



T.C
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

**ATIK ÇAY VE HURMA ÇEKİRDEĞİ KATKILI BİYOBÖZÜNÜR
POLİLAKTİK ASİT TERMOPLASTİK FİLAMENT ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Sabri BAYINDIR

OCAK

**ATIK ÇAY VE HURMA ÇEKİRDEĞİ KATKILI BİYOBOZUNUR
POLİLAKTİK ASİT TERMOPLASTİK FİLAMENT ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Muhammed Sabri BAYINDIR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman

Doç. Dr. LEVENT UĞUR

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAZAN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed Sabri BAYINDIR

17.01.2023

ATIK ÇAY VE HURMA ÇEKİRDEĞİ KATKILI BİYOBOZUNUR POLİLAKTİK ASİT
TERMOPLASTİK FİLAMENT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed Sabri BAYINDIR

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Petrol bazlı plastiklerin sınırlı hammadde kaynağı ile üretim ve doğada kaybolma aşamasında oluşturduğu olumsuzluklar bio-bazlı organik kompozit malzeme arayışını arttırmaktadır. Son yıllarda yaygın olarak kullanılan Poly (lactic acid) (PLA), mısır nişastası veya şeker kamışından elde edilmektedir. Bununla birlikte insan yaşamı için gerekli olan bu doğal kaynaklar da sınırsız değildir. Sürdürülebilir bir üretim için bu kaynakların tüketimi de azaltılmalıdır. Bu amaçla, çay tüketimi konusunda Dünya sıralamasında 1. sırada olan Türkiye’de çay atıklarına ve hurma ağacının lifli yapısı sebebiyle hurma meyvesinin atık çekirdeğine işlevsellik katarak, evsel çay atığı ve hurma çekirdeği ile ağırlıkça belirli oranlarda dolgulandırılmış PLA kompozit malzemeler 3 boyutlu yazıcı ile çekme numuneleri üretilmiş ve gerilmeleri dolgusuz PLA ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak dolgu malzemeleri toz formuna getirilmek amacıyla halkalı değirmen kullanılarak öğütülmüş ve partikülleri boyutlandırmak amacıyla sarsak elek kullanılarak eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. %90 PLA + %10 çay, %90 PLA + %10 hurma çekirdeği, %90 PLA + %5 çay + %5 hurma çekirdeği kombinasyonlarından hazırlanan fiziki karışım eriyik karıştırma işlemi ile çift vidalı ekstrüder kullanılarak granül haline getirilmiştir. Sonrasında elde edilen biyo-kompozit malzemeler tek vidalı ekstrüderde 1,75 mm çapında filamentler haline getirilmiş ve ASTM standartlarına uygun olarak 3B yazıcı ile çekme numuneleri üretilmiştir. Test sonuçlarına göre üretilen kompozitlerin faydalı ürün haline getirilmesi ve bununla birlikte PLA tüketiminin azaltılmasının mümkün olduğu tespit edilmiştir.

Sayfa Adedi
Anahtar Kelimeler
Danışman

: 58
: PLA, Çay atığı, Hurma çekirdeği, Gerilme dayanımı, 3B yazıcı
: Doç. Dr. LEVENT UĞUR

PRODUCTION OF WASTE TEA AND DATE SEED ADDED BIODEGRADABLE
POLYLACTIC ACID THERMOPLASTIC FILAMENT AND INVESTIGATION OF
MECHANICAL PROPERTIES

(M.Sc. Thesis)

Muhammed Sabri BAYINDIR

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

The disadvantages of petroleum-based plastics with limited raw material resources during production and disappearance in nature increase the search for bio-based organic composite materials. Poly (lactic acid) (PLA), which has been widely used in recent years, is obtained from corn starch or sugar cane. However, these natural resources, which are necessary for human life, are also not unlimited. For a sustainable production, the consumption of these resources should also be reduced. For this purpose, 1 in the world ranking on tea consumption. PLA composite materials filled with domestic tea waste and date seed in certain proportions by weight, adding functionality to tea waste and the waste core of palm fruit due to the fibrous structure of the palm tree in Turkey, which is next, tensile samples were produced with a 3-dimensional printer and their stresses were compared with unfilled PLA. First, the filling materials were ground using a ring mill in order to bring them into powder form, and the screening process was carried out using a spiral sieve in order to size the particles. The physical mixture prepared from the combinations of 90 % PLA + 10 % tea, 90 % PLA + 10 % date seed, 90 % PLA + 5 % tea + 5 % date seed was granulated using a double screw extruder by melt mixing process. The bio-composite materials obtained after that were made into filaments with a diameter of 1.75 mm in a single screw extruder and tensile samples were produced with a 3D printer in accordance with ASTM standards. According to the test results, it has been determined that it is possible to turn the composites produced into useful products and to reduce PLA consumption with it.

Page Number : 58
Keywords : PLA, Tea waste, Date seed, Tensile strength, 3D printer
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. LEVENT UĞUR

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Öncelikle bugüne kadar beni yetiştirmiş hep yanımda olmuş ve bana sınırsız destekleri ve yönlendirmeleri için Anneme ve Babama, benim bu süreçte yanımda olarak sınırsız destekleri yardımlarıyla düşünce ve fikirleriyle hiç yalnız bırakmayan Nişanım ve Kardeşime teşekkür ederim. Bu çalışmamda bana yardımlarıyla destek olan ve tez konusu seçiminde değerli düşünce ve fikirlerini benimle paylaşan tez danışmanlarım değerli hocalarım Levent UĞUR hocama ve Hakan KAZAN hocama teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışmalarım ve geçmişteki çalışmalarımda yardımlarını bana esirgemeyen değerli arkadaşlarıma da teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2.EKLEMELİ İMALAT.....	4
2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	6
2.1.1. Eriyik yığma modelleme (FDM).....	7
2.1.2. Seçici lazer sinterleme (SLS).....	8
2.1.3. Direkt metal lazer sinterleme (DMLS).....	9
2.1.4. Seçici lazerle ergitme (SLM).....	10
2.1.5. Stereolitgrafi (SLA).....	11
2.1.6. Poly jet-ink jet baskı.....	12
2.1.7. Three dimensional printing (3DP).....	13
2.1.8. Lamine nesne imalatı (LOM).....	14
2.1.9. Elektron ışınli ergitme (EBM).....	15
2.2. Fdm Yönteminde Kullanılan Kompozit Malzemeler.....	16
2.2.1. Polilaktik asit (PLA).....	19
3. LİTARETÜR ÖZETİ.....	22
4. MATERYAL VE METOD.....	27

	Sayfa
4.1. Materyal.....	27
4.1.1. Matrisler.....	27
4.1.1.1. Polilaktik asit (PLA).....	27
4.1.2. Katkı maddeleri.....	28
4.1.2.1 Çay atıkları.....	29
4.1.2.1 Hurma çekirdeği.....	29
4.2. Metod.....	30
4.2.1. Matris ve katkı maddelerinin öğütülmesi.....	31
4.2.2. Matris ve katkı maddelerinin fiziksel karışımlarının hazırlanması.....	32
4.2.3. Biyo-kompozit malzemelerin hazırlanması.....	35
4.2.4. Kompozit malzemelerden filament üretimi.....	37
4.2.5. Test örneklerinin 3D yazıcıda üretilmesi.....	40
4.2.6. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testinin yapılması.....	43
5. BULGULAR.....	45
5.1. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Çekme Testi Deneyi.....	45
5.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Çekme Testi Deney Sonuçları.....	47
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2. 1.ASTM standartları eklemeli imalat teknolojisi sınıflandırması (Diksu, 2021).....	6
Çizelge 2. 2. Filament çeşitleri ve özellikleri (Diksu, 2021).....	18
Çizelge 2. 3. Pla'nın özellikleri (Zehir,2022).....	21
Çizelge 4. 1. Matrislere eklenen katkı maddeleri ve oranları.....	33
Çizelge 4. 2. Tek vidalı ekstrüder uygulama parametreleri.....	38
Çizelge 4. 3. Xperia 3D printer teknik bilgiler.....	41
Çizelge 4. 4. 3D Yazıcıda yazdırılan örneklerin yazdırma parametreleri.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1. 1. Eklemeli İmalat (Tezel ve diğerleri, 2018).....	2
Şekil 2. 1. Prototip Üretim Süreci (Çelik ve Özkan, 2017)	5
Şekil 2. 2. FDM cihazı (Diksu, 2021).....	8
Şekil 2. 3. SLS Cihazı (Bayram, 2019).....	9
Şekil 2. 4. DMLS Yöntemiyle Üretim (Öter, 2021).....	10
Şekil 2. 5. SLM Cihazı (Diksu, 2021).....	11
Şekil 2. 6. SLA Cihazı (Çelik, Karakoç, Çakır ve Duysak, 2013).....	12
Şekil 2. 7. Poly Jet Cihazı (Tokdemir, 2022).....	13
Şekil 2. 8. 3DP cihazı (Diksu, 2021).....	14
Şekil 2. 9. LOM cihazı (Özsoy ve Duman, 2017).....	15
Şekil 2. 10. Elektron ışınli ergitme (EBM) cihazı (Uslu, 2019).....	16
Şekil 2. 11. Polilaktik asit zincirinin yapısı (Elmas, 2021).....	20
Şekil 4.1. Polilaktik Asit granül görüntüsü.....	28
Şekil 4. 2. Çay Atığı Kurutulmuş Hali.....	29
Şekil 4. 3. Hurma Çekirdeği.....	30
Şekil 4. 4. (a) Elmas marka çene ağızlı ve hava akışlı değirmen, (b) Mipro MLD öğütücü.....	31
Şekil 4. 5. Öğütölmüş hurma çekirdeği artıkları.....	32
Şekil 4. 6. Sarsak elek (Loyka ESM 200).....	33
Şekil 4. 7. (a) Öğütölmüş matris (PLA), (b) Öğütölmüş PLA ve çay atığı karışımı....	34
Şekil 4. 8. Öğütölmüş PLA ve Hurma Çekirdeği karışımı.....	34
Şekil 4. 9. PLA, öğütölmüş hurma çekirdeği ve çay atığı karışımı.....	35
Şekil 4. 10.Çift vida ekstrüder kullanım değeri.....	36
Şekil 4. 11. Soğutma havuzu.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4. 12. (a) Kırıcı, (b) Granül haline getirilen kompozit.....	37
Şekil 4. 13. (a) Filament sarma ünitesi, (b) Filament çap kontrol ünitesi.....	38
Şekil 4. 14. Tek vidalı ekstrüder.....	39
Şekil 4. 15. Üretilen filamentler.....	39
Şekil 4. 16. 3D baskılar için kullanılan yazıcı.....	41
Şekil 4. 17. 3D baskı ile üretilen çekme testi numuneleri.....	42
Şekil 4. 18. Çekme testi numune boyutları (mm).....	43
Şekil 4. 19. 3D baskıyla üretilen numuneler.....	44
Şekil 4. 20. Çekme testinin yapıldığı çekme testi cihazı.....	44
Şekil 5. 1. (a) 3D baskılı PLA numuneleri, (b) Numunelerin kopma noktaları.....	45
Şekil 5. 2. (a) 3D baskılı PLA-C numuneleri, (b) Numunelerin kopma noktaları.....	46
Şekil 5. 3. (a) 3D baskılı PLA-H numuneler, (b) Numunelerin kopma noktaları.....	46
Şekil 5. 4. (a) 3D baskıyla üretilen PLA-CH numuneler, (b) Numunelerin kopma noktaları.....	47
Şekil 5. 5. Saf PLA matrisinin gerilme-uzama eğrileri.....	48
Şekil 5. 6. PLA-C kompozitinin gerilme-uzama eğrileri.....	48
Şekil 5. 7. PLA-H kompozitinin gerilme-uzama eğrileri.....	49
Şekil 5. 8. PLA-CH kompozitinin gerilme-uzama eğrileri.....	49
Şekil 5. 9. Saf PLA ve kompozit malzeme örneklerinin ortalama gerilme-uzama eğrileri.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Tez çalışmasında kullanmış olduğumuz simgeler, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
C	Karbon
O ₂	Oksijen
H	Hidrojen
CO ₂	Karbondiyoksit
CH ₄	Metan gazı
CH ₃	Metil
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar**Açıklama**

STL	Stereolithograph
PLA	Polilaktik Asit
FDM	Eriyik Yığma Modelleme
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
DMLS	Direkt Metal Lazer Sinterleme
SLM	Seçici Lazerle Ergitme
SLA	Stereolitgrafi
EBM	Elektron ışınli ergitme
3DP	Three Dimensional Printing
LOM	Lamine Nesne İmalatı
Ra	Ortalama pürüzlülük
Rz	Ortalama tepe-vadi yüksekliği
Ry	Maksimum tepe-vadi yüksekliği
FFF	Fused Filamet Fabrication
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	Amerikan Standardizasyon Enstitüsü
CNC	Computer Numeric Control
PLA-C	PLA ve çay atıkları
PLA-H	PLA ve hurma çekirdeği
PLA-CH	PLA ve çay atığı, hurma çekirdeği

1.GİRİŞ

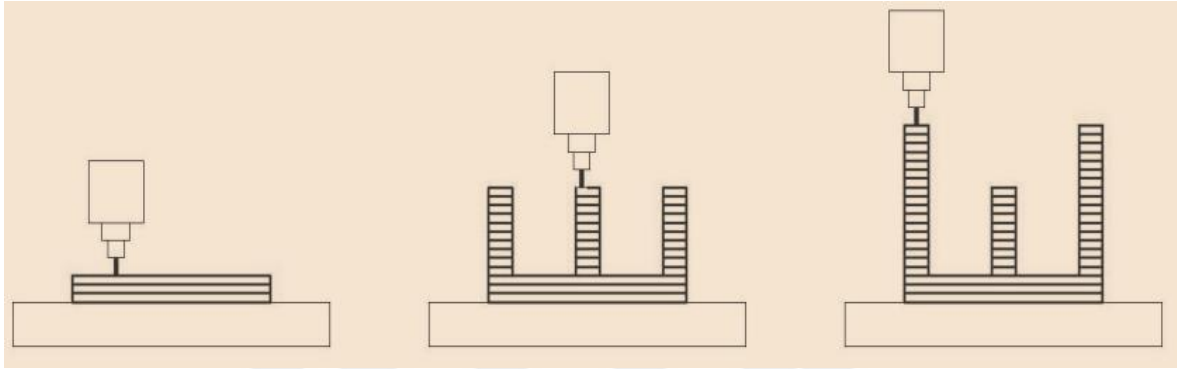
İnsanlığın varoluşundan bugüne kadar insanoğlu hayatını kolaylaştıracak araç gereçleri üretmeye çalışmıştır. Doğada bulunan maddeleri kendilerini gerek korumak için gerekse de günlük hayatta faydalanmak için doğayı araştırmıştır. Bu araştırmalar zamanla gelişerek çeşitli imalat yöntemlerinin günümüzde kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Günümüzde kullanılan imalat yöntemleri talaşlı imalat (delme, frezeleme, tornalama vb.) ve talaşsız imalat (plastik şekil verme, döküm, kaynak vb.) gibi geleneksel imalat yöntemlerinin yanında lazer, basınçlı su jeti, plazma ile işleme gibi günümüzün teknolojik gelişmeleriyle imalat yöntemlerine katılan yöntemlerde mevcuttur. Son yıllarda ise bilgisayarların hayatımızın her noktasında yerini aldığı gibi üretiminde çeşitlenmesine olanak sağlamıştır. Bu hususta imalat yöntemlerine bir yeni yöntem olarak eklemeli imalat yöntemi de yerini almıştır. Üç boyutlu baskı şeklinde bilinen ve eklemeli imalat yönteminin bir alt dalı olan bu yöntemde malzemelerin geleneksel imalat yönteminden farklı olarak imal edilecek malzemenin üst üste katmanlar şeklinde eklenmesi ile farklı geometrik şekillerin karmaşık yapılarının kolay bir şekilde üretilmesine olanak sağlamaktadır. (Dedeakayoğulları ve Kaçal, 2020)

Eklemeli imalat yönteminin asıl başlangıcı 1987 yıllarına dayanmaktadır. Bilgisayar destekli tasarımın nasıl üç boyutlu ürün olarak yapılabileceğinden yola çıkılarak bilgisayar destekli tasarımın Stereolithograph (STL)' ye dönüştürülmesiyle bu yöntemin temelleri atılmıştır. Lazer ultraviyole ışını kullanılarak termoset polimer malzemesinin ışığa duyarlı olması sebebiyle katmanlar halinde katılaşmasını sağlayabilecek ticari bir üç boyutlu polimer yazıcı (SLA-1) geliştirilmesiyle eklemeli imalat yönteminin ilk örnekleri ortaya çıkmıştır. (Yalçın ve Ergene, 2017)

Günümüze kadar gelişerek gelen bu eklemeli imalat yönteminde talaşlı imalattan ayıran en temel özelliği işlem yazdırma kafasının yazdırma yatağı üzerinde iki boyutlu ürün kesitlerini parçanın şekli üç boyutlu olarak tamamlanana kadar üst üste katmanlar oluşturması şeklinde gerçekleştirmesi işlemiyle çalışır. Üç boyutlu yazdırmada plastik malzemeler yaygın olarak kullanıldığı gibi metallerde de üç boyutlu olarak imal edilen parçaların üretimi mevcuttur. Bunların yanı sıra talaşlı imalatla üretilen parçaların üç boyutlu olarak üretilen parçalara göre ürün çeşitliliği hem dardır hem de imalat süresi uzundur. Bu durum talaşlı imalat yönteminin

olumsuzlukları olarak göze çarpmaktadır. Eklemeli imalatın kullanılmasında göze çarpan faydalı hususlar ise geometrisi karmaşık olan parçaların üretimi daha kolay ve hızlı olmasının yanında örnek prototiplerin de üç boyutlu yazıcıda üretilmesi hem zaman açısından hem kabiliyet açısından uygundur. Buda eklemeli imalatın faydaları arasında yerini alan birkaç durumdur. Şekil 1.1’de eklemeli imalat gösterilmektedir. (Tezel, Topal ve Kovan, 2018)



Şekil 1.1. Eklemeli İmalat (Tezel ve diğerleri, 2018)

Eklemeli imalat teknolojisinde kullanımında birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin arasındaki farklar ise katmanların nasıl meydana gelmesiyle ilişkilidir. En çok uygulanan yöntemler ise şu şekildedir. Dijital ışık işleme (Digital Light Processing (DLP)), eriyik yığma modelleme (Fused Deposition Modeling (FDM)), stereolithography (SLA), seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering (SLS)). Bunların arasından ekonomik olarak daha uygun ve dünyada kullanımı yaygın olduğundan eriyik yığma modelleme yöntemi (FDM) diğer eklemeli imalat yöntemlerinden bir adım öne çıkmaktadır. Birleştirme yoluyla yığma teknolojisi olan eriyik yığma modelleme yönteminde ısı kullanılarak şekillendirilebilen termoplastikler (PLA, ABS vb.) kullanılmaktadır. (Tokdemir, 2022).

Eriyik yığma modelinde (FDM) ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), PLA (Polylactic Acid), PC (Polikarbonat), PEEK (Polieter Eter Keton), PEI (Polyetherimide), PP (Polipropilen), PCABS (Polikarbonat Akrilonitril Butadien Stiren), TPU (Termoplastik Poliüretan) gibi malzemeler eriyik malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin bazıları organik bazıları ise anorganik malzemelerdir. (Özsoy ve Sayın, 2021; Başçı ve Yamanoğlu, 2021) Malzeme teknolojisinin geliştiği son yıllarda eriyik yığma modelinde (FDM) farklı kompozit filamentler de üretilmeye başlanmıştır. Bunların kullanılmasıyla üretilen akıllı

giysiler, kompleks sensörler, mikro akışkan cihazlar vb. gibi malzemelerin üretilmesinde kullanılmaktadır. (Başçı ve Yamanoğlu, 2021).

Tüketim çılgınlığının son yıllarda artmasıyla arz talep ilişkisi doğrultusunda üretilmesi gereken materyallerin hem hızlı üretilmesi hem de maliyetinin düşük olması amaçlanmaktadır. Teknolojini gelişmesi ve bu arz talep ilişkisi sebebiyle üretim yöntemlerinde gelişmeler kaydedilmiş farklı üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasında yararlı bir etki oluşturmuştur. Bununla birlikte üretimin artması doğrultusunda yaşadığımız çevrede olumsuz yönde etkilenmektedir. Üretimde kullanılan zararlı hammaddeler hem insan sağlığına zarar vermekte hem de çevremizde kirliliğe ve yüzyıllar boyunca yok olmayan ürünlerin doğada kalmasına sebep olmaktadır.

Bu tezimizde eklemeli üretim yöntemlerinden olan eriyik yığma modelinde kullanılan organik ve doğada çözünmesi kolay olan PLA (Polylactic Acid) hammaddesinin maliyetini düşürmek ve atık maddelerin geri dönüşümünü sağlayıp kullanılabilir bir filament oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kütlece %90 oranında PLA matrisine katkı maddesi olarak çay atıkları kütlece %10 oranında PLA-çay atıkları(PLA-C), kütlece %90 PLA matrisine hurma çekirdekleri kütlece %10 oranında PLA-hurma çekirdeği (PLA-H) ve kütlece %90 PLA matrisine yine kütlece %5 çay atıkları, %5 hurma çekirdekleri PLA - çay+hurma çekirdekleri (PLA-CH) malzemeleri önce fiziksel olarak daha sonra da çift vida ekstrüder kullanılarak homojen olarak karıştırılması sağlanıp oluşturulan karışımlardan da tek vida ekstrüderde kompozit filamentler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için filamentler kullanılarak 3D yazıcıda çekme testi numuneleri bastırılarak çekme testleri yapılmış ve saf PLA kontrol numunesi ile üretilen kompozitlerin çekme test sonuçları karşılaştırılmıştır.

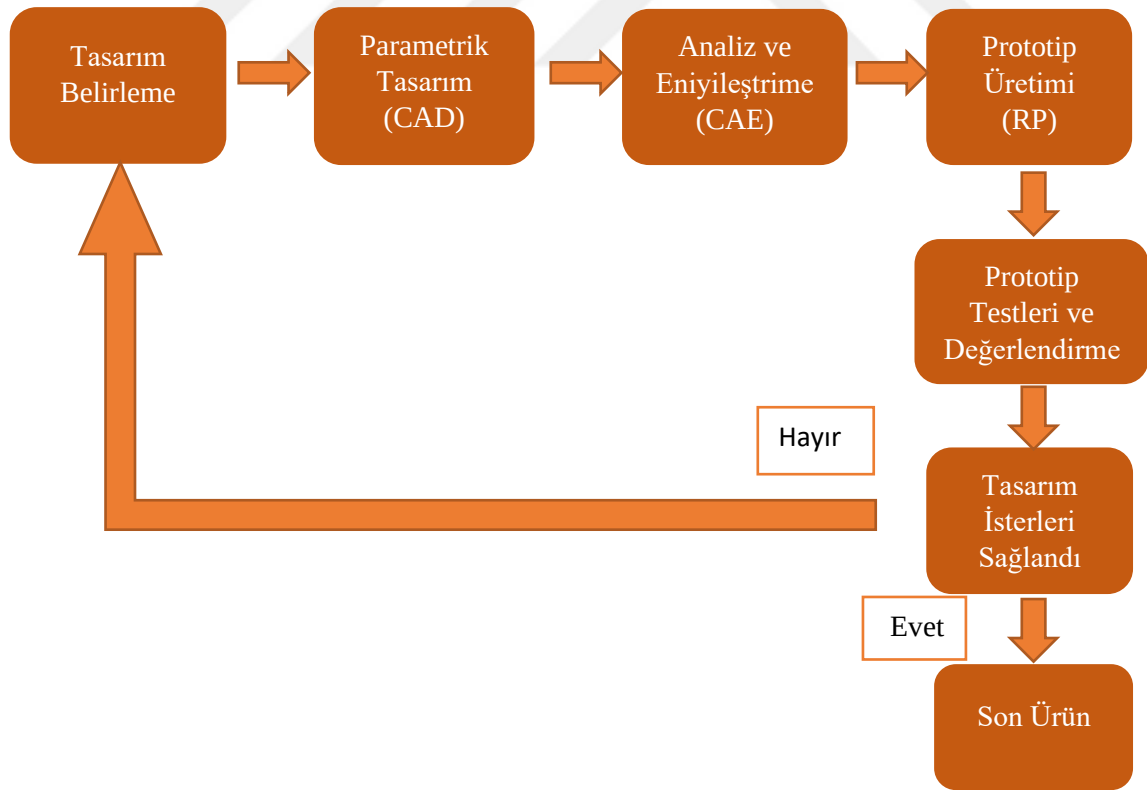
2.EKLEMELİ İMALAT

Yarım asırdan beri imalat yöntemleri talaşlı imalat ve talaşsız imalat olmak üzere iki başlıkta toplanmıştı. Talaşlı imalatta üretilcek parçadan malzeme koparılmasıyla yani talaş kaldırılmasıyla malzemenin üretilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntemlerin başında tornalama, frezeleme, tel erozyon ve CNC işleme gelmektedir. Talaşlı üretim yöntemi seri üretim yapılan durumlar için uygun bir üretim yöntemidir. Üretimde yüksek hassasiyetli olması bu üretim yönteminin bir diğer avantajıdır. Ancak bu üretim yönteminin bazı dezavantajları vardır. Üretim sırasında kesme takımlarının boyut ve şekillerinden dolayı karmaşık geometrili parçaların üretimi zahmetlidir ayrıca parça üretilirken oluşan talaşlar görece verimliliği düşürür. (Bıyıkoglu, 2019).

Talaşsız üretim yönteminde ise talaşlı üretim yönteminde olduğu gibi parça üretimi yapılırken parçadan talaş kaldırma yapılmadan gerçekleşen üretim yöntemidir. Talaşsız üretim yapılırken farklı yöntemler uygulansa da talaşsız üretimde ortak olan nokta da budur. Bu üretim yönteminde kullanılan başlıca kategoriler ise döküm, haddeleme, ekstrüzyon ve preslemedir. Seri üretime uygun olan talaşsız üretim yönteminde ilk maliyet genel olarak yüksektir. Ayrıca karmaşık geometrili şekillerin üretimi yapılırken döküm yöntemlerinin bazıları hariç üretime olanaklı değildir. Bu durum talaşsız üretim yöntemlerinin olumsuz yönü olarak göze çarparken metallerin, plastiklerin ve seramiklerin bu yöntemle işlenebilir olması olumlu bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Talaşlı üretim yönteminde ise büyük oranda metallerin işlenmesi talaşsız üretim yöntemine göre dezavantajlı bir durumda olmasına olanak sağlamaktadır. (Bıyıkoglu, 2019).

Eklemeli imalat bu geleneksel imalat yöntemlerinin yanında yeni türden bir imalat yöntemi olarak yerini almaktadır. Üretilcek parçanın katmanlar halinde teker teker biriktirilmesiyle oluşan üretim yöntemine eklemeli imalat denir. Bu sebepten dolayı geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi malzemenin şekillendirilmesi ya da eksiltilmesi yönteminin aksine malzemenin katmanlar halinde biriktirilerek oluşturulması geleneksel imalat yöntemlerinden ayrılmasına neden olmaktadır. (Kruth, Leu ve Nakagawa, 1998). Eklemeli imalat 3 boyutlu baskılama, 3d printing gibi aslında kendi imalat yöntemleri olan bu isimlerle de anılmaktadır ancak bunlar eklemeli imalat yöntemlerinden birkaçıdır. Eklemeli imalat yöntemleri başlangıçta malzeme üretimi için prototip oluşturmak amacıyla kullanılmaktaydı. Bu kullanımlar sırasında geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi

malzeme israfı olmaması ve karmaşık geometrili malzemelerinde üretiminde teorik olarak kısıtlamalar yaşanmaması nedeniyle son yıllarda kullanımı bir hayli yaygınlaşmaktadır. Üretilecek malzemelerin seri üretimine başlamadan önce malzemenin prototipi çıkarılır. Eklemeli imalatla oluşturulacak olan prototip için öncelikle prototipin temel tasarımı yapılmakta ve daha sonra üç boyutlu olarak modellenmektedir. Modellemesi yapılan tasarımın analizleri bilgisayar destekli olarak yapılmakta ve analiz değerlerine göre tasarımda iyileştirmeler yapılarak prototipin üretilmesi sağlanmaktadır. Üretimi yapılan prototip fiziki testlerle kontrolleri yapılarak tasarımın uygunluğu denetlenir. Tasarımın uygunluğu değerlendirmeler sonucunda onaylanırsa ürün seri üretime alınıp üretimi yapılması sağlanır. Prototipin oluşturulması bu noktada önem kazanmaktadır. Bu önem arz eden durum eklemeli imalatında ortaya çıkmasına ve yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır. Zamanla bu yöntemin prototip oluşturmak için kullanımının yansısı üretimi kolay olmayan veya üretim miktarı az olan ürünlerinde seri üretimi yapılmaya başlanmıştır. Tıp, havacılık, uzay, otomobil gibi sektörlerde de zamanla bu yöntemle üretilen ürünler kullanılmaktadır. Şekil 2. 1’de prototip üretim süreci gösterilmektedir. (Çelik ve Özkan, 2017)



Şekil 2.1. Prototip Üretim Süreci (Çelik ve Özkan, 2017)

2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri

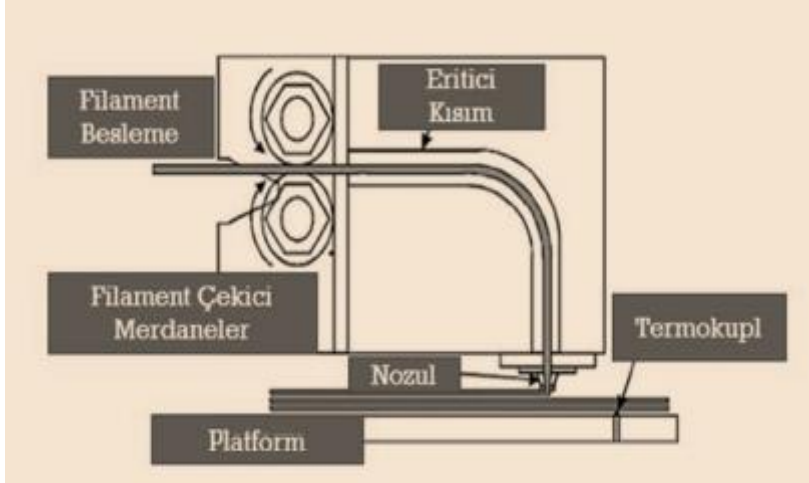
Teknolojinin gelişmesiyle eklemeli imalat yöntemlerinin kullanım sıklığı ve alanları da artmaktadır. ASTM standartlarına göre yedi kategoride değerlendirilen eklemeli imalat teknolojisinin değerlendirilen kategorileri şu şekildedir. Malzeme ekstrüzyonu, toz yatak füzyonu, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, tabaka laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji birikimi şeklinde kategorileri mevcuttur. Kategoriler çizelge 2.1’de görülmektedir. (Diksu, 2021)

Çizelge 2.1.ASTM standartları eklemeli imalat teknolojisi sınıflandırması (Diksu, 2021)

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

2.1.1. Eriyik yığma modelleme (FDM)

Eklemeli imalat yöntemlerinden eriyik yığma modeline göre bir parçanın üretimi yapılabilmesi için öncelikle parçanın tasarımı yapılması gerekmektedir. Tasarımı CAD programlarından (Solidworks, catia vb) birinden yapılan parçanın datası STL formatında kaydedilir. STL formatı üretimi yapılacak parçanın tasarım dosyasını küçük parçalara, dilimlere ayırarak katmanlar şeklinde üretimi yapılmasına kolaylık sağlar. STL formatındaki bu data parçanın platform üzerinde konumlandırılıp işlem basamaklarının belirlenebilmesi için üretim koduna dönüştürülür. Bu kod sayesinde parçanın üretimi yapılabilmesi ve x, y ve z yönlerinde nozul hareketleri sağlanabilmesi için komutlar bulunmaktadır. Bu noktadan sonra üretimi yapılacak parçanın üretimi yapılabilmesi için cihazın hazır hale getirilmesi sağlanmalıdır. FDM modeliyle üretilecek parçanın ilk katmanı cihazın tablası üzerinde imalata başlanır. Bu tablanın sıcaklığı üretilecek malzemeye göre belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve üretimin sonuna kadar bu sıcaklıkta tutulması sağlanmalıdır. Bu noktadaki amaç ise üretime başlandığında ilk katmanın tabla üzerine yapışarak sabit kalması ve üretim sonuna kadar ayrılmamasıdır. Üretim yapılması için dikkat edilmesi gereken bir diğer hususta eriyik malzemeyi basacak ekstrüder kafası da malzemenin özelliklerine göre belli bir sıcaklıkta olması ve üretim sonuna kadar bu sıcaklıkta kalması sağlanmalıdır. FDM yönteminde kullanılacak malzeme filament şeklinde olmalıdır. Bu filament yarı sıvı durumuna gelinceye kadar ısıtılarak cihazın tablasına öncelikle birinci katmanında iki boyutlu bir yapı oluşturur. Bunu ise ekstrüzyon başlığından (nozul) filamentin yarı eriyik şeklinde devamlı ve kesintisiz olarak çıkması sağlanarak yapılır. Bu devamlılığı ise bobine sarılmış olan filamentin bir motor yardımıyla çekilerek sağlanmaktadır. İki boyutlu olarak ilk katman basıldıktan sonra ekstrüzyon başlığı bir katman kalınlığında yükselerek ikinci katmanın imalatı sağlanır. Bu şekilde katman katman üretim sonuna kadar ekstrüder başlığı her katmanda sürekli olarak hareketine devam eder ve üç boyutlu şeklin oluşmasını sağlar. FDM yönteminde kullanılan bu cihaza ait bölümler şekil 2.2’de gösterilmiştir. (İsmail, Yap ve Ahmed, 2022; Nikzad, Masood ve Sbarski, 2011)



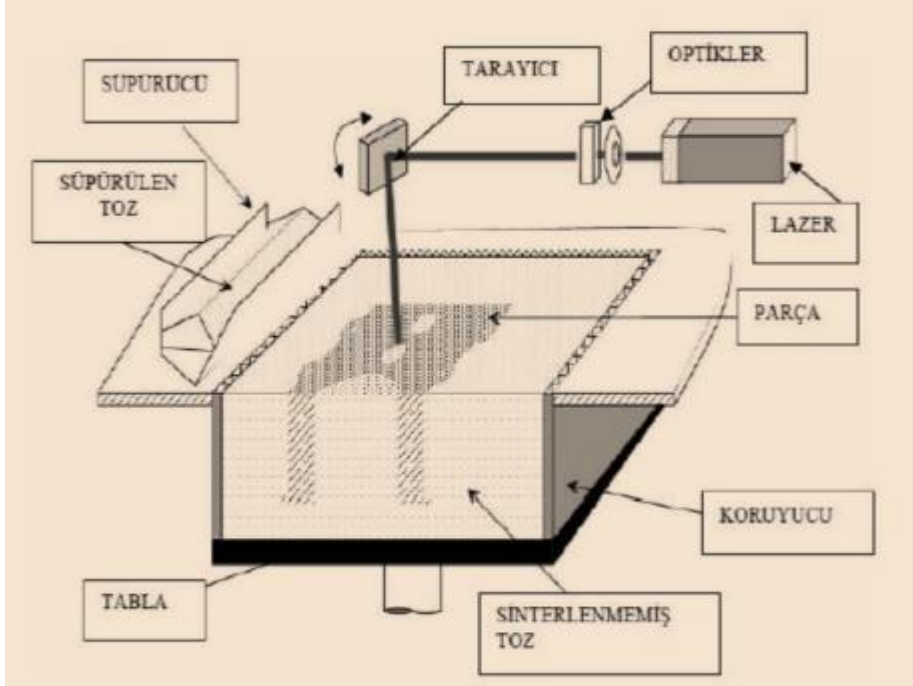
Şekil 2.2. FDM cihazı (Diksu, 2021)

2.1.2. Seçici lazer sinterleme (SLS)

Seçici lazer sinterleme yöntemi eklemeli imalat yöntemlerinden lazer enerjisi kullanılarak yapılan üretim yöntemidir. Seçici lazer sinterleme 1989 yılında Carl Deckard tarafından geliştirilmiş ve Texas Üniversitesi tarafından patentlenmiştir. 1990 yılına gelindiğinde ise Brouell ve Manriquez- Fayre tarafından eklemeli imalat olarak metal malzemenin üretimi yapılmıştır. (Celalettin Kaplan, 2021)

Bu yöntemde toz bir malzemenin silindir yardımıyla eşit olarak üretim alanına yayılmasıyla sağlanır. Burada yayılan toz katmanının kalınlığının 0.02-0.1 mm aralığındadır. Bu katmanların sinterlenmesi(katılaşması) için yüksek termal enerjiye ihtiyaç duyulur. İhtiyaç duyulan termal enerjiyi de lazer kullanılarak elde edilir. Burada lazer sinterlemeyi oluşturmak için toz yatağı üzerine taranır. Bu şekilde katmanlar teker teker oluşturularak üç boyutlu yapı meydana gelinceye kadar devam eder. İmalat yapılan oda kapalıdır. Oksidasyonu önlemek için inert bir atmosferde (nitrojen vb.) üretim gerçekleştirilmelidir. (Santos, Shiomi, Osakada ve Laoui, 2006)

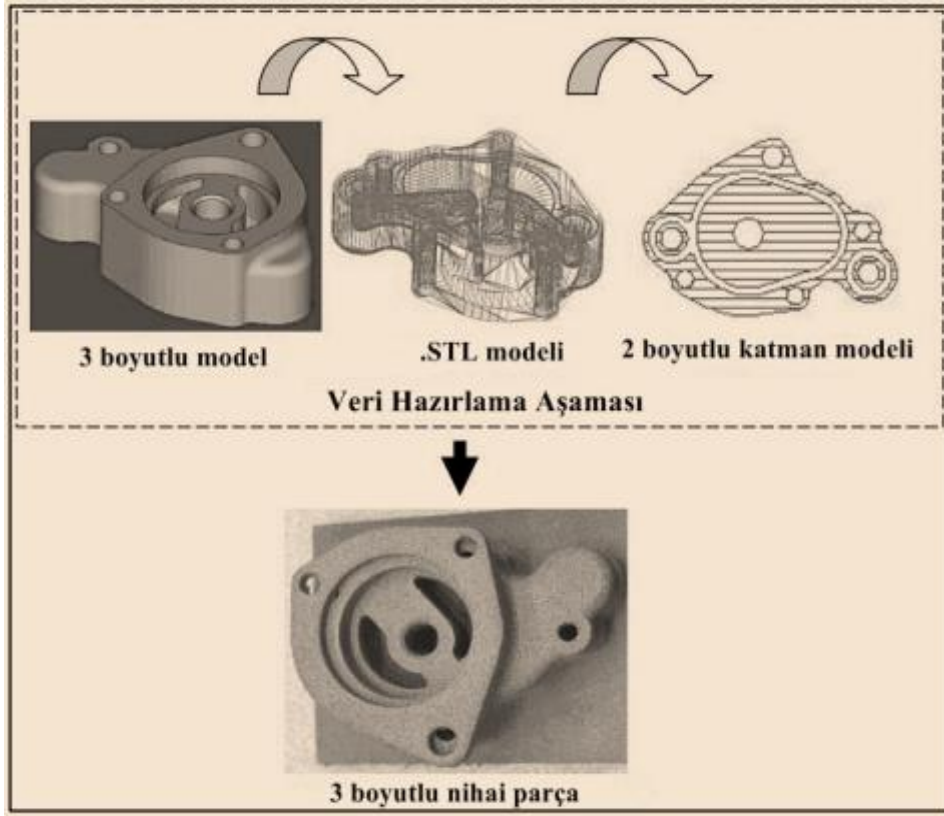
Bu yöntemle metal, seramik, polimer, cam, pulvarize olabilen herhangi bir malzemenin eklemeli imalat olarak üretilmesi gerçekleştirilebilir. SLS cihazına ait bölümler şekil 2.3'te gösterilmektedir. (Celalettin Kaplan, 2021)



Şekil 2.3. SLS Cihazı (Bayram, 2019)

2.1.3. Direkt metal lazer sinterleme (DMLS)

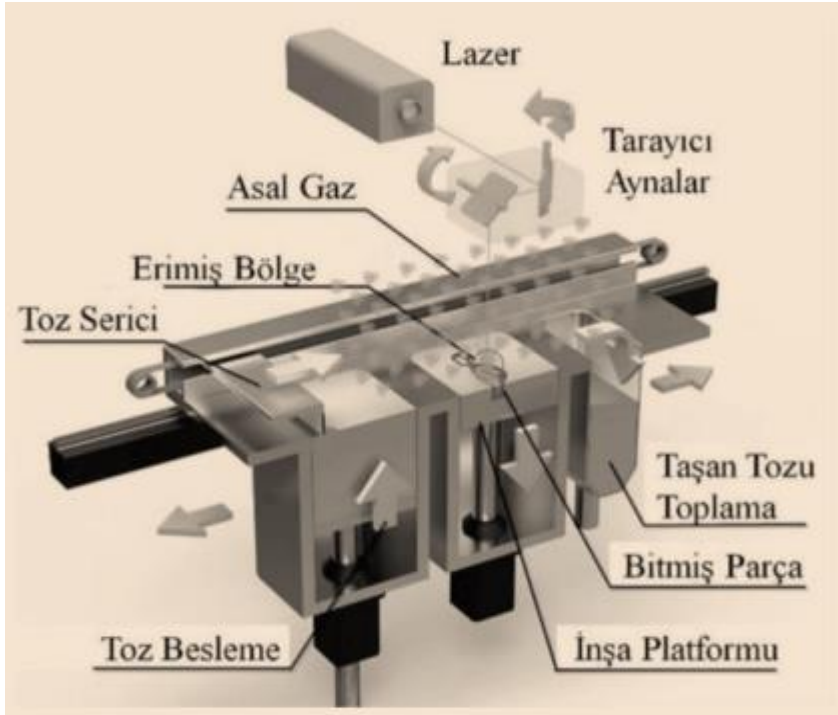
Dlms, Rapid Product Innovations (Rusko, Finlandiya) ve EOS Gmbh (Münih, Almanya) tarafından 3 boyutlu olarak boyutsal doğruluğu yüksek olan metalik ürünlerin küçük miktarlar halinde imal edilmesi için geliştirilen hızlı prototipleme tekniğidir. Eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan bu yöntemde bir CAD programında tasarlanan parça STL formatına çevrilir ve cihaz parçanın üretimi için konumlandırılır. Yüksek enerjili lazer kullanılarak metal tozların parçanın nihai geometrisinin oluşması için öncelikle ilk katmanda lazer sayesinde sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Parçanın geometrisi oluşuncaya kadar katman katman bu işlem devam eder ve üretimi yapılması istenen parça bu yöntemle üretimi yapılmış olur. Bu yöntemle geleneksel üretim yöntemiyle üretilmeyecek ya da üretilmesi zor olan karmaşık geometrili parçaların üretimi kolaylıkla gerçekleştirilir. DLMS yöntemi ile üretilen parçanın yüksek hassasiyetle üretilmesi kalıp tasarımı, takımla şekillendirme vb. üretim basamaklarını ortadan kaldırması ve aynı zamanda birden fazla parçanın üretilmesini gerçekleştirme yeteneği sayesinde prototip üretiminde, küçük miktardaki parçaların üretiminde zaman ve maliyet kazancı sağlayan ileri teknoloji bir üretim yöntemi olarak göze çarpmaktadır. DMLS cihazına ait bölümler şekil 2.4'te gösterilmektedir. (Öter, 2021)



Şekil 2.4. DMLS Yöntemiyle Üretim (Öter, 2021)

2.1.4. Seçici lazerle ergitme (SLM)

Lazer toz yatağı füzyonu olarak bilinen seçici lazer ergitme yöntemi (SLM), metal tozlarını eritmek için bir lazer enerji kaynağı kullanan eklemeli imalat yöntemidir. CAD programında tasarlanan parça STL formatında kaydedilir. Üretilmesi planlanan tasarımın geometrisi dilimlenerek SLM cihazının ayarları yapılır ve üretime hazır hale gelir. Bu işlemde SLM cihazı vasıtasıyla toz serme işlemi yapılır. Serilmiş tozun son derece kontrollü bir ortamda ergitilmesi sonrasında yüksek hızlı bir mikro kaynak işlemiyle parçaların üç boyutlu baskısını katman katman gerçekleştirilmesiyle oluşan SLM yöntemi bir eklemeli imalat yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. SLM yönteminin çıkış noktası SLS yöntemine dayanır. SLM yöntemi örnek alınarak oluşturulan bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. SLM cihazı şekil 2.5'te gösterilmektedir. (Diksu, 2021)

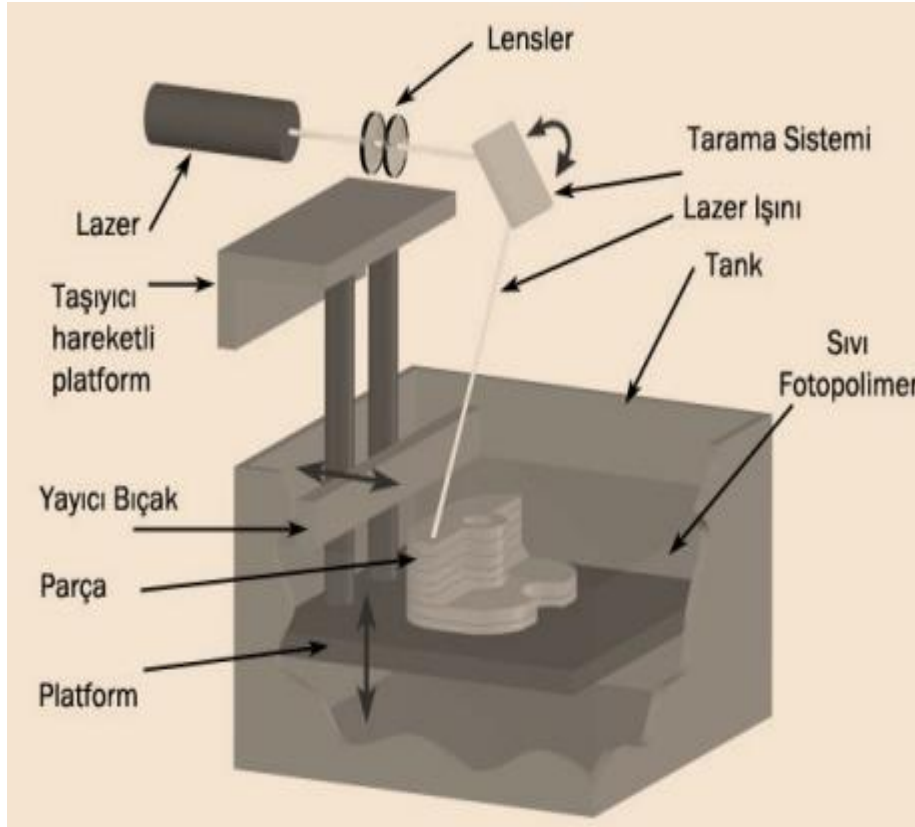


Şekil 2.5. SLM Cihazı (Diksu, 2021)

2.1.5. Stereolitgrafi (SLA)

Fotopolimer malzemeler yani ışınlara duyarlı polimerler ultraviyole ışınlarla karşılaştıklarında kürleşebilen malzemelerdir. Charles Hull 1980’li yıllarda bu malzemelerin lazer ışınlarıyla maruz kalması sonucunda katılaşmasını sağlayacak çalışmalar yapmıştır. Charles Hull’ün yapmış olduğu bu çalışmalar sayesinde fotopolimer malzemeler kullanarak oluşturulan üç boyutlu malzemeler meydana gelmiştir. Stereolitgrafi yönteminin çıkması bu çalışmalar sayesinde olmuştur. Bu yöntemde bilgisayar programında tasarlanan prototip, ışına duyarlı akışkan malzemenin lazer ışını ile taranarak katman katman yüksek boyutlu hassasiyetlerde üç boyutlu olarak polimer malzemelerin imalatı gerçekleştirilir. Geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi çok miktardaki malzemenin üretilmesi için oluşturulan üretim basamaklarını ortadan kaldırdığı gibi aynı zamanda kalıbı oluştururken malzemenin istenilen şekle gelebilmesi amacıyla geleneksel imalat yöntemlerinde sarf edilen atık malzemenin de oluşmasını engelleyen bir üretim yöntemidir. Üretimi yapılan üç boyutlu polimer yapıların istenilen düzeyde mekanik özellikleri olmadığı için mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla polimerizasyon işlemlere başvurulur. SLA yöntemiyle üretilen üç boyutlu polimer malzemenin polimerizasyon süresi polimer malzemenin mekanik özelliklerini, yüzey kalitesini, boyut hassasiyetini etkilemektedir. Bu yöntemin diğer

eklemeli imalat yöntemlerine göre iki hususta avantajları mevcuttur. Birincisi hassasiyet (parça doğruluğu) ikincisi de yüzey kalitesidir. Üretilen bu parça genellikle orta düzeyde mekanik özelliklere sahip olduğu göze çarpmaktadır. SLA cihazı şekil 2.6'da gösterilmektedir. (Diksu, 2021; Aktitiz, Aydın ve Topcu, 2020).

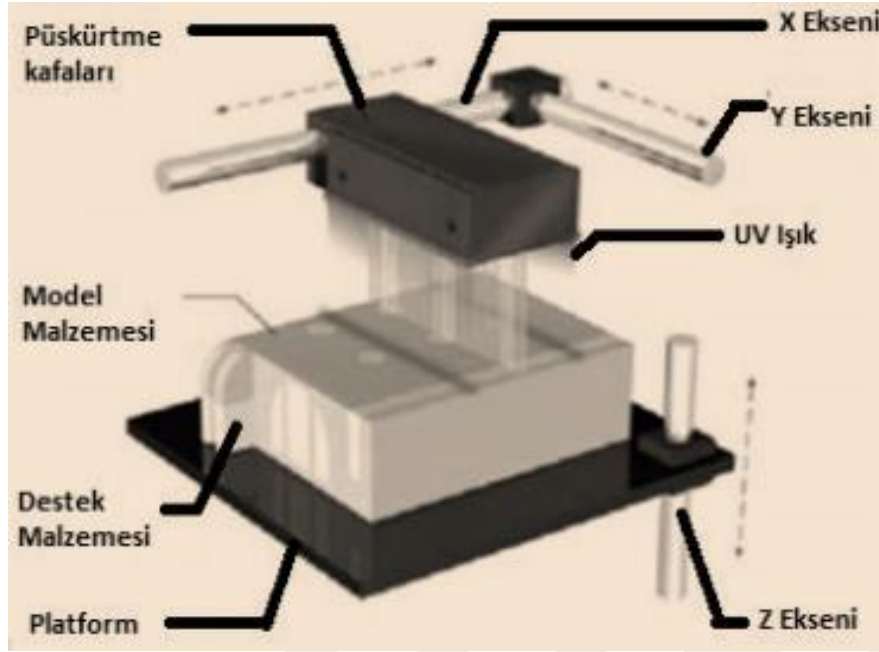


Şekil 2.6. SLA Cihazı (Çelik, Karakoç, Çakır ve Duysak, 2013)

2.1.6. Poly jet-ink jet baskı

Poly jet-ink jet teknolojisi 16 μm 'lik katmanlar halinde imal edilmesi istenen parçanın son hali tamamlanana kadar devam eder. Burada imal edilmesi istenen parçanın için kullanılan malzeme fotopolimer bir malzeme olması gerekmektedir. Parçanın tamamlanabilmesi için fotopolimer malzeme bir platform üzerine katman katman püskürtülür. Püskürtülen her fotopolimer katman poly jet cihazından çıkan UV ışıklar sayesinde sertleştirilir ve işlenip kullanılacak tamamen sertleşmiş modeller bu eklemeli imalat yöntemiyle ortaya çıkmış olur. Bu üretim yönteminde karmaşık geometrili malzemelerin aynı diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi üretilmesi gerçekleşir. Poly jet cihazı şekil 2.7'de

gösterilmektedir. (Deáky, Udriou, Lupulescu ve Bâlc, 2011; Haverman, Karagozoglu, Prins, Schulten ve Forouzanfar, 2013).



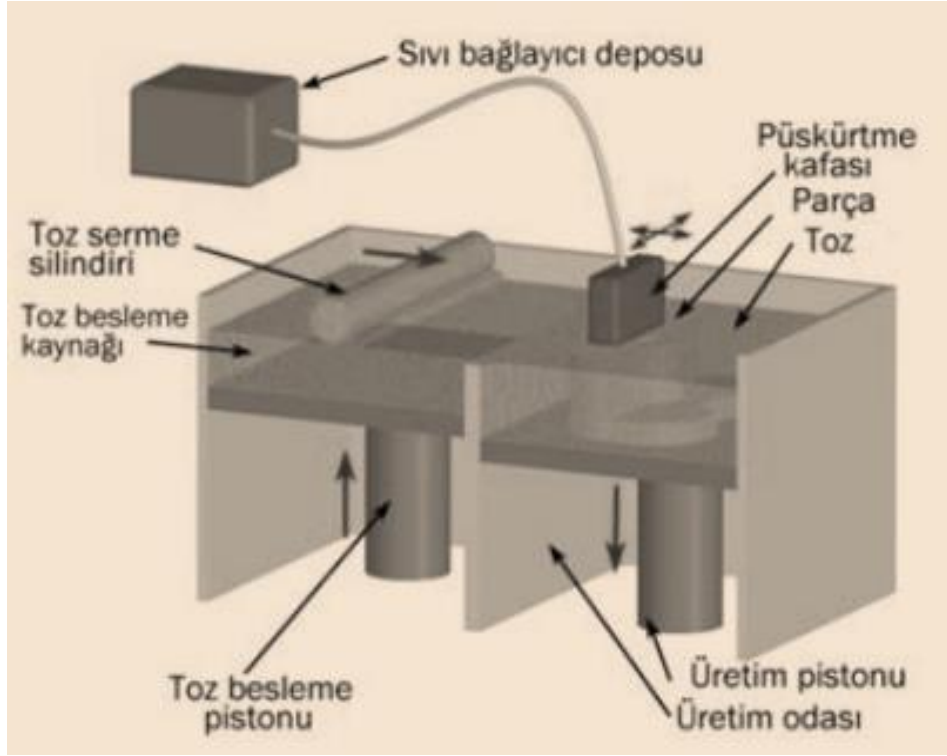
Şekil 2.7. Poly Jet Cihazı (Tokdemir, 2022)

2.1.7. Three dimensional printing (3DP)

Üç boyutlu yazdırma teknolojisini ilk çıkış noktası Massachussets Teknolojisi Enstitüsü'nde Amerika'ya dayanmaktadır. Üretilmesi istenen parçanın öncelikle CAD programlarında üç boyutlu tasarımı yapılması ve bu tasarımın STL formatına dönüştürülmesi eklemeli imalat yöntemlerinin temel başlangıç noktasını oluşturmaktadır.

Bu üretim yönteminde de aynı yol izlenmektedir. Bu noktadan sonra cihaz üretime hazır hale getirilir ve cihazın platformu üzerine üretim yapılması planlanan toz malzeme serilir. Bu tozların birbirlerine tutunması için bağlayıcı bir yapışkan STL formatındaki verilere göre püskürtülerek tasarlanan parçanın ilk katmanının basımı yapılmış olur. Diğer katmanların basımı yapılması için platform bir katman yer değiştirir. Biten katmanın üstüne yeni toz malzeme serilir. Serilen yeni toz malzemenin üstüne bağlayıcı yapışkan püskürtülür. Bağlayıcı yapışkan toz malzemeleri birbirine bağladığı gibi katmanlarında birbirlerine bağlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu katman katman devam eden durum tasarlanan parçanın nihai olarak üretilmesiyle son bulmaktadır. Parça üretimi sırasında destek görevi

gören toz atıkları bir vakum sayesinde temizlenir. Eklemeli imalat yönteminin bu türü sayesinde polimer tozlar, metal tozlar, seramik tozlardan parça üretimi veya prototip üretimi yapılması sağlanır. 3DP cihazı şekil 2.8’de gösterilmektedir. (Diksu, 2021; Islam, 2022)

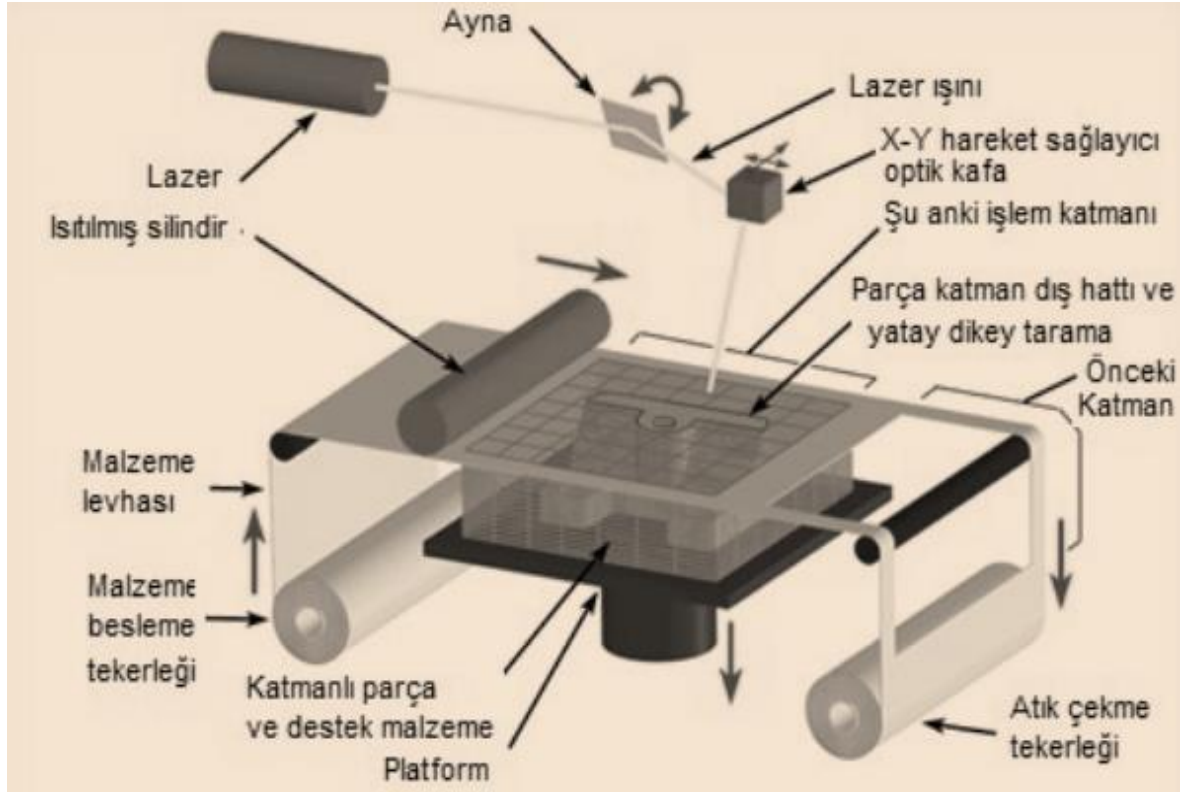


Şekil 2.8. 3DP cihazı (Diksu, 2021)

2.1.8. Lamine nesne imalatı (LOM)

İlk ticari olarak Lamine Nesne İmalat sistemi Helisys tarafından 1991 yılında piyasaya sürülmüştür. Bu sistemin meydana gelmesine olanak sağlayan ana bileşenler; üretimi yapılmak istenen parçanın üretilmesi için üretim platformuna levha getiren besleme mekanizması, basınç uygulayarak levhaların bir alt katmana yapıştırılması için kullanılan ısıtılmış bir silindir ve katmanların birbirlerine geçişinde levhaların kesilmesi için kullanılan lazer şeklindedir. Üretilmesi istenen geometrideki parça öncelikle bir CAD programlarında tasarlanır. Tasarımı yapılan parça STL formatına çevrilerek üretim yapılacak cihaza veri girişi yapılması sağlanır. Cihazın hazırlanmasıyla parça üretimine başlanır. Üretimin yapıldığı platform yüzeyine ilk katman besleme mekanizması yardımıyla serilir. Serilen levhanın yüzeye veya bir önceki katmana tutunmasının sağlanması için sıcak silindir levhanın üzerinden basınç uygulayarak geçer ve katmanların birleşmesi sağlanır. Lazer sayesinde bu levhanın kesilmesiyle bir sonraki katmanın tekrar oluşturulup katman katman

tasarlanan parçanın üretilmesi bu döngüyle sağlanır. Lazer levhaları kestikten sonra atık levha parçaları diğer katmanların üretiminde destek olarak görev aldığı için parça geometrisi tamamlanana kadar platforda kalır. LOM cihazı şekil 2.9’da gösterilmektedir. (Özsoy ve Duman, 2017)

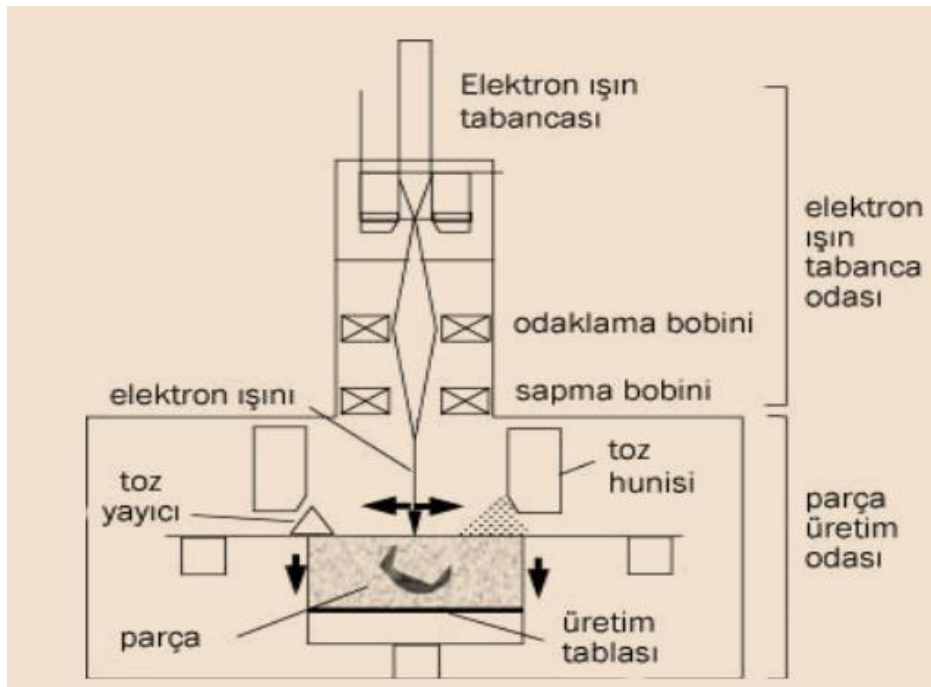


Şekil 2.9. LOM cihazı (Özsoy ve Duman, 2017)

2.1.9. Elektron ışınli ergitme (EBM)

Elektron ışınli ergitme yönteminin ilk kullanım örnekleri 1950’li yıllara dayanmaktadır. Nükleer alanda refrakter ve reaktif malzemeleri birleştirmek için ilk örnekleri bu tarihte ortaya çıkmıştır. Daha sonra ise çeşitli sektörlerde kullanımı yaygınlaşmıştır. (Kaynak Yiintemi Aydın & Aydın, n.d.). Elektron ışınli ergitme yöntemi (EBM), toz yatağı füzyon ailesine ait metal parçaların eklemeli olarak imalatında kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden bir tanesidir. Elektron ışınıyla ergitme yöntemi, Seçici lazer eritme yöntemine (SLM) benzerdir tek fark EBM’nin metal tozunu yüksek vakumda eritmek için bir elektron ışını kullanmasıdır. EBM makinesinin vakumlanmış ortamı sayesinde malzemenin kimyasal bileşimi korunur. Bu nedenle üretilmesi istenen parça için titanyum alaşımları gibi reaktif malzemeler kullanılabilir. EBM yönteminde malzeme 1000 santigrat

derece gibi yüksek bir sıcaklıkta oluşur. Bu nedenle bu yöntemle üretilmek istenen parçaya ek ısıl işleme gerek kalmadan parça bu sıcaklıkta üretilmiş olur. Metal sinterleme işleminin aksine EBM yönteminde, metal tozlar tamamen eriyerek oluşan parçanın yoğunluğu oldukça yüksek olurken malzemenin iç yapısı boşluksuz bir yapıya sahip olur. Bu durum üretilmek istenen malzemenin mekanik özelliklerinin iyi olmasının temel sebebi olarak göze çarpar. EBM yöntemi havacılık, medikal uygulamalar gibi titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. EBM cihazı şekil 2.10'da gösterilmektedir. (Akbulut, 2019)



Şekil 2.10. Elektron ışınli ergitme (EBM) cihazı (Uslu, 2019)

2.2. Fdm Yönteminde Kullanılan Kompozit Malzemeler

Eklemeli üretim yönteminden birisi olan eriyik yığma modelleme yönteminde karmaşık geometrideki yapıların imalatı farklı türden malzemelerle gerçekleştirilebilirler. Üretimi yapılacak ürünün istenilen özelliklere göre malzemeler seçilerek üretimi yapılabilmesi mümkündür. Eriyik yığma modelleme yönteminde PLA, ABS, PA, PC gibi malzeme olarak termoplastik özellikteki filamentler kullanılarak ürünler oluşturulabilir. Aynı zamanda kompozit malzemelerinde kullanımıyla ürünlerin imalatı gerçekleştirilebilir. (Dudek, 2013)

Kompozitler malzemeler kimyasal ve fiziksel olarak farklı özellikteki iki veya daha fazla malzemenin belli oranlarda birleştirilmesiyle oluşan, kendisini oluşturan malzemelerin özelliklerinden farklı yeni bir ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir. Kompozit malzemeler güçlü olmaları, hafif olmaları ve ucuz olmaları sebebiyle tercih edilmektedirler. Kompozit malzemelere örnek olarak çimento ve beton gibi yapı malzemeleri, fiber takviyeli yapı polimerler gibi takviyeli plastikler, seramik kompozitler ve metal kompozitler verilebilir. (Fowler, Hughes ve Elias, 2006)

Biyo-kompozit malzemeler kendisini meydana getiren iki veya daha fazla malzemenin en az birinin biyo kaynaklı malzemelerden olmasıyla oluşmuş olan malzemelerdir. 1980'lerin sonlarına doğru geliştirilmeye başlanan biyo-kompozitler doğal/biyo liflerden oluşan ve doğada bozulabilir olan PLA gibi veya doğada bozulmayan PP, PE gibi polimerlerden elde edilebilirler. Doğal polimerler yenilenebilir olmaları, doğada bol miktarda bulunmaları ve ucuz olmaları sebebiyle günümüzde ilgiyle yaklaşılacak polimerlerdendir. (Yüzgeç, 2019) Yeşil polimerler olarak adlandırılan biyo-kompozitler doğal lifler ve biyolojik olarak doğada çözünebilir polimerlerden oluştuğundan dolayı çevre dostudur. Anaerobik veya aerobik olarak doğada çözümleri sonucunda su, karbondioksit, metan, tuz mineralleri ve biyokütleler oluşurlar. Doğada çözünebilir olmaları ve çözümleri sonucunda çevreye zarar vermedikleri bu veriler ışığında söylenilebilir. (Vilaplana, Strömberg ve Karlsson, 2010)

Üç boyutlu baskı teknolojisinde biyo-kompozitler son yıllarda ilgi çekmektedir. Hem endüstride hem de bireysel olarak kullanımı yaygınlaşan üç boyutlu baskı teknolojisi ile üretilen ürünlerin çevreye zarar vermemesi ve geri dönüştürülebilir olması, biyobozunurluğu yüksek filamentlerin üretilmesiyle doğrudan ilişkilidir. (Çakır Yiğit ve Karagöz, 2021) Biyobozunurluğu yüksek filamentlerin üretilmesinin yanında üretilecek filamentin mekanik ve fiziksel özelliklerinin de iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda filamentlere ahşap tozu ve ahşap lifi katılarak üretilen filamentlerin yansıra, ahşabın yapıtaşını oluşturan aynı zamanda da doğada en yaygın bulunan polimer olan selüloz ve lignin gibi polimerlerin üç boyutlu baskı yönteminde kullanılması için katkı maddesi olarak filament üretiminde kullanılabilirler. Bu sayede biyo bazlı olarak kullanılan PLA, Bio ABS, Bio TPU vb. gibi matrislerin kullanım oranını düşürmek, mekanik özellik bakımından kullanılabilir biyo-kompozit malzemeler oluşturulmak ve doğada da çözünmesi kolay ve çevre dostu bir filament üretimi amaçlanmaktadır. (Altun, 2015)

Eklemeli üretim yöntemlerinde birisi olan eriyik biriktirme modelleme yönteminde (FDM) çok sayıda filament malzeme mevcuttur. ABS, PLA, PET-G, PC, PVA, TPE, TPUİ HIPS gibi öremekler bunlardan birkaç tanesini oluşturmaktadır. FDM yönteminde kullanıcılar tarafından tercih edilen malzemeler genellikle PLA ve ABS filamentleridir. (Diksu, 2021). Biz bu araştırmamızda organik bazlı PLA granül malzemesine yine organik olan aynı zamanda geri dönüştürülerek katkı değer oluşturmak ve PLA oranını azaltıp mekanik özellikleri bakımından da yeterli olabilmesi açısından çay atığı ve hurma çekirdeğinin öğütülerek belli oranlarda birbirleriyle karıştırılıp filament üretimi yapılması amaçlanmıştır. Filament çeşitleri ve özellikleri çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Filament çeşitleri ve özellikleri (Diksu, 2021)

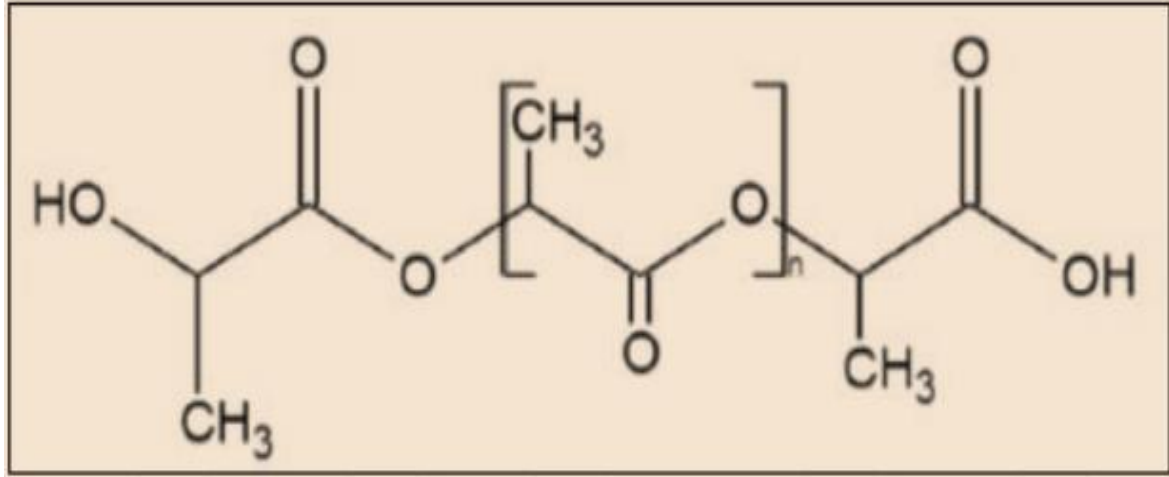
Filamentler	Açılımı	Özellikleri	Baskı Sıcaklığı	Dayanım	Sertlik	Esneklik	Uygulama Alanı
PLA	Polilaktik Asit	Daha az koku yayar. Kullanımı kolaydır. Çevre dostu ve geri dönüştürme yatkın.	180 – 220°C	Orta	Yüksek	Orta	Tıbbi İmplantlar Gıda Kaplan Modeller Prototipler
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren	Kullanımı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

Çizelge 2.3. (Devamı)

Wood	Ahşap	Ahşap yüzey.	195 – 220°C	Orta	Orta	Orta	Dekor Aksesuar
PP	Polipropilen	Esnek bir yapıya sahip. Kimyasal direnç.	210 – 230°C	Orta	Orta	Yüksek	Esnek parçaların Üretimi Gıda Ambalajları
TPE	Termoplastik Elastomer	Esneklik. Aşınma direnci.	210 – 235°C	Orta	Düşük	Yüksek	Oyuncaklar Giyilebilen Eşyalar

2.2.1. Polilaktik asit (PLA)

Günümüzde dünya genelinde malzemelerin depolanması veya geri dönüştürülme çabaları bir sorun olarak göze çarpmaktadır. Geri dönüşüm için gerekli olan yüksek enerji ve işçi maliyetleri bu sorunun büyümesine sebep olmuştur. Ayrıca atık termoplastik malzemelerin kapladıkları alan ve karbondioksit emisyonları sebebiyle depolanmaları da imkânsız hale gelmiştir. Bu sebeplerden dolayı doğada bozunumu kolay çevre kirliliğine neden olmayan biyopolimerler kullanılması gelecek nesillere yaşanabilir bir ortam için kaçınılmaz bir ihtiyaçtır. Polilaktik Asit (PLA) tam olarak böyle bir polimerdir. PLA mısır, nişasta, şeker kamışı, patates vb. gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen tekrarlayan birimi laktik asit olan bir polimerdir. Bu tekrarlayan birimler laktik asit fermantasyonu ile insan vücudunda da ortaya çıkan monomerlerdir. Bu monomerler bir araya gelerek polilaktik asit (PLA) polimerini oluştururlar. Polilaktik asit zincirinin yapısı şekil 2.11’de gösterilmektedir. (Bozcuoğlu, 2022; Zehir 2022; Elmas, 2021)



Şekil 2.11. Polilaktik asit zincirinin yapısı (Elmas, 2021)

PLA uygun maliyetli bir üretim yöntemine sahip olduğu için dünyada en çok sentezlenen biyopolimerlerin arsındadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden eriyik biriktirme yönteminde kullanılmak üzere PLA'dan filament üretimi yapılarak kullanımı sağlanılabilir. PLA filamentler yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Herhangi bir kokusu zararlı bir toksik etkisi bulunmayan alifatik yapıdaki bir polimer olarak göze çarparlar. Ayrıca baskı kolaylığı sayesinde üç boyutlu yazıcılarda kullanımı zahmetsizdir. Üretilen baskılarında yüzey kalitesi oldukça iyi durumdadır. PLA katkısız olarak üretildiğinde herhangi bir gaz çıkışı meydana gelmez ayrıca şeffaf bir görüntüye sahiptir. PLA'nın biyolojik olarak doğada parçalanabilir olması petrol bazlı olarak üretilen polimerlerin parçalanabilirlikleri açısından önünde olmasını sağlamaktadır. (Elmas, 2021)

PLA erime özelliklerinin düşük olmasından ve yavaş kristallenme hızına sahip olmasından kaynaklı olarak kırılkan yapıda bir biyopolimerdir. Bu durum aynı zamanda PLA'nın tokluğunun da düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca servis sıcaklığının düşük olması, işlem yeteneğinin iyi düzeyde olmaması ve köpüklenme gibi dezavantajlarda sahiptir. (Gupta, Revagade ve Hilborn, 2007)

PLA'nın kullanım alanları arasında otomotiv, havacılık, inşaat ve gıda endüstrileri yaygın olarak bulunmaktadır. Özellikle medikal ve biyomedikal gibi alanlarda PLA'dan imal edilen parçaların üretilmesi teknolojik açıdan gerekli olarak görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında birçok hasta için üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak implant ve protezlerin üretilmesi umut verici bir gelişme olarak görülmektedir. PLA'nın insan vücuduna zararı minimum

düzeyde olmakla sebebiyle biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanımı için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Pla'nın özellikleri çizelge 2.3. da gösterilmektedir. (Zehir,2022; Mazzanti, Malagutti ve Mollica, 2019)

Çizelge 2.4. Pla'nın özellikleri (Zehir,2022)

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

3. LİTARETÜR ÖZETİ

Literatürde eklemeli imalat yöntemlerinin eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemlerinde kullanılan termoplastik kompozitlerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Burada kullanılan termoplastik malzemelerden polilaktik asid (PLA) ve bu malzemeye eklenen katkı maddeleriyle birlikte oluşturulan filamentlerle ilgili bilgilerin bulunduğu çalışmalar mevcuttur.

Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre termo oksidasyon yöntemiyle PLA'ya selüloz ve cam elyaf ekleyerek harmanlanmış malzemeyle 3D baskı yöntemi kullanılarak filament elde etmişlerdir. Bu filamentin fiziksel ve mekanik testlerini gerçekleştirmişler ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Değerlendirme sonuçlarına göre katkısı olmayan saf PLA filamentinin daha kırılgan bir yapıda olduğu güç ve dayanıklılık konusunda eksiklerinin bulunduğu belirtilmiştir. Saf PLA'ya % 4 selüloz eklendikten sonra oluşturulan filamentlerin mekanik özelliklerinde artış olduğu ve kırılganlığın azaldığı belirtilmiştir. Eklenen selüloz oranı % 8'e çıkarıldığında kırılma dayanımının, kesilme dayanımının arttığı ve sertlik değerinin de önemli düzeyde artma meydana geldiği belirtilmiştir. % 4 cam elyaf saf PLA'ya eklenip oluşturulan filamentteki özelliklere göre ise sertlik değerlerinde artış olurken tokluk değerlerinde azalmanın meydana geldiği ancak kırılganlık değerlerinde belli oranlarda artışın meydana geldiği belirtilmiştir. Cam elyaf oranı % 8 olarak yapılan çalışmada ise % 4 cam elyaf eklenerek üretilen filamentte göre kırılganlık ve sertlikte gözle görülür derecede artışın meydana geldiği belirtilmiştir. (Li, Ni, Bai ve Lou, 2018)

Onur ve arkadaşlarının, PLA ve manda boynuzunun atık maddesinin birleştirilmesiyle oluşan biyobozunur kompozit malzeme üretimi ile ilgili yaptıkları çalışmada, PLA'nın ve boynuz atığının 0,5 mm boyutuna kadar öğütülüp daha sonrasında ağırlıkça % 75 PLA ile % 25 boynuz fiziksel olarak karıştırıldığı belirtilmiştir. Bu karışımdan ısıtmalı soğutmalı pres ile kompozit malzemeler elde edilip bir lazer kesici ile çekme ve eğilme dayanımları için test numunelerinin elde edildiği belirtilmiştir. Yapılan testler sonucunda bu karışımdan oluşan kompozit malzemenin saf PLA'ya göre çekme ve eğilme dayanımları ciddi oranlarda düşüş meydana geldiği belirtilmiştir. Bununla birlikte gerinim değerlerinde de düşüş meydana gelmiş ve bu düşüşün sebebi ise saf PLA'nın boynuz katkısıyla daha gevrek bir hale gelmesiyle açıklanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yine PLA'nın yoğunluğu 1.2

g/cm^3 iken kompozit malzemenin yoğunluğunun 1.1 g/cm^3 olarak bulunduğu belirtilmiştir. (Ermeydan ve Aykanat, 2019)

Tanase ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre, ladin biyokütlesinde lignin elde edebilmek için soda hamurlaştırma yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen lignin PLA matrisine % 20-% 40 oranlarda karıştırılarak 2 farklı oranda biyo-kompozit filament elde edildiği çalışmada belirtilmiştir. Bu yapılan çalışma sonucunda ligninin PLA malzemesinin saf haline göre gerime mukavemetinde ve elastikiyet modülünde düşüşe sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada ligninin PLA matrisinin yapısında değişikliğe sebep olarak daha fazla kristalleşmesine yol açtığı vurgulanmıştır. (Tanase-Opedal, Espinosa, Rodríguez ve Chinga-Carrasco, 2019)

Öztürk ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre üç boyutlu yazıcı ile PLA filamentler ahşap katkısı eklenerek 200°C nozul sıcaklığında ve 70 mm/s dönme hızı ile % 50 doluluk oranında $10 \times 10 \times 180 \text{ mm}$ boyutlarında yoğunluğu $0,65 \text{ g/cm}^3$ olan üç boyutlu malzeme üretildiği belirtilmiştir. Üretilen parçaların değişmez ağırlığa gelinceye kadar 20°C sıcaklı % 65 bağıl nem şartlarında iklimlendirme kabiniinde bekletildiği daha sonra ise parçanın üst ve alt bölümlerine, kaplama olarak ağaç işleri endüstrisinde en çok kullanılan ürün olan kayın ve ıhlamur kaplamalar $0,5 \text{ mm}$ kalınlıkta tutkal ile yapıştırılarak eğilme testlerine tabi tutulduğu belirtilmiştir. Yapılan test sonucunda kaplama yapılmamış test numunesinde oluşan kırılma hattı nispeten doğrusal iken kaplama yapılan numunede bu durum düzensiz olduğu ve kırılma alanının büyüdüğü belirlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak ise yüzeye yapıştırılan kaplamaların uygulanan kuvvete tepki göstermesi sonucu ortaya çıktığı yapılan çalışmada öne çıkarılmıştır. (Öztürk ve Burdurlu, 2021)

Pavon ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre atık yumurta kabuklarından çıkarılan CaCO_3 dolgu maddelerinin 3D baskılı PLA performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmişleridir. Farklı ağırlıkta PLA ya katılan CaCO_3 maddeleri katılarak oluşturulan kompozitin eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemiyle oluşturulan test numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin mekanik, dinamik, termal olarak analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak dolgu içeriği arttıkça elastisite modülünde artma, gerilme mukavemeti ve bükülme oranlarında artış gözlemlendiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada PLA ile CaCO_3 maddesinin PLA yapısını bozmadığı uyumlu bir kompozit olduğu belirtilmiştir. Yapılan SEM analizlerine göre ise ara katman bozukluklarının varlığı tespit edilmekle birlikte PLA'nın seçilen dolgu maddeleri ile arayüz

uyumluluğu ortaya koymuştur. (Pavon, Aldas, Samper, Motoc, Ferrandiz ve López-Martínez, 2022)

Yiğit ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre yenilenebilir kaynaklardan elde biyo-bozunur olan PLA'nın düşük olan biyo-bozunurluğunun artırılması amacıyla ceviz kabuğu katkılı 3D yazıcılarda kullanılabilecek bir filament yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında ceviz kabuklarını kırıcı öğütücü makine sayesinde toz haline getirildiği belirtilmiştir. Burada elde edilen tozların elek sayesinde elenerek 100 mikron 'un altındaki partiküller kullanıldığı ve bu kullanılan malzemenin farklı oranlarda PLA ile karıştırıldığı belirtilmiştir. PLA ceviz kabuğu karışımlarındaki ceviz kabuğu oranları sırasıyla % 10, % 20, % 30, % 40 oranlarda PLA ile karıştırılarak yapılan çalışmalar sonucunda farklı oranlarda filamentler elde edildiği belirtilmiştir. Bu filamentlerden 3D yazıcı da test numuneleri oluşturulmuş ve testlerin sonuçları değerlendirilmiş. Yapılan terslerin sonuçlarına göre ise ürünün performansını arttırmak, mekanik özelliklerini geliştirmek ve homojen bir renk dağılımı sağlamak için yapılması gerekenin kullanılan malzemelerin tanecik boyutunun önemli olduğu, boyutunun büyük olan taneciklerin 3D yazıcının nozulunu tıkadığı belirtilmiştir. (Çakır Yiğit ve Karagöz, 2021)

Ayrılmışın yapmış olduğu çalışmaya göre 1,75 mm çapındaki odun unu, PLA filamentlerinden yapılan 3D baskılı numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve ıslanabilirliği üzerine baskı tabakası kalınlığının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 3D baskılı numunelerin üretiminde 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm ve 0,3 mm olmak üzere dört farklı baskı katmanı kullanıldığından söz edilmiştir. Örneklerin yüzey özelliklerini değerlendirmek için ortalama pürüzlülük (Ra), ortalama tepe-vadi yüksekliği (Rz) ve maksimum tepe-vadi yüksekliği (Ry) dikkate alındığı belirtilmiştir. Numunelerin yüzey düzgünlüğü, azalan baskı katmanları ile önemli ölçüde iyileştiği, artan baskı tabakası kalınlığı ile de numunelerin ıslanabilirliği önemli ölçüde arttığı çalışmalar kapsamında belirtilmiştir. (Ayrılmış, 2018)

Martin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre ligninin iyi bir antioksidan özelliği gösterdiğinden yola çıkılarak erimiş filament üretim uygulamaları için PLA ile birleştirilmek üzere bir yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada PLA lignin tozu ve Hint yağı ile başarılı bir şekilde karıştırılmış. Bu karışımdan değişik lignin oranlarında filamentler elde edilmiş ve bunlarla ilgili deneyler yapıldığı belirtilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda lignin içeriğinin tüm malzemenin mekanik ve yüzey özelliklerini etkilediği ve ligninin dahil edilmesiyle

numunelerin kırılmaya karşı daha düşük dirençli olduğu aynı zamanda daha yüksek ıslana bilirlige sahip malzemenin olduğu öne çıkarılmıştır. Yine yapılan çalışmalar sonucunda 3D olarak basılan numunelerin antioksidan özellik gösterdiği bu doğrultuda da yara pansumanı amacıyla farklı tasarımlara sahip malzemeler üretmek için kullanıldığı belirtilmiştir. (Domínguez-Robles, Martin, Fong, Stewart, Irwin, Rial-Hermida ve Larrañeta, 2019)

Kaygusuz ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre eriyik yığıma modelleme yönteminde (EYM) polilaktik asit kullanılarak oluşturulan 3D boyutlu baskılarda nozul sıcaklığının ve dolgu yoğunluğunun iç yapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelendiği belirtilmiştir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre nozul sıcaklığında meydana gelen değişim malzemenin yapısında önemli dereceden bir değişikliğe yol açmadığı, 215°C'deki gerçekleştirilen 3D baskılarda kısmi olarak kristallenme gözlemlendiği ön plana çıkarılmıştır. Bunun yanı sıra nozul sıcaklığı ve dolgu yoğunluğu malzemenin mekanik özelliklerinde önemli ölçüde değişim gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Yapılan deneylerde nozul sıcaklığının artması çekme dayanımının artmasına neden olmuş bu olan durum, malzeme üretilirken yapısındaki boşlukların azalmasından kaynaklandığı şeklinde açıklanmıştır. Elastikiyet modülü ise nozul sıcaklığından fazla etkilenmediği, dolgu yoğunluğunun düşürülmesi sonucunda ise akma dayanımının ve elastikiyet modülünün önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. (Kaygusuz, Özerinç, 2018)

Jafferson ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre 3D baskı kullanılarak atık maddelerin değerlendirilmesi amacıyla PLA ile kompozit yapmak için kullanılabilecek farklı doğal lifler araştırılmıştır. Bu kapsamda tarımsal ürünlerin atıkları kullanılmıştır. Bu ürünler kahve telvesi ve PLA karışımı, pirinç kepeği ve PLA karışımı, selüloz ve PLA karışımı vb. karışımlardan filament yapmak için vida ekstrüzyon yöntemi kullanıldığı belirtilmiştir. Yapılan çalışmada üretilen filamentlerin young modülü, sertlik, elastikiyet, su ile bozulma, gerilme vb. gibi mekanik özelliklerin ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca filamentlerin kesitleri taramalı elektron mikroskobu altında incelendiği ön plana çıkarılmıştır. Bu çalışma kapsamında incelenen atıklardan üretilen filamentlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve gerekli amaca hizmet etmek ve en iyi doğal elyaf takviyeli filamentini seçmek için bir kılavuz görevi gördüğü belirtilmiştir. (Deb ve Jafferson, 2021)

Raza ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA malzemesi kullanım alanlarının çeşitli olması sebebiyle sürdürülebilirlik açısından baskı sırasında başarısız olduğunda oluşan atık PLA malzemesinin tekrar geri dönüşle kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla başarısız olunan baskılarda atık durumuna düşen boyutsal düzensizlikleri veya işlevsel arızaları olan 3B basılı nesneler bir parçalayıcı kullanılarak ezildiği ve daha sonra daha büyük malzeme parçalarını ortadan kaldırmak için parçalanmış parçalar elendiği belirtilmiştir. Parçalanmış malzemeler daha sonra ekstrüzyon yöntemiyle istenilen boyutlarda filamentlerin oluşması sağlandığı ve uygun boyutlarda filament oluşturulmasında ekstrüderin yüksek sıcaklık ve hız değişimi gibi farklı faktörler çerçevesinde malzemelerin testleri yapıp sonuçlarının değerlendirildiği belirtilmiştir. Bu sonuçlara göre hem hız hem de sıcaklık parametrelerinin filament kalınlığı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. (Raza ve Singh, 2020)

Doğru ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre PLA malzemesi, FFF (Fused Filament Fabrication) yöntemiyle eklemeli imalatta polimerleri şekillendirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada PLA matrisi, mekanik özellikleri arttırmak ve geri dönüşüme katkıda bulunmak için doğal liflerle takviye edilmiştir. Ağırlıkça % 15 ağaç lifi takviyeli olan biyo-kompozit bileşikler, çift vidalı ekstrüder kullanılarak PLA matrisi hazırlandı. Test numuneleri FFF yöntemi ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretildi. Hazırlanan bileşiklerin, filamentlerin ve üretilen numunelerin termal analizi yapıldığı belirtildi. Yapılan çalışmalar sonucunda doğal elyaf takviyeli bileşiğin Tg değerinde azalma gözlenirken, Tm değerinde artış gözlemlendiği belirtilmiştir. FFF yöntemi ile üretilen numunelerin Tg değeri enjeksiyon numunelerine göre arttığı, enjeksiyonla üretilen numunelerin kopma gerilmelerinin FFF tarafından üretilen numunelere göre 2 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretilen numunelerin darbe dayanımı, FFF ile üretilen numunelere göre %51,75 daha yüksek olduğu analiz sonuçlarında belirtilmiştir. Çalışmada üretilen biyo-kompozit malzemeler taramalı elektron mikroskobu (SEM) altında incelenmiş yüzey etkileşimleri ve matris ile lif arasındaki homojen lif dağılımı incelendiği ön plana çıkarılmıştır. (Doğru, Yılcıoğlu, Gökem, Turan ve Seydibeyoğlu, 2022)

4. MATERYAL VE METOD

Polilaktik asit'in (PLA) matrisi eklemeli imalat yönteminde yaygın olarak kullanılan günümüzde de sürdürülebilir olarak nitelendirilen ve mısır, patates, şeker kamışı, pirinç vb. gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilmektedir. Bu yenilenebilir kaynakları insanlarda kullanmaktadır. Bu sebepten dolayı bu çalışma kapsamında hem PLA kullanımını azaltmak hem de atık maddeleri geri dönüşüm yoluyla üretime kazandırmak amacıyla eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan PLA matrisine biyo-bozunur olan atık maddelerin belirli oranda karıştırılıp filament elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda en uygun parametreleri belirlemek açısından çeşitli ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kompozit ve filament üretimini barındıran ekstrüzyon süreci çalışmaları ve elde edilen filamentleri 3D yazıcıda kullanarak yazdırma parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmaları kapsamaktadır. Filament üretimi çalışmalarında kullanılan biyo-bozunur olan çay atığının ve hurma çekirdeğinin kütsel olarak belirli oranlarda PLA matrisiyle karıştırılıp üretilen kompozit malzeme kullanılarak elde edilen filamentlerden 3D yazıcıyla başarılı şekilde basılan deney numuneleri bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

4.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında biyobozunur sürdürülebilir ve atık maddelerden oluşan bir kompozit üretilmesi için matris olarak PLA, katkı maddeleri olarak da biyo bazlı çay atığı ve hurma çekirdeği kullanılmıştır.

4.1.1. Matrisler

Bu çalışmada matris olarak tamamen biyo materyallerden üretilmiş olan Polilaktik asit (PLA) kullanılmıştır. PLA matrisinin detaylı olarak bilgileri aşağıda verilmiştir.

4.1.1.1. Polilaktik asit (PLA)

Tez çalışmamda kullanılan matris olan PLA Frekans Network Teknoloji Tic LTD. ŞTİ' den temin edilmiştir.

PLA, doğal kaynaklardan elde edilen biyo bazlı bir polimerdir. Bu sebeple PLA doğada çözünmesi kolay ve petrol bazlı polimerlere göre kirlilik oranı düşük bir yapıya sahiptir. PLA mısır, nişasta, şeker kamışı, patates vb. gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen tekrarlayan birimi laktik asit olan bir polimerdir. Kullanılan PLA'nın granül haldeki görüntüsü şekilde 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Polilaktik Asit granül görüntüsü

4.1.2. Katkı maddeleri

Bu çalışma kapsamında Biyo-kompozit filament üretmek amacıyla PLA matrisine tamamen biyo materyaller olan çay atıkları ve hurma çekirdekleri öğütülüp katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. Bu sayede PLA kullanılarak biyo bazlı kompozitlerin oluşturmasını sağlamıştır.

4.1.2.1 ay atıkları

ay tüketiimi konusunda dünyada birinci sırada bulunan ülkemiz de çay atıklarına işlevsellik kazandırmak ve PLA matrisinin kullanımını azaltmak için çay atıklarıyla Filamentler üretilmesi amaçlanmaktadır. ay atıklarının görüntüsü şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. ay Atığı Kurutulmuş Hali

4.1.2.1 Hurma çekirdeği

Hurma her geçen yıl ülkemizde tüketimi artan bir meyve olarak göze çarpmaktadır. Aynı zamanda hurma meyvesinin kendisi tüketildikten sonra çekirdeği atık olarak atılmaktadır. Bu doğrultuda çekirdeğin geri dönüştürölüp üretime katılması hem de hurma bitkisinin yapraklarının lifli yapıda olması ve çekirdeğinin üzerinde bulunan lifler sebebiyle yalnızca hurma çekirdeği kullanılarak öğütölmesiyle oluşturulan malzemenin PLA ile karıştırılarak filament oluşturulması düşünölmüştür. Burada bu meyvedeki lifli yapılardan yola çıkarak çekirdeğin kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikler hurma çekirdek kurutulmuş ve öğütölümüştür. Öğütölün hurma çekirdekleri sarsak elek yardımıyla boyutlandırılmış ve PLA ile fiziksel olarak karıştırılıp filament oluşturulması sağlanmıştır. Hurma çekirdeğinin görüntüsü şekil 4.3’te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Hurma Çekirdeği

4.2. Metod

Biyo bazlı atıklardan biyo-kompozit filament üretmek amacıyla öncelikle PLA matrisi, hurma çekirdeği ve çay atığı katkı malzemeleri öğütücüde, kullanılmak istenen aralıkta partiküllere kadar öğütölme işlemi gerçekleştirmiştir. Öğütölün malzemeler sarsak elek yardımıyla boyutlandırılmıştır. Boyutlandırılması yapılan malzemelerin fiziksel karışımları kütleli oranlarda çift vida ekstrüderde granül hale getirilmiştir. Elde edilen biyo kompozitler ile tek vida ekstrüderde saf PLA, PLA-C, PLA-H, PLA-CH karışımlarından filament üretilmiştir. Tek vida ekstrüderde üretilen biyo-kompozit filamentlerden 3D yazıcıda çekme testi numuneleri üretilerek çekme testi yapılması sağlanmıştır. Hem kompozit üretimi hem de numune yazdırma süreçlerinde birçok faktör kullanılarak ön

denemeler yapılmış bu ön denemeler sonucunda başarılı olan denemelerden faydalanılarak süreç yönlendirilmiştir. Süreç ile ilgili detaylı kısımlar bu bölümde belirtilmiştir.

4.2.1. Matris ve katkı maddelerinin öğütülmesi

PLA matrisinin granül olarak temin edilmiş ve granül haldeki PLA matrisinin eriyik karıştırma işleminde homojen olarak katkı malzemeleriyle karışımı yapılabilmesi için öğütme işleminin yapılması tercih edilmiştir. Bu işlem için Elmas marka çene ağızlı ve hava akışlı değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir

Katkı maddeleri de aynı PLA matrisinde olduğu gibi eriyik karıştırma işleminde malzemelerin homojen bir şekilde dağılması amacıyla öğütme işleminin yapılması tercih edilmiştir. Bu işlem için çay atıkları ve hurma çekirdeği Mipro MLD öğütücüde öğütülerek toz haline getirilmiştir. Kullanılan öğütücüler şekil 4.4 ve şekil 4.5'te gösterilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 4.4. (a) Elmas marka çene ağızlı ve hava akışlı değirmen, (b) Mipro MLD öğütücü



Şekil 4.5. Öğütülmüş hurma çekirdeği artıkları

4.2.2. Matris ve katkı maddelerinin fiziksel karışımlarının hazırlanması

PLA matrisinin ve katkı maddelerinin öğütme işlemi yapıldıktan sonra malzemeler yaklaşık olarak 24 saat boyunca 60°C sıcaklığında etüvde kalarak içerisindeki nemin atılması sağlanmıştır. Nemden arındırılmış malzemelerin birbirlerine olabildiğince homojen olarak karışabilmesi için boyutlandırma işleminin yapılması gerekmektedir. Boyutlandırma işlemi için ise sarsak elek (Loyka ESM 200) kullanılarak malzemelerin eleme işlemi yapılmıştır. Eleme işleminden sonra 288-666 mikron aralığında kalan malzemeler karışımlarda kullanılmıştır. Karışımların ağırlıkça oranları bu malzemeler kullanılarak oluşturulmuştur. Kullanılan sarsak eleğin görüntüsü şekil 4.6’da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Sarsak elek (Loyka ESM 200)

Bu çalışma kapsamında malzeme karışımlarının oranları çizelge 4.1’de görülmektedir. Matrislere eklenen katkı maddeleri ve oranlar çizelgede belirtildiği şekilde oluşturulmuştur. Matrisler ve katkı maddeleri 0,001 g hassasiyetli terazide tartılarak karışımlar fiziksel olarak birbirlerine karıştırılmıştır. Karıştırılan karışımlardan oluşan deney numuneleri şekil 4.7, şekil 4.8 ve şekil 4.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Matrislere eklenen katkı maddeleri ve oranları

Kompozit malzeme	Matris	Matris oranı (%)	Katkı maddesi	Katkı maddesi oranı (%)
PLA-C	PLA	%90	Çay atığı	%10
PLA-H	PLA	%90	Hurma çekirdeği	%10
PLA-CH	PLA	%90	-Çay atığı	-%5
			-Hurma Çekirdeği	-%5



Şekil 4.7. (a) Öğütülmüş matris (PLA), (b) Öğütülmüş PLA ve çay atığı karışımı



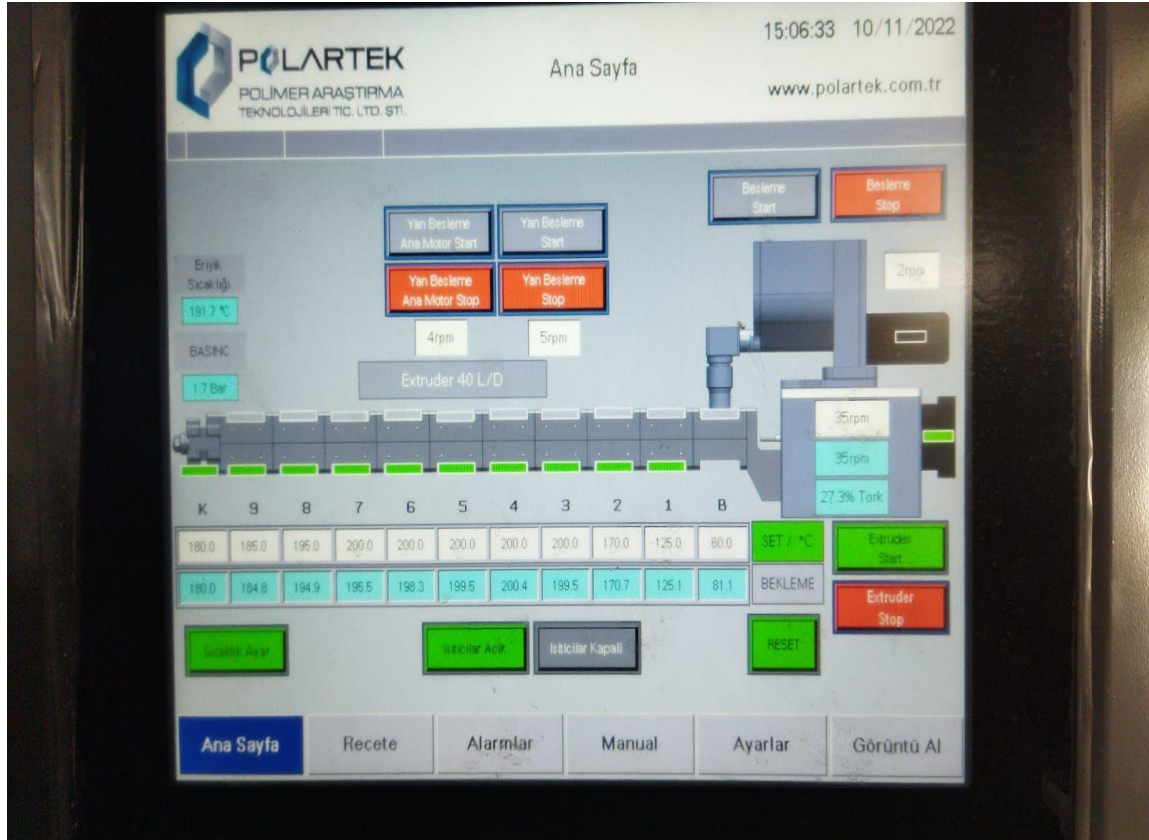
Şekil 4.8. Öğütülmüş PLA ve Hurma Çekirdeği karışımı



Şekil 4.9. PLA, öğütülmüş hurma çekirdeği ve çay atığı karışımı

4.2.3. Biyo-kompozit malzemelerin hazırlanması

Fiziksel karışımı yapılan malzemeler toz halinde 60°C'lik etüvde yaklaşık olarak 24 saat boyunca içindeki nemin atılması için bırakılmıştır. Toz numuneler 18 mm çaplı, L/D oranı 44 olan çift vidalı ekstrüderde eritilerek karıştırılmıştır. Tüm gruplar 190°C sıcaklık ve 15 m/dk besleme hızıyla çekilerek kompozit haline getirilmiştir. Bu kompozitleri bir kırıcı yardımıyla granül haline getirilmiştir. Ekstrüderden çıkan karışım malzemesinden oluşan eriyik su havuzunda soğutulduğundan dolayı kırılan kompozitlerin granülleri nemli bir yapıya sahip olmaktadır. Bu sebepten dolayı granüller yaklaşık 24 saat 60°C sıcaklıkta etüvde bekletilip içerisindeki nemin atılması sağlanmıştır. Etüvde bekletilen granüller tek vida ekstrüder için filament üretimine hazır hale gelmiştir. Şekil 4.10'da çift vida ekstrüderde üretilen kompozitin üretim parametrelerinin görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.11'de ise üretilen kompozit malzeme görülmektedir.



Şekil 4.10.Çift vida ekstrüder kullanım değerleri



Şekil 4.11. Soğutma havuzu



(a)

(b)

Şekil 4.12. (a) Kırıcı, (b) Granül haline getirilen kompozit

4.2.4. Kompozit malzemelerden filament üretimi

Granül haline getirilip kurutulmuş boyo-kompozit malzemelerin bir kısmından 1.75 mm çapında filament üretimi yapılabilmesi için 16 mm çaplı, L/D oranı 25 olan tek vidalı ekstrüder (Polartek Polimer Araştırma Teknolojileri Tic.Ltd.Şti.) kullanılmıştır. Filament çekme işlemlerinde sıcaklık ayarları ve besleme hızı çok önemli iki parametre olarak göze çarpmaktadır. Bu iki parametre de tutarsızlık olursa filament çapında dengesizlikler oluşur. Filamentlerin incilmesi durumunda kopmalara ya da filament birikip kalınlaşması durumunda ise çapının büyümesine, filamentin sarkmasına neden olmaktadır. Üretim sırasında oluşan bu gibi sorunlar 3D yazıcıda yazdırma sırasında da problemlere sebep olmaktadır. Filamentlerin kalın olması durumunda yazıcı nozulundan malzemenin geçmemesine ve yazıcının nozulunun tıkanmasına bu sebeple de işlemlerin uzamasına neden olmaktadır. Filamentlerin ince olması da yazıcının yeteri kadar beslenememesine ve yazdırılan malzemenin dolgu oranlarının yeterli düzeyde oluşmamasına sebep olmaktadır. Bu gibi sorunlardan dolayı filament üretim safhasında sıcaklık ayarları ve besleme hızı önem arz etmektedir. Çizelge 4.2’de tek vidalı ekstrüder uygulama parametreleri belirtilmiştir. Şekil 4.14’te kullanılan tek vida ekstrüder görülmektedir. Şekil 4.15’te ise üretilen filamentler görülmektedir.

Çizelge 4.2. Tek vidalı ekstrüder uygulama parametreleri

Grup adı	Sıcaklık (°C)			Besleme hızı (r/dk)
	1. hücre	2. hücre	3. hücre	
PLA	170	175	175	13,5
PLA-C	190	190	190	13
PLA-H	195	195	195	11
PLA-CH	195	195	195	12

Filament üretiminde çap kontrolü sensörler tarafından anlık okuma yapılarak ölçülmüş ve 1,65 mm-1,85 mm çap aralığında filamentler üretilmiştir. Besleme hızı her kompozit malzemeye göre farklılık göstermektedir. Şekil 4.13'te filament sarma ünitesi ve çap kontrol ünitesi görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.13. (a) Filament sarma ünitesi, (b) Filament çap kontrol ünitesi



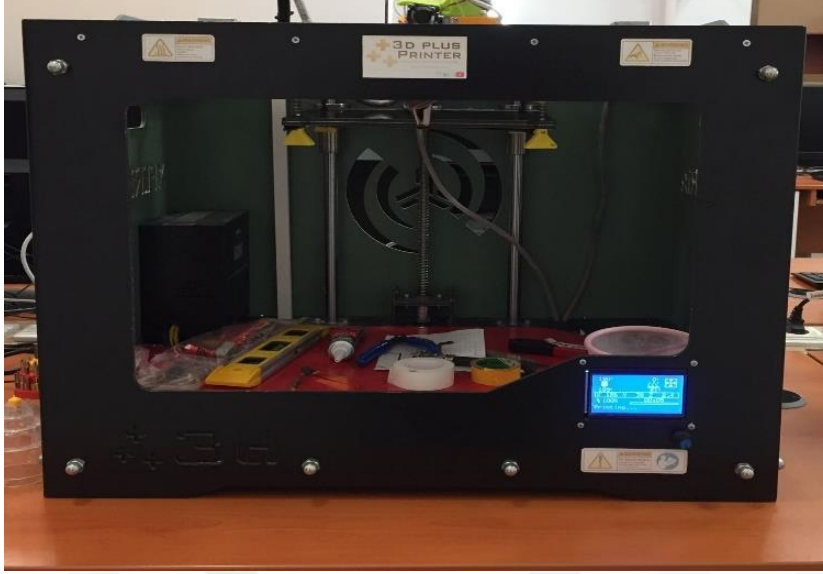
Şekil 4.14. Tek vidalı ekstrüder



Şekil 4.15. Üretilen filamentler

4.2.5. Test örneklerinin 3D yazıcıda üretilmesi

Üretimi yapılan kompozit filamentlerin 3D yazıcılarda basılarak yazdırma parametrelerinin ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme testi numuneleri elde edildi. Bu kapsamda üretilen filamentlerden ASTM D638-14, tip I çekme testi numunelerinin Autocad (Student Version, Autodesk, San Rafael, CA, USA) yazılımı kullanılarak modellenmiş ve STL formatında dosya kaydedilmiştir. Simplify 3D (Simplify 3D, Cincinnati, USA) programı kullanılarak G kodlarını oluşturma, dilimleme ve yazdırma parametrelerini belirlenme işlemleri yapılmıştır. 3D yazıcı olarak Xperia, Yapılcıan Makine San. ve Tic. LTD. ŞTİ. Çorum/Türkiye kullanılarak 0,8 mm nozzle çapı kullanılarak saf PLA kontrol numunesi ve kompozit malzemelerden de üç grup olarak (PLA-C, PLA-H, PLA-CH) deney numuneleri yazdırılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için en önemli parametre yazdırma katmanları arasındaki bağlanma faktörüdür. Nozzle çapı, katman kalınlığı, doluluk oranları bütün filamentler için benzer etkiler göstermektedir. Fakat filamentlerden katman oluştururken bağlanmayı etkileyen faktörlerin başında bağlanma sıcaklığı ve yazdırma hızı gelmektedir. Bu amaçla oluşturulan kompozit filamentlerden çekme testi numuneleri basılırken birçok farklı yazdırma hızı ve sıcaklık değerleri denenmiş ve deney numunelerinin yalnızca başarılı olanları bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. 3D yazıcının ekstrüder ısıtma sıcaklık toleransı $\pm 5^{\circ}\text{C}$ olduğu göz önüne alınmış ve yazdırma sıcaklığı olarak malzemeler için 190-210 $^{\circ}\text{C}$ arasında değerler kullanılmıştır. Malzemelerin yazdırılma hızlarıyla ilgili olarak 3D yazıcının yazılımında PLA polimeri için ön görülen optimum yazdırma hızı 3600 mm/dk olarak belirlenmiştir. Doluluk oranları % 100, doldurma geometrisi Rectilinear ve katman kalınlığı 0,4 mm olarak malzemelerin 3D yazıcıda yazdırılması gerçekleştirilmiştir. Çekme testi örnekleri şekil 4.16'da gösterilen 3D yazıcıda yapılmıştır.



Şekil 4.16. 3D baskılar için kullanılan yazıcı

Xperia 3d yazıcı 300x240x280 mm yazdırma kapasitesine sahip Xperia 3D printerın teknik özelliklerine çizelge 4.3'te, yazdırma parametreleri ise çizelge 4.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Xperia 3D printer teknik bilgiler

• X:320 mm Y:240 mm Z:280 mm ebatlarında geniş baskı alanında çalışabilir • 0.9 derece Step motorlar ile yüksek çözünürlüklü Core XY sistemli hızlı, rijit ve sessizdir
• Profesyonel amaçlı çalışmalarınızda minyatür seri Kızak Ray yataklama sistemi ile X ve Y eksenlerinde mükemmel hassasiyet sağlar
• Z eksenini Vidalı Mil ve Bilyalı Somun ile hassas hareket iletme sistemine sahiptir.
• Endüstriyel Hassas Lazer tezgâhları ile kesilmiş, paslanmaz metalden üretilmiştir
• 1.75 mm kalınlıktaki ABS , PLA Flex PVA vb. 280 °C derece sıcaklığa kadar filamentlere uygundur
• 0.1 Nozul ile 50 mikron hassasiyette baskı yapabilir
• Flament bitti Sensörü ile kaldığı yerden başlama özelliği
• Lazer, Drill ve özel amaçlı kullanıma uygun ekstruder bağlantısına sahiptir
• Kapasitif Autonics Sensör ile Autolevel otomatik kalibrasyon Sistemine sahiptir
• SD Kart ile makineyi bilgisayardan bağımsız veya bilgisayara bağlı çalıştırabilirsiniz

Çizelge 4.4. 3D Yazıcıda yazdırılan örneklerin yazdırma parametreleri

Filament	Yazdırma Sıcaklığı (°C)	Yazdırma Hızı (mm/dk)	Doluluk Oranı (%)	Yazdırma Geometrisi
PLA	190	3600	100	Rectilinear
PLA-C	200	3600	100	Rectilinear
PLA-H	210	3600	100	Rectilinear
PLA-CH	210	3600	100	Rectilinear



Şekil 4.17. 3D baskı ile üretilen çekme testi numuneleri

4.2.6. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testinin yapılması

Üretilen biyo-kompozit malzemelerin maksimum gerilme direnci, % uzama ve gerinim değerlerinin tespit edilmesi amacıyla 3D yazıcıda yazdırılan örneklerin çekme testi deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çekme testi ASTM D638-14, tip I standartlarında numunelerinin 3D yazıcıda üretilerek Instron marka çekme testi cihazında test hızı olarak 5 mm/dk belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Çekme test numuneleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır. Şekil 4.18’de çekme testi numune boyutları görülmektedir.

$$\delta_T = \frac{F_{max}}{a \times b} \quad N/mm^2 \quad (1)$$

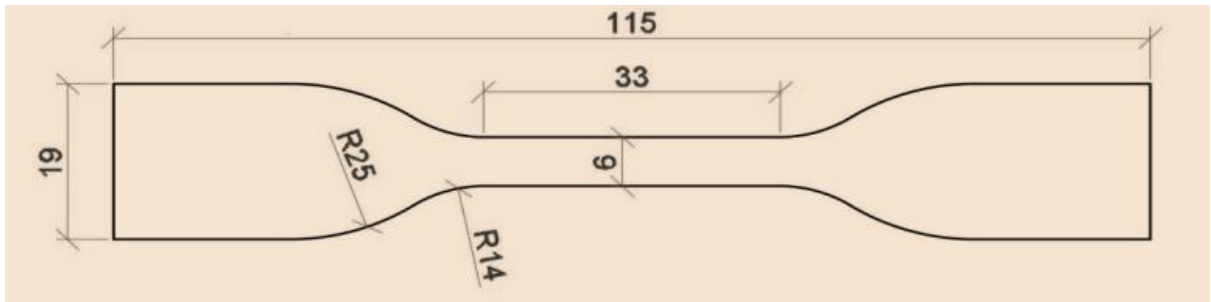
burada;

δ_T = Çekme Direnci (N/mm²)

Fmax = Kopma anında maksimum kuvvet (N)

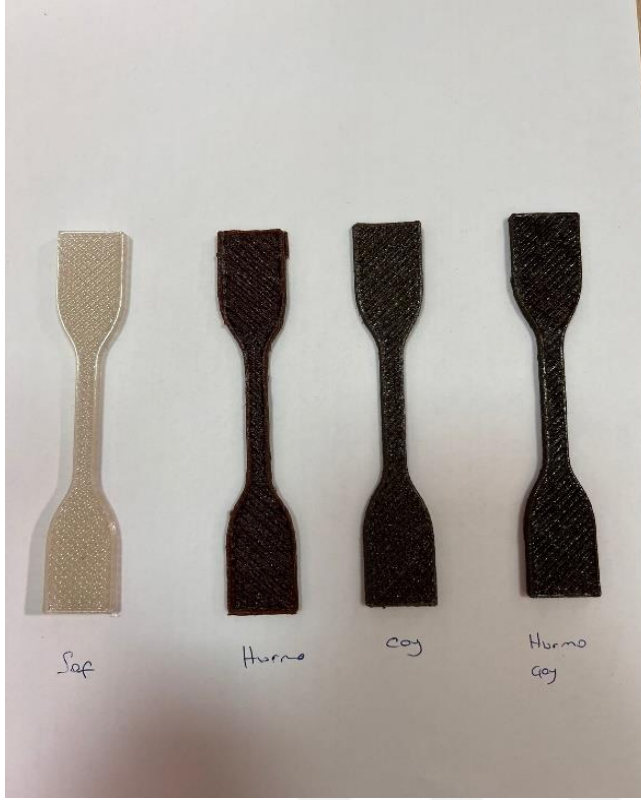
a = Numunenin kalınlığı (4 mm)

b = Numunenin genişliği (6 mm)



Şekil 4.18. Çekme testi numune boyutları (mm)

Verilen formül ve boyut ölçülerine göre üretilen numuneler şekil 4.17 ve şekil 4.19’da görülmektedir. Üretilen numunelerin çekme testleri şekil 4.20’de gösterilen çekme cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.19. 3D baskıyla üretilen numuneler

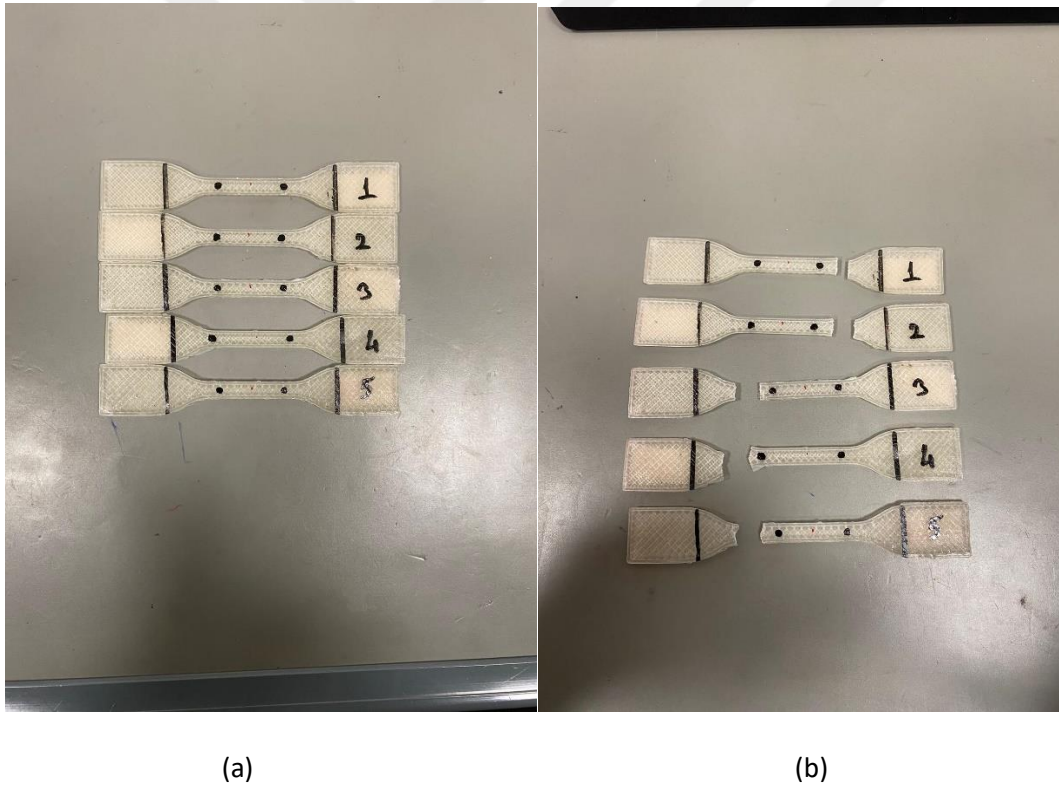


Şekil 4.20. Çekme testinin yapıldığı çekme testi cihazı

5. BULGULAR

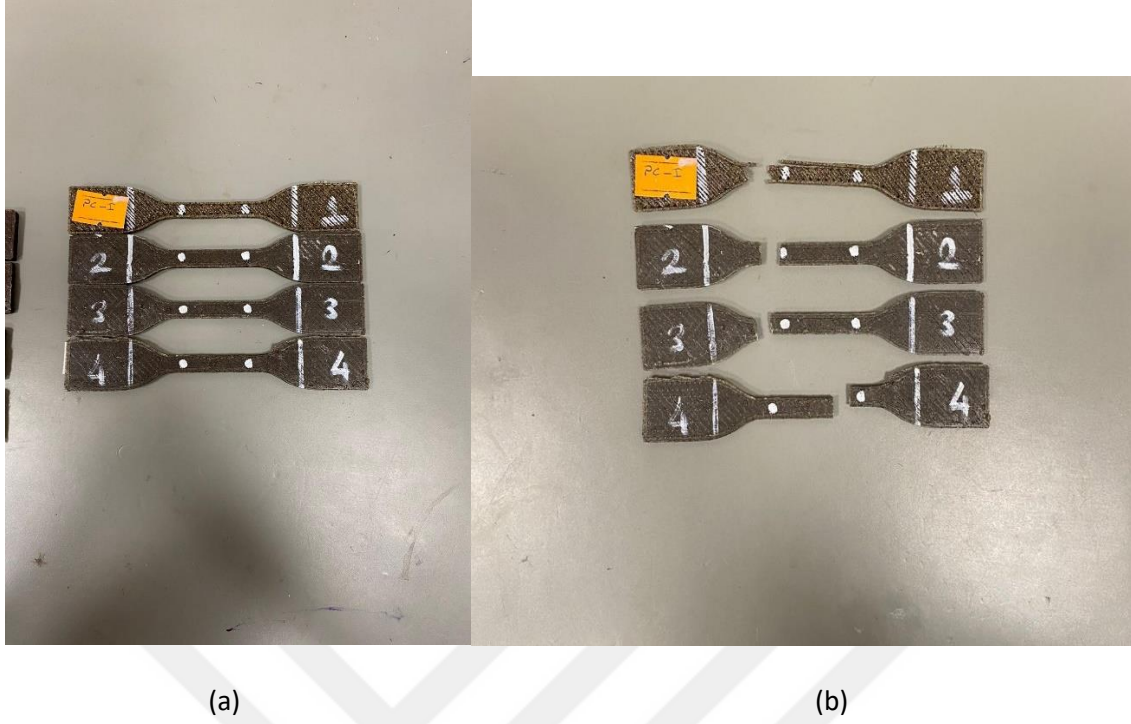
5.1. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Çekme Testi Deneyi

Geliştirilen kompozit filamentlerden 3D yazıcı ile çekme numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerden kontrol numunesi olan saf PLA numuneleri ile PLA-C, PLA-H ve PLA-CH numunelerinin kıyaslanması için ASTM standartlarına göre çekme testleri yapılarak sonuçlar kendi içlerinde kıyaslanmıştır. Her bir numunenin kopma noktaları bu bölümdeki görsellerde gösterilmektedir. Buna göre kontrol numunesi olan ağırlıkça saf PLA malzemesinin 3D baskı yöntemiyle üretilen bazı numunelerinde çekme testi kopma noktaları şekil 5.1’de görülmektedir.



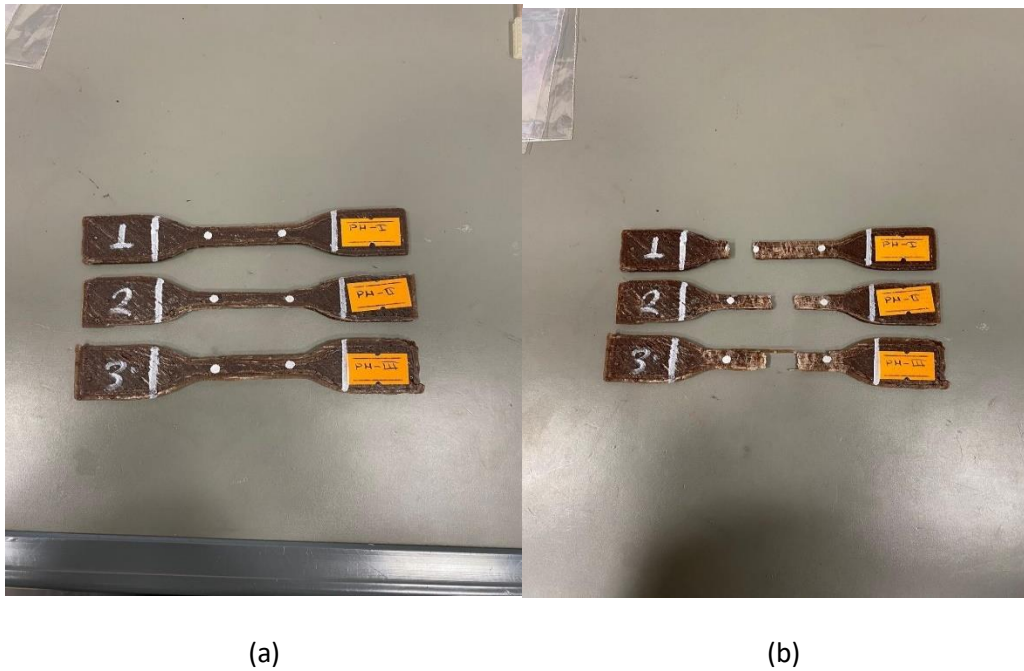
Şekil 5.1. (a) 3D baskılı PLA numuneleri, (b) Numunelerin kopma noktaları

Ağırlıkça % 90 PLA - % 10 çay atığından oluşan numunelerin çekme testi ASTM standartlarına göre yapılmış ve çekme testi sonucunda bazı numunelerin kopma noktaları şekil 5.2’de gösterilmiştir.



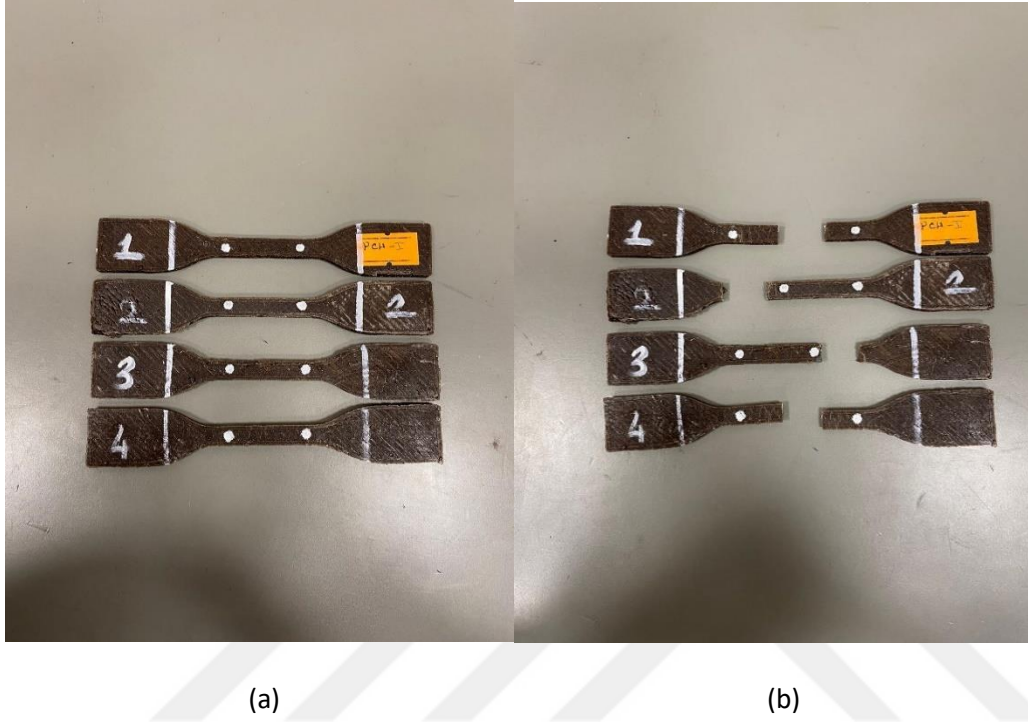
Şekil 5.2. (a) 3D baskılı PLA-C numuneleri, (b) Numunelerin kopma noktaları

Ağırlıkça % 90 PLA - % 10 hurma çekirdeğinden oluşan numunelerin çekme testi ASTM standartlarına göre yapılmış ve çekme testi sonucunda bazı numunelerin kopma noktaları şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. (a) 3D baskıyla üretilen PLA-H numuneler, (b) Numunelerin kopma noktaları

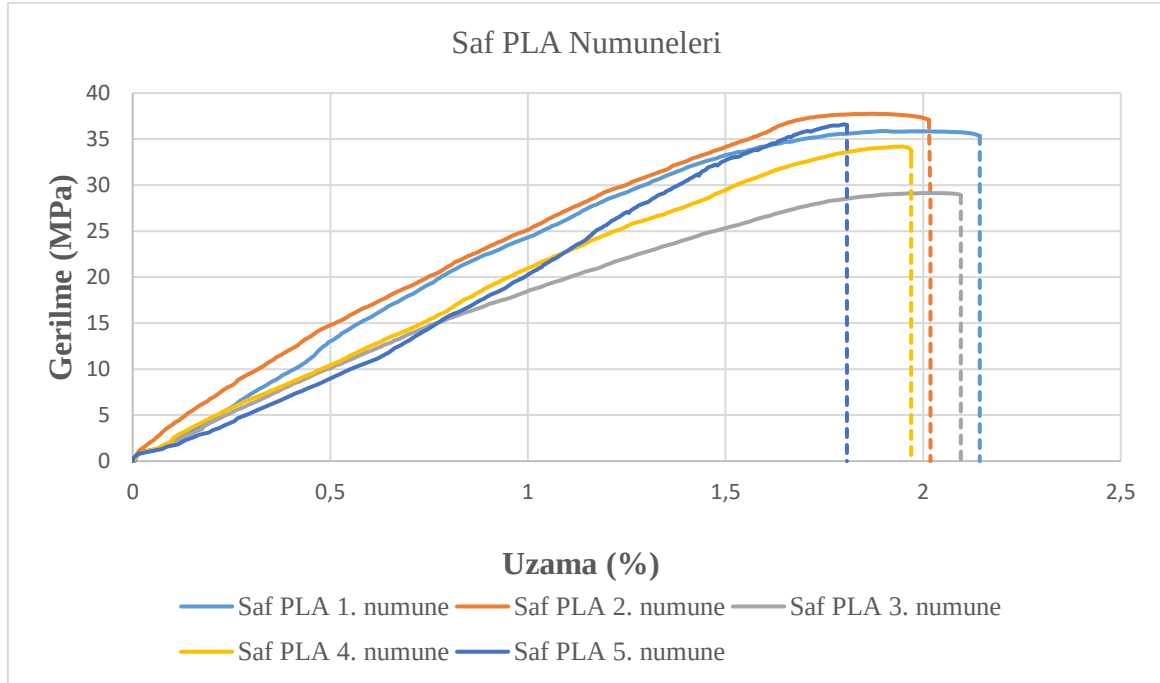
Ağırlıkça % 90 PLA - % 5 çay atığı - % 5 hurma çekirdeğinden oluşan numunelerin çekme testi ASTM standartlarına göre yapılmış ve çekme testi sonucunda bazı numunelerin kopma noktaları şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4.(a) 3D baskıyla üretilen PLA-CH numuneler, (b) Numunelerin kopma noktaları

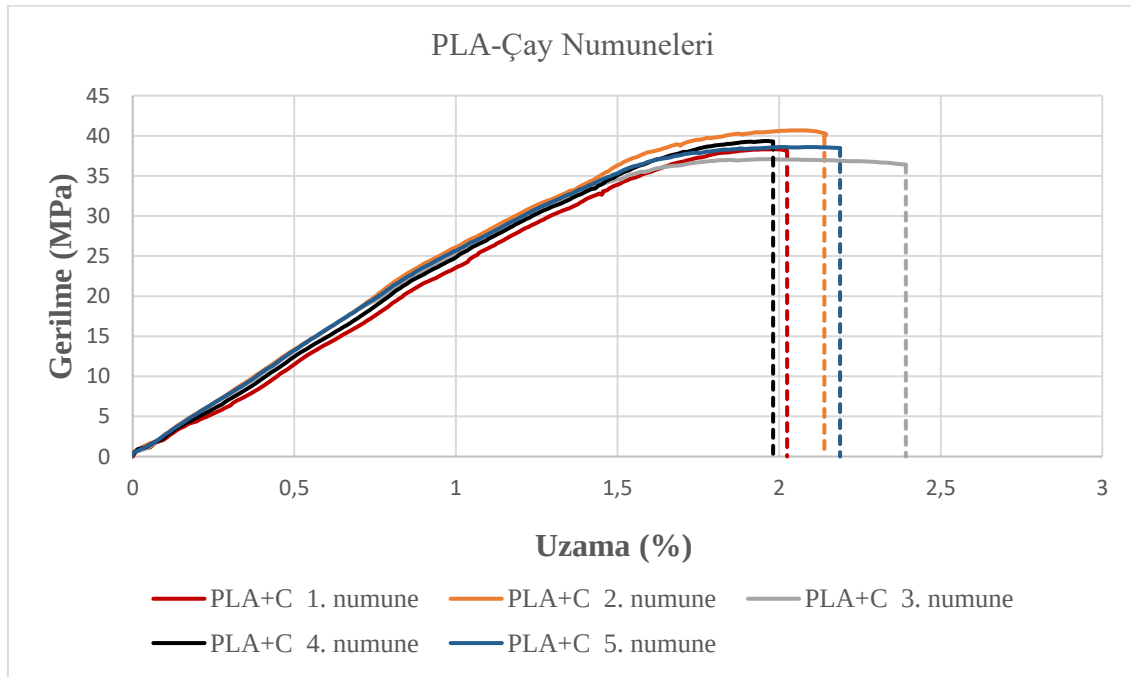
5.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Çekme Testi Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında PLA matrisinin çeşitli atık katkı maddeleriyle karışımlarından oluşan kompozit malzemelerden 3D yazıcıyla elde edilen numunelerin beşer tane örneği kullanılarak çekme testi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde öncelikle saf PLA malzeme örneklerinin çekme testleri yapılmış ve bu malzeme kontrol numunesi olarak kullanılarak üretilen kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5’te saf PLA malzemesinden üretilen deney numunelerinin çekme testi sonuçları grafikte görülmektedir.

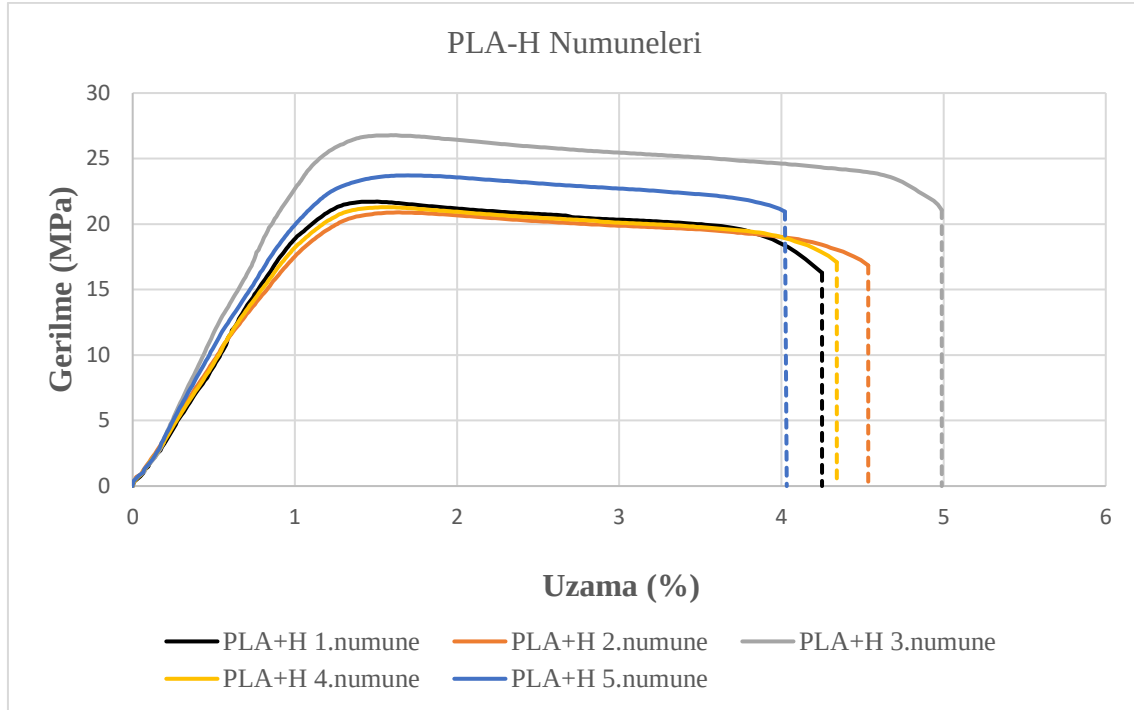


Şekil 5.5. Saf PLA matrisinin gerilme-uzama eğrileri

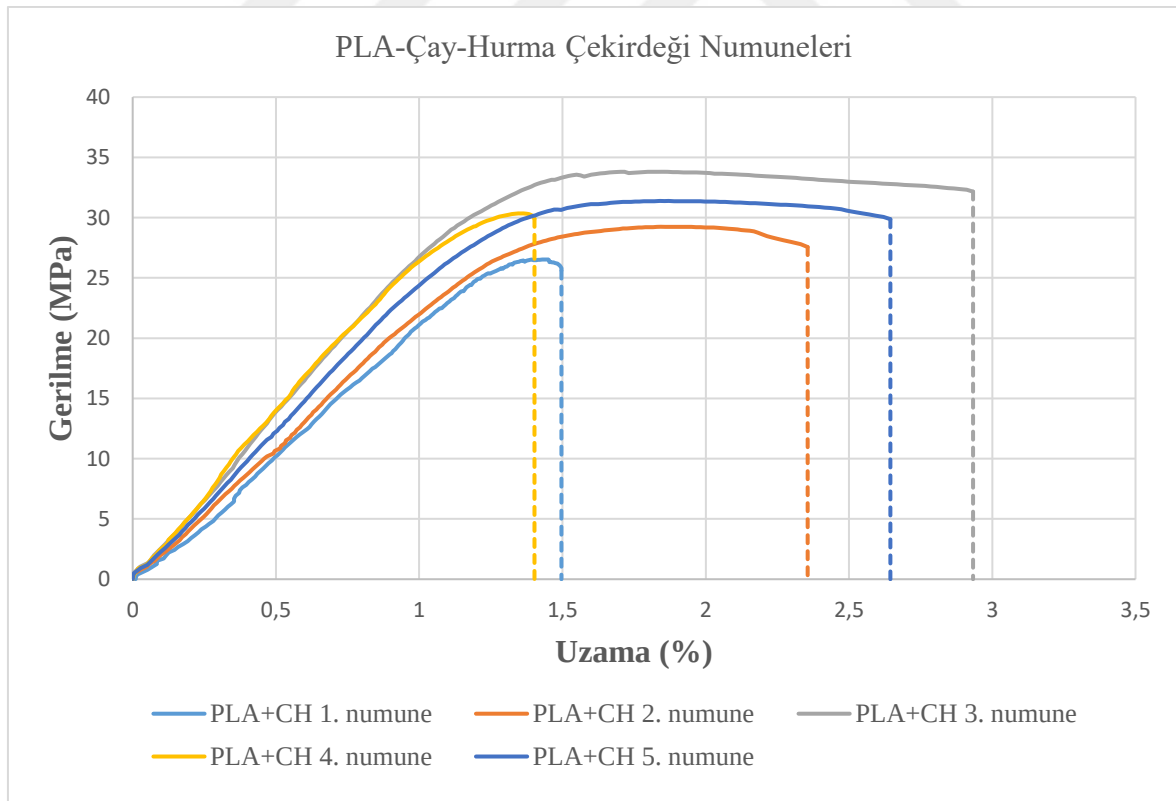
PLA matrisine ağırlıkça belirli oranlarda katkı malzemeleri katılarak üretilen PLA-C, PLA-H ve PLA-CH kompozitlerinden beşer tanesinin çekme testleri yapılmış ve malzemelerin çekme testi sonuçları şekil 5.6’da PLA-C numuneleri için, şekil 5.7’de PLA-H numuneleri için ve şekil 5.8’de PLA-CH numuneleri için gösterilmiştir.



Şekil 5.6. PLA-C kompozitinin gerilme-uzama eğrileri

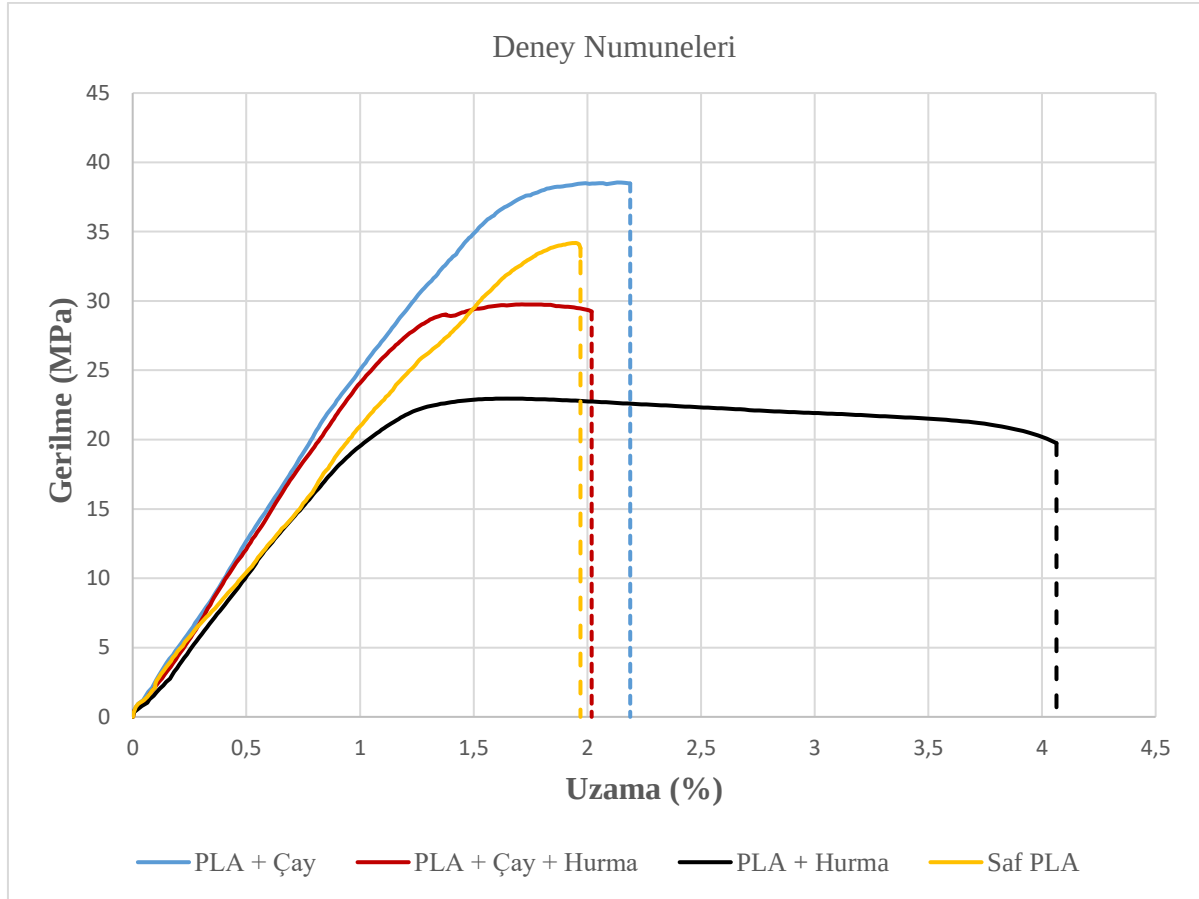


Şekil 5.7. PLA-H kompozitinin gerilme-uzama eğrileri



Şekil 5.8. PLA-CH kompozitinin gerilme-uzama eğrileri

Yapılan çekme testi deneyi ile üretilen malzemelerin, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 3D baskı yöntemi kullanılarak yazdırılan saf PLA ve PLA-C, PLA-H, PLA-CH deney numuneleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda saf PLA 3D numunesine kıyasla PLA-C atığı karışımından oluşan 3D numunesinin çekme dayanımının da artış olduğu ve en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Saf PLA 3D numunesi 34,7 MPa çekme dayanımına sahipken PLA-C kompozit malzemesinden üretilen 3D numunesinin 38,69 MPa çekme dayanımına sahip olması yüzde olarak PLA-C atığından oluşan numunenin saf PLA ya göre mukavemetinde % 11,49 oranında arttığını ve çay moleküllerinin PLA matrisiyle uyum sağlayıp dayanımında pozitif yönde etki oluşturduğu test sonuçlarından yola çıkarak yorumlanmıştır. PLA-H karışımından üretilen 3D test numunesinin saf PLA numunesine göre çekme dayanımında % 33,34 oranında düşüş görülmüştür. Bu düşüşün meydana gelmesinde hurma çekirdeklerinin PLA matrisiyle belirlenen şartlar dahilinde yeterli düzeyde arasında bağ oluşturmadıkları düşünülmektedir. PLA-CH oluşan kompozit malzemenin 3D baskı sonucunda oluşturulan test numunesinin ise saf PLA numunesine göre dayanımında % 13,68 oranında düşüşün olduğu bu düşüşünde hurma çekirdeği katkısında meydana geldiği düşünülmektedir. PLA'nın nispeten hidrofobik özellikte, katkı maddesinin de hidrofilik özellikte olması PLA'nın katkı maddesiyle arasında bağ oluşturmamasına sebep olduğunu Tokdemir, 2022 yılında yaptığı çalışmada belirtmiştir. Çalışmada belirtilen husus doğrultusunda hurma çekirdeğinin hidrofilik özellikte olduğu ve bu yüzden PLA ile bağ oluşturmadığı düşünülmektedir. Şekil 5.9'da kontrol numunesi olan saf PLA malzemesinden üretilen numunelerin gerilme-uzama değerlerinin ortalamasından oluşan eğri ile kompozit malzemelerden üretilen numunelerin gerilme-uzama eğri değerlerinin ortalamaları karşılaştırılıp yukarıdaki bulgulara ulaşılmıştır.



Şekil 5.9. Saf PLA ve kompozit malzeme örneklerinin ortalama gerilme-uzama eğrileri

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında biyolojik olarak biyo-bozunur bir matris olan PLA matrisine yine doğada çözünebilen katkı maddeleri katılarak ağırlıkça %10 çay atığı, ağırlıkça %10 hurma çekirdeği atığı ve ağırlıkça %5 çay atığı %5 hurma çekirdeği atığı eklenerek atık malzemelerin geri dönüştürülüp yenilenebilir ve biyolojik olarak doğada çözünebilen bir biyo-kompozit malzeme elde edilmiştir. Bu biyo-kompozit malzemelerden 3D yazıcı kullanılarak çekme testi numuneleri üretilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kendi içlerinde kıyaslanmış ve geliştirilen kompozit yapıların mekanik davranışlarıyla ilgili birtakım sonuçlara varılmıştır. Buna göre;

1-Doğada çözünebilen PLA matrisi kullanılarak ve katkı maddesi olarak doğada çözünebilen çay atığı ve hurma çekirdeği atığının ağırlıkça belirli oranlarda çift vidalı ekstrüder de başarılı şekilde karıştırılıp kompozit malzemeler elde edilmiştir.

2-Mekanik davranışların belirlenmesi açısından yapılan çekme testi sonuçlarına göre 3D baskıyla elde edilen numunelerde PLA matrisine ağırlıkça %10 oranında çay atığı katılarak oluşturulan kompozitin malzeme dayanımının, %100 PLA ya göre arttığı sonucuna varılmıştır.

3-Hurma çekirdeğinin ise çay atıklarına oranla PLA matrisiyle uyummadığı ve dayanımı ciddi şekilde düşürdüğü belirlenmiştir.

4-Çay atıklarının PLA matrisiyle moleküler olarak uyum sağladığı ve dayanımının bu nedenle arttığı düşünülmektedir.

5-Çay atıklarının geri dönüştürülüp üretime katılması sağlanılmıştır.

6-Ağırlıkça %10 çay atığı kullanılarak üretilen kompozit malzemede kullanılan PLA oranının düşmesi ve ayrıca dayanımında artması PLA kullanımının azalmasına olanak sağlamıştır.

7-Hem matris hem de katkı maddelerinin biyolojik açıdan doğada çözünebilir olması sebebiyle üretilen kompozit malzemelerin doğada çözünebilir bir biyo-kompozit üretilmesi sağlanılmıştır.

8-Bu çalışma kapsamında kompozitlerin üretimi sırasında bağlayıcı ajanlar kullanılmamıştır. Kullanılan matris malzemesi ve katkı malzemelerinin daha uyumlu olabilmeleri ve bağ oluşturabilmeleri açısından bağlayıcı ajanlar kullanılabilir. Bu tarz malzemelerin kullanılmasıyla birlikte üretilen malzemenin de mekanik özellikleri iyileştirip dayanımını attırabilir.

9-Bu çalışmada matris PLA malzemesi kütlece %90 oranında kullanılmış katkı maddeleri kütlece %10 çay atığı, %10 hurma çekirdeği, %5 çay atığı ve %5 hurma çekirdeği şeklinde kullanılarak kompozit malzemeler bu oranlarda üretilmiştir. Bu oranların haricinde oranlar değiştirilerek kompozit malzemelerin üretilmesi gerçekleştirilebilir.

10-Farklı işlem parametreleri kullanılarak sistemin optimizasyonu sağlanabilir. Burada üretilen biyo-kompozitler 666 mikron altındaki partiküller kullanılarak üretilmiştir. Daha düşük partiküller kullanılarak malzeme üretilebilir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, E. (2019). "Investigating the Effects of The Scanning Strategy and Layer Thickness For Electron Beam Melting by Using Finite Element Method." unpublished master's thesis, Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
- Aktitiz, İ., Aydın, K., & Topcu, A. (2020). Stereolitografi (Sla) Tekniği ile Basılan 3 Boyutlu Polimer Yapılarda İkincil Kırılma Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 949-958.
- Altun, Y. (2015). Improvement of Mechanical and Flame Retardancy Properties of Biocomposites Based on Low Density Polyethylene and Polylactic Acid. unpublished doctoral dissertation, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Ayrılmis, N. (2018). Effect of Layer Thickness on Surface Properties of 3d Printed Materials Produced From Wood Flour/Pla Filament. *Polymer Testing*, 71, 163-166.
- Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2021). Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: Fdm ile Eklemeli İmalat. *International Journal of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352.
- Bayram, A. (2019). *Seçici Lazer Sinterleme Yöntemi ile Katmanlı Olarak Üretilmiş Termoplastik ve Kompozit Malzemelerin Bilgisayar Destekli Analizi İçin Malzeme Modelinin Oluşturulması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Bıyıkoglu, M. (2019). *Eriyik Yığılma Yöntemiyle Üretilen Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Bozcuoğlu, Ç. (2022). *Polylactic Acid Recycling with Environmentally Benign Fluids*, Unpublished master's thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Celalettin Kaplan, M., (2021). *Seçici Lazer Sinterleme ile Üretilen Desteksiz Yapıların Geometrik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakır Yiğit, N., & Karagöz, İ. (2021). *Ceviz Kabuğu Esaslı Polilaktik Asit (Pla) Kompozit Filamentlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu*. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, 51-58.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., & Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (031), 53-70.

- Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107-121.
- Deáky, B., Udriou, R., Lupulescu, N., & Bâlc, N. Cylindrical Gear Rapid Manufacturing Study (Part I). *ModTech*, 2011.
- Deb, D., & Jafferson, J. M. (2021). Natural Fibers Reinforced Fdm 3d Printing Filaments. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1308-1318.
- Dedeakayoğulları, H., & Kaçal, A. (2020). Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(1), 1-12.
- Doğru, A., Yılcıoğlu, S., Gökem, Ü., Turan, B. Ş., & Seydibeyoğlu, M. Ö. Comparison Of Wood Fiber Reinforced Pla Matrix Bio-Composites Produced by Injection Molding and Fused Filament Fabrication (Fff) Methods. *Hacettepe Journal Of Biology And Chemistry*, 50(3), 215-226.
- Domínguez-Robles, J., Martin, N. K., Fong, M. L., Stewart, S. A., Irwin, N. J., Rial-Hermida, M. I., ... & Larrañeta, E. (2019). Antioxidant Pla Composites Containing Lignin for 3d Printing Applications: A Potential Material for Healthcare Applications. *Pharmaceutics*, 11(4), 165.
- Dudek, P. F. D. M. (2013). Fdm 3d Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy And Materials*, 58(4), 1415-1418.
- Elmas, Burak Samet. 2021. “Üç Boyutlu (3d) Yazıcıda Üretilen Polilaktik Asit (Pla) Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.” Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ermeydan, M. A., & Aykanat, O. (2019). Pla/Boynuz Biyo-kompozitlerin Termal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Engineering Sciences*, 14(4), 226-231.
- Fowler, P. A., Hughes, J. M., & Elias, R. M. (2006). Biocomposites: Technology, Environmental Credentials and Market Forces. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 86(12), 1781-1789.
- Gupta, B., Revagade, N., & Hilborn, J. (2007). Poly (Lactic Acid) Fiber: An Overview. *Progress In Polymer Science*, 32(4), 455-482.
- Haverman, T. M., Karagozoglu, K. H., Prins, H. J., Schulten, E. A. J. M., & Forouzanfar, T. (2013). Rapid Prototyping: Een Veelbelovende Methode. *Nederlands Tijdschrift Voor Tandheelkunde*, 120(3), 136-141.
- Johan, S., (2022). *A Review on Three-Dimensional Printing (3dp) Strategies to Induce Bone Regeneration in Bone Tissue Engineering*. Unpublished master's thesis, School of Pharmacy Brac University.

- Ismail, K. I., Yap, T. C., & Ahmed, R. (2022). 3d-Printed Fiber-Reinforced Polymer Composites by Fused Deposition Modelling (Fdm): Fiber Length and Fiber Implementation Techniques. *Polymers*, 14(21), 4659.
- Öter, Ç. (2021). *Direkt Metal Lazer Sinterleme Yöntemi ile 3 Boyutlu Metal Yazıcıda Üretilen Parçaların Yüzey Kalitesi, Boyutsal Hassasiyet ve Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Kaygusuz, B., & Özerinç, S. (2018). 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Pla Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1-6.
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping*. *Cirp Annals*, 47(2), 525-540.
- Li, X., Ni, Z., Bai, S., & Lou, B. (2018, March). Preparation and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Pla for 3d Printing Materials. in *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 322, No. 2, P. 022012). Iop Publishing.
- Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F. (2019). Fdm 3d Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of Their Mechanical Properties. *Polymers*, 11(7), 1094.
- Nikzad, M., Masood, S. H., & Sbarski, I. (2011). Thermo-Mechanical Properties of A Highly Filled Polymeric Composites for Fused Deposition Modeling. *Materials & Design*, 32(6), 3448-3456.
- Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 1(1), 36-48.
- Özsoy, K., & Sayın, H. (2021). Eklemeli İmalat ile Üretilen Pla Esaslı Malzemenin Çekme Dayanımının Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanarak Tahmini. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(6), 15-25.
- Öztürk, Y., & Burdurlu, E. (2021). 3d Yazıcı ile Yazdırılmış Malzemede Ahşap Kaplama Laminasyonunun Eğilme Direncine Etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 23(3), 885-891.
- Pavon, C., Aldas, M., Samper, M. D., Motoc, D. L., Ferrandiz, S., & López-Martínez, J. (2022). Mechanical, Dynamic-Mechanical, Thermal and Decomposition Behavior Of 3d-Printed Pla Reinforced with Caco3 Fillers From Natural Resources. *Polymers*, 14(13), 2646.
- Raza, S. M., & Singh, D. (2020). Experimental Investigation on Filament Extrusion Using Recycled Materials. Unpublished master's thesis, Halmstad University.

- Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., & Laoui, T. (2006). Rapid Manufacturing of Metal Components by Laser Forming. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 46(12-13), 1459-1468.
- Diksu, S. (2021). "Eklemeli İmalat Teknolojisi Eriyik Biriktirme Modelleme Yöntemi İçin Kompozit Abs Filament Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Tanase-Opedal, M., Espinosa, E., Rodríguez, A., & Chinga-Carrasco, G. (2019). Lignin: A Biopolymer From Forestry Biomass for Biocomposites and 3d Printing. *Materials*, 12(18), 3006.
- Tezel, T., Topal, E. S., & Kovan, V. (2018). Hibrit İmalat: Eklemeli İmalat ile Talaşlı İmalat Yöntemlerinin Birlikte Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *International Journal Of 3d Printing Technologies and Digital Industry*, 2(3), 60-65.
- Tokdemir, V. (2022). *3d Yazıcılar İçin Ahşap Biyo-Kompozit Filament Üretimi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Uslu, O. (2019). *Bikomponent ve Karışım Hdpe/Ldpe Liflerinin Eriyikten Çekim Yöntemi ile Üretimi ve 3d Yazıcılarda Kullanımı*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversite Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Vilaplana, F., Strömberg, E., & Karlsson, S. (2010). Environmental and Resource Aspects of Sustainable Biocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 95(11), 2147-2161.
- Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-D Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
- Yüzgeç, B. (2019). *Yara Örtüsü Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Biyo-kompozitlerin Geliştirilmesi ve İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Zehir, Burçak. 2022. "Molecular Dynamics Analyses And Experimental Investigation in The Effects of The Nanoadditives on The Thermo-Mechanical Properties and Fracture Toughness of Biodegradable Polylactic Thermoplastic." Unpublished master's thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Alparslan Turkes University, Adana.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Muhammed Sabri BAYINDIR

Eğitim Derecesi Okul / Program / Mezuniyet Yılı

Lisans Karabük Üniversitesi / Raylı Sistemler Mühendisliği / 2019

Lisans Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi/Makine Mühendisliği/2023

İş Deneyimi / Yıl

MEB Ücretli Öğretmenlik / 2019-

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

1-) Çay atıkları kullanılarak üretilen organik kompozit yapının çekme gerilmesinin incelenmesi. IMASCON 2022