

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI YÜZEY DESENLERİ VE HİDROTERMAL YAŞLANDIRMANIN PLA'NIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Aibek YESMAGANBET

Danışman: Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

Dr. Öğr. Üyesi Ayşenur KELEŞ DAYAUÇ

Dr. Öğr. Üyesi Mevra ASLAN ÇAKIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2026

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Farklı yüzey desenleri ve hidrotermal yaşlandırmanın PLA'nın mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 03/02/2026

(İmza)

**Aibek
YESMAGANBET**

ÖZET

FARKLI YÜZEY DESENLERİ VE HİDROTERMAL YAŞLANDIRMANIN PLA'NIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Aibek YESMAGANBET

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

2026, 52 sayfa

Bu çalışmada, eriyik biriktirme modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak yeni nesil bir polilaktik asit (PLA) filamentten farklı yüzey desenleri ile basılan numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin yarısına hidrotermal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Hidrotermal yaşlandırma uygulanmış ve uygulanmamış PLA numunelerin moleküler yapısal değişimleri Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile mekanik davranışları ise standartlara uygun mekanik testler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı yüzey desenlerinin PLA'dan üretilen numunelerin mekanik dayanımında kayda değer farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca hidrotermal yaşlandırma işleminin PLA'nın bağ yapısı üzerinde etkili olduğu, buna bağlı olarak mekanik dayanım ve rijitlik değerlerinde değişimler meydana geldiği görülmüştür. Bu bulgular, yüzey tasarımı ve hidrotermal yaşlandırma stratejilerinin FDM yöntemi ile üretilen PLA numunelerin mekanik performansının optimize edilmesinde önemli bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: FDM, PLA, FTIR, hidrotermal yaşlandırma, mekanik özellikler

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT SURFACE PATTERNS AND HYDROTHERMAL AGING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA

Aibek YESMAGANBET

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

2026, 52 pages

In this study, specimens with different surface patterns were fabricated from a next-generation polylactic acid (PLA) filament using the fused deposition modeling (FDM) technique. Half of the fabricated specimens were subjected to hydrothermal aging treatment. The molecular structural changes of hydrothermally aged and non-aged PLA samples were analyzed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), while their mechanical behavior was evaluated through standardized mechanical tests. The obtained results revealed that different surface patterns led to significant variations in the mechanical strength of PLA specimens. Furthermore, hydrothermal aging was found to influence the bonding structure of PLA, resulting in changes in mechanical strength and stiffness values. These findings demonstrate that surface design and hydrothermal aging strategies constitute important tools for optimizing the mechanical performance of PLA specimens manufactured via the FDM process.

Keywords: FDM, PLA, FTIR, hydrothermal aging, mechanical properties

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve bu tezin hazırlanma sürecinde bana yol gösteren, akademik bilgi birikimi, tecrübesi ve desteğiyle her zaman ilham kaynağım olan değerli danışmanım Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT'e en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin akademik rehberliği, yapıcı eleştirileri ve sabırlı yaklaşımı, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük bir rol oynamıştır. Tez sürecinde karşılaştığım her zorlukta bana gösterdiği anlayış ve yönlendirmeleri sayesinde, hem akademik hem de kişisel olarak gelişme fırsatı buldum. Bilgi birikimi, nazik desteği ve teşvik edici yaklaşımıyla bana her zaman yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Ayşenur KELEŞ DAYAUÇ'a içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin kıymetli yorumları ve yapıcı eleştirileri, bu çalışmanın bilimsel derinliğine önemli katkılar sağlamıştır.

Bu süreçte deneyim ve bilgi paylaşımlarıyla tez çalışmamın farklı aşamalarında desteğini hissettiren Doç. Dr. Filiz BORAN'a da samimi teşekkürlerimi iletmek isterim. Değerli fikirleriyle çalışmama yeni bakış açıları kazandırmış ve akademik yolculuğuma anlamlı katkılar yapmıştır.

Ayrıca, bu süreçte yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, anlayışı ve sabırlıyla bana güç veren Tugay Sonsuz SERT'e içtenlikle teşekkür ederim. Varlığı ve desteği, yoğun emek gerektiren bu dönemde benim için en büyük motivasyon kaynaklarından biri olmuştur.

Ayrıca bu tez kapsamında malzeme desteği veren REVO FILAMENT şirketine teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sevgi, sabır ve sonsuz destekleriyle beni bugünlere getiren aileme ve dostlarıma en derin minnettarlığımı sunarım. Onların varlığı ve inancı olmasaydı bu noktaya gelebilmem mümkün olmazdı. Tüm bu yolculuk boyunca, bilgiye olan inancımı ve bilimin gücünü her zaman hissettiren, bana düşünmeyi, sorgulamayı ve üretmeyi öğreten tüm hocalarıma da teşekkürlerimi arz ederim.

Aybek Yesmaganbet

Ocak, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLOLAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1.GİRİŞ	9
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	14
2.1. Eklemeli İmalat (Katmanlı üretim)	14
2.1.1. FDM	15
2.2. Hidrotermal Yaşlandırma	16
2.3. Polimerler	17
2.3.1. Biyopolimerler	20
2.3.1.1. PLA	22
2.3.1.1.1. 3D ve FDM 3D baskı ile farklı dolgu desenlerinde üretilen PLA numunelerin mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar	25
2.3.1.1.2. PLA'nın Hidrotermal Yaşlandırması	32
3. YÖNTEM	35
4. BULGULAR	37
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	45
KAYNAKÇA	47
EKLER	52
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	52

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Hidrotermal yaşlandırma sırasında numunelerin kütle değişimleri.....	39
Tablo 2. Desensiz ve farklı dolgu desnelere sahip PLA numunelerin aksel basma altındaki dayanıklılık ve enerji sönümlenme performanslarını nicel olarak karşılaştırılması	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 3D baskı sürecinin iş akışı.....	14
Şekil 2. Eriyik biriktirme modelleme sürecinin şematik gösterimi.....	15
Şekil 3. İki kaynağa göre Biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin sınıflandırılması.....	21
Şekil 4. Polilaktik asit geri dönüşümünün şematik diyagramı	22
Şekil 5. Laktik asidin iki yapısı.....	23
Şekil 6. LA üretimi için metodoloji.....	23
Şekil 7. Polilaktik asit üretimi için polimerizasyon yolu	24
Şekil 8. Farklı dolgu desenleri ile üretilen numunelerin görünüşleri	35
Şekil 9. Üniversal mekanik test cihazı	36
Şekil 10. FDM yöntemi kullanılarak PLA filamentten üretilen desensiz ve 3 farklı dolgu desenine sahip numuneler.....	37
Şekil 11. PLA ve 45 gün hidrotermal yaşlandırılmış PLA numunelerinin FTIR spektrumları	38
Şekil 12. Desensiz ve farklı dolgu desenine sahip PLA numunelerin şişme testi sonuçları	39
Şekil 13. Hidrotermal yaşlandırma işlemi sonrasında desensiz ve farklı dolgu desenine sahip PLA numunelerin şişme testi sonuçları	40
Şekil 14. Farklı dolgu desenlerine sahip PLA numunelerin basma testleri ile elde edilen kuvvet - uzama eğrileri	41
Şekil 15. Hidrotermal yaşlandırma uygulanmış farklı dolgu desenlerine sahip PLA numunelerin basma testleri ile elde edilen kuvvet - uzama eğrileri	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
°C	Santigrat derece
3D	Üç boyutlu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
CO₂	Karbondioksit
DMA	Dinamik Termo-Mekanik Analiz
EA	Enerji emme
FDM	Eriyik Biriktirme Modelleme
FFF	Eritilmiş filamentle eklemeli imalat
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
g/cm³	Gram/santimetreküp
GRA	Gri İlişkisel Analiz
GRG	Gri İlişkisel Derece
HIPS	Yüksek Darbe Dayanımlı Polistiren
ISO/ASTM	Uluslararası Standartlar Örgütü / Amerikan Test ve Malzeme Standartları Derneği
IWP	I-sargılı Primitif Yapı
kJ·mm⁻²	Yüksek enerji emilim değeri
kN	Kilonewton
LA	Laktik asit
LOM	Lamine nesne imalatı
MCF	Ortalama ezilme kuvveti
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
PC	Polikarbonat
PCF	Pik ezilme kuvveti

PBT	Poli bütülen tereftalat
PBSA	Poli bütülen süksinat-ko-adipat
PCL	Polikaprolakton
PE	Polietilen
PET	Poli (etilen tereftalat)
PGA	Poli glikolik asit
PHA	Poli (hidroksialkanoatlar)
PHB	Poli (hidroksibutirat)
PLA	Poli (laktik asit)
PP	Polipropilen
SEA	Özgül enerji emme
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SLA	Stereolitografi
SLS	Seçici lazer sinterleme
SMP	Şekil hafızalı polimerler
Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
TGA	Termogravimetrik analiz
TPS	Termoplastik nişastalar
Wi	Başlangıçtaki kuru ağırlık
Wt	t zaman aralığında şişmiş ağırlık

1. GİRİŞ

Otomobillerin üretimi ve kullanımı gibi tüm yaşam döngüsü boyunca birçok atık ürün ortaya çıkmaktadır. Otomotiv endüstrisinin, otomobil parçalarının imhası sırasında yılda yaklaşık 9 milyon ton atık ürettiği bildirilmektedir. Motorlu taşıt üretiminin artış eğilimi göz önüne alındığında, bu rakamın çok daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, çevreyi korumak için geri dönüşüm hayati önem taşımaktadır. Öte yandan, otomobillerin kullanımı sırasında çok büyük miktarda karbondioksit emisyonu meydana gelmektedir. Eğer aracın ağırlığı 100 kg azaltılırsa, yakıt tüketimi kilometre başına yaklaşık 0,35 litreye düşecek bunun sonucunda da azalan yakıt tüketimi ile birlikte karbondioksit emisyonu da o kadar düşük olacaktır. Araç ağırlığını azaltmanın en etkili yollarından biri, otomotiv parçalarında polimer kullanmaktır. Bu nedenle otomotiv endüstrisinde polimerler önemli roller oynamaktadır. İşlevsellikleri, korozyona karşı dirençleri, daha uzun ömürleri, parçaları entegre etme esnekliği, güvenli, ekonomik ve düşük ağırlıkları sayesinde yakıt tüketimini azaltmaları, otomotiv endüstrisinde polimerik parçaların kullanılmasının başlıca nedenleridir. Polimerler tamponlarda, koltuklarda, yakıt sisteminde, gösterge panelinde, gövdede, iç/dış kaplamalarda, panellerde, kaput altı bileşenlerinde, elektrikli bileşenlerde, aydınlatmada, döşemelerde, sıvı haznelere, araba lastiklerinde vb. kullanılmaktadır. Araçlarda kullanılan polimerik malzemelerin ortalama ağırlığı 1970 yılında 50 kg/araba iken 2019 yılında 157 kg/araba'ya yükselmiştir ve bu artış eğilimi halen devam etmektedir.

Biyopolimerler, canlı organizmalardan geliştirilen polimerlerdir. “Biyopolimer” adı, biyolojik olarak parçalanabilir bir polimer anlamına gelmektedir. Biyopolimerler milyarlarca yıldır yeryüzünde mevcuttur ve plastik gibi sentetik polimerlerden daha eskidir. Bu polimerler doğada önemli bir rol oynar. Enerji depolama, genetik bilginin korunması ve aktarımı ve hücre yapısı gibi işlevleri yerine getirmede son derece yararlıdır (Upadhye vd., 2022). Otomobil üretiminde biyolojik olarak parçalanabilir malzemeler kullanılarak, hurdaya ayrılan araç parçalarının geri dönüşümü daha kolay hale gelir (Ranjbar vd., 2022). Ayrıca petrol bazlı polimerlerin kıtlığı, biyolojik olarak parçalanamama özelliği ve sıkı çevre düzenlemeleri, araştırmacıları petrol bazlı polimerlere alternatif olarak yeşil biyopolimerler/biyokompozitler aramaya yöneltmektedir. Biyopolimerler, direksiyon, kapılar, tekerlekler, elektrikli bileşenler, motor parçaları, egzoz sistemleri vb. olmak üzere bir otomobilin çeşitli dış ve iç parçalarında potansiyel uygulamalara sahiptir (Rahman vd., 2023). Ayrıca yüksek performanslı biyopolimer türevli maddeler, koltuk

arkalıkları, kapı panelleri, gösterge panelleri, bagaj astarları, tavan döşemeleri ve diğer iç bileşenler gibi otomotiv parçalarına dâhil edilmiştir (Zhao ve Zhou, 2014; Sampath vd., 2016).

Otomotiv endüstrisinde özellikle yaygın olarak kullanılması önerilen biyopolimerlerle ilgili olarak başlıca olası yollar şunlardır:

- (i) nişasta gibi kısmen biyo-bazlı polimerlerin biyoplastik haline getirilmesi,
- (ii) laktik asit gibi biyo-bazlı bir monomerin elde edilmesi ve farklı moleküler ağırlıklarda yeniden polimerize edilmesi,
- (iii) bakteriler gibi mikroorganizmalar aracılığıyla biyopolimerlerin doğrudan üretilmesi.

Elde edilen ilgili ürün kategorileri ise şunlardır:

- (i) termoplastik nişastalar (TPS),
- (ii) poli (laktik asit) (PLA) gibi biyo-bazlı termoplastik polyesterler,
- (iii) topluca poli (hidroksialkanoatlar) (PHA'lar) olarak adlandırılan bakteriyel biyoplastikler; bunların arasında en yaygın polimer poli (hidroksibutirat) (PHB) 'dir (Giammaria vd., 2024).

PLA, şeker kamışı ve mısır nişastasası gibi yenilenebilir kaynaklarda doğal olarak bulunan organik asitler olan laktik asit yapı taşlarından oluşan doğrusal bir alifatik polyesterdir (Peres vd., 2017). Polilaktik asit (PLA) biyo-bazlı, biyobozunur, biyouyumlu (canlı dokularla uyumlu) ve çevre dostu bir termoplastik polimer olup yaygın olarak bulunabilmekte ve kullanıldıktan sonra çevreye zarar vermeden kolayca ayrıştırılabilmektedir (Shekhar ve Mondal, 2024). PLA, biyolojik olarak parçalanabilirliği ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan biyopolimerdir (Rahman vd., 2023). Çevre dostu kökeni ve mükemmel performansı ile yaygın ilgi gören bir termoplastik polyester olan PLA ciddi beyaz kirlilik ve petrol kaynaklarının kıtlığı gibi güncel sorunları çözme potansiyeline sahiptir (Li vd., 2023). PLA, daha kontrol edilebilir özellikleri ve nispeten ucuz fiyatı nedeniyle, otomotiv endüstrisi gibi alanlarda polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi petrol bazlı termoplastiklerin yerine geçmek (veya bunlarla karıştırılmak) için en uygun aday olarak görülmektedir (Pradeep vd., 2024). Bu özelliklerinin yanısıra mükemmel işlenebilirliğe ve düşük maliyete (Hussain vd., 2024) sahip PLA'nın kullanımını sınırlayan dezavantajları da vardır. Bunlar düşük camsı geçiş sıcaklığı, düşük termal stabilite, yüksek kırılma kırılma, düşük kristalleşme oranı (Giammaria vd., 2024), zayıf gaz bariyer performansı, zayıf su geçirgenliği, düşük tokluk ve düşük gerilme uzamasıdır (Notta-Cuvier vd., 2014). PLA otomotiv sektörünün çevre düzenlemelerini karşılayabilse de bu dezavantajlar otomotiv uygulamalarında PLA'nın kullanımını

sınırlamaktadır. Bu nedenle, PLA'nın uzun vadeli uygulamalarda büyük ölçekte kullanılması için bu özelliklerin iyileştirilmesi gerekmektedir (Notta-Cuvier vd., 2014)

Eklemeli imalat (katmanlı üretim), yaygın olarak üç boyutlu baskı (3D baskı) olarak bilinen bir teknoloji olup, 1980'li yıllardaki ortaya çıkışından bu yana önemli bir evrim geçirmiştir. Başlangıçta hızlı prototipleme amacıyla geliştirilen eklemeli imalat teknolojileri, zaman içerisinde gelişerek polimerler, metaller, seramikler ve kompozitler dâhil olmak üzere geniş bir malzeme grubunu işleyip üreten kapsamlı ve çok yönlü bir üretim yaklaşımına dönüşmüştür. Eklemeli imalatın gelişimi; malzeme, teknoloji ve yazılım alanlarındaki yeniliklerle şekillenmiş ve havacılık, otomotiv, sağlık ve moda gibi sektörlerle yayılmasını sağlamıştır. Günümüzde 3D baskı; benzersiz özelleştirme kabiliyeti, azaltılmış malzeme israfı ve geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor ya da imkânsız olan karmaşık geometrilerin üretilebilmesi gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. 3D baskı, maliyet, süre ve iş gücü açısından sağladığı avantajlar sayesinde malzeme üretiminde giderek daha yaygın bir yöntem hâline gelmiştir. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılan tekniklerden biri, malzeme ekstrüzyonu olarak adlandırılan ve Eriyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) olarak da bilinen teknolojidir (Zhou vd., 2024).

FDM eritilmiş filamentle eklemeli imalat (FFF) olarak da bilinir (Hasan vd., 2024)), termoplastik bir filamentin eritilmesini ve katman katman biriktirilerek 3D nesnelere oluşturulmasını içeren bir eklemeli imalat tekniğidir. Bir CAD yazılımı tarafından üretilen 3D nesne tasarımının bir kesitiyle başlar. İşlem, daha sonra katman katman yüzeye biriktirilen bir termoplastik filamentin çıkarmak ve eritmek için ısıtılmış bir nozulun kullanılmasını içerir. Nozul, filamentin önceden belirlenmiş bir deseni izleyerek hareket ettirir ve erimiş plastik filamentin katmanlar halinde bir yüzeye ekler (Huang vd., 2012; Top vd., 2021). FDM, özellikle prototipleme için kullanılan bir yöntemdir. Klasik yöntemlerle üretilemeyen karmaşık yapıların üretilmesinde avantajlıdır (Camargo vd., 2019; Top vd., 2021). Bu yöntem, malzeme israfını azaltır ve üretim sürecindeki maliyetleri düşürür. Ayrıca, nesnenin boyutlarına ve karmaşıklığına bağlı olarak farklı termoplastik filamentler kullanılabilir ve bu da nesnenin özelliklerinin özelleştirilmesine olanak tanır (Edgar ve Tint, 2015). FDM yöntemi, 3D yazıcıların yaygın olarak kullanıldığı ev, ofis ve laboratuvar ortamlarında da kullanılır. Ayrıca havacılık, otomotiv, biyomedikal, diş hekimliği, mühendislik parçaları, tıbbi cihazlar, oyuncaklar ve öğrenme materyalleri gibi farklı endüstrilerde, özellikle üretim prototiplerinde de kullanılabilir.

PLA, biyolojik olarak parçalanabilirliği ve çevre dostu özellikleri nedeniyle FDM tabanlı 3D baskı sürecinde kullanılan önde gelen bir hammadde olarak ortaya çıkmıştır (Olawumi vd., 2023). Bununla birlikte PLA'nın 3D baskı malzemesi olarak kullanımı, darbe direncinin zayıf olması ve boyutsal kararlılığının düşük olması gibi çeşitli özellikler nedeniyle sınırlıdır (Wang vd., 2024). Ayrıca 3D baskı süreçlerinde PLA parçalar, FDM ile basılmış yapıların katmanlı doğası nedeniyle katmanlar arası zayıf bağlanma ve farklı yükleme yönlerinde mukavemet değişimlerine yol açan anizotropik mekanik davranış gibi zorluklarla karşılaşmaktadır (Wang vd., 2024; Kahya vd., 2025). Baskı parametrelerinin ve son işlem tekniklerinin optimize edilmesi, FDM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için çok önemlidir. Katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, dolgu yoğunluğu ve desen açısı gibi parametrelerin ayarlanması, basılan parçaların dayanıklılığını ve performansını artırmada önemli bir rol oynar. Ek olarak, FDM işlem parametreleri sadece mekanik performansı etkilemekle kalmaz, aynı zamanda üretim süresini, ağırlığı ve yapışma kalitesini de etkiler. Örneğin, daha yüksek baskı hızları üretim süresini kısaltır, ancak katmanlar arası yapışma ve yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir. Benzer şekilde, dolgu yoğunluğunun artırılması mekanik mukavemeti artırır, ancak baskı sürelerinin uzamasına ve malzeme kullanımının artmasına neden olurken, nozul sıcaklığının ayarlanması malzeme akışını ve yapışmayı kontrol ederek katmanlar arasındaki yapışmayı optimize eder (Kahya vd., 2025). Ayrıca FDM işlemiyle farklı dolgu desenlerinde (Bal peteği, üçgen, hegzagonal vb.) üretilen parçaların çekme gerilmesi, basma gerilmesi, elastisite modülü, akma mukavemeti mekanik özelliklerini etkilediği rapor edilmiştir (Galeta vd., 2016; Akhoundi ve Behraves, 2019; Saniman vd., 2020; Moradi vd., 2021; Ganeshkumar vd., 2022; Yılan vd., 2025; Aboeella vd., 2025).

Polimerik malzemelerin yaşam döngüsünün her aşamasında maruz kaldıkları bozunma süreçleri, hem atık geri kazanım olanakları hem de geri dönüştürülmüş plastiklerin performansı tartışılırken dikkate alınması gereken temel bir faktördür (Vilaplana ve Karlsson, 2008). Genel olarak, düşük termal kararlılığa ve zayıf tokluğa sahip PLA hidrofobiktir ve yavaş bozunma hızına sahiptir. Bununla birlikte, PLA'nın moleküler yapısı, su moleküllerinin difüzyonunun ester bağlarını kopardığı hidrolitik koşullar altında bozulabilir ve bu da malzemenin moleküler ağırlığında ve mekanik performansında bir azalmaya yol açabilir. Hoş olmayan çevresel etkilere maruz kalma, polimerin çekme dayanımı, süneklik ve modül gibi mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açabilir. Sık karşılaşılan hoş olmayan faktörler arasında nem, UV radyasyonu, ısı, kimyasallar veya uygulanan herhangi bir kuvvet bulunur. Nem ve ısı, polimer

ürünlerinin üretim sürecinde karşılaşılan yaygın faktörlerdir ve daha sonra polimer ürününün ömrü boyunca çevresel koşullara maruz kalması söz konusudur. Polimer malzemede suyun varlığı, polimer malzemenin yaşlanmasını etkiler ve ayrıca mekanik performansında önemli değişikliklere neden olur. Polimere nem girişi, su molekülünün polimer malzeme boyunca difüzyonu yoluyla gerçekleşir. Su molekülleri, rastgele moleküler hareket nedeniyle polimere girer ve emilim ve difüzyon derecesi nem içeriğine ve sıcaklığa bağlıdır. Polimerin polaritesi, çapraz bağlanma derecesi ve hidrofilik türlerin varlığı nem difüzyonunu etkiler. Nem difüzyonu, ıslak bir ortama maruz kaldıktan sonra malzemenin kütlesindeki artışla gösterilir (Nugraha vd., 2023).

PLA'nın yaşlanma davranışı üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, farklı boyutlara sahip çekme numuneleri gibi malzeme örneklerine odaklanmış olup (Singh vd., 2020; Moreno Nieto vd., 2021), FDM ile üretilmiş kafes (lattice) yapıların yaşlanma davranışı büyük ölçüde yeterince araştırılmamıştır (Ekinci vd., 2021).

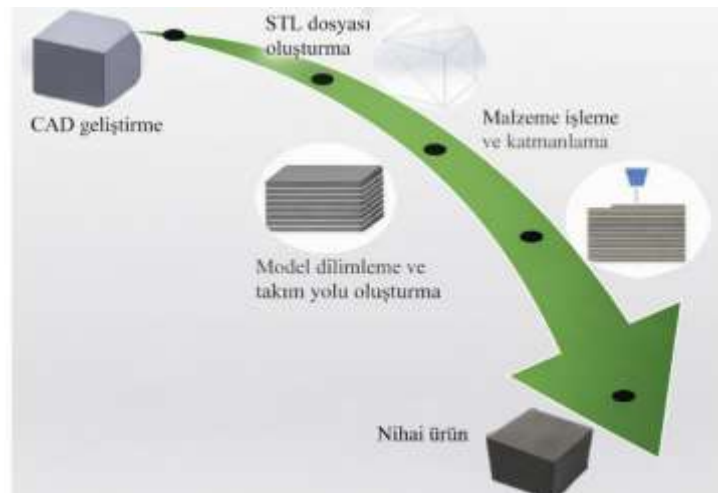
Bu bilgiler ışığında literatürde FDM yöntemi kullanılarak üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerinin mekanik performansı üzerinde farklı dolgu desenlerinin ve hidrotermal yaşlandırma işleminin birlikte sistematik olarak incelendiği çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu tez çalışması, FDM yöntemi ile farklı dolgu desenlerine sahip PLA numunelerinin üretimini, ardından hidrotermal yaşlandırma işlemini ve bu süreçlerin moleküler yapısal etkiler ile mekanik performans değişimlerini inceleyerek PLA'nın otomotiv parçaları gibi fonksiyonel uygulamalarda potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

2.1. Eklemeli İmalat (Katmanlı üretim)

Eklemeli imalat (katmanlı üretim), geleneksel üretim yöntemleriyle zor olan karmaşık tasarımların ve özel parçaların hızlı bir şekilde üretilmesini sağlayan bir yöntemdir (Yin vd., 2019). Genellikle 3D baskı olarak adlandırılan eklemeli imalat teknolojisi, Uluslararası Standartlar Örgütü/Amerikan Test ve Malzeme Standartları Derneği (ISO/ASTM 52900:2015) tarafından “3D model verilerinden parçalar yapmak için malzemeleri genellikle katman katman birleştirme işlemi,” olarak tanımlanmaktadır (ISO/ASTM, 2015).

Bu süreç (Şekil 1), bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyası ile başlar ve ardından parçanın dilimlenerek eklemeli imalat dosyasının oluşturulduğu ve işlem parametrelerinin seçildiği harici bir yazılıma aktarılır. Böylece CAD dosyalarına dayalı nesnelerin hızlı bir şekilde oluşturulmasıyla, doğal tasarım ve üretim yetenekleri sağlar (Caputo vd., 2022). Geleneksel kesici üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, 3D baskı atık, enerji talebi ve karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli göstermiştir. Ayrıca, 3D baskı, daha az dolgu ile içi boş yapılar basarak daha az malzeme kullanarak hafif malzemeler üretme yeteneğine sahiptir. Bu teknoloji, uçak, otomotiv, gıda, tıp ve robotik endüstrileri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için giderek daha değerli hale gelmektedir. Spesifik eklemeli imalat teknikleri arasında ergiyik biriktirme modelleme (FDM), seçici lazer sinterleme (SLS), stereolitografi (SLA) ve lamine nesne imalatı (LOM) bulunmaktadır (Hasan vd., 2024).

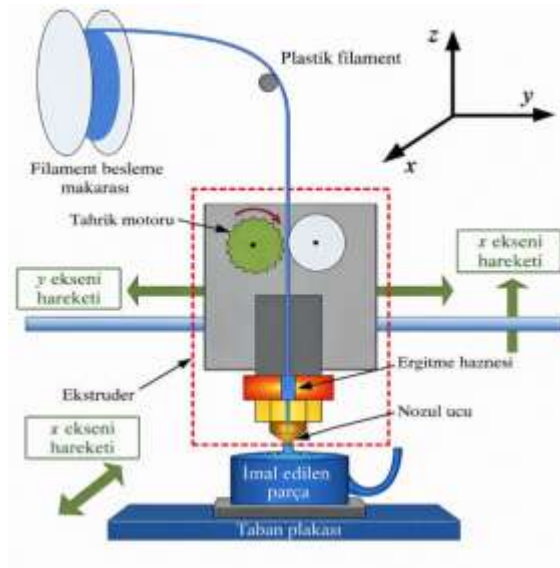


Şekil 1. 3D baskı sürecinin iş akışı (Kafle vd., 2021).

2.1.1. FDM

Eriyik biriktirme modelleme (FDM), eritilmiş filamentle eklemeli imalat (FFF) olarak da bilinen, üç boyutlu parçalar veya ürünler oluşturmak için malzeme biriktirme ekstrüzyon prensibini kullanan bir tür eklemeli imalat yöntemidir. FDM işlemi, parçayı oluşturan malzeme katmanlarını yazdırmak için bir makaradan sürekli olarak termoplastik filament beslemesi kullanır.

Şekil 2’de gösterildiği gibi, termoplastik filament, sıvılaştırma kafasındaki bir ısıtma elemanı tarafından ısıtılır ve yarı sıvı hale gelir. Ardından, bir ekstrüzyon nozulu aracılığıyla bir baskı yatağı veya platformuna ekstrüde edilir. FDM'nin temel çalışma prensibi, yarı sıvı termoplastik filamentlerin bir baskı platformundaki nozülden ekstrüde edilmesini içerir. Ekstrüde edilen malzeme hemen katılaşmaz, bunun yerine oda sıcaklığında kürlenmeden/katılaşmadan önce birbirine kaynaşarak katmanlı bir yığın parça oluşturur. FDM süreci, ilgili dilimleme yazılımının kullanılmasıyla başlar. Genellikle, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı 3D parçalar oluşturmak için kullanılır. 3D model daha sonra eklemeli imalat makineleri tarafından okunabilir ve geometrik bilgi sağlayan stereolitografi dosyası (STL) formatına dönüştürülür. Dilimleme yazılımı, dolgu, katman kalınlığı, katman yüksekliği, baskı hızı, nozul çapı vb. gibi parçaların baskı parametrelerini tanımlamak için kullanılır. Dosya dilimlendikten sonra, 3D yazıcı tarafından okunan bir G kodu dosyasına dönüştürülür. Yazıcı, baskı sürecini başlatmak için dijital olarak sağlanan koordinatları (G dosyaları) kullanır. Nesnenin imalat prosedürü, çalışma prensibine uygun olarak gerçekleştirilir ve katman katman baskı işlemi, tam 3D baskılı model üretilene kadar devam eder (Hasan vd., 2024).



Şekil 2. Eriyik biriktirme modelleme sürecinin şematik gösterimi (Solomon vd., 2021).

FDM teknolojisi (veya 3D baskı teknolojisi) nispeten düşük bir piyasa fiyatına sahiptir, malzeme tüketimi düşüktür ve kullanımı kolaydır. FDM, zahmetsiz model gerçekleştirme, düşük bakım maliyetleri ve çok çeşitli malzemelerden çok karmaşık modellerin uygun maliyetli üretimini sağlar (Vorkapić vd., 2022). FDM yöntemi ile parça üretiminde Polilaktik Asit (PLA), Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS), Polikarbonat (PC), Yüksek Darbe Dayanımlı Polistiren (HIPS), Şekil Hafızalı Polimerler (SMP) vb. çok sayıda malzeme kullanılabilir (Caputo vd., 2022). Bu yöntemle üretilen parçalar, biyotıp ve inşaat sektöründen otomotiv, havacılık, akustik, tekstil ve mesleki terapiye kadar çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir (Hasan vd., 2024).

2.2. Hidrotermal Yaşlandırma

Bazı belirli uygulama alanlarında, ısı, nem, ultraviyole ve çeşitli yükler veya bunların kombinasyonları gibi çevresel faktörler, malzeme özelliklerini bozabilir. Hava koşullarına maruz kalma ve çevresel unsurlar, malzemelerin dayanıklılığını ciddi şekilde etkileme eğilimindedir. Ve malzemelerin çevresel dayanıklılığı, uygulamaları için sınırlayıcı faktörlerden biridir (Wang vd., 2016).

Bir malzemenin veya yapının özelliklerinin zamana bağlı olarak değişmesi süreci genel olarak “yaşlanma (ageing)” olarak adlandırılır. Etkin olan bozunma mekanizmasının türüne bağlı olarak yaşlanma iki ana kategoriye ayrılır: “fiziksel” ve “kimyasal” yaşlanma. Yaşlanma sürecindeki bozunmanın hızı ve derecesi; malzeme türü, çevresel ve mekanik yükleme koşulları ile bu koşullara maruz kalma süresinin beklenen dayanıklılık sınırına göre konumuna bağlı olarak belirlenir.

Fiziksel yaşlanma, malzeme veya bileşenlerin, yapılarında kimyasal değişime yol açmayan ve etkileri geri döndürülebilir olan çevresel koşullara maruz kalmasını ifade eder. Polimer malzemelerde fiziksel yaşlanma, serbest hacmin evrimi ve denge durumuna göre özelliklerde meydana gelen değişimlerle ilişkilidir. Kimyasal ve fiziksel yaşlanma arasındaki temel fark, etkinin geri döndürülebilir olup olmaması, yani malzemenin nemli bir ortama maruz kaldıktan sonra özelliklerini yeniden kazanabilme yeteneği ile tanımlanır. Kimyasal yaşlanmanın en önemli üç mekanizması termo-oksidasyon, sıcaklık kaynaklı hidrolitik bozunma ve nem kaynaklı hidrolitik bozunmadır. Nem kaynaklı kimyasal yaşlanma, esas olarak hidroliz, zincir kopması (chain scission) veya tam kürlenmemiş polimerlerde çapraz bağ oluşumu gibi

mekanizmalar yoluyla polimer zinciri/ağ yapısında meydana gelen geri döndürülemez bozunma ve değişimlerle ilişkilidir. Kimyasal yaşlanma, nem ve sıcaklık veya nem ve mekanik yükler gibi bozunma etkenlerinin eş zamanlı etki ettiği durumlarda daha olasıdır. Bir polimerik malzemede mekanik yüklerin ve kalıntı gerilmelerin varlığı, bağ kopma olasılığını artırarak zincir kopmasını teşvik edebilir. Kimyasal yaşlanma, polimerik malzemelerin özelliklerini ve dolayısıyla difüzyon kinetiklerini değiştirebilir. Kimyasal yaşlanma, esas olarak nem ve sıcaklık gibi bozunma etkenlerinin birlikte etkisiyle gerçekleşir ve bu durum hidrotermal yaşlanma olarak adlandırılır (Thomason ve Xypolias, 2023).

Hidrotermal yaşlanma sırasında dayanıklılığı belirleyen farklı olası mekanizmalar şunlardır: artık kürlenmeye bağlı ilave çapraz bağ oluşumu, polimer zincirleri ile su molekülleri arasında ikincil çapraz bağ oluşumu, şişme, mikro-çatlak oluşumu, düşük molekül ağırlıklı segmentlerin çözünerek uzaklaşması (bozunma), plastikleşme, polimer gevşemesi vb.

Hidrotermal süreçte su alma davranışı sıcaklık ve nem ile değişmektedir. Bu iki parametre hem difüzyon katsayısını hem de denge nem alma miktarını etkilemektedir. Camı geçiş sıcaklığı (T_g), malzeme bozunmasını ortaya koyan en yararlı parametrelerden biri olarak kabul edilebilir. T_g'deki bir azalma genellikle plastikleşme ve bozunmaya bağlanırken, T_g'deki artış hidrotermal süreç sırasında meydana gelen sonradan kürlenme (post-cure) olgusuna atfedilmektedir. Ayrıca, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA) ve dinamik termo-mekanik analiz (DMA), yaşlanma süreci boyunca reçine moleküllerinin bileşim ve yapı değişimlerini incelemek için kullanılabilir. Mekanik deneyler, dayanım ve elastik modüldeki değişimleri incelemek amacıyla uygulanabilir. Buna ek olarak, taramalı elektron mikroskopu (SEM) mikro-morfolojinin incelenmesine yardımcı olur (Wang vd., 2016).

2.3. Polimerler

Polimer kelimesi, klasik Yunanca'da "çok" anlamına gelen poly ve "parça" anlamına gelen meres kelimelerinden türemiştir. Basitçe ifade etmek gerekirse, polimer, aynı yapıya sahip çok sayıda tekrarlanan birimden oluşan uzun zincirli bir moleküldür. Proteinler, selüloz ve ipek gibi bazı polimerler doğada bulunurken, polistiren, polietilen ve naylon gibi diğerleri sadece sentetik yollarla üretilir. Bazı durumlarda, doğal olarak oluşan polimerler de sentetik olarak üretilebilir (örneğin sentetik formunda poliizopren olarak bilinen doğal kauçuk (Hevea)). Ortam

koşullarında yüksek düzeyde uzama yeteneği gösteren polimerler, elastomer sınıfında değerlendirilmekte olup, bu özellikleri nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptir. Doğal kauçuğun yanı sıra, nitril ve butil kauçuk gibi birkaç önemli sentetik elastomer de bulunmaktadır. Bazı polimerler ise tekstil uygulamaları için uygun uzun lifler halinde üretilebilmesini sağlayan özelliklere sahip olabilir. Sentetik lifler, özellikle naylon ve polyester, pamuk, yün ve ipek gibi doğal liflerin iyi birer ikamesi olarak kullanılabilir. Polimer kelimesinin kullanımının aksine, elastomerler ve lifler dışında sentetik polimerlerden elde edilen ticari malzemeler plastik olarak adlandırılır. Tipik bir ticari plastik; reçine, çeşitli katkı maddeleri ve dolgu maddelerinin yanı sıra iki veya daha fazla polimer içerebilir. Bunlar, işlenebilirlik, termal veya çevresel stabilite veya mekanik özellikler gibi belirli bir özelliği iyileştirmek için eklenir.

Polimer biliminin doğuşu, on dokuzuncu yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. 1830'larda Charles Goodyear, doğal kauçuğun yapışkan lateksini lastik kullanımına uygun bir elastomer haline getiren vulkanizasyon sürecini geliştirmiştir. 1847'de Christian F. Schönbein, selülozu nitrik asit ile reaksiyona sokarak selüloz nitrat üretmiştir. Bu, 1860'larda ilk yapay termoplastik olan selüloit olarak kullanılmıştır. 1907'de Leo Hendrik Baekeland Bakalit (fenol-formaldehit reçinesi) üretmiştir. Glyptal (doymamış polyester reçine), 1912'de General Electric tarafından koruyucu kaplama reçinesi olarak geliştirilmiştir. 1930'lara gelindiğinde, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki DuPont araştırmacıları, sentetik kauçuk, naylon ve Teflon gibi daha "egzotik" malzemeler dahil olmak üzere çeşitli yeni polimerler üretmişlerdir. 1938'de Dow, ilk kez ticari ölçekte polistiren üretmiş ve 1939'da İngiltere'deki ICI bilim adamları tarafından polietilen (düşük yoğunluklu) üretilmiştir. İkinci Dünya Savaşı sırasında, Hevea kauçuğu gibi birçok doğal malzemenin tedarikinde sıkıntı yaşanması nedeniyle, yeni polimerik malzemeler, özellikle sentetik kauçuk geliştirme çabaları yoğunlaştırılmıştır. 1950'lerde Karl Ziegler ve Giulio Natta, bağımsız olarak, polipropilenin önemli bir plastik hammadde olarak ticarileştirilmesini mümkün kılan bir dizi stereospesifik geçiş metali katalizörü geliştirmiştir. 1960'lar ve 1970'ler, otomotiv ve havacılık uygulamaları için metaller gibi daha geleneksel malzemelerle rekabet edebilecek bir dizi yüksek performanslı mühendislik plastiği polimerinin geliştirilmesine tanık olmuştur. Bunlar arasında polikarbonat, poli(fenilen oksit), polisülfonlar, poliimidler, kevlar gibi aromatik poliamidler ve diğer yüksek sıcaklık sert zincirli polimerler yer almıştır. Daha yakın zamanda, elektrik iletken, fotokondüktif ve sıvı kristal özelliklere sahip özel polimerler çeşitli uygulamalar için ortaya çıkmıştır.

Polimerler, işleme özelliklerine veya polimerizasyon mekanizmalarına göre sınıflandırılabilir. Ancak en temel ayırım, polimerlerin termal davranışlarına dayanır: termoplastikler ve termosetler. Termoplastikler ısıtıldığında yumuşar, şekil verilebilir ve tekrar ısıtıldığında geri dönüştürülebilir. Polistiren, polietilen, polipropilen ve PVC bu gruba örnek olarak verilebilir. Buna karşılık, termosetler üretim sırasında kimyasal olarak çapraz bağlanır ve üç boyutlu bir ağ oluşturur. Bu yapı sayesinde ısıya, deformasyona ve çözücülere dirençlidirler; ancak yeniden şekillendirilemez veya yeniden işlenemezler. Epoksi, fenol–formaldehit reçineleri ve doymamış polyesterler yaygın termoset örnekleridir. Polimerler aynı zamanda polimerizasyon mekanizmalarına göre de sınıflandırılır. Wallace Carothers tarafından önerilen erken sınıflandırmaya göre polimerler ilave (addisyon) ve yoğunlaşma (kondensasyon) polimerleri olarak ikiye ayrılır. İlave polimerlerde monomerler ardışık olarak birbirine eklenir; polistiren buna örnektir. Yoğunlaşma polimerlerinde ise reaksiyon iki fonksiyonel gruba sahip moleküller arasında gerçekleşir ve su veya HCl gibi küçük bir yan ürün açığa çıkar. Naylon-6,6'nın adipik asit ve heksametilendiamin ile sentezi, buna tipik bir örnektir; polikarbonatın bisfenol-A ve fosgenle üretilmesi de başka bir yoğunlaşma polimerizasyonudur. Güncel sınıflandırmalarda polimerizasyonlar zincir büyüme ve adım büyüme olarak da ele alınır. Zincir büyüme mekanizmalarında yüksek molekül ağırlığı polimerizasyonun başlarında oluşur. Adım büyüme mekanizmalarında ise yüksek molekül ağırlığı ancak reaksiyonun son aşamalarında, yani monomer dönüşümü çok yükseldiğinde elde edilir. Polimerler, işleme ve polimerizasyon özelliklerinin yanı sıra, omurgalarını oluşturan kimyasal yapıya göre de sınıflandırılabilir. Omurgası tamamen karbon atomlarından oluşan polimerler, homozincir polimerler olarak adlandırılır ve omurgalarında tekli veya çiftli bağ bulunmasına göre alt gruplara ayrılır. Omurgasında sadece tekli bağ bulunan karbon zinciri polimerlerine polialkenler denir; polistiren, polietilen, polipropilen ve poli(vinil klorür) bu gruba örnektir. Zincir boyunca çift bağ içeren polimerler ise polialkenilenler olarak bilinir; poliizopren, polibutadien ve iletken poliasetilen buna örnektir. Omurgasında karbon dışında farklı atomlar (örneğin oksijen, azot) bulunan polimerler ise heterozincir polimerler olarak sınıflandırılır ve içerdikleri kimyasal gruplara (karbonil, amid, ester vb.) göre alt gruplara ayrılır. Bu sınıfın önemli bir örneği, –Si–O– omurgasına sahip ve metil gibi yan gruplarla bağlanan polisiloksanlardır.

Günümüzde polimerik malzemeler günlük yaşamın neredeyse tüm alanlarında kullanılmaktadır ve bunların üretimi ve imalatı dünya çapında önemli endüstriler oluşturmaktadır (Fried, 2014). Mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve çok yönlülüğü ile mühendislik polimerleri, uzun süredir malzeme mühendisliğinin ön saflarında yer almakta ve çeşitli teknolojik ve endüstriyel

alanlarda yeniliklerin önünü açmaktadır. Önemli bir gerilime dayanma özelliği ile karakterize edilen bu malzemeler, günlük kullanımın yanı sıra havacılık, otomotiv, elektronik ve biyomedikal alanlarındaki karmaşık bileşenlere kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Harun-Ur-Rashid ve Imran, 2024). Ancak mevcut polimer ve plastik malzemeler yenilenemeyen petrokimya kaynaklarından üretilmektedir (Chae ve An, 2018). Petrol bazlı ürünler, biyolojik olarak parçalanamayan ve biyolojik olarak uyumlu olmayan yapıları nedeniyle küresel çapta endişe kaynağıdır ve dünya çapında yoğun tüketim nedeniyle petrol rezervleri hızla tükenmektedir. Bu küresel çevre sorunları ve düzenlemeler, araştırmacıları geleneksel petrol bazlı ürünlerin yerini alabilecek biyolojik olarak parçalanabilir ve biyolojik olarak uyumlu malzemeler geliştirmeye yöneltmiştir (Trivedi vd., 2023).

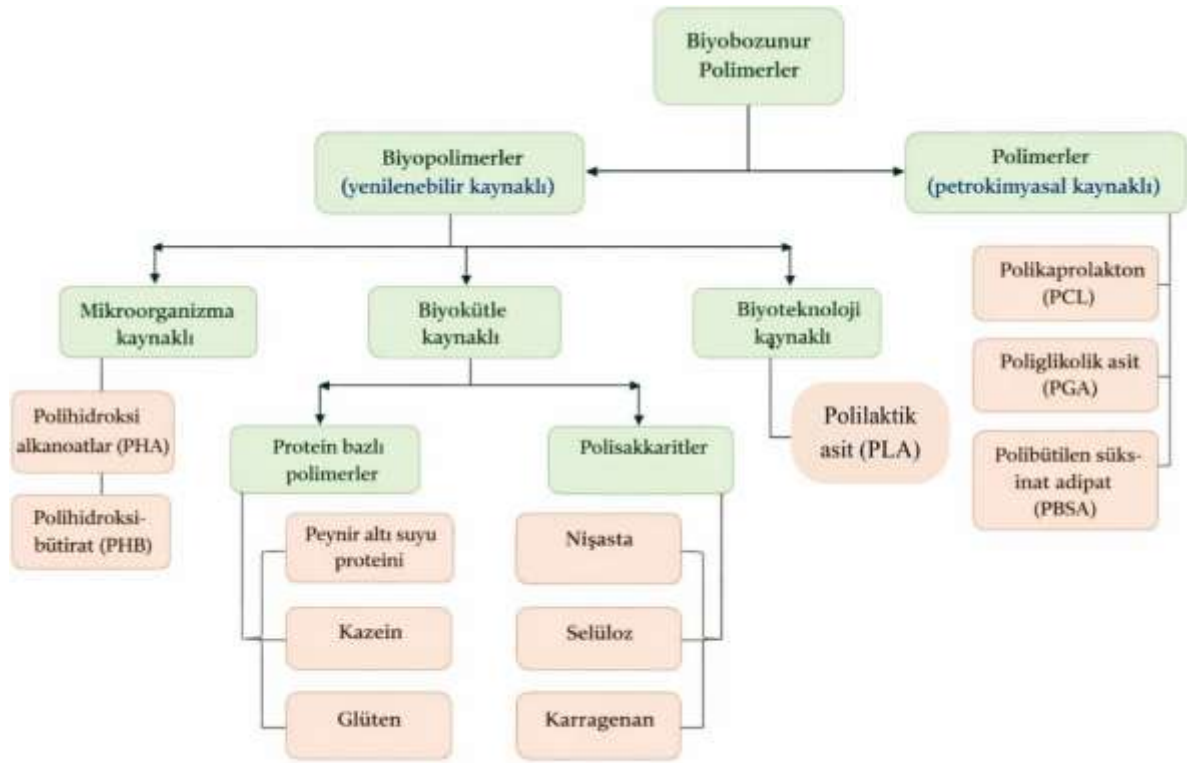
2.3.1. Biyopolimerler

Biyopolimerler, nişasta, selüloz, proteinler ve bitki ve hayvanlardan elde edilen kitosan gibi doğal kaynaklardan elde edilir. Bu doğal polimerler, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu özellikleri nedeniyle, biyolojik olarak parçalanamayan ve petrol bazlı sentetik plastik malzemelerin umut verici ikameleri haline gelebilir. Biyo-bazlı ve biyolojik olarak parçalanabilen biyobozunur plastikler, atmosferden CO₂ emerek CO₂ emisyonlarını azalttıkları, geleneksel plastiklerden daha hızlı bir şekilde bozdukları ve dolayısıyla plastik kirliliğini azalttıkları için çevre dostudur (Shekhar ve Mondal, 2024).

Biyopolimerler, biyolojik olarak parçalanamayan plastiklerin yerine kullanılabilir ve böylece çevresel etki ve petrole bağımlılık azaltılabilir. Biyopolimerlerin biyolojik bozunması, polimerdeki bağların hidrolitik veya enzimatik olarak parçalanmasını içerir. Biyolojik bozunma genellikle, canlı organizmalarla (bakteriler, mantarlar vb.) ilişkili enzimlerin ve/veya kimyasal ayrışmanın etkisiyle meydana gelen bir olay olarak tanımlanır. Fotobozunma, oksidasyon ve hidroliz gibi diğer süreçlerin de biyolojik bozunma öncesinde veya sırasında polimerlerin yapısı ve zincirleri üzerinde etkisi olabileceğini belirtmek gerekir.

Biyolojik olarak parçalanabilir polimerler, sentez süreçlerine ve kaynaklarına göre farklı türlere ayrılabilir; bunlar Şekil 3'de özetlenmiştir. Bunlar doğrudan biyokütleden (proteinler ve polisakkaritler), biyokütleden elde edilen sentetik biyopolimerlerden (poli(laktik asit) (PLA)) veya petrokimyasallardan (ör. (polikaprolakton) (PCL), poli(glikolik asit) (PGA), poli(bütülen süksinat-ko-adipat) (PBSA)) veya mikrobiyal fermantasyonla elde edilenler (örneğin, poli

(hidroksialkanoatlar) (PHA), poli(hidroksibütirat) (PHB)) olarak sınıflandırılabilir (Zhong vd., 2020).



Şekil 3. İki kaynağa göre Biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin sınıflandırılması (Zhong vd., 2020).

Biyobozunur polimerler biyotıp, katkı teknolojileri, film, elyaf, ambalajlama, otomotiv ve tarım gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Balla vd., 2021).

Polilaktik asit (PLA), bu uygulamalarda kullanılan en umut verici polimerlerden biridir (Maharana vd., 2009) ve bu nedenle “21. yüzyılın polimeri” olarak adlandırılır. PLA aynı anda biyouyumlu, biyobozunur ve biyo bazlı olan tek polimerdir (Pretula vd., 2016). PLA çevre dostu bir termoplastik polimer olup yaygın olarak bulunabilmekte ve kullanıldıktan sonra çevreye zarar vermeden kolayca ayrıştırılabilmektedir. Diğer biyolojik olarak parçalanabilen polimerlere kıyasla, PLA çok iyi işlenebilirliğe, mekanik özelliklere ve şeffaflığa sahiptir, bu da onu daha uygun ve kullanışlı bir biyolojik olarak parçalanabilen polimer haline getirir (Shekhar ve Mondal, 2024).

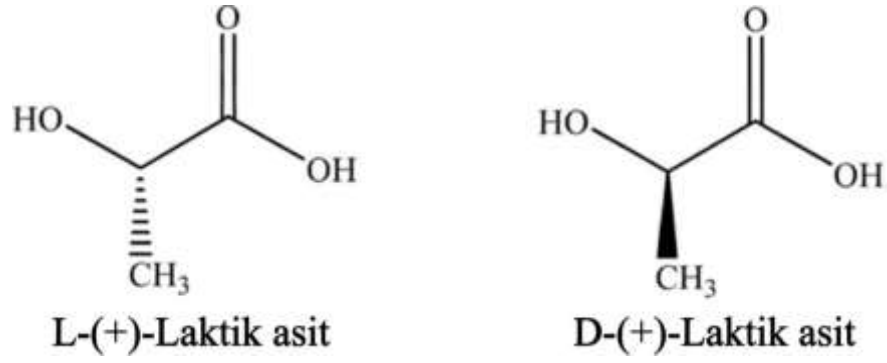
2.3.1.1. PLA

PLA şu anda dünyada çok yaygın olarak kullanılan bir bozunabilir plastiktir ve bozunabilir plastiklerin %25'ini oluşturmaktadır. PLA'nın ana hammaddesi nişastadır ve mısır, manyok, şeker kamışı ve şeker pancarı gibi yenilenebilir malzemelerden elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir termoplastik alifatik polyesterdir. PLA sadece kökeni açısından çevreci olmakla kalmaz, aynı zamanda üretiminde sentetik petrol bazlı polimerlere göre %25 ile %55 daha az fosil enerji gerektirir. Bozunmanın son ürünleri CO₂ ve su (H₂O) olup, bunlar bitkiler tarafından yeniden emilip kullanılabilir ve Şekil 4'deki diyagramda gösterildiği gibi belirli bir döngü oluşturur. PLA, tam olarak parçalanabilirlik (PLA doğal ortamda CO₂ ve H₂O'ya ayrışır), iyi biyoyumluluk (PLA canlı organizmalarda laktik asite (LA) hidrolize olur ve vücuttaki enzimler tarafından daha da parçalanabilir), birçok petrol bazlı plastiğe kıyasla yüksek şeffaflık, modül ve mukavemet gibi birçok avantaj sunar. Alev geciktirme açısından, saf PLA'nın nihai oksijen indeksi sadece %18'dir, dikey yanma testi derecesi yoktur ve havada aşırı derecede yanıcıdır ve ciddi erimiş damlacıklar oluşturur; mekanik özellikler açısından PLA, oda sıcaklığında yaklaşık %4 Young modülüne, 50 ile 70 MPa arasında gerilme mukavemetine, yaklaşık %4 kopma uzamasına ve 2,5 kJ/m²'ye yakın darbe mukavemetine sahiptir. PLA'nın yan grubu, uzamsal olarak korumalı ve hidrofobik olan metil (CH₃) olup, bu da PLA'yı suya karşı oldukça dirençli hale getirir. Bununla birlikte, PLA'nın kırılabilirliği, zayıf tokluğu, düşük yumuşama noktası, düşük erime mukavemeti ve üretim sırasında düşük kristalleşme oranı gibi dezavantajları uygulamasını ciddi şekilde sınırlamaktadır (Li vd., 2023).



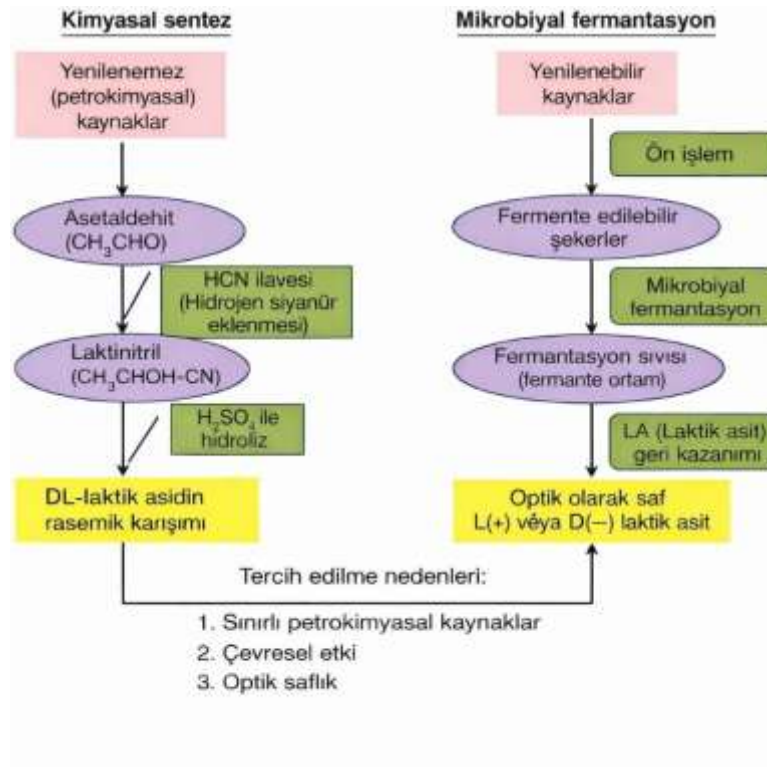
Şekil 4. Polilaktik asit geri dönüşümünün şematik diyagramı (Li vd., 2023).

PLA, tekrarlanan LA'dan oluşan uzun bir düz zincirdir ve PLA'yı üretmek için kullanılan iki LA monomer yapısı vardır: sol laktik asit (L-LA) ve dekstrolik asit (D-LA) (Şekil 5).



Şekil 5. Laktik asidin iki yapısı (Castro-Aguirre vd., 2016).

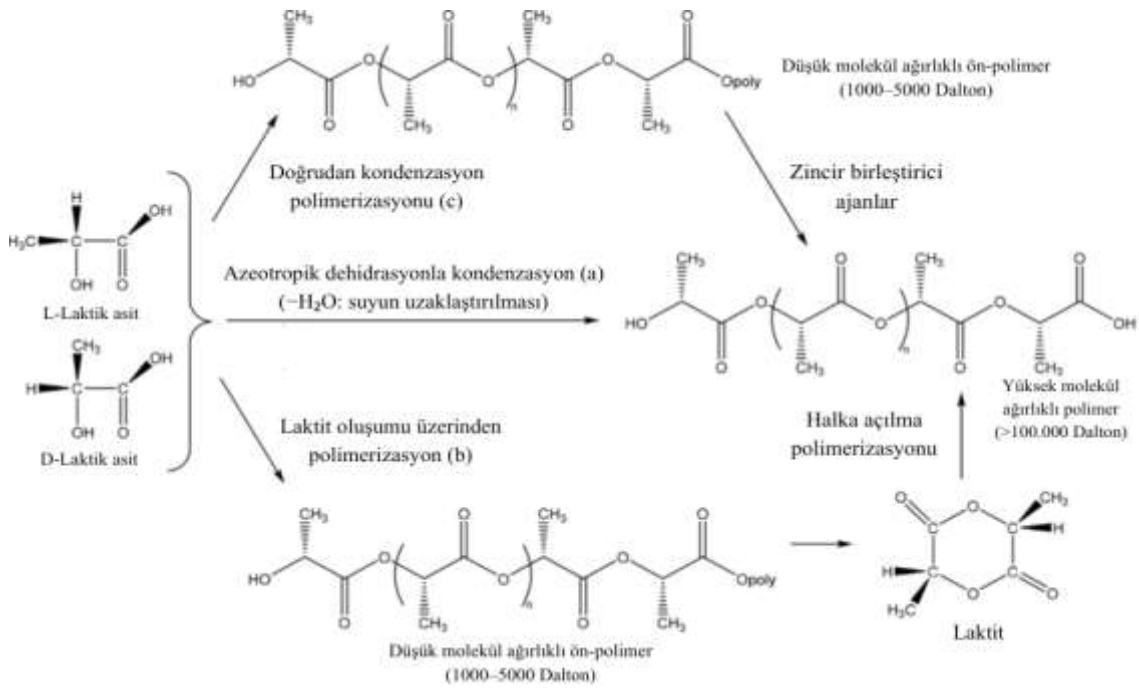
LA, kimyasal üretim yöntemleri veya biyolojik fermantasyon yoluyla elde edilebilir ve LA'yı üretmek için kullanılan iki süreç Şekil 6'da gösterilmektedir. Kimyasal sentez yönteminin sorunu, hazırlık sürecinde eşlenik bir karışım üretilmesidir. Fermantasyonla üretilen LA'nın avantajı, optik olarak saf L-LA veya D-LA üretebilmesidir ve optik güç, PLA'nın fiziksel özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Ek olarak, asidik fermantasyon koşulları altında, LA'nın mikrobiyal üretimi üretim maliyetlerinin düşürülmesini kolaylaştırır.



Şekil 6. LA üretimi için metodoloji (Singhvi vd., 2019).

PLA'yı hazırlamanın üç ana yolu vardır: dolaylı polimerizasyon, azeotropik dehidrasyon kondensasyonu ve halka açma polimerizasyonu. Doğrudan polimerizasyon (tek aşamalı yöntem), LA doğrudan polimerizasyonu kullanılarak, kısa bir süreç ve az ekipman yatırımı ile

basit bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ancak, bu yöntem üretim sürecinin vakum ve sıcaklığının sıkı bir şekilde kontrol edilmesini ve üretim sürecinin bir yan ürünü olarak suyun sürekli olarak uzaklaştırılmasını gerektirir ve hazırlanan PLA'nın moleküler ağırlığı yüksek değildir. Bu yöntem ayrıca çözücüyü geri kazanmak için daha büyük bir reaktör gerektirir. Mitsui Chemicals Co., PLA'yı hazırlamak için azeotropik dehidrasyon polikondenzasyon yöntemi kullandı ve bu, hazırlanan PLA'nın moleküler ağırlığında bir artışa neden oldu. Üretim sırasında uzaklaştırılması açıkça zor olan ayrılmış su, azeotropik damıtma ile uzaklaştırılabilir. Ancak, bu yöntem ekosistem üzerinde baskı oluşturabilecek ve PLA geliştirilmesinin asıl amacını bozabilecek organik çözücülerin kullanımını gerektirdiğinden, fazla ilgi görmemiştir. PLA, genellikle kalay oktanoat bazlı bir katalizör kullanılarak halka açma polimerizasyonu (iki aşamalı işlem) ile LA'nın dimerik propilenlerinin polimerizasyonu yoluyla da hazırlanabilir. Bu yöntem, dar moleküler dağılımlı ve yan ürün suyun daha kolay uzaklaştırılabildiği daha yüksek moleküler ağırlıklı PLA ile sonuçlanır. Ancak bu yöntem pahalı bir hammadde olduğundan, piyasada PLA'nın fiyatları yüksek olmaktadır. PLA için farklı sentez yöntemleri Şekil 7'de gösterilmektedir (Li vd., 2023).



Şekil 7. Polilaktik asit üretimi için polimerizasyon yolu (Murariu ve Dubois, 2016).

Tarihe bakıldığında, Carothers ve arkadaşları (Carothers vd., 1932) ilk olarak 1932 yılında oligomerik laktidlerin polimerizasyonu ve depolimerizasyonu kullanarak PLA geliştirmeye çalışmışlar ve daha sonra 1954 yılında Du Pont tarafından patent başvurusu yapılmıştır. 1960'lı yıllarda, teknikler değiştirilerek yüksek moleküler ağırlıklı PLA hazırlanmış ve bu PLA, petrol

türevli plastiklerle karşılaştırılabilir özellikler sergilemiştir. Ancak bu üretim yöntemi ekonomik olmamıştır. PLA'nın ticari üretimi, Cargill Dow Corporation tarafından sürecin geliştirilmesinden sonra 1997 yılında başlamıştır (Dorgan vd., 2006). Bu teknikte, çözelti yerine eritme tekniği kullanılarak PLA sentezlenmiştir. PLA'nın ilk sürekli üretimi 2002 yılında Nebraska, Blair'de yıllık 300 lb kapasite ile başlamıştır. PLA'nın büyük ölçekte üretimi, nihayetinde PLA üretim maliyetini önemli ölçüde düşürmüştür. Gıda ambalajlama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan PLA vücut tarafından kolayca gözlemlenebilir olması nedeniyle biyomedikal uygulamalarda kullanılan ilk polimer olmuştur (Kulkarni vd., 1966).

Günümüze gelindiğinde ise, küresel PLA pazarının büyüklüğü 2020 yılında 525,47 milyon ABD doları olarak fiyatlandırılmış ve 2021'den 2028'e kadar yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) %18,1 olarak tahmin edilmektedir. Ürüne olan talep çoğunlukla biyotıp, otomotiv, inşaat, tarım, tek kullanımlık ürünler ve gıda ambalajları gibi endüstrilerinden gelmektedir ve çoğunlukla petrol bazlı plastiklerin yerine kullanılmaktadır (Balla vd., 2021).

PLA'nın genel olarak ve daha özel olarak otomotiv endüstrisinde kullanılması, iki önemli sonuca yol açar: kompozitler için takviye olarak doğal (lignoselülozik) liflerin daha geniş bir şekilde kullanılması ve yapısal, ancak en azından kısmen biyolojik bazlı bileşenler için eklemeli imalat sürecinin (3D baskı) potansiyelinin kullanılması (Giammaria vd., 2024).

PLA, otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların mühendisliğinde, özellikle iç bileşenler ve kaput altı dişlilerde uygulama alanı bulmaktadır. Olağanüstü biyo-içeriği, ürünü karbon ayak izini azaltmasıyla tanınır hale getirir ve gelişmiş darbe ve UV direnci, yüksek parlaklık ve boyutsal kararlılık gibi çeşitli faydalar sağlar. Bu özellikler, PLA'yı otomotiv motor bölmelerinde ve iç mekanlarda geleneksel olarak kullanılan polikarbonat (PC), poli (etilen tereftalat) (PET), akrilonitril bütadien stiren (ABS), poli (bütilen tereftalat) (PBT) ve poliamid gibi çoğu geleneksel termoplastiklerin mükemmel bir ikamesi haline getirir (Balla vd., 2021).

2.3.1.1.1. 3D ve FDM 3D baskı ile farklı dolgu desenlerinde üretilen PLA numunelerin mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar

Erken dönem çalışmalardan biri olarak Tonsilav Galeta ve arkadaşları (Galeta vd., 2016) numune yapısının 3D yazdırılmış numunelerin çekme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deney numuneleri, Z Corporation Z310 model bir 3D yazıcı kullanılarak, farklı iç geometrik yapı (iç yapıları dolu (full), petek (honeycomb), delikli (drills) ve şeritli (stripes))

konfigürasyonlarında tasarlanmıştır. Petek (honeycomb) yapıya sahip numunelerin en yüksek çekme dayanımını sergilediği ortaya konmuştur.

Bodaghi ve arkadaşları (Bodaghi vd., 2017) 3D baskı ile üretilen metamateryallerde meydana gelen büyük deformasyonları incelemiştir. Paralelkenar ve altıgen birim hücrelerin tekrarlayan düzenini içeren metamateryaller, yumuşak hiper-elastik PLA'lerden FDM 3D baskı tekniğiyle tasarlanıp üretilmiştir. Numuneler, basma ve çekme testleri için basılmıştır. Dolgu deseni olarak altıgen ve paralelkenar şekiller verilmiştir. Altıgen birim hücrelere sahip metamateryalinin aksel yönde enine yöne göre daha yüksek gerilme mukavemetine sahip olduğu bulunmuştur. Altıgen birim hücreli metamateryalinin, paralelkenar birim hücreli metamateryale kıyasla çok düşük basınç mukavemetine sahip olduğu görülmüş ve bu davranış, düşük yapısal yoğunluğuna atfedilmiştir. Metamateryallerin anizotropik olduğu, yani özelliklerinin hücrenin genel şekline, yükleme yönüne ve büyüklüğüne bağlı olduğu bulunmuştur.

Lubombo ve Huneault (Lubombo ve Huneault, 2018), 3D baskılı hücresel yapıları PLA parçalarda farklı dolgu desenlerine göre mekanik performansın nasıl değiştiğini araştırmıştır. Beş farklı dolgu deseni (altıgen, üçgen, kare, kare-diyagonal, güçlendirilmiş kare-diyagonal) çekme ve eğilme test numunelerine tasarlanmış ve tek eksenli çekme testi ve üç noktalı eğilme yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Tek eksenli çekme testleri, kare dolgu desenine sahip yapının çekme mukavemeti ve çekme modülü açısından en iyi mekanik özellikleri gösterdiğini ortaya koymuştur. Altıgen dolgu yapısı, hem kenar yönlü hem de düz yönlü testlerde eğilme mukavemeti ve modülü açısından en iyi eğilme özelliklerini göstermiştir. Ayrıca, altıgen dolgu yapısının belirli bir nispi yoğunluk aralığında en iyi gerilme özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Khan ve arkadaşları (Khan vd., 2018), 3D baskılı PLA parçalarında dolgu desenlerinin mekanik ve çekme özelliklerine olan etkilerine odaklanmıştır. Dört farklı dolgu deseni (doğrusal (rectilinear), eşmerkezli (concentric), petek (honeycomb) ve Hilbert eğrisi (hilbert curve) dolgu desenleri basılmış ve incelenmiştir. Numunelerin boyutları ASTM D638-14 Standardına uygun olarak ayarlanmıştır. Çekme testleri, bir universal test cihazı kullanılarak 5 mm/dak gerinim hızı ve 100 kN'luk uygulanan kuvvetle gerçekleştirilmiştir. Maksimum çekme dayanımı, Young modülü ve gerinim gibi mekanik özellikler incelenmiştir. Doğrusal desen en yüksek çekme dayanımını gösterirken, Hilbert eğrisi deseni en düşük çekme dayanımı değerini göstermiştir. Doğrusal ve petek yapısı, eş merkezli ve Hilbert eğrisi dolgu desenlerine kıyasla birim uzunluk başına en yüksek uzamayı (gerinim) göstermiştir. Young modülü, eğrinin elastik bölgesinin

eğimi hesaplanarak gerilim-gerinim eğrisinden elde edilmiştir. Doğrusal desen en yüksek Young modülünü gösterirken, bunu sırasıyla eş merkezli, petek ve Hilbert eğrisi dolgu desenleri izlemiştir. Doğrusal dolgu deseni en uygun ve istenen çekme mekanik özelliklerini sergilemiştir.

Moradi ve arkadaşları (Moradi vd., 2019), altıgen dolgulu 3D baskılı PLA numunelerinin mekanik özelliklerini çekme testleri ile araştırmıştır. Numuneler gevrek kırılma gösterirken, bazıları kırılmadan önce genişletilmiş bir plastik bölge göstermiştir. Daha ileri araştırmalarda, katmanları düzgün bir şekilde kaynaşmamış 3D baskılı numunelerin gevrek kırılma göstereceği sonucuna varılmıştır. Katmanlar arasındaki bağ dayanımı, kırılma özelliklerini karakterize etmiştir. Çekme test verileriyle, petek dolgu deseninin hafif uygulamalarda kullanılabilen etkili bir desen olduğu gözlemlenmiştir. Katman kalınlığının, 3 boyutlu baskılı petek dolgu deseninin mekanik dayanımıyla doğrudan orantılı olduğu bulunmuştur.

Akhoundi ve Behraves (Akhoundi ve Behraves, 2019), 3 boyutlu baskı yapılarında dolgu desenlerine bağlı olarak çekme ve eğilme mekanik özelliklerinin nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Parçaların basımı için değişken parametreler olarak eşmerkezli (concentric), doğrusal (rectilinear), Hilbert eğrisi (hilbert curve) ve petek (honeycomb) desenleri ile %20, %50 ve %100 doluluk oranları kullanılmıştır. Numunelerin basımında PLA filament kullanılmıştır. Mekanik testler sonrasında numunelerin mikro yapıları analiz edilmiş ve incelenmiştir. Sonuçlar, eşmerkezli (concentric) desenin tüm doluluk oranlarında, biriktirilen desenlerin yükleme yönüyle hizalanmış olmasından kaynaklı, en yüksek çekme ve eğilme özelliklerini sergilediğini göstermiştir. Hilbert eğrisi (Hilbert curve) deseni de %100 doluluk oranında mekanik özelliklerde belirgin bir artış sağlamıştır. Bu önemli artış, esas olarak Hilbert eğrisi deseninde nozln kısa hareket mesafeleri nedeniyle desenlerin yüksek sıcaklıkta tutulması ve bunun sonucunda desenler ile katmanlar arasında güçlü bağlanmanın oluşmasıyla ilişkilendirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri, %100 doluluk oranında eşmerkezli ve Hilbert eğrisi desenlerinde desenler arasında güçlü bağlanma ve sağlam bir mikroyapı (daha az kusur ve boşluk) olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, petek (honeycomb) deseninde büyük boşluklar tespit edilmiş olup, özellikle %100 doluluk oranında daha düşük dayanım ve elastik modülün bu boşluklardan kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Saniman ve arkadaşları (Saniman vd., 2020), 3D baskılı bileşenlerde kütle azaltımı bağlamında farklı dolgu desenlerinin çekme dayanımı ve uzama davranışlarını deneysel olarak incelemiş

ve karşılaştırmıştır. Bu çalışmada altı dolgu deseni (Hilbert eğrisi, Arşimet kırışları, petek, eş merkezli, doğrusal, sekizgen spiral) incelenmiştir. Çekme testi numuneleri ASTM D638 Tip III standardı ile 3D olarak basılmıştır. Çekme testleri, 5 mm/dak gerinim hızı ve 5 kN yük altında bir niversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, PLA termoplastiklerinin 3,4 GPa ile 3,6 GPa arasında değişen nispeten düşük bir Young Modülüne sahip olduğunu göstermiştir. Doğrusal dolgu deseni en yüksek çekme dayanımı değerini (18,90 MPa) gösterirken, Hilbert eğrisi en düşük çekme dayanımı değerini göstermiştir. Bu dolgu desenli numunelerin kütlesinin desensiz numunelere göre daha düşük olmasına rağmen mukavemeti azalmıştır. Arşimet kırışları (Archimedean cords) dolgu deseninin, 33.23×10^3 MPa·mm³/g ile en yüksek özgül çekme dayanımına sahip olduğu ve bu nedenle yüksek çekme dayanımına sahip 3D baskılı parçaların kütlesinin azaltılması için en uygun dolgu deseni olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, 18.21×10^3 %·mm³/g ile en yüksek özgül çekme uzamasına sahip olan eşmerkezli (concentric) dolgu deseni, kopma öncesinde daha yüksek uzama gerektiren hafif parçaların üretimi için daha uygun bulunmuştur. Buna karşılık, Hilbert eğrisi (Hilbert curve) dolgusu, sırasıyla 19.80×10^3 MPa·mm³/g ve 8.34 %·mm³/g değerleriyle özgül çekme dayanımı ve özgül uzama bakımından en düşük değerlere sahip olduğundan, kütle azaltımı açısından en kötü seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Cabreira ve Santana (Cabreira ve Santana, 2020), farklı dolgu desenlerine sahip 3D yazdırılmış yapıların sergilediği mekanik özelliklere odaklanmıştır. Bu çalışmada doğrusal, ızgara, üçgen ve petek dolgu desenler ASTM-D638 ekme testi standardına göre tasarlanmış numunelere 3D baskı ile basılmış ve çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri, niversal test cihazında 5 kN'luk bir yük hücresi ile 2 mm/dak gerinim hızında yapılmıştır. Sonuçlar, ızgara deseninin en yüksek elastik modüle sahip olduğunu, petek ve üçgen desenlerin ise en düşük elastik modüle sahip olduğu göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı doğrusal desende elde edilirken, en düşük çekme dayanımını üçgen desende edilmiştir. Tüm ızgara desenlerinde kırılma bölgesi çekme numunesinin boyun bölgesine yakinken, diğer desenlerde kırılma numunenin orta bölgesinde meydana gelmiştir. ızgara desenlerinin boyun bölgesine yakın kırılması, boyun bölgesindeki yüksek gerilim konsantrasyonlarına ve yapı içindeki düşük gerilim transferine bağlanmıştır. Petek deseni ve doğrusal desen yüksek çekme gerilimi gösterirken, ızgara ve üçgen desenler nispeten düşük çekme gerilimi göstermiştir.

Aloyaydi ve arkadaşları (Aloyaydi vd., 2020) ve basma deneyleri uygulayarak, dolgu desenlerinin (infill patterns, IP) 3D baskılı numunelerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini

incelemiştir. Polilaktik asit (PLA, saflık > %98 ağırlıkça) malzemesi seçilmiş ve eriyik biriktirme modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM; baskı hızı 20 mm/s, katman yüksekliği 0,2 mm, katman sayısı 30, ekstrüzyon sıcaklığı 200 °C) yöntemi kullanılarak dört farklı dolgu deseniyle (üçgen, ızgara, çeyrek kübik ve tri-altıgen) numuneler üretilmiştir. Bu çalışmada LVI deneyine ait hız-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri ile basma davranışları incelenmiş ve sunulmuştur. LVI deneyi, implant, doku mühendisliği ve geri dönüştürülebilir ürün uygulamalarına yönelik PLA gözenekli parçaların (%60 dolgu yoğunluğu) delinme enerjisi, enerji soğurma kapasitesi (tokluk), rijitlik ve dayanımını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, üçgen dolgu deseninin, darbe uygulayan yarım küresel uçla dik yönde daha fazla kesme/temas eden katmana sahip olması nedeniyle LVI testinde en yüksek soğurulan enerjiyi (delinme enerjisi 7,5 J ve rijitlik 668,82 N/mm) sağladığını göstermiştir. Buna karşılık, ızgara dolgu deseni, basma yükleme yönüne paralel daha fazla katman içermesi nedeniyle en yüksek basma dayanımını (72 MPa) sergilemiştir. Üçgen dolgu desenine ait SEM kırık yüzeyi görüntüleri; etkin filament (raster) ve katman bağlanması, daha az boşluk, daha fazla dairesel plaj izi ve tırnak (ratchet) çizgilerinin olmaması gibi özellikler göstermiş olup, bu durum gelişmiş mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Moradi ve arkadaşları (Moradi vd., 2021), eriyik biriktirme modelleme (FDM) ile PLA kullanarak 3D baskı ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerinde dolgu desenlerinin etkilerini araştırmıştır. Bu çalışma için, mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak üzere altı farklı dolgu deseni (tam petek (full honeycomb), doğrusal (rectilinear), üçgen (triangular), hızlı petek (fast honeycomb), ızgara (grid) ve dalgalı (wiggly)) tasarlanmış ve basılmıştır. Bu numunelere çekme testleri yapılmıştır. Üçgen dolgu deseni en yüksek çekme dayanımı değerine sahipken, ızgara deseninin en düşük çekme dayanımı değerine sahip olduğu rapor edilmiştir. Izgara deseni Young Modülü için en düşük değere sergilerken, üçgen desen Young Modülü için en yüksek değeri sergilemiştir. Dalgalı dolgu deseni, esnek yapısı sayesinde en yüksek uzama yüzdesi değeri ve en yüksek enerji emilim değerini göstermiştir. Petek deseni, mukavemet ve malzeme kullanımı açısından en dengeli değerleri sergilemiştir.

Birosz ve arkadaşları (Birosz vd., 2022) üç farklı dolgu deseni (bal peteği, ızgara ve gyroid) ve dolgu oranı (%25, %50 ve %75 (referans örneği %100 doluluğa sahiptir)) ile FDM 3D yazıcı yöntemini kullanarak ürettiği PLA numunelerin verimliliklerini ve anizotropik davranışlarını karşılaştırmak amacıyla eğme deneyleri yapmıştır. Bal peteği (honeycomb) ve gyroid desenleri,

basit ızgara (grid) desenine kıyasla daha iyi mekanik dayanım sağlamıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, incelenen desenlerin hiçbiri belirgin bir mekanik anizotropi göstermemiştir. Çatlak ilerlemesinin katman yönelimine bağlı olarak etkilendiği ancak kabuk (shell) kalınlığı anlamlı düzeyde değilse bu etkinin ihmal edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Dakhil ve arkadaşları (Dakhil vd., 2022), dolgu deseninin ve yoğunluğunun (dolgu yüzdesi) üç boyutlu yazdırılmış polimerin (polilaktik asit-PLA) çekme davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çekme testi numuneleri ASTM D-638 standardına uygun olarak hazırlanmış ve farklı dolgu desenleri (gyroid, doğrusal (linear) ve üç-altıgen (tri-hexagonal)) ile farklı doluluk oranlarında (%30, %50 ve %70) üretilmiştir. En uygun sonuçları elde etmek amacıyla her test için üçer numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, çekme testi açısından %70 doluluk oranına ve doğrusal dolgu desenine sahip numunelerin diğerlerine kıyasla en yüksek çekme dayanımını gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca çekme testinden elde edilen Young modülü değerleri de %70 doluluk oranının en yüksek değere sahip olduğunu ve dolgu desenleri arasında doğrusal desenin en yüksek, onu sırasıyla üç-altıgen ve gyroid desenlerinin izlediğini göstermektedir. Buna karşılık, eğilme ve darbe testlerinde üç-altıgen dolgu deseninin en yüksek eğilme dayanımı ve darbe dayanımı değerlerini sağladığı belirlenmiştir.

John ve arkadaşları (John vd., 2023) farklı işlem parametreleri altında üretilmiş 3D yazdırılmış hücresel geometrilerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Numunelerin üretiminde polilaktik asit (PLA) kullanılmıştır. Çekme numuneleri ASTM-D638 standardına göre ve altı farklı dolgu deseninde (altıgen, kare, elmas, kare açılı, elmas açılı ve üçgen) üretilmiştir. 3D yazdırılmış numuneler üzerinde çekme, darbe ve sünme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan giriş parametreleri dolgu deseni, dolgu yoğunluğu, nozul çapı ve şekil değiştirme hızıdır. Çekme deneyleri, kare hücre geometrisine sahip numunelerin çekme yükleri altında en iyi performansı gösterdiğini ve diğer beş desen türüne kıyasla daha yüksek mekanik dayanım sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada Hücre geometrisi, nozul çapı ve birim uzama hızı (strain rate) değişkenlerine odaklanarak Taguchi deney tasarımı ve Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis, GRA) yöntemleri ile optimizasyon yapılmıştır. Gri ilişkisel analiz sonuçlarına göre, en yüksek gri ilişkisel derece (GRG); 0,8 mm nozul çapı, 5 mm/dk uzama hızı ve kare hücresel geometri kombinasyonunda elde edilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) sonuçları, en etkili parametrenin %48,99 katkı oranı ile nozul çapı olduğunu, bunu %40,78 katkı oranı ile hücre geometrisinin izlediğini göstermiştir. Gri ilişkisel

analiz yaklaşımı, çok değişkenli 3D yazdırma süreci optimizasyonunun daha basit ve sistematik bir biçimde gerçekleştirilmesini sağlamıştır.

Yılan ve arkadaşları (Yılan vd., 2025) FDM yöntemiyle üretilmiş PLA parçaların mekanik özellikleri üzerinde dolgu desenlerinin etkilerini analiz etmiştir. Çalışmada altıgen, dairesel, kare, dolu (full), üçgensel ve eliptik dolgu desenlerine sahip PLA numuneleri üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiş ve çekme davranışları incelenmiştir. Sonuçlar, dolu (desensiz) PLA numunelerin en yüksek çekme dayanımını (36 MPa) ve uzama kapasitesini (%3,1) gösterdiğini ortaya koyarak maksimum yük taşıma gerektiren uygulamalar için ideal olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, eliptik desen 28 MPa'lık dayanım ve dolu yapıya yakın deformasyon kapasitesi ile mekanik performans, malzeme tasarrufu ve üretim verimliliği arasında pratik bir denge sunmuştur. Altıgen, dairesel ve kare gibi diğer dolgu desenleri ise hafif tasarımlar için uygun, orta düzey performans sergilemiştir. Ayrıca X-ışını tomografisi kullanılarak içyapılar ve üretim kalitesi analiz edilmiş ve geometrik tasarım ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi destekleyen bulgular elde edilmiştir.

Akçay ve Arı (Akçay ve Arı, 2025) FFF ile Üretilen 3D Baskılı PLA'nın mekanik özellikleri üzerinde dolgu yoğunluğu ve dolgu deseninin etkilerini araştırmıştır. Beş dolgu desenine (kübik, üç-altıgen (tri-hexagon), oktet, ızgara ve zikzak) ve iki dolgu yoğunluğuna (50%, 60%) sahip test numuneleri üretmişlerdir. Ek olarak %100 dolgu yoğunluğu, desensiz katı dolguya sahip olacak şekilde oluşturulmuş ve referans olarak seçilmiştir. Numunelere çekme ve Charpy testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, doldurma parametrelerinin üç boyutlu olarak basılmış yapıların enerji emilimi ve çekme dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Baskı desenlerinin basılan yapıların çekme dayanımını etkilediği rapor edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı (42 MPa) ve en yüksek enerji emilim değeri ($16,94 \text{ kJ.mm}^{-2}$) oktet desenli yapılarda elde edilmiştir. Ayrıca dolgu yoğunluğunun artması ile çekme mukavemetinin de arttığı belirlenmiştir.

Aboeella ve arkadaşları (Aboeella vd., 2025) çok katmanlı dolgu desenlerinin çekme ve basma dayanımı üzerindeki etkisini inceleyerek 3D yazdırılmış PLA yapıların mekanik davranışını araştırmıştır. Üç yaygın dolgu deseni (üçgensel, ızgara ve petek) %20 ve %50 doluluk oranlarında değerlendirilmiştir. Yenilikçi bir yaklaşım olarak, tek katmanlı, iki katmanlı ve dört katmanlı aynı desen kombinasyonlarına sahip numuneler üretilmiş ve katmanlar arası bağlanmayı artırmak amacıyla ardışık katmanlar 180° döndürülmüştür. Elde edilen sonuçlar, iki katmanlı yapıların tek katmanlı numunelere kıyasla çekme dayanımında %64'e, basma

dayanımında ise %47'ye varan önemli artışlar sağladığını göstermiştir. Tek katmanlı yapılarda %20 doluluk oranında en iyi performansı ızgara (grid) desenleri sergilemiştir. İki katmanlı petek (honeycomb) konfigürasyonları, çekme dayanımında en yüksek artışı (%64) sağlamıştır. %50 doluluk oranında en yüksek çekme dayanımı petek (honeycomb) desenlerinde elde edilmiştir. %50 doluluk oranında iki katmanlı yapılarda en büyük iyileşme (%56) ızgara (grid) desenlerinde gözlenmiştir. %20 doluluk oranında en yüksek basma dayanımını petek (honeycomb) desenleri göstermiştir. İki katmanlı konfigürasyonlarda en büyük artış (%47) ızgara (grid) desenlerinde elde edilmiştir. %50 doluluk oranında üçgensel (triangular) desenler hem en yüksek basma dayanımını hem de en büyük iyileşmeyi (%41) sağlamıştır. Bu bulgular, 3D yazdırılmış yapılarda çekme ve basma dayanımının artırılması ve malzeme verimliliğinin iyileştirilmesi için dolgu tasarımı ve katman konfigürasyonlarının optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sunmuştur. Bu çalışma, stratejik çok katmanlı dolgu tasarımı yoluyla malzeme tüketiminin azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından 3D baskılı parçaların performansının optimize edilebileceğini ortaya koymuştur.

2.3.1.1.2. PLA'nın Hidrotermal Yaşlandırması

Çalışmalar, PLA'nın termal işleme veya hidrolitik koşullar altında bozunduğunu ve moleküler ağırlığının hızla azaldığını, bunun da mekanik mukavemet gibi malzemenin nihai özelliklerini etkilediğini bildirmiştir (Signori vd., 2009).

Oda sıcaklığında 1 yıllık kullanıma karşılık gelen enjeksiyon kalıplama sınıfı PLA'nın hidrotermal yaşlandırılmasının PLA'yı önemli ölçüde bozduğu, böylece cam geçiş, soğuk kristalizasyon ve erime sıcaklıklarının düştüğü ve bunun sonucunda yaşlandırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin ölçülemediği rapor edilmiştir (Yarahmadi vd., 2016).

30 ve 60 gün boyunca hızlandırılmış hidrotermal yaşlandırma işleminden sonra kalıplanmış PLA çubukların sıkıştırılması, malzemelerin moleküler kütlelerini önemli ölçüde azaltmıştır (Lesaffre vd., 2016).

Banjo ve arkadaşları (Banjo vd., 2022), Fused Filament Fabrication (FFF) yöntemiyle 3D yazdırılmış numunelerde nem ve sıcaklığın mekanik ve kimyasal özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Naylon, polilaktik asit (PLA) ve karbon elyaf takviyeli naylon kompozit numuneler üretilmiş ve 21 °C ile 70 °C sıcaklıklarda, 30 dakikadan 28 güne kadar değişen

sürelerle deiyonize suya tamamen daldırılmıştır. Çalışma sonuçları, yüksek sıcaklıkta deiyonize suda bekletilen numunelerin su emme hızında artışa neden olduğunu göstermiştir. Naylon malzemenin eğilme modülü, yedi gün sonra %60 oranında azalmıştır. Buna karşılık PLA malzeme, 21 °C’de bekletildiğinde mekanik özelliklerinde minimum bozulma gösterirken, 70 °C’de yedi gün boyunca bekletildiğinde fiziksel bozunma sergilemiştir.

Ekinci ve arkadaşları (Ekinci vd., 2021), 37 °C’de fosfat tamponlu çözelti içerisinde tek katmanlı ince filmlerin yaşlanma davranışını incelemiştir. Çalışmalarında, PLA numunelerinin filament yönündeki çekme dayanımının 120 gün sonra 49 MPa’dan 28,6 MPa’a düştüğünü ve 280 gün sonunda ise 7 MPa’a kadar gerilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, numunelerin şekli ve boyutlarının da PLA’nın yaşlanma davranışı üzerinde önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir.

Verbeeten ve Lorenzo-Bañuelos (Verbeeten ve Lorenzo-Bañuelos, 2022), farklı filament yönelimlerine sahip çok sayıda PLA çekme numunesi yazdırmış ve bu sayede %6,6 ile %10,1 arasında değişen porozite değerleri elde etmişlerdir. Bu porozite, görünür yoğunluğun, PLA’nın 1,25 g/cm³ olan gerçek yoğunluğuna kıyasla 1,12–1,17 g/cm³ aralığına düşmesine neden olmuştur. Bu nedenle, FDM ile üretilmiş PLA numunelerin yaşlanma hızının farklı mikroyapılara bağlı olarak değiştiği rapor edilmiştir.

Agarwal ve arkadaşları (Agarwal vd., 2022), FDM ile üretilmiş PLA kortikal vidalarının yaşlanma hızının dolgu desenine yüksek derecede bağlı olduğunu ve dolgu oranı arttıkça yaşlanma hızının azaldığını belirlemiştir.

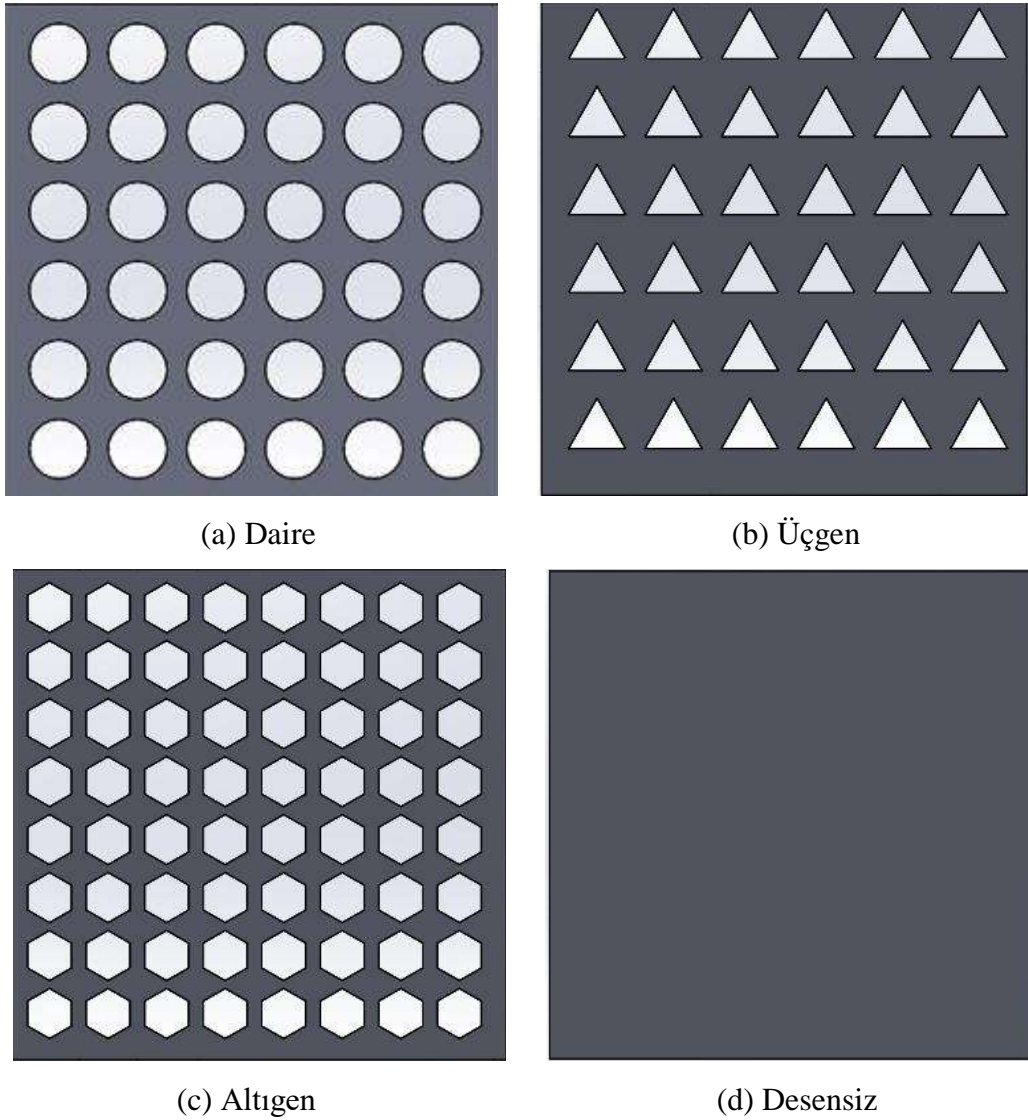
Bergaliyeva ve arkadaşları (Bergaliyeva vd., 2022) 3D yazdırılmış PLA numuneleri farklı süre aralıklarında termal ve hidrotermal yaşlandırmaya tabi tutmuştur. Bu süreçte termal ve mekanik özellikleri de belirlemiştir. Çalışmanın sonucu, 1344 saatlik hidrotermal yaşlandırma sonrasında, gerçek kullanımda yaklaşık 1,5–2,5 yıla karşılık gelen bir sürede, çekme dayanımının azaldığını ortaya koymuştur. Bu nedenle PLA’nın, yaklaşık 1,5 yıl yaşına ulaşana kadar termo-mekanik özelliklerini büyük ölçüde koruduğunu ve bu süreden önce geri dönüştürülebileceğini rapor etmişlerdir.

Li ve arkadaşları (Li vd., 2026) dört farklı dolgu desenine (Primitif (Primitive (P)), Gyroid (G), Elmas (Diamond (D)) ve I-sargılı Primitif yapı (I-Wrapped Primitive (IWP))) sahip üç eksenli periyodik minimal yüzey (TPMS) kafes metamaletaryallerinin hidrotermal yaşlanma

davranışını incelemiştir. Metamaletaryaller, polilaktid (PLA) kullanılarak eriyik biriktirme modelleme (FDM) yöntemiyle üretilmiş ve 50 °C’de 30 güne kadar suya daldırılmıştır. Basınç testleri, tüm metamaletaryallerin 30 günlük yaşlanma sonrasında malzeme bozunmasına bağlı olarak yük taşıma kapasitelerini kaybettiğini göstermiştir. Gyroid ve elmas kafes yapıları, mekanik özelliklerini en iyi koruyan yapılar olup, 18 gün sonunda başlangıç tepe gerilmelerinin sırasıyla %96’sını ve %94’ünü muhafaza etmiştir. Bu üstün performans, yük taşıyan alanlardaki daha fazla değişim çevrimine (variation cycle) sahip olmalarına bağlanmıştır. Buna karşılık, daha az değişim çevrimine sahip olan primitif kafes yapısı, en zayıf mekanik özellikleri ve en yüksek gerilme dalgalanmasını sergilemiştir. Özellikle I-sargılı Primitif kafes yapısı yaşlanmaya en duyarlı yapı olarak belirlenmiş ve mekanik bozunma 7. günden itibaren başlamıştır. Ayrıca, üretim yönüne dik (\perp BD) yüklenen TPMS kafes yapılarının, üretim yönüne paralel (\parallel BD) yüklenenlere kıyasla daha hızlı bozunduğu gözlenmiştir. Bu durum, malzeme seviyesinde katmanlar arası bağ dayanımının filament dayanımının yalnızca yarısı olması ve yaşlanma sırasında önemli ölçüde zayıflamasıyla açıklanmakta; böylece katmanlar arası ayrılmanın (interlayer debonding) baskın hasar mekanizması olduğu doğrulanmaktadır. Bu bulgular, 3D yazdırılmış metamaletaryallerin yaşlanma davranışında dolgu deseninin ve katmanlar arası bağlanmanın kritik önemini vurgulamaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada üretilen numuneler için kullanılan HYPER SPEED PLA (Siyah) filamenti REVO FILAMENT (İstanbul/TÜRKİYE) tarafından temin edilmiştir. Test numuneleri, nozul boyutu 0,4 mm olan BAMBULAB X1 CARBON marka bir 3D yazıcıda basılmıştır. Kullanılan 3D baskı parametreleri şunlardır: nozul sıcaklığı 190–240 °C, yatak sıcaklığı 50 °C ve ilk katman baskı hızı 50 mm/s'dir. PLA filamentini kullanarak hazırlanan numuneler (ASTM International, 2023) basma testi standartlarına göre (12,7 mm x 12,7 mm x 25,4 mm boyutlarında dikdörtgen prizmalar) üretilmiştir. Numuneler daire, altıgen, üçgen dolgu deseni ve desensiz (Şekil 8a-d) olmak üzere 4 farklı şekilde üretilmiştir. Farklı dolgu desenleri ile üretilen numunelerde hacim dolgu oranları şu şekildedir: Daire:%60, Üçgen: %78, Altıgen: %78,2 ve Desensiz: %100.



Şekil 8. Farklı dolgu desenleri ile üretilen numunelerin görüntüleri

Hidrotermal yaşlandırma etkilerini incelemek amacıyla numuneler (üretilen numunelerin yarısı) (ISO, 2011) standardına göre 45 gün boyunca 50°C sıcaklıkta %95 nemde koşullandırma kabininde bekletilmiştir. Hidrotermal yaşlandırmadan kaynaklı kütle kayıplarının belirlenmesi için 0., 15., 30. ve 45. günde hassas terazi ile kütle ölçümleri yapılmıştır.

Numunelerin moleküler yapısındaki değişimleri incelemek amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi (THERMO SCIENTIFIC/NICOLET 6700) gerçekleştirilmiştir. FTIR ölçümleri, 4000–600 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında ve 4 cm⁻¹ çözünürlükte yapılmıştır. Her numune için 3 tarama alınarak spektrumlar elde edilmiştir.

Şişme oranları, numunelerin distile su içerisine daldırılmasıyla ölçülmüştür. Ölçümler üç kez tekrarlanmıştır. Numuneler çözeltilerden çıkarıldıktan sonra yüzeyleri filtre kağıdıyla silinmiş, 0, 24, 48 ve 72 saatte kütle ölçümü yapılmış ve şişme oranları aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Şişme Oranı (\%)} = \frac{W_i - W_t}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

Burada, W_i başlangıçtaki kuru ağırlık ve W_t t zaman aralığında şişmiş ağırlıktır.

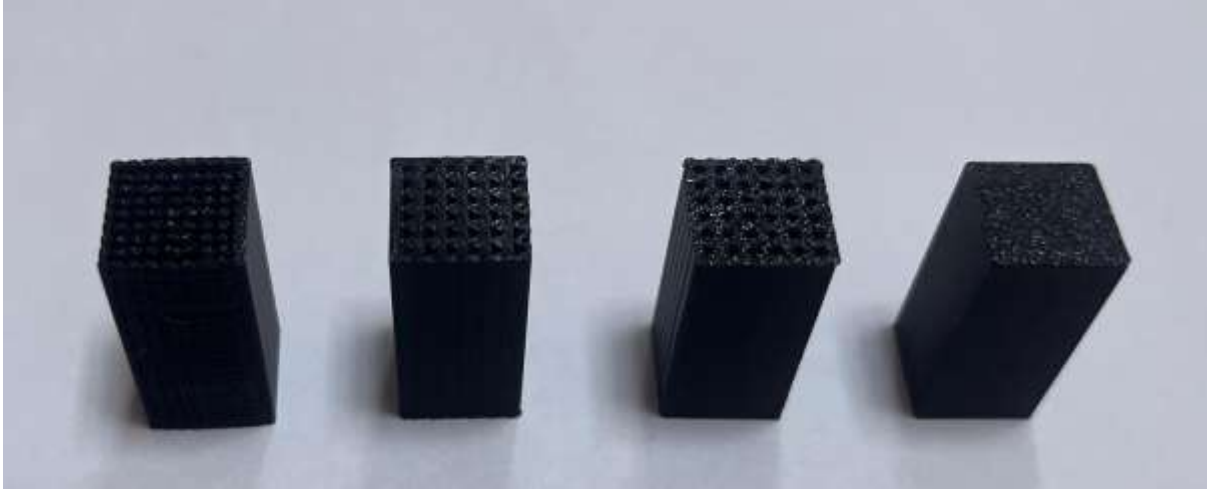
Hidrotermal yaşlandırma uygulanmamış ve uygulanmış numunelerin basma testleri 100 kN kapasiteli SHIMADZU marka üniversal mekanik test cihazı (Şekil 9) ile gerçekleştirilmiştir. Basma deneyleri ASTM D695-23, 2023 standartına göre yapılmıştır. Basma hızı 1,3 mm/dk ve basma oranı %50 olarak ayarlanmıştır. Her deney beş kez tekrarlanmıştır. Cihaz, hassas veri toplama özelliği ve kontrollü test koşulları sağlayarak güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.



Şekil 9. Üniversal mekanik test cihazı

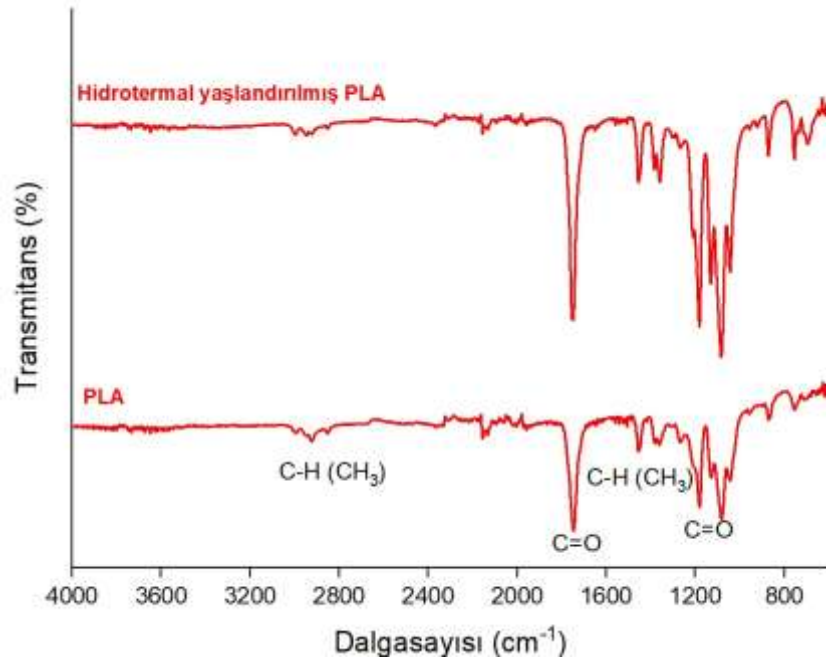
4. BULGULAR

Bu çalışmada FDM yöntemi kullanılarak PLA filamentten desensiz ve 3 farklı dolgu desenine (daire, altıgen, üçgen) sahip numuneler başarılı bir şekilde (Şekil 10) üretilmiştir.



Şekil 10. FDM yöntemi kullanılarak PLA filamentten üretilen desensiz ve 3 farklı dolgu desenine sahip numuneler

PLA ve 45 gün hidrotermal işlem görmüş PLA numunelerinin bağ değişimleri FTIR analizleri belirlenmiştir. Şekil 11’de PLA ve 45 gün hidrotermal işlem görmüş PLA numunelerinin FTIR spektrumları gösterilmiştir. Her iki spektrumda, $\sim 2995-2945\text{ cm}^{-1}$ aralığında bantlar $-\text{CH}_3$ gruplarına ait C–H gerilme titreşimlerini göstermektedir. $\sim 1750-1760\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki kuvvetli pik ise ester karbonil grubuna (C=O) ait gerilme titreşimlerini göstermektedir. Ek olarak, $1180-1080\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bantlar C–O–C ester bağlarının tipik titreşimlerine karşılık gelir. Bu sonuçlar, her iki numunede de PLA'nın kimyasal iskeletinin korunduğunu göstermektedir. Hidrotermal koşullandırma sonrası PLA spektrumunda, karbonil (C=O) bandında önemli bir şiddet artışı ve hafif bir genişleme görülmektedir. Hidrotermal ortamda ester bağlarının kısmi hidrolizi, zincir uçlarında $-\text{COOH}$ ve $-\text{OH}$ gruplarının oluşumuna neden olur. Ek olarak, $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ aralığında zayıf ancak net bir bant vardır. Bu bant, hidroksil ($-\text{OH}$) gruplarının varlığını göstererek su alımını ve hidrolitik bozunma mekanizmasını desteklemektedir. Bununla birlikte, PLA'nın temel kimyasal yapısının korunduğunu ve bozunmanın ileri düzeyde olduğunu gösteren yeni bir pik görülmemiştir (Savaris vd., 2017; Çelikkol vd., 2018)



Şekil 11. PLA ve 45 gün hidrotermal yaşlandırılmış PLA numunelerinin FTIR spektrumları

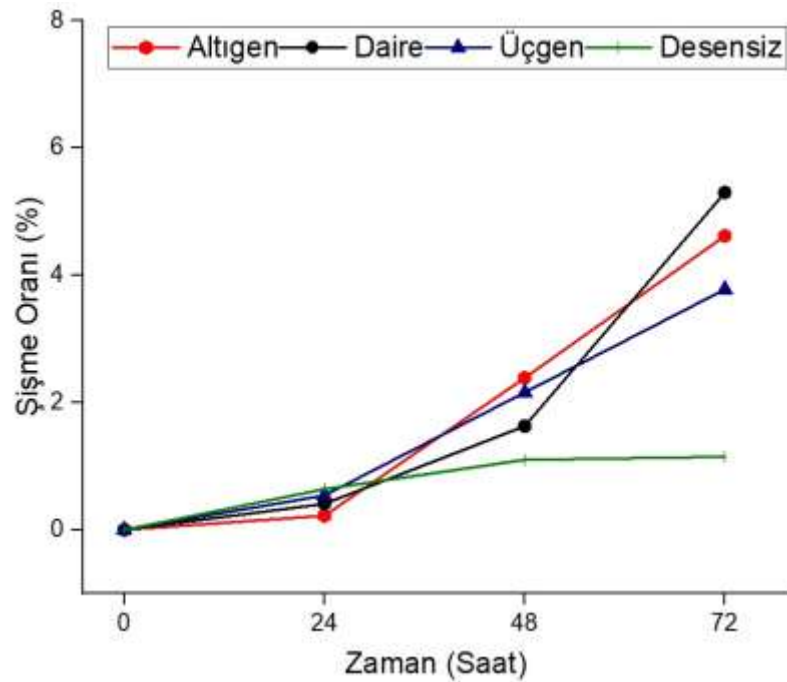
Polilaktik asit (PLA), bir alifatik polyester polimer olarak hidrotermal ortamda hidrolitik bozunmaya maruz kalabilen bir malzemedir. Literatürde, sıcaklık ve nemin artmasının PLA’da zincir kırılması ve moleküler ağırlık azalmasına yol açabildiği, bu süreçlerin özellikle kristal olanaklı olmayan amorf bölgelerde suyun polimer ağı içine difüzyonuyla hızlandığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, hidrotermal ortamın PLA üzerinde etkili olması için kritik eşiklerin bulunması gerektiği; örneğin çok yüksek nem ve sıcaklık koşullarının (örneğin 70°C’in üzerinde, uzun süreli yüksek RH) moleküler ağda belirgin hidroliz ve kütle değişimi oluşturduğu rapor edilmiştir. Bunun aksine, daha ılımlı koşullarda (örneğin 50°C ve belirli sürelerle kadar) PLA’nın ağırlıkça stabil kalabileceği ve kütlede anlamlı bir azalma göstermeyebileceği başka çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Tablo 1’de hidrotermal yaşlandırma sırasında numunelerin 0., 15., 30. ve 45. günde ölçülmüş kütle değerleri verilmiştir. Bu çalışmada uygulanan 50°C sıcaklık ve %95 bağıl nem kombinasyonunda, yüksek bağıl neme rağmen numunelerin kütle stabilitesini koruduğu görülmüştür. Böyle bir kütle kararlılığı, PLA’daki hidrolitik zincir kırılmasının başlangıç aşamalarında gerçekleşip kütle kaybına henüz yol açmamasıyla örtüşebilir; hidroliz ilk olarak polimer zincirlerinde kırılmaya ve moleküler ağırlığın düşmesine neden olur, ancak bu süreç genellikle kütlede hızlı bir azalma ile ölçülen bir “madde kaybı”na dönüşene kadar uzun süre gerektirebilir. Ayrıca, PLA’nın kristalin yapısı ve başlangıçtaki morfolojisi de yaşlanma cevabını etkileyerek su

absorpsiyonunu sınırlandırabilir ve bu da erken dönemde kütlede anlamlı bir değişimin gözlemlenmemesine yol açabilir. (Goetjes vd., 2022; Rocca-Smith vd., 2017)

Tablo 1. Hidrotermal yaşlandırma sırasında numunelerin kütle değişimleri

	0. gün	15. gün	30. gün	45. gün
Altıgen	3,01	3,01	3,01	3,01
Daire	2,44	2,44	2,44	2,44
Üçgen	3,70	3,70	3,70	3,70
Desensiz	4,79	4,79	4,79	4,79

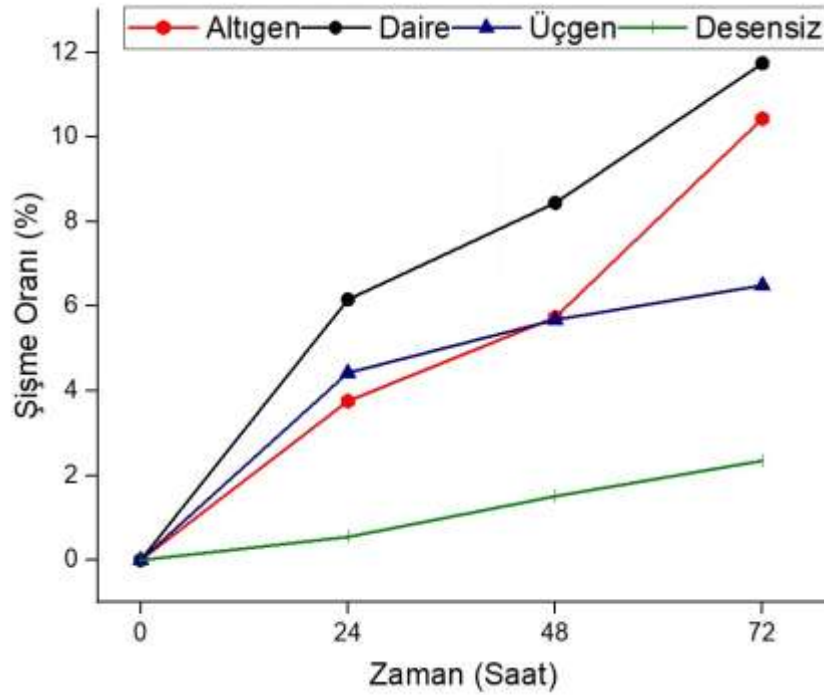
Desensiz ve farklı dolgu desenine sahip PLA numunelerin su alımı, 72 saatlik şişme oranı şeklinde Şekil 12’de verilmiştir. 72 saat sonunda desensiz numunenin şişme oranı en düşük (%1.15) elde edilmiştir. Dolgu desenleri PLA numunenin şişme oranını artırmıştır. Bu durum, yüksek gözenekliliğin su emilimini artırmak için geniş bir yüzey teması sağlaması ile açıklanabilir (Cheng vd., 2021). İlk 24 saat sonunda şişme oranları bütün numunelerde birbirine yakın ölçülmüştür. Şişme oranları literatür ile uyumludur (Choudhary vd., 2023).



Şekil 12. Desensiz ve farklı dolgu desenine sahip PLA numunelerin şişme testi sonuçları

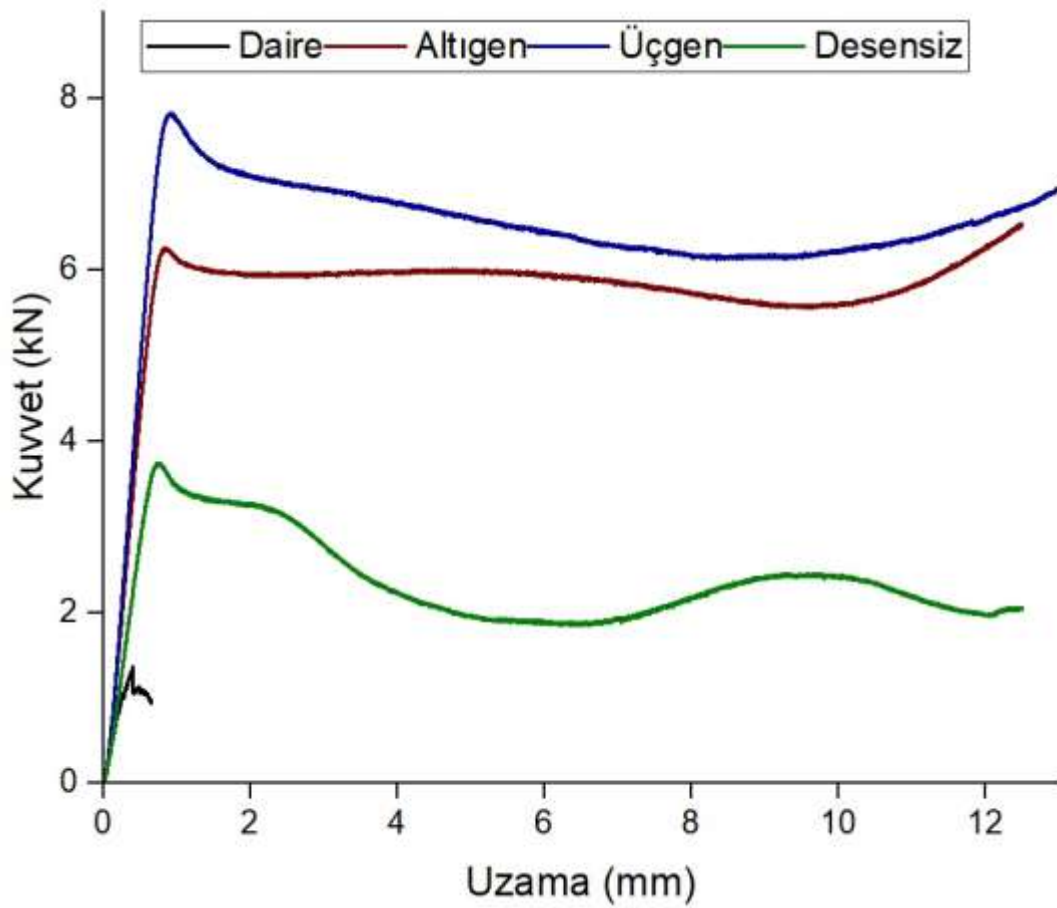
Hidrotermal yaşlandırma işlemi sonrasında desensiz ve farklı dolgu desenine sahip PLA numunelerin su alımı, 72 saatlik şişme oranı şeklinde Şekil 13’de verilmiştir. Hidrotermal yaşlandırma işleminden sonra tüm numunelerde şişme oranında artış gözlemlenmiştir. Hidrotermal ortamda su molekülleri PLA’ya nüfuz eder, bu sırada polimer zincirleri arasındaki boşluk artar ve numunede hacimsel olarak şişme meydana gelir (Bergaliyeva vd., 2022). Ayrıca polimer malzemelerde kristalin bölgeler daha az su absorbe ederken, amorf bölgeler şişme için

daha uygundur. Bu nedenle yaşlanma sonucu numunelerde kristalin bölgeler etrafındaki amorf kısımlar daha fazla su alabilir ve lokal şişme oluşturabilir (Momeni vd., 2023).



Şekil 13. Hidrotermal yaşlandırma işlemi sonrasında desensiz ve farklı dolgu desenine sahip PLA numunelerin şişme testi sonuçları

Basma testi sonuçları, PLA malzemesinin mekanik davranışının sadece malzemenin kendisinin özellikleriyle değil, aynı zamanda numune geometrisi ve yüzey özellikleriyle de güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu açıkça göstermektedir. Şekil 14’de görüldüğü gibi, farklı dolgu desenlerine sahip dört numune (daire, altigen, üçgen ve desensiz), ilk yükleme aşamasında benzer bir eğilim sergilemiş ve yaklaşık olarak ilk 1 mm uzama değerine kadar oldukça dik bir doğrusal artış göstermiştir. Bu, PLA'nın nispeten yüksek bir elastik modüle sahip olduğunu ve özellikle basma altında sert bir başlangıç davranışı sergilediğini göstermektedir. Ancak, başlangıçtaki tepe yük değerleriyle karşılaştırıldığında, geometrik farklılıkların PLA'nın yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 14. Farklı dolgu desenlerine sahip PLA numunelerin basma testleri ile elde edilen kuvvet- uzama eğrileri

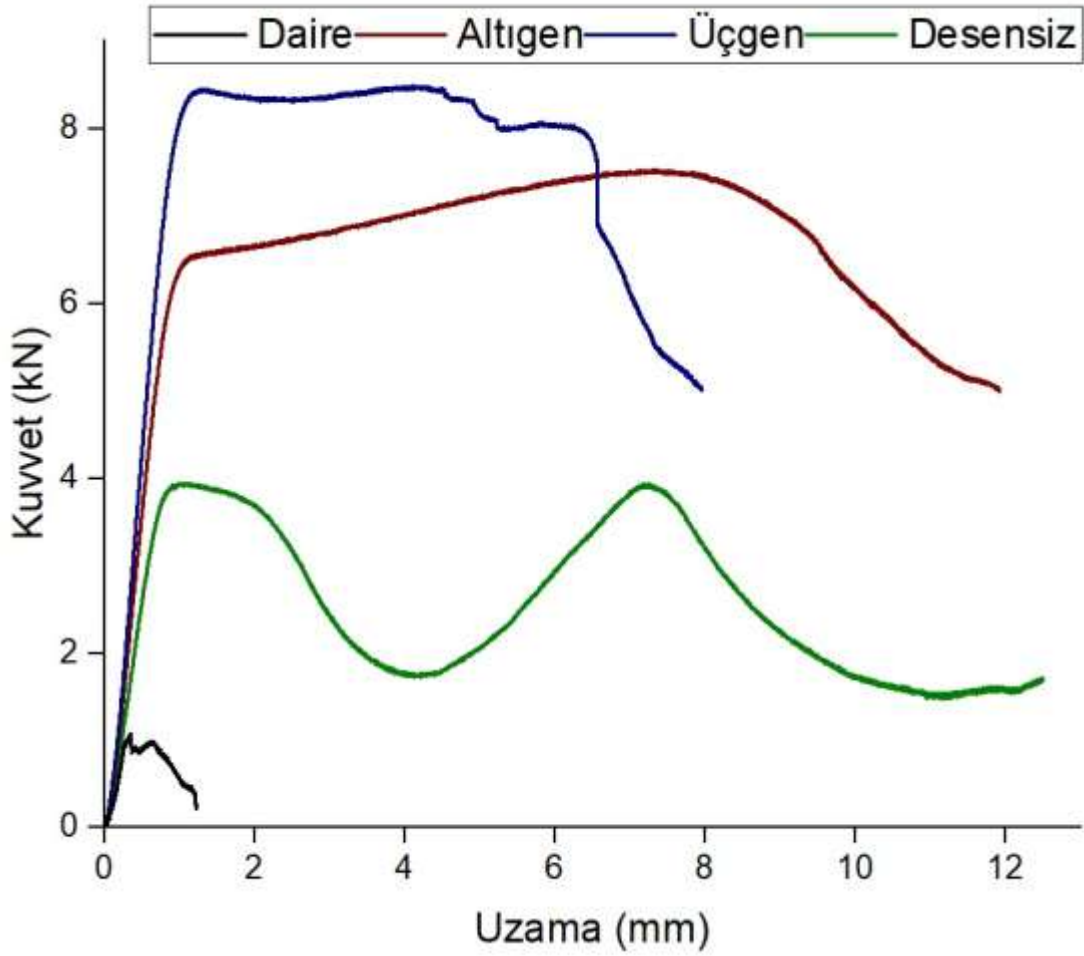
Üçgen dolgu desenli numune, yaklaşık $7,74\pm 0,05$ kN'lik en yüksek maksimum yüke ulaşarak, hem mukavemet hem de yük taşıma kapasitesi açısından en başarılı performansı sergilemiştir. Bunu yaklaşık $6,39\pm 0,09$ kN değerine sahip altıgen dolgu desenli numune izlerken, desensiz numune yaklaşık $3,77\pm 0,026$ kN maksimum kuvvete ulaşmış ve dairesel dolgu desenli numune sadece $1,35\pm 0,04$ kN gibi çok düşük bir yükte zirveye ulaşmıştır. Bu değerlere göre, üçgen dolgu desenli numuneler en yüksek mukavemeti sergilemiş ve PLA gibi termoplastik malzemelerde geometrik tasarımın mekanik performans üzerindeki belirleyici rolünü güçlü bir şekilde vurgulamıştır. Açısal dolgu deseninin (üçgen ve altıgen) gerilmeleri daha etkili bir şekilde dağıtarak yapının daha büyük yüklere dayanmasını sağladığı düşünülürken, dairesel dolgu desenli ve desensiz numunelerde yük daha homojen ancak daha düşük bir seviyede dağıtılır ve bu da erken yerel deformasyon, burkulma veya mikro sünmeye yol açar (Subramaniyan vd., 2022). İlk maksimum yükten sonra tüm eğrilerde gözlenen ani düşüş, PLA'nın kırılkan yapısını göstermektedir ve bu bölgede malzemede mikro çatlaklar, katmanlar arası ayrılma veya yerel kesme bantları oluşması muhtemeldir. Bununla birlikte, özellikle üçgen

ve altıgen geometrilere, tepe noktasından sonraki düşüşün daha sınırlı olması ve daha istikrarlı bir eğri ile devam etmesi, bu yapıların sıkıştırma altında deformasyona daha kontrollü bir şekilde tepki verdiklerini ve ani sünmeye karşı daha dirençli olduklarını ortaya koymaktadır. Uzama değerlerinin artmasıyla birlikte, üçgen ve altıgen numunelerde yükün tekrar yükselmeye başladığı ve yaklaşık 10-12 mm'de ikinci bir yukarı yönlü eğilim gösterdiği dikkat çekicidir.

Bu durum, malzemenin iç yapısının yoğunlaşması, yan yüzeylerin birbirine yaklaşması ve temas alanının artması sonucu ortaya çıkan, gerinim sertleşmesine benzer bir davranışla açıklanabilir. Düzgün olmayan numunede, bu gerinim sertleşmesi davranışı daha zayıf ve daha düzensizdir ve yük değerleri daha düşük aralıklarda dalgalanır; bu, yapının daha kararsız bir deformasyon rejimine sahip olduğunu gösterir. Dairesel kesitli numunede, hem maksimum yük hem de tepe sonrası davranış oldukça sınırlıdır, bu da bu geometrinin PLA için basınç yükü taşıma açısından elverişsiz bir yapı oluşturduğunu gösterir.

Eğrilerin altındaki alanı, yani enerji emme kapasitesini değerlendirirken, en yüksek performansın üçgen kesitte elde edildiği, bunu altıgen kesitin izlediği açıktır. Bu sonuç, PLA'nın, özellikle enerji darbe dağılımı ve yapısal bütünlüğün önemli olduğu uygulamalarda, üçgen veya altıgen gibi açılı ve stratejik olarak tasarlanmış kesit geometrileriyle kullanıldığında çok daha verimli sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Uygulama açısından bakıldığında, bu tür geometrik düzenlemeler, hafif ancak dayanıklı yapısal eleman tasarımından otomotiv iç ve dış parçalarına, ambalaj elemanlarına ve darbe emici sistemlere kadar geniş bir uygulama yelpazesinde PLA'nın daha etkili kullanımını sağlayabilir. Bu bakımdan, elde edilen sonuçlar, PLA ve benzer polimer malzemelerin mekanik performansını artırmak için sadece malzeme formülasyonunun değil, geometrik tasarım parametrelerinin de optimize edilmesinin gerekli olduğunu açık ve net bir şekilde göstermektedir (Dwivedi vd., 2024).

Genel olarak hidrotermal yaşlandırma sonrasında basma testleri (Şekil 15) sonrasında plastik deformasyonda azalma meydana gelmiştir. Desensiz numunede yükleme yönü boyunca hücre sayısına karşılık gelen iki gerilme zirvesi sergilemektedir. Bu fenomen, hücrelerin yükleme yönü boyunca aşamalı olarak tek tek çökmesi ile ilgili bir arıza davranışıdır (Li vd., 2026).



Şekil 15. Hidrotermal yaşlandırma uygulanmış farklı dolgu desenlerine sahip PLA numunelerin basma testleri ile elde edilen kuvvet- uzama eğrileri

Farklı dolgu desenlerine sahip numunelerin aksel basma altındaki dayanıklılık ve enerji sönmleme performanslarını nicel olarak karşılaştırmak amacıyla enerji emme (EA), özgül enerji emme (SEA), pik ezilme kuvveti (PCF) ve ortalama ezilme kuvveti (MCF) parametreleri hesaplanmıştır. EA, numunenin aksel sıkıştırma sırasında plastik deformasyon yoluyla absorbe ettiği toplam enerjiyi temsil etmekte olup, kuvvet–yer değiştirme eğrisinin integrali olarak tanımlanmaktadır. SEA, EA'nın numune kütlesine oranlanmasıyla elde edilen ve enerji emme performansının kütle verimliliği açısından değerlendirilmesini sağlayan kritik bir parametredir. PCF, sıkıştırma esnasında kaydedilen maksimum kuvvet değerini ifade ederken, MCF, deformasyon süreci boyunca aktarılan ortalama yük seviyesini ve dolayısıyla enerji emme sürecinin sürekliliğini ve stabilitesini yansıtmaktadır. Bu bağlamda, yüksek MCF değerleri, enerji emici yapıların darbe ve ezilme yükleri altında daha kararlı ve dirençli bir mekanik davranış sergilediğine işaret etmektedir. Tablo 2’de verilen sonuçlar incelendiğinde, üçgen dolgu desenine sahip numunenin diğer desen geometrilerine kıyasla en yüksek MCF

değerine ulaştığı ve bu nedenle aksel sıkıştırma altında üstün enerji emme ve yük taşıma kapasitesi gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, üçgen desen geometrisinin daha homojen gerilme dağılımı sağlaması ve progresif ezilme mekanizmasını desteklemesiyle ilişkilendirilebilir.

Tablo 2. Desensiz ve farklı dolgu desnelere sahip PLA numunelerin aksel basma altındaki dayanıklılık ve enerji sönümlenme performanslarını nicel olarak karşılaştırılması

		PCF (kN)	EA (J)	SEA (J/g)	MCF (kN)
PLA	Daire	1,35±0,04	0,68±0,15	0,14±0,03	0,74±0,18
	Altıgen	6,39±0,09	58,98±11,88	11,54±2,31	5,11±0,67
	Üçgen	7,74±0,05	77,17±4,12	15,46±0,86	6,12±0,24
	Desensiz	3,77±0,03	30,78±0,88	14,52±0,42	2,46±0,07
Hidrotermal Yaşlandırılmış PLA	Daire	1,26±0,16	0,81±0,02	0,33±0,01	0,69±0,02
	Altıgen	7,48±0,07	55,24±3,10	14,93±0,84	6,22±0,15
	Üçgen	8,47±0,02	77,73±1,89	25,91±0,63	7,19±0,40
	Desensiz	3,94±0,01	31,15±0,2	6,52±0,04	2,49±0,02

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ergiyik biriktirme modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerinin mekanik performansı üzerinde farklı dolgu desenlerinin ve hidrotermal yaşlandırma işleminin etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- FTIR analizleri 45 gün süreyle hidrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılan PLA numunelerinde ester bağlarının kısmi hidrolizine bağlı olarak hidroksil ve karboksil uç gruplarının oluştuğunu, ancak PLA'nın ana polimer omurgasının büyük ölçüde korunduğunu göstermekte; bu durum, hidrotermal işlemin PLA'da tam bir kimyasal bozunmadan ziyade erken evre hidrolitik yaşlanmaya yol açtığını ortaya koymaktadır.
- Hidrotermal yaşlandırma sırasında numunelerin 0., 15., 30. ve 45. günde kütle değerleri ölçülmüş ve uygulanan 50°C sıcaklık ve %95 bağıl nem kombinasyonunda, yüksek bağıl neme rağmen numunelerin kütle stabilitesini koruduğu görülmüştür.
- PLA numunelerin şişme testi sonucunda; 72 saat sonunda desensiz numunenin şişme oranı en düşük (%1.15) elde edilmiştir. Dolgu desenleri ise PLA numunenin şişme oranını artırmıştır.
- Hidrotermal yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelerle karşılaştırıldığında, hidrotermal yaşlandırma işleminden sonra tüm numunelerde şişme oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Basma testi sonucunda en yüksek mukavemet değeri üçgen dolgu desenine sahip numunede elde edilmiştir.
- Hidrotermal yaşlandırma yapılmış PLA numunelerde plastik deformasyonda azalma meydana gelmiştir.
- Hidrotermal yaşlandırma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerde; üçgen dolgu desenine sahip numunenin desensiz ve diğer desen geometrilerine kıyasla en yüksek ortalama ezilme kuvveti (MCF) değerine ulaştığı ve bu nedenle eksenel sıkıştırma altında üstün enerji emme ve yük taşıma kapasitesi gösterdiği belirlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, dolgu geometrisinin ve hidrotermal çevresel koşulların FDM ile üretilmiş PLA yapıların mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlar temel alındığında, gelecek araştırmalar için aşağıdaki konuların incelenmesi önerilebilir:

- FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerde, farklı dolgu oranları, katman kalınlıkları ve baskı yönlerinin hidrotermal yaşlandırma altındaki mekanik davranışa etkileri ayrıntılı olarak incelenebilir.
- Hidrotermal yaşlandırma süresi ve sıcaklığı değiştirilerek, PLA'daki hidrolitik bozunmanın kinetiği ve uzun süreli performans kayıpları ortaya konabilir.
- Yaşlandırma sonrası numunelerin mikroyapısal değişimleri (SEM, DSC, TGA gibi yöntemlerle) detaylı biçimde analiz edilerek mekanik davranış ile yapı-özellik ilişkisi daha kapsamlı şekilde açıklanabilir.

KAYNAKÇA

- Aboeella, M. G., Ebeid, S. J., & Sayed, M. M. (2025). Layer combination of similar infill patterns on the tensile and compression behavior of 3D printed PLA. *Scientific Reports*, *15*(1), 11759.
- Agarwal, R., Gupta, V., & Singh, J. (2022). Mechanical and biological behaviour of additive manufactured biomimetic biodegradable orthopaedic cortical screws. *Rapid Prototyping Journal*, *28*(9), 1690–1705.
- Akçay, Ö., & Arı, A. (2025). Effect of Infill Density and Infill Pattern on Mechanical Properties of 3D-printed PLA Produced by FFF. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *37*(1), 223–232.
- Akhoundi, B., & Behraves, A. H. (2019). Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Experimental Mechanics* 2019, *59*(6), 883–897.
- Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., & Mustafa, A. (2020). Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. *Polymer Testing*, *87*, 106557.
- ASTM International. (2023). *ASTM D695-23: Standard test method for compressive properties of rigid plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Balla, E., Daniilidis, V., Karlioti, G., Kalamas, T., Stefanidou, M., Bikiaris, N. D., Vlachopoulos, A., & Bikiaris, D. N. (2021). Poly(lactic acid): A versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties—from monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications. *Polymers*, *13*(11), 1822.
- Banjo, A. D., Agrawal, V., Auad, M. L., & Celestine, A. D. N. (2022). Moisture-induced changes in the mechanical behavior of 3D printed polymers. *Composites Part C: Open Access*, *7*, 100243.
- Bergaliyeva, S., Sales, D. L., Delgado, F. J., Bolegenova, S., & Molina, S. I. (2022). Effect of thermal and hydrothermal accelerated aging on 3D printed polylactic acid. *Polymers*, *14*(23), 5256.
- Birosz, M. T., Ledenyák, D., & Andó, M. (2022). Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*, *113*, 107654.
- Bodaghi, M., Damanpack, A. R., Hu, G. F., & Liao, W. H. (2017). Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing. *Materials & Design*, *131*, 81–91.
- Cabreira, V., & Santana, R. M. C. (2020). Effect of infill pattern in Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing on materials performance. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *25*(3), e-12826.
- Camargo, J. C., Machado, Á. R., Almeida, E. C., & Silva, E. F. M. S. (2019). Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *103*(5), 2423–2443.
- Caputo, M., Rashwan, O., Waryoba, D., & McDade, K. (2022). Surface texture and thermo-mechanical properties of material extruded and ironed polylactic acid. *Additive Manufacturing*, *59*, 103084.
- Carothers, W. H., Borough, G. L., & Natta, F. J. (1932). Studies on polymerization and ring formation. X. The reversible polymerization of six-membered cyclic esters. *Journal of the American Chemical Society*, *54*(2), 761–772.
- Castro-Aguirre, E., Iñiguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X., & Auras, R. (2016). Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *107*, 333–366.

- Çelikkol, Ö., Şahin, E., Yildiz, N., & Bayraktar, E. (2018). The Effect of Acetylation on the Hydrolytic Degradation of PLA/Clay Nanocomposites. *Journal of Polymers and the Environment* 2018, 26(10), 4131–4140.
- Chae, Y., & An, Y. J. (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 240, 387–395.
- Cheng, C. H., Shie, M. Y., Lai, Y. H., Foo, N. P., Lee, M. J., & Yao, C. H. (2021). Fabrication of 3D Printed Poly(lactic acid)/Polycaprolactone Scaffolds Using TGF- β 1 for Promoting Bone Regeneration. *Polymers*, 13(21), 3731.
- Choudhary, N., Ghosh, C., Sharma, V., Roy, P., & Kumar, P. (2023). Investigations on effect of pore architectures of additively manufactured novel hydroxyapatite coated PLA/Al₂O₃ composite scaffold for bone tissue engineering. *Rapid Prototyping Journal*, 29(5), 1061–1079.
- Dakhil, G. Y., Salih, R. M., & Hameed, A. M. (2022). The Influence of Infill Pattern and Infill Density on the (Tensile, Flexural and Impact) Strength Of 3D Printed Polymers. *AIP Conference Proceedings*, 2660(1), 020109.
- Dorgan, J. R., Braun, B., Wegner, J. R., & Knauss, D. M. (2006). Poly(lactic acids): A brief review. *ACS Symposium Series*, 939, 102–125.
- Dwivedi, K., Joshi, S., Nair, R., Sapre, M. S., & Jatti, V. (2024). Optimizing 3D printed diamond lattice structure and investigating the influence of process parameters on their mechanical integrity using nature-inspired machine learning algorithms. *Materials Today Communications*, 38, 108233.
- Edgar, J., & Tint, S. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. *Johnson Matthey Technology Review*, 59(3), 193–198.
- Ekinci, A., Gleadall, A., Johnson, A. A., Li, L., & Han, X. (2021). Mechanical and hydrolytic properties of thin polylactic acid films by fused filament fabrication. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 114, 104217.
- Fried, J. R. (2014). *Polymer science and technology* (3rd ed., pp. 1-2). Pearson Education.
- Galeta, T., Raos, P., Stojšić, J., & Pakši, I. (2016). Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects. *Procedia Engineering*, 149, 100–104.
- Ganeshkumar, S., Kumar, S. D., Magarajan, U., Rajkumar, S., Arulmurugan, B., Sharma, S., & Badran, M. F. (2022). Investigation of tensile properties of different infill pattern structures of 3D-printed PLA polymers: Analysis and validation using finite element analysis in ANSYS. *Materials*, 15(15), 5142.
- Giammaria, V., Capretti, M., Del Bianco, G., Boria, S., & Santulli, C. (2024). Application of Poly(lactic Acid) Composites in the Automotive Sector: A Critical Review. *Polymers*, 16(21), 3059.
- Goetjes, V., Zarges, J.-C., & Heim, H.-P. (2022). Differentiation between hydrolytic and thermo-oxidative degradation of poly(lactic acid) and poly(lactic acid)/starch composites in warm and humid environments. *Polymers*, 14(3), 456.
- Harun-Ur-Rashid, M., & Imran, A. B. (2024). Emerging Trends in Engineering Polymers: A Paradigm Shift in Material Engineering. *Recent Progress in Materials*, 6(3), 1–37.
- Hasan, M. R., Davies, I. J., Pramanik, A., John, M., & Biswas, W. K. (2024). Potential of recycled PLA in 3D printing: A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 3, 100020.
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2012). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5), 1191–1203.
- Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., & Abbas, N. (2024). A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications. *Giant*, 18, 100261.

- International Organization for Standardization (ISO). (2011). *ISO 188: Rubber, vulcanized or thermoplastic — Accelerated ageing and heat resistance tests*. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO/ASTM. (2015). *ISO/ASTM 52900:2015 – Additive manufacturing — General principles — Terminology*. Geneva, Switzerland: ISO. Retrieved January 18, 2026, from <https://www.iso.org/standard/69669.html>
- John, J., Devjani, D., Ali, S., Abdallah, S., & Pervaiz, S. (2023). Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(1), 62–78.
- Kafle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Shrestha, P. L., & Bastola, A. K. (2021). 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers*, 13(18), 3101.
- Kahya, Ç., Tunçel, O., Çavuşoğlu, O., & Tüfekci, K. (2025). Thermal annealing optimization for improved mechanical performance of PLA parts produced via 3D printing. *Polymer Testing*, 144, 108735.
- Khan, S. F., Zakaria, H., Chong, Y. L., Saad, M. A. M., & Basaruddin, K. (2018). Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 429(1), 012101.
- Kulkarni, R. K., Pani, K. C., Neuman, C., & Leonard, F. (1966). Polylactic Acid for Surgical Implants. *Archives of Surgery*, 93(5), 839–843.
- Lesaffre, N., Bellayer, S., Fontaine, G., Jimenez, M., & Bourbigot, S. (2016). Revealing the impact of ageing on a flame retarded PLA. *Polymer Degradation and Stability*, 127, 88–97.
- Li, M., Xu, Y., Wu, C., Li, Q., Wu, C., & Fang, J. (2026). Mechanical performance of FDM-printed PLA TPMS lattices under hydrothermal aging. *Thin-Walled Structures*, 218, 113924.
- Li, X., Lin, Y., Liu, M., Meng, L., & Li, C. (2023). A review of research and application of polylactic acid composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(13), e53477.
- Lubombo, C., & Huneault, M. A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications*, 17, 214–228.
- Maharana, T., Mohanty, B., & Negi, Y. S. (2009). Melt–solid polycondensation of lactic acid and its biodegradability. *Progress in Polymer Science*, 34(1), 99–124.
- Momeni, S., Craplewe, K., Safder, M., Luz, S., Sauvageau, D., & Elias, A. (2023). Accelerating the biodegradation of poly(lactic acid) through the inclusion of plant fibers: A review of recent advances. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(36), 15146–15170.
- Moradi, M., Aminzadeh, A., Rahmatabadi, D., & Hakimi, A. (2021). Experimental investigation on mechanical characterization of 3D printed PLA produced by fused deposition modeling (FDM). *Materials Research Express*, 8(3), 035304.
- Moradi, M., Meiabadi, S., & Kaplan, A. (2019). 3D Printed Parts with Honeycomb Internal Pattern by Fused Deposition Modelling; Experimental Characterization and Production Optimization. *Metals and Materials International*, 25(5), 1312–1325.
- Moreno Nieto, D., Alonso-García, M., Pardo-Vicente, M. A., & Rodríguez-Parada, L. (2021). Product Design by Additive Manufacturing for Water Environments: Study of Degradation and Absorption Behavior of PLA and PETG. *Polymers*, 13(7), 1036.
- Murariu, M., & Dubois, P. (2016). PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 17–46.
- Notta-Cuvier, D., Odent, J., Delille, R., Murariu, M., Lauro, F., Raquez, J.-M., & Dubois, P. (2014). Tailoring polylactide (PLA) properties for automotive applications: Effect of addition of designed additives on main mechanical properties. *Polymer Testing*, 36, 1–9.

- Nugraha, A. D., Mamba'udin, A., Susanto, B., Kusni, M., Darmanto, S., Santos, G. N., & Akhsin Muflikhun, M. (2023). The influence of long-term hydrothermal and physical ageing on the characteristics of additively manufactured bio-based photopolymer resin. *Results in Materials*, *20*, 100499.
- Olawumi, M. A., Oladapo, B. I., Ikumapayi, O. M., & Akinyoola, J. O. (2023). Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing. *Science of The Total Environment*, *905*, 167109.
- Peres, C., Matos, A. I., Conriot, J., Sainz, V., Zupančič, E., Silva, J. M., Gaspar, R. S., Pr eat, V., & Florindo, H. F. (2017). Poly(lactic acid)-based particulate systems are promising tools for immune modulation. *Acta Biomaterialia*, *48*, 41–57
- Pradeep, S. A., Deshpande, A. M., Limaye, M., Iyer, R. K., Kazan, H., Li, G., & Pilla, S. (2024). A perspective on the evolution of plastics and composites in the automotive industry. In M. Kutz (Ed.), *In Applied plastics engineering handbook: Processing, sustainability, materials, and applications* (3rd ed., pp. 705–748). Elsevier.
- Pretula, J., Slomkowski, S., & Penczek, S. (2016). Polylactides—Methods of synthesis and characterization. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *107*, 3–16.
- Rahman, M. Z., Rahman, M., Mahbub, T., Ashiquzzaman, M., Sagadevan, S., & Hoque, M. E. (2023). Advanced biopolymers for automobile and aviation engineering applications. *Journal of Polymer Research*, *30*(3), 106.
- Ranjbar, Z., Ranjbar, B., & Foroughirad, S. (2022). Biopolymers in automotive industry. In A. K. Nadda, S. Sharma & R. Bhat (Eds.), *Biopolymers: Recent updates, challenges and opportunities* (pp. 271–288). Springer, Cham.
- Rocca-Smith, J. R., Chau, N., Champion, D., Brachais, C.-H., Marcuzzo, E., Sensidoni, A., Piasente, F., Karbowiak, T., & Debeaufort, F. (2017). Effect of the state of water and relative humidity on ageing of PLA films. *European Polymer Journal*, *95*, 450–463.
- Sampath, U. G. T. M., Ching, Y. C., Chuah, C. H., Sabariah, J. J., & Lin, P. C. (2016). Fabrication of porous materials from natural/synthetic biopolymers and their composites. *Materials*, *9*(12), 991.
- Saniman, M. N. F., Hashim, M. H. M., Mohammad, K. A., Wahid, K. A. A., Muhamad, W. M. W., & Mohamed, N. H. N. (2020). Tensile Characteristics of Low Density Infill Patterns for Mass Reduction of 3D Printed Polylactic Parts. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *17*(2), 7927–7934.
- Savaris, M., Braga, G. L., Dos Santos, V., Carvalho, G. A., Falavigna, A., Machado, D. C., & Brandalise, R. N. (2017). Biocompatibility assessment of poly(lactic acid) films after sterilization with ethylene oxide: In vivo histological study with Wistar rats and in vitro fibroblast adhesion. *International Journal of Polymer Science*, 7158650
- Shekhar, N., & Mondal, A. (2024). Synthesis, properties, environmental degradation, processing, and applications of Polylactic Acid (PLA): an overview. *Polymer Bulletin*, *81*(13), 11421–11457.
- Signori, F., Coltelli, M. B., & Bronco, S. (2009). Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing. *Polymer Degradation and Stability*, *94*(1), 74–82.
- Singh, A., Guedes, R. M., Paiva, D., & Magalhães, F. D. (2020). Experiment and modelling of the strain-rate-dependent response during in vitro degradation of PLA fibres. *SN Applied Sciences*, *2*(2), 1–18.
- Singhvi, M. S., Zinjarde, S. S., & Gokhale, D. V. (2019). Polylactic acid: synthesis and biomedical applications. *Journal of Applied Microbiology*, *127*(6), 1612–1626.
- Solomon, I. J., Sevvil, P., & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, *37*(Part 2), 509–514.

- Subramaniyan, M., Karuppan, S., Prabanjan, P., Anand, A. P., & Vasanthan, A. P. (2022). Survey on compression property of sandwich 3D printed PLA components. *Materials Today: Proceedings*, 66(6), 955–961.
- Thomason, J., & Xypolias, G. (2023). Hydrothermal Ageing of Glass Fibre Reinforced Vinyl Ester Composites: A Review. *Polymers*, 15(4), 835.
- Top, N., Şahin, İ., Gökçe, H., & Gökçe, H. (2021). Computer-aided design and additive manufacturing of bone scaffolds for tissue engineering: state of the art. *Journal of Materials Research*, 36(19), 3725–3745.
- Trivedi, A. K., Gupta, M. K., & Singh, H. (2023). PLA based biocomposites for sustainable products: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(4), 382–395.
- Upadhye, M. C., Kuchekar, M. C., Pujari, R. R., & Sable, N. U. (2022). Biopolymers: A comprehensive review. *Open Access Research Journal of Science and Technology*, 4(1), 13–18.
- Verbeeten, W. M. H., & Lorenzo-Bañuelos, M. (2022). Material Extrusion Additive Manufacturing of Poly(Lactic Acid): Influence of infill orientation angle. *Additive Manufacturing*, 59, 103079.
- Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: A review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(4), 274–297.
- Vorkapić, M., Mladenović, I., Ivanov, T., Kovačević, A., Hasan, M. S., Simonović, A., & Trajković, I. (2022). Enhancing mechanical properties of 3D printed thermoplastic polymers by annealing in moulds. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(8), 16878132221120737.
- Wang, M., Xu, X., Ji, J., Yang, Y., Shen, J., & Ye, M. (2016). The hygrothermal aging process and mechanism of the novolac epoxy resin. *Composites Part B: Engineering*, 107, 1–8.
- Wang, X., Huang, L., Li, Y., Wang, Y., Lu, X., Wei, Z., & Liu, Y. (2024). Research progress in polylactic acid processing for 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*, 112, 161–178.
- Yarahmadi, N., Jakubowicz, I., & Enebro, J. (2016). Polylactic acid and its blends with petroleum-based resins: Effects of reprocessing and recycling on properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(36), 1–9.
- Yin, L., Tian, X., Shang, Z., Wang, X., & Hou, Z. (2019). Characterizations of continuous carbon fiber-reinforced composites for electromagnetic interference shielding fabricated by 3D printing. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 125(4), 266.
- Yılan, F., Alzraiqi, İ. M. M., & Urtekin, L. (2025). Study of geometric texture on tensile properties of PLA polymer parts produced by FDM. *Journal of Scientific Reports-A*, 62, 61–70.
- Zhao, D., & Zhou, Z. (2014). Applications of lightweight composites in automotive industries. In Y. Yang, H. Xu & X. Yu (Eds.), *Lightweight Materials from Biopolymers and Biofibers* (pp. 143–158). American Chemical Society.
- Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y., & Xiao, H. (2020). Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 27–35.
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors*, 24(7), 2668.

EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

YESMAGANBET, A. SERT, T. S., KELEŞ DAYAUÇ, A., BORAN, F., BARAN ACIMERT Ö., Use Of Pla In The Automotive Industry: The Effect Of Surface Geometry On Mechanical Properties, *INTERNATIONAL 8th BURSA SCIENTIFIC RESEARCH CONGRESS* , December 16-18, 2025 BURSA/TÜRKİYE.