



# 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Biyouyumlu AFO'ların Mekanik Analizi

## Mechanical Analysis of 3D Printed Biocomposite AFOs

Bahadır BOZKURT<sup>1</sup>, M. Hüsnü DİRİKOLU<sup>2</sup>

BB: [0000-0002-8308-4929](https://orcid.org/0000-0002-8308-4929) MHD: [0000-0001-6279-2283](https://orcid.org/0000-0001-6279-2283)

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Enerji Mekaniği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

### Öz

**Amaç:** Geleneksel ortez üretim malzemelerine göre üstün nitelikli malzemelerle, kişiye özel Ayak-Ayak Bileği Ortesi (AFO) üreterek çekme dayanım analizinin gerçekleştirilmesi ve geleneksel AFO'lar ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

**Yöntem:** İlk olarak geleneksel AFO malzemeleri çekme testine tabii tutulmuştur. Test bilgileri ışığında benzer çekme dayanımı gösteren malzemeler araştırılmış ve farklı karışım oranlarıyla Polilaktik asit (PLA) / Polikaprolakton (PCL) karışımı biyokompozit filamentler elde edilmiştir. Filamentlerden 3 boyutlu (3B) yazıcı ile mekanik test çubukları üretilmiştir. Üretilen çubuklara çekme testi uygulanmıştır. Test çubuklarından elde edilen bilgiler ışığında filamentlerden AFO üretimi yapılmış ve AFO'lara özel deney düzeneği hazırlanmıştır ve mekanik analiz yapılmıştır. Yapılan deneyler ile sonlu eleman analizinde (SEA) elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Bulgular:** Geleneksel AFO'larda yaygın olarak kullanılan polipropilen (PP) malzemelerinin mekanik analizi ile elde edilen çekme dayanımı 22,6 MPa olarak ölçülmüştür. Biyouyumlu olduğu bilinen malzemelerin belirli oranları ile karışım yapılarak imal edilen malzemeler ise; 43,2-27,6 MPa çekme dayanımı ile geleneksel AFO'lara oranla daha yüksek çekme dayanımı göstermektedir. Ayrıca, biyouyumlu olan bu malzemeler doğaya zarar vermedikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle de avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle; oluşturulan AFO malzemelerinin hem yüksek çekme dayanımı hem de yeşil dönüşüm anlamında endüstriyel AFO malzemelerine üstünlük sağladığı görülmüştür.

**Sonuç:** PLA/PCL karışımı filamentlerden üretilen AFO'ların, geleneksel üretim AFO'lara göre daha yüksek çekme dayanımı sağladığı görülmüştür. Bu malzemelerden yapılan AFO'lar aynı zamanda biyouyumlu ve benzer çekme dayanımı için geleneksel yöntemlerle üretilen AFO'lara göre daha hafif yapıların oluşmasına imkân tanımaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** biyokompozit, ayak-ayak bileği ortezi, AFO, eklemeli imalat, mekanik analiz

### Abstract

**Aim:** The aim is to produce custom Ankle Foot Orthoses (AFO) with biocompatible materials compared to traditional orthotic manufacturing materials, perform tensile strength analysis, and compare them with traditional AFOs.

**Methods:** Initially, traditional AFO materials were subjected to a tensile test. Following the test information, materials demonstrating similar tensile strength were researched, and biocomposite filaments with different mixture ratios of Polylactic acid (PLA) / Polycaprolactone (PCL) were obtained. Mechanical test specimens were produced from the filaments using a 3-dimensional printer. A tensile test was applied to the produced specimens. Based on the information obtained from the test specimens, AFO production was carried out using the filaments; a special experimental setup for the AFOs was prepared, and mechanical analysis was conducted. The results obtained from the experiments were compared with those from the finite element analysis (FEA).

**Results:** The biocomposite materials known as biocompatible have not only achieved a tensile strength of 43.2-27.6 MPa, surpassing the 22.6 MPa tensile strength obtained from the mechanical analysis of polypropylene materials commonly used in traditional AFOs, but they have also demonstrated superiority over industrial AFO materials by offering higher tensile strength while being environmentally respectful.

**Results:** The tensile strength obtained by mechanical analysis of polypropylene (PP) materials commonly used in traditional AFOs was measured as 22.6 MPa. The materials manufactured by mixing with certain ratios of materials known to be biocompatible show higher tensile strength compared to traditional AFOs with a tensile strength of 43.2-27.6 MPa. In addition, these biocompatible materials are also advantageous because they are environmentally friendly and do not harm nature. Therefore, it was observed that the created AFO materials are superior to industrial AFO materials in terms of both high tensile strength and green transformation.

**Conclusion:** The AFOs produced from PLA/PCL blend filaments have been observed to provide higher tensile strength than traditional manufacturing AFOs. These materials also allow for the creation of biocompatible lighter structures and offer similar tensile strength to those produced by conventional methods.

**Keywords:** biocomposite, ankle-foot orthosis, AFO, additive manufacturing, mechanical analysis



## Giriş

Modern tıp ve mühendislik disiplinleri, sağlık hizmetlerinin geliştirilmesi ve hastaların yaşam kalitesinin artırılması amacıyla çeşitli alanlarda kesişen yenilikçi araştırmalara öncülük etmektedir. Bu bağlamda; biyoyumlu malzemeler ve eklemeli imalat teknolojisi, hem mühendislik hem de sağlık sektöründe heyecan verici bir potansiyele sahiptir (1,2). Bu çalışma, yenilikçi yaklaşımları bir araya getirerek, biyoyumlu özellikli biyokompozitlerin ortez üretimindeki potansiyelini keşfetmeyi amaçlamıştır.

Ortezler; nöromüsküler rahatsızlıklar, sakatlıklar veya hastalıklar sonucu oluşan hareket kısıtlamalarını hafifletmek veya düzeltmek amacıyla kullanılan medikal destek cihazlarıdır. Geleneksel ortezler, genellikle standart boyutlarda üretilmekte ve farklı anatomik yapı ve ihtiyaçları karşılamakta sınırlılıklar göstermektedir (3). Bunun yanı sıra, geleneksel ortezler genellikle kullanım sonrası geri dönüştürülemediğinden çevreye zarar veren atıklara dönüşmektedir (4).

Son yıllarda, 3B yazıcılar ve eklemeli imalat yöntemleriyle (EİY) biyoyumlu biyokompozitlerin ortez üretiminde kullanımı, önemli bir araştırma alanı olmuştur. Bu yöntem, özellikle ortezlerin kişiye özel tasarımını ve üretimini mümkün kıldığından, farklı anatomik yapıların gereksinimlerini ve kullanıcı ihtiyaçlarını daha iyi karşılayabilme imkânı yaratmaktadır (5,6). Özellikle PLA ve PCL gibi biyoyumlu malzemeler kullanılarak, ortezlerin çevreye verebileceği olumsuz etkilerin azaltılması; yeşil dönüşüm ve sürdürülebilir üretim süreçlerine katkıda bulunması açısından büyük bir potansiyele sahiptir (7-9).

Bu perspektif, ortezlerin geleneksel üretiminden, EİY ve biyoyumlu malzemelerin sunduğu potansiyele doğru bir dönüşümü vurgularken, kullanıcı odaklı ta-

sarımın ve rehabilitasyonun önemini öne çıkarmaktadır.

Bu makale, biyoyumlu malzemelerle EİY kullanılarak üretilen bir AFO tasarımı oluşturulmasını ele almaktadır. Bu bağlamda PLA ve PCL malzemeleri farklı oranlarda karıştırılarak farklı özelliklerde filamentler üretilmiştir. Elde edilen biyokompozit filamentlerden üretilen AFO'ların mekanik özelliklerinin incelenmesiyle, sürdürülebilir ve kullanıcı odaklı bir AFO malzemesi elde edilmiştir. Biyoyumlu malzeme karışımlarının farklı oranlarının AFO'ların mekanik performansına etkisi ölçülerek, en uygun malzeme karışımı belirlenmiştir.

## Yöntem

Çalışmada ilk olarak geleneksel yöntemlerle üretilen AFO malzemeleri kimyasal, termal ve mekanik olarak karakterize edilmiştir.

Elde edilen bulgular üzerinden yapılan literatür araştırması kapsamında; biyoyumlu olduğu bilinen, **çekme dayanımı** olarak geleneksel AFO'larda kullanılan malzemelere benzer ve Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisi ile 3B baskı alınabilen malzemeler araştırılmıştır. Çalışmanın odak noktası olan yüksek **çekme dayanımının yanında biyoyumluluk** özelliklerini taşıyan PLA ve PCL malzemeleri imalat malzemesi olarak belirlenmiştir (10-13).

**Üç farklı kompozisyon birbiri içerisinde çözünerek karıştırılmış ve ekstrüder** ile 3B yazıcılarda kullanılabilen filamentler haline getirilmiştir. Bu yeni malzemelerin kütlece karışım oranları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Çekme dayanımını belirlemek maksadı ile American Society for Testing and Materials (ASTM)'nin

**Tablo 2.1.** Karışımların Kütlece Oranı

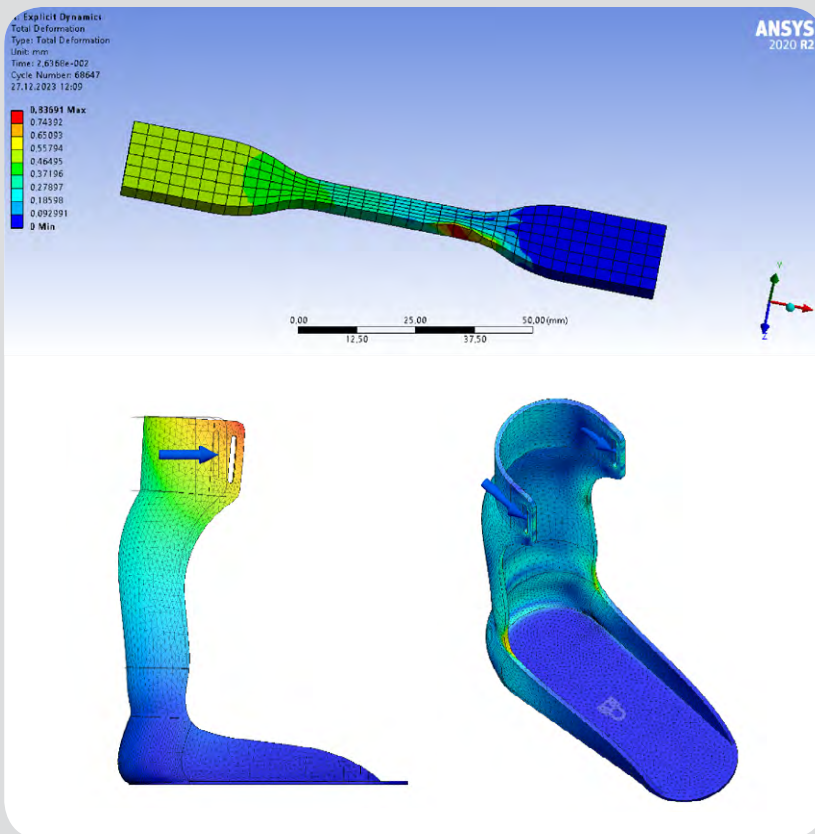
|      | Kütlece PLA (%) | Kütlece PCL (%) |
|------|-----------------|-----------------|
| P100 | 100             | -               |
| P95  | 95              | 5               |
| P92  | 92,5            | 7,5             |
| P90  | 90              | 10              |



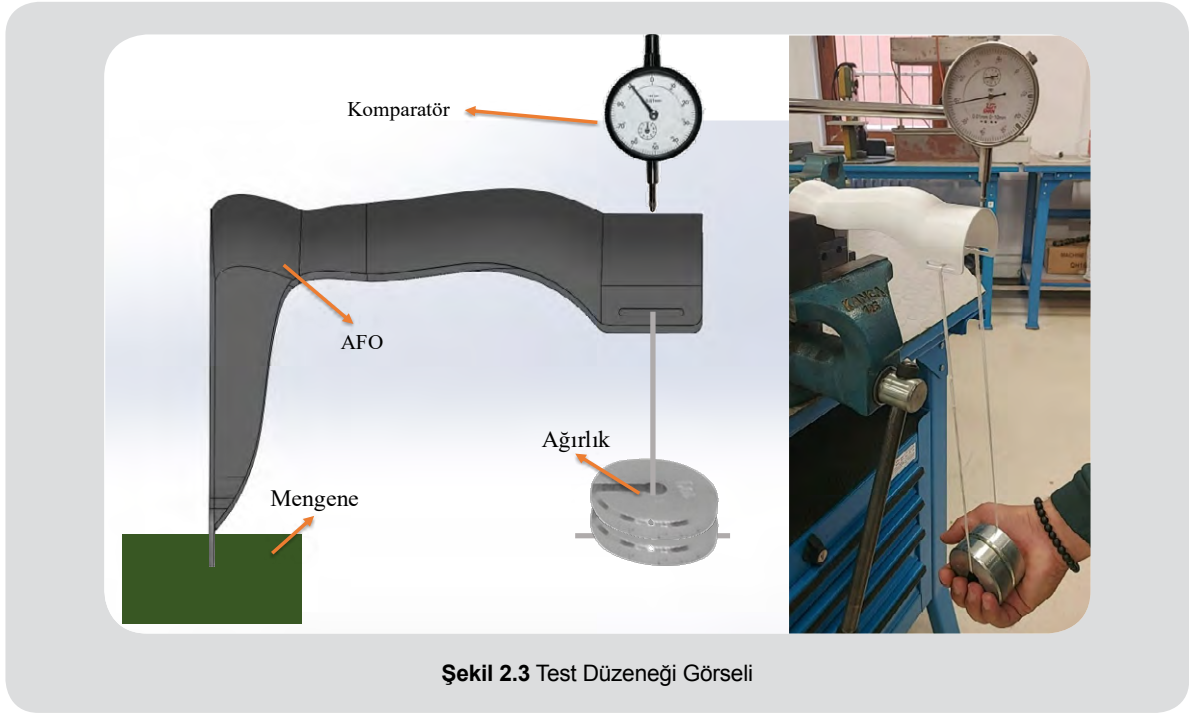
Şekil 2.1 ASTM D638 Tip 4 Göre Basılan Mekanik Test Çubukları

Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638) test yöntemi uygulanmıştır. ASTM D638 standardında yer alan tip 4 modeli basım için re-

ferans alınmıştır. 3B yazıcıda, elde edilen filamentler kullanılarak %100 dolgu oranına sahip test çubukları 3'er adet olmak üzere üretilmiştir (Şekil 2.1) (14).



Şekil 2.2 SEA Sonuçları



Şekil 2.3 Test Düzeneği Görseli

Test çubukları üzerinden yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen veriler, AFO tasarımında kullanılan malzemelerin dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. Bu veriler, Sonlu Eleman Analizi (SEA) yöntemi kullanılarak tasarlanan AFO'nun mekanik performansının öngörülmesi için temel oluşturmuştur (Şekil 2.2).

SEA analizi sonuçları ile üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilen AFO tasarımı, referans AFO modeli olarak alınmıştır. Üretilen filamentler kullanılarak referans AFO modelinin 3B yazıcıdan baskıları alınmıştır. Malzeme türüne bağlı olarak, 3'er adet baskı alınan prototipler deneysel testlere tabii tutulmuştur. Literatür araştırması dahilinde özel olarak tasarlanan test düzeneği sayesinde (15,16); AFO'ya uygulanan yükler altında yapılan yer değiştirme testleri, tasarlanan AFO'nun dayanıklılığını ve gerçek kullanım koşullarında nasıl davrandığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.3).

Metodoloji; malzeme karakterizasyonu, analitik modelleme ve deneysel testlerin birleştirilmesiyle AFO tasarımının hem teorik hem de pratik açıdan incelenmesini sağlamıştır. Bu sayede, mekanik özelliklerin belirlenmesi ve tasarımın gerçek dünya uygulamalarına uygunluğu arasındaki bağlantıyı ortaya koymaktadır. Gerçek dünya uygulamaları literatürde incelenmiş ve çalışmalarındaki yürüme analizlerinde ortaya çıkan yükler referans alın-

mıştır

### 2.1. Araştırmanın Soruları/Hipotezi

Çalışmanın odaklandığı soru/hipotez;

PLA ve PLC karışımlarının değişen oranları, 3B yazıcılarla üretilen AFO'ların çekme dayanımını nasıl etkilemektedir? Bu karışımlardan imal edilen AFO'lar ile geleneksel AFO'lar arasında ne tür farklılıklar oluşmaktadır? PLA ve PLC karışımlarının malzeme oranlarının değişimi, AFO tasarımındaki geometrik özellikler üzerinde hangi etkileri beraberinde getirir?

Hipotez: Biyoyumlu malzemelerin farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen filamentlerden EİY yöntemi ile imal edilen AFO'ların çekme dayanımı, geleneksel ortezlerin mekanik özellikleri ile rekabet edecek düzeyde yeterlidir.

### 2.2. Araştırmanın Evren ve Örneklemi

Araştırmanın evreni, çeşitli malzeme ve malzeme karışımları ile üretilen AFO'lardır. Evren, çeşitli malzeme karışımlarından oluşan geleneksel ve yeni nesil AFO'ları kapsamaktadır.

Araştırmanın örnekleme, PLA ve PCL malzemelerinin farklı oranlardaki karışımlarını içeren biyoyumlu mal-

zemelerle 3B yazıcılarla üretilen yeni nesil AFO'lar ve kıyaslama amacıyla kullanılan geleneksel AFO'lardır.

Özellikle yeni nesil AFO'lar için belirlenen farklı PLA ve PCL karışım oranlarında (%95, %92,5 ve %90) üretilen filamentlerden elde edilen test çubukları ve sonrasında üretilen AFO prototiplerinden oluşmaktadır. Örnekleme, özellikle ASTM D638 standardının tip 4 modeline göre üretilen test çubuklarını ve SEA analizi için tasarlanan AFO prototiplerini kapsamaktadır.

Araştırmanın evreni, geleneksel ve yeni nesil AFO'ların mekanik özellikleri üzerine odaklanırken, örnekleme PLA ve PCL malzeme karışımlarından 3B yazıcılarla üretilmiş test çubukları ve AFO prototipleri yer almaktadır. Bu örnekleme dayalı olarak elde edilen veriler, bu biyouyumluluğu bilinen malzemelerin AFO'larda kullanıma uygunluğunu değerlendirmek amacıyla deneysel testlerde kullanılmıştır.

Üretilen test çubukları;

P100: Kütlece %100 PLA, %0 PCL,

P95: Kütlece %95 PLA, %5 PCL ,

P92: Kütlece %92,5 PLA, %7,5 PCL,

P90: Kütlece %90 PLA, %10 PCL oranlarında üretilen filamentlerden EİY ile elde edilmiştir.

Baskı öncesi SEA üzerinden gerçekleştirilen çekme test sonuçları ise;

P100S: P100 filamenti ile üretilen

P95S: P95 filamenti ile üretilen

P92S: P92 filamenti ile üretilen

P90S: P90 filamenti ile üretilen test çubuklarını ifade etmektedir.

### 2.3. Verilerin Toplanması ve Veri Araçları

Geleneksel ortezlerde kullanılan malzemelere ait veriler Sağlık Bakanlığı'na bağlı Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu (TİTCK) tarafından onaylı ortez üretici firmalardan elde edilen numunelerden elde edilmiştir. Makale için gerekli olan diğer tüm malzemelere uygulanan kimyasal, termal ve mekanik karakterizasyon verileri YÖK onaylı İstanbul Arel Üniversitesi Polimer ve Kompozit Teknoloji Araştırma Merkezi tarafından sağlanmıştır.

Veri araçları olarak; malzeme karakterizasyonu için polimerlere özelleşmiş Fourier Dönüşümlü Kızılötesi

Spektrometresi (FTIR) ile analizinden yararlanılmıştır.

Termal karakterizasyon: diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazında analiz edilmiştir. Bu aşamada numunelerin ekstrüderde üretilmesi ve 3B yazıcıda doğru sıcaklıkta basım yapılabilmesi için erime ( $T_c$ ) ve camsı geçiş ( $T_g$ ) sıcaklıklarının bilinmesi hedeflenmektedir.

Mekanik karakterizasyon için; belirlenen farklı PLA ve PCL oranlarında üretilen filamentlerden ASTM D638 standardının tip 4 modeline göre 3B yazıcı ile test çubukları üretilmiştir. Sonrasında üretilen AFO prototiplerine özel deney düzeneği tasarlanmış ve AFO üzerine uygulanan kuvvet ile yer değiştirme oranı saptanarak test çubukları ve SEA sonuçları ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

### 2.4. Araştırmanın Etik Yönü

Bu araştırma; etik kurul onayına konu olacak anket, mülakat, odak grup çalışması, gözlem, deney, görüşme teknikleri kullanılarak katılımcılardan veri toplamasını gerektiren bir unsur içermediğinden etik kurul onayına gerek duyulmamaktadır.

### 2.5. Araştırmanın Sınırlılıkları

Çalışmanın sınırlılıkları arasında, üretimi yapılan AFO'larda kullanılan malzemelerin belirli koşullar altında laboratuvarında elde edilen sonuçları vermesi ve gerçek hayatta kullanıma dair bilgi vermemesi sayılabilir. Örneğin, kullanılan biyouyumlu malzeme karışımlarının çevresel faktörler altında nasıl davranacağı gibi değişkenler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca; kullanılan ölçüm araçlarının hassasiyeti ve ölçüm koşullarının standartlaştırılmasına karşın ortezlerin kişiye özgü olmasından ötürü, kurulan deneysel düzenekler doğru ölçüm alamayabilir. Dolayısıyla bu gibi teknik faktörler de sonuçların yorumlanmasını etkileyebilir. Bununla birlikte, çalışma kapsamında belirli hastalık grupları veya rehabilitasyon süreçleri üzerine daha spesifik bir odaklanma yapılmamış olması da bir sınırlılık olarak değerlendirilmektedir.

Araştırmada kullanılan tüm ölçüler, ölçüleri standartlaştırılmış bir cansız bir model üzerinden gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla gerçek hayattaki ön görülemeyen olgular ortaya çıkabilmektedir.

Tablo 2.2 Çekme Testi Sonuçları

| PP                   | P100                 | P95                  | P92                  | P90                  |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Çekme Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) |
| 22,6 ± 0,6           | 43,2 ± 1,1           | 39,2 ± 0,7           | 35,3 ± 1,4           | 27,4 ± 2,6           |

Makalede yapılan tüm SEA ve mekanik analizler statik olarak test edilmiştir. Ancak AFO'lar kullanım süreleri boyunca dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla kullanım ömürleri açısından ön görülen değerler sınırlı kalmaktadır.

#### 2.6. Verilerin Analizi ve Değerlendirilmesi

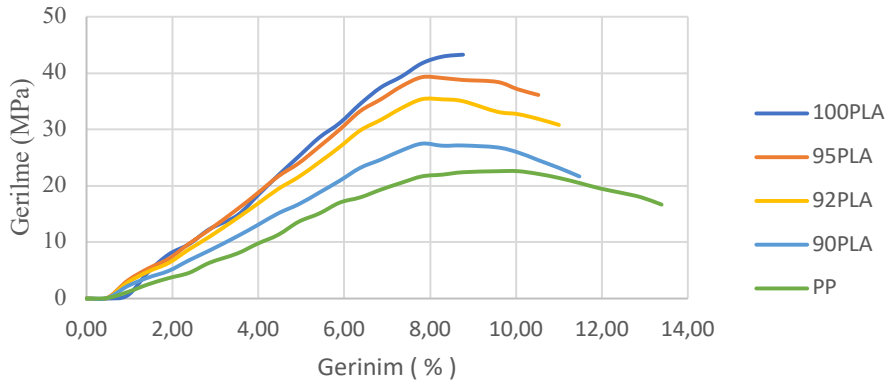
Çalışmanın analizi, PLA/PCL karışımlarının farklı oranlarının AFO'ların çekme dayanımına etkisini değerlendirmeye odaklanmaktadır. Elde edilen veriler; malzeme karakterizasyonu, termal analizler ve mekanik testler yoluyla toplanmış ve test çubukları ve AFO prototipleri üzerinde yapılan deneylerle desteklenmiştir. Bulgular, belirlenen PLA/PCL oranlarının, AFO'lardan belirlenen çekme dayanımı özelliklerini sağlamada kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, biyoyumumluluğu bilinen malzemelerin özellikle nöromüsküler rehabilitasyon süreçlerinde potansiyel olarak kullanılabilirliğini işaret etmektedir.

Bu bağlamda, elde edilen verilerin klinik uygulamalara ve hastaların iyileşme süreçlerine olan etkilerini daha derinlemesine anlamak için ileri çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, belirlenen malzeme oranlarının dışındaki değişkenlerin, örneğin kullanım koşulları veya ortez tasarımı gibi faktörlerin AFO'ların performansı üzerindeki etkilerinin daha detaylı incelenmesi önemlidir.

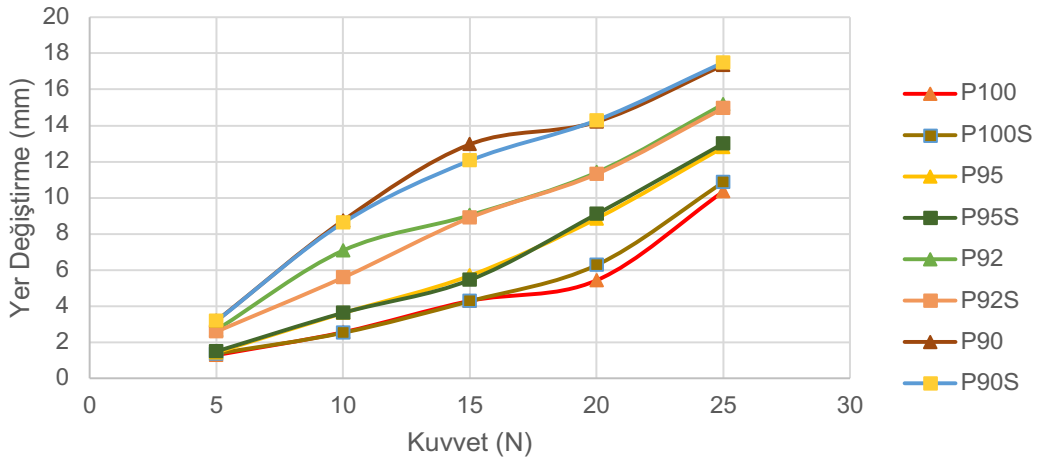
#### Bulgular

Geleneksel AFO'lardan elde edilen numuneler ile yapılan kimyasal karakterizasyon ile ürünlerin (PP) olduğu tespit edilmiştir. Çekme testi analiz sonucunda ulaşılan test çubuklarının çekme dayanımı sonuçları Tablo 2.2 ve Şekil 2.4'te verilmiştir.

Farklı karışım oranlarına sahip filamentlerden üretilen mekanik test çubuklarına uygulanan test sonuçları; geleneksel olarak üretimi gerçekleştirilen



Şekil 2.4 Gerilme – Gerinim Grafiği



Şekil 2.5 Kuvvete Bağlı Yer Değişirme

AFO'larda belirlenen 22,6 MPa çekme dayanımını tüm örneklerin (43,2 – 27,4 MPa) sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, PCL/PLA karışımlarının %100 PLA kompozisyonuna göre AFO'larda sünekliliği artırma potansiyeli olduğu gözlemlenmiştir.

Mekanik test çubuklarından elde edilen veriler SEA programına özel malzeme olarak tanımlanmıştır. Sonrasında tasarlanan AFO özel olarak dizayn edilen deney düzeneği ile simüle edilmiştir. Farklı karışım oranlarına sahip filamentlerden üretilen AFO'lara uygulanan kuvvete bağlı yer değiştirmeler (P100, P95, P92, P90) ve baskı öncesi SEA sonuçları (P100S, P95S, P92S, P90S) ile gerçekleştirilen uygulama Şekil 2.5'te verilmiştir.

Termal analizler; bu karışımların  $T_c$  ve  $T_g$  sıcaklıklarının, üretim süreçlerindeki kritik aşamaları belirlemede yardımcı olduğunu ortaya koymuştur. DSC testleri, belirli sıcaklık aralıklarında malzemenin imalat sürecin-

de önemli veriler sağlamıştır (Tablo 2.3). Analiz sonucunda elde edilen veriler ile baskı alımı sağlanmıştır.

#### Tartışma

Çalışmanın bulguları, belirli oranlardaki PLA/PCL karışımlarının, 3B yazıcılarla üretilen AFO'ların mekanik performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. PLA/PCL karışımlarının, AFO'larda istenilen çekme dayanımı seviyelerini sağlama potansiyeline sahip olduğu görülmüştür. Ancak bu karışımların farklı sıcaklıklardaki esneklik ve dayanımları gibi başka mekanik özelliklerinin de irdelenmesi gerekmektedir.

Termal karakterizasyon çalışmaları, malzeme karışımlarının  $T_c$  ve  $T_g$  belirlenmesinde etkin rol oynadığı görülmüştür. Bu sıcaklıklarının 3B yazıcıda basım sıcaklıklarının belirlenmesinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. DSC'den alınan sıcaklık değerleri

Tablo 2.3 Biyokompozitlerin  $T_c$  ve  $T_g$  sıcaklıklarının

| Numune Kodu | $T_g$  | $T_c$   |
|-------------|--------|---------|
| 100PLA      | 59,932 | 178,849 |
| 95PLA       | 59,246 | 178,380 |
| 92PLA       | 58,889 | 177,501 |
| 90PLA       | 58,321 | 177,156 |

ile 3B yazıcı sıcaklık değerli değişkenlik gösterebilmektedir (11).

Çalışmanın sınırlılıkları; filamentleri oluştururken kullanılan belirli malzeme oranları dışındaki değişkenlerin, üretim koşulları ve ortez tasarımı gibi faktörlerin AFO'ların performansı üzerindeki etkilerini belirleme açısından önemli bir perspektif sunmaktadır. Bu sınırlılıkların dikte alınması, çalışmanın bulgularının geniş ölçekli üretim süreçlerine nasıl yansıtılabileceğinin daha iyi anlaşılmasına olanak sağlayabilir.

### Sonuç

Bu çalışma, biyoyumlu olduğu bilinen malzemelerden olan PLA ve PCL karışımlarından imal edilen filamentlerin 3B yazıcılarla üretilen AFO'ların çekme dayanımı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini amaçlamıştır. Yapılan mekanik testler ile PLA/PCL karışımlarının farklı oranlarda kullanılmasının AFO'ların çekme dayanımı üzerinde kritik bir rol oynadığı ve geleneksel AFO malzemelerinin gösterdiği çekme dayanımına (22,6 MPa) göre üstünlük sağladığı tespit edilmiştir.

Öte yandan; farklı karışım oranlarına sahip biyoyumlu filamentlerden üretilen AFO'lar, geleneksel AFO'lardan beklenen çekme mukavemeti seviyelerini sağlarken; aynı zamanda hafiflik ve daha hızlı kişiselleştirilebilirlik ve özelleştirilebilirlik gibi üstün özellikler de sunmaktadır. Ayrıca PLA/PCL karışımı filamentlerden EİY ile üretilen AFO'lar, geleneksel AFO'lara göre tedavi yöntemlerine daha uygun(17), ilaç salınımını mümkün kılan(9) ve çevresel etkileri azaltılmış bir kullanım sağlamaktadır(7).

Çalışmanın sınırlılıkları; filament üretiminde belirli malzeme oranları kullanımı dışındaki değişkenlerin, üretim koşulları ve ortez tasarımı gibi faktörlerin AFO'ların performansı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu sınırlılıklar, gelecekteki çalışmaların daha spesifik ve geniş kapsamlı bir şekilde tasarlanması gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak; bu çalışma, farklı oranlarda karışımı yapılan PLA/PCL biyoyumlu malzemelerinin AFO tasarımında ve üretiminde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Gelecekteki araştırmaların daha kapsamlı çalışmalarla; farklı malzeme kombinasyonlarının yanı sıra, üretim süreçlerindeki değişkenleri de göz önünde bulunduracak şekilde planlanmasıyla bu alandaki bilgi birikimini genişletebileceği düşünülmektedir.

Received/Geliş Tarihi: 29.12.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 20.01.2024

### Kaynaklar

1. R.K. Chen, Y. an Jin, J. Wensman, A. Shih, Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses-A review, *Additive Manufacturing*, 12 (2016) 77-89. doi:10.1016/J.ADDMA.2016.04.002.
2. Y.A. Jin, J. Platt, R. Chen, J. Wensman, A. Shih, Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses – A Review, *Procedia CIRP*, 36 (2015) 199-204. doi:10.1016/J.PROCIR.2015.02.125.
3. M. Muthusamy, S. Safae, R.K. Chen, Additive Manufacturing of Overhang Structures Using Moisture-Cured Silicone with Support Material, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2018, Vol. 2, Page 24. 2 (2018) 24. doi:10.3390/JMMP2020024.
4. B. Braun, I.C. Roşca, I. Şerban, D. Tibrea, LOW-COST ORTHOPEDIC SHOES BASED ON RECYCLED MATERIALS: MANUFACTURING, PLANTAR CORRECTION EVALUATION, 17 (2018) 1773-1780. <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/http://www.eemj.eu> (erişim 26 Aralık 2023).
5. H. Kalita, D. Zindani, Design, Development, and Optimization of Bio-mechatronic Engineering Products, 2019. doi:10.4018/978-1-5225-8235-9.ch009.
6. B. BOZKURT, M.H. DİRİKOLU, S. DİLİBAL, Y.M. ŞAHİN, Biyomedikal Amaçlı Soğutucuların Tasarımında Termoelektrik Malzemelerin Kullanımına Yönelik Verimlilik Analizi, içinde: İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi 8. Bilim Günleri Kongresi, İstanbul, 2022: s. 73.
7. M. Abedalwafa, F. Wang, L. Wang, C.L.-Rev.Adv.Mater. Sci, undefined 2013, Biodegradable poly-epsilon-caprolactone (PCL) for tissue engineering applications: A review, *academia.edu*. (t.y). [https://www.academia.edu/download/43018200/02\\_23413\\_abedalwafa.pdf](https://www.academia.edu/download/43018200/02_23413_abedalwafa.pdf) (erişim 04 Aralık 2023).
8. N.I.A. Razak, N.A. Ibrahim, N. Zainuddin, M. Rayung, W.Z. Saad, The influence of chemical surface modification of kenaf fiber using hydrogen peroxide on the mechanical properties of biodegradable kenaf fiber/poly(lactic acid) composites, *Molecules* (Basel, Switzerland), 19 (2014) 2957-2968. doi:10.3390/MOLECULES19032957.
9. P.K. Bajpai, *Ceramics: a novel device for sustained long term delivery of drugs*, *Bioceramics*, 3 (1992) 87-99.
10. F. Aynali, H. Balcı, E. Doganci, E. Bulus, Production and characterization of non-leaching antimicrobial and hydrophilic polycaprolactone based nanofiber mats, *European Polymer Journal*, 149 (2021) 110368. doi:10.1016/J.EURPOLY-MJ.2021.110368.
11. E. Åkerlund, A. Diez-Escudero, A. Grzeszczak, C. Persson, The Effect of PCL Addition on 3D-Printable PLA/HA Composite Filaments for the Treatment of Bone Defects, *Polymers*, 14 (2022) 3305. doi:10.3390/POLYM14163305/S1.
12. E. Bulus, D. Ismik, D.S. Mansuro lu, M.S. Findiko lu, B. Bozkurt, Y.M. Şahin, E. Do anci, M.D. Do anci, G. Sakarya, Electrohydrodynamic atomization (EHDA) technique for the health sector of polylactic acid (PLA) nanoparticles,



- 2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics and Biomedical Engineering and Computer Science, EBBT 2019. (2019). doi:10.1109/EBBT.2019.8742004.
13. S.N. SAHIN, E. BULUS, D.S. MANSUROGLU, B. BOZKURT, A. KORKUT, Y.M. SAHIN, Production And Characterization of Composite Scaffolds By Electrosinning Technique From Bioceramics Synthesized From Seashells, 7 th ICNTC BOOK OF ABSTRACTS. (2021) 43-44.
  14. J.J. Laureto, J.M. Pearce, Anisotropic mechanical property variance between ASTM D638-14 type i and type iv fused filament fabricated specimens, Polymer Testing. 68 (2018) 294-301. doi:10.1016/j.POLYMERTESTING.2018.04.029.
  15. T. Kobayashi, A.K.L. Leung, S.W. Hutchins, Techniques to measure rigidity of ankle-foot orthosis: a review, Journal of Rehabilitation Research and Development. 48 (2011) 565-576. doi:10.1682/JRRD.2010.10.0193.
  16. H.K. SÜRMEEN, Spina bifida hastalığı olan çocuklar için ayak-ayak bileği ortezi tasarımı, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, 2016.
  17. B.S. Roman, S. Espuelas, S. Gómez, C. Gamazo, M.L. Sanz, M. Ferrer, J.M. Irache, Intradermal immunization with ovalbumin-loaded poly-ε-caprolactone micro-particles conferred protection in ovalbumin-sensitized allergic mice, Clinical & Experimental Allergy. 37 (2007) 287-295. doi:10.1111/j.1365-2222.2007.02654.x.