

Polilaktik Asit (PLA) Esaslı Farklı Filamentlerle Biriktirilmiş Malzemelerin
Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Halil İbrahim Özer

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Şubat 2022

Investigation of Mechanical Properties of Fused Deposited Materials with Different
Polylactic Acid (PLA) Based Filaments

Halil İbrahim Özer

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Aviation Science and Technologies

February 2022

Polilaktik Asit (PLA) Esaslı Farklı Filamentlerle Biriktirilmiş Malzemelerin Mekanik
Özelliklerinin İncelenmesi

Halil İbrahim Özer

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

Şubat 2022

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Mustafa ULUTAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Polilaktik asit (PLA) Esaslı Farklı Filamentlerle Biriktirilmiş Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

16/02/2022

Halil İbrahim ÖZER

İmza

ÖZET

Günümüzde geleneksel üretim metotlarına alternatif olarak eklemeli imalat teknolojisi yaygınlaşmıştır. Eriyik biriktirme modelleme, düşük maliyeti ve kolay uygulanması sebebiyle sık tercih edilmektedir. Bu teknikte filament olarak Polilaktik Asit (PLA) malzemesi baskısı kolay ve yüksek yüzey kalitesine sahip olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. PLA mükemmel bir fiziksel ve reolojik özellikler dengesine sahip olmasına rağmen mekanik özelliklerini ve davranışını araştırmak, kullanılacak alana olan uygunluğunu değerlendirmek önemlidir. PLA filamentin kullanım alanının belirginleşmesini sağlamak, PLA Filamentler için belli bir standartın geliştirilmesine katkı sunmak ve PLA filament kullanıcılarının içerik sorgulaması konusunda bilinçlenmesini ve farkındalık oluşturulmasını sağlamak amacıyla bu çalışmada, ticarileşmiş on farklı markaya ait PLA filamentler ile üretilen malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar olarak numunelere çekme, eğme, darbe testi, sertlik ölçümleri ve XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizi ile kimyasal içeriği tespit edilen numunelerden polimer karışımları içeren markaların, tüm mekanik değerlerinin ortalamanın altında olduğu belirlenmiştir. Yapıda bulunan yüksek kalsit katkısının ise çekme dayanımını ve sertlik değerlerini olumsuz etkilediği, baryum sülfat katkısının ise mekanik özelliklere etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre kullanılan hammaddenin kalitesi, katkı malzemesinin türü, boyutu ve miktarına bağlı olarak mekanik özellikler değişmiştir. Ayrıca tamamen içerikten bağımsız olarak üretim ve ördürme parametrelerinin mekanik test sonuçları üzerinde etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PLA Filament, FDM, Eklemeli İmalat, 3B Yazıcı

SUMMARY

Today, additive manufacturing technology has become widespread as an alternative to traditional production methods. Fused deposition modeling is frequently preferred due to its low cost and easy implementation. In this technique, Polylactic Acid (PLA) material is widely used as a filament because it is easy to print and has high surface quality. Although PLA has an excellent balance of physical and rheological properties, it is important to investigate its mechanical properties and behavior and to evaluate its suitability for the area in which it will be used. The purpose of this study is to identify the area of use of PLA filament, contribute the efforts for standardising PLA filaments, and create and increase awareness about PLA filaments contents for users. In this study, the chemical and mechanical properties of materials produced with PLA filaments of ten different commercialized brands were investigated. As experimental studies, tensile, bending, impact tests, hardness measurements and XRD analyzes were performed on the samples. It was determined that all mechanical values of the brands containing polymer mixtures from the samples whose chemical content was determined by XRD analysis were below the average. It has been observed that the high calcite additive in the structure affects the tensile strength and hardness values negatively, while the barium sulfate additive has no effect on the mechanical properties. According to these results, the mechanical properties have changed depending on the quality of raw material used, the type, size and amount of the additive material. In addition, it has been observed that production and printing parameters have an effect on the mechanical test results, completely independent of content.

Keywords: PLA Filament, FDM, Additive Manufacturing, 3D Printer

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
İÇİNDEKİLER.....	1
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	3
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	4
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	6
1. GİRİŞ VE AMAÇ	7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	8
2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi	8
2.1.1. Eklemeli imalat teknolojisinin uygulama alanları ve geleceği	9
2.2. Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM) Yöntemi:	11
2.2.1. FDM yönteminde kullanılan malzemeler	12
<u>2.2.1.1. Polilaktikasit (PLA)</u>	<u>12</u>
<u>2.2.1.2. Akrilonitril bütadien stiren (ABS)</u>	<u>13</u>
<u>2.2.1.3. Akrilonitril stiren akrilat (ASA)</u>	<u>13</u>
<u>2.2.1.4. Polietilen tereftalat glikol (PETG)</u>	<u>13</u>
<u>2.2.1.5. Polipropilen (PP)</u>	<u>13</u>
3. PLA FİLAMENT VE ÖZELLİKLERİ.....	14
3.1. PLA Filament Üretim Aşamaları.....	14
3.2. PLA Filament Temel Özellikleri	15
3.3. PLA Filamentte Kullanılan Katkı Malzemeleri.....	18
3.3.1. Kalsit.....	18
3.3.2. Kitosan.....	19
3.3.3. Baryum sülfat	19
3.3.4. Talk.....	19

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.3.5. Selüloz	20
3.3.6. Nişasta	20
3.3.7. Ahşap tozu	20
3.4. PLA Filamentin Kullanım Alanları	21
4. YÖNTEM	22
4.1. FDM Methodu ile Numunelerin Modellenmesi ve Üretimi	23
4.1.1. Çekme testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi	26
4.1.2. Üç nokta eğme testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi	30
4.1.3. Sertlik ölçüm testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi	32
4.1.4. Çentik darbe testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi	33
4.1.5. XRD analizi için numunelerin hazırlanması	35
4.2. Karakterizasyon	35
4.2.1. Çekme Testleri.....	35
4.2.2. Üç nokta eğme testleri	38
4.2.3. Çentik darbe testleri.....	40
4.2.4. Sertlik ölçüm testleri.....	40
4.2.5. XRD analizi	41
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
5.1. Çekme Testi Sonuçları.....	42
5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	44
5.3. Çentik Darbe Testi Sonuçları	47
5.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları	48
5.5. XRD Analiz Sonuçları.....	49
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Derece
mm ²	Milimetrekafe
MPa	Megapaskal
J	Joul
N	Newton
HV	Vickers Sertliği

Kisaltmalar

FFF	Filament Biriktirme Üretimi
FDM	Eriyik Biriktirme Modelleme
PLA	Polilaktik Asit
ABS	AkrilonitrilBütadienStiren
ASA	AkrilonitrilstirenAkrilat
PETG	Polietilen Tereftalat Glikol
PP	Polipropilen
3D	3 Boyutlu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
STL	Stereolitografi
XRD	X-Ray Difraktometrisi
IP	Dolgu Modelleri
MFR	Erime Akış Hızı
FDA	Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi
RoHS	Restriction of Hazardous Substances Directive

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Eklemeli imalat yönteminin üretim aşamaları.....	8
2.2. FDM yönteminin şematik gösterimi.....	12
3.1. PLA filament üretim adımları.....	15
4.1. Yöntem akım şeması	22
4.2. Baskı Ayarları.....	25
4.3. Filament ayarları.....	25
4.4. Çekme numunesinin STL görüntüsü	26
4.5. Çekme testi numune baskıları a) A marka numune b) B marka numune.....	28
4.6. Çekme testi numune baskıları a) C marka numune b) D marka numune.....	28
4.7. Çekme testi numune baskıları a) E marka numune b) F marka numune.....	29
4.8. Çekme testi numune baskıları a) G marka numune b) H marka numune.....	29
4.9. Çekme testi numune baskıları a) I marka numune b) J marka numune	30
4.10. Üç nokta eğme numunesinin STL görüntüsü	30
4.11. Sertlik test numunesinin STL görüntüsü	32
4.12. Darbe testi numunesinin STL görüntüsü	34
4.13. Çekme testi a) sırasında b) sonrası	36
4.14.Çekme testi sonrası a) A marka test numuneleri b) B marka test numuneleri	36
4.15.Çekme testi sonrası a) C marka test numuneleri b) D marka test numuneleri	37
4.16.Çekme testi sonrası a) E marka test numuneleri b) F marka test numuneleri	37
4.17.Çekme testi sonrası a) G marka test numuneleri b) H marka test numuneleri	37
4.18.Çekme testi sonrası a) I marka test numuneleri b) J marka test numuneleri	38
4.19. Eğme testi a) başlangıcı b) sonu	38
4.20. Eğme testi sonrası a) A marka test numuneleri b) C marka test numuneleri	39
4.21. Eğme testi sonrası a) D marka test numuneleri b) E marka test numuneleri.....	39
4.22. Eğme testi sonrası a) F marka test numuneleri b) G marka test numuneleri.....	39
4.23. Eğme testi sonrası a) H marka test numuneleri b) I marka test numuneleri.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) A marka b) B marka.....	42
5.2.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) C marka b) D marka.....	43
5.3.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) E marka b) F marka.....	43
5.4.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) G marka b) H marka.....	43
5.5.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) I marka b) J marka.....	44
5.6.Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) A marka b) C marka	45
5.7.Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) D marka b) E marka.....	46
5.8.Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) F marka b) G marka.....	46
5.9. Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) H marka b) I marka.....	46
5.10. J markasına ait gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği.....	47
5.11. XRD analiz sonuç grafiği a) A marka b) B marka	51
5.12. XRD analiz sonuç grafiği a) C marka b) D marka	51
5.13. XRD analiz sonuç grafiği a) E marka b) F marka	51
5.14. XRD analiz sonuç grafiği a) G marka b) H marka	52
5.15. XRD analiz sonuç grafiği a) I marka b) J marka.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması.....	4
3.1. Filamentlere ait bazı özellikler.....	8
3.2. Filament ördürme dolgu desenleri.....	9
4.1. Uygulanan mekanik testler ve standartlara uygun test numune görselleri.....	16
4.3. Tüm markalara ait üç nokta eğme test numunelerinin baskı parametreleri.....	21
4.4. Tüm markalara ait sertlik test numunelerinin baskı parametreleri.....	22
4.5. Tüm markalara ait darbe test numunelerinin baskı parametreleri.....	24
5.1. Tüm markaların ait çekme testi sonuçları.....	30
5.2. Tüm markaların ait üç nokta eğme testi sonuçları.....	32
5.3. Tüm markalara ait çentik darbe testi sonuçları.....	35
5.4. Tüm markalara ait sertlik testi sonuçları.....	36
5.5. Tüm markalara ait XRD analiz sonuçları.....	37

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünya nüfusunun artışıyla üretim ve ekonomik büyüme hızlanmıştır. Üretimdeki artışa paralel olarak endüstriyel rekabet gücünün artması çeşitli katkı teknolojilerini doğurmuştur. Eklemeli imalat bu katkı teknolojilerinden biri olup, herhangi bir alete ihtiyaç duymadan karmaşık fonksiyonel yapılar üretebilmektedir.

Dünya pazarında, eklemeli imalat teknolojisinin en sık kullanılan türü, düşük maliyeti ve kolay uygulanması nedeniyle ekstrüzyon bazlı bir katkı teknolojisi olan eriyik biriktirme modelleme (FDM)'dir (Hodzic & Pandzic, 2019). Bu teknikte filament olarak birçok malzeme kullanılmasına rağmen PLA, ABS, PETG, ASA, PP gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Polilaktik asit (PLA), bitki esaslı olup biyolojik olarak parçalanabilen ve çevre dostu bir polimerdir. PLA genellikle eğitim, hobi ve prototip montajında kullanılmaktadır, ancak mekanik zayıflık, kırılabilirlik, suda çözünürlük oranı, yüksek maliyeti vb. dezavantajları nedeniyle kullanımı sınırlıdır.

PLA'nın diğer ticari polimerlerle rekabet edebilir özelliklere ulaşması için çeşitli katkı maddeleriyle desteklenebilmektedir (Uzun & Erdoğan, 2020). Böylece katkılı PLA filamentler otomotiv, havacılık, mimari, biyomühendislik, tıbbi ekipman, protez parçalar, fiktürler ve daha pek çok alanda yaygın olarak kullanılabilir hale getirilmektedir (Hodzic & Pandzic, 2019).

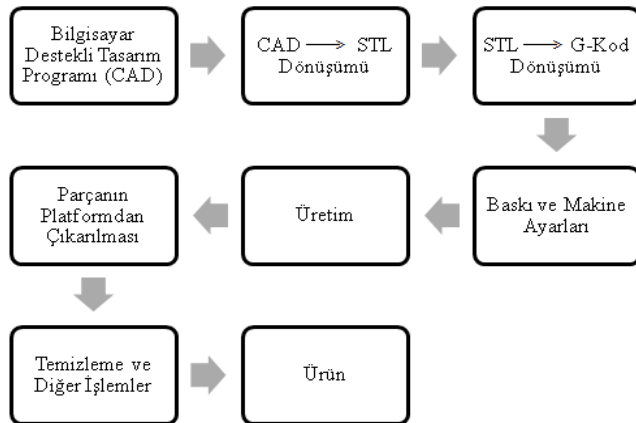
Bu çalışmada, PLA filamentin kullanım alanının belirginleşmesini sağlamak, PLA Filamentler için belli bir standart geliştirilmesine katkı sunmak ve PLA filament kullanıcılarının içerik sorgulaması konusunda bilinçlenmesine ve farkındalık oluşturulmasına destek olmak amaçlanmıştır. Bu bağlamda Türkiye'de ticarileşmiş on farklı markaya ait PLA filamentler çeşitli karakterizasyon işlemine tabi tutulup, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada literatür araştırılması yapılmış, çeşitli mekanik ve kimyasal analizler uygulanmış ve analiz sonuçları yorumlanarak öneriler geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

Eklemeli imalat yöntemi, 20. yüzyılın sonlarında ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, malzeme katmanı üzerine katman ekleyerek istenilen nesneleri oluşturmak için kullanılan teknolojileri tanımlamaktadır (Pelleg, 2020). Eklemeli imalatın temel prensibi, üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım (3D CAD) sistemi kullanarak oluşturulan bir modelin, geleneksel üretim yöntemlerine nazaran, süreç planlamasına gerek kalmadan doğrudan üretilebilmesidir. Günümüzde hızlı üretim ve prototipleme için yaygın olarak kullanılmasından dolayı hızlı prototipleme teknolojisi olarak da bilinmektedir.

Eklemeli imalatın, farklı standartlara sahip birçok yöntemi vardır. Bu yöntemlerinden herhangi biri ile istenilen parçanın prototipleşebilmesi ve üretilebilmesi için izlenmesi gereken adımlar genel olarak Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat yönteminin üretim aşamaları

Üretilmek istenilen parça, bilgisayar destekli bir tasarım programı (CAD) veya üç boyutlu tarayıcılar kullanılarak tasarlanır. Tasarlanan üç boyutlu data, STL formatına dönüştürülerek parçanın yüzeyleri üçgen parçalar şeklinde dilimlenir ve kullanılacak cihaza uygun bir G-Kod'a dönüştürülür. Tasarlanan parça, G-Kod ile cihaz üzerinde konumlandırılır ve üretim aşamaları oluşturulur. Cihazın baskı ayarları (sıcaklık, yazdırma deseni, destekler, dolgu oranı, yazdırma hızı, enerji yoğunluğu vb.) ve diğer makine ayarları da yapıldıktan sonra yazdırma işlemine başlanır. Yazdırma işlemi bitip, üretim tamamlandıktan sonra parça platformdan çıkartılır ve ana yapıda destek yapıları varsa temizlenir. Temizlenen parça nihai ürün haline gelir. Ardından kullanılacağı yere göre işlemleri (boyama, yüzey işlemleri, montaj vb.) yapılır.

2.1.1. Eklemeli imalat teknolojisinin uygulama alanları ve geleceği

Eklemeli imalat, hızlı üretim ve prototipleme avantajlarından dolayı özellikle tasarımcılar, mimarlar ve mühendisler gibi tasarımın önemli olduğu meslekler tarafından tercih edilmektedir. Yapılan parçaların, final tasarımı tamamlanmadan önce bir obje olarak tasarımı görmek, geleneksel üretim sırasında oluşabilecek hataları tespit etmesi açısından da oldukça büyük önem taşır.

Günümüzde gıda, hobi, inşaat, otomotiv, havacılık ve medikal sektörleri gibi sektörler eklemeli imalat teknolojilerini kullanmaya başlamışlardır. Otomotiv sektöründe; konsol parçaları, fren pedalları, direksiyon, motor blokları vb. parçaların prototipleri ve nihai ürünler için, gıda sektöründe; müşterilerden gelen özel talepler doğrultusunda, yiyecek tasarımları için, sanat ve hobicilikte; tasarım, kalıplama veya figür oluşturma için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, akademilerde ve araştırma merkezlerinde; bilimsel araştırmalar için gerekli olan prototiplerin yapılması, endüstrilerde yeni ürün tasarımlarının modellemeleri için bu teknolojinin kullanımı büyük bir oranda yer bulmaktadır (Diksu,2021).

Uçaklarda ve uzay araçlarında kullanılan malzemelerin kalite standartları yüksek olduğundan dolayı, maliyetlerin yüksek olduğu bilinmektedir. Eklemeli imalatın kullanımıyla, hammadde gereksinimlerinin azalması, üretim maliyetlerinde büyük düşümlere sebep olmaktadır. Airbus'ın geliştirdiği THOR isimli insansız uçak sistemi, hafifleyen

uçakların daha düşük yakıt tüketmelerini sağlamış olup, yakıt tüketiminden doğan karbondioksit salınımlarının da azaltılması sağlamıştır (Sezer vd, 2021). Gelişen teknolojiyle birlikte tüm sektörlerde olan eksiklikler neticesinde katmanlı imalat teknolojilerinin gelecekte havacılık ve ilgili alanlarda çok daha önemli bir yere sahip olacağı ön görülmektedir.

Eklemeli imalat yöntemlerinin, ayrılan standartları çerçevesinde birçok yöntemi bulunmaktadır. Kullanıcılar yöntemlerden kendileri için uygun olanı seçerek, prototiplerini oluşturabilmektedir. Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinin 7 kategoriye ayrılmış hali Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. ASTM Standartlarına göre eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Diksu,2021)

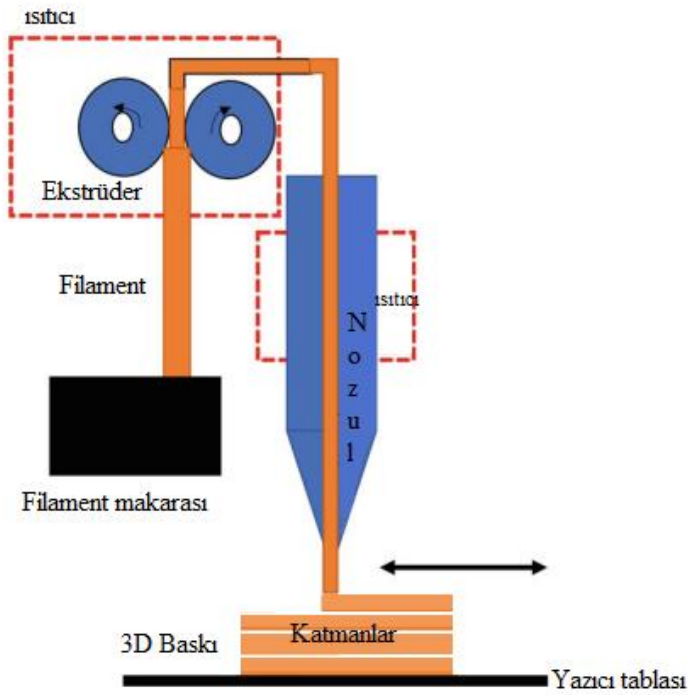
Yöntem	Teknoloji	Kullanılan Malzeme	Kullanılan Enerji
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtmeli Baskı (Binder 3D)	Polimer Tozları Seramik Tozları Metal Tozları	Termal Enerji
Katman Laminasyonu	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Polimer Film Metal Sac Seramik Bant	Termal Enerji
Yönlendirilmiş Enerji Birikimi	Lazerle Tasarlanmış Net Şekil (LENS)	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
	Elektronik Işın Kaynağı (EBW)		
Malzeme Püskürtme	Polyjet-Injet Baskı	Fotopolimer Vaks	Termal Enerji
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi(SLA)	Fotopolimer Seramikler	Ultraviyole Lazer
Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM)	Termoplastik Seramik Çamurları Metal Macunları	Termal Enerji

Çizelge 2.1. ASTM Standartlarına göre eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Diksu,2021)

Toz Füzyonu	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Poliamid/Polimerler Metal Tozları Seramik Tozları	Yüksek Güçte Lazer Işını
	Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS)		
	Seçici Lazer Eritme (SLM)		
	Elektron Işını Eritme (EBM)		Elektron Işını

2.2. Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM) Yöntemi:

FDM (Eriyik biriktirme modelleme), eklemeli imalat yöntemlerinden en yaygın kullanıma sahiptir. FDM ile üretimin gerçekleşebilmesi için tasarıma ait STL formatında dataya ihtiyaç vardır. Bu yöntemde üretim için kullanılan malzeme filamenttir. Bu yüzden bu yöntem FFF (filament biriktirme üretimi) olarak da bilinmektedir. Şekil 2.2’de FDM yönteminin şematik gösterimi yer almaktadır. Üretim için baskı ve cihaz ayarları filament malzemesine uygun olarak ayarlanır. Yazıcının ekstrüder kafasında eriyik hale gelen filament, nozul aracılığıyla plaka üzerine basılır. Nozul, data talimatlarına göre yapıyı oluşturmak için üç serbestlik derecesinde (x,y,z) hareket edebilir. Filament, datadaki ürün oluşana kadar katman katman ilerler.



Şekil 2.2. FDM yönteminin şematik gösterimi (Mwema & Akinlabi, 2020)

2.2.1. FDM yönteminde kullanılan malzemeler

FDM 3D yazıcıların çoğunun üretim malzemesi düşük maliyetli termoplastiklerdir. Filament, termoplastik malzemelerin 3 boyutlu yazıcı için kullanılmak üzere özel olarak şekillendirilmiş halidir. Kullanılan filament malzemesine göre 3D yazıcılar tasarlanmaktadır. Bazı FDM sistemlerinde, polimer bileşenlerini yazdırmak için çoklu ekstrüzyon nozulleri kullanılabilir. Polilaktik asit (PLA) filament olarak kullanılan en yaygın malzemedir. PLA dışında ABS, ASA, PETG, PP diğer sık kullanılan malzemeler olup, çeşitli özelliklerini iyileştirmek için bu malzemelere katkı malzemeleri de katılmaktadır. Ayrıca, karbon fiber gibi özel bileşenli kompozit filamentlerde kullanılmaktadır.

2.2.1.1. Polilaktikasit (PLA)

PLA, mısır veya çeşitli bitki küspesinden elde edilen bir polyester türüdür. Biyolojik olarak doğada parçalanabilen bir yapıya sahiptir PLA filamentler; yüksek mekanik özelliklere, yüzey kalitesine ve baskı kolaylığına sahiptir. Saf olarak üretildiği takdirde herhangi bir gaz salınımı yapmamaktadır.

2.2.1.2.Akrilonitril bütadien stiren (ABS)

ABS, fiziksel darbelere ve aşındırıcı kimyasallara karşı dirençli, petrol bazlı bir termoplastiktir. ABS filamentleri, aşınmaya dayanıklı parçalar yazdırmaya izin veren tokluğa, ısı ve darbe direncine sahiptir.

2.2.1.3.Akrilonitril stiren akrilat (ASA)

ASA, ABS malzemesine alternatif olarak geliştirilmiş amorf bir termoplastiktir. ASA filamentler, geliştirilmiş darbe direnci, ultraviyoleye ve sert hava koşullarına karşı direnci nedeniyle dış mekân uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.1.4.Polietilen tereftalat glikol (PETG)

PET malzeme bileşimine glikol eklenmesiyle oluşturulan amorf bir termoplastiktir. Eklenen glikol, malzemenin kristalleşmesini ve kırılmasını önler. PET'e göre daha dayanıklı ve şekillendirilebilirliğe sahip PETG filamentler, iyi darbe direnci, boyutsal kararlılığı sebebiyle, büyük tasarım özgürlüğü sunar ve birçok uygulama için uygundur.

2.2.1.5.Polipropilen (PP)

PP, sert ve dayanıklı termoplastik türüdür. PP filamentler, yüksek kimyasal ve yorulma direncine, yarı esnek/hafif özelliklere ve gıdalarda kullanıma uygunluğu nedeniyle kullanımları gün geçtikçe artmaktadır.

2. PLA FİLAMENT VE ÖZELLİKLERİ

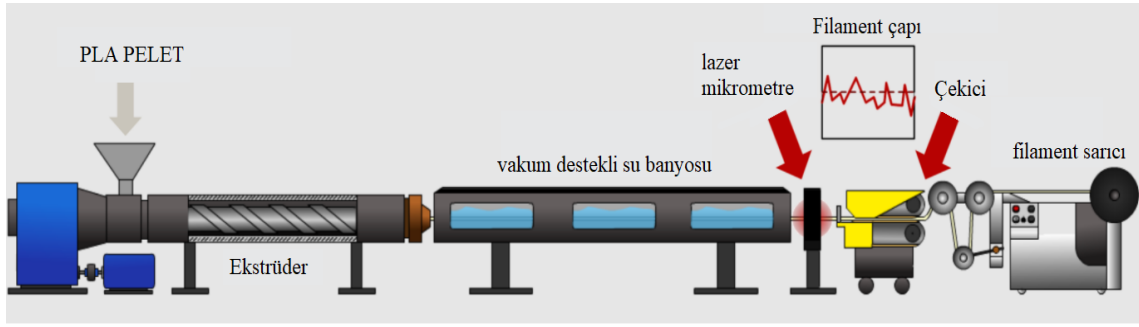
Polilaktikasit (PLA), çeşitli uygulamalara sahip biyolojik olarak parçalanabilen bir polimerdir. Günümüzde PLA sentezi için kullanılan laktik asitin büyük bir kısmı mısır ve manyoktan elde edilir. Laktik asit, nişasta ve selüloz gibi karbonhidratların fermantasyonundan meydana gelmektedir (Tueen, 2019). Mevcut petrokimyasal polimerlerden farklı olarak PLA, çevre dostu üretime sahip olması, yazdırılırken zararlı gaz yaymaması ve baskı kolaylığı sebebiyle popüler yazıcı malzemesidir

3.1. PLA Filament Üretim Aşamaları

Fermantasyon işlemiyle elde edilmiş laktik asit, işlendikten sonra granül haline getirilir ve filament hammaddesi olarak kullanılır. Filamente belirli özellikler katmak için granüller katkı maddeleri ile karıştırılabilir. Bu katkı maddeleri, rengi belirleyen renklendiriciler veya darbe direnci, mukavemet, yapısal bütünlük ve hatta manyetik özellikler gibi özelliklere katkıda bulunan diğer şeyleri içerebilir (Jackson,2020).

Elde edilen PLA karışım ekstrüdere yüklenir. Isıtma odasında malzeme eriyerek yuvarlak bir ağızlıktan ip benzeri şekilde çıkarak soğutma bölümüne geçer. Filament ısıtma bölümünden ayrıldıktan sonra birden fazla su odasından çekilir.

Ardından motorlar, PLA filamenti soğutma odasından sarma mekanizmasına çeker. Filament, 1,75 mm veya 2,85 mm olan hedef çapın toleransı dahilinde olduğundan emin olmak için lazer cihazıyla filament çapının ölçümü yapılır. Malzemeye göre doğru sıcaklık ayarı, çekilme hızı gibi parametreler filamentin çapını belirler. Filament daha sonra bir makaraya bağlanır ve etrafına sarılır (Jackson,2020). Şekil 3.1’de PLA filament üretim adımlarına ait şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.1. PLA filament üretim adımları (Plastic Processing, 2020)

3.2. PLA Filament Temel Özellikleri

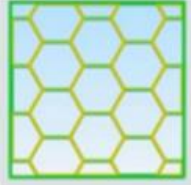
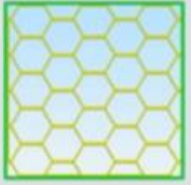
PLA filamentler, çeşitli filamentler arasında en popüler olanıdır. Hafif esnek ve sert bir yapısı vardır ancak kırılgandır. İyi gerilme kuvveti ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklere sahip olup camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı düşüktür. Geleneksel polimer filamentlere kıyasla üretim ve baskı sırasında kötü koku yaymaz ve kolay baskı alınır. Ayrıca PLA filamentler, mükemmel katman yapışması ve yüzey kalitesine sahiptir. Optimize edilmiş baskı sıcaklığı, yatak tablası sıcaklığı, kalibrasyonu ve üretim hızı ile problemsiz baskılar yapılabilmektedir. Etil asetat gibi organik solventlerde çözülebilir ve baskı sonrası destek parçaları organik çözücülerle temizlenebilir. Çeşitli filamentlere ait bazı özellikler çizelge 3.1’de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Filamentlere ait bazı özellikler

Filament	Özel özellikler	Yoğunluk (g/cm ³)	Esneklik	Dayanıklılık	Baskı zorluğu	Baskı sıcaklığı (°C)	Yatak sıcaklığı (°C)
PLA	-Biyolojik olarak parçalanır. -Baskı kolaylığı	1,24	Düşük	Orta	Düşük	180-230	Isıtmalı yatak gerekmez. 60-80°C önerilir.
ABS	-Darbeye dayanıklı	0,90	Orta	Yüksek	Orta	210-250	70-100
ASA	-Sert, dayanıklı -Hava koşullarına dirençli	1,07	Düşük	Yüksek	Orta	220-260	90-120
PETG	-İyi darbe ve ısı direnci	1,2	Yüksek	Yüksek	Orta	220-235	Isıtmalı yatak gerekmez. 60-80°C önerilir.
PP	-Esnek -İyi kimyasal direnç	1,04	Yüksek	Orta	Yüksek	210-230	120-150

FDM ile üretilen PLA parçalarının dolgu deseni (IP'ler), belirli mekanik özellikleri etkilediği bilinmektedir. Tam petek, doğrusal, üçgen, hızlı petek, ızgara ve kıvrık olmak üzere altı tip dolgu deseni vardır (Moradi vd., 2021). Altı tip dolgu desen yapı ve özellikleriyle beraber çizelge 3.2'de yer almaktadır. Bu çalışmada tüm markanın ürünleri aynı şartlar altında değerlendirileceği için bu baskı model tipi değişken olmaktan çıkarılmış tüm markalar aynı hassasiyet ve desen tipinde basılmıştır. Maliyet ve hız açısından Iızgara desen tipi uygulanmıştır.

Çizelge 3.2. Filament ördürme dolgu desenleri (Moradi vd., 2021)

Desen	Yapı	Özellik
Tam Petek (Full Honeycomb)		Arı paneli veya petek dolgusu yükü ve ağırlığı hassas bir şekilde dağıtmak için altıgen geometridir.
Doğrusal (Rectilinear)		Dikdörtgen doğrusal desen, her yönde güçlü bir ağ sağlar.
Üçgen (Triangular)		Üçgen desen, uygulanan kuvvetlere karşı daha yüksek dayanıma sahiptir.
Hızlı Petek (Fast honeycomb)		Hızlı petek, dikdörtgen doğrusal desenden daha büyüktür, ancak daha uzun bir baskı süresine sahiptir.
Izgara (Grid)		Izgara, diğer desen tiplerine göre en hızlı olanıdır.
Kıvrık (Wiggle)		Kıvrık, yeterli destek sağlar ve geri tepme kuvvetini artırır.

Moradi vd, kaynaşmış biriktirme modellemesi (FDM) ile üretilen parçaların belirli mekanik tepkileri üzerindeki dolgu modellerinin (IP'ler) etkisini sistematik olarak deneysel olarak araştırmayı amaçlamışlardır. Basılı malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlamak için 6 farklı dolgu deseni üzerinde akma, uzama, çekme mukavemeti ve absorblanan enerji gibi temel faktörleri hesaplamak için tek eksenli bir çekme testi uygulanmıştır. Sonuçlar, dolgu desenlerinin PLA parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip

olduğunu ve farklı iyi özelliklerin elde edilmesi için farklı dolgu desenlerin kullanılabileceğini göstermektedir. Deneysel çalışmalar neticesinde, üçgen dolgu deseni en yüksek dayanıma ve Young modülüne, kıvrık ve hızlı petek modelleri ise en yüksek uzama ve absorblanan enerjiye sahip olduğu gözlemlenmiştir (Moradi vd., 2021). Ayrıca PLA filament üretiminde, filament üreticileri nihai ürüne farklı bir renk, ısı direnci veya mukavemet gibi gelişmiş özellikler kazandırmak için katkı maddeleri kullanmaktadır.

3.3. PLA Filamentte Kullanılan Katkı Malzemeleri

PLA mükemmel bir fiziksel ve reolojik özellikler dengesine sahip olmasına rağmen, özelliklerin aralığını daha da genişletmek ve malzemeyi belirli uygulamalar için optimize etmek amacıyla birçok katkı maddesi eklenir. Katkı maddesi ne olursa olsun, iyi dispersiyon sağlanmalıdır. Her formülasyonda ekstrüder vida konfigürasyonunun, üretim hızının, RPM'nin, sıcaklığın ve diğer proses parametrelerinin optimize edilmesi gereklidir (Network, 2007).

Genel olarak, kalsit, kitosan, baryum sülfat, talk, selüloz, nişasta ve ahşap tozu gibi katkı ve dolgu maddeleri maliyeti azaltmak, fiziksel, reolojik, termal, mekanik veya optik gibi özelliklerini değiştirmek için PLA ile birleştirilir.

3.3.1. Kalsit

İnert bir malzeme olan kalsit, genel olarak maliyet düşürücü dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kalsit fiyatta ucuzluk getirirken sertlik değerlerinde artışa neden olmaktadır. Dike, kalsit ilavesinin PLA esaslı kompozitlerin mekanik, eriyik akışı ve morfolojik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Kalsit minerali ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 konsantrasyonlarında PLA ile karıştırılmıştır. Kalsit takviyeli PLA, saf PLA'ya göre daha yüksek çekme ve darbe mukavemeti değerleri verdiğini gözlemlenmiş olup artan kalsit miktarı ile PLA'nın sertliği de artmıştır. Ayrıca saf PLA'ya kıyasla, kalsit takviyeli PLA biraz yüksek MFR değerleri vermiştir. Morfolojik karakterizasyonlarda, kalsit parçacıkları düşük ekleme oranlarında PLA matrisi içinde homojen şekilde dağıldığı görülmüştür. Elde edilen tüm sonuçlara göre %10 ve %15 kalsit takviyeli PLA uygun olarak belirlenmiştir (Dike, 2020).

3.3.2. Kitosan

Kitosan, apatit oluşumunu iyileştirmenin yanı sıra biyolojik tepkileri artırma yeteneği nedeniyle iyi bilinen bir doğal biyopolimerdir. Singh vd, 3D baskı teknolojisi olan FFF (Eriyik Biriktirme Üretimi) kullanılarak biyomedikal uygulamalar için kitosan takviyeli PLA iskelelerinin üretilebilirliğini göstermişlerdir. Kitosan, PLA polimerine 1, 1.5 ve %2 olmak üzere farklı ağırlık oranlarında ilave edilmiştir. Kitosan içeriği, %2'den daha fazla olduğunda, kompozit malzemenin filament formunda ekstrüde edilmesini zorlaştırdığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kitosan ağırlık oranı arttıkça çekme mukavemeti azaldığı görülmüş olup, %1 kitosan içeriği, saf PLA'nın mekanik mukavemetinin tatmin edici derecede iyileştirdiği belirlenmiştir (Singh vd., 2020).

3.3.3. Baryum sülfat

Baryum sülfat filamentlerde genellikle filamentin yoğunluğunu, asit direncini ve opaklığı artırmak için maliyet düşürücü dolgu maddesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca gelişmiş radyo-opaklıkları nedeniyle bazı özel uygulamalar için kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Gang vd, radyasyon kalkını olarak kurşun yerine, çevre dostu bir madde olan baryum sülfat ve bir 3D yazıcı malzemesi olan PLA filamentini karıştırarak koruyucu malzemeler geliştirmeyi amaçlamışlardır. Baryum sülfat tozunun karıştırma oranı %0-30 aralığında denenmiştir. Baryumun karışıma en uygun karışım oranı %30 olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmaya dayalı olarak tanınal radyasyon alanında bir 3D yazıcı kullanılarak morfolojik bir kalkının üretiminin mümkün olduğunu kanıtlamışlardır (Gang & Kim, 2020).

3.3.4. Talk

Talk , yumuşak bir mineraldir. Genel olarak maliyet düşürücü ve çekirdekleştirici ajan olarak kullanılmasının yanı sıra ısı direncini, aşınma ve kayma direncini, dayanıklılığı artırır. Yu vd, PLA, talk ile karıştırılmış, statik/dinamik mekanik, termal ve morfolojik özellikler araştırılmıştır. %3 ve %6 konsantrasyonlarında PLA içerisine eklenmiş olup, talkın çekirdekleştirici katkı özelliği sebebiyle PLA'nın kristalizasyon yeteneğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kristalleşme üzerinde tam kontrol gerçekleştirmesine olanak sağlayacağı bildirilmiştir (Yu vd., 2019).

3.3.5. Selüloz

Selüloz içeriği yüksek olan ceviz kabuğu unu, çam ağacı unu ve diğer selüloz lifi kaynakları PLA içerisine eklendiği takdirde PLA'nın sertliğini ve ısı direncini arttırmaktadır. (Network, 2007) Arockiam vd, 3D baskılı selüloz ile güçlendirilmiş polilaktik asit biyokompozit filamentleri geliştirmeyi amaçlamışlardır. Ağırlıkça %1, 3, 5 selüloz içeren PLA karışımlar elde edilmiştir. Sonuç olarak selüloz takviyesinin PLA'nın kristalleşmesini arttırdığını ve camsı geçiş sıcaklığını düşürdüğünü belirlemişlerdir (Joseph Arockiam vd., 2021).

3.3.6. Nişasta

Nişasta PLA içerisine genel olarak maliyet düşürmek için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra PLA içinde bir çekirdekleştirici ajan olarak hareket ettiği, malzemenin ısı direncini ve elastisite modülünü arttırdığı bildirilmiştir (Network, 2007).

3.3.7. Ahşap tozu

Tao vd, ahşap tozu dolgulu polilaktik asit (PLA) kompozit filamentlerinin geliştirilmesini araştırmışlardır. %5 ahşap tozundan oluşan PLA kompozit filament, saf PLA filamenti ile karşılaştırıldığında, ahşap tozu eklenmesinin malzeme kırılma yüzeyinin mikro yapısını değiştirdiği, kompozitin ilk deformasyon direncinin arttığı, kompozitin başlangıç termal bozunma sıcaklığının biraz düştüğü ve erime sıcaklığı üzerinde hiçbir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır (Tao vd., 2017).

Joseph Arockiam vd, üç boyutlu baskı için kullanılan PLA Filamente %0, 10,20,30,40 ve 50 oranına ahşap dolgu maddesi ekleyerek test etmişlerdir. Odun içeriği arttıkça filament yoğunluğu önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, saf PLA filamentin çekme direncinin 55 MPa olduğu, %10 ahşap parçacıklı filamentin çekme direncinin 57 MPa ve %50 ahşap parçacıklı filamentin ise çekme direncinin 30 MPa olduğu saptanmıştır. Saf PLA baskılı bileşenlerin yüzeyi pürüzsüz ve boşluksuzdur, ancak ahşap partikülünün arttırılmasıyla filament yüzeyinin daha gözenekli ve daha pürüzlü gözüktüğü bildirilmiştir (Joseph Arockiam vd., 2021).

3.4. PLA Filamentin Kullanım Alanları

PLA tamamen doğal, toksik olmayan bir polimer olduğundan gıda, medikal, kozmetik gibi alanlarda kullanılabilirliğinin yanı sıra eğitim, havacılık, inşaat, tekstil, tasarım, hobi vb gibi alanlarda tercih edilen polimerlerdendir.

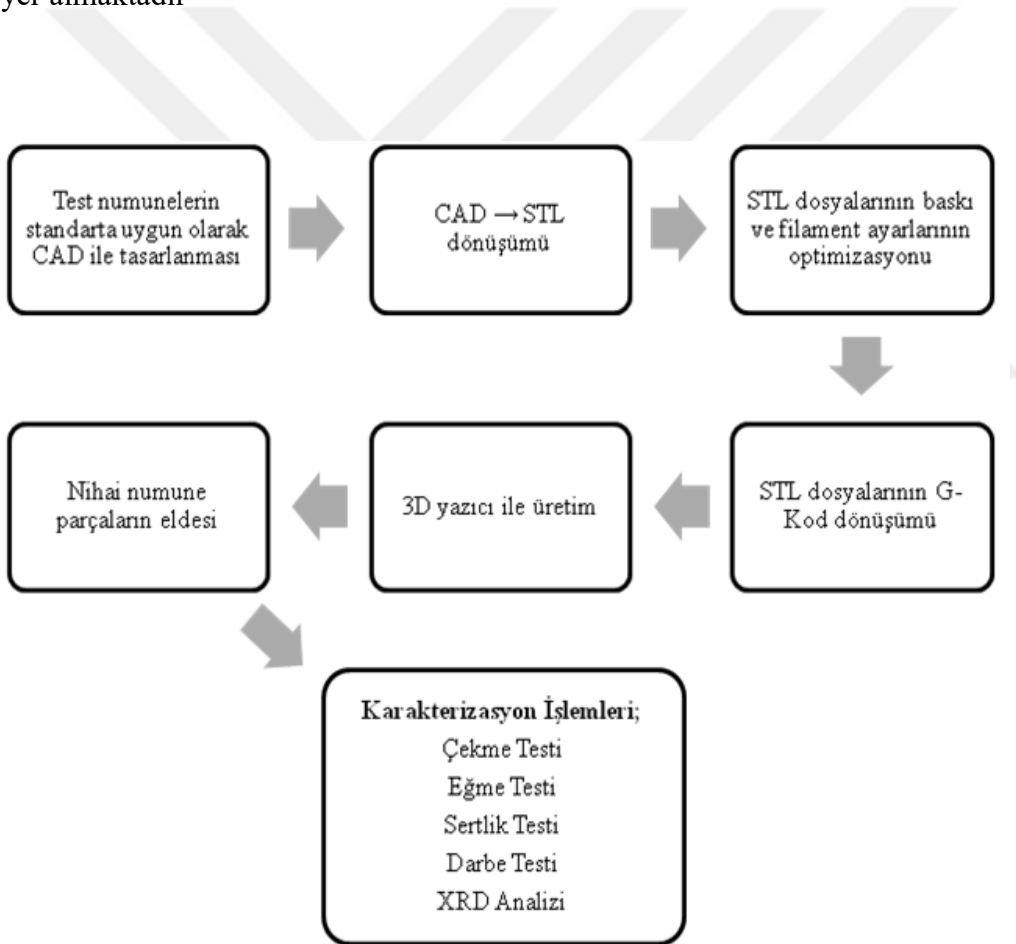
Katmanlı imalat yönteminde PLA kullanımıyla prototiplerin hızlı üretimi, kolay test ve tasarım süreçleri, kısalan teslimat süreleri, minimize edilen süreç hataları sağlanmaktadır. Tasarlanan parçalar karmaşık bir yapıya sahip olsa da PLA kullanımının üretim kolaylığı ve 3D yazıcı teknikleri ile daha kısa sürede, daha az maliyetle ve istenilen özelliklerde üretim süreçleri gerçekleştirilmektedir. Çocuklar için üretilen oyuncaklar, mimari modeller, gıda saklamaları, mutfak araç ve gereçleri, tasarım prototipleri gibi kullanım örnekleri verilebilir.

Bunların yanı sıra PLA 55-60°C'den daha yüksek sıcaklığa, güneş ışınlarına ve darbeye maruz kalması gerekmektedir. Ancak kullanım alanlarına göre istenilen özellikleri kazandırmak için PLA filamentte çeşitli katkı malzemeleri de eklenmektedir. Son zamanlarda metal ve seramik içerikli PLA kompozit filamentleri havacılık ve uzay alanında kullanımı araştırılmaktadır.

NASA, dünyanın ilk üç boyutlu roket motoru ateşleyicisini test etmiş ve kullanılan ateşleyici, bakır alaşımı ve Inconel kullanılarak üretilmiştir. Böylece ateşleyicinin imalatından hem maliyet hem de zaman tasarrufu sağlanmıştır (Liu vd., 2019).

4. YÖNTEM

Ticarileşmiş PLA filamentlerin mekanik ve kimyasal özelliklerin incelenmesi için 10 farklı markaya ait PLA filamentler satın alınmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için standartlara uygun olarak çekme, eğme, darbe test ve sertlik ölçüm numuneleri hazırlanmış ve 3D yazıcıda optimize edilen parametrelerle basılmıştır. Kimyasal özelliklerin belirlenmesi için ise XRD analizinden faydalanmıştır. Yönteme ait akım şeması Şekil 4.1’de yer almaktadır



Şekil 4.1. Yöntem akım şeması

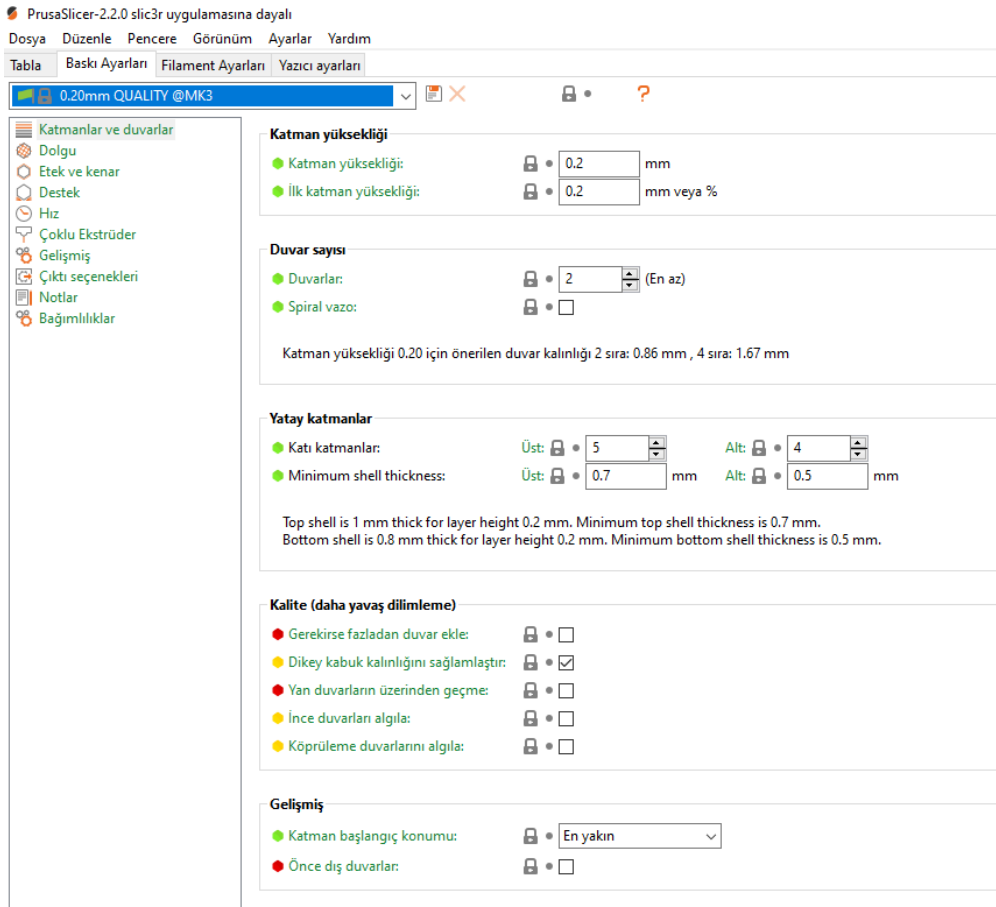
4.1. FDM Methodu ile Numunelerin Modellenmesi ve Üretimi

Farklı markalara ait PLA filamentlerin mekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için çekme, darbe, üç nokta eğme, XRD testi ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. İlgili testlere ait belirli standartlar doğrultusunda hazırlanan test numune ölçüleri Çizelge 4.1’de yer almaktadır. Standartlara uygun modellenen şekiller STL dosyasına dönüştürülerek Original Purusa i3 MK3 marka 3D yazıcı kullanılarak test numuneleri hazırlanmıştır. Baskı ayarları Şekil 4.2 ve 4.3’te yer almaktadır.

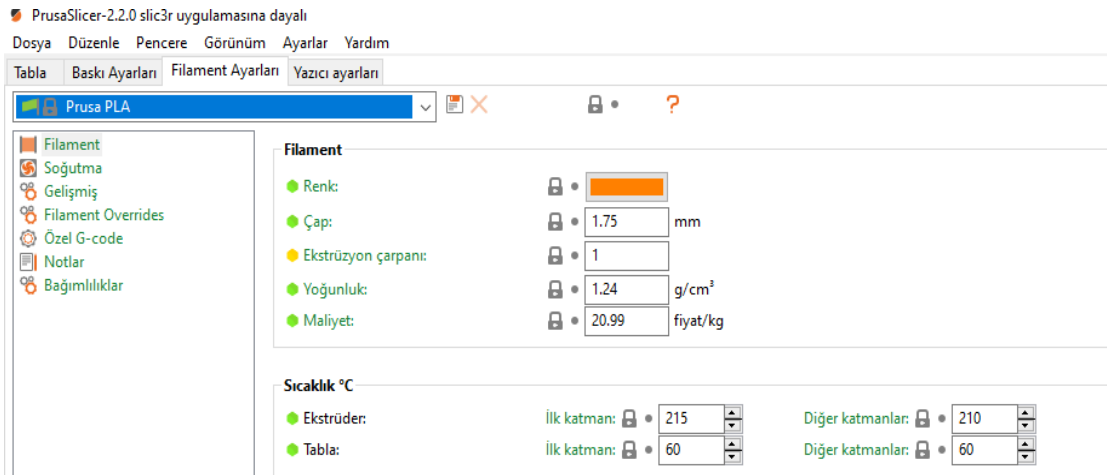
Tez kapsamında yapılan ön çalışmalarda baskı tipi deseni belirlemek için maliyet – performans niteliği göz önüne alınmıştır. Bu bağlamda Moradi (2021) yaptığı çalışmada en optimum desen modelinin “Hızlı Petek” olduğunu belirtmiştir. İkinci sırada ise “Dikdörtgen Doğrusal Desen”in her yönden güçlü bir ağ yapısı sağladığını, üçüncü olarak “Izgara Desen”in süre olarak en hızlı baskı sağladığını söylemiştir. Bu nedenle ilk olarak hızlı petek deseni kullanarak G kodları oluşturulduğunda dikdörtgen doğrusal desende beş saat olan baskı süresi hızlı petek desene geçildiğinde bu süre dokuz saate çıkmıştır. Izgara desen üzerinden G kodları çıkarıldığında aynı ürün üç saatte normal hassasiyette basılabilmektedir. Tüm markanın ürünleri aynı şartlar altında değerlendirileceği için bu baskı model tipi değişken olmaktan çıkarılmış, tüm markalar aynı hassasiyet ve desen tipinde basılmıştır. Çalışmada on markadan çeşitli mekanik testler için 120 numune olduğu göz önüne alındığında maliyet etkinliği hızlı petek deseni ve dikdörtgen doğrusal desen için kaybolmuştur.

Çizelge 4.1. Uygulanan mekanik testler ve standartlara uygun test numune görselleri

TEST	STANDART	NUMUNE ADETİ	BOYUTLAR	GÖRSEL	DOLULUK
Çekme Testi (Tensile Test)	ASTM 638 Tıp 1	3	Kalınlık:3,2 mm Genişlik: 19mm Toplam Uzunluk:165mm		%100
Darbe Testi (Charpy)	ASTM D6110-10	3	A: 10 mm $61.0 \text{ mm} < B < 63.5 \text{ mm}$ $124.5 < C < 127.0$ E: 12.7 ± 0.15 D: 0.25 R		%100
Eğme Testi (Flexural Test 3 Point)	ASTM D790	3	Kalınlık:2 mm Genişlik: 12,7 mm Toplam Uzunluk:80mm		%100
Sertlik Testi (Vickers Hardnes)	ASTM D785	3	Genişlik:13mm Uzunluk: 25mm Kalınlık: 6mm		%100



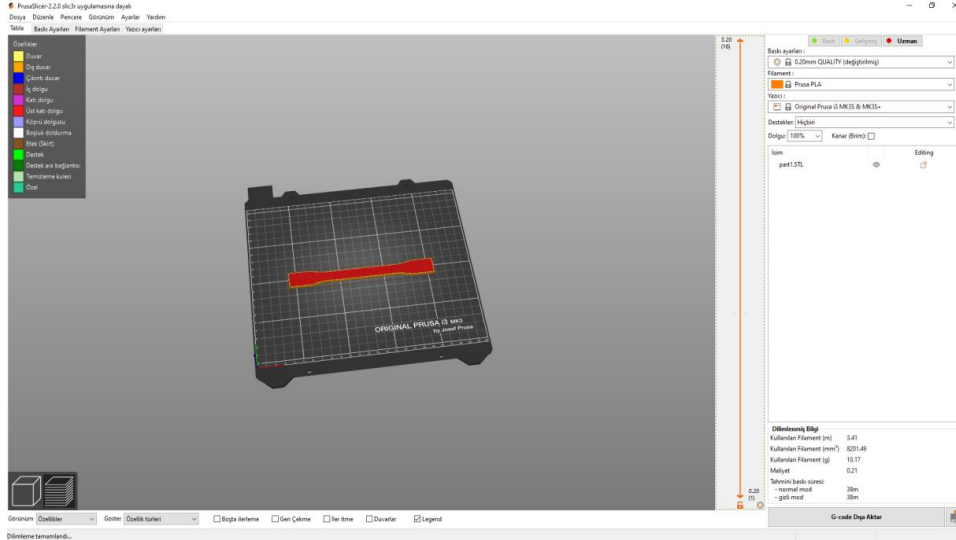
Şekil 4.2. Baskı Ayarları



Şekil 4.3. Filament ayarları

4.1.1. Çekme testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi

ASTM 638 Tip 1 standartlarına uygun olarak hazırlanan çekme numunesinin STL görüntüsü Şekil 4.4'te yer almaktadır.



Şekil 4.4. Çekme numunesinin STL görüntüsü

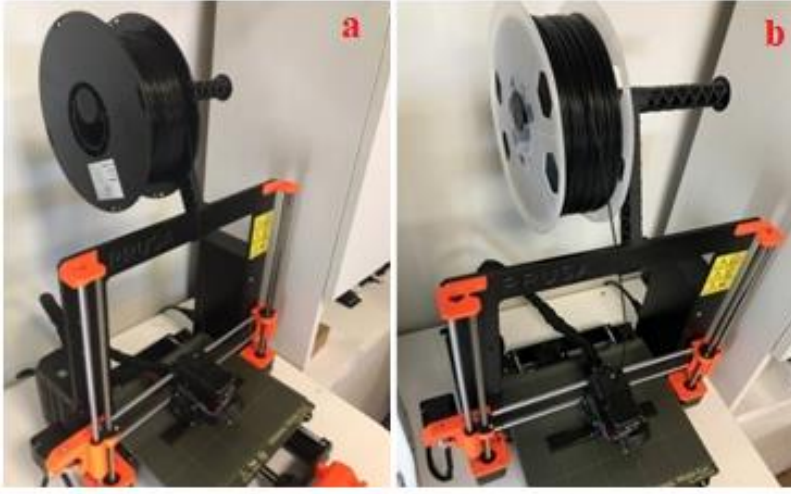
Çizelge 4.2'de bütün markaların çekme test numunelerinin baskı parametreleri yer almaktadır. Tüm numunelerin baskı sırasına ait fotoğrafları ise sırasıyla Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'da yer almaktadır.

Çizelge 4.2 Tüm markalara ait çekme test numunelerinin baskı parametreleri

Marka	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı	Not
A	215°C	70°C	İlk katmanda yapışma problemi gözlemlendiğinden tabla sıcaklığı 60°C'den 70°C'ye çıkarılmıştır. Baskı sırasında filamentte tıkanma, tablaya ve kendine yapışmada zorluklar gözlemlenmiştir.
B	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmıştır fakat baskı alınamamıştır. Ardından sıcaklıklar 220°C ve 70°C olarak değiştirilmiştir fakat nozulda tıkanma meydana gelmiş ve nozul değiştirilmiştir. Baskı bitinceye kadar benzer problemler yaşanmıştır.

Çizelge 4.2 Tüm markalara ait çekme test numunelerinin baskı parametreleri

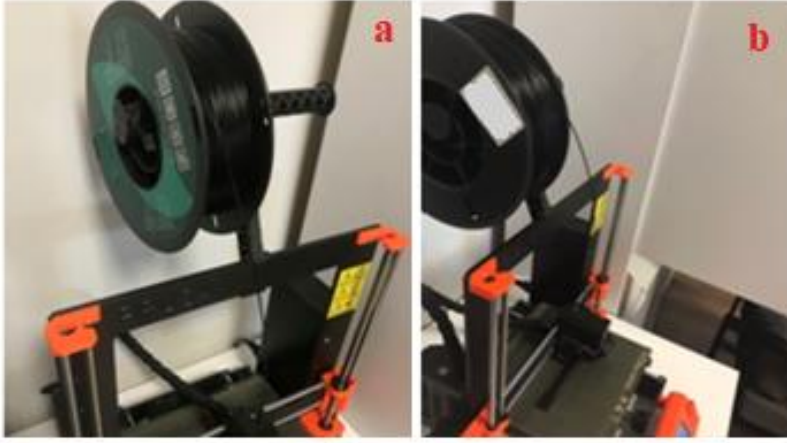
C	215°C	70°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmıştır. İlk katmanda yapışma problemi yaşanmıştır tabla sıcaklığı 70°C'ye ayarlanmıştır.
D	221°C	65°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmıştır. Yer yer filament erimediği gözlemlenmiş ve nozul sıcaklığı 221°C'ye yükseltilmiştir
E	218°C	65°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı 65°C'ye ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
F	223°C	70°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 60°C olarak ayarlanmıştır. Tablaya zor yapışma ve filament erimeme problemi gözlemlenmiştir. Ardından tabla sıcaklığı 70°C ve nozul sıcaklığı 223°C'ye ayarlanmıştır.
G	225°C	73°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 60°C olarak ayarlanmıştır. Baskı bitinceye kadar tablaya zor yapışma ve filament erimeme problemi gözlemlenmiştir. Nozulda tıkanma yaşanmıştır. Ardından tabla sıcaklığı 73°C ve nozul sıcaklığı 225°C'ye ayarlanmıştır.
H	215°C	65°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmıştır. Baskı bitinceye kadar sorun yaşanmamıştır.
I	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmıştır. İlk katmanda yapışma problemi ve filament erimeme yaşanmıştır. Ardından nozul sıcaklığı 220°C ve tabla sıcaklığı 70°C'ye ayarlanmıştır.
J	218°C	65°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmıştır. Tablaya yapışma problemi yaşanmamış fakat iki kere baskı sırasında filamentte kopma meydana gelmiştir.



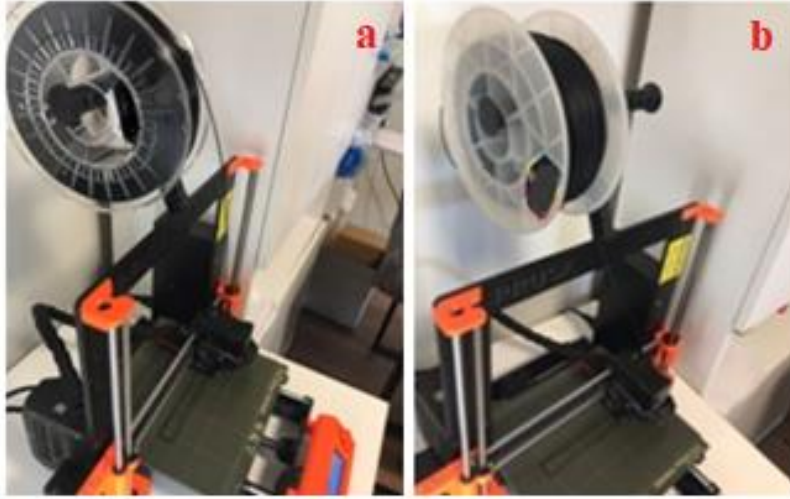
Şekil 4.5. Çekme testi numune baskıları a) A marka numune b) B marka numune



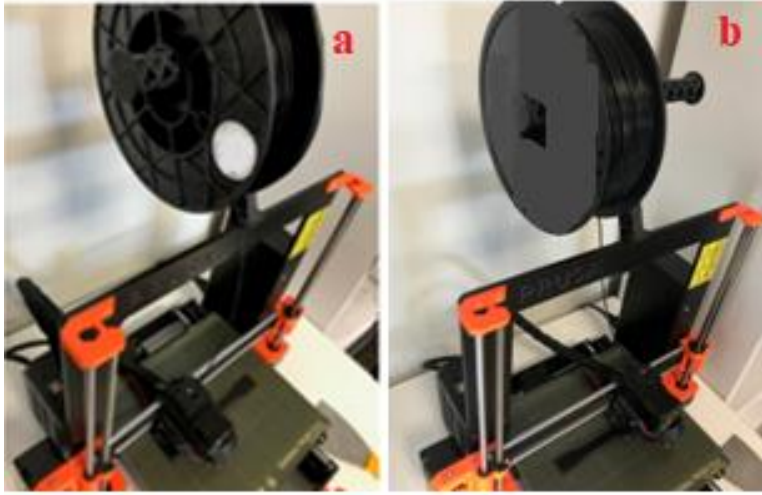
Şekil 4.6. Çekme testi numune baskıları a) C marka numune b) D marka numune



Şekil 4.7. Çekme testi numune baskıları a) E marka numune b) F marka numune



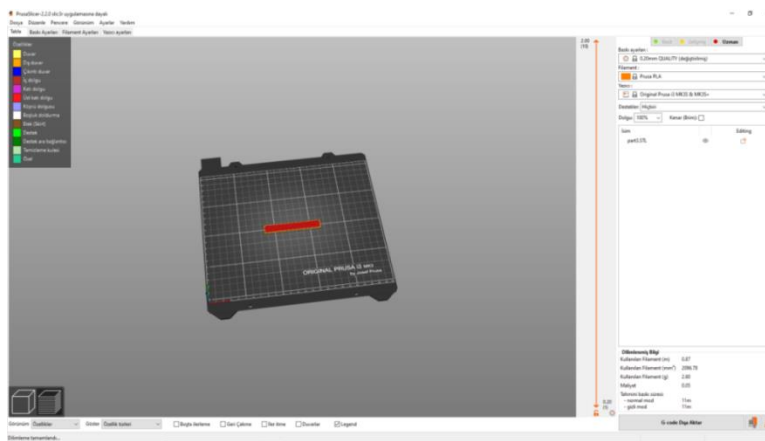
Şekil 4.8. Çekme testi numune baskıları a) G marka numune b) H marka numune



Şekil 4.9. Çekme testi numune baskıları a) I marka numune b) J marka numune

4.1.2. Üç nokta eğme testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi

ASTM D790 standartlarına uygun olarak hazırlanan üç nokta eğme numunesinin STL görüntüsü Şekil 4.10’da ve Çizelge 4.3’te bütün markaların üç nokta eğme test numunelerinin baskı parametreleri yer almaktadır.



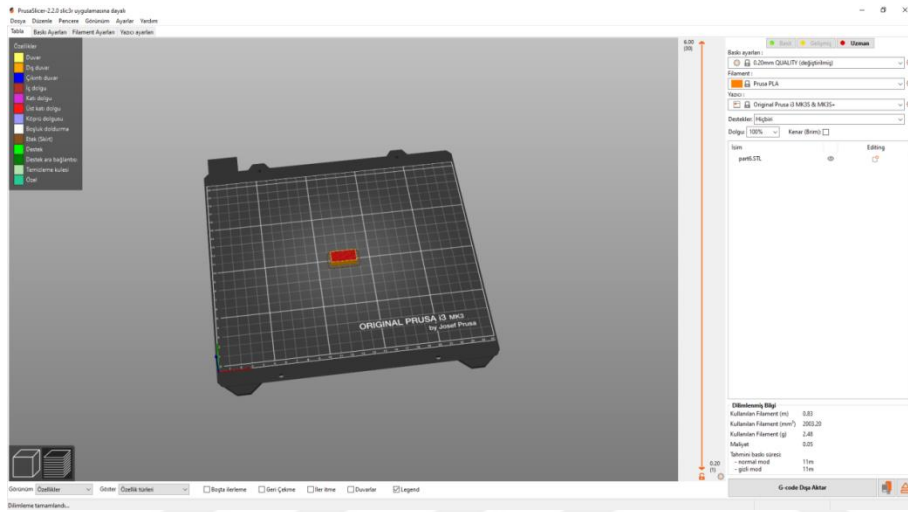
Şekil 4.10. Üç nokta eğme numunesinin STL görüntüsü

Çizelge 4.3 Tüm markalara ait üç nokta eğme test numunelerinin baskı parametreleri

Marka	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı	Not
A	215°C	70°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 60°C olarak ayarlanmıştır. Katman yapışmaması sebebiyle tabla sıcaklığı 70°C'ye çıkarılmış ve baskı bitimine kadar problem yaşanmamıştır.
B	-	-	Nozul sıcaklığı 220°C ve 70°C olarak ayarlanmıştır fakat çekme numunesi basılması sırasında yaşanan problemler gibi nozulda tıkanma meydana gelmiş ve baskı alınamamıştır.
C	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış fakat yer yer filament erimeme durumu gözlemlenmiştir.
D	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
E	218°C	70°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı 70°C'ye ayarlanmıştır. Yer yer filamentte erimeme sorunu gözlemlenmiştir.
F	223°C	70°C	Tablaya zor yapışma ve filament erimeme problemi gözlemlendiğinden nozul sıcaklığı 223°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanıp baskı alınmıştır.
G	225°C	73°C	Filament erimeme ve tablaya zor yapışma problemleri gözlemlendiğinden nozul sıcaklığı 225°C, tabla sıcaklığı 73°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
H	217°C	62°C	Nozul sıcaklığı 217°C, tabla sıcaklığı 62°C olarak ayarlanmıştır. Baskı bitinceye kadar sorun yaşanmamıştır.
I	220°C	70°C	İlk katmanda yapışma problemi ve filament erimeme yaşandığından nozul sıcaklığı 220°C ve tabla sıcaklığı 70°C'ye ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
J	218°C	65°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı 65°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.

4.1.3. Sertlik ölçüm testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi

ASTM D785 standartlarına uygun olarak hazırlanan sertlik ölçüm test numunesinin STL görüntüsü Şekil 4.11’de ve Çizelge 4.4’te bütün markaların sertlik ölçüm test numunelerinin baskı parametreleri yer almaktadır.



Şekil 4.11. Sertlik test numunesinin STL görüntüsü

Çizelge 4.4 Tüm markalara ait sertlik ölçüm test numunelerinin baskı parametreleri

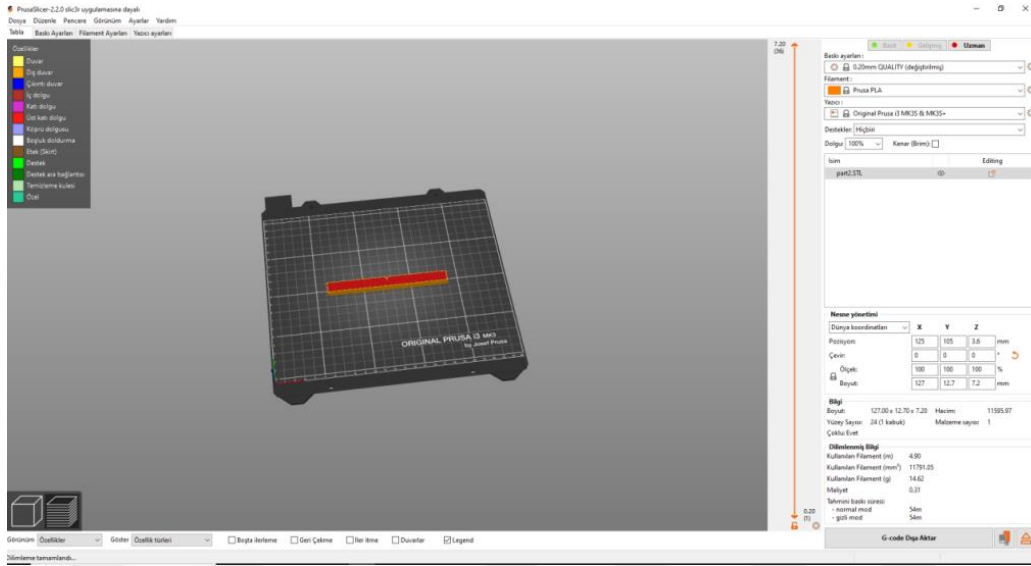
Marka	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı	Not
A	217°C	70°C	Nozul sıcaklığı 217°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
B	-	-	Nozul sıcaklığı 220°C ve 70°C olarak ayarlanmıştır fakat sürekli nozul tıkanması sebebiyle baskı alınamamıştır.
C	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış, yer yer yapışmama gözlemlenmiştir ve baskı alınmıştır.

Çizelge 4.4 Tüm markalara ait sertlik ölçüm test numunelerinin baskı parametreleri

D	219°C	70°C	Nozul sıcaklığı 219°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
E	220°C	71°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 71°C'ye ayarlanmıştır. Baskı sırasında filament erimeme sorunu gözlemlenmiş ve baskı alınmıştır.
F	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmıştır. Katmanlar arası yapışma zorluğu gözlemlenmiş ve baskı alınmıştır.
G	225°C	73°C	Nozul sıcaklığı 225°C ve tabla sıcaklığı 73°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
H	215°C	60°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 60°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
I	219°C	70°C	Nozul sıcaklığı 219°C ve tabla sıcaklığı 70°C'ye ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
J	218°C	70°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı ise yapışmada zorluk yaşandığı için 75°C olarak ayarlanmış daha sonra 70°C'ye düşürülmüş ve basılmıştır.

4.1.4. Çentik darbe testi numunelerinin modellenmesi ve üretimi

ASTM D6110-10 standartlarına uygun olarak hazırlanan darbe testi numunesinin STL görüntüsü Şekil 4.12'de ve Çizelge 4.5'te bütün markaların darbe test numunelerinin baskı parametreleri yer almaktadır.



Şekil 4.12. Darbe testi numunesinin STL görüntüsü

Çizelge 4.5 Tüm markalara ait çentik darbe test numunelerinin baskı parametreleri

Marka	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı	Not
A	217°C	70°C	Nozul sıcaklığı 217°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
B	-	-	Nozul sıcaklığı 220°C ve 70°C olarak ayarlanmıştır fakat sürekli nozul tıkanması sebebiyle baskı alınamamıştır.
C	221°C	68°C	Nozul sıcaklığı 221°C, tabla sıcaklığı 68°C olarak ayarlanmış ve hassas olmasa da baskı alınmıştır.
D	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
E	218°C	70°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı 70°C'ye ayarlanmış, yüksek hassasiyete sahip olmayan baskı alınmıştır.
F	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
G	221°C	72°C	Nozul sıcaklığı 221°C, tabla sıcaklığı 72°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.

Çizelge 4.5 Tüm markalara ait çentik darbe test numunelerinin baskı parametreleri

H	215°C	60°C	Nozul sıcaklığı 215°C, tabla sıcaklığı 60°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
I	220°C	70°C	Nozul sıcaklığı 220°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.
J	218°C	70°C	Nozul sıcaklığı 218°C, tabla sıcaklığı 70°C olarak ayarlanmış ve baskı alınmıştır.

4.1.5. XRD analizi için numunelerin hazırlanması

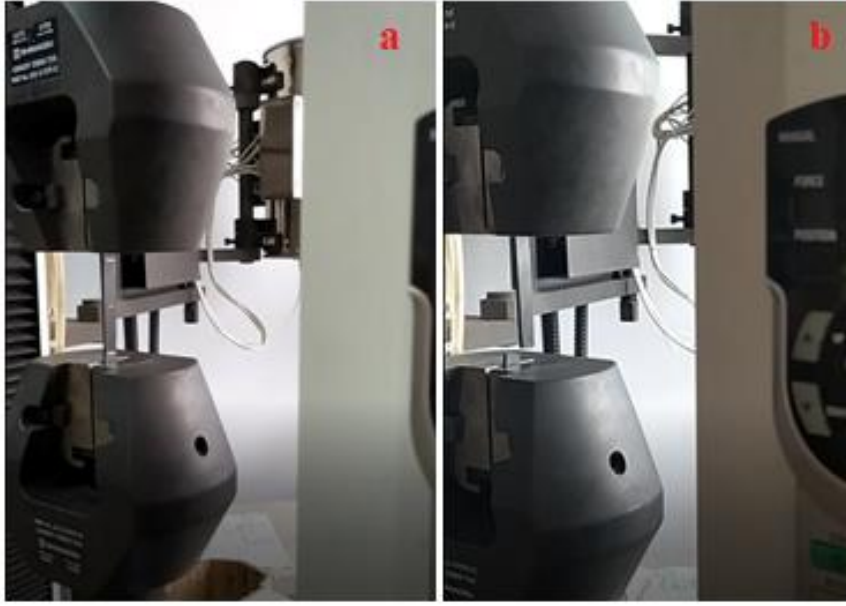
Numunelerin parçacık boyutu 1-5 μm boyutlarına getirilmek için sistem soğutularak bilyalı değirmende öğütme işlemi uygulanmıştır. Analiz için uygun hale getirilen numune, cihaz içindeki platforma yerleştirilerek analiz yapılmıştır.

4.2. Karakterizasyon

Baskı sonrası elde edilen numunelerin mekanik ve kimyasal özelliklerin belirlenmesi için çeşitli testler uygulanmıştır.

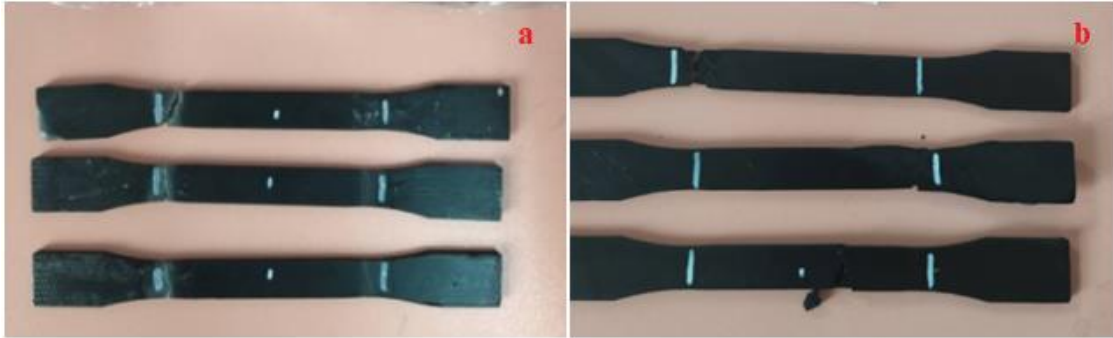
4.2.1. Çekme Testleri

Filamentlerin mekanik özellikleri olarak bilinen akma, çekme ve kopma mukavemeti gibi birçok parametrelerin tespiti için Shimadzu marka evrensel test makinesi kullanılmıştır. Her markadan üçer çekme numunesi çekme test hızı 5mm/dk ve full skala 250000N ayarlanarak teste tabi tutulmuştur. Şekil 4.13'te çekme numunesinin çekme testi sırasında (a) ve çekme testi sonrasında (b) çekilen görsel yer almaktadır.

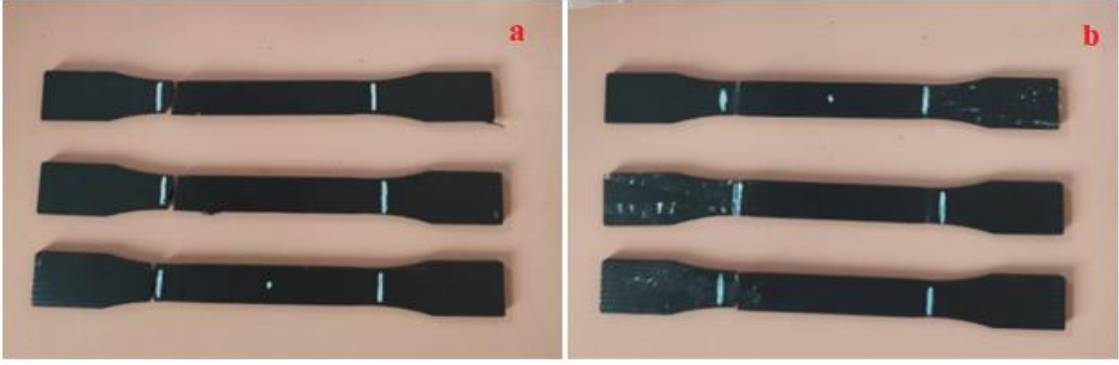


Şekil 4.13. Çekme testi a) sırasında b) sonrası

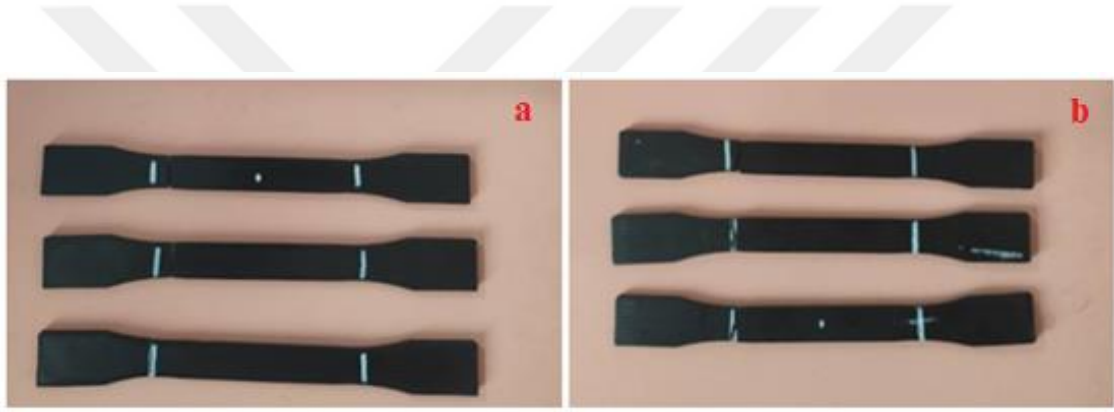
Her markaya ait çekme numunelerinin test sonrasına ait görüntüler sırasıyla Şekil 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18’de yer almaktadır.



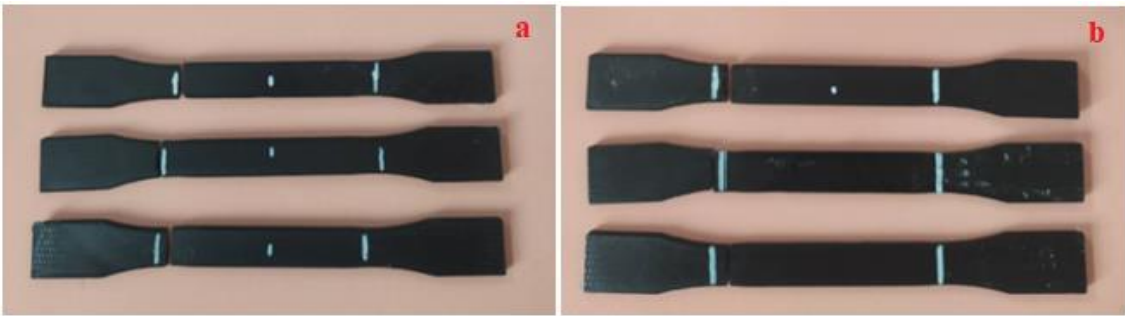
Şekil 4.14.Çekme testi sonrası a) A marka test numuneleri b) B marka test numuneleri



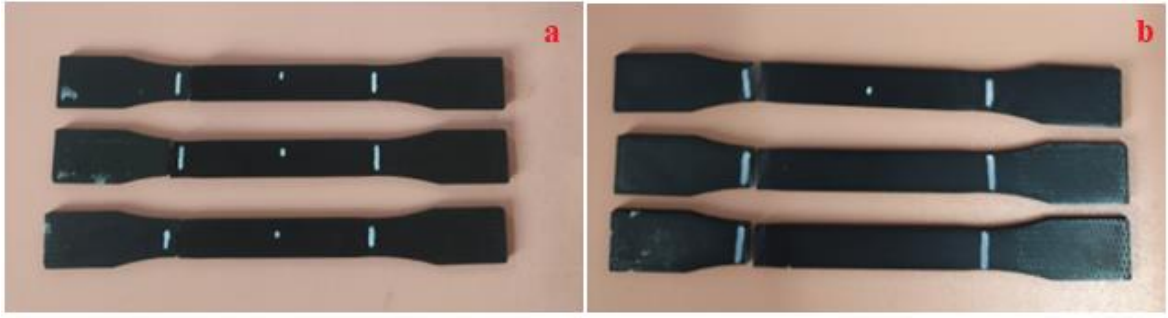
Şekil 4.15.Çekme testi sonrası a) C marka test numuneleri b) D marka test numuneleri



Şekil 4.16.Çekme testi sonrası a) E marka test numuneleri b) F marka test numuneleri



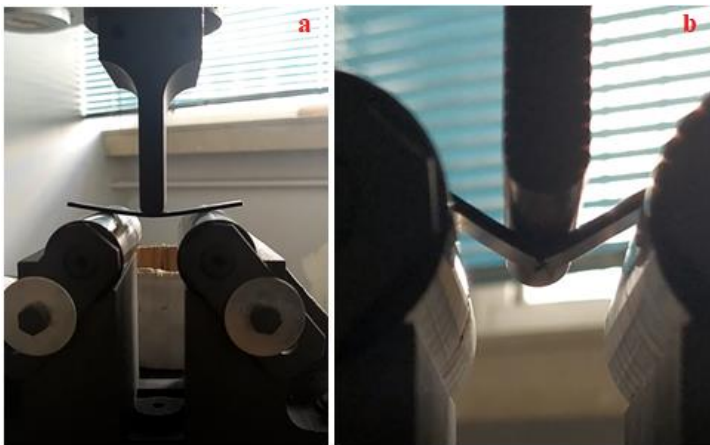
Şekil 4.17.Çekme testi sonrası a) G marka test numuneleri b) H marka test numuneleri



Şekil 4.18.Çekme testi sonrası a) I marka test numuneleri b) J marka test numuneleri

4.2.2. Üç nokta eğme testleri

Filamentlerin, kırılırken ne kadar enerji absorbe edebileceği veya kırılma enerji miktarının ne kadar olabileceği hakkında bilgi edinmek için charpy darbe testi yapılmıştır. Çekme testi için de kullanılan Shimadzu evrensel test makinesinin parçaları değiştirilerek kayıp enerji 1joul ve yüklenen enerji 300 joul olarak ayarlanmış, üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Şekil 4.19’da eğme numunesinin eğme testi sırasında (a) ve eğme testi sonrasında (b) çekilen görsel yer almaktadır.

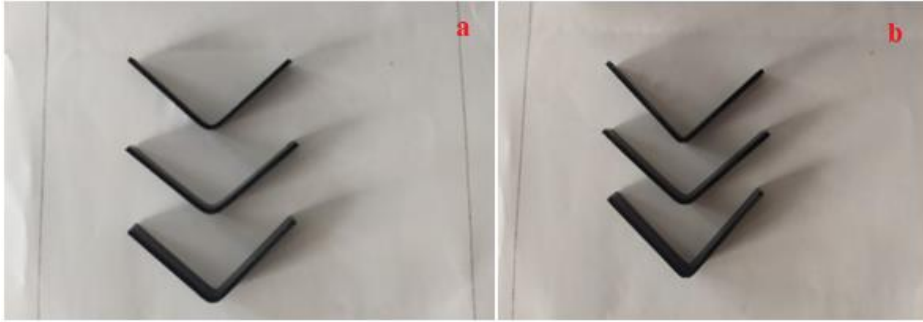


Şekil 4.19. Eğme testi a) başlangıcı b) sonu

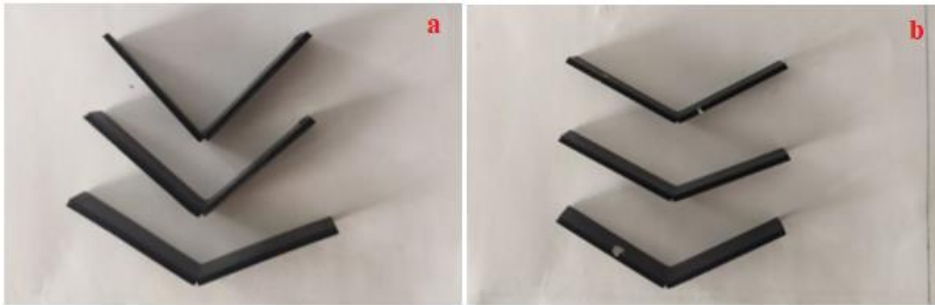
Her markaya ait üç nokta eğme test numunelerinin test sonrasına ait görüntüler sırasıyla Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24’de yer almaktadır.



Şekil 4.20. Eğme testi sonrası a) A marka test numuneleri b) C marka test numuneleri



Şekil 4.21. Eğme testi sonrası a) D marka test numuneleri b) E marka test numuneleri



Şekil 4.22. Eğme testi sonrası a) F marka test numuneleri b) G marka test numuneleri



Şekil 4.23. Eğme testi sonrası a) H marka test numuneleri b) I marka test numuneler



Şekil 4.24. Eğme testi sonrası J marka test numuneleri

4.2.3. Çentik darbe testleri

Malzemelere yüklenen yüklere karşı ne kadarlık bir kırılma enerjisine sahip olduğuna ulaşmak, darbe dayanımı hakkında yorum yapabilmek amacıyla darbe testi yapılmaktadır. Çentik darbe testi, yatay olarak yerleştirilen numunenin çentik bölgesine çekiçle darbe yapılması ve numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tayin işlemidir. (Aslanlar, 2019) Kayıp enerji 1 Joul, yüklenen enerji 300 Joul olarak ayarlanarak oda sıcaklığında her markaya ait üç adet darbe numunesi test edilmiştir.

4.2.4. Sertlik ölçüm testleri

Sertlik, malzemenin çizilmeye ve aşınmaya karşı gösterdiği direncin ölçütüdür. Vickers sertliği, malzemeye batıcı olarak kare kesitli, tepe açısı 136° olan elmas piramit uç tespit edilir (Bulut, 2015). Test yükü 25g, bekleme süresi 5 saniye olarak ayarlanarak her

markaya ait üç adet sertlik numunesi test edilmiştir. Polimer esaslı malzemelerde Shore sertlik ölçümü yapılması uygundur. Ancak laboratuvar olanaklarının uygun olması sebebiyle Vickers ölçümü tercih edilmiştir.

4.2.5. XRD analizi

Amorf/kristal yapı oranı, varsa dolgu ve katkı malzemelerinin kristal yapılarını tespit etmek için XRD analizi yapılmıştır. Partikül boyutu 1-5 μm boyutlarında ölçüm için uygun hale getirilen numune, cihaz içindeki platforma yerleştirilerek 90° - 95° arası taranmıştır. Rietveld analizi ile faz miktarları ve PLA filamentlere yapılan katkı maddelerinin miktarı araştırılmıştır.

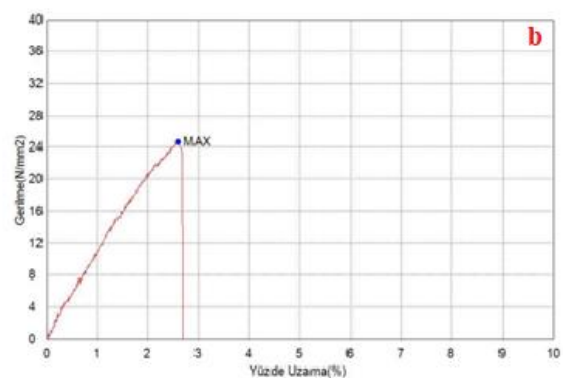
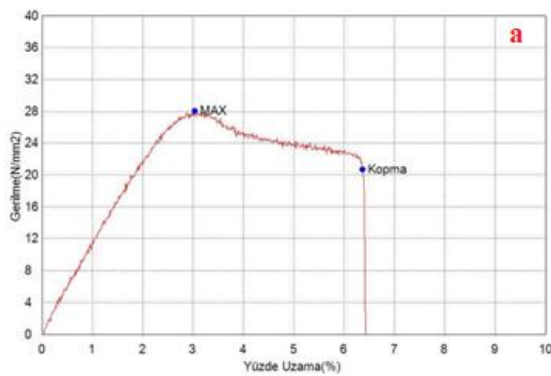
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Çekme Testi Sonuçları

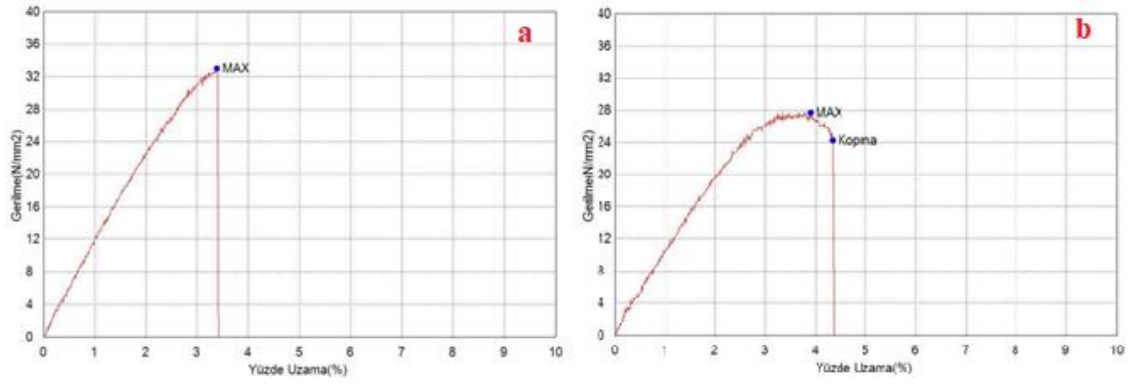
Her markadan çekme testine tabi tutulan üçer numuneye ait sonuçlar Çizelge 5.1’de ve ilgili test sonuç grafikleri sırasıyla Şekil 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5’ de yer almaktadır.

Çizelge 5.1 Tüm markalara ait çekme testi sonuçları

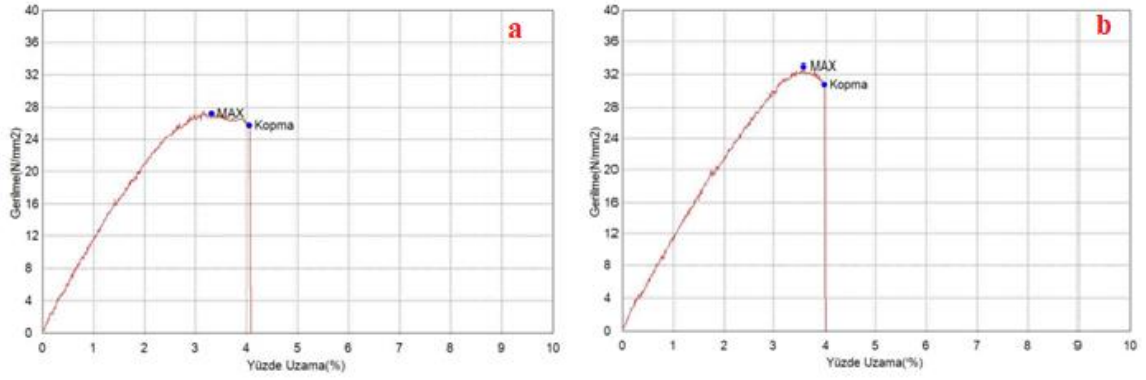
Marka	Çekme Dayanımı (ort)	Ortalama Kopma Uzaması (ort)	Not
A	28,10 MPa	%6,46	Test sonuçları incelendiğinde en yüksek çekme mukavemeti (ort) değeri H markasına ait ve en düşük çekme mukavemeti (ort) değeri ise B markasına aittir. A markası baryum sülfat içermektedir. H markası saf PLA polimerdir. B markası ise PLA+ farklı polimerler içermektedir.
B	24,77 MPa	%2,55	
C	33,10 MPa	%3,41	
D	28,80 MPa	%4,35	
E	27,90 MPa	%4,04	
F	32,47 MPa	%3,95	
G	31,44 MPa	%4,53	
H	33,41 MPa	%4,10	
I	27,97 MPa	%4,45	
J	30,37 MPa	%3,88	



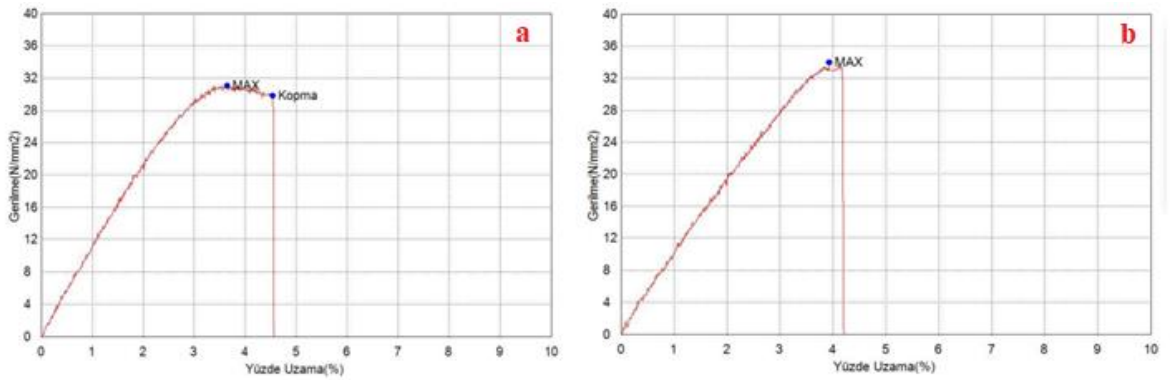
Şekil 5.1. Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) A marka b) B marka



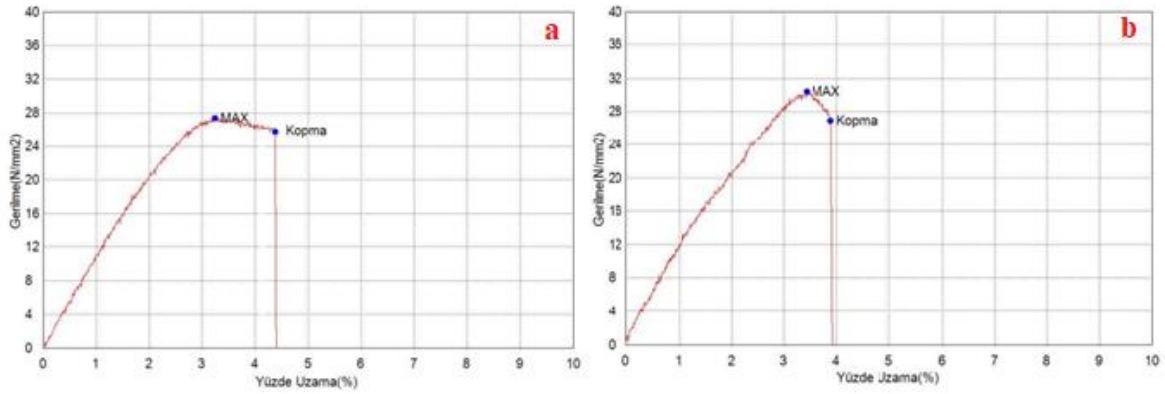
Şekil 5.2.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) C marka b) D marka



Şekil 5.3.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) E marka b) F marka



Şekil 5.4.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) G marka b) H marka



Şekil 5.5.Çekme testi sonuç gerilme/yüzde uzama grafiği a) I marka b) J marka

5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

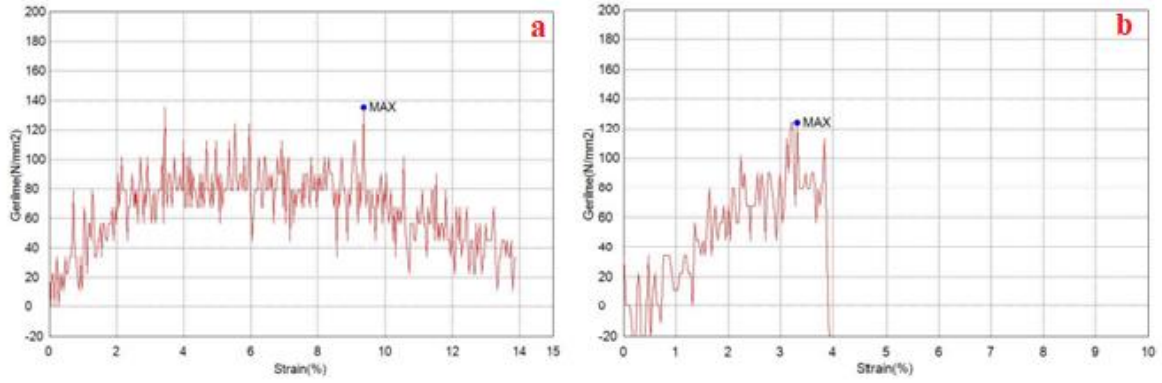
Her markadan eğme testine tabi tutulan üçer numuneye ait sonuçlar Çizelge 5.2’de ve ilgili test sonuç grafikleri sırasıyla Şekil 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10’ da yer almaktadır.

Çizelge 5.2 Tüm markalara ait üç nokta eğme testi sonuçları

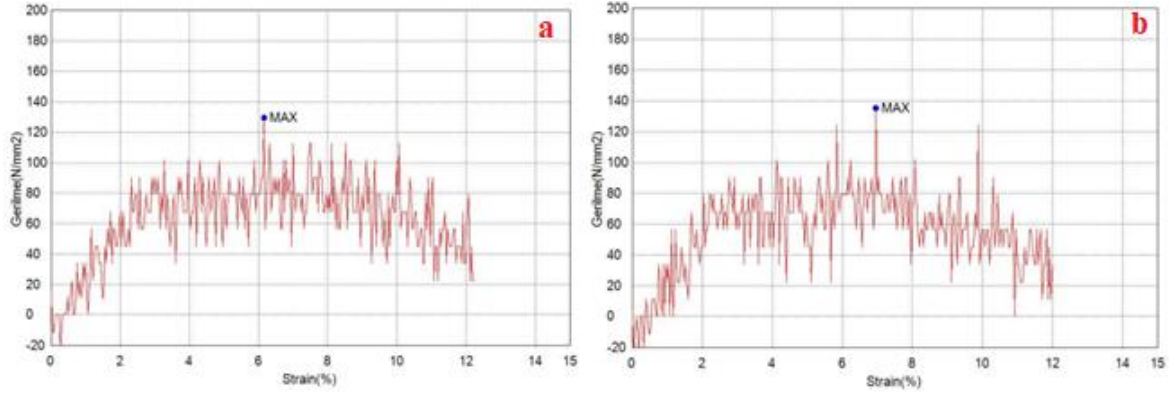
MARKALAR	ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARI		NOT
A	Kuvvet (ort)	96,35N	B markasının eğme test numunesi basılamadığı için test yapılmamıştır.
	Gerilme (ort)	138,98 MPa	
	% Gerinim (ort)	7,52	
B	Kuvvet (ort)	0	Test sonuçları incelendiğinde en yüksek gerinim (%) değeri A markasına ait ve en yüksek kuvvet (ort) ve gerilme(ort) değerleri ise H markasına aittir.
	Gerilme (ort)	0	
	% Gerinim (ort)	0	
C	Kuvvet (ort)	83,33 N	En düşük kuvvet (ort), gerilme(ort) ve gerinim (%) değerleri C markasına aittir.
	Gerilme (ort)	120,20 MPa	
	% Gerinim (ort)	3,21	
D	Kuvvet (ort)	96,35 N	A markası PLA+Baryüm Sulfat içermektedir.
	Gerilme (ort)	138,97 MPa	
	% Gerinim (ort)	6,58	
E	Kuvvet (ort)	93,75 N	C markası PLA+ diğer polimerleri içermektedir. H markası saf PLA polimerdir.
	Gerilme (ort)	135,21 MPa	
	% Gerinim (ort)	6,25	

Çizelge 5.2 Tüm markalara ait üç nokta eğme testi sonuçları

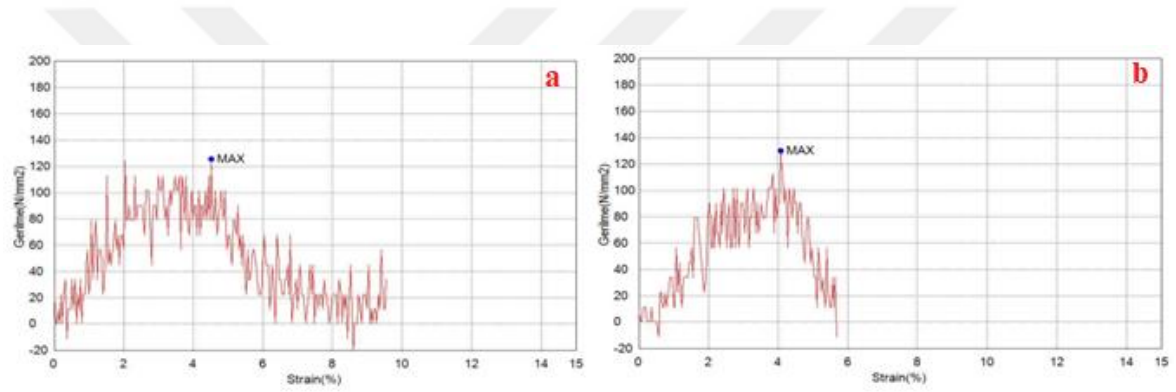
F	Kuvvet (ort)	88,5418 N
	Gerilme (ort)	127,704 MPa
	% Gerinim (ort)	4,7328
G	Kuvvet (ort)	93,7501 N
	Gerilme (ort)	135,216 MPa
	% Gerinim (ort)	4,1731
H	Kuvvet (ort)	101,5626 N
	Gerilme (ort)	146,484 MPa
	% Gerinim (ort)	4,719
I	Kuvvet (ort)	98,9583 N
	Gerilme (ort)	142,728 MPa
	% Gerinim (ort)	3,5454
J	Kuvvet (ort)	85,9375 N
	Gerilme (ort)	123,948 MPa
	% Gerinim (ort)	4,6651



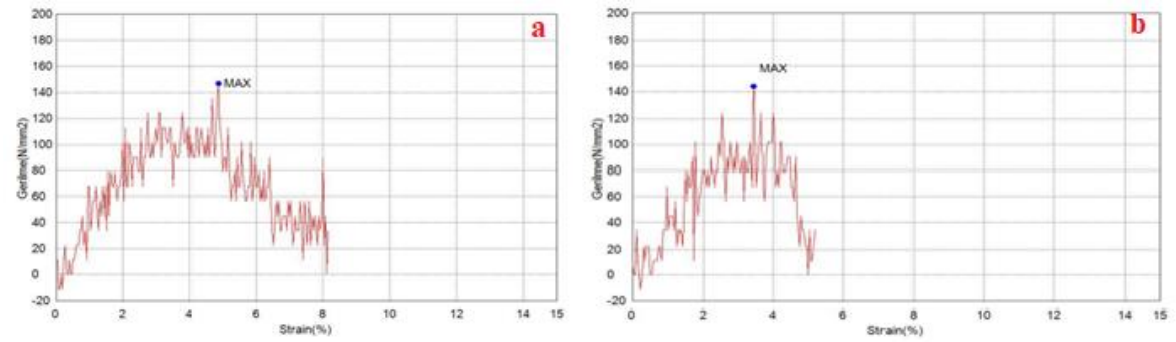
Şekil 5.6. Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) A marka b) C marka



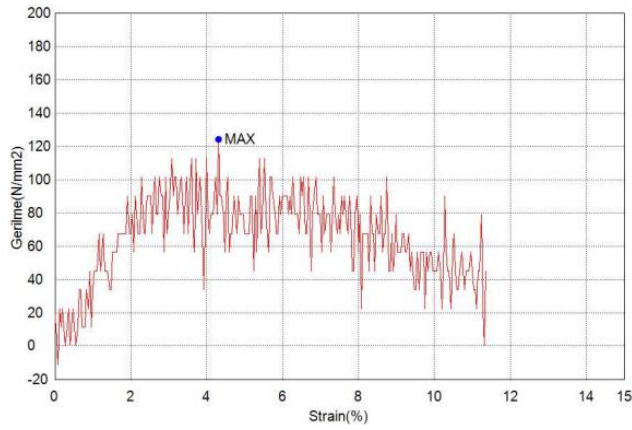
Şekil 5.7. Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) D marka b) E marka



Şekil 5.8. Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) F marka b) G marka



Şekil 5.9. Eğme testi sonuç gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği a) H marka b) I marka



Şekil 5.10. J markasına ait gerilme/yüzde gerinim(strain) grafiği

5.3. Çentik Darbe Testi Sonuçları

Her markadan çentik darbe testine tabi tutulan üçer numuneye ait sonuçlar Çizelge 5.3'te yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Tüm markalara ait çentik darbe testi sonuçları

Marka	Alan	Kırılma Enerjisi (ort)	Darbe Mukavemeti (ort)	Not
A	74,2mm ²	3 J	0,040 J/mm ²	B markasının test numune baskısı alınamadığı için test yapılamamıştır. Test sonuçları incelendiğinde en yüksek çentik darbe mukavemet değeri (ort) E markasına ait ve en düşük çentik darbe mukavemet değeri (ort) ise J markasına aittir.
B	0	0 J	0	
C	91mm ²	2,3 J	0,025 J/mm ²	
D	77mm ²	1,1 J	0,014 J/mm ²	
E	77mm ²	4 J	0,052 J/mm ²	
F	77mm ²	1,1 J	0,014 J/mm ²	

Çizelge 5.3. Tüm markalara ait çentik darbe testi sonuçları

G	91mm ²	2,33 J	0,026 J/mm ²	D, E, J markaları PLA+Kalsiyum Karbonat içermektedir. F markası geri dönüşüm PLA polimerdir.
H	71,4 mm ²	1,33 J	0,019 J/mm ²	
I	91mm ²	1,6 J	0,017 J/mm ²	
J	72,08mm ²	1 J	0,014 J/mm ²	

Çentik darbe testleri neticesinde en yüksek darbe mukavemeti gösteren E markasına ait filamentin statik tokluk değeri yaklaşık 2,4 J/mm² olarak hesaplanmıştır. En düşük darbe mukavemeti gösteren J, F ve D markalarının statik tokluk değerleri ise sırayla 2,5 J/mm², 2,7 J/mm² ve 2,5 J/mm² olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşık sonuçlar neticesinde yapılan darbe testlerinin uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

5.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Her markadan üçer numuneye ait sertlik ölçüm sonuçları Çizelge 5.4'te yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Tüm markalara ait sertlik testi sonuçları

Markalar	Sertlik Ölçüm Sonuçları (Ort)	Not
A	36 HV	B markasının sertlik test numunesi basılamadığı için sertlik testi yapılmamıştır.
B	0 HV	
C	34,1 HV	
D	30,2 HV	

Çizelge 5.4. Tüm markalara ait sertlik testi sonuçları

E	27,1 HV	Test sonuçları incelendiğinde en yüksek sertlik değeri (ort) H markasına ait ve en düşük sertlik değeri (ort) E markasına aittir. E markası PLA+kalsiyum karbonat içermektedir. H markası saf PLA polimerden üretilmiştir.
F	29,1 HV	
G	35,3 HV	
H	43,7 HV	
I	27,9 HV	
J	34 HV	

5.5. XRD Analiz Sonuçları

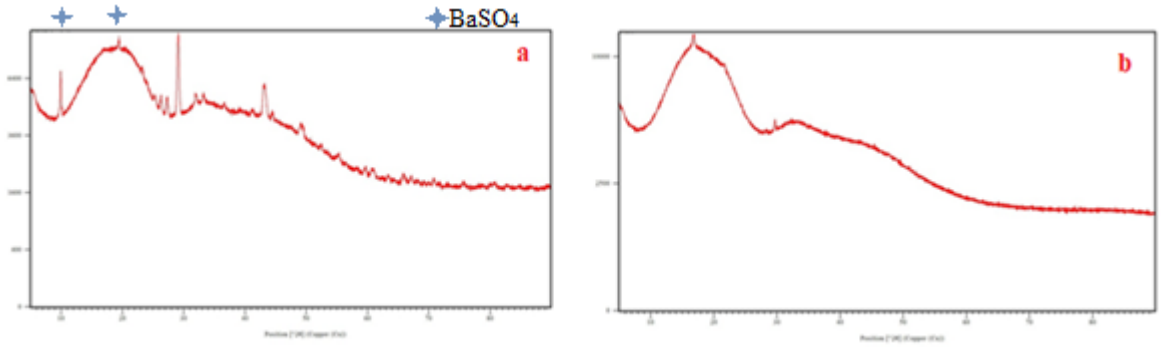
Polimerler organik yapılar oldukları için XRD analizi ile içeriklerini belirlemek zordur. Panalytical Empyrean marka XRD cihazı kullanılarak yapı içerisinde eğer inorganik bileşenler var ise bulunan bileşik tahminlerinde %50 ve üstü turuncu, %50 ve altı kırmızı, %70 ve üzeri yeşil renk gözlemlenmiştir fakat teknik aksaklıklar nedeniyle analiz görselleri eklenememiştir. XRD analizine tabi tutulan tüm markalara ait sonuçlar Çizelge 5.5'te ve sonuç grafikleri sırasıyla Şekil 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 ve 5.15'e yer almaktadır.

Çizelge 5.5 Tüm markalara ait XRD analiz sonuçları

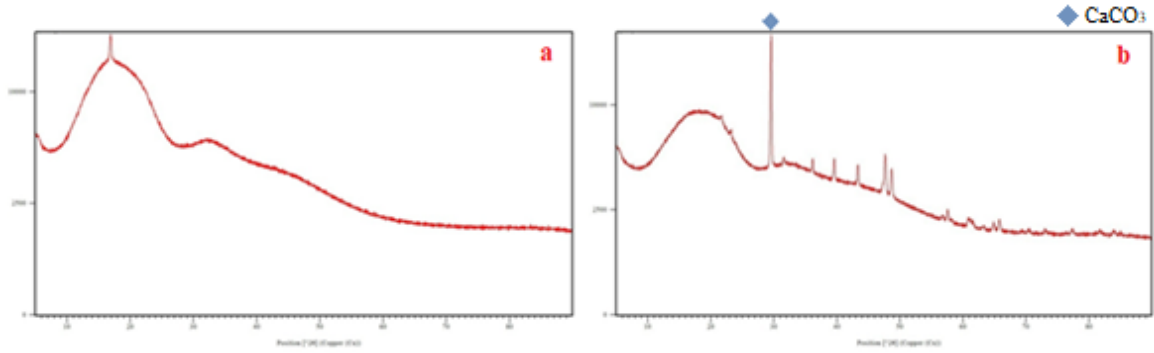
MARKALAR	KİMYASAL İÇERİĞİ	NOT
A	PLA Polimer + Baryum Sülfat	Grafiklerde içerikte bulunan sülfatlı bileşiklerin oluşturduğu karışık pikler görülmektedir. Yapıda bulunan BaSO ₄ yüksek yoğunluk, ısı ve kimyasal dayanım, maliyet düşürücü özellikleri sebebiyle polimer içinde dolgu malzemesi olarak kullanımı mevcuttur.
B	PLA Polimer (saf değil- amorft+kristal polimer karışımları)	XRD grafikleri incelendiğinde yapıda inorganik madde tespit edilememekle birlikte hammaddenin tek bir bileşenden oluşmadığı, polimer karışımları görülmektedir.

Çizelge 5.5 Tüm markalara ait XRD analiz sonuçları

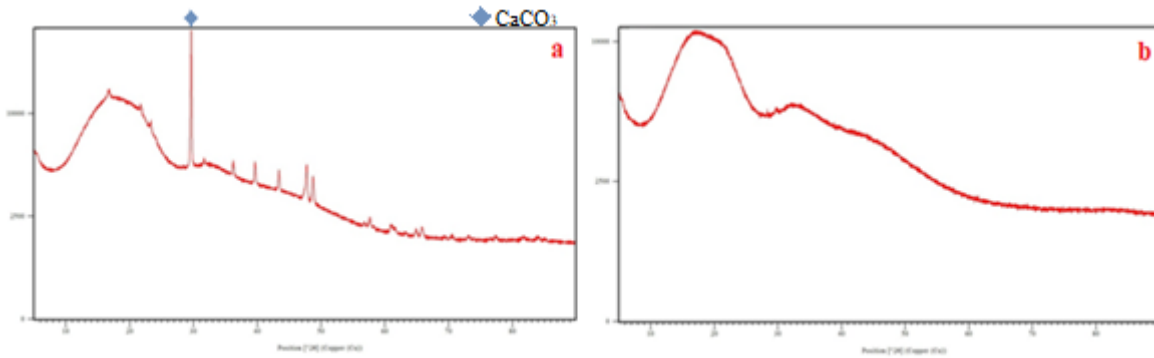
C	PLA Polimer (saf değil- amorf+kristal polimer karışımları)	XRD grafikleri incelendiğinde yapıda inorganik madde tespit edilememekle birlikte hammaddenin tek bir bileşenden oluşmadığı, polimer karışımları görülmektedir.
D	PLA Polimer + Kalsiyum Karbonat	XRD grafiğinde, içerikte bulunan inorganik bileşiklerinin oluşturduğu karışık pikler görülmektedir. 29-30° pik davranışı yapıda yüksek miktarda CaCO_3 olduğunu göstermektedir. Ticari olarak kalsit olarak bilinen kalsiyum karbonat plastik üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılmakta olup malzemeye eklenme oranına bağlı olarak esneklik, sertlik, ısıl dayanım gibi özellikler katıp aynı zamanda ürünün maliyetini düşürmektedir.
E	PLA Polimer + Kalsiyum Karbonat	XRD grafiği incelendiğinde, D markasının analiz sonuçlarına benzer olarak 29-30° pik davranışı yapıda yüksek miktarda CaCO_3 olduğunu göstermektedir
F	PLA Polimer	Grafik incelendiğinde polimer yapıda herhangi bir inorganik malzeme tespit edilememiştir.
G	PLA Polimer	Grafik incelendiğinde polimer yapıda herhangi bir inorganik malzeme tespit edilememiştir.
H	PLA Polimer	Grafik incelendiğinde polimer yapıda herhangi bir inorganik malzeme tespit edilememiştir.
I	PLA Polimer + Kalsiyum Karbonat	XRD grafiği incelendiğinde, E ve D markalarının analiz sonuçlarına benzer olarak 29-30° pik davranışı yapıda yüksek miktarda CaCO_3 olduğunu göstermektedir.
J	PLA Polimer + Kalsiyum Karbonat	XRD grafiği incelendiğinde, E, D ve I markalarının analiz sonuçlarına benzer olarak 29-30° pik davranışı yapıda yüksek miktarda CaCO_3 olduğunu göstermektedir.



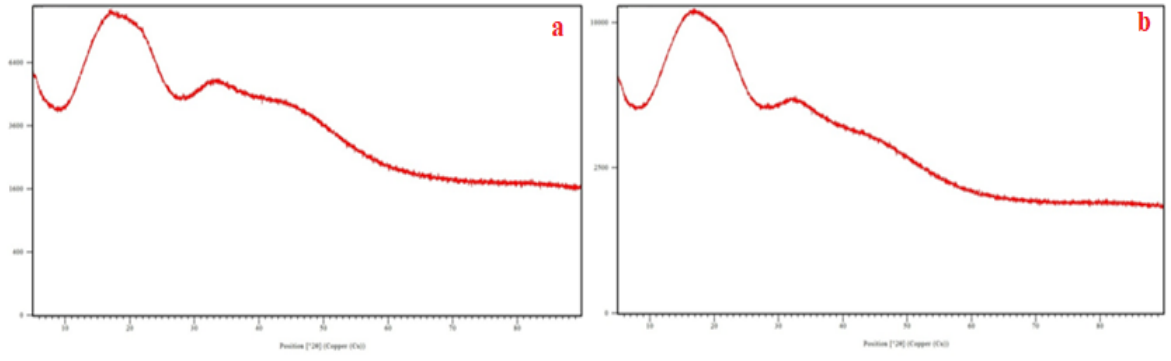
Şekil 5.11. XRD analiz sonuç grafiği a) A marka b) B marka



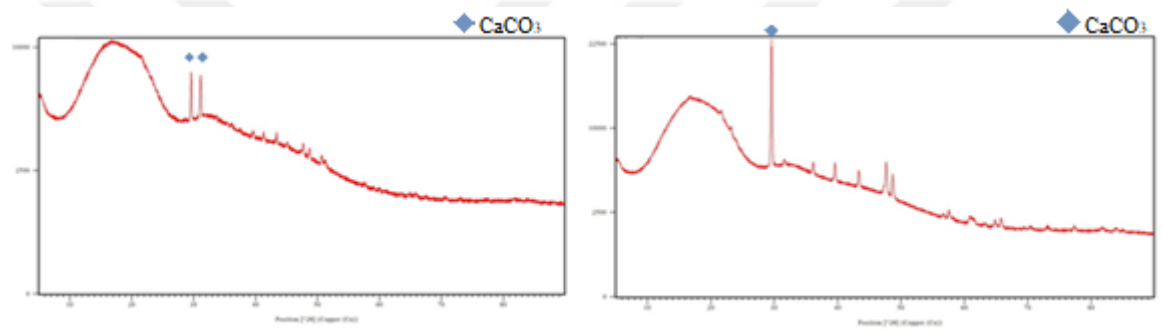
Şekil 5.12. XRD analiz sonuç grafiği a) C marka b) D marka



Şekil 5.13. XRD analiz sonuç grafiği a) E marka b) F marka



Şekil 5.14. XRD analiz sonuç grafiği a) G marka b) H marka



Şekil 5.15. XRD analiz sonuç grafiği a) I marka b) J marka

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye’de ticarileşmiş PLA bazlı filamentlerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenip, yorumlanmıştır. Bu kapsamda on farklı ticari markaya ait PLA filamentlerin mekanik ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi için standartlara uygun stl dosyaları hazırlanmış ve üç boyutlu yazıcı ile ördürülmüştür.

Her bir markaya ait test numuneleri aynı yazıcı ve baskı parametreleriyle ördürülmeye başlanmıştır ancak kullanılan sıcaklık parametreleri markalarda değişiklik göstermiştir. Ardından ördürülen test numunelerinin analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yazdırılma parametrelerinin, kimyasal içeriğinin ve kullanılan hammaddenin mekanik özelliklere olan etkilerini incelemek için çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Tüm markaların test sonuçları karşılaştırılmış ve değişen ördürme parametreleri ile kimyasal içeriğinin numuneyi ne yönde etki ettiği deneylerle kontrol edilmiştir.

XRD analizi ile kimyasal içeriği tespit edilen numunelerden polimer karışımları içeren markaların, tüm mekanik değerleri ortalamanın altında olduğu, yapıda bulunan yüksek kalsit katkısının ise çekme dayanımını ve sertlik değerlerini olumsuz etkilediği, baryum sülfat katkısının ise mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemediği görülmüştür. Testler incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı, eğme dayanımı ve sertlik değeri hiçbir katkı maddesi içermeyen H markasına ait olup sırasıyla 33,40 MPa, 146,5 MPa ve 43,7 HV’dir. En yüksek çentik darbe dayanımı ise yüksek kalsit katkısı içeren E markaya ait olup 0,052 j/mm²’dir. En düşük çekme dayanımı polimer karışımları içeren B markaya ait olup 20,77 MPa, en düşük eğme dayanımı polimer karışımları içeren C markaya ait olup 120,19 MPa’dır. Ayrıca en düşük sertlik değeri E markasına ait olup 27,13 HV ve en düşük çentik darbe dayanımı ise 0,014 j/mm² değeri ile yüksek kalsit katkısı içeren J markasına aittir.

Test sonuçlarında aynı içeriğe sahip katkılı/katkısız filamentler farklı mekanik değer göstermesinin ve bir takım çelişkili sonuçların sebebi ise kullanılan hammadde kalitesi, ekstrüder üretim hattı parametreleri, ördürme parametreleri, deney koşulları vb değişken

koşullar sebebiyle farklılıklar gösterdiği düşünülmektedir. Ördürülme sırasında yaşanan yüzeye yapışmama, nozul tıkanma ve yer yer filamentte erimeme problemi yaşayan numunelerin istenildiği kadar iyi bir baskı kalitesi almadığı ve bu sebeple deney sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir.

Yapılan kimyasal ve mekanik testlerin sonuçları irdelendiğinde;

- Konuyla ilgili piyasada satılan ürünlerin gerek kutularında gerekse broşürleri incelendiğinde içerik bilgilerini vermedikleri (Tüm markalar) görülmektedir. Burada özellikle basım sırasında mekanik aksama zarar veren kalsiyum karbonatın (J, I,D,E) belirtilmesi, insan sağlığına zararı bilen baryum sülfatın (A markası) kutu üzerinde belirtilmesi, PLA dışı diğer polimerleri kullanan (C,B) markaların ise bu polimerlerin cinsini ve tipini belirtmesi gerekli olmalıdır. Özellikle PLA dışı farklı katkı maddeleri kullanımı okullarda biyo kökenli olduğu için gıdaya teması uygundur sloganıyla satışı/pazarlaması gerçekleştirilen PLA filamentlerin gıdaya teması uyumluluğu oldukça büyük bir problem teşkil edebilir. Bu sebeple bazı Türkiye menşeli firmaların (H markası) konuyla ilgili farkındalık uyandırmaya çalıştığı görülmüştür.
- Özellikle XRD sonuçlarına göre sadece PLA içeren (H, G, F) filamentlerinde sonuçları incelendiğinde çok tutarlı mekanik sonuçlar vermediği görülmüştür. Bu markalardan biri olan F markası sitesinde PLA filamentleri geri dönüşüm PLA'lerden ürettiğini belirtmektedir. Bu durum F markasının mekanik özelliklerini H ve G markalarından farklılaştırmaktadır. H ve G ürünleri kıyaslamasına bakıldığında ise PLA granül tedarikçilerinin aynı olmadığı düşünülmektedir.
- Kalsiyum Karbonat eklemek üretim hızını arttırdığı için tercih edilmektedir. Fakat yapılan değerlendirmelerde kalsiyum karbonat içeren malzemelerin baskı süreci zor olabilmekte (D, E) markası, ayrıca her markadan sonra değiştirilen nozzle göz önüne alındığında daha fazla aşınma yaptığı görülmüştür (J, I, D, E markaları).

Sonuçlara istinaden kullanılan hammaddenin kalitesi, katkı malzemesinin türü, boyutu ve miktarına bağlı olarak mekanik özellikler değişmiştir. Ayrıca tamamen içerikten bağımsız olarak üretim ve ördürme parametrelerinin mekanik test sonuçları üzerinde etkisi olduğu, daha fazla deney numunesi ve optimize edilen ördürme parametreleri ile daha doğru sonuçlar alınacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte eklemeli imalat yönteminin popülerlik kazanmasıyla birlikte havacılık ve uzay sektöründe özellikle prototip için kullanılan PLA filamentlerin, elde edilen test sonuçları doğrultusunda kullanım alanına uygun marka filamentin seçilmesiyle beraber havacılık sektöründe prototip dışında, parça olarak kullanımı da ön görülmektedir.

Yapılan bu çalışma neticesindeki öneriler:

- Bu markaların siteleri incelendiğinde AB-RoHS sertifikası aldıkları görülmektedir. Konuyla ilgili tek sertifikasyon süreci budur. Bu sertifikada sadece AB üyesi ülkelerde satış yapmak için istenmektedir. Bu sertifikaya sahip firmalar Çin menşeli D, E; Avrupa menşeli J markası ve Türkiye Menşeli F, H markalarıdır.
- ABD de gıda kullanılmak üzere alınması durumunda ise FDA sertifikası ihtiyacı olabilmektedir. Bu sertifikaya sahip firmalar Çin menşeli D, E ve Avrupa menşeli J firmasıdır. Fakat siteleri detaylı incelendiğinde Avrupa üretimleri ile ABD üretimlerinin ayrı olduğu farklı ürün kodlarıyla satışa sunulduğu görülebilir.

Türkiye için bu ürünlerin ne gümrük süreçleri ne de yerli üretim süreçlerinde bir kontrol bulunmamaktadır. Bu durum hepsinin paketin PLA yazan bu ürünlerin tüketici açısından kullanım alanlarının tanımlanmasında problem oluşturmaktadır. Basım sırasında bulunduğu takdirde, gıdaya temas etme durumunda ya da günümüzün en önemli sorunlarından biri olan mikro plastik olarak doğaya karıştığı takdirde nasıl bir sağlık veya çevre sorununa sebep olacağı orta-uzun vadede bilinmemektedir. Tüm bu bilgiler ışığında konuyla ilgili bir standart ve kalite yönetim modelinin gelişmesi gerektiği görülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Aslanlar (2019). Darbe Deneyleri pdf,8-25

<https://cdn.bartın.edu.tr/makine/68df7d9c9f6ecb4700d81de4ba2b2163/darbedeneyleri.pdf>

Bulut, M. (2020). Sertlik Ölçme Metodları ve Cihazları.pdf, s.30.

www.baskent.edu.tr/~ekoc/courses/MAK402/MAK_402_DENEY_1.pdf

Dike, A. S. (2020). Kalsit Takviyeli Poli (Laktik Asit) Kompozit Malzemelerinin

Hazırlanması ve Karakterizasyonu. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi s.7-8

Diksu, S. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojisi Eriyik Biriktirme Modelleme Yöntemi İçin

Kompozit Abs Filament Üretilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. s.11

Gang, H.-H., Kim, D.-H. (2020). A Study on Barium Mixed Radiation Shield using 3D Printer. Journal of the Korean Society of Radiology, 14(5), s.627-634.

Hodzic, D., Pandzic, A. (2019). Influence of Carbon Fibers on Mechanical Properties of Materials in FDM Technology. İçinde B. Katalinic (Ed.), DAAAM Proceedings (1. bs, C. 1, ss. 0334-0342)

Jackson O'Connell(2020) Filament Üretim Aşamaları

<https://all3dp.com/2/how-3d-printer-filament-made/>

Joseph Arockiam, A., Karthikeyan Subramanian, Padmanabhan, R. G., Rajeshkumar

Selvaraj, Dilip Kumar Bagal, Rajesh, S. (2021). A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. Materials Today: Proceedings. , s.5-9

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Joseph Arockiam, A., Karthikeyan Subramanian, Padmanabhan, R. G., Rajeshkumar Selvaraj, Dilip Kumar Bagal, Rajesh, S. (2021). A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today: Proceedings*. s.36-37
- Liu, Z., Lei, Q., Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3741-3751.
- Moradi, M., Aminzadeh, A., Rahmatabadi, D., Hakimi, A. (2021a). Experimental investigation on mechanical characterization of 3D printed PLA produced by fused deposition modeling (FDM). *Materials Research Express*, 8(3), 035304.
- Mwema, F. M., Akinlabi, E. T. (2020). *Fused Deposition Modeling: Strategies for Quality Enhancement*. Springer International Publishing.
- Network, 2007 https://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Properties_Documents/PropertiesDocument_Fillers-and-Fibers_pdf.pdf
- Pelleg, J. (2020). Additive and traditionally manufactured components. Elsevier. s.11-12
- Plastic Processing. (2020). Polymer Engineering Center. Geliş tarihi 30 Kasım 2021, gönderen <https://pec.engr.wisc.edu/plastic-processing/s.6-7>
- Sezer, A., Sargin, A., DemiRay, R. T. (t.y.). Bitirme Çalışması Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, s.67
- Singh, S., Singh, G., Prakash, C., Ramakrishna, S., Lamberti, L., Pruncu, C. I. (2020). 3D printed biodegradable composites: An insight into mechanical properties of PLA/chitosan scaffold. *Polymer Testing*, s.89, 106722.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tao, Y., Wang, H., Li, Z., Li, P., Shi, S. Q. (2017). Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. Materials, Tueen (2019) Universiti Tunku Abdul Rahman, Malaysia The Instit.pdf. s. 9-11
- Uzun, M., Erdoğan, Y. E. (2020). Investigation of the Effect of Using Unreinforced and Reinforced PLA in Production by Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties. Journal of the Institute of Science and Technology, s.2800-2808.
- Yu, W., Wang, X., Ferraris, E., Zhang, J. (2019). Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication. Materials & Design, 108013 s. 182.