



**3B YAZICILAR İÇİN PLA MATRİSLİ SÜREKLİ
TEL TAKVİYELİ FİLAMANT ÜRETİMİ VE TEST
EDİLMESİ**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ**

Mohamad Diaa TALEB

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Özkan ÖZ**

**3B YAZICILAR İÇİN PLA MATRİSLİ SÜREKLİ TEL TAKVİYELİ
FİLAMENT ÜRETİMİ VE TEST EDİLMESİ**

Mohamad Daa TALEB

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Özkan ÖZ**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalınız Anabilim Dalında
Tezin Derecesi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Mayıs 2023**

Mohamad Diaa TALEB tarafından hazırlanan “3B YAZICILAR İÇİN PLA MATRİSLİ SÜREKLİ TEL TAKVİYELİ FİLAMENT ÜRETİMİ VE TEST EDİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Özkan ÖZ

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 03/05/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Özkan ÖZ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat AYDIN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL (NEÜ)

ONLINE

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Mohamad Diaa TALEB

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

3B YAZICILAR İÇİN PLA MATRİSLİ SÜREKLİ TEL TAKVİYELİ FİLAMENT ÜRETİMİ VE TEST EDİLMESİ

Mohamad Diaa TALEB

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Özkan ÖZ

Mayıs 2023, 37 sayfa

Üç boyutlu (3B) yazıcılar, eklemeli imalat yöntemleri içinde en fazla araştırılan ve uygulanan üretim teknolojisidir. 3B yazıcılar kullanılarak geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak parçalar katmanlar halinde üretilir. Karmaşık geometrilerin tek aşamada üretilebilir olması montajlanan parça sayısını ve üretim zamanını önemli oranda azaltmaktadır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı parça dayanımının enjeksiyon kalıplama yöntemi ile karşılaştırıldığında düşük olmasıdır. Ancak, kompozit filamentlerin kullanılması ile beraber yazdırılan parça dayanımları önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu tez çalışmasının amacı, sürekli tel takviyeli (STT) kompozit Polilaktik Asit (PLA) filament üretilmesidir. Kompozit filament üretimi tasarlanan kalıp yardımıyla tek vidalı ekstrüder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit filament kullanılarak çekme test numuneleri yazdırılmış ve dayanımları belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, kompozit filament ile yazdırılan

numune dayanımlarının, saf PLA filament ile yazdırılan numune dayanımlarından oldukça yüksek olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler : Kompozit filament, 3B yazıcı, PLA

Bilim Kodu : 91417

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PRODUCTION AND TESTING OF CONTINUOUS WIRE-REINFORCED PLA FILAMENT FOR THE 3D PRINTER

Mohamad Daa TALEB

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Industrial Design Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Özkan ÖZ

May 2023, 37 pages

Three-dimensional (3D) printers are the most researched and applied production technology among additive manufacturing methods. Unlike traditional manufacturing methods, parts are produced in layers using 3D printers. The fact that complex geometries can be produced in one step significantly reduces the number of assembled parts and production time. The biggest disadvantage of this method is that the part strength is low compared to the injection molding method. However, the strength of the printed part has been significantly improved with the use of composite filaments. The aim of this thesis is to produce continuous wire-reinforced (CWR) composite (Polylactic Acid) PLA filament. Composite filament production was carried out using a single screw extruder with the help of the designed mold. Tensile test specimens were printed using the composite filament and their strengths were determined. Experimental results showed that the strength of specimens printed with composite filament were considerably higher than those printed with pure PLA filament.

Key Word : Composite filament, 3D printer, PLA

Science Code : 91417

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Özkan ÖZ'e teőekkürü borç bilirim.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
3B YAZICILARDA KULLANILAN TERMOPLASTİK MALZEME VE TAKVİYE ELEMANLARI	7
2.1. TERMOPLASTİK MALZEMELER	7
2.1.1. PLA.....	7
2.1.2. ABS	7
2.1.3. TPU.....	8
2.1.4. PVA	8
2.1.5. PETG	8
2.2. TAKVİYE ELEMANLARI	8
2.2.1. Cam Elyaf	8
2.2.2. Karbon Elyaf.....	9
2.2.3. Aramid Elyaf	9
BÖLÜM 3	11
3 BOYUTLU YAZICILARDA KOMPOZİT PARÇA ÜRETİMİ.....	11

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4	19
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	19
4.1. MALZEMELER.....	19
4.2. FILAMENT ÜRETİM KALIBI TASARIMI.....	19
4.3. KOMPOZİT FİLAMENT ÜRETİMİ	23
4.4. TEST NUMUNELERİNİN YAZDIRILMASI ve HAZIRLANMASI.....	26
BÖLÜM 5	30
DENEYSEL SONUÇLAR	30
BÖLÜM 6	32
SONUÇLAR	32
KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yazdırma şırıngasının enine kesit görünümü.....	12
Şekil 3.2. Sürekli karbon fiber takviyeli kompozit yazdırılması için tasarlanan deney düzeneği	12
Şekil 3.3. Ultrasonik destekli eklemeli imalat cihazının şematik gösterimi	13
Şekil 3.4. Sürekli fiber yazdırılmasında kullanılan 3B yazıcı şematik gösterimi	14
Şekil 3.5. ABS filamentli karbon fiber prepreg baskısı için tasarlanan 3B yazıcı sistemi.	15
Şekil 3.6. MarkOne yazıcı nozul detay görüntüsü	16
Şekil 3.7. Yazdırılabilir karbon fiber prepreg filament üretimi şematik gösterimi..	17
Şekil 3.8. Karbon fiber prepreg filament yazdırma nozulu detay görüntüsü	17
Şekil 3.9. Yazdırılan karbon fiber eğilme numunesi.....	18
Şekil 4.1. Kalıp görünüşleri.....	20
Şekil 4.2. Kalıp ölçüleri.....	20
Şekil 4.3. Takviye elemanı giriş nozulu ve ölçüleri	21
Şekil 4.4. Kalıp çıkış nozulu ve ölçüleri.	22
Şekil 4.5. Kalıp ısıtıcıları kontrol paneli.	22
Şekil 4.6. Montajı yapılan kalıp.	23
Şekil 4.7. Filament üretimi.	24
Şekil 4.8. Tel makara.....	24
Şekil 4.9. Filament çapı ölçümü.....	25
Şekil 4.10. Filament makarası.	25
Şekil 4.11. Filament eksenini doğrultusunda telin konumu.....	26
Şekil 4.12. Filament çap kesitinde telin konumu.	26
Şekil 4.13. Numunelerin yazdırılması.....	27
Şekil 4.14. Matris içerisinde tel detay görüntüleri.	28
Şekil 4.15. Çekme test numuneleri.	28
Şekil 4.16. Çekme test cihazı.	29
Şekil 5.1. Kompozit ve PLA numune yük-yerdeğiştirme diyagramı.	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. CuZn37 pirinç telin kimyasal kompozisyonu.....	19
Çizelge 4.2. PLA fiziksel özellikleri.....	19
Çizelge 4.3. Yazdırma parametreleri	27
Çizelge 5.1. PLA ve kompozit numune çekme test sonuçları.	31

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

gr : gram
°C : derece
Fe : demir
Zn : çinko
Sn : kalay
Cu : bakır

KISALTMALAR

3B : Üç Boyutlu
ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

3B yazdırma teknolojisi, eklemeli imalat yöntemlerinin en fazla uygulama alanı ve araştırılan teknolojisidir. Bu yöntemde, malzemeler, geleneksel kalıplama veya talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak katmanlar halinde üretilir. Karmaşık geometrilerin tek aşamada üretilebilir olması montajlanan parça sayısını azaltarak imalat süresini önemli oranda düşürür [1]. Bu yöntemin en büyük dezavantajı parça dayanımının enjeksiyon kalıplama yöntemi ile karşılaştırıldığında düşük olmasıdır. Ancak, yazdırılan parça, yazdırma parametrelerinin doğru seçilmesi ve sonrasında ısıl işlem uygulamaları dayanımı belirgin şekilde arttırabilmektedir [2]. Ayrıca, günümüzde, yazdırılan parçaların dayanımlarını arttırmak amacıyla polimer matrisli kompozit yapı esasları, 3B yazdırma teknolojisine adapte edilerek, bu yöntemin kompozit üretiminde de kullanılabilirliği araştırılmakta ve birçok uygulama araştırmacılar tarafından önerilmektedir.

Polimer kompozitler kullanılan takviye elemanlarına bağlı olarak havacılık ve otomotiv sanayinde kullanılabilir ürünler haline gelmiştir. Fiber takviyeli polimer kompozitler (FTPK), önemli yapı elemanlarıdır, çünkü bu grup içerisindeki malzemeler yüksek özgül güç, yüksek performans ve daha iyi yorulma direnci gibi özellikler sergilerler [3,4].

Günümüzde, mevcut yöntemler ile üretilen polimer kompozitler yüksek maliyetlidir. Bunun nedeni üretim süreçlerinin karmaşık oluşu ve yeterli bilgi birikimine sahip eleman ihtiyacıdır. Halihazırda mevcut olan bir dizi imalat yöntemi, enjeksiyonlu kalıplama, basınçlı kalıplama, reçine enjeksiyonlu kalıplama vb. içerir [5]. Bu nedenle, yüksek mekanik özelliklerden ödün vermeden FTPK 'lerin çok etkili ve kolay bir şekilde üretilmesi için yeni yöntemler için büyük bir talep vardır. Polimer kompozitler, termoset ve termoplastik matrisli olmak üzere iki çeşittir. Termoset plastikler arasında

epoksi ve poliüretan, termoplastikler ise Polipropilen (PP), Poliamid (PA), Polieter eter keton (PEEK), vb. içerir [6]. 3B yazdırma, yüksek oranda özelleştirilebilir parçaların, karmaşık yapıların ve kişiselleştirilmiş cihazların üretim kapasitesinin orta üretim hacmi ile mümkün olduğu endüstriler için daha avantajlıdır. 3B yazıcılar hem FTPK'lerin hem de 3B baskı teknolojisinin sunduğu avantajlar göz önüne alındığında, hafif, daha karmaşık ve yüksek performanslı parçaların üretiminde etkili ve verimli bir şekilde kullanılabilir [7].

Zhang vd. [8] çalışmalarında, yerinde emprenye tekniği ile karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) kompozitleri üretmek için 3B yazdırma tekniği ile kullanılacak ekstrüder geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, yazdırılan KFTP kompozitlerde, karbon fiberlerin iyi emprenye edilmesi nedeniyle yapı içerisindeki boşluk oranının düşük ve mekanik özelliklerinin yüksek olduğunu göstermiştir. Çekme mukavemeti ve modülü, %27'lik bir artışla sırasıyla, 610 MPa ve 61 GPa'a ulaşmıştır. Bununla birlikte, yazdırma sırasında oluşan çekme kuvvetinin ve matrisin yetersiz katılmasından dolayı geniş eğrilikli bölgelerde boyut doğruluğunun etkilenebileceğini belirtmişlerdir. 3B baskının işlem parametreleri optimize edilirken boyut doğruluğu ile mekanik özellikler arasında bir denge sağlanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Mosleh vd. [9] çalışmalarında, sürekli karbon fiber takviyeli akrilonitril bütadien stiren (ABS) filamentleri 3B yazıcı kullanılarak yazdırılmışlar ve mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Sürekli karbon fiber takviyeli termoplastik kompozitler, karbon elyaf prepreleri ve ABS filament aynı anda özel olarak tasarlanan tek çıkışlı nozul kullanılarak yazdırılmıştır. Nozul çapı, katman yüksekliği ve baskı hızı gibi değişen baskı koşulları ile farklı kalitelerde kompozit numuneler yazdırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, elyaf tüylenme veya yırtılma kararsızlığı, elyaf burulma kararsızlığı, düşük kaliteli stabil baskı ve yüksek kaliteli stabil baskı olmak üzere dört bölge gözlemlenmiştir. Karbon fiber takviyeli polimer filamentleri yazdırmak için optimum parametreler belirlenerek mekanik özelliklerini araştırmak için numuneler yazdırılmıştır. Herhangi bir elyaf tüylenmesi, yırtılması veya bükülmesi olmayan, görsel olarak optimize edilmiş 3B baskılı kompozitlerin mekanik ve morfolojik özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, 3B baskılı kompozitlerin çekme, eğilme ve

katmanlar arası kayma direncinin, düzgün ABS 3B baskılı numunelerle karşılaştırıldığında sırasıyla %313, %121 ve %54 arttığını gösterdi.

Melenka vd. [10] çalışmalarında, Mark Forged tarafından üretilen MarkOne 3B yazıcı kullanarak sürekli karbon, fiberglas veya kevlar elyaflarıyla güçlendirilmiş numuneler yazdırmışlardır. Takviyeli 3B baskılı yapıların elastik özellikleri belirlenmiş ve Ortalama Sertlik yöntemini kullanarak, yazdırılan numunelerin elastik özellikleri tahmin edilmiştir. Numunelerin yazdırılmasında takviye hacim oranları değiştirilerek (sırasıyla %4.04, %8.08 ve %10.1) üretim gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak belirlenen elastisite modülü, sırasıyla %4.04, %8.08 ve %10.1'lik fiber hacim fraksiyonları için 1767.2, 6920.0 ve 9001.2 MPa olarak bulunmuştur. Ön görülen elastisite modülleri 4155.7, 7380.0 ve 8992.1 MPa olarak bulunmuştur. Model sonuçları, %4.04, %8.08 ve %10.1 fiber hacim fraksiyonları için deneylerden %57.5, %6.2 ve %0.1 oranında farklılık göstermiştir. Uygulanan modelin, tasarımcıların, belirli mekanik özellikler gerektiren fonksiyonel bileşenler için kullanılacak fiber takviyeli 3B baskılı parçaların elastik özelliklerini tahmin etmelerini sağlayacaktır.

Wang vd. [11] çalışmalarında, ısıl işlemin 3B baskılı sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri ve yazdırılan numunelerin boyutsal kararlılığına etkilerini incelemişlerdir. Isıl işlemin sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etki mekanizması, mikro yapı değişiklikleri (kristalleşme ve gözeneklilik) gözönüne alınarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sürekli karbon fiber takviyeli kompozitler için en iyi ısıl işlem koşulunun 100 °C de 8 saat olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla, gözenekliliğin artması nedeniyle sürekli karbon fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri azalmıştır.

Tian vd. [12] çalışmalarında sürekli karbon fiber takviyeli PLA kompozitlerin 3B baskısını yapmışlardır. 3B baskı sürecindeki parametrelerin arayüzeyler üzerindeki etkisi ve basılı kompozitlerin performansı sistematik olarak araştırılmıştır. Optimize edilmiş proses parametreleriyle, %27 fiber içeriğine sahip 3B baskılı sürekli karbon fiber takviyeli PLA kompozitlerde, maksimum 335 MPa eğilme mukavemetine ve 30 GPa eğilme modülüne ulaşılmıştır.

Caminero vd. [13], 3B baskılı sürekli karbon, cam ve keklar elyaf takviyeli naylonun katmanlar arası kayma mukavemetini belirlemek için kısa kiriş kayma testleri gerçekleştirmişlerdir. Katmanlar arası kayma mukavemeti değerleri, daha yüksek gözeneklilik nedeniyle tabaka kalınlığı arttıkça azalmıştır. Ek olarak, sürekli elyaf takviyeli numuneler, takviye edilmemiş olanlardan daha yüksek katmanlar arası kayma mukavemeti değerleri göstermiş, ancak, keklar elyafı durumunda, elyaf içeriğindeki sürekli artışla birlikte katmanlar arası kayma mukavemetindeki artış seviyesi orta düzeyde kalmıştır. Karbon fiber takviyeli kompozitler, daha yüksek rijitlik ile en iyi tabakalar arası kayma performansını sergilemiştir. Kevlar elyaf takviyeli kompozitler, keklar elyaf demetlerinin naylon tarafından zayıf ıslanabilirliği nedeniyle en düşük tabakalar arası kayma performansına sahiptir ve bu durum delaminasyona yol açmıştır.

Calignano vd. [14] çalışmalarında, karbon fiberle güçlendirilmiş naylon filament ile 3B yazıcıda üretilen parçaların mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Sonuçlar, sertlik ve çekme mukavemetinin yazdırma yönü, doluluk yüzdesi ve ısıl gerilmelerden etkilendiğini, esnekliğin ise sadece yazdırma yönünden etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, mekanik özellikler ile doluluk faktörü arasında doğrusal bir ilişki olmadığı belirtilmiştir.

Heidari-Rarani vd. [3], sürekli karbon fiber takviyeli PLA üretmek amacıyla 3B yazıcı için yeni bir ekstruder tasarlamışlardır. Ekstrüder, "Bileşen üzerine gömme" yöntemine dayalı olarak çalışmakta ve aynı anda termoplastik matrisli uzun elyaf takviyesini ekstrüde edebilmektedir. Güvenilir bir baskı elde etmek için temel parametreleri iyileştirmek üzere deneyler yapılmıştır. PVA (Polivinil Alkol) solüsyonu kullanarak fiber/matris bağımlılığını artırma, fiberlerin ve erimiş polimerin aynı anda enjeksiyonu, basılı numunelerin soğutma fanı tarafından biriktirildikten hemen sonra hızlı soğutulması ve optimum karbon çapının bulunması gibi işlem parametreleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, sürekli karbon fiber takviyeli PLA'nın çekme ve eğilme dayanımlarının saf PLA'ya göre sırasıyla %35 ve %108'e kadar arttığını göstermiştir. Lif/matris bağımlılığını ve hasar modlarını araştırmak için morfolojik analiz de yapılır. Bu analiz, elyafın PVA ile yüzey hazırlığının çok etkili

olduğunu göstermiştir. Karbon fiber takviyeli PLA'nın hasar modları sırasıyla, delaminasyon ve delaminasyon kaynaklı matris çatlamasıdır.

Yang vd. [15] çalışmalarında, termoplastik polimer eritme, sürekli elyaf sıcak daldırma ve emprenye edilmiş kompozitlerin ekstrüzyonundan oluşan işlem mekanizması üzerine çalışmışlardır. Kompozit ekstrüzyon kafasına sahip 3B yazıcı ile yazdırılan karbon fiber takviyeli polimerlerin mekanik testleri yapılmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile arayüzey performansı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, ağırlıkça %10 sürekli karbon fiber/(ABS) numunelerinin eğilme mukavemetinin ve çekme mukavemetinin sırasıyla 127 ve 147 MPa'ya yükseltildiğini gösterdi. ABS parçalarından ve aynı elyaf içeriğine sahip enjeksiyonlu kalıplama ile üretilen karbon fiber takviyeli ABS'nin birbirine yakın mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, test sonuçları çok düşük katmanlar arası kayma mukavemetini (sadece 2,81 MPa) ve düşük arayüzey performansını ortaya çıkarmıştır.

Saeed vd. [16] çalışmalarında, "Markforged Two" 3B yazıcı sistemi kullanılarak üretilen sürekli karbon fiber takviyeli poliamid kompozitin düzlem içi mekanik özellikleri belirlenerek klasik lamine plaka teorisinden tahmin edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Kompozitin mukavemeti, sertliği ve Poisson oranı numuneler hem boyuna hem de enine yönde çekme testi kullanılarak ölçülmüş ve ayrıca, kayma özellikleri de belirlenmiştir. Son olarak, lif oryantasyonunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmış ve takviye edilmemiş naylon numuneler ve literatürden bilinen malzeme özellik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, takviyesiz naylon numunelere göre elastisite modülü ve çekme dayanımı değerlerinin sırasıyla 603,43 MPa ve 85 GPa'ya önemli ölçüde iyileştirildiği belirlendi. Ayrıca, 3B baskılı kompozitin mikro yapısını ve kırılma mekanizmasını gözlemlemek için numunelerin enine kesit mikrografları analiz edilmiştir. Deneysel olarak belirlenen değerler, ticari olarak temin edilebilen Lamine Analiz Programı (LAP) yardımıyla klasik katmanlı plaka teorisi kullanılarak malzemelerin farklı yönlerdeki davranışını tahmin edilmiştir.

Bu tez çalışmasında literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, filament sürekli takviyeli olarak üretilecek ve yazdırılacaktır. Sürekli filament üretimi tek vidalı

ekstrüder için tasarlanan kalıp yardımıyla gerçekleştirilecektir. PLA matrisli filament takviye elemanı olarak 0.25 mm çapa sahip, mekanik özellikleri bilinen ekstrüzyon teli kullanılacaktır. Yazdırma parametreleri belirlenerek, kompozit numuneler yazdırılacak ve yazdırılan numunelerin çekme dayanımları bulunacaktır.

BÖLÜM 2

3B YAZICILARDA KULLANILAN TERMOPLASTİK MALZEME VE TAKVİYE ELEMANLARI

2.1. TERMOPLASTİK MALZEMELER

3B yazıcılarda kullanılan termoplastik malzeme çeşitleri aşağıdaki şekli ile sıralanabilir.

- ABS
- PLA
- TPU (Termoplastik Poliüretan)
- PVA
- PETG (Polietilen Tereftalat)

2.1.1. PLA

PLA yenilenebilir biyolojik kaynaklardan elde edilir. Bu nedenle çevreye zararı yoktur [17]. Ayrıca kullanımı sırasında çıkan koku insanlara rahatsızlık vermez.

2.1.2. ABS

ABS, camsı matris formunda stiren akrilonitril kopolimer ve bütadien stiren (sentetik kauçuk) kopolimerinden oluşan en yaygın kullanılan mühendislik plastiklerinden biridir. ABS kopolimerleri nispeten serttir, iyi termal dirence sahiptir. ABS petrol türevidir ve uygulama esnasında hissedilir derecede kötü kokar. Geri dönüşümü diğer malzemelere göre daha kolaydır ancak geri dönüşümden sonra ilk halindeki kalite gözlemlenmez. Otomotiv parçaları, ev aletleri parçaları, mobilya parçaları, oyuncaklar vb. alanlarda kullanımı yaygındır [18].

2.1.3. TPU

TPU, esnek, şeffaf, toksik yapıda olmayana ve yağ/gres aşınma direncine sahip bir polimer alt kümesidir. Yapıları gereği esnektirler ve çok fazla bükülme, esneme, sıkıştırma ve genel olarak aşınmaya maruz kalan nesnelere basılmasında kullanışlıdır. Giyilebilir bileklikler, ayakkabı tabanları, oyuncaklar ve havasız lastik prototipleri, 3B yazıcılar kullanım alanlarıdır. [19]

2.1.4. PVA

PVA, esas olarak yazdırılan parçaların desteklenmesi amacıyla kullanılır. Suda çözünebildiği ve esas parçaya zarar vermeden kolayca çıkarılabildiği için PVA, yazdırılan parçaların destek gereken boşluklarını doldurmak amacıyla geniş oranda tercih edilir. Zararlı yan ürünler olmadan biyolojik olarak bozunur. [20]

2.1.5. PETG

PETG, glikol modifiyeli ko-polyester tipi plastik malzemedir. PET, polietilen tereftalat glikol oluşturmak için ko-polimerizasyon işlemi yoluyla etilen glikol ile reaksiyona girer. PLA ve ABS malzemelerine önemli bir alternatiftir. Yüksek mukavemet, maliyet etkinliğine ve kimyasal dirence sahip, filament formunda kırılma olmayan, ABS ve PLA'dan daha esnek bir malzemedir. Katman yapışması mükemmeldir ve bu nedenle baskılar güçlü çıkar. Mükemmel alkali, asit, su ve kimyasal dayanımları vardır. Geri dönüştürülebilir amorf yapıdadır [21].

2.2. TAKVİYE ELEMANLARI

2.2.1. Cam Elyaf

Endüstride yaygın olarak kullanılan iki cam elyafı türü E-cam ve S-cam'dır. Çoğu cam elyafındaki birincil malzeme silikadır. Cam elyafın etkili bir şekilde üretilmesi için, bileşenlerin yaklaşık 1.370°C sıcaklıktaki bir fırında eritilmesi gerekir. Cam elyaflar, yüksek mukavemet (yaklaşık 3.40 GPa çekme mukavemeti), yüksek sıcaklıklara ve

aşındırıcı ortamlara tolerans ve düşük maliyet gibi avantajlı özelliklerinden dolayı elyaf takviyesi için önemli bir seçimdir. Bununla birlikte, cam elyafın rijitliği (70 ila 90 GPa), karbon elyafın rijitliğinden (230 ila 830 GPa) düşüktür. Ayrıca, cam elyafları da neme karşı çok hassastır [22]. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, iyi çevresel direnç, yüksek özgül mukavemet ve sertlikleri nedeniyle denizcilik endüstrisinde ve boru endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir [23].

2.2.2. Karbon Elyaf

Karbon lifleri suni ipek, poliakrilonitril (PAN) ve petrol ziftinden üretilir. Elyaf lar başlangıçta 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda çekilir ve oksitlenir. Bu işlem den sonra lifler pirolize tabi tutulur (800°C'nin üzerinde ısıtılır). Son olarak grafitleştirme işlemi gerçekleştirilir. Son olarak elyaflar 1.000°C'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılır. Karbon fiberlerin avantajları arasında yüksek mukavemeti, yüksek elastisite modülü ve sıcaklık ile aşındırıcı ortamlara karşı yüksek direnci sayılabilir. Ancak karbon fiber petrol bazlıdır. Ayrıca, karbon fiberin üretimi için bir fırının kullanılmasını gerektiren yüksek sıcaklıklar gerekir [22].

2.2.3. Aramid Elyaf

Aramid elyaf, yüksek elastisite modülü ve mukavemete sahip gelişmiş kompozitlerde takviye olarak kullanılan ilk organik elyaftı. Eşit ağırlık bazında çelik ve cam elyaflara göre çok daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Aramid lifler doğası gereği ısıya ve alev e dayanıklıdır ve bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda korur. "Aramid" terimi, ABD Federal Ticaret Komisyonu tarafından tanımlandığı gibi, amid bağlarının (dCOdNHd) en az %85'inin doğrudan iki aromatik halkaya bağlandığı aromatik poliamid tipi elyaflar için belirlenmiştir. Bu bağların para veya meta olarak konfigürasyonu genellikle polimeri sınıflandırmak için kullanılır. Alifatik karbon omurgasının aromatik gruplarla ikame edilmesi, elde edilen liflerin özelliklerinde önemli değişiklikler meydana getirir. Bu sınıfın geliştirilecek ilk elyafı, 1960'larda ortaya çıkan DuPont'tan Nomex idi. Bu iplik orta mukavemetlidir ve yanmaz özelliklerdedir ve yanmaz giysiler, elektrik yalıtımı, vb. ürünler için hammadde olarak tercih edilir. Bununla birlikte, p-disüstitüe benzen halkaları içeren zincirlere sahip aramid liflerin (ayrıca DuPont tarafından

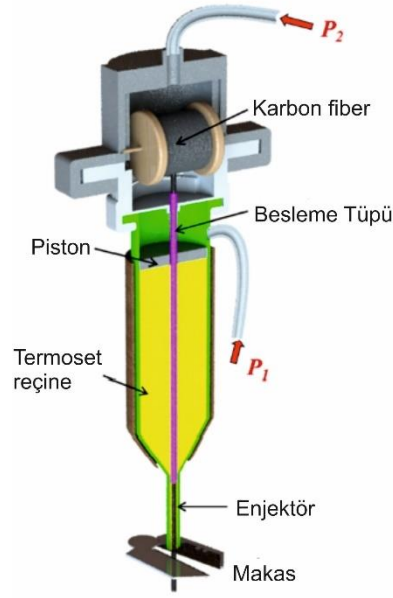
üretilen Kevlar) ortaya çıkmasıyla, iyi termal stabiliteye ek olarak, bu lifler ayrıca olağanüstü mekanik özelliklere sahip olmuştur. Olağanüstü potansiyelleri, çoğunlukla fibriller, kıvrımlı, kristal ve deri çekirdekli özellikler sunan üst üste bindirilmiş alt yapılarının anizotropisinden kaynaklanır [24].

BÖLÜM 3

3 BOYUTLU YAZICILARDA KOMPOZİT PARÇA ÜRETİMİ

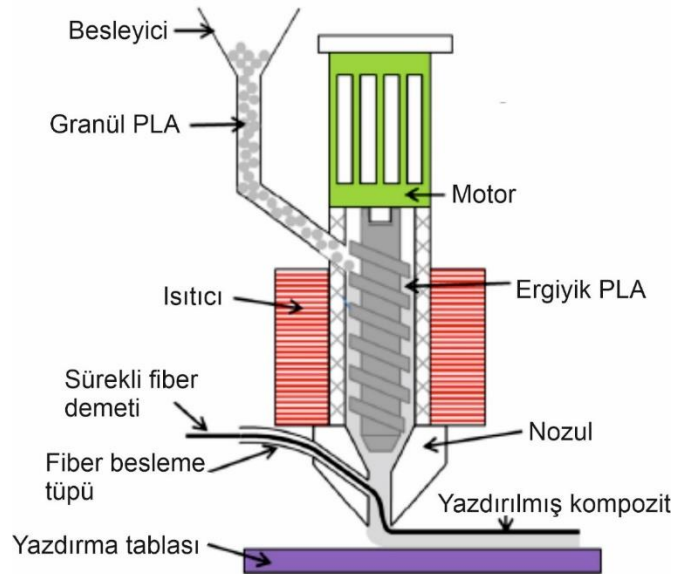
Bu bölümde literatürde çalışılan kompozit parça yazdırma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Kompozit parça yazdırılması amacıyla tasarlanan yöntem ve tasarımlar detaylı olarak incelenmiştir.

Şekil 3.1'de kompozit parça yazdırılmasında kullanılan şırınga tipi yazıcı kafasının ayrıntılı tasarımı gösterilmektedir [25]. Bu tasarımda, uygun viskoziteye sahip termoset reçine yazdırılabilir mürekkep olarak şırıngaya yüklenir. Kimyasal işlem görmemiş ticari karbon fiber demeti (6k T300 karbon fiberler ile, çap ~9 um) besleme tüpü aracılığıyla şırıngaya iletilmektedir. Yazdırma sırasında şırıngaya iki farklı basınç uygulanmaktadır (P1 ve P2). Uygulanan P1 basıncı termoset reçinenin ilerletilmesi amacıyla şırınga pistonunu hareket ettirmektedir. Şırınga içindeki viskoz reçine akışı, fiberin nozuldaki akışını sağlayan kesme gerilimi uygular. Reçinenin besleme borusuna akışını önlemek ve borunun ucundaki basıncı dengelemek üzere üst kısma pozitif P2 basıncı uygulanmaktadır. Bu tasarımda filamentin iletilmesi için gerekli itici güç, reçine tarafından fibere uygulanan kesme gerilimi tarafından sağlanır.



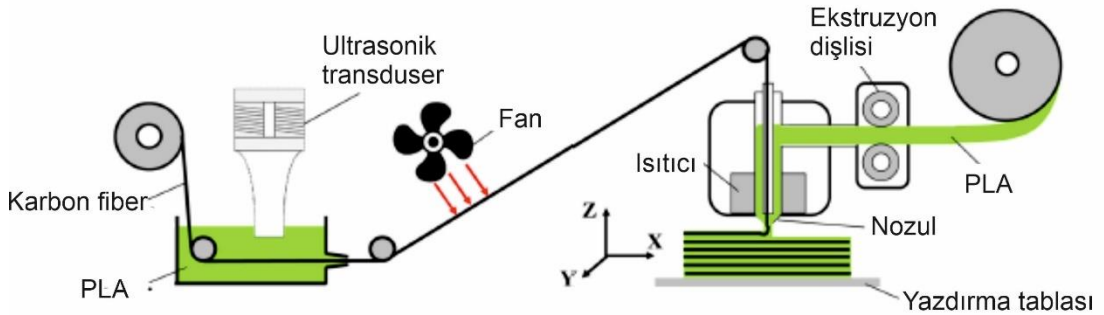
Şekil 3.1. Yazdırma şırıngasının enine kesit görünümü [25].

Şekil 3.2'de, dahili tek bir vidaya sahip yazıcı tasarımı gösterilmiştir [26]. Bu tasarımda PLA peletleri ekstrüder hunisinden beslenir ve nozuldaki çıkımdan önce ısıtıcı tarafından eritilir. Ekstrüzyon içerisinde iletilen eriyik PLA, besleme tüpünden ayrı olarak iletilen karbon elyaf demetini kaplar ve emprene edilen fiber katmanlar halinde yazdırılır.



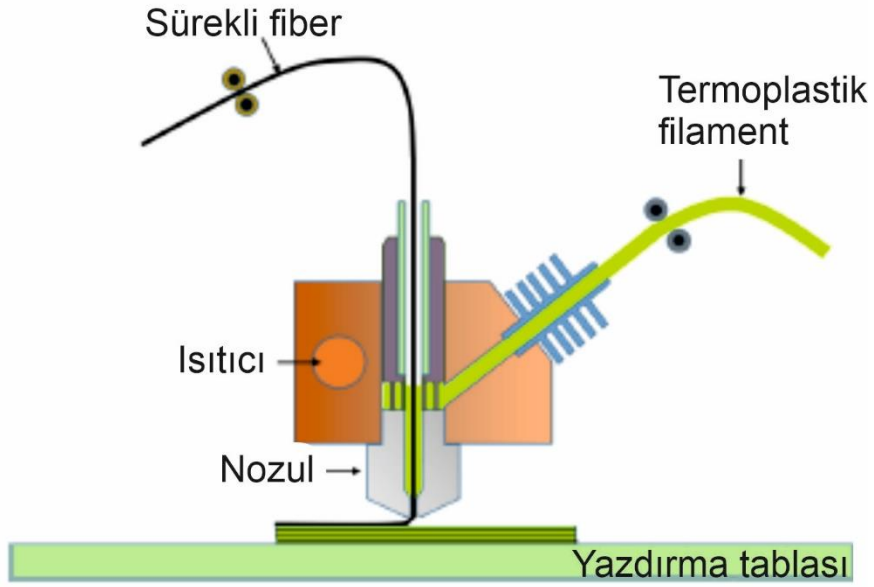
Şekil 3.2. Sürekli karbon fiber takviyeli kompozit yazdırılması için tasarlanan deney düzeneği [26].

Şekilde 3.3'te gösterilen tasarım sürekli fiber takviyeli kompozitler imal etmek için geliştirilmiştir [27]. Bu tasarımda, termoplastik reçinenin diklorometan içinde çözülmesiyle reçine çözeltisi hazırlanır. Daha sonra, karbon fiber demeti sarma makinesinin çekişi altında reçine solüsyonu havuzuna girer. Karbon fiber demeti ultrasonik transduserden 10 mm uzaklıkta tamamen reçine çözeltisine daldırılır. Reçine çözeltisi ultrasonik transduserin neden olduğu kavitasyon etkisi altında karbon fiber demetine nüfuz eder. Bu yöntemle emprenye edilmiş karbon fiber demeti, yüzeyindeki fazla reçineyi almak için bir kazıma deliğinden geçer ve diklorometan çözücü sıcak hava altında buharlaştırılır. Son olarak, reçine ile emprenye edilmiş karbon fiber demeti (karbon fiber prepreg) baskı hammaddesi olarak sarım makinesi kullanılarak makarada biriktirilir. Bu tasarımda, 3B yazıcının baskı kafası iki konik koaksiyel nozuldan oluşur. Karbon fiber demeti ve PLA daha sonra nozuldan ekstrüde edildiği nozul borusunun alt bölümünde birlikte karışır. Ekstrüde edilmiş karbon fiberle güçlendirilmiş PLA filament yazdırma tablasına yapışır ve sürekli fiberle güçlendirilmiş kompozitleri nozuldan dışarı çekmek için gerekli çekme kuvveti sağlanır.



Şekil 3.3. Ultrasonik destekli eklemeli imalat cihazının şematik gösterimi [27].

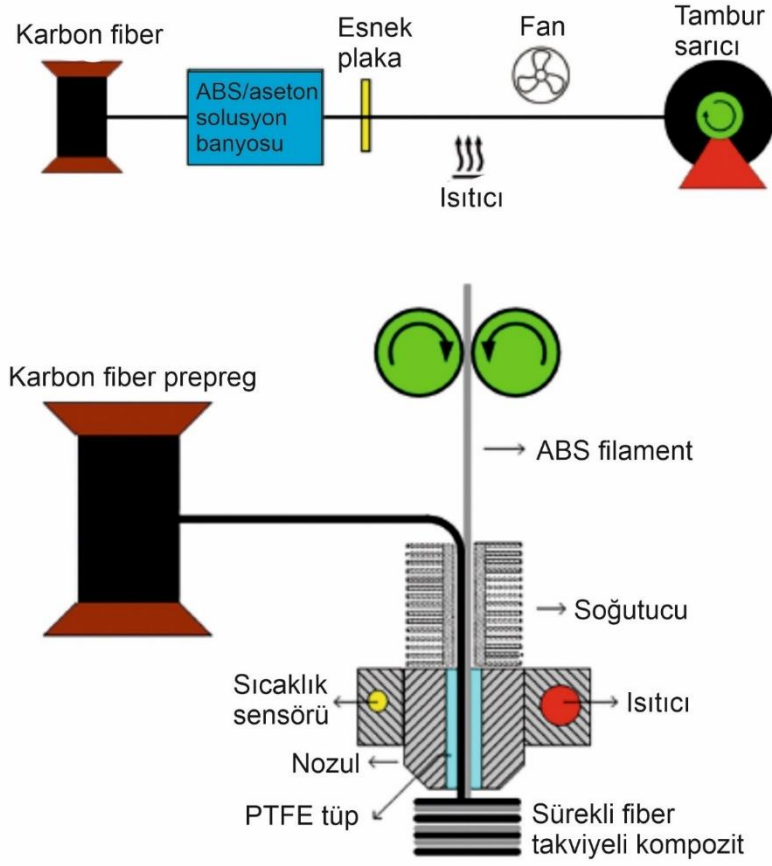
Şekil 3.4'de gösterilen tasarımda, karbon fiber ve PLA aynı anda beslenir [8]. Karbon fiberlerin termoplastik filament ile kaplanabilmesi için ekstrüder kafasında altı yarıkli tüp yerleştirilmiştir. Dikdörtgen yuva yapılarının boyutları 3 mm x1 mm'dir. Erimeş termoplastik filament, tek biçimli olarak tasarlanmış ve dağıtılmış yarıklar yoluyla fiberlerin üzerini kaplar. Daha sonra, emprenye edilmiş lifler, kompozit yapıları oluşturmak için baskı yatağının çekişi altında 0.8 mm çapındaki nozuldan çekilir.



Şekil 3.4. Sürekli fiber yazdırılmasında kullanılan 3B yazıcı şematik gösterimi [8].

Şekil 3.5 gösterilen tasarımda matris ve fiber arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmek için termoplastik ABS çözeltisi kullanılmıştır [9]. ABS aseton içinde kapalı bir ortamda karıştırılarak çözelti hazırlanmıştır. Uyumluluk sorunları için, emprenye solüsyonunu hazırlanmasında baskı filamentinin aynı ABS sınıfı kullanılmıştır. Karbon fiber, çözelti banyosundan geçirilmiş ve bir tambur sarıcı ile makarada biriktirilmiştir. Prepreglerden fazla çözeltiyi sıyırmak için delikli esnek bir plaka tercih edilmiştir.

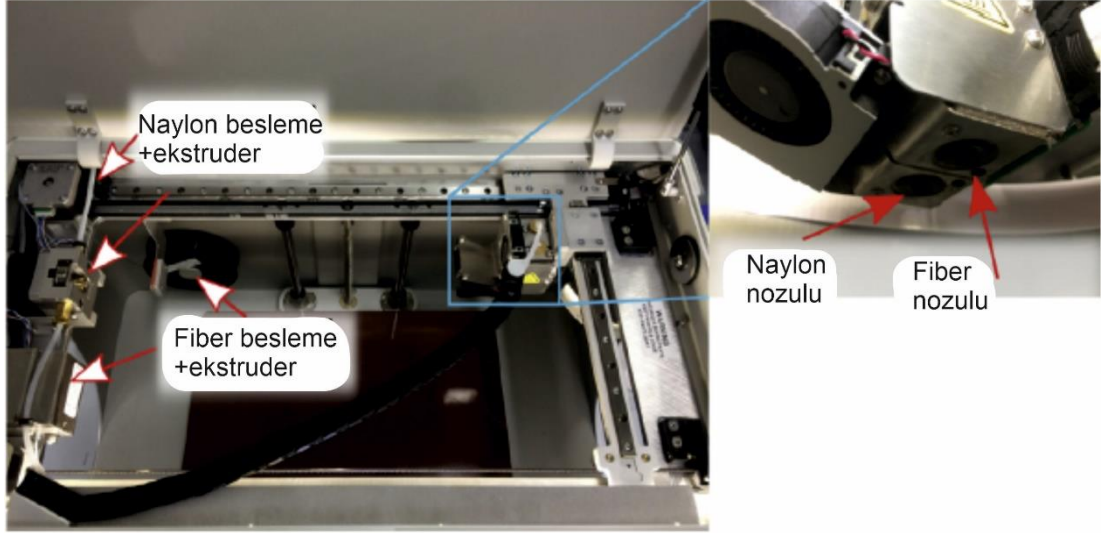
Nozul, ABS filamentini ve sürekli fiberi aynı anda basmak için modifiye edilmiştir. Karbon fiber prepreg ile nozul arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve aynı zamanda besleme tüpündeki polimerin erken erimesini önlemek için nozul içine politetrafloroetilen tüp yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5. ABS filamentli karbon fiber prepeg baskısı için tasarlanan 3B yazıcı sistemi [9].

Yukarıda belirtilen tasarımların tamamı ticari olmayan ve sadece deney amacıyla kullanılan tasarımları göstermektedir. Günümüzde, sürekli fiber takviyeli parça yazdırılmasında ticari olarak satılan ve kullanılan yazıcılarda bulunmaktadır. MarkOne yazıcı, bir naylon matrise gömülü sürekli fiberden oluşan bir filament yazdırabilen tescilli bir 3B yazıcıdır. Bu yazıcıda, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, biri saf naylon filament biriktirmek için ve diğeri fiber takviyeli naylon filament biriktirmek için iki adet yazdırma nozulu vardır [28]. Takviyesiz naylon nozul, baskıların genel bütünlüğü ve kalitesi için çok önemlidir, çünkü fiber filament, parçaların dış katmanları (üst, alt, yanlar) için kullanılamaz ve daha karmaşık şekiller ve ince yapılarda fiber filamentin dolduramadığı bölgeler takviyesiz naylon filament ile doldurulur. Bu yazıcıda nesneyi yazdırmak için özel bir dilimleme yazılımı kullanılmalıdır. Bu yazılım kapalı kaynak kodludur ve sıcaklık, nozul hareketi veya

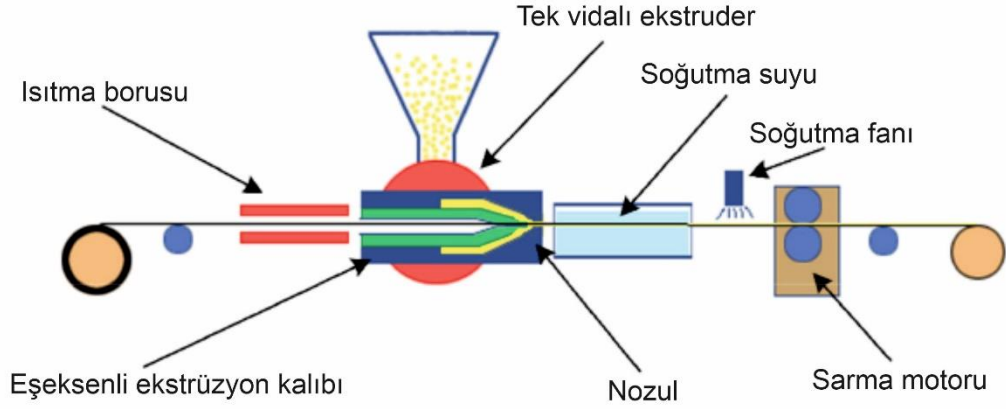
ekstrüzyon gibi önemli yazdırma parametrelerinin kullanıcı tarafından ayarlanmasına izin vermez. Bu durum, yazdırma ayarları olarak yazdırma yeteneklerini sınırlar.



Şekil 3.6. MarkOne yazıcı nozul detay görüntüsü [28].

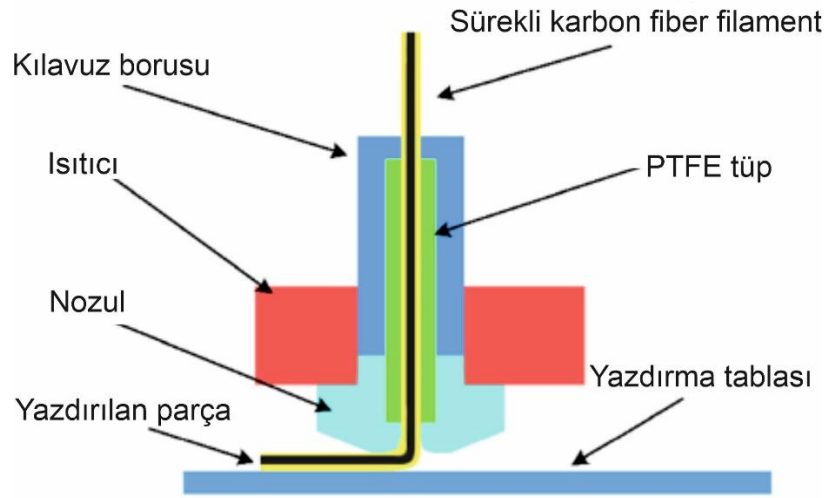
Yukarıda belirtilen kompozit parça yazdırma yöntemleri incelendiğinde kompozit filament kullanılarak kompozit parça yazdıran tasarım örneklerinin olmadığı görülmektedir. Tasarımların tamamında genel olarak filament ve takviye elemanı ayrı ayrı iletilmekte ve nozul kısmında bir araya getirilmektedir.

Şekil 3.7’de gösterilen tasarımda sürekli karbon fiber filament üretmek için tek vidalı ekstrüder ve koaksiyel ekstrüzyon kalıpları kullanılmıştır [29]. Koaksiyel ekstrüzyon kalıbına girmeden önce sürekli karbon fiber, kuru ve sıcak kalması ve filamentlerin erimiş polimer ile kolayca emprenye edilmesini sağlamak için ısıtma borusunda ısıtılmıştır. Emprenye işleminden sonra, sürekli karbon fiber prepreg filament katılma için soğutma suyuna girerken, bir sonraki adımda filamenti kuru tutmak için soğutma fanı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Yazdırılabilir karbon fiber prepreg filament üretimi şematik gösterimi. [29].

Şekil 3.8’de tasarlanan kalıp yardımıyla hazırlanan kompozit filamentin 3B yazıcı ile yazdırılması için geliştirilen nozul gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Karbon fiber prepreg filament yazdırma nozulu detay görüntüsü [29].

Şekil 3.9’da yazdırılan karbon fiber eğilme numunesi gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Yazdırılan karbon fiber eğilme numunesi [29].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. MALZEMELER

Çizelge 4.1 takviye elemanı olarak kullanılan ve 1040 MPa çekme dayanımına sahip CuZn37 pirinç telin kimyasal kompozisyonu göstermektedir.

Çizelge 4.1. CuZn37 pirinç telin kimyasal kompozisyonu.

Sn (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)
0.001	62.8	0.0025	Denge	0.006

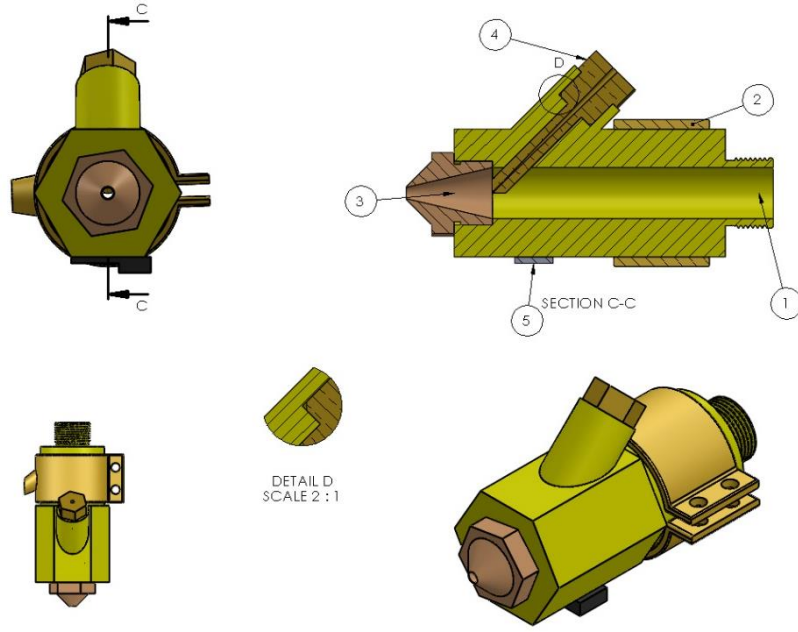
Çizelge 4.2. termoplastik matris PLA'nın fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Çizelge 4.2. PLA fiziksel özellikleri.

Elastisite modülü	Çekme dayanımı	Kopmada uzama yüzdesi	Ergime sıcaklığı	Camsı geçiş sıcaklığı
3500 MPa	50 MPa	≤ 5%	175°C	60°C

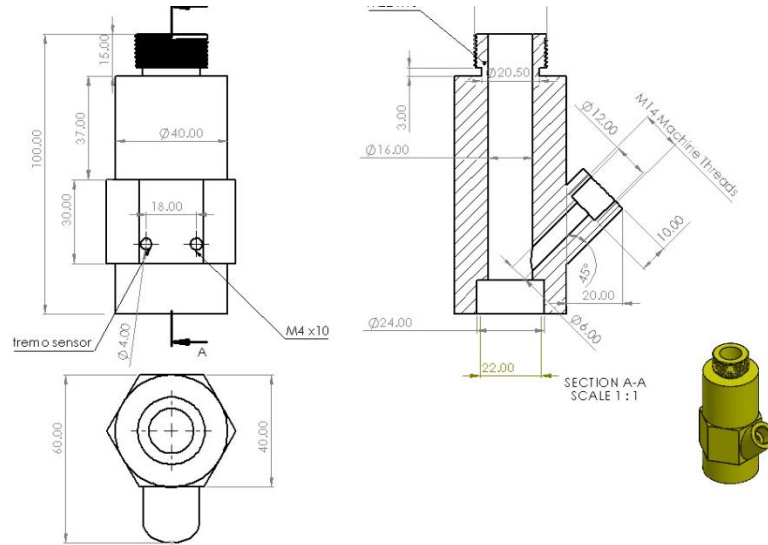
4.2. FILAMENT ÜRETİM KALIBI TASARIMI

Şekil 4.1'de sürekli tel takviyeli filament üretiminde kullanılacak kalıp tasarımı gösterilmektedir. Tasarlanan kalıp tek vidalı ekstrüder ile uyumlu çalışacak şekilde ölçülendirilmiş ve imal edilmiştir. Kalıp temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar ergiyik termoplastiğin içinde ilerlediği gövde (1 nolu kısım), sürekli takviye elemanın eklendiği yolluk (4 nolu kısım) ve kalıp nozulu (3 nolu kısım) olarak sıralanabilir. Ayrıca, kalıbın ısıtılması ve belirlenen sıcaklıklara çıkartılabilmesi için gövde üzerinde kelepçe ısıtıcı (2 nolu kısım) kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Kalıp görünüşleri.

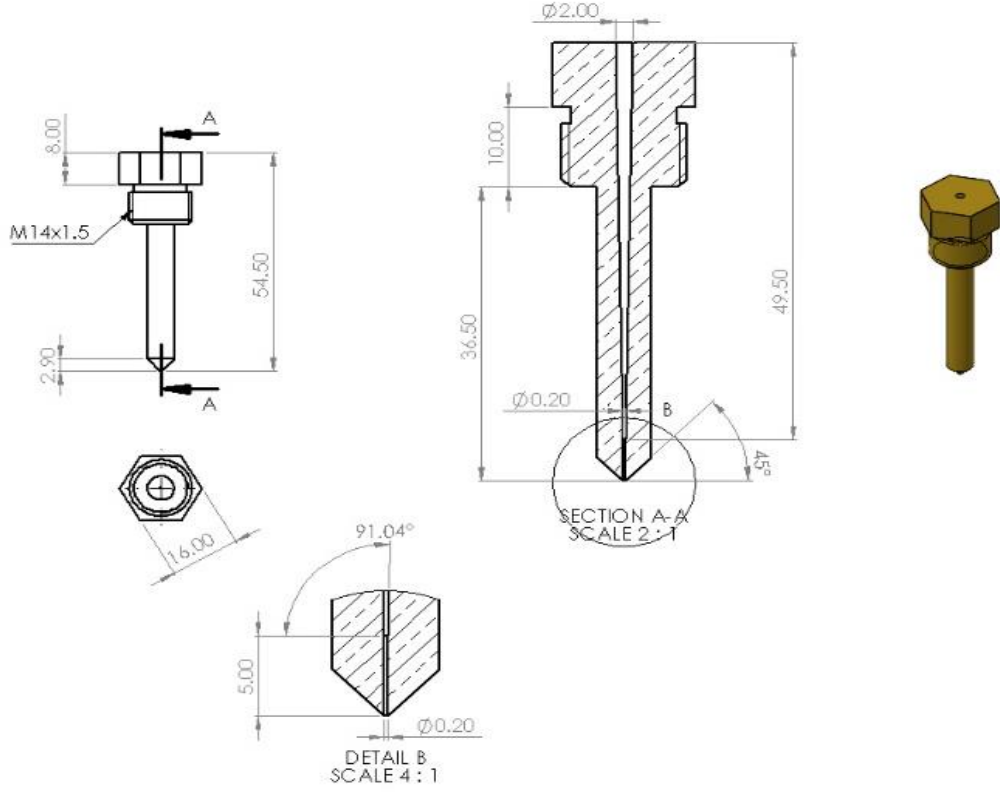
Şekil 4.2’de hazırlanan kalıbın ölçüleri detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 4.2. Kalıp ölçüleri.

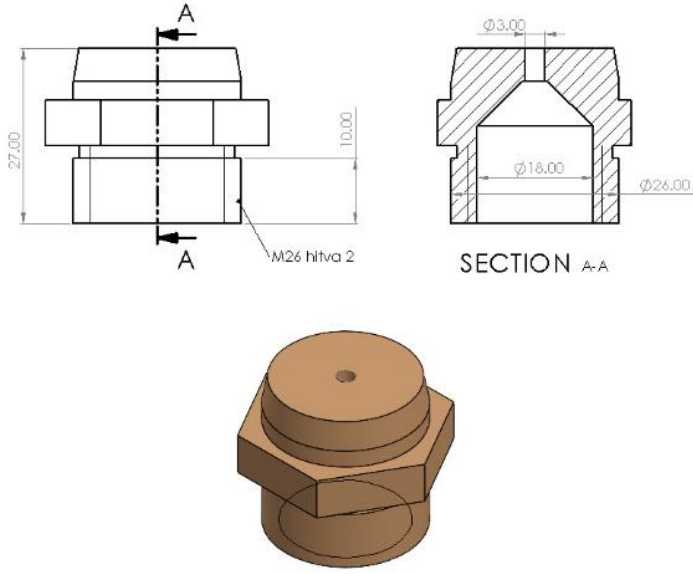
Şekil 4.3 takviye elemanı giriş nozulunu göstermektedir. Takviye elemanı giriş nozulu takviye elemanın ergiyik plastik içerisinden geçirilmesi için tasarlanmıştır. Kalıp gövdesi içerisine vida adımı ile ilerletilerek takviye elemanın filament çap kesitinde merkezlenmesi hassas şekilde sağlanmaktadır. Açılı tasarımı sayesinde polimer

akışının nozul içerisine girişi engellenmiştir. Ergiyik polimer ile temas başladığı anda takviye elemanı sürekliliği aksamadan nozul içerisinde kendiliğinden ilerlemektedir.



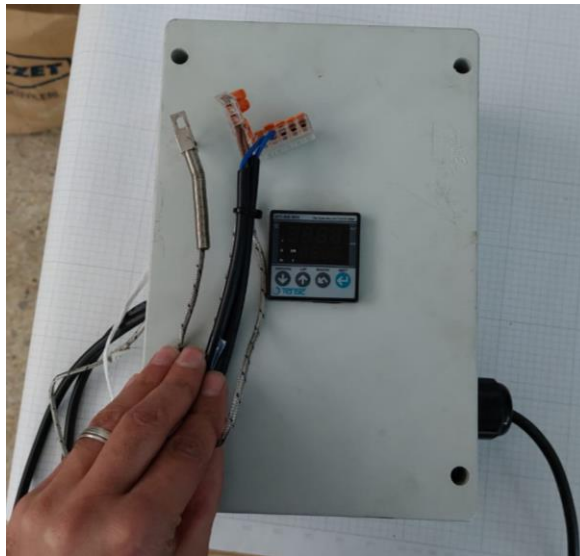
Şekil 4.3. Takviye elemanı giriş nozulu ve ölçüleri.

Şekil 4.4 kalıp çıkış nozulunu göstermektedir. Kalıp çıkış nozulu sökülebilir olarak tasarlanmıştır. Kalıp ısıtma işlemleri başlamadan önce takviye elemanı giriş ve çıkış nozullarından geçirilmektedir. Başlangıçta kalıptan ayrı olan çıkış nozulu kalıp ucuna bağlanarak kalıp ısıtılmaya hazır hale getirilmektedir.



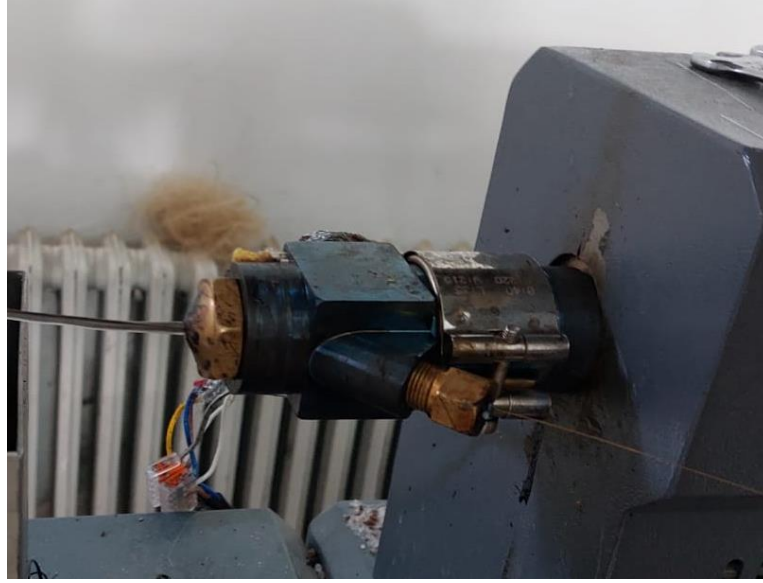
Şekil 4.4. Kalıp çıkış nozulu ve ölçüleri.

Şekil 4.5, kalıp üzerinde kullanılan ısıtıcıların sıcaklık kontrolünün yapıldığı kontrol panosunu göstermektedir. Kontrol panosu yardımıyla kalıp sıcaklıkları istenilen değerlerde ayarlanabilmekte ve sıcaklık sensörleri vasıtasıyla sıcaklık kontrolü yapılabilmektedir. Kalıbın ısıtılmasında kullanılan mika izolasyonlu kelepçe tipi rezistansların maksimum çalışma sıcaklık aralığı 350°C/400°C 'dir. Bu tür rezistanslar isteğe göre kendinden termokuplu olarak rahatlıkla üretilebilmektedir.



Şekil 4.5. Kalıp ısıtıcıları kontrol paneli.

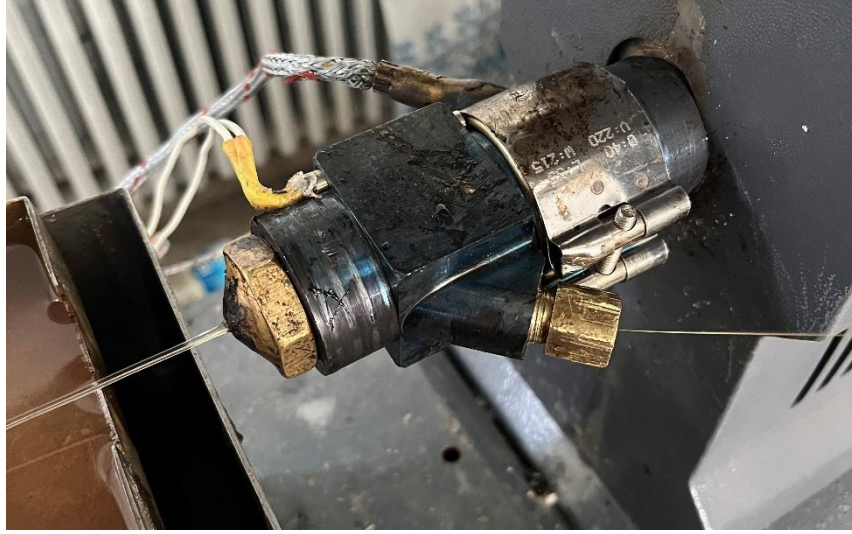
Şekil 4.6 ekstrüdere bağlantısı yapılan kalıbı göstermektedir. Kalıp tek vidalı ekstrüderin vida sonuna konumlandırılmıştır. Ergiyik termoplastik vida içerisinde kalıba doğrudan iletilmektedir. Kalıp vasıtasıyla gövde içerisinde geçirilen tel ergiyik haldeki termoplastik malzeme ile kaplanmakta ve kalıp dışına kendiliğinden itilmektedir.



Şekil 4.6. Montajı yapılan kalıp.

4.3. KOMPOZİT FİLAMENT ÜRETİMİ

Kompozit filament üretiminde granül formdaki PLA nem giderme amacıyla 60°C sıcaklıkta 24 saat boyunca fırında bekletilmiştir. Kurutma işlemi yapılan PLA granül, tek vidalı ekstrüder besleme hunisi vasıtasıyla 200°C sıcaklıktaki kovan içerisine iletilerek iletmiş ve vida yardımıyla hazırlanan kalıba kadar ilerlemesi beklenmiştir. Yolluktan kalıp çıkışına kadar uzatılan tel, ergiyik PLA ile kaplandığı anda filament sarma işlemine başlanmıştır. Şekil 4.7’de yolluk içerisinde geçen ve kalıp çıkışında kaplanan tel gösterilmektedir. Filament sarma hızı ayarlanarak filamentin 1.75 mm çapa ulaşması sağlanmış ve makaraya sarım işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Filament üretimi.

Şekil 4.8 yolluk aracılığı ile kalıp içerisine iletilen telin sarılı olduğu makarayı göstermektedir. Tel iletiminde kesinti olmaması amacıyla makaranın serbestçe dönmesi takılı olduğu mil aracılığı ile sağlanmıştır.



Şekil 4.8. Tel makara.

Şekil 4.9’da filament çapı lazer ölçüm cihazı gösterilmektedir. Filament sarımı süresince çap kontrolü lazer ölçüm cihazı ile sürekli kontrol edilmiştir. Filament sarım hızı ayarlanarak filament çapı istenilen değerde ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.9. Filament çapı ölçümü.

Şekil 4.10 üretilen filamentin sarılı olduğu makarayı göstermektedir. Makara sarım işlemi bittikten sonra 60°C sıcaklıktaki fırın içerisinde tekrar bekletilerek nem alma işlemi yazdırma prosesinden önce tekrarlanmıştır. Ayrıca, tekrar nem alma ihtimaline karşı makara sürekli desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir.



Şekil 4.10. Filament makarası.

Şekil 4.11 ve 4.12’ de üretilen kompozit filamentin PLA matris içerisindeki konumu gösterilmektedir. Telin filament ekseninde ve çap kesitinin tam ortasında konumlandığı net olarak görülmektedir. Her iki şekil, kullanılan kalıbın, teli matris içerisinde istenilen konumda tutulabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.11. Filament ekseninde telin konumu.



Şekil 4.12. Filament çap kesitinde telin konumu.

4.4. TEST NUMUNELERİNİN YAZDIRILMASI ve HAZIRLANMASI

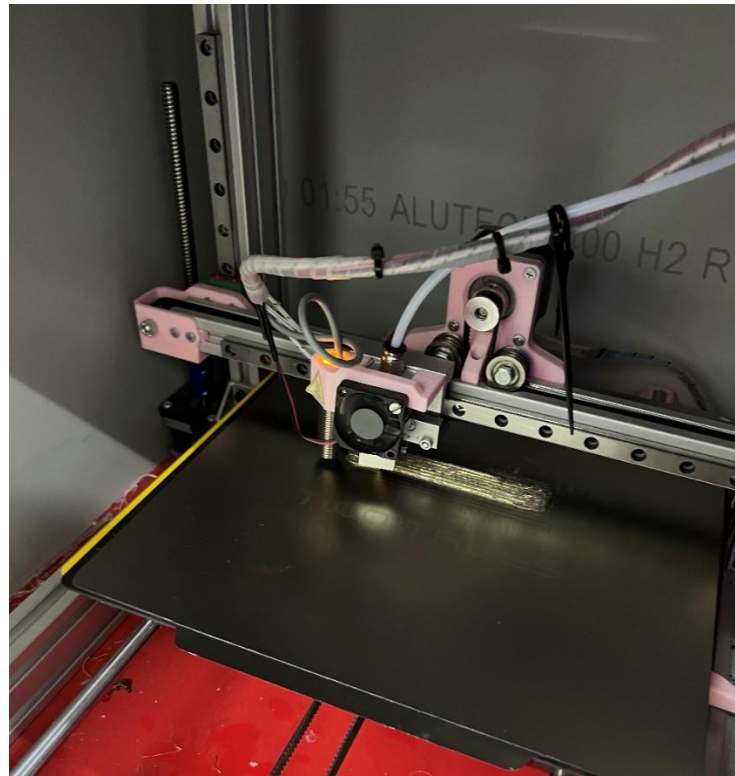
Filamentlerin yazdırılması açık kaynak kodlu 3B yazıcı kullanılarak yapılmıştır. Yazıcı tablası y yönünde, yazdırma kafası x ve z yönlerinde harekete sahiptir. Hazırlanan filament kullanılarak, çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla standartlarda belirtilen ölçülerde numuneler yazdırılmıştır. Bütün numunelerde yazdırma yönü numune uzunluğunu takip edecek şekilde seçilmiştir. Yazdırma prosesi süresince, yazdırma hızı ve filament besleme hızı eşitlenmiş ve 1.2 mm çapa sahip bakır nozul kullanılmıştır. Çizelge 4.3 yazdırma işlem parametrelerini göstermektedir.

Yazdırma işlemleri saf PLA ve tel takviyeli PLA filamentler kullanılarak tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.3. Yazdırma parametreleri

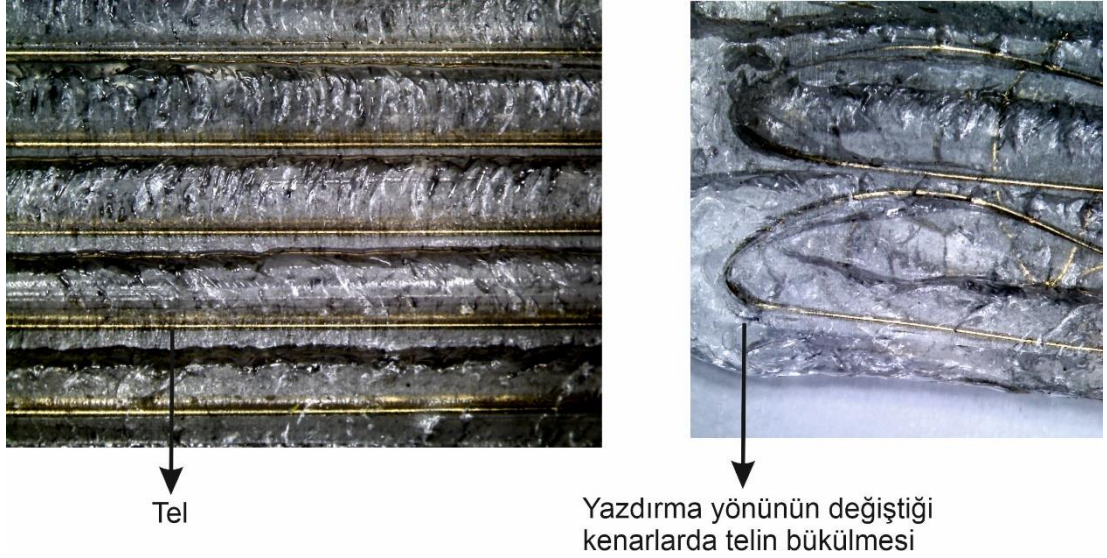
Parametre	Değer
Yazdırma hızı (mm/s)	50
Katman yüksekliği (mm)	0.6
Yazdırma sıcaklığı (°C)	200
Nozul çapı (mm)	1.2
Yazdırma deseni	Rectilinear
Doluluk oranı	100%

Şekil 4.13'te yazdırma işlemi başlatılan numune gösterilmektedir. ASTM D3039/D3039M-00 (Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Çekme Özellikleri İçin Standart Test Yöntemi) standardına uygun olarak, 200x15x1,2 ölçülerinde yazdırılmıştır.



Şekil 4.13. Numunelerin yazdırılması.

Şekil 4.14'te yazdırılan numune içerisindeki tel detay görüntüleri gösterilmektedir. Her iki şekil incelendiğinde, yazdırma yönünün değiştiği kenar kısımlara kadar telin hatasız şekilde matris içerisinde konumlandığı görülmektedir. Ayrıca, dönüş kısımlarında telde oluşan büküm nozul ucunu kırılmadan takip etmekte herhangi bir kopma meydana gelmemektedir.



Şekil 4.14. Matris içerisinde tel detay görüntüleri.

Şekil 4.15'te standartlara uygun olarak hazırlanan çekme test numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Çekme test numuneleri.

Çekme testleri, numuneler hasara uğrayana kadar 2 mm/dk sabit hızda Şekil 4.16’da gösterilen Instron 50 kN çekme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylede uygulanan çekme yükü ve yerdeğiştirme eş zamanlı olarak kaydedilerek gerilme-gerinim diyagramı elde edilmiştir. Gerilme-gerinim diyagramındaki gerilme değerleri, uygulanan yükün numune kesit alanına bölünmesiyle belirlenmiştir.

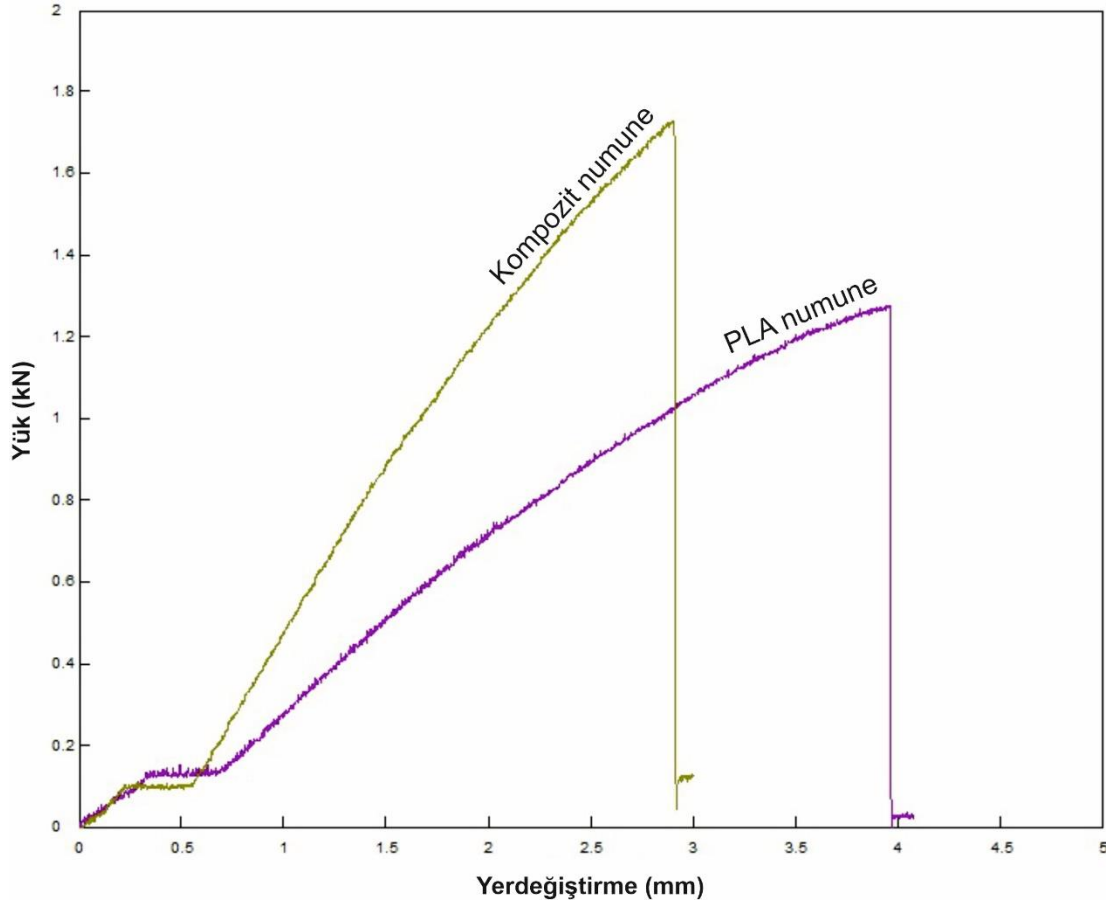


Şekil 4.16. Çekme test cihazı.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR

Şekil 5.1, çekme testinden elde edilen, kompozit ve PLA numune gerilme-gerinim diyagramı gösterilmektedir. Diyagram incelendiğinde kompozit numunenin PLA numuneye göre daha yüksek gerilme değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca, parça rijitliği de önemli oranda artmıştır.



Şekil 5.1. Kompozit ve PLA numune yük-yerdeğiştirme diyagramı.

PLA filament ile yazdırılan numune gerilme değeri ile sürekli tel takviyeli filament ile yazdırılan kompozit numune gerilme değerleri karşılaştırıldığında, takviye elemanının dayanımı yaklaşık %40 oranında arttırdığı görülmüştür.

Çizelge 5.1. PLA ve kompozit numune çekme test sonuçları.

Numune	Yük (N)	Yerdeğiştirme (mm)
PLA	1161 (± 190)	3.27 (± 0.67)
Kompozit	1620 (± 99)	3.21 (± 0.37)

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu tezin temel amacı sürekli tel takviyeli filament üretimi yapabilecek kalıp tasarımı ve üretimidir. Ayrıca, üretilen kalıp kullanılarak hazırlanan kompozit filament ile yazdırılan numunelerin çekme dayanımlarının belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan ve imalatı yapılan kalıbın istenilen özelliklerde sürekli takviye elemanına sahip filament üretim kabiliyetinin olduğunu göstermiştir. Takviye amacıyla kullanılan tel, yolluk üzerinde gerekli ayarlamalar yapılarak filamentin merkezine alınabilmiş ve 1.75 mm çap kontrolü başarı ile sağlanmıştır. İkinci aşamada, yazdırma işleminin başarısı test edilmiştir. Dilimleme yazılımında yapılan gerekli düzenlemeler ile yazdırma işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan filament ile yapılan yazdırma işleminde yazdırma yolunun kesintili olmaması önemlidir. Dolayısıyla nozul hareketi kesintili yazdırmaya izin vermeyecek şekilde tasarlanmıştır. Elde edilen numunelerde dönüşlerin olduğu uç kısımlarda tel de herhangi bir kırılma meydana gelmemiş ve belirlenen ölçülerde numunelerin yazdırılması sağlanmıştır.

Hazırlanan filament karmaşık numunelerin yazdırılması için değil düz yüzeyli levha üretimi veya silindirik parça imalatı için oldukça uygundur. Telde ergime olmaması ve yazdırma esnasında kesintiye izin verilmemesinden dolayı parça geometrisi kısıtlıdır. Karmaşık yüzeylerin elde edilebilmesi filamentin yazdırma esnasında mekanik olarak kesilmesi ile mümkündür. Yazıcı kafa sisteminde ileride yapılacak iyileştirmeler ile sürekli takviye elemanına sahip filamentler ile karmaşık şekillerin yapılması mümkün olacaktır. Ayrıca, tasarlanan ekstrüzyon kalıbında, takviye türü değiştirilerek, farklı özelliklere sahip filament üretilmesi de mümkündür. Üretilen filamentler yazıcıda kullanılabileceği gibi kırılarak granül haline getirilebilir ve enjeksiyon kalıplama yöntemi için kompozit hammaddesi olarak değerlendirilebilir. Bilindiği üzere enjeksiyon kalıplama da en büyük problem kompozit karışımların hazırlanmasıdır. Karışımların homojen olması ve topaklanmanın meydana gelmemesi

için üretim prosesinin çok dikkatli ilerletilmesi gerekmektedir. Bu sebepten tez çalışması sonucunda elde edilen bilgi birikimi ve tasarlanan kalıp sayesinde homojen yapıda kompozit granül üretimininde yapılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Parandoush, P. And Lin, D., “A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites”, *Compos. Struct.*, 182:36–53 (2017).
- [2] Jayanth, N., Jaswanthraj, K., Sandeep, S., Harish Mallaya, N. And Raghul Siddharth, S., “Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 123:104764 (2021).
- [3] Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M. And Zahedi, A.M., “Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites”, *Compos. Part B-Eng.*, 175: 107147 (2019).
- [4] Mortazavian, S. And Fatemi, A., “Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites: A literature review”, *Int. J. Fatigue*, 70:297-321 (2015).
- [5] Rajak, D.K., Wagh, P.H. And Linul, E., “Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review”, *Polymers*, 13:3721 (2021).
- [6] Zhou, W. D. And Chen, J. S., “3D Printing of Carbon Fiber Reinforced Plastics and their Applications”, *M. S. F.*, 913:558–563 (2018).
- [7] Petrick, I. J. And Simpson, T. W., “3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition”, *Res. Technol. Manag.*, 56 (6): 12-16 (2013).
- [8] Zhang, Z., Long, Y., Yang, Z., Fu, K. And Li, Y., “An investigation into printing pressure of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites”, *Compos. Part A Appl.*, 162: 107162 (2022).
- [9] Mosleh, N., Rezadoust, A.M. And Dariushi, S., “Determining process-window for manufacturing of continuous carbon fiber-reinforced composite Using 3D-printing”, *Mater. Manuf. Process.*, 36(4):409-418 (2021).
- [10] Melenka, G.W., Cheung, B.K.O., Schofield, J.S., Dawson, M.R. And Carey, J.P., “Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures”, *Compos. Struct.*, 153:866-875 (2016).
- [11] Wang, K., Long, H., Chen, Y., Baniassadi, M., Rao, Y. And Peng, Y., “Heat-treatment effects on dimensional stability and mechanical properties of 3D printed continuous carbon fiber-reinforced composites”, *Compos. Part A Appl.*, 147: 106460 (2021).

- [12] Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q. And Li, D., “Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites”, *Compos. Part A Appl.*, 88:198-205 (2016).
- [13] Caminero, M.A., Chacón, J.M., García-Moreno, I. And Reverte, J.M., “Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling”, *Polym. Test.*, 68:415-423 (2018).
- [14] Calignano, F., Lorusso, M., Roppolo, I. And Minetola, P., “Investigation of the Mechanical Properties of a Carbon Fibre-Reinforced Nylon Filament for 3D Printing”, *Mach.*, 8:1-13 (2020).
- [15] Yang, C., Tian, X., Liu, T., Cao, Y. And Li, D., "3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance", *Rapid Prototyp. J.*, 23: 209-215 (2017).
- [16] Saeed, K., McIlhagger, A., Harkin-Jones, E., Kelly, J. And Archer, E., “Predication of the in-plane mechanical properties of continuous carbon fibre reinforced 3D printed polymer composites using classical laminated-plate theory”, *Compos. Struct.*, 259: 113226 (2021).
- [17] Taib, N.A.A.B., Rahman, M.R., Huda, D. et al. “A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer”, *Polym. Bull.*, 80:1179–1213 (2023).
- [18] Izdebska-Podsiadły, J., “Polymers For 3d Printing Methods, Properties, and Characteristics 1st ed.” *William Andrew*, Oxford, (2022).
- [19] Andriya, N., Dutta, V. And Vani, V. V., “Study on 3D printed auxetic structure-based non-pneumatic tyres (NPT’S)”, *Mater. Manuf. Process.*, 37 (11): 1280–1297 (2022).
- [20] Lopes, L.R., Silva, A.F. And Carneiro, O.S., “Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the boundary interface performance”, *Addit. Manuf.*, 23: 45-52 (2018).
- [21] Panneerselvam, T., Raghuraman, S. And Vamsi Krishnan, N. “Investigating Mechanical Properties of 3D-Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Material Under Fused Deposition Modeling”, *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 102:375–387 (2021).
- [22] Jain, R., Lee, L., “Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications”, *Springer Dordrecht*, New York, 2012.
- [23] Sathishkumar, T.P., Satheeshkumar, S. and Naveen, J., “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review” *J. Reinf. Plast. Compos.*, 33(13): 1258–1275 (2014).

- [24] Seydibeyoğlu, Ö., Mohanty, A.K. And Misra, M., “Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites 1st ed.”, **Woodhead Publishing**, Duxford (2017).
- [25] He, X., Ding, Y., Lei, Z., Welch, S., Zhang, W., Dunn, M., Yu, K., “3D printing of continuous fiber-reinforced thermoset composites”, **Addit. Manuf.**,40: 101921 (2021).
- [26] Pappas, J.M., Thakur, A.R., Leu, M.C. et al. “A parametric study and characterization of additively manufactured continuous carbon fiber reinforced composites for high-speed 3D printing”, **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 113:2137–2151 (2021).
- [27] Qiao, J., Li, Y. And Li, L., “Ultrasound-assisted 3D printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic (FRTP) composites”, **Addit. Manuf.**, 30: 100926 (2019).
- [28] Blok, L.G., Longana, M.L., Yu, H. And Woods, B.K.S., “An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites”, **Addit. Manuf.**, 22:176-186 (2018).
- [29] Hu, Q., Duan, Y., Zhang, H. et al. “Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament”, **J. Mater. Sci.**, 53:1887–1898 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Mohamad Diaa TALEB 2011 yılında Damascus Üniversitesi Makine Mühendisliğini bitirdi. İyi derecede İngilizce ve Türkçe konuşmaktadır. Akgül makinede tasarımcı olarak çalışmaktadır.