



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POLİ (LAKTİK ASİT) (PLA)'NİN ZAMANA VE SICAKLIĞA BAĞLI
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan Alper YAPICI

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222304714 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Ramazan Alper YAPICI tarafından hazırlanan “**POLİ (LAKTİK ASİT) (PLA)’NİN ZAMANA VE SICAKLIĞA BAĞLI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamızda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Ramazan Alper YAPICI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve gerektiğinde bilgi ve deneyimlerini paylaşan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ'ye ve maddi, manevi her anlamda yanımda olup bugünlere gelmemde en büyük desteği sağlayan kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ramazan Alper YAPICI

AKSARAY, 2024



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOT	10
2.1 DeneySEL Prosedür	18
2.1.1. Malzeme temini ve hazırlık	19
2.1.2. Mekanik testler	19
2.1.3. Test yöntemleri	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	26
3.1. PLA'nın Tek Eksenli Yükleme ve Sabit Gerinim Seviyesinde Gevşeme Davranışı	26
3.1.1. Tek eksenli çekme testleri:	26
3.1.2. Tek eksenli çekme, yükleme-gevşeme testi:	26
3.2 Test Süreci ve Ölçüm Yöntemleri	27
3.3 Tek Eksenli Çekme-Gevşeme Testleri	28
3.4 Temel Eğrilerin Oluşturulması	31
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	40
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ.....	52

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİ (LAKTİK ASİT) (PLA)'NİN ZAMANA VE SICAKLIĞA BAĞLI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Ramazan Alper YAPICI

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ÖZET

Bu çalışma, Poli (Laktik Asit) (PLA) ve Poli (Laktik Asit) (PLA)/Hidroksiapatit (HA) nanokompozitinin farklı sıcaklıklardaki gerilme gevşemesi davranışı ile temel eğrilerinin oluşturulmasına odaklanmaktadır. PLA, biyobozunur ve biyouyumlu özellikleri sayesinde biyomedikal uygulamalarda, özellikle kırık onarımı, girişim vidaları, dikiş çapaları ve menisküs onarımında yaygın olarak kullanılan bir polimerdir. PLA'nın mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla hidroksiapatit takviye malzemesi olarak eklenmiştir. Bu çalışmada, PLA/HA nanokompozitinin gerinim gevşemesi üzerine sıcaklık etkisi ve temel eğrisinin oluşturulması incelenmiştir. Tek eksenli çekme testleri 23, 30, 35, 40, 45, 50 ve 55 °C sıcaklıklarında 1 mm/dak hızda uygulanmış ve numuneler %1.5 gerinim seviyesine kadar yüklenmiş, ardından 20 dakika süresince gerinim gevşemesi testi yapılmıştır. Elde edilen gevşeme test verileri kullanılarak, sırasıyla 23 °C, 40 °C ve 55 °C'deki veriler referans alınarak PLA ve PLA-HA kompozit için temel eğriler oluşturulmuş ve geçiş faktörleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Poli (Laktik Asit) (PLA), Poli (Laktik Asit) (PLA)/Hidroksiapatit (HA) nanokompozit, Gerilme Gevşemesi, Temel Eğri, Geçiş Faktörü.

Kasım, 2024; 52 sayfa

M.Sc. THESIS

CHARACTERIZATION OF THE TIME AND TEMPERATUREDEPENDENT MECHANICAL PROPERTIES OF POLY (LACTIC ACID) (PLA)

Ramazan Alper YAPICI

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Necmi DÜŞÜNCELİ

ABSTRACT

This study examines the stress relaxation behavior and master curve generation of Poly (Lactic Acid) (PLA) and Poly (Lactic Acid) (PLA)/Hydroxyapatite (HA) nanocomposites across various temperatures. PLA is a biodegradable and biocompatible polymer commonly used in biomedical applications, including fracture repair, interference screws, suture anchors, and meniscus repair. Hydroxyapatite serves as a reinforcement to enhance PLA's mechanical properties. The study investigates the impact of temperature on strain relaxation in PLA/HA nanocomposites and the creation of a master curve. Uniaxial tensile tests were performed at temperatures of 23, 30, 35, 40, 45, 50, and 55 °C at a loading rate of 1 mm/min, with samples loaded to a strain level of 1.5%. A 20-minute strain relaxation test was then applied at this strain level. Using the obtained relaxation data, master curves for PLA and PLA-HA composites were constructed by referencing data at various temperatures (23 °C, 40 °C, and 55 °C) and comparing shift factors.

Keywords: Poly(Lactic Acid) (PLA), Poly(Lactic Acid) (PLA)/Hydroxyapatite (HA) Nanocomposite, Stress Relaxation, Master Curve, Shift Factor.

November, 2024; 52 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. PLA'nın farklı gerinimlerde yapısal değişimi	8
Şekil 2.1. PLA nanokompozitleri içeren çeşitli uygulamaların şematik gösterimi....	13
Şekil 2.2. Kemik rejenerasyonu için PLA/n-HA iskeletlerinin hazırlanması ve uygulanmasına dair şematik gösterim	15
Şekil 2.3. Instron 3366 Çekme Test Cihazı	21
Şekil 2.4. Ölçümler	21
Şekil 2.5. Test numuneleri	22
Şekil 3.1. PLA için Gerilim (σ) - Gerinim (ϵ) grafiği, farklı sıcaklıklardaki yükleme testlerini gösterir.	30
Şekil 3.2. PLA için Gerilim (σ) - Zaman (t) grafiği, her sıcaklık için gevşeme sürecindeki gerilme değişimlerini gösterir.	30
Şekil 3.3. PLA-HA için Gerilim (σ) - Gerinim (ϵ) grafiği, farklı sıcaklıklardaki yükleme testlerini gösterir.	31
Şekil 3.4. PLA-HA Gerilim (σ) - Zaman (t) grafiği, her sıcaklık için gevşeme sürecindeki gerilme değişimlerini gösterir.	31
Şekil 3.5. Tipik sünme ve gevşeme eğrileri. Viskoelastik özellikleri belirlemek üzere uygulanırlar.....	34
Şekil 3.6. Polibütadine ait örnek bir temel eğri	35
Şekil 3.7. PLA için değişik referans sıcaklıklarında meydana getirilmiş temel eğriler Gerilme σ 'ye karşı logaritmik geçiş faktörü şeklinde gösterilmiştir.....	38
Şekil 3.8. PLA-HA için değişik referans sıcaklıklarında meydana getirilmiş temel eğriler Gerilme σ 'ye karşı logaritmik geçiş faktörü şeklinde gösterilmiştir.	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

ASTM	American Society for Testing and Materials
dk	Dakika
DMA	Dinamik Mekanik Analizör
FDM	Fused Deposition Modelling
FEA	Sonlu Elemanlar Analizleri
h	saat
HAp	Hidroksiapatit
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
J2	Plastisite/Akış Teorisi
kHz	Kilohertz
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
m	Metre
MP	Mikroplastik
Mpa	Megapascal
Mt	Metrik ton
n	Çevrim Sayısı
nHAp	Nano-hidroksiapatit
NP	nanoparçacık
°C	Santigrat
PEEK	Polieterketon
PEX	Çapraz Bağlı Polietilen
PLA	Poli (Laktik Asit)
PLA_HA	Hiyalüronik Asit
POM	Polioksimetilen
PP	Polipropilen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UHMWPE	Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
UV	Ultra viyole
ϵ_{max}	Maksimum Gerinim
ϵ_{min}	Minimum Gerinim
σ_{max}	Maksimum Gerilme
σ_{min}	Minimum Gerilme
μm	mikrometre

1. GİRİŞ

Polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve biyomekanik alandaki uygulamaları, son yıllarda en çok ilgi gören konulardan ikisini oluşturmaktadır. Bu iki alan, çeşitli açılardan ele alınması gereken pek çok yön barındırmaktadır. Bu konularda yapılan çalışmaların sonuçları, uluslararası alanda büyük bir ilgiyle karşılanmaktadır. Elde edilen bulgular, global düzeyde ilgi uyandırarak çözüme yönelik katkılar sağlayacaktır. Araştırma konusunun gelişime açık ve güncel olması nedeniyle, literatürdeki eksiklikleri gidermeye yardımcı olup önemli bulgular ortaya koyacaktır. Bu bulgular, öncelikli olarak araştırmacıların konuya dair daha uzman ve deneyimli olmalarını sağlayarak değerli sonuçlar sunacaktır.

Mühendislik bilimi, insanlara daha güvenli, huzurlu ve rahat bir yaşam sağlama amacıyla varlığını sürdürmekte olup, üretime yönelik faydalar sağlamaya ve bu faydaları uygulamaya odaklanır. Üretimi gerçekleştiren taraf ise çalışmalarını son aşamaya taşıırken, yüksek üretim hızı ve düşük maliyet talep etmektedir. Bu farklılaşan gereksinimlerle birlikte kullanılan malzemelerde de değişiklik yapılması zorunlu hale gelir. Değişen beklentiler, malzemeler üzerinde test yapılmasını gerektirir. Test yapmanın amacı; a) Tasarım kriterlerini belirlemek, b) Güvenirlilik sınırlarını netleştirmek, c) Güvenliği sağlamak, d) Üretim uyumluluğunu temin etmek, e) Kalite kontrolü gerçekleştirmek, f) Sabit ve özel koşulları belirlemek, g) İmalat süreçlerini gözden geçirmek, h) Sonuçların doğruluğunu kontrol etmek, i) Yeni bileşen türleri için bir temel oluşturmaktır. Polimerik malzemeler, son dönemde maliyet avantajı sağlamaları, üretim hızını artırmaları ve otomasyonlu üretim süreçlerine uyum sağlamaları nedeniyle birçok üretim alanında tercih edilmektedir. Özellikle polimerik malzemelerin mekanik özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle yapılacak testlerdeki hatalar, testin kendisi, testi gerçekleştiren kişi ve test edilen numune ile ilişkili olabilir (Jourdan vd., 1989).

Polimerik malzemeler üzerindeki araştırmalar, deneysel çalışmaları ve bu deneylerin sonuçlarını açıklamaya yönelik modelleme çalışmalarını kapsar. Deneysel araştırmalar, temel olarak çekme/basma koşulları altında yükleme-boşaltma, sünme, gevşeme, toparlanma ve kırılma davranışlarını anlamaya odaklanır. Literatürde, polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi makro ve mikro yapısal olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Makro modeller, elastik ve akışkan

yapıları temsil etmek amacıyla elektrik devreleri kurularak ve viskoelastisite teorileri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, Standart Lineer Katı modeli ile birlikte Maxwell ve Kelvin modellerini içerir. Mikro modeller ise, malzemenin iç yapısını dikkate alan matematiksel ifadeleri ve yapısının, bir kompozit malzemedeki gibi iki farklı bileşenden oluştuğunu varsayarak çözüm odaklı yaklaşımları kullanır (Dusunceli, 2010a).

Ariyama (1994), polimer örneklerini çeşitli yaşlandırma etkilerine maruz bırakarak çekme koşullarında mekanik özelliklerin nasıl değiştiğini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Yaşlandırmanın iç yapıda meydana getirdiği değişiklikler ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. (Ge vd., 2019) , polimer örneklerle tek eksenli çekme/basma ve döngüsel yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde yalnızca bir gerinim hızı seviyesi incelenmiş olup, döngüsel yükleme sırasında oluşan gerinim yumuşamasının artan çevrimsel gerinimle arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, malzemenin viskoplastik akış bölgesinde çekme sırasında basmaya göre daha dayanıklı olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak, döngüsel yüklemedeki gerinim yumuşaması ile çekme-basma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. (Ivey vd., 2017), karbon fiber takviyeli epoksi polimerlerin basınç altındaki dayanımı ve akma gerilmesi altındaki sünme davranışını incelemiştir. Basınç dayanımı testleri sonucunda, farklı doldurma oranlarıyla güçlendirilmiş polimerlerin dayanım açısından faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, sünme ve toparlanma deformasyonunun numune kenar kalınlığı ve yarıçapına (yüzey şekline) bağlı olduğunu gözlemlenmiştir; bu çalışmanın literatüre optimum kenar geometrisinin belirlenmesi açısından katkı sağladığı belirtilmiştir. Amoedo ve Lee (1992) ise polimer malzemelerde çapraz bağlanmanın yorulma, kırılma, akma ve deformasyon üzerindeki etkilerini incelemiştir. Akma, kırılma ve yorulma nedeniyle oluşan döngüsel hasarların implant üretiminde önemli kısıtlamalara yol açtığını ifade etmiştir. Sonuç olarak, yüksek çapraz bağlı polimerlerin ortopedik implantlarda ve taşıyıcı elemanlarda kullanımının giderek artacağı öngörülmüştür. Çapraz bağlanma işleminin aşınma direncini artırmakla birlikte çekme kopma mukavemeti, modüller, çatlak ilerlemesi ve tokluğa olumsuz etkileri olduğu belirtilmiştir.

Mourad vd. (2009), polimerlerin viskoelastik özelliklerini frekans ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak termomekanik ve dinamik analizlerle incelemiştir. Bu çalışmada,

ön ısıtma işleminin kristallik derecesini etkilediği ve viskoelastik özelliklerin sıcaklık ve yükleme frekansına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ön ısıtma işleminin dinamik depolama modülünü ve gevşeme sıcaklığını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Brusselle-Dupend ve Cangémi (2008), konvansiyonel ve yüksek çapraz bağlı polimerlerin hasar mekanizmalarını ve tek eksenli çekme altında kırılma davranışlarını inceleyerek her iki malzeme türünde benzer kırılma mekanizmalarının işlediğini ortaya koymuştur. Fairhurst vd. (2019), bir dizi çekme/basma ve döngüsel yükleme testi yaparak polimerlerin gerilme-gerinim davranışlarını incelemiş; kopma gerilmesinin, basma koşullarına kıyasla çekme altında daha büyük bir azalma gösterdiğini gözlemlemiştir. Daha sonra J2 plastisite modelini kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamalar yapmış ve bu modelle döngüsel yükleme davranışını anlamaya çalışmıştır.

Caelers vd. (2016), daha önce geliştirdikleri hibrit modeli bazı modifikasyonlarla konvansiyonel polimerlerin yanı sıra yüksek çapraz bağlı polimerlerin döngüsel yükleme altındaki boşaltma davranışlarını ve geniş gerinim seviyesinde kopma davranışlarını modellemek için uyarlamışlardır. Model ayrıca aşınma, yorulma ve kırılma davranışlarını açıklamaya yönelik olarak da denenmiştir. Li vd. (2019), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) ve çapraz bağlı polietilen (PEX) numunelerin basma koşulları altında yükleme davranışlarını, çeşitli şekil değiştirme hızları ve sıcaklık koşullarında incelemiştir. UHMWPE ve PEX benzer davranışlar sergilerken, HDPE'nin dikkat çekici farklılıklar gösterdiği ve yüksek akma gerilmesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. UHMWPE ve PEX düşük akma gerilmesi gösterirken, HDPE'nin ise sabit bir gerilme altında plastik akış sergilediği belirlenmiştir.

Ge vd. (2019), polimerlerin kısa ve uzun süreli sünme davranışını incelemiş ve zaman-sıcaklık süperpozisyon ilkesini kullanarak bu davranışları modellemiştir. Sünme deformasyonunun zamanın ilk aşamalarında daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. J. S. Bergström vd. (2003), polimerlerin çekme altındaki gerilme-gerinim davranışlarını belirlemek ve modellemek amacıyla kimyasal ve mekanik olarak şartlandırılmış numunelerle çalışmış; mekanik özellikler arasında elastisite modülü ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi belirlemek için ampirik bir bağıntı geliştirmiştir. Day vd. (2020), polimerlerin kırılma davranışı üzerinde akma ve plastik akışın etkilerini incelemek

üzere deneysel çalışmalar yürütmüştür. Tek eksenli çekme ve basma testleri ile akma sınırına kadar çekme ve basma eğrilerinin örtüştüğünü, ancak pekleşme, plastik akış ve kırılma davranışlarının farklı olduğunu belirtmiştir. Çekme koşullarında malzemenin daha mukavim olduğu gözlenmiştir.

Baykal vd. (2016), polimerlerin mekanik davranışını kristalleşme morfolojisine bağlı olarak çok eksenli yükleme koşulları altında incelemiş; çapraz bağlanma işleminin dayanımı artırırken esnekliği azalttığını ve pekleşme davranışını olumlu yönde etkilediğini gözlemlemiştir. Lewis ve Carroll (2001), polimerlerde çapraz bağlanmanın sünme davranışını çekme ve basma koşulları altında inceleyerek, çapraz bağlanma işleminin sünme özelliklerine olumsuz etkiler yaptığını ve bu durumun azalan kristallik derecesinden kaynaklandığını ifade etmiştir. Meyer ve Pruitt (2001), polimerlerin döngüsel yükleme ve gevşeme davranışlarını incelemiş ve malzemenin iç yapısına bağlı olarak farklı mekanik davranışların ortaya çıktığını tespit etmiştir. Artan çevrim sayısı ve kalıcı plastik gerinim miktarının, lamellerin düzenlenmesini artırdığı SEM analizleriyle doğrulanmıştır.

Mourad vd. (2009), kırılma davranışını gerinim hızına bağlı olarak UHMWPE ve polioksimetilen (POM) numunelerle karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Quasi-statik çekme testi sonuçlarından POM ve polimerlerin mekanik özelliklerinin gerinim hızına duyarlı olduğu belirlenmiştir. Chen vd. (2019) polimerlerin dinamik tepkilerini ve kırılma davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çentikli ve çentiksiz numuneler üzerinde yapılan testler, polimerlerin çekme özelliklerinin hem gerinim hızı hem de üç eksenli gerilmelere karşı duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Çentiksiz numunelerde akma gerilmesinin gerilme hızı ile arttığı, ancak kopma gerilmesinin azaldığı tespit edilmiştir. Kırılma davranışını modellemek için Johnson-Cook modelini kullanmış ve bu modelin başarılı sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Yukarıdaki çalışmaların genel incelemesinden görüldüğü üzere, polimerlerin mekanik davranışları hâlâ pek çok açıdan tam anlamıyla açıklığa kavuşturulmamıştır. Bu araştırmalar çoğunlukla yük altında şekil değiştirme hızına bağlı olarak akma sınırını, viskoplastik akış sınırlarını ve dayanım seviyelerini belirlemeye odaklanmıştır. Ancak, yükleme elemanı olarak kullanılan polimer malzemeler, ekipmanın normal çalışması sırasında oldukça karmaşık yük durumlarına maruz kalmaktadır. Bu karmaşık yüklemelerden biri de çevrimsel yüklemedir. Çalışmaların çoğu, hasar ve kırılma

davranışlarını inceleyerek geniş gerinim seviyelerindeki kopma davranışlarını araştırmıştır.

Öte yandan, ekipmanın ısı ve kimyasal etkileşimlerinin etkisini incelemek için kimyasal, termal ve mekanik ön şartlandırmalara maruz bırakılan numuneler üzerinde de çalışmalar yapılmış; bu deneyler, malzemenin dayanım ve deformasyon özelliklerini etkileyen farklı şartlar altında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sünme davranışı üzerine yapılan çalışmalar ise oldukça sınırlıdır, ancak sabit yük altında zamanla meydana gelen sünme, polimerik malzemelerde oda sıcaklığında dahi gerçekleşebilen bir olgudur ve yük taşıyan elemanlarda kaçınılmaz olarak ortaya çıkar. Ayrıca, literatürde gevşeme davranışı ile ilgili çalışma eksikliği de önemli bir boşluk olarak öne çıkmaktadır. Gevşeme özelliklerinin araştırılması, malzemenin uzun vadeli dayanıklılığını ve performansını anlamak için kritik bir gerekliliktir. Bu tür eksiklikler göz önünde bulundurulduğunda, polimerlerin mekanik davranışlarını daha kapsamlı bir şekilde açıklayabilmek için yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Polimerlerin mekanik davranışları, çeşitli yönlerden incelenmeye açıktır. Bu çalışmada, gerinim hızı etkilerinin yanı sıra, özellikle sünme, gevşeme ve yükleme geçmişi bağımlılıklarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşılmaktadır. Tez çalışmamız, gevşeme davranışları ile temel eğrilerinin oluşturulmasını incelenmesini hedeflemekte ve bu alana literatüre önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Polimerik malzemelerin mekanik davranışları, metalik malzemelere kıyasla kendine özgü bazı önemli özellikler göstermektedir. Yükleme ve boşaltma sırasında davranışın lineer olmaması, hidrostatik basıncın akma davranışı üzerindeki etkisi, sıfır gerilme durumunda belirgin toparlanma, ayrıca elastik bölgede dahi gözlemlenen sünme ve gevşeme davranışları bu farkların başında gelir (Drozdov ve Dusunceli, 2012, 2013; Necmi Dusunceli, 2010a, 2010b, 2012; Necmi Dusunceli ve Colak, 2006a; Necmi Dusunceli vd., 2017). Polimerlerin oda sıcaklığında dahi sünme ve gevşeme özellikleri sergilemesi, iç yapısal değişimlerin de etkisiyle polimerik malzemelerin mekanik davranışlarını oldukça karmaşık bir hale getirmektedir. Bu karmaşıklığı çözebilmek için geniş bir deneysel çalışma yapılması, ardından sonuçların uygun bir model ile ifade edilmesi gerekmektedir. Özellikle biyomedikal polimerlerde, bu tür malzemelerin hasar davranışları, yükleme-boşaltma ve çevrimsel yükleme davranışları üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıda olup, sünme davranışı daha çok deneysel

olarak incelenmiştir. Gevşeme davranışının eksikliği ise implant uygulamalarında uygulanacak gerilme değerlerinin belirlenmesi ve ticari sonlu eleman programları ile analiz yapılabilmesi için kritik bir eksiklik oluşturmaktadır. Ayrıca sünme davranışının modellenmesi üzerine yapılan çalışmalar da oldukça azdır. Bu projede, gevşeme davranışının belirlenmesi ve modellenmesi ile sünme davranışının modellenmesi önemli bir yenilik olacaktır.

Yükleme geçmişinin etkilerini araştırmak amacıyla katlamalı gevşeme ve sünme deneylerinin yapılması ve bu deneylerin matematiksel olarak modellenmesi, mevcut literatürde önemli bir boşluğu dolduracaktır. Ayrıca, çevrimsel yüklemenin deneysel olarak incelenmesi ve modellenmesi, çevrimsel sünme davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacaktır. Tüm bu yaklaşımlar, belirli bir değişken grubu ve model çerçevesinde açıklanarak hem literatür hem de pratik tasarımlar açısından yapısal hesaplamaların kolaylaştırılmasına yönelik önemli bir adım teşkil edecektir.

Yarı kristal polimer malzemelerin mekanik davranışı, bu malzemelerin birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmasını sağlayan önemli bir araştırma konusudur. Bu tür polimerler, belirli bir derecede kristal yapı içermeleri nedeniyle hem elastik hem de viskoelastik özellikler sergileyerek, çeşitli yükleme koşullarında kendine özgü davranışlar göstermektedir. Polimerik malzemelerin öne çıkan pozitif özellikleri şunlardır:

Aşınmaya Karşı Direnç: Yarı kristal polimerler, aşınma ve yıpranmaya karşı gösterdikleri direnç sayesinde, otomotiv, inşaat ve paketleme gibi birçok endüstride güvenle kullanılmaktadır.

Düşük Maliyet: Üretim süreçleri genellikle daha basit ve daha az enerji gerektirdiğinden, yarı kristal polimer malzemeler düşük maliyetli seçenekler sunar. Bu, maliyet etkin çözümler arayan uygulamalar için önemli bir avantajdır.

Mukavemet: Yarı kristal polimerler, yüksek mukavemet değerleri sağlayarak, yapısal uygulamalarda güvenilir performans sergilerler. Bu, özellikle mekanik yüklerin söz konusu olduğu uygulamalarda kritik bir özelliktir.

Fazla Yük Taşıma Kabiliyeti: Bu polimerler, belirli bir seviyeye kadar yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir, bu da onları mühendislik uygulamalarında tercih edilen

bir malzeme yapar.

Basit İşlenebilirlik: Yarı kristal polimerler, şekil verme ve işleme süreçlerinde kolaylık sağlayarak, tasarımcıların ve mühendislerin çeşitli formlarda ve uygulamalarda bu malzemeleri kullanmalarına olanak tanır.

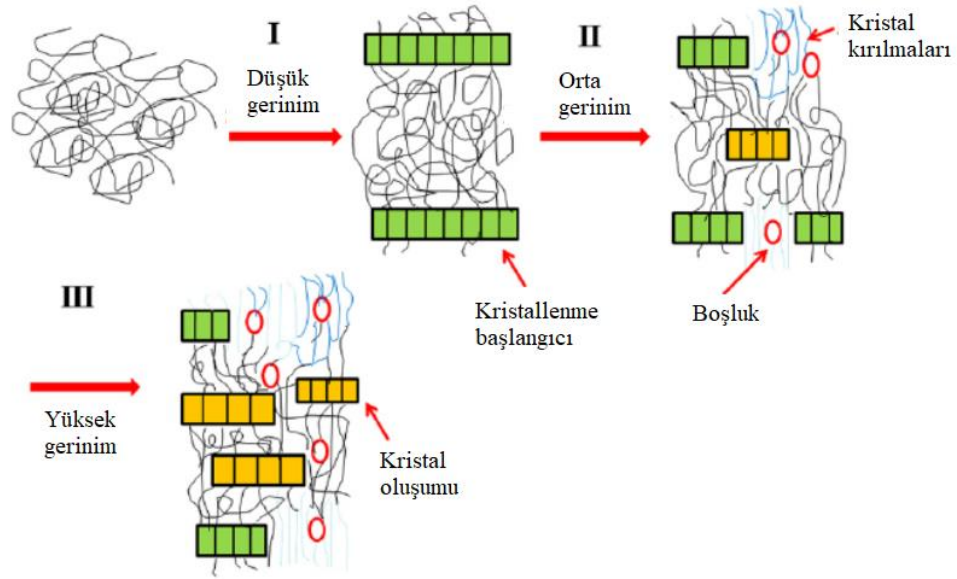
Bu özelliklerin kombinasyonu, yarı kristal polimer malzemeleri mühendislik ve endüstri alanında cazip bir seçenek haline getirirken, mekanik davranışlarının anlaşılması, bu malzemelerin uygulama alanlarını genişletmek ve performanslarını optimize etmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Poli (Laktik Asit)'in (PLA) çekme gerilmesi altındaki kristalleşme, stres ve deformasyon arasındaki etkileşimi Şekil 1.1'de gösterilmektedir.

Aşama I: Gerilme gerinimi %100'den düşük olduğunda, amorf PLA'nın bazı bölgelerinde kristalleşme başlar (yeşil renkle gösterilmiştir). Bu durum, gerinim etkisiyle oluşan kristalleşmeden kaynaklanmaktadır.

Aşama II: Gerilme gerinimi %100 ile %160 arasında arttıkça, stres de artar. Stres, oluşmuş kristalleri yok edebilecek kritik bir seviyeye ulaştığında bazı mevcut kristaller kaybolur (mavi renkle gösterilmiştir) ve bu, kristaller arasındaki amorf fazda boşluklar ve boşlukların oluşmasına neden olur (kırmızı renkle gösterilmiştir). Aynı zamanda, amorf bölgelerdeki yönelmiş zincirler yeni kristaller oluşturabilir (sarı renkle gösterilmiştir).

Aşama III: Kırılmaya kadar süren gerinimle, stres artmaya devam eder ve bu durum zincirlerin dolaşıklıklarının çözülmesine yol açar. Sonuç olarak, amorf bölgelerde daha fazla yönelmiş zincir oluşur ve bu durum PLA'nın daha fazla kristalleşmesini sağlar.



Şekil 1.1. PLA'nın farklı gerinimlerde yapısal değişimi.

Bu araştırma, polimerik malzemelerin mekanik davranışlarını daha kapsamlı bir şekilde anlamayı ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini artırmayı hedeflemektedir. Sonuçlar, özellikle biyomedikal alanlar gibi kritik uygulamalarda, polimerik malzemelerin dayanıklılığı, güvenilirliği ve performansı açısından önemli veriler sunacaktır. Ayrıca, bu bulgular, mühendislik tasarım süreçlerinde daha sağlam ve güvenilir hesaplamalar yapılabilmesine olanak sağlayacaktır. Böylece, polimer malzemelerin daha etkin bir şekilde kullanımı mümkün hale gelecektir.

Çalışmanın ana amacı, polimerik malzemelerin tek eksenli monotonik yükleme koşulları altında mekanik özelliklerini belirlemektir. Bu hedef doğrultusunda, ortaya konacak deneysel sonuçlar, mevcut literatüre katkı sağlarken aynı zamanda pratik uygulamalara yönelik tasarım kriterlerinin belirlenmesine de olanak tanıyacaktır.

Bu amacın gerçekleştirilmesi için, PLA malzemedan üretilmiş numuneler üzerinde tek eksenli monotonik yükleme koşullarında çevrimsel çekme deneyleri ve gevşeme deneyleri gerçekleştirilecektir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, polimerlerin mekanik davranışının matematiksel olarak ifade edilmesine yönelik araştırmalara destek sağlayacak ve bu sayede polimer malzemelerin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunacaktır.

Çalışma, polimerik malzemelerin mekanik özelliklerinin yanı sıra, bu özelliklerin zaman ve yükleme geçmişi gibi faktörlere olan bağımlılığını da inceleyerek, malzeme mühendisliği ve tasarım süreçlerine değerli bilgiler sunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, hem akademik alanda hem de endüstriyel uygulamalarda polimer malzemelerin kullanımı için önemli referanslar oluşturacaktır.

Bu çalışma, PLA ve PLA_HA (Poli (Laktik Asit) ve Hiyalüronik Asit) malzemelerinin gevşeme modüllerinin aynı numune ve test koşulları altında doğru bir şekilde ölçülmesini amaçlamaktadır. Elde edilen gevşeme test verileri, referans sıcaklıkları olarak 23 °C, 40 °C ve 55 °C değerlerini kullanarak üç temel eğri oluşturacaktır. Bu yaklaşım, her iki malzemenin sıcaklığa bağlı davranışını karşılaştırmak ve gevşeme modüllerinin sıcaklık değişimlerinden nasıl etkilendiğini analiz etmek için önemli bir temel sağlayacaktır.

Test sürecinde, her sıcaklık değeri için uygulanan sabit gerilme veya gerinim koşullarında elde edilen veriler, gevşeme modülünün zamanla nasıl değiştiğini gösteren eğrilerin oluşturulmasına olanak tanıyacaktır. Bu sayede, PLA ve PLA_HA malzemelerinin mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılması sağlanacak ve biyomedikal uygulamalar için potansiyel avantajları belirlenebilecektir.

Sonuç olarak, çalışmanın bulguları, bu polimerlerin tasarımı ve uygulama koşullarındaki performansını optimize etmek için önemli veriler sunacaktır.

2. MATERYAL VE METOT

Endüstriyel plastik üretimi 1950'lerin başında başladı ve günümüzde dünya genelinde yaklaşık 8.3–9.1 milyon metrik ton (Mt) plastiğin üretildiği tahmin edilmektedir (Pappa vd., 2021). Bunların çoğu ambalaj malzemelerinde kullanılmakta olup (> %50) hafif ve geri dönüştürülmesi oldukça zor olduğundan, üretilen plastiklerin %79'u çöplüklere atılmakta veya çevrede birikmektedir (Geyer vd., 2017). Ticari olarak üretilen plastiklerin çoğu, fosil bazlı malzemeler olup oldukça dayanıklıdır ve çevrede yavaşça bozunur. Bu durum, güneşten gelen UV ışınımı nedeniyle farklı boyutlarda parçalar oluşturarak gerçekleşir (Bikiaris vd., 2023). Boyutları 1 µm ile 5 mm arasında değişen ve mikroplastikler (MP'ler) olarak adlandırılan bu parçalar, son 10-20 yılda yaşayan mikroorganizmalar (Bobori, vd., 2022; Bobori, vd., 2022; Darnell vd., 2013; Kaloyianni vd., 2021) ve insan sağlığı için başlıca tehdit olarak tanınmış olup okyanuslarda, tortularda, nehirlerde ve kanalizasyonlarda bulunabilmektedir (Huang vd., 2021; Jiang, 2018). Mikroplastiklerin canlı organizmalar üzerindeki etkisi konusundaki endişeler, polimerler üzerinde çalışan bilim insanları ve şirketlerin, çevrede zararlı yan ürünler olmadan bozunabilecek çevre dostu plastiklerin üretilmesine yönelik araştırma faaliyetlerine odaklanmasına yol açmıştır. Bu nedenle, biyobozunur ve biyolojik bazlı polimerler, tek kullanımlık petrol bazlı geleneksel polimerlere olan artan talebe alternatif bir çözüm olarak son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Kian vd., 2019).

Çevresel etkilerle ilgili giderek artan küresel endişe, küresel iklim değişikliği ve plastik atık yönetimi gibi konulara yönelik artan farkındalık, tüketicileri; dolayısıyla endüstrileri ve hükümetleri daha sürdürülebilir bir yaklaşım benimsemeye yöneltmiştir (Banerjee ve Ray, 2021). Yeniden kullanma, azaltma, kompostlama ve geri dönüştürme gibi birçok atık yönetimi çözümü, beyaz kirliliğin (yani, doğaya, okyanuslara ve çöplüklere ulaşan tek kullanımlık plastiklerin çevreyi kirlletmesi) azalmasına katkı sağlamış ve geri dönüşüm ve kompostlama yoluyla geri kazanılabilen biyobozunur polimerlerin geliştirilmesi olumlu bir değişiklik olmuştur. Bu bağlamda, PLA, atık bertarafı sorununa potansiyel bir çözüm sunduğu için (biyolojik) polimerlerde öncü olmuştur (Balla vd., 2021; Raquez vd., 2013). Laktik asit (LA), PLA'nın öncüsüdür ve mısır, manyok nişastası ve patates gibi yenilenebilir kaynakların fermentasyonu yoluyla elde edilebilir (Kervran vd., 2022).

Doğrusal bir alifatik polyester olan PLA, birçok çekici özelliğe sahiptir ve bu nedenle birçok ticari sektörde kullanım bulmuştur (John, Črešnar, Bikiaris, ve Zemljič, 2023; Papageorgiou, Achilias, Nanaki, Beslikas, ve Bikiaris, 2010). Mükemmel aroma bariyeri ve iyi ısı sızdırmazlığı özelliği, gıda ambalajı alanındaki kullanımını artırırken, çekici mekanik özellikleri, yüksek şeffaflığı ve işlenme kolaylığı tıp, otomotiv, tekstil ve tarım alanlarındaki kullanımını genişletmiştir (Klonos vd., 2022; Sanusi vd., 2021). Ayrıca PLA, yenilenebilir, kompostlanabilir ve nispeten düşük maliyetlidir (Raquez vd., 2013). PLA, biyobozunur bir polyester değil, kompostlanabilir olduğundan çevrede yavaşça bozunabilir ve bu durum mikroplastiklerin oluşumuna yol açar. Birçok toksisite çalışmasından, PLA mikroplastiklerinin bitkiler ve topraklar üzerinde önemli bir etki göstermediği bulunmuştur (Ainali vd., 2022). İnsan vücudu söz konusu olduğunda ise PLA, tıbbi ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı için güvenli bir biyopolimerdir (Vlachopoulos vd., 2022). İnsan vücudunda yavaşça bozunabilir ve laktik asit gibi toksik olmayan parçalar oluşturur (Beslikas vd., 2011).

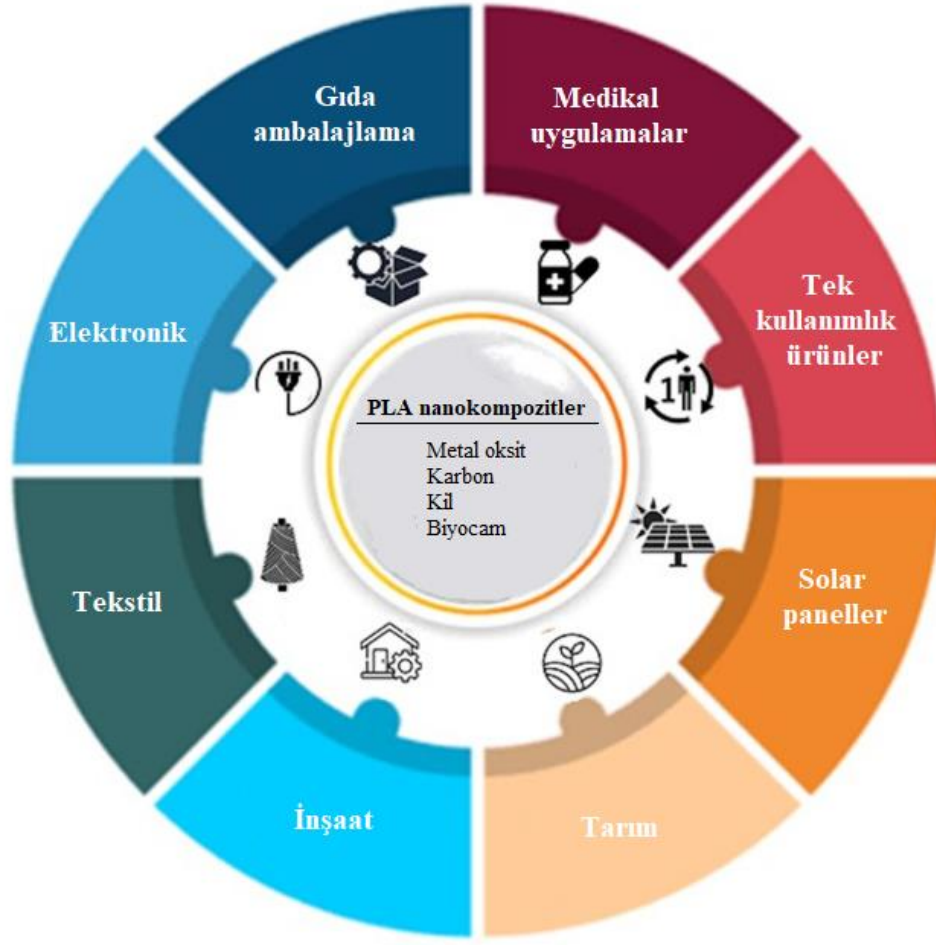
Bu avantajlarına rağmen, PLA'nın kırılabilirlik, gaz ve buhara karşı yüksek geçirgenlik, düşük erime mukavemeti ve termal kararlılık gibi bazı dezavantajları da vardır. Ayrıca, gıda ve bahçe atıkları gibi diğer yaygın doğal organik atıklara kıyasla bozunma hızı daha yavaştır. Bu durum, endüstriyel gıda ve bahçe kompostlama tesislerinde kabul edilmesinde ve genel olarak yaygın kullanımında önemli bir sınırlamaya neden olmaktadır (Mayekar vd., 2020). Hibrid PLA nanokompozitlerinde, çok düşük nanodolgu yüklemelerinde bile gözlemlenen önemli iyileşme nedeniyle bu konuda birçok araştırma yapılmıştır (Sha vd., 2016; Sharif vd., 2019). Hibrid nanoteknoloji, gelecekteki uygulamalar için en yüksek teknolojik ileri kompozitleri geliştirerek malzeme bilimi alanında yeni bir devrim yaratmıştır. Nanokompozitlere en az bir nanoboyutlu parçacık dahil edilmektedir. Nanoparçacıkların (NP) eklenmesi, daha iyi dağılım, yüksek spesifik oran ve etkili polimer–dolgu etkileşimi sayesinde termal, mekanik, fiziksel termomekanik özelliklerde dikkate değer bir iyileşme sağlamaktadır (Kian vd., 2019).

Hidroksiapatit (HA) ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), kristal halinde vücut sıvısında termodinamik olarak kararlı olan biyolojik bir seramik malzemedir ve insan kemiğinin ana inorganik bileşenidir. Bu nedenle, osteokondüktif ve osteoindüktif özellikleri sayesinde

biyoyumlu olup mükemmel kemik iyileştirme özelliklerine sahiptir (R. Zhang vd., 2020; Michael vd., 2018). Doğal HA genellikle biyolojik atıklardan veya besin kaynaklarından (örneğin, sığır, deve ve at gibi memeli kemikleri), deniz veya sucul kaynaklardan (örneğin, balık kemiği ve balık pulları), kabuk kaynaklarından (örneğin, deniz kabuğu, istiridye, yumurta kabuğu ve deniz kabuğu), bazı bitkilerden ve ayrıca kireç taşı gibi mineral kaynaklardan elde edilir. Sentetik HAp ise katı yöntemler (katı hâl ve mekanokimyasal), ıslak yöntemler (kimyasal çöktürme, hidroliz, sol-jel, hidrotermal, emülsiyon ve sonokimyasal) ve yüksek sıcaklık işlemleri (yanma ve piroliz) dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle üretilebilir (Szczęs vd., 2017). Nano-hidroksiapatit (nHA), küçük kristal tane çapı, geniş arayüzey, yüksek yüzey serbest enerjisi ve bağlanma enerjisi ile makro kuantum tünelleme etkisi gibi nanomalzemelerin benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerine sahip küçük boyut etkisine sahiptir (Du vd., 2021).

HA'nın kırılkan yapısı, tek başına kullanıldığında çoğu uygulama için uygun değildir çünkü mekanik gereksinimleri karşılamaz. PLA'nın nano-hidroksiapatit (HA) gibi seramiklerle güçlendirilmesi, doku mühendisliği ve kemik rejenerasyonu uygulamaları için yoğun bir şekilde araştırılmaktadır ve hidroksiapatitin yüksek kırılkanlığı ve kontrol edilemeyen bozunma hızı gibi birçok sorunu etkili bir şekilde çözmüştür. Ayrıca, nanofazdaki HA'nın osteoblast hücre yapışmasını ve hem in vitro hem de in vivo olarak uzun vadeli fonksiyonlarını iyileştirdiği bulunmuştur (Wetteland ve Liu, 2018).

Yukarıda bahsedildiği gibi, nanodolgular, yüksek performanslı PLA bazlı nanokompozitler hazırlamak amacıyla PLA'nın özelliklerini genişletmek ve iyileştirmek için ilgi çekici bir yol sunmaktadır. PLA nanokompozitlerinin geliştirilmiş özellikleri sayesinde ambalaj, inşaat, tıp, tekstil, elektronik, güneş paneli ve tarım sektörlerinde umut verici uygulamalar olarak potansiyel sunmaktadırlar (Şekil 2.1).



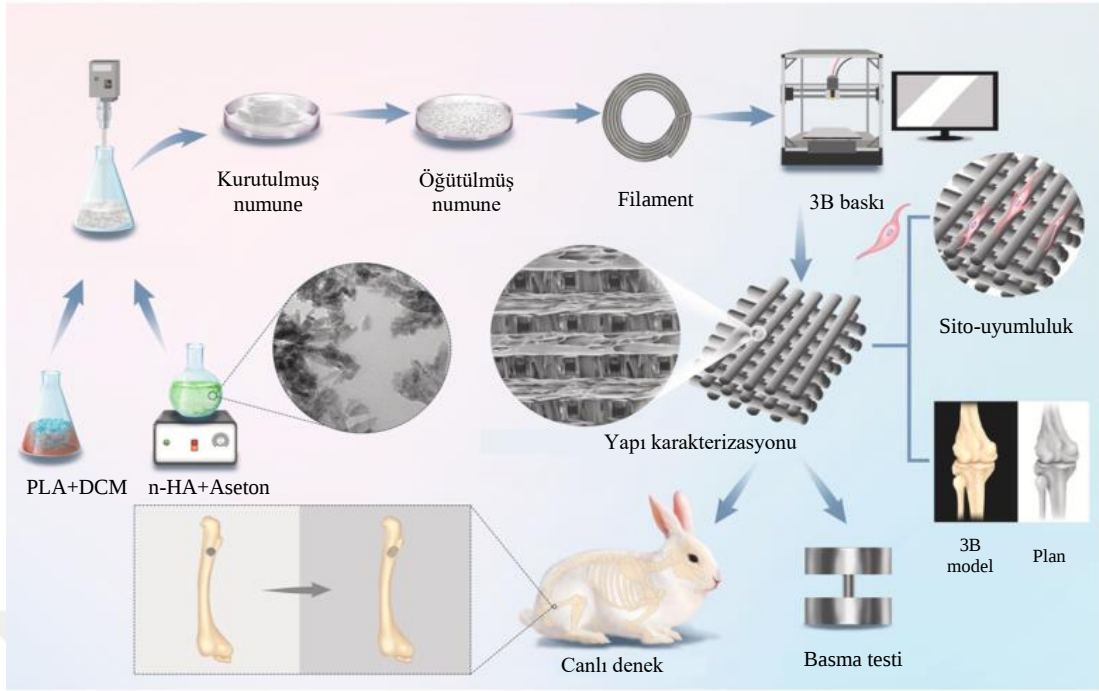
Şekil 2.1. PLA nanokompozitleri içeren çeşitli uygulamaların şematik gösterimi.

Hidroksiapatit (HAp), kemik ve dişlerin inorganik mineral bileşiğiyle yakın benzerlikler taşıması nedeniyle, özellikle ortopedi ve diş hekimliği gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan en gelişmiş biyoseramik malzemedir (Bikiaris vd., 2023).

Morsi ve arkadaşları (Morsi ve Hezma, 2019), doku mühendisliği uygulamaları için çözünürlük döküm tekniğiyle PLA matrisini farklı kütle fraksiyonlarında demir-doplanmış nHA (FeHA NPs) ile doldurdular (PLA/FeHA NPs wt.%: 90/10, 80/20 ve 70/30). FT-IR sonuçları, FeHA NPs'nin PLA ile Ca(OH)_2 'nin OH grubu ile PLA'daki ester grubundaki oksijen atomları arasında hidrojen bağı oluşumu yoluyla bağlandığını ve bunun daha iyi bir ara yüzey davranışına katkıda bulunduğunu gösterdi. %10'luk FeHA NPs'nin dahil edilmesi, elastik modülün en yüksek değerini 330 MPa olarak gösterdi. Bu, saf polimerden 28 MPa daha yüksekti.

Toong ve arkadaşları (Toong vd., 2022), nHAp ve L-laktid fonksiyonelleştirilmiş nHA ile PLLA'yı içeren nanokompozit formülasyonlarını, potansiyel ince-kollu biyolojik olarak emilebilir iskeletler olarak değerlendirdiler. Fonksiyonelleştirilmiş nanodolgunlar / PLLA, nanodolgu dağılımını iyileştirirken, agregasyon ve zayıf matris/dolgu entegrasyonu gibi sorunlar da azaltıldı. nHA'nın homojen dağılımı, mekanik özellikleri artırdı. Özellikle, 10 wt. % nHA/PLLA ve 10 wt.% LA-nHA/PLLA'nın nihai çekme dayanımının sırasıyla saf PLLA'ya kıyasla 31.96 ve 75.02 MPa arttığı gözlemlendi; ayrıca, matris içinde %10 ve %15 yükleme oranlarına sahip LA-nHA, en yüksek kopma uzama değerlerine yol açtı.

Wang ve arkadaşları, PLA'nın nHA ile (0%, 10%, 20%, 30%, 40% ve 50% içeriğinde) tıbbi uygulamalarda 3D yazdırılabilme kapasitesini keşfettiler (W. Wang vd., 2021). Sonuçlar, PLA/nHAp kompozitinin stabil bir yapıya sahip olduğunu ve bu malzemenin işlenmesinin oldukça kontrollü olduğunu gösterdi. nHAp oranı %50'den büyük olduğunda, kompozit malzeme, yüksek kırılma kırılma nedeniyle yazdırma memesinden tutarlı ve stabil bir şekilde geçemedi. nHAp oranı %50 veya daha düşük olduğunda ise kompozit filament malzeme FDM ile yazdırılabiliyordu. Ayrıca, nHAp oranı %0'dan %50'ye çıktıkça, 3D yazdırılmış PLA/n-HA iskeletlerinin yüzeyinde pürüzlülükten kaba hale doğru kademeli bir değişim gözlemlendiler. Bu, yüzeyde çok sayıda konveks ve konkav yapının ortaya çıkmasıyla, iskeletin yüzey alanını artırdı. 3D yazdırma işlemi PLA/nHAp kompozitlerine uygulandıktan sonra, %0 ila %30 nHAp içeren yazdırılmış örnekler basınç testinden sonra yapı bütünlüğünü koruyabildi. Bu da bu örneklerin elastikiyetini koruduğunu kanıtladı. Ancak, n-HA oranı %40'ı geçtiğinde, yazdırılan örnek kırılma hale geldi ve sıkıştırma sonrası şeklini koruyamadı. Yine de, nHAp entegrasyonu ile yazdırılan tüm PLA iskeletlerinin mekanik özellikleri, saf HA gözenekli seramik ve doğal insan süngerimsi kemiğinden çok daha yüksekti. Biyouyumluluk ve osteojenik indüksiyon özelliklerinin, saf PLA iskeletinden daha iyi olduğu kanıtlandı. PLA/n-HA kompozit malzeme, ıslak karıştırma yöntemiyle hazırlanmış ve 3D yazdırılmış kompozit iskelet, PLA/n-HA filament ile yapılmıştır. Malzeme karakterizasyonu ve kompozit malzemelerin in vivo ve in vitro deneyleri sırasıyla, kemik defektlerinin onarımını desteklemek için yeterli mekanik kuvvet ve toksik olmayan özelliklerini doğrulamıştır. Söz konusu çalışmanın uygulama adımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Kemik rejenerasyonu için PLA/n-HA iskeletlerinin hazırlanması ve uygulanmasına dair şematik gösterim.

Polimerik malzemelerin biyomedikal uygulamalarda kullanımı, imalat kolaylığı ve düşük maliyetler gibi avantajları nedeniyle giderek artmaktadır. Ancak, bu malzemelerin zaman ve sıcaklığa bağlı davranış sergilemesi, üretim ve operasyon esnasında uygulama noktasındaki mekanik davranışlarının tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, viskoelastik özelliklerin dikkate alınması gerekmektedir.

Viskoelastik özelliklerin belirlenmesi için çeşitli test yöntemleri geliştirilmiştir ve bunların bir kısmı ticari olarak yaygın ekipmanlarla rutin şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, viskoelastik özelliklere sahip malzemelerin karakterizasyonu genellikle özel yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, uzman olmayan kişiler tarafından uygulanamayacak kadar karmaşık veya zaman alıcı olabilir. Bu nedenle, bu tür testlerde numune hazırlama ve test koşulları, güvenilir ve tekrarlanabilir ölçümlerin elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Necmi Dusunceli ve Colak, 2006b; Schiavi, Cuccaro, ve Troia, 2016; Sin vd., 2013; Zhou vd., 2016).

Bu durum, polimerik malzemelerin mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve uygulama alanında güvenilir sonuçların elde edilmesi için titiz bir

yaklaşım gerektirmektedir. Özellikle biyomedikal alanında, bu malzemelerin performansı ve uzun ömürlülüğü açısından viskoelastik özelliklerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir.

Poli (Laktik Asit) (PLA), biyobozunur ve biyouyumlu özellikleri sayesinde biyomedikal uygulamalar için uygun bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Ancak, PLA'nın düşük mukavemet ve elastiklik modülü, kırılganlık, cam geçiş sıcaklığının yaklaşık 60 °C civarında olması, zayıf gaz bariyeri özellikleri ve yavaş kristalleşme hızı gibi dezavantajlı özellikleri, kullanım alanlarını sınırlamaktadır (Dusunceli vd., 2013).

Son on yıl içinde PLA'nın mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli nanoparçacıklarla güçlendirilmiş ve bu sayede mekanik dayanım, ısı bozulma sıcaklığı, termal kararlılık ve gaz bariyeri gibi özellikleri iyileştirilmiştir. Örneğin, killer, karbon bazlı nano-dolgular, metal oksitler ve polisakkarit nanoparçacıklar gibi malzemelerle yapılan güçlendirme çalışmaları, PLA'nın performansını artırma potansiyeline sahip olmuştur (Hébert vd., 2013; Sin vd., 2013; W. Wang vd., 2021).

Bu gelişmeler, PLA'nın biyomedikal uygulamadaki etkinliğini artırmakta ve çeşitli alanlarda daha geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır. Özellikle, mekanik ve termal özelliklerin iyileştirilmesi, PLA'nın implantlar, dikiş ipleri ve diğer biyomedikal cihazlar gibi uygulamalarda daha güvenilir ve etkili bir seçenek olmasını sağlamaktadır (M. Wang, vd., 2017).

Polimerlerin karakterizasyonu için çeşitli test yöntemleri geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu tekniklerin çoğu, malzemenin bir veya iki özelliğine odaklanmakta ve farklı özellikler ölçüleceği zaman farklı teknikler kullanılmaktadır.

Zamana ve sıcaklığa bağlı elastik modül özellikleri genellikle statik veya dinamik yükleme kullanılarak ölçülmektedir. Statik yükleme, çeşitli sıcaklıklarda sünme testi (numuneye uygulanan sabit gerilme) veya gerinim gevşemesi (numuneye uygulanan sabit gerinim) için geleneksel çekme test makineleri ile gerçekleştirilebilir. Elde edilen gerinim veya gerilme değerleri, sırasıyla sünme kompliyansı veya gevşeme modülü değerlerini hesaplamak için kullanılabilir (Henton vd., 2005). Bununla birlikte, polimerlerin elastik modül değerleri metallerle karşılaştırıldığında çok daha küçüktür.

Bu nedenle ölçümler sırasında son derece hassas ekstansometrelerin kullanılması gerekmektedir. Dinamik testler ise genellikle Dinamik Mekanik Analizör (DMA) kullanılarak gerçekleştirilir. DMA, geçici adım gerinim modunda çalışırken numuneye bir gerilim yüklemesi uygulayarak zamana bağlı kesme modülünü ölçebilmektedir (Drozdov ve Dusunceli, 2012; Rezgui vd., 2005; Tamrakar vd., 2020)

Bu test yöntemlerinin kullanımı, polimerlerin mekanik davranışlarını daha iyi anlamak ve çeşitli uygulamalarda doğru malzeme seçimleri yapmak için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, uygun karakterizasyon tekniklerinin belirlenmesi, polimerlerin endüstriyel ve biyomedikal uygulamalardaki etkinliğini artırmaya yardımcı olacaktır (Hatami-Marbini ve Etebu, 2013).

Bir polimerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve zamana ve sıcaklığa bağlı elastik modülü, biyomalzemelerin uygulama noktasında işlevlerini yerine getirmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu özellikler, polimerlerin mekanik davranışlarını ve uygulama alanlarındaki performanslarını doğrudan etkiler. Özellikle biyomedikal uygulamalarda, polimerlerin T_g değeri, malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı olan hassasiyetini belirlerken, elastik modül, malzemenin deformasyon kabiliyetini ve dayanıklılığını gösterir (Baiardo vd., 2003; Haugan vd., 2019; Hébert vd., 2013; Ricci vd., 2019).

Bu nedenle, her durum için avantaj-dezavantaj dengesinin dikkate alınması kritik bir önem taşır. Örneğin, yüksek T_g değerine sahip bir polimer, sıcaklık artışında daha stabil olabilir, ancak bu durum mekanik dayanıklılık açısından dezavantaj oluşturabilir. Benzer şekilde, elastik modül değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, malzemenin uygulama koşullarında beklenen performansını öngörmek açısından önemlidir (Bennin vd., 2019; J. S. Bergström vd., 2003; Ricci vd., 2019; X. Zhang vd., 2011).

Sonuç olarak, bu özelliklerin kesin ve doğru ölçümü, biyomalzemelerin etkin kullanımını sağlamak için gereklidir. Ayrıca, bu ölçümler, polimerlerin tasarımında ve uygulama alanlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Polimerik malzemeler üzerine yapılan çalışmalar, hem deneysel incelemeleri hem de bu deney sonuçlarını açıklamaya yönelik modelleme çabalarını kapsamaktadır.

Deneyisel çalışmalar, genellikle çekme ve basma şartları altında yükleme-boşaltma, sünme, gevşeme, toparlanma ve kırılma davranışlarının anlaşılmasına odaklanmaktadır (N. Dusunceli vd., 2021; Khan ve Yeakle, 2011; Van De Velde ve Kiekens, 2002).

Literatürde, polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi iki ana yaklaşım üzerine inşa edilmiştir: makro ve mikroyapısal modeller. Makro modeller, elastik ve viskoz özellikleri tanımlamak için elektrik benzeşim devreleri oluşturarak ve viskoelastisite teorileri geliştirerek oluşturulmaktadır. Bu yaklaşım, Kelvin, Maxwell ve Standart Lineer Katı modellemeleri gibi klasik modellere dayanmaktadır (Bonet, 2001; Erhard Krempl ve Ho, 2000; C. Zhang ve Moore, 1997).

Mikro modeller ise, malzeme yapısını tıpkı bir kompozit malzemede olduğu gibi iki farklı elemandan oluştuğunu varsayarak, malzemenin iç yapısına dair parametreleri içeren matematiksel ifadelerle çözüm odaklı yaklaşımlar sunmaktadır (Jörgen S. vd., 2016; Necmi Dusunceli ve Colak, 2008; G'sell ve Dahoun, 1994).

Polimerik malzemeler, endüstriyel ve biyomekanik teknolojinin temel hammaddelelerinden biri olarak giderek daha fazla kullanılmakta ve bu durum, malzeme davranışını açıklamaya yönelik çalışmalara olan ilgiyi artırmaktadır. Bu alandaki öne çıkan çalışmalar arasında Chaboche (1989); Necmi Dusunceli ve Drozdov (2017); Inside vd. (2014); Kitagawa ve Takagi (1990); E. Krempl (1999); Erhard Krempl (1996); Lai ve Bakker (1995) gibi kaynaklar yer almaktadır. Bu araştırmalar, polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini daha iyi anlamaya yönelik önemli bilgiler sunmakta ve bu alandaki literatüre katkıda bulunmaktadır.

2.1. Deneyisel Prosedür

Polimerlerin elastik olmayan deformasyon davranışının modellenmesi, artan polimer kullanım oranıyla birlikte giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu ilgi, polimerlerin çeşitli endüstriyel ve biyomedikal uygulamalardaki önemli rollerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, polimerik davranışın karmaşıklığı ve mevcut deneyisel sonuçların sınırlı olması, yapısal model geliştirme sürecini zorlaştırmaktadır.

Uygun bir yapısal model geliştirmek için polimerlerde gözlenen bazı önemli özellikler dikkate alınmalıdır: Yüksek düzeyde doğrusal olmayan gerinim hızı bağımlılığı:

Polimerlerin mekanik davranışları, yükleme hızı değiştiğinde önemli ölçüde değişir. Bu durum, polimerlerin zamanla değişen yapısal özelliklerini yansıtır.

Doğrusal olmayan boşaltma: Polimerler, yükleme ve boşaltma döngüleri sırasında doğrusal olmayan bir davranış sergiler. Bu, malzemenin geçmiş yükleme tarihine bağlı olarak değişen gerilim ve gerinim ilişkilerini etkiler.

Hidrostatik basınçtan etkilenen akma: Polimerlerin akma davranışı, çevresel koşullardan, özellikle hidrostatik basınç gibi faktörlerden etkilenir. Bu durum, polimerlerin farklı ortamlardaki performansını anlamak için önemlidir.

Döngüsel gevşeme: Polimerlerin döngüsel yükleme altında yumuşama davranışları, malzemenin mekanik özelliklerini zamanla değiştirebilir ve bu durum döngüsel yükleme uygulamalarında dikkate alınmalıdır.

Sıfır gerilimde önemli toparlanma: Polimerlerin sıfır gerilim altında gösterdiği geri kazanım davranışı, özellikle deformasyon sonrası malzemenin eski haline dönme kapasitesi ile ilgilidir. Bu, malzemenin elastik ve viskoelastik özelliklerinin bir kombinasyonunu yansıtır.

Polimerlerin mekanik davranışlarını anlamak için bu özelliklerin dikkate alınması hem araştırma hem de uygulama açısından büyük önem taşır. Doğru yapılandırılmış modeller, polimerlerin performansını ve dayanıklılığını tahmin etmeye yardımcı olur ve bu da yeni tasarımlar geliştirilmesine olanak tanır.

Bu sayede, biyomedikal alanlarda kullanılan implantlardan otomotiv sektöründeki parçalara kadar geniş bir yelpazede polimer malzemelerin etkili bir şekilde kullanılmasına imkan sağlar. Ayrıca, bu tür araştırmaların sonuçları, malzeme biliminin yanı sıra mühendislik ve tasarım süreçlerini de geliştirebilir, böylece daha inovatif ve sürdürülebilir çözümler elde edilebilir. Polimerlerin mekanik davranışlarının daha iyi anlaşılması, hem endüstriyel hem de akademik alanda daha fazla araştırma ve yenilik için bir temel oluşturur.

PLA (Poli (Laktik Asit)) ve PLA/HA (Hidroksapatit takviyeli Poli (Laktik Asit)) polimerlerinin mekanik özelliklerini incelemek üzere gerçekleştirilen deneysel çalışma şu şekilde özetlenebilir:

2.1.1. Malzeme temini ve hazırlık

Poli (Laktik Asit) (PLA): PLA 4042D (yoğunluk: 1.24 g/cm³), NatureWorks LLC'den temin edilmiştir. Numuneler, 5,1 mm x 2,25 mm kesit alanına sahip olacak şekilde, enjeksiyon kalıplama makinesi Arburg 320C kullanılarak kalıplanmıştır.

Bifazik Sentetik Hidroksapatit: %70 Hidroksapatit (HA) ve %30 Beta Tri Kalsiyum Fosfat (β TCP) içeren seramik tozu, Ifgl Bio Ceramic Ltd. (Hindistan) firması tarafından sağlanmıştır. Bu nano seramik tozu, saf PLA ile karıştırılarak PLA/HA nanokompozitleri oluşturulmuştur. PLA/HA kompozitinin toplam ağırlığının %5'ine karşılık gelen oran ile hazırlanmıştır.

2.1.2. Mekanik testler

Test makinesi: Mekanik testler, boyun bölgesindeki uzunlamasına gerinimlerin kontrolü için bir elektro-mekanik sensörle donatılmış evrensel test makinesi olan Instron-5568 aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.3.) Çekme kuvveti, 5 kN'luk bir yük hücresi ile ölçülmüştür.

Deney koşulları: PLA ve PLA/HA nano-kompozit polimer numuneleri, 1 mm/dak hızda (gerinim hızı = 2×10^{-4} 1/s) yüklenmiştir. Deneyler, sırasıyla 23, 30, 35, 40, 45, 50 ve 55 °C'de, bir ısı hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.4.)

Deney öncesi hazırlık: Yüksek sıcaklıktaki deneylerde, her bir numune, belirlenen sıcaklıkta bir termal odada en az yarım saat ısıtılmış ve ardından test cihazına bağlanmadan önce 10 dakika boyunca dengelenmesi için bekletilmiştir.

Tekrar sayısı: Her test, sıfır bir numune ile yapıldı ve her bir koşul için en az iki kez tekrarlandı.



Şekil 2.3. Instron 3366 Çekme Test Cihazı



Şekil 2.4. Ölçümler



Şekil 2.5. Test numuneleri

Çekme ve basma deneyleri, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için en yaygın kullanılan test yöntemlerinden biridir. Bu testlerin yanı sıra, üç nokta eğme testleri de kullanılmakta olup, özellikle malzeme mühendisliği ve araştırma alanlarında kritik öneme sahiptir.

İnstron çekme-basma cihazı, dayanıklılık ve esneklik sağlamak amacıyla tasarlanmış olup, çeşitli malzemelerin test edilmesinde kullanılır. Bu cihazın özellikleri ve kullanım alanları aşağıda belirtilmiştir:

Genel özellikler:

Yük Kapasitesi: 100 kN

Dikey Test Alanı: 1430 mm

Yük Ölçüm Doğruluğu: $\pm 0,5\%$; 1/500 yük hücre kapasitesinin altında okunur.

Veri Edinimi Hızı: Yük, uzama ve gerilim kanallarında aynı anda 1 kHz hızına ulaşabilen veri edinimi.

Hız Aralığı: 0.00005 - 3000 mm/dak.

Düşük Taban Yüksekliği: Test alanına rahat erişim sağlar.

Özelleştirilebilir Kontrol Paneli: Kullanıcının ihtiyaçlarına göre uyarlanabilir.

Yazılım Uyumluluğu: Bluehill® 3 yazılımı ile uyumludur.

Otomatik Transdüzer Tanıma: Yük hücreleri ve ekstensometreler için otomatik tanıma imkanı.

Ekstra Yüksek ve Geniş Seçenekler: Farklı test ihtiyaçlarına yönelik geniş bir seçenek yelpazesi sunar.

İnstron çekme-basma cihazı, çeşitli malzemelerin test edilmesinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Öne çıkan uygulama alanları şunlardır:

Hava-Uzay Kompozitleri: Malzeme dayanıklılığının test edilmesi.

Metal Alaşımları: Mukavemet ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesi.

Kristalin Polimerler: Mekanik davranışların incelenmesi.

Çekme ve basma deneyleri, malzemelerin elastiklik modülü, akma noktası, dayanıklılık ve deformasyon özelliklerini belirlemek için kullanılır. Deneyler sırasında, test cihazının gövde sertliği, doğru modül ve gerilme değerlerinin elde edilmesinde önemli bir rol oynar. Özel tasarlanmış bileşenler (önceden yüklü yataklar, hassas top vidaları vb.) kullanılarak, test sırasında depolanan enerji minimuma indirilir, böylece daha iyi performans sağlanır.

İnstron çekme-basma test cihazı, yüksek hassasiyet ve doğruluk ile malzeme testleri yapmayı mümkün kılar. Bu cihazın sunduğu esneklik ve özelleştirilebilir özellikler, farklı mühendislik ve araştırma uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanılmasına olanak tanır. Polimerler ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini anlamak ve geliştirmek için bu testler kritik öneme sahiptir.

Çekme ve basma deneyleri, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan temel test yöntemleridir. Bu testler, malzemenin dayanıklılığı, elastikiyeti ve akma özellikleri gibi kritik parametrelerin ölçülmesine olanak tanır.

2.1.3. Test yöntemleri

Çekme Deneyleri:

Malzemenin uzama ve kopma noktalarını belirlemek için kullanılır.

Numune, iki uçtan çekilerek gerilme ve deformasyon ölçümleri yapılır.

Çekme testleri sırasında elde edilen veriler, gerilme-gerinim eğrileri oluşturmak için kullanılır, bu sayede malzemenin elastik modülü, akma noktası ve kopma dayanımı gibi özellikleri belirlenebilir.

Basma Deneyleri:

Malzemenin sıkıştırılma davranışını incelemek için gerçekleştirilir.

Numune, iki uçtan basınç uygulanarak test edilir.

Basma testleri, malzemenin sıkışma dayanımını ve deformasyon özelliklerini belirlemek için önemlidir.

Üç Nokta Eğme Testleri:

Malzemenin eğilme dayanımını ve elastik özelliklerini incelemek için kullanılır.

Test sırasında, numune üç nokta üzerinde desteklenir ve ortasından yük uygulanır. Bu sayede malzemenin eğilme direnci ölçülür.

Eğilme testleri, özellikle yapı malzemeleri ve kompozitler gibi uygulamalarda önemli bilgiler sağlar.

Üniversal test cihazları, çekme, basma ve eğilme testlerini gerçekleştirmek için kullanılan çok yönlü ve hassas makinelerdir. Bu cihazlar, aşağıdaki özelliklere sahiptir:

Yük Kapasitesi: Farklı malzemelerin test edilmesine olanak tanıyan geniş bir yük kapasitesine sahiptir.

Hız Kontrolü: Test esnasında yükleme hızının hassas bir şekilde ayarlanmasına olanak verir.

Veri Kaydı: Gerilme, gerinim ve uzama gibi verilerin kaydedilmesi ve analizi için entegre yazılımlar kullanılır.

Çeşitli Aksesuarlar: Testin gereksinimlerine göre farklı aksesuarlar (ekstensometreler, yük hücreleri vb.) ile donatılabilir.

Bu testler, malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, doğru test yöntemlerinin seçimi ve uygun cihazların kullanımı, malzeme araştırmaları ve geliştirmeleri için büyük bir rol oynar.



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. PLA'nın Tek Eksenli Yükleme ve Sabit Gerinim Seviyesinde Gevşeme Davranışı

Son yıllarda PLA polimerik malzemelerin döngüsel deformasyon ve yorulma davranışları üzerine birçok literatür çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, polimerlerin karmaşık davranışlarını daha iyi anlamak amacıyla hem deneysel hem de teorik bakış açılarıyla ele alınmıştır.

Çoğu çalışma, yalnızca gerilme kontrolü ile sınırlı kalmıştır.

Yükleme hızı, yükleme yolları, yükleme geçmişi gibi faktörler ve sünme-gevşeme etkileşimi üzerine çok az çalışma yapılmıştır.

Gerçek bileşen ömrünü belirlemek için döngüsel testlerin, sürünme ve yorulma etkileşimlerini ve karmaşık yükleme geçmişlerini içermesi gerekmektedir.

PLA numunelerinin gevşeme davranışını incelemek üzere aşağıdaki deneyler gerçekleştirilmiştir:

3.1.1. Tek eksenli çekme testleri:

Bu testler, farklı gerinim oranları kullanarak bir maksimum ($\epsilon_{\max}$) seviyeye kadar yüklemeyi içermektedir ($\epsilon_{\max} > \epsilon_{\min} > 0$).

Deneysel program, düşük gerilme seviyesi testleri için tipik tek döngü ($N = 1$) ve akma gerilmesini aşmayan maksimum şekil değiştirme ($\epsilon_{\max}$) değerleri ile yükleme deneyleri kapsamaktadır.

3.1.2. Tek eksenli çekme, yükleme-gevşeme testi:

Bu testler, ardışık yükleme ve gevşeme testlerini içerir.

Farklı stres seviyelerinde sürünme testleri de içermektedir; bu, polimer malzemelerin karmaşık yükleme geçmişleri altında nasıl davrandığını anlamaya yardımcı olmaktadır.

Bu deneyler, polimerik malzemelerin yük altındaki davranışları ve yükleme-gevşeme etkileşimleri üzerine değerli bilgiler sağlamaktadır. Geliştirilen bu test yöntemleri, malzeme mühendisliği ve tasarımı açısından kritik öneme sahip bilgiler sunarak, polimerlerin kullanım alanlarını ve dayanıklılığını artırma potansiyeli taşımaktadır. Bu tür kapsamlı incelemeler, polimerik malzemelerin uzun ömürlü ve güvenilir uygulamalar için nasıl optimize edilebileceği konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır.

3.2. Test Süreci ve Ölçüm Yöntemleri

Mekanik testler için kullanılan dambıl numuneleri, ASTM standardı D-638'ye uygun olarak tasarlanmış ve enjeksiyon kalıplama makinesi Arburg 320C ile üretilmiştir (Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2014). Test süreçleri, elektro mekanik sensörlere sahip olan Instron-5599 makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu makine, boyuna gerilimleri kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır.

Çekme kuvveti ölçümü: Deneylerde uygulanan çekme kuvveti, 5 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür.

Mühendislik Gerilmesi (σ): Eksenel kuvvetin hasar görmemiş numunelerin kesit alanına oranı, mühendislik gerilmesi (σ) olarak tanımlanmıştır.

Deney koşulları: Her test, oda sıcaklığında yeni bir örnek üzerinde gerçekleştirilmiş olup, işlemler en az iki kez tekrarlanmıştır. Bu tekrarlar, elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmak ve istatistiksel bir analiz yapabilmek amacıyla yapılmıştır.

Bu testler, polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Elde edilen mühendislik gerilmesi verileri, malzemelerin dayanıklılığı, deformasyon özellikleri ve genel performansı hakkında önemli bilgiler sunar. Aynı zamanda, testlerin tekrarlanabilirliği, malzeme davranışlarının daha doğru bir şekilde karakterize edilmesine olanak tanır ve mühendislik uygulamalarında bu malzemelerin güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar.

3.3. Tek Eksenli Çekme-Gevşeme Testleri

Gevşeme testleri, polimerlerin zamanla gerilme altında nasıl davrandığını anlamak için önemli bir yöntemdir. Bu testler, polimerlerin mekanik davranışlarını, sıcaklık değişimlerinin etkilerini ve malzeme özelliklerini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir. Aşağıda, yapılan gevşeme testlerinin koşulları ve elde edilen bulgular detaylandırılmıştır:

İlk seri testler, gerinim kontrollü bir program ile gerçekleştirilen çekme yüklemesi testinden oluşmuştur. Bu testlerde belirlenen gerinim değerleri ve deneysel koşullar şu şekilde özetlenebilir:

Minimum Gerinim ($\epsilon_{\min}$): 0,015

Maksimum Sıcaklık ($\epsilon_{\max}$): 23, 30, 35, 40, 45, 50 °C

Çaprazkafa Hızı: 1 mm/dak

Gerinim Hızı ($\dot{\epsilon}$): $1,7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

Gevşeme test süresi: 20 dakika

Her testte bir numune, maksimum gerinim ($\epsilon_{\max}$) değerine kadar gerilmiştir. Ardından, gerinim sabit tutularak 20 dakika gevşemeye bırakılmıştır (Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures, 2021).

Testler, her biri yükleme-gevşeme döngüsünden oluşan bir program ile gerçekleştirilmiştir.

Seçim Kriterleri:

Maksimum gerinim ($\epsilon_{\max} = 0,015$) iki gereklilik arasında bir uzlaşma ile seçilmiştir:

Mekanik Tepki Analizi: Minimum gerinim ($\epsilon_{\min}$) değerinin, maksimum gerinim ($\epsilon_{\max}$) üzerindeki etkisinin analiz edilebilmesi için $\epsilon_{\max}$ mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Viskoplastik Davranışın Hariç Tutulması: $\epsilon_{\max}$, polipropilenin akma gerilimi ($\epsilon_y \approx 0,025$) değerinin altında olmalı, böylece akma sonrası bölgedeki viskoplastik davranışın analizinin hariç tutulması sağlanmalıdır.

Sonuçlar, PLA ve PLA-HA numuneleri için grafikler halinde sunulmuştur.

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2: PLA için gerilme-gerinim eğrileri

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4: PLA-HA için gerilme-gerinim eğrileri

Eğriler, önce gerilme-gerinim ilişkisini ve ardından gerilmenin (σ) gevşeme süresine göre değişimini göstermektedir. Logaritmik bir ölçekte, $\log_{10}$ kullanılarak yarı logaritmik bir ölçek oluşturulmuştur.

Bu testlerden elde edilen veriler, aşağıdaki şekilde yorumlanmıştır:

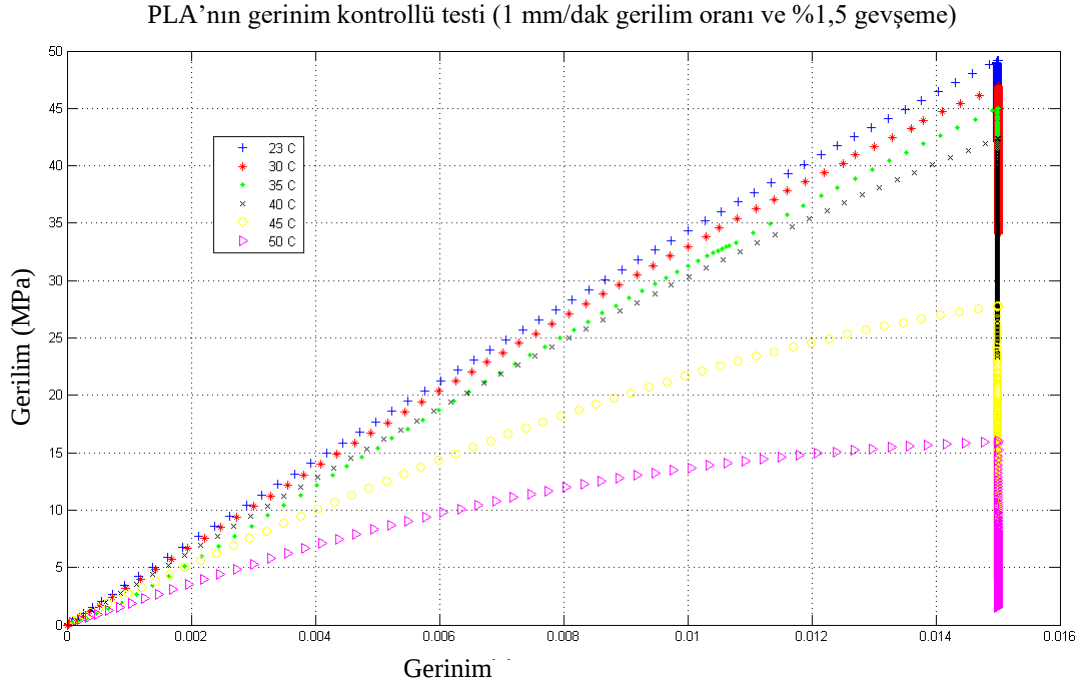
Gerilme azalması: Tüm sıcaklık seviyelerinde, gerilme (σ) zamanla monoton bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, basit gevşeme davranışını göstermektedir.

Düşük sıcaklık etkisi: Ortam sıcaklığı $T \leq 35$ °C olduğunda, gerilme seviyesindeki düşüş oldukça azdır. Örneğin, oda sıcaklığında ($T = 23$ °C), gerilme sadece %13 azalmaktadır.

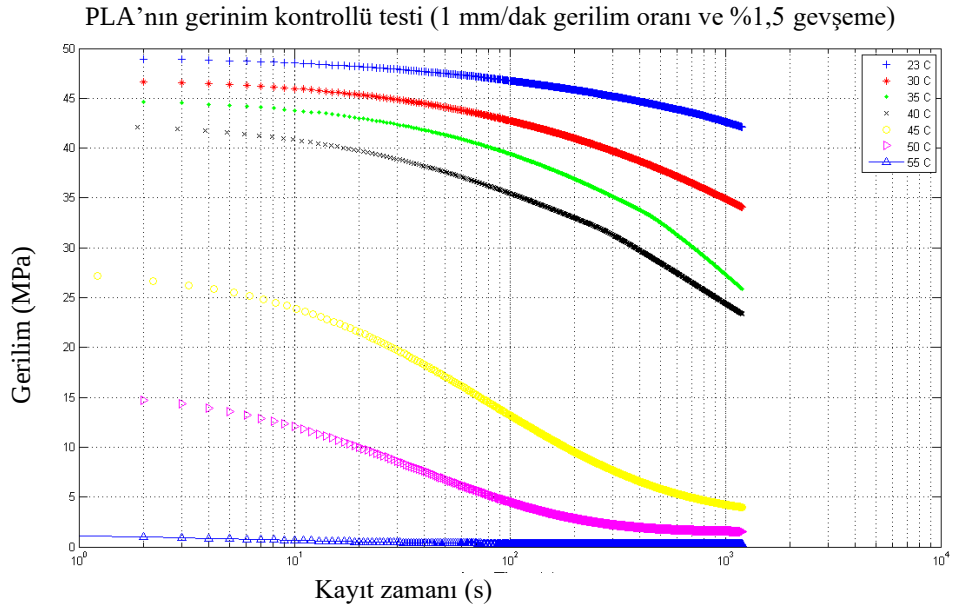
Yüksek sıcaklık etkisi: $T > 35$ °C durumunda gerilme kaybı daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle $T = 50$ °C’de, 20 dakikalık gevşeme süresi sonunda gerilme kaybolmaktadır.

Sıcaklık artışı: Verilen bir gevşeme süresi (τ) için, sıcaklıktaki bir artış, gerilme üzerinde önemli bir azalmaya yol açmaktadır. Bu, birkaç kat daha fazla gerilme kaybı anlamına gelmektedir.

Bu bulgular, polimerlerin mekanik davranışlarının zaman ve sıcaklık ile nasıl etkileşime girdiğini göstermektedir. Özellikle, düşük sıcaklıklarda gerilme seviyesinin azaldığı, ancak yüksek sıcaklıklarda belirgin bir kaybın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, polimerlerin kullanım koşulları ve uygulama alanlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Gevşeme testleri, malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları için kritik bilgiler sağlamaktadır.

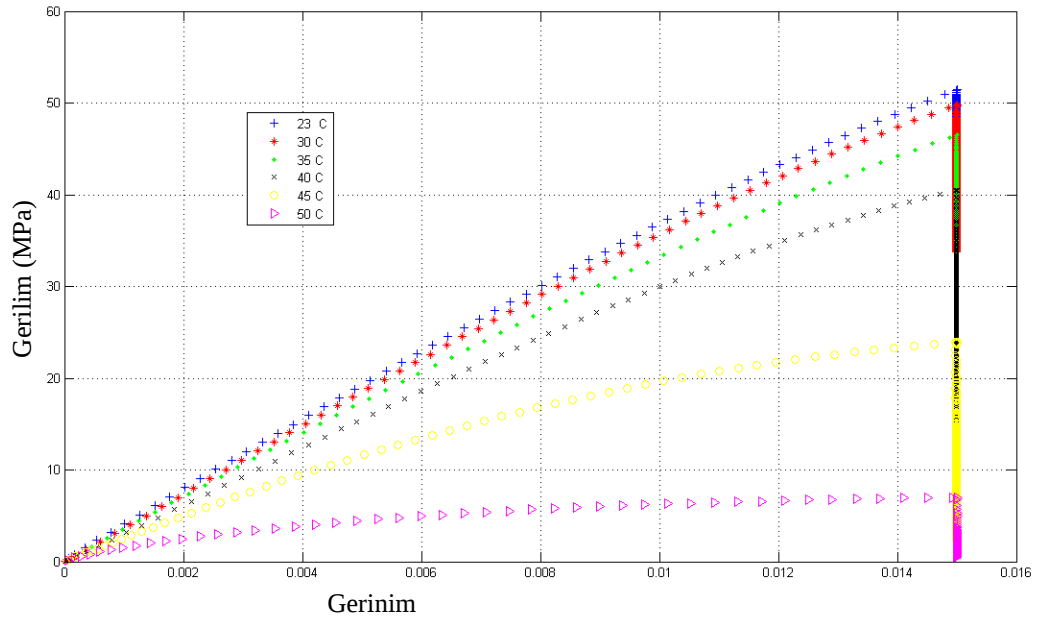


Şekil 3.1. PLA için Gerilim (σ) - Gerinim (ϵ) grafiği, farklı sıcaklıklardaki yükleme testlerini gösterir.



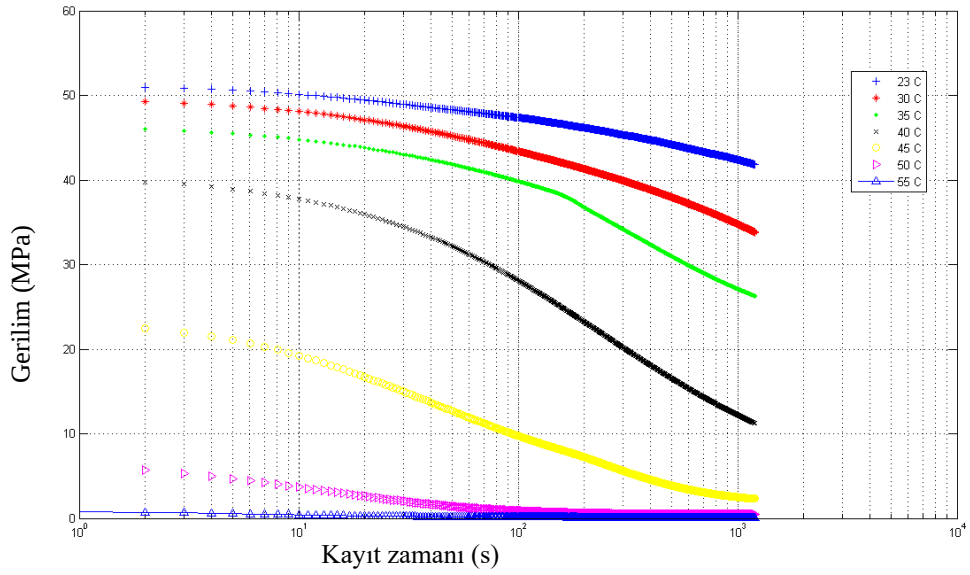
Şekil 3.2. PLA için Gerilim (σ) - Zaman (t) grafiği, her sıcaklık için gevşeme sürecindeki gerilme değişimlerini gösterir.

PLA-HA kompozitinin gerinim kontrollü testi (1 mm/dak gerilim oranı ve %1,5 gevşeme)



Şekil 3.3. PLA-HA için Gerilim (σ) - Gerinim (ϵ) grafiği, farklı sıcaklıklardaki yükleme testlerini gösterir.

PLA-HA kompozitinin gerinim kontrollü testi (1 mm/dak gerilim oranı ve %1,5 gevşeme)



Şekil 3.4. PLA-HA Gerilim (σ) - Zaman (t) grafiği, her sıcaklık için gevşeme sürecindeki gerilme değişimlerini gösterir.

3.4. Temel Eğrilerin Oluşturulması

Polimerik malzemelerin temel eğrileri, bu malzemelerin mekanik ve termal özelliklerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Bu eğriler, polimerlerin viskoelastik davranışını, stres (gerilme) ve deformasyon (gerinim) ilişkisini, zaman ve sıcaklık

etkilerini yansıtır. İşte polimerik malzemelerin temel eğrileri hakkında bazı ana noktalar:

Gevşeme Modülü Eğrisi ($E(t)$): Gevşeme modülü, belirli bir gerinim altında zamana bağlı olarak malzemenin gösterdiği gerilme değerini tanımlar. Bu eğri, malzemenin viskoelastik davranışının zamana göre değişimini gözler önüne serer. Genellikle gerilmenin zaman fonksiyonu olarak çizilir.

Sünme Kompliyansı Eğrisi ($C(t)$): Sünme kompliyansı, sabit bir gerilme altında zamanla ortaya çıkan deformasyonu ifade eder. Yani, malzeme üzerindeki sürekli bir gerilme uygulandığında, zamanla ne kadar deformasyona uğradığını gösterir.

Zaman-Sıcaklık Süperpozisyonu: Polimerlerin viskoelastik davranışı, zaman ve sıcaklık ile ilişkili olarak değişir. Zaman-sıcaklık süperpozisyonu, belirli sıcaklıklarda elde edilen verilerin, daha geniş bir zaman aralığında geçerli olacak şekilde bir araya getirilmesini sağlar. Bu, farklı sıcaklıklardaki eğrilerin kaydırılarak tek bir temel eğri elde edilmesine olanak tanır.

WLF Denklemi: Williams-Landel-Ferry denklemi, kaydırma faktörünü sıcaklık ile ilişkilendiren bir modeldir. Bu denklem, polimerlerin zaman-sıcaklık kaydırma faktörlerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılır.

Geçiş Noktası: Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), malzemenin elastik davranıştan viskoelastik davranışa geçtiği noktadır. Bu sıcaklık, polimerlerin mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar ve temel eğrilerde belirgin bir etki yaratır.

Çekme ve Basma Eğrileri: Polimerlerin çekme ve basma testleri sonucunda elde edilen eğriler, malzemenin elastik ve plastik deformasyon özelliklerini ortaya koyar. Bu eğriler genellikle gerilme-gerinim grafikleri olarak sunulur.

Yükleme Geçmişi ve Tarihsel Etkiler: Polimerlerin mekanik davranışları, yükleme geçmişine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Yani, malzemenin daha önceki yüklemeleri ve bu yüklemelere bağlı deformasyonları, gelecekteki mekanik tepkilerini etkileyebilir. Bu temel eğriler, polimerik malzemelerin mühendislik uygulamalarında doğru bir şekilde tasarım ve analiz yapabilmek için gereklidir. Bu eğrilerin

belirlenmesi, polimerlerin davranışını modellemek ve simüle etmek için hayati öneme sahiptir.

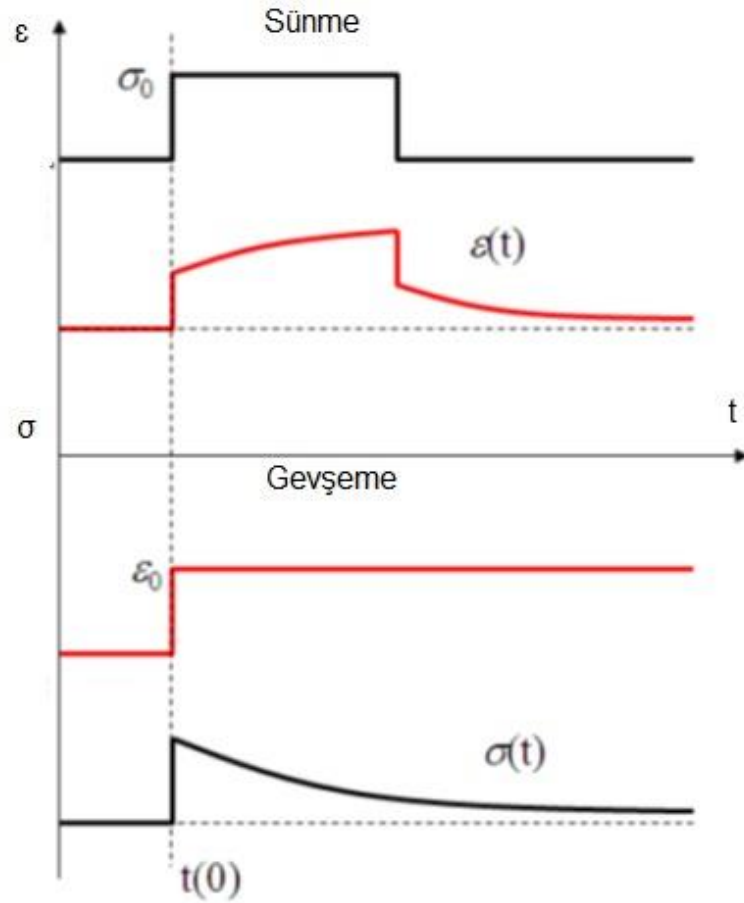
Zamana ve sıcaklığa bağlı elastiklik modülünün (viskoelastik) ölçümü, polimerlerin mekanik davranışını anlamak ve malzeme özelliklerini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Bu ölçüm genellikle iki ana test yöntemi ile gerçekleştirilir: sünme testi ve gerinim gevşeme testi.

Sünme testinde, numuneye anlık olarak sabit bir gerilme (σ) uygulanır. Bu gerilme altında, zamanın bir fonksiyonu olarak gerinim (ϵ) ölçülür. Zamanla birlikte, numunenin gerinim değerinin nasıl değiştiği izlenir. Bu test, malzemenin zamanla nasıl deformasyona uğradığını ve sabit bir gerilme altında ne kadar süreyle dayanabileceğini belirlemeye yardımcı olur.

Gerinim gevşeme testinde, numuneye sabit bir gerinim (ϵ) seviyesi uygulanır. Bu durumda, uygulanan gerinim seviyesinde ortaya çıkan gerilme (σ) değişimi zamanla izlenir. Bu test, malzemenin sabit bir deformasyon altında zamanla nasıl bir gerilme kaybı yaşadığını değerlendirmek için kullanılır.

Bu testler, belirli bir sıcaklık aralığında ve çeşitli sıcaklık değerlerinde tekrarlanarak tam bir zaman ve sıcaklığa bağlı veri seti elde etmek amacıyla gerçekleştirilir. Böylece, malzemenin mekanik özellikleri ve viskoelastik davranışları hakkında daha kapsamlı bir anlayış geliştirilir.

Bu testlerin sonuçları, genellikle gerilme-gerinim (σ - ϵ) veya gerilme-zaman (σ - t) grafiklerinde gösterilir. Örneğin, Şekil 3.5'te, belirli bir sıcaklık aralığında elde edilen verilerle zaman ve sıcaklığa bağlı elastiklik modülündeki değişimler açıkça izlenebilir. Bu grafikler, malzeme mühendisliğinde ve biyomedikal uygulamalarda malzeme seçiminde önemli bir rol oynar (Dong vd., 2024; Necmi Dusunceli vd., 2017; Kühl ve Muñoz-Rojas, 2019; McCabe, Merkle, ve Wallin, 2005; Povolo ve Hermida, 1991).



Şekil 3.5. Tipik sünme ve gevşeme eğrileri. Viskoelastik özellikleri belirlemek üzere uygulanırlar.

Polimerlerin viskoelastik davranışını anlamak için sünme kompliyansı ($C(t)$) ve gevşeme modülü ($E(t)$) gibi iki temel özellik üzerinde durmak önemlidir. Her iki özellik de malzemenin mekanik davranışını tanımlamak için kritik öneme sahiptir, ancak bu özelliklerin kullanımı ve uygulanabilirliği farklılık gösterebilir.

Sünme Kompliyansı ($C(t)$), sabit bir gerilme uygulandığında, zaman içinde ortaya çıkan gerinim değişimini ifade eder. Sürünme kompliyansı, özellikle düşük sıcaklık ve kısa zaman ölçekleri için yararlıdır.

Gevşeme Modülü ($E(t)$), sabit bir gerinim uygulandığında, zamanla değişen gerilme değerlerini ifade eder. Gevşeme modülü, genellikle mühendislik uygulamalarında ve ticari sonlu eleman analiz yazılımlarında daha yaygın bir şekilde kullanılır (Fu vd., 2014; Kühl ve Muñoz-Rojas, 2019; Rey Calderón ve Díaz Díaz, 2018; Van Melick vd., 2003; Y. Zhang ve Jar, 2016).

Gevşeme modülünün temel eğrisi, ticari yazılımlarda yaygın olarak kullanıldığından, mühendislik uygulamalarında genellikle tercih edilen bir ölçüdür. Ancak, belirli deneysel kurulumlar için sünme kompliyansının uygulanması daha kolay olabilir. Bu nedenle, iki özellik arasında dönüşüm gerektiren bir yöntem geliştirilmiştir.

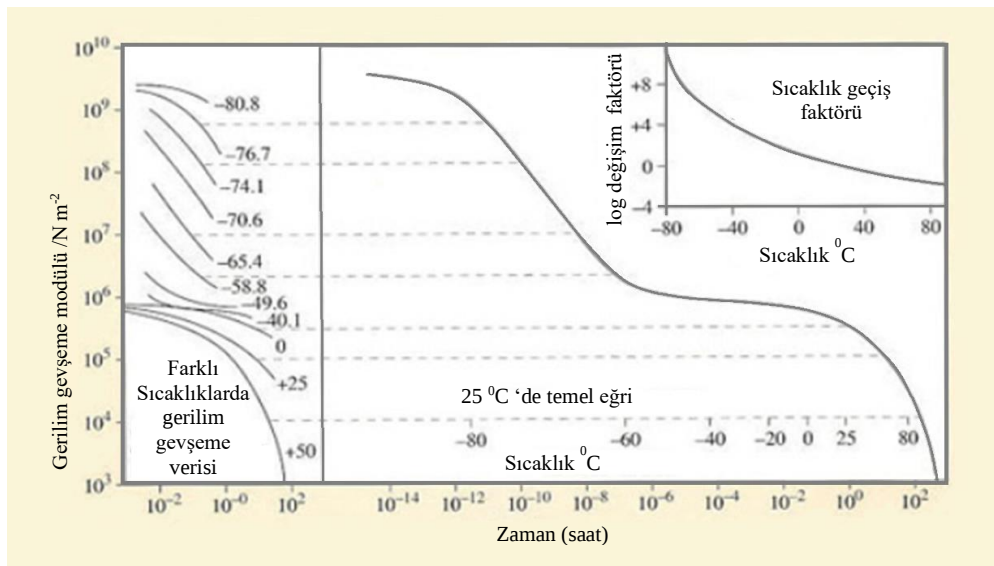
Sürünme kompliyansı ve gevşeme modülü, benzer moleküler mekanizmaların tezahürü olduğundan, evrişim integrali ile ilişkilendirilebilir. Bu ilişki, her iki özellik arasında dönüşüm yapmayı mümkün kılar.

Belirli bir sıcaklık seviyesinde elde edilen gevşeme verileri, yatay kaydırma yöntemi ile tek bir "temel eğriye" dönüştürülebilir. Bu işlem şu şekilde gerçekleşir:

Referans eğrisi seçimi: İlk olarak, bir referans eğrisi belirlenir.

Eğri kaydırma: Geniş bir log-zaman aralığını kapsayacak şekilde diğer eğriler yatay olarak kaydırılır. Örneğin, referans sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda elde edilen eğriler, daha uzun zaman dilimlerini ifade ettiklerinden sola kaydırılmalıdır.

Bu kaydırma işlemi, polimerin farklı sıcaklık veya zaman ölçeklerinde viskoelastik davranışını benzersiz bir şekilde tanımlamak için kullanılır. Sonuç olarak, polimerlerin mekanik davranışlarını daha iyi anlamak ve mühendislik uygulamalarında etkili bir şekilde kullanmak için bu tür bir modelleme kritik öneme sahiptir (Bauwens-Crowet, 1973; Cooper-White ve Mackay, 1999; Srithep vd., 2013).



Şekil 3.6. Polibütadin'e ait örnek bir temel eğri (Povolo ve Hermida, 1991).

Viskoelastik polimerik malzemelerin frekans davranışı, önemli bir araştırma konusudur ve bu alanda önemli çalışmalar, Williams, Landel ve Ferry tarafından gerçekleştirilmiştir. Zaman-sıcaklık süperpozisyonu, deneysel olarak elde edilen frekans değerlerinin yaklaşık 20 yıldan 40 yıla kadar uzatılmasına olanak tanır. Bu süreçte elde edilen gerinim veya gerilme değerleri, sırasıyla sünme kompliyansı veya gevşeme modülü hesaplamak için kullanılabilir (Srithep vd., 2013).

Farklı frekanslarda elde edilen bağımsız izotermal DMA eğrileri, seçilen bir referans sıcaklığa doğru kaydırılarak izafi bir temel eğri oluşturur. Bu temel eğri, polimerlerin uzun dönem davranışlarını ve gevşeme özelliklerini tanımlamak için gereklidir.

Yapılan testlere bağlı olarak, sünme kompliyansı $C(t)$ veya gevşeme modülü $E(t)$ aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

$$\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = C(t) \quad , \quad \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = E(t) \quad (1)$$

Her iki özellik, malzeme davranışını eksiksiz ve doğru bir şekilde tanımlar. Ancak, gevşeme modülünün ana eğrisi ANSYS gibi ticari sonlu eleman analiz yazılımlarında daha yaygın bir şekilde kullanıldığı için, sünme kompliyansı yerine gevşeme modülünün ana eğrisinin tercih edilmesi yaygındır. Bununla birlikte, belirli bir deneysel kurulum için sünme kompliyansını doğru şekilde uygulamak daha basit olabilir; bu nedenle, bir dönüştürme yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Hem sünme kompliyansı hem de gevşeme modülü, aynı moleküler mekanizmaların yansımalarıdır ve bu nedenle evrişim integrali ile bağlantılıdır.

$$\int_0^t C(t - \tau)E(\tau)d\tau = t \quad (2)$$

Sıcaklık, polimerlerin visko-elastik yanıt hızını önemli ölçüde etkiler, bu nedenle visko-elastik özelliklerin geniş bir sıcaklık aralığında değerlendirilmesi gereklidir. Termoreolojik olarak basit bir varsayıma dayanarak, zaman ve sıcaklık arasındaki ilişki, basit modellerle tanımlanabilir. Bu varsayıma göre, sıcaklığın düşmesinin etkisi, gevşeme modülü eğrisinin (log zaman eksenine göre çizilmiş) şeklinin değişmeden sola kaydırılmasını sağlar. Zaman-sıcaklık kaydırma faktörü $a(T)$, yatay kayma katsayısı olarak tanımlanır. Bu katsayı, belirli referans sıcaklıklarında T_{ref} eğrisini elde

etmek için, belirli bir T sıcaklığında ölçülen gevşeme eğrisine E(t)-log zaman skalasında uygulanır.

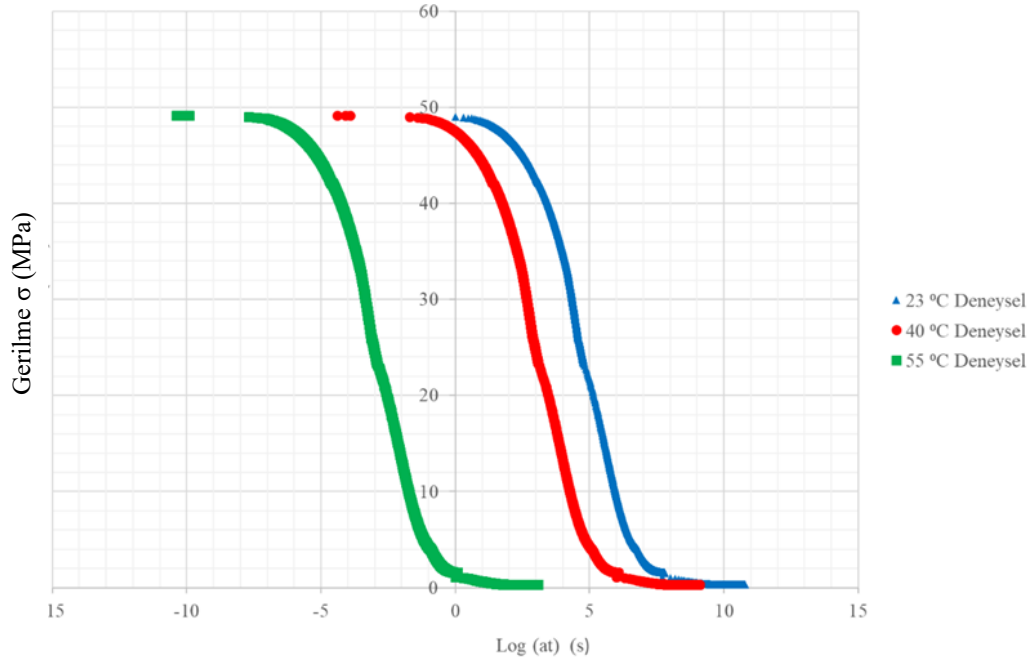
$$\log(a_t) = \log(t(T)) - \log(t(T_{ref})) \quad (3)$$

Williams-Landel-Ferry (WLF) denklemi, kaydırma faktörünün sıcaklıkla ilişkisini açıklamak için sıkça kullanılır ve genellikle aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\log(a_t) = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (4)$$

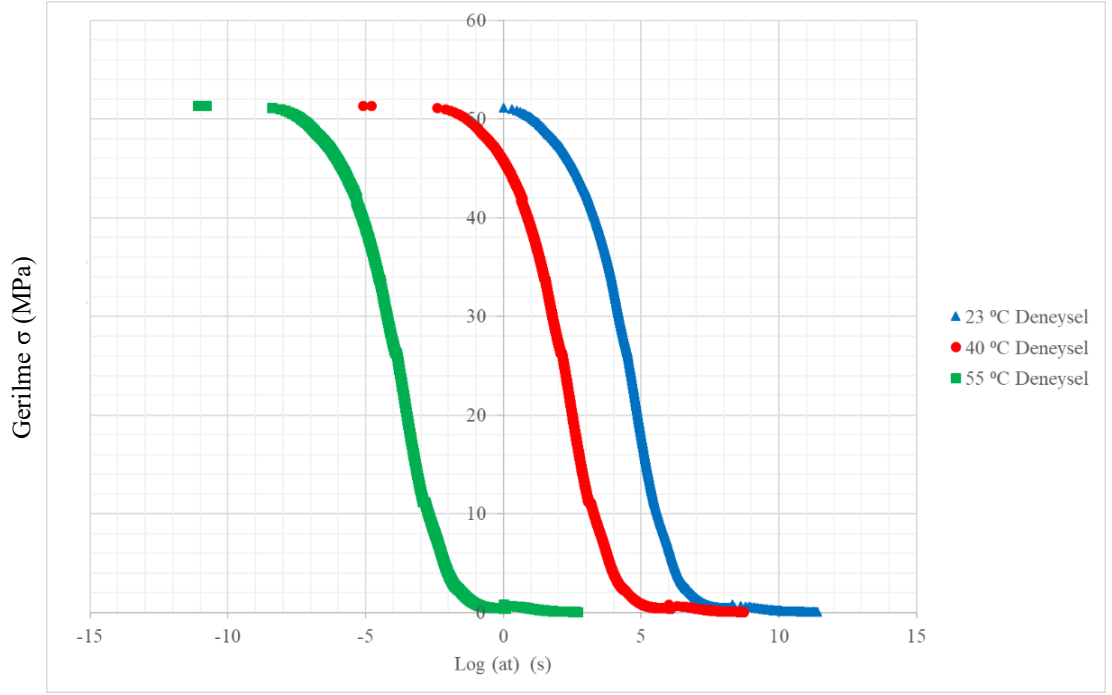
Burada C_1 ve C_2 , malzemenin özelliklerine ve seçilen referans sıcaklığı T_{ref} 'ye bağlı olan malzeme sabitleridir. $a(T)$ kaydırma faktörünü ve T sıcaklığı ifade eder. Bu sabitler, polimerin viskoelastik davranışını etkileyen fiziksel ve kimyasal özelliklerini yansıtır. Her malzeme için bu değerler farklılık gösterebilir, bu nedenle deneysel verilerle belirlenmesi gerekmektedir. WLF denklemi, polimerlerin sıcaklığa bağlı viskoelastik özelliklerini anlamak ve tahmin etmek için etkili bir araç sağlar.

Şekil 3.2'deki gevşeme verileri kullanılarak, üstdüşüm prensibi ile PLA için gevşeme gerilmesi değişiminin geçiş faktörüne (shift factor) bağlı olarak temel bir eğri oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Bu temel eğri, polimerin viskoelastik davranışını tanımlamak için önemli bir referans sağlar ve farklı sıcaklıklarda elde edilen gevşeme verilerini tek bir eğri altında birleştirmek için kullanılır. Bu sayede, polimerin uzun dönem davranışı hakkında daha fazla bilgi elde edilebilir.



Şekil 3.7. PLA için değişik referans sıcaklıklarında meydana getirilmiş temel eğriler Gerilme σ 'ye karşı logaritmik geçiş faktörü şeklinde gösterilmiştir.

PLA ve PLA-HA nanokompozitine ait temel eğriler, daha önce açıklanan yöntemle Şekil 3.4'teki gevşeme verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu süreç, elde edilen gevşeme verilerinin geçiş faktörüne göre kaydırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, gerilme-geçiş faktörü eğrisi Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de sunulmaktadır. Bu eğriler, PLA ve PLA-HA nanokompozitinin viskoelastik davranışı ile sıcaklık değişimlerinin etkilerini anlamak için önemli bilgiler sağlar. Eğrinin analizi, malzemenin performansını optimize etmek ve uygulama alanlarında daha iyi sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.8. PLA-HA için değişik referans sıcaklıklarında meydana getirilmiş temel eğriler Gerilme σ 'ye karşı logaritmik geçiş faktörü şeklinde gösterilmiştir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tek eksenli gerilim altında PLA ve PLA-HA kompozit malzemelerinin gevşeme davranışı üzerinde sıcaklık etkisi ve temel eğrilerinin oluşturulması üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, sırasıyla 23 °C, 40 °C ve 55 °C sıcaklıkları referans alarak üç farklı temel eğri, gerinim gevşemesi ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi açıklamak için zaman-sıcaklık üst düşüm prensibi kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen gevşeme verileri, farklı sıcaklıklarda elde edilen temel eğrilerin geçiş faktörlerindeki değişim açısından PLA ve PLA-HA kompozitleri için benzer değerler göstermiştir.

Ayrıca, hem PLA hem de PLA-HA kompozit için her bir sıcaklıkta geçiş faktörünün büyüklüğü, 55 °C için görece baskın bir değerde bulunmuştur. Bu durum, PLA'nın camsı geçiş sıcaklığına yakın olması nedeniyle geçiş faktöründeki belirgin sıçramayı açıklamak için bir sebep olarak değerlendirilebilir. Bu sonuçlar, polimerlerin sıcaklığa bağlı viskoelastik davranışlarını daha iyi anlamak ve uygulama alanlarında optimize edilmiş malzeme seçimleri yapmak açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Kurucu modeller, özellikle birleşik durum değişken teorileri, birçok malzeme sabiti içerir. Bu modellerde malzeme parametrelerinin belirlenmesi, önemli bir aşamadır ve burada deneysel verilere olan ihtiyaç ön plana çıkmaktadır. Polimerik malzemelerle ilgili yeterli tek eksenli veri mevcut olsa da, bu malzemelerin hasar-sünme ve gevşeme etkileşim davranışları yeterince incelenmemiştir. Bu nedenle, malzeme tepkisini simüle edebilmek için, malzeme parametreleri yalnızca tek eksenli döngüsel verilerle değil, aynı zamanda döngüsel-gevşeme verileri ile de belirlenmelidir. Bu bağlamda, döngüsel sürünme ve gevşeme deneylerinin gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu tür deneyler, malzeme davranışının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayarak, polimerlerin mekanik özelliklerinin optimize edilmesine yardımcı olacaktır.

Geliştirilmiş malzeme modelinin, modelin oluşturulmasında kullanılan farklı yükleme koşullarında yanıtının ne kadar iyi tahmin edilebildiğini belirlemek amacıyla, PLA üzerinde çeşitli deformasyon tipleri altında testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler, modelin farklı deformasyon oranlarında malzeme davranışını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Sonuçlar, modelin yükleme koşullarına göre PLA mekanik

yanıtını ne ölçüde yansıttığını ortaya koymakta ve malzeme modelinin geçerliliğini değerlendirmeye yardımcı olmaktadır.

Gevşeme davranışının, maksimum gerinim ile mevcut gerinim seviyesi arasındaki farktan etkilendiği gözlemlenmiştir. Gerinim artışıyla birlikte, gevşeme davranışı basit gevşeme davranışından ters sürünme/gevşeme davranışına dönüşmektedir. Bu geçiş, malzemenin viskoelastik özelliklerinin zamanla nasıl değiştiğini ve gerilme koşullarına nasıl tepki verdiğini göstermektedir. Özellikle, belirli bir gerinim seviyesinin üzerindeki yüklemeler, malzemenin geri kazanım yeteneğini ve deformasyon mekanizmalarını etkileyen karmaşık bir etkileşim sürecini tetikleyebilir.

Gevşeme davranışının, maksimum gerinim ile mevcut gerinim seviyesi arasındaki farktan etkilendiği gözlemlenmiştir. Gerinim artışı arttıkça, gevşeme davranışı basit gevşeme davranışından ters sürünme/gevşeme davranışına değişir.

KAYNAKLAR

- Ainali, N. M., Kalaronis, D., Evgenidou, E., Kyzas, G. Z., Bobori, D. C., Kaloyianni, M., Lambropoulou, D. A. (2022). Do poly(lactic acid) microplastics instigate a threat? A perception for their dynamic towards environmental pollution and toxicity. *Science of The Total Environment*, 832, 155014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155014>
- Amoedo, J., ve Lee, D. (1992). Modeling the uniaxial rate and temperature dependent behavior of amorphous and semicrystalline polymers. *Polymer Engineering & Science*, 32(16), 1055–1065. <https://doi.org/10.1002/pen.760321603>
- Ariyama, T. (1994). Viscoelastic-plastic deformation behavior of polypropylene after cyclic preloadings. *Polymer Engineering & Science*, 34(17), 1319–1326. <https://doi.org/10.1002/pen.760341704>
- Baiardo, M., Frisoni, G., Scandola, M., Rimelen, M., Lips, D., Ruffieux, K., ve Wintermantel, E. (2003). Thermal and mechanical properties of plasticized poly(L-lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science*, 90(7), 1731–1738. <https://doi.org/10.1002/app.12549>
- Balla, E., Daniilidis, V., Karlioti, G., Kalamas, T., Stefanidou, M., Bikiaris, N. D., Bikiaris, D. N. (2021). Poly(lactic Acid): A versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties from monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications. *Polymers*, 13(11), 1822. <https://doi.org/10.3390/polym13111822>
- Banerjee, R., ve Ray, S. S. (2021). An overview of the recent advances in polylactide-based sustainable nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*, 61(3), 617–649. <https://doi.org/10.1002/pen.25623>
- Bauwens-Crowet, C. (1973). The compression yield behaviour of polymethyl methacrylate over a wide range of temperatures and strain-rates. İçinde *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* (C. 8).
- Baykal, D., Siskey, R. S., Underwood, R. J., Briscoe, A., ve Kurtz, S. M. (2016). The Biotribology of PEEK-on-HXLPE bearings is comparable to traditional bearings on a multidirectional pin-on-disk tester. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 474(11). <https://doi.org/10.1007/s11999-016-4989-7>
- Bennin, T., Ricci, J., ve Ediger, M. D. (2019). Enhanced segmental dynamics of Poly(Lactic Acid) glasses during constant strain rate deformation. *Macromolecules*. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b01363>
- Bergström, J. S., Rimnac, C. M., ve Kurtz, S. M. (2003). Prediction of multiaxial mechanical behavior for conventional and highly crosslinked UHMWPE using a hybrid constitutive model. *Biomaterials*, 24(8), 1365–1380. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00514-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00514-8)

- Bergström, Jörgen S., ve Hayman, D. (2016). an overview of mechanical properties and material modeling of polylactide (PLA) for medical applications. *Annals of Biomedical Engineering*, 44(2), 330–340. <https://doi.org/10.1007/s10439-015-1455-8>
- Beslikas, T., Gigis, I., Goullos, V., Christoforides, J., Papageorgiou, G. Z., ve Bikiaris, D. N. (2011). Crystallization study and comparative in vitro–in vivo hydrolysis of PLA reinforcement ligament. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(10), 6597–6618. <https://doi.org/10.3390/ijms12106597>
- Bikiaris, N. D., Koumentakou, I., Samiotaki, C., Meimaroglou, D., Varytimidou, D., Karatza, A., Papageorgiou, G. Z. (2023). Recent advances in the Investigation of Poly(LLactic Acid) (PLA) nanocomposites: Incorporation of various nanofillers and their properties and applications. *Polymers*, 15(5), 1196. <https://doi.org/10.3390/polym15051196>
- Bobori, D. C., Dimitriadi, A., Feidantsis, K., Samiotaki, A., Fafouti, D., Sampsonidis, I., Kaloyianni, M. (2022). Differentiation in the expression of toxic effects of polyethylene-microplastics on two freshwater fish species: Size matters. *Science of The Total Environment*, 830, 154603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154603>
- Bobori, D. C., Feidantsis, K., Dimitriadi, A., Datsi, N., Ripis, P., Kalogiannis, S., Kaloyianni, M. (2022). dose-dependent cytotoxicity of polypropylene microplastics (PP-MPs) in two freshwater fishes. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 13878. <https://doi.org/10.3390/ijms232213878>
- Bonet, J. (2001). Large strain viscoelastic constitutive models. *International Journal of Solids and Structures*, 38(17), 2953–2968. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00215-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00215-8)
- Brusselle-Dupend, N., ve Cangémi, L. (2008). A two-phase model for the mechanical behaviour of semicrystalline polymers. Part I: Large strains multiaxial validation on HDPE. *Mechanics of Materials*, 40(9), 743–760. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.03.011>
- Caelers, H. J. M., Govaert, L. E., ve Peters, G. W. M. (2016). The prediction of mechanical performance of isotactic polypropylene on the basis of processing conditions. *Polymer*, 83, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.12.001>
- Chaboche, J. L. (1989). Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, 5(3), 247–302. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0749-6419(89)90015-6)
- Chen, K., Kang, G., Yu, C., ve Jiang, H. (2019). Effect of crystalline content on ratchetting of ultra-high molecular weight polyethylene polymers: Experimental investigation and constitutive model. *Mechanics of Materials*, 133(March), 37–54. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.03.007>

- Cooper-White, J. J., ve Mackay, M. E. (1999). Rheological properties of poly(lactides). Effect of molecular weight and temperature on the viscoelasticity of poly(l-lactic acid). *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 37(15), 1803–1814. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(19990801\)37:15<1803::AID-POLB5>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0488(19990801)37:15<1803::AID-POLB5>3.0.CO;2-M)
- Darnell, M. C., Sun, J. Y., Mehta, M., Johnson, C., Arany, P. R., Suo, Z., ve Mooney, D. J. (2013). Performance and biocompatibility of extremely tough alginate/polyacrylamide hydrogels. *Biomaterials*, 34(33). <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.06.061>
- Day, J. S., MacDonald, D. W., Ramsey, M. L., Abboud, J. A., ve Kurtz, S. M. (2020). Quantitative ultrahigh-molecular-weight polyethylene wear in total elbow retrievals. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 29(11). <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.03.026>
- Dong, W., Ma, F., Fu, Z., Qin, W., Qi, C., He, J., ve Li, C. (2024). Construction and examination of temperature master curve for asphalt with different aging extents. *Fuel*, 370, 131819. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131819>
- Drozdov, A. D., ve Dusunceli, N. (2012). Inverse relaxation in polypropylene. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 21(10), 701–711. <https://doi.org/10.1007/s13726-012-0077-3>
- Drozdov, A. D., ve Dusunceli, N. (2013). Modeling of multi-cycle deformation of polymers with various deformation programs. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 9(1), 4–22. <https://doi.org/10.1108/15736101311329133>
- Du, M., Chen, J., Liu, K., Xing, H., ve Song, C. (2021). Recent advances in biomedical engineering of nano-hydroxyapatite including dentistry, cancer treatment and bone repair. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108790. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108790>
- Dusunceli, N., Drozdov, A. D., Theilgaard, N., ve Dusunceli, N. (2013). Thermo-mechanical response of poly (lactic acid)/hydroxyapatite nanocomposites: Observations and modeling within the overstress concept. *Journal of Nanostructured Polymers and Nanocomposites*, 9(2), 31–35.
- Dusunceli, N., Sanporean, C. G., Drozdov, A. D., de Claville Christiansen, J., ve Comanici, F.-E. (2021). Mechanical and microstructural characterization of poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels and its nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. <https://doi.org/10.1177/1464420720988301>
- Dusunceli, Necmi. (2010a). Modeling finite deformation behavior of semicrystalline polymers under uniaxial loading-unloading. *Journal of Elastomers and Plastics*, 42(4), 347–364. <https://doi.org/10.1177/0095244310368126>

- Dusunceli, Necmi. (2010b). Modeling finite deformation behavior of semicrystalline polymers under uniaxial loading-unloading. *Journal of Elastomers and Plastics*, 42(4), 347–364. <https://doi.org/10.1177/0095244310368126>
- Dusunceli, Necmi. (2012). The unusual creep and relaxation behaviour of polypropylene. *Journal of Polymer Engineering*, 32(3), 167–176. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2011-0159>
- Dusunceli, Necmi, ve Colak, O. U. (2006a). High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 10(4), 331–345. <https://doi.org/10.1007/s11043-007-9026-5>
- Dusunceli, Necmi, ve Colak, O. U. (2006b). High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11043-007-9026-5>
- Dusunceli, Necmi, ve Colak, O. U. (2008). Modelling effects of degree of crystallinity on mechanical behavior of semicrystalline polymers. *International Journal of Plasticity*, 24(7), 1224–1242. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.09.003>
- Dusunceli, Necmi, ve Drozdov, A. D. (2017). Fading memory of deformation history in carbon black-filled thermoplastic elastomers. *Polymer Testing*, 58, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.12.008>
- Dusunceli, Necmi, Drozdov, A. D., ve Theilgaard, N. (2017). Influence of temperature on viscoelastic–viscoplastic behavior of poly(lactic acid) under loading–unloading. *Polymer Engineering and Science*, 57(3). <https://doi.org/10.1002/pen.24404>
- Fairhurst, A., Thommen, M., ve Rytka, C. (2019). Comparison of short and long term creep testing in high performance polymers. *Polymer Testing*, 78, 105979. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105979>
- Fu, K., Chang, Y., Tang, Y., ve Zheng, B. (2014). Effect of loading rate on the creep behaviour of epoxy resin insulators by nanoindentation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(8), 3552–3558. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2055-3>
- G'sell, C., ve Dahoun, A. (1994). Evolution of microstructure in semi-crystalline polymers under large plastic deformation. *Materials Science and Engineering A*, 175(1–2), 183–199. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)91058-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)91058-8)
- Ge, S., Zhu, X., Wang, S. Q., Chen, K., Kang, G., Yu, C., Coates, P. D. (2019). A constitutive model for block-copolymers based on effective temperature. *Macromolecules*, 161–162(22), 8878–8894. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105979>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., ve Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). https://doi.org/10.1126/SCIADV.1700782/SUPPL_FILE/1700782_SM.PDF

- Hatami-Marbini, H., ve Etebu, E. (2013). A new method to determine rate-dependent material parameters of corneal extracellular matrix. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(11). <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0842-2>
- Haugan, I. N., Lee, B., Maher, M. J., Zografos, A., Schibur, H. J., Jones, S. D., Bates, F. S. (2019). Physical aging of polylactide-based graft block polymers. *Macromolecules*, 52(22), 8878–8894. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b01434>
- Hébert, J. S., Wood-Adams, P., Heuzey, M. C., Dubois, C., ve Brisson, J. (2013). Morphology of polylactic acid crystallized during annealing after uniaxial deformation. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 51(6), 430–440. <https://doi.org/10.1002/polb.23231>
- Henton, D. E., Gruber, P., Lunt, J., ve Randall, J. (2005). Polylactic acid technology. *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, 48674(23), 527–577. [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200012\)12:23<1841::aid-adma1841>3.3.co;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200012)12:23<1841::aid-adma1841>3.3.co;2-5)
- Huang, D., Tao, J., Cheng, M., Deng, R., Chen, S., Yin, L., ve Li, R. (2021). Microplastics and nanoplastics in the environment: Macroscopic transport and effects on creatures. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124399. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124399>
- Inside, L., Access, G., ve April, E. (2014). *A Literature Review of Poly (Lactic Acid)*. 9(2), 1–10.
- Ivey, M., Melenka, G. W., Carey, J. P., ve Ayranci, C. (2017). Characterizing short-fiber-reinforced composites produced using additive manufacturing. *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 3(3), 81–91. <https://doi.org/10.1080/20550340.2017.1341125>
- Jiang, J.-Q. (2018). Occurrence of microplastics and its pollution in the environment: A review. *Sustainable Production and Consumption*, 13, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.11.003>
- John, A., Črešnar, K. P., Bikiaris, D. N., ve Zemljič, L. F. (2023). Colloidal solutions as advanced coatings for active packaging development: focus on PLA systems. *Polymers*, 15(2), 273. <https://doi.org/10.3390/polym15020273>
- Jourdan, C., Cavaille, J. Y., ve Perez, J. (1989). Mechanical relaxations in polypropylene: A new experimental and theoretical approach. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 27(11), 2361–2384. <https://doi.org/10.1002/polb.1989.090271115>
- Kaloyianni, M., Bobori, D. C., Xanthopoulou, D., Malioufa, G., Sampsonidis, I., Kalogiannis, S., Bikiaris, D. N. (2021). Toxicity and functional tissue responses of two freshwater fish after exposure to polystyrene microplastics. *Toxics*, 9(11), 289. <https://doi.org/10.3390/toxics9110289>

- Kervran, M., Vagner, C., Cochez, M., Ponçot, M., Saeb, M. R., ve Vahabi, H. (2022). Thermal degradation of polylactic acid (PLA)/polyhydroxybutyrate (PHB) blends: A systematic review. *Polymer Degradation and Stability*, 201, 109995. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109995>
- Khan, F., ve Yeakle, C. (2011). Experimental investigation and modeling of non-monotonic creep behavior in polymers. *International Journal of Plasticity*. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.06.007>
- Kian, L. K., Saba, N., Jawaidd, M., ve Sultan, M. T. H. (2019). A review on processing techniques of bast fibers nanocellulose and its polylactic acid (PLA) nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 1314–1328. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.040>
- Kitagawa, M., ve Takagi, H. (1990). Nonlinear constitutive equation for polyethylene under combined tension and torsion. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 28(11). <https://doi.org/10.1002/polb.1990.090281105>
- Klonos, P. A., Lazaridou, M., Samiotaki, C., Kyritsis, A., ve Bikiaris, D. N. (2022). Dielectric and calorimetric study in renewable polymer blends based on poly(ethylene adipate) and poly(lactic acid) with microphase separation. *Polymer*, 259, 125329. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125329>
- Krempl, E. (1999). Creep-Plasticity Interaction. *Creep and Damage in Materials and Structures* (285–348). Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2506-9_6
- Krempl, Erhard. (1996). A Small-Strain Viscoplasticity Theory Based on Overstress. İçinde *Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation*. <https://doi.org/10.1016/b978-012425970-6/50007-2>
- Krempl, Erhard, ve Ho, K. (2000). Overstress model for solid polymer deformation behavior applied to Nylon 66. *ASTM Special Technical Publication*, (1357), 118–137. ASTM.
- Kühl, A., ve Muñoz-Rojas, P. A. (2019). Application of a master curve and the modified superposition principle for modeling creep and loading rate effects at small strains in high-density polyethylene. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1605008>
- Lai, J., ve Bakker, A. (1995). An integral constitutive equation for nonlinear plasto-viscoelastic behavior of high-density polyethylene. *Polymer Engineering & Science*, 35(17). <https://doi.org/10.1002/pen.760351703>
- Lewis, G., ve Carroll, M. (2001). Effect of crosslinking UHMWPE on its tensile and compressive creep performance. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 11(3).
- Li, W., Gazonas, G., Brown, E. N., Rae, P. J., ve Negahban, M. (2019). Thermomechanical model for monotonic and cyclic loading of PEEK. *Mechanics of Materials*, 129, 113–138. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.11.005>

- Mayekar, P. C., Castro-Aguirre, E., Auras, R., Selke, S., ve Narayan, R. (2020). Effect of Nano-Clay and Surfactant on the Biodegradation of Poly(Lactic Acid) Films. *Polymers*, 12(2), 311. <https://doi.org/10.3390/polym12020311>
- McCabe, D., Merkle, J., ve Wallin, K. (2005). *An Introduction to the Development and Use of the Master Curve Method*. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. <https://doi.org/10.1520/MNL52-EB>
- Meyer, R. W., ve Pruitt, L. A. (2001). The effect of cyclic true strain on the morphology, structure, and relaxation behavior of ultra high molecular weight polyethylene. *Polymer*, 42(12). [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00626-1](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00626-1)
- Michael, F. M., Ratnam, C. T., Khalid, M., Ramarad, S., ve Walvekar, R. (2018). Surface modification of nanohydroxyapatite and its loading effect on polylactic acid properties for load bearing implants. *Polymer Composites*, 39(8), 2880–2888. <https://doi.org/10.1002/pc.24282>
- Morsi, M. A., ve Hezma, A. E. M. (2019). Effect of iron doped hydroxyapatite nanoparticles on the structural, morphological, mechanical and magnetic properties of polylactic acid polymer. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2098–2106. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.017>
- Mourad, A. H. I., Fouad, H., ve Elleithy, R. (2009). Impact of some environmental conditions on the tensile, creep-recovery, relaxation, melting and crystallinity behaviour of UHMWPE-GUR 410-medical grade. *Materials and Design*, 30(10), 4112–4119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.001>
- Papageorgiou, G. Z., Achilias, D. S., Nanaki, S., Beslikas, T., ve Bikiaris, D. (2010). PLA nanocomposites: Effect of filler type on non-isothermal crystallization. *Thermochimica Acta*, 511(1–2), 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.08.004>
- Pappa, A., Papadimitriou-Tsantarliotou, A., Kaloyianni, M., Kastrinaki, G., Dailianis, S., Lambropoulou, D. A., Bikiaris, D. N. (2021). Insights into the toxicity of biomaterials microparticles with a combination of cellular and oxidative biomarkers. *Journal of Hazardous Materials*, 413, 125335. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125335>
- Povolo, F., ve Hermida, E. B. (1991). Analysis of the master curve for the viscoelastic behaviour of polymers. *Mechanics of Materials*, 12(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(91\)90051-Z](https://doi.org/10.1016/0167-6636(91)90051-Z)
- Raquez, J.-M., Habibi, Y., Murariu, M., ve Dubois, P. (2013). Polylactide (PLA)-based nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1504–1542. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.014>
- Rey Calderón, A. A., ve Díaz Díaz, A. (2018). New aspects in the mechanical behavior of a polycarbonate found by an experimental study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1540919>

- Rezgui, F., Swistek, M., Hiver, J. M., G'Sell, C., ve Sadoun, T. (2005). Deformation and damage upon stretching of degradable polymers (PLA and PCL). *Polymer*, 46(18). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.116>
- Ricci, J., Bennin, T., Xing, E., ve Ediger, M. D. (2019). Linear stress relaxation and probe reorientation: comparison of the segmental dynamics of two glassy polymers during physical aging. *Macromolecules*, 52(21). <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b01625>
- Sanusi, O. M., Benelfellah, A., Bikiaris, D. N., ve Aït Hocine, N. (2021). Effect of rigid nanoparticles and preparation techniques on the performances of poly(lactic acid) nanocomposites: A review. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(2), 444–460. <https://doi.org/10.1002/pat.5104>
- Schiavi, A., Cuccaro, R., ve Troia, A. (2016). Strain-rate and temperature dependent material properties of Agar and gellan gum used in biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 53, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.08.011>
- Sha, L., Chen, Z., Chen, Z., Zhang, A., ve Yang, Z. (2016). Polylactic acid based nanocomposites: promising safe and biodegradable materials in biomedical Field. *International Journal of Polymer Science*, <https://doi.org/10.1155/2016/6869154>
- Sharif, A., Mondal, S., ve Hoque, M. E. (2019). Polylactic Acid (PLA)-based nanocomposites: Processing and Properties. *Bio-based Polymers and Nanocomposites* (233–254). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05825-8_11
- Sin, L. T., Rahmat, A. R., ve Rahman, W. A. W. A. (2013). Mechanical Properties of Poly(lactic Acid). *Polylactic Acid* (177–219). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-4459-0.00005-6>
- Srithep, Y., Nealey, P., ve Turng, L. S. (2013). Effects of annealing time and temperature on the crystallinity and heat resistance behavior of injection-molded poly(lactic acid). *Polymer Engineering and Science*, 53(3), 580–588. <https://doi.org/10.1002/pen.23304>
- Szczęś, A., Hołysz, L., ve Chibowski, E. (2017). Synthesis of hydroxyapatite for biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 249, 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.04.007>
- Tamrakar, S., Ganesh, R., Sockalingam, S., Haque, B. Z., ve Gillespie, J. W. (2020). Strain rate-dependent large deformation inelastic behavior of an epoxy resin. *Journal of Composite Materials*, 54(1). <https://doi.org/10.1177/0021998319859054>
- Test Method for Tensile Properties of Plastics*. (2014). West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

- Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures*. (2021). West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0328-21>
- Toong, D. W. Y., Ng, J. C. K., Cui, F., Leo, H. L., Zhong, L., Lian, S. S., Ang, H. Y. (2022). Nanoparticles-reinforced poly-l-lactic acid composite materials as bioresorbable scaffold candidates for coronary stents: Insights from mechanical and finite element analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 125, 104977. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104977>
- Van De Velde, K., ve Kiekens, P. (2002). Biopolymers: Overview of several properties and consequences on their applications. *Polymer Testing*, 21(4), 433–442. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00107-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00107-6)
- Van Melick, H. G. H., Govaert, L. E., Raas, B., Nauta, W. J., ve Meijer, H. E. H. (2003). Kinetics of ageing and re-embrittlement of mechanically rejuvenated polystyrene. *Polymer*, 44(4), 1171–1179. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00863-7](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00863-7)
- Vlachopoulos, A., Karlioti, G., Balla, E., Daniilidis, V., Kalamas, T., Stefanidou, M. Bikiaris, D. N. (2022). Poly(Lactic Acid)-based microparticles for drug delivery applications: an overview of recent advances. *Pharmaceutics*, 14(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14020359>
- Wang, M., Wu, Y., Li, Y. D., ve Zeng, J. B. (2017). Progress in toughening Poly(Lactic Acid) with renewable polymers. *Polymer Reviews*, 57(4), 557–593. <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1287726>
- Wang, W., Zhang, B., Li, M., Li, J., Zhang, C., Han, Y., Zhang, X. (2021). 3D printing of PLA/n-HA composite scaffolds with customized mechanical properties and biological functions for bone tissue engineering. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109192, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109192>
- Wetteland, C. L., ve Liu, H. (2018). Optical and biological properties of polymer-based nanocomposites with improved dispersion of ceramic nanoparticles. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 106(10), 2692–2707. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36466>
- Zhang, C., ve Moore, I. D. (1997). Nonlinear mechanical response of high density polyethylene. Part II: Uniaxial constitutive modeling. *Polymer Engineering and Science*, 37(2). <https://doi.org/10.1002/pen.11684>
- Zhang, R., Hu, H., Liu, Y., Tan, J., Chen, W., Ying, C., Wong, C. P. (2020). Homogeneously dispersed composites of hydroxyapatite nanorods and poly(lactic acid) and their mechanical properties and crystallization behavior. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 132, 105841. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105841>
- Zhang, X., Schneider, K., Liu, G., Chen, J., Brüning, K., Wang, D., ve Stamm, M. (2011). Structure variation of tensile-deformed amorphous poly(l-lactic acid):

Effects of deformation rate and strain. *Polymer*, 52(18), 4141–4149.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.07.003>

Zhang, Y., ve Jar, P. Y. B. (2016). Time-strain rate superposition for relaxation behavior of polyethylene pressure pipes. *Polymer Testing*, 50, 292–296.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.12.014>

Zhou, C., Guo, H., Li, J., Huang, S., Li, H., Meng, Y., Jiang, S. (2016). Temperature dependence of poly(lactic acid) mechanical properties. *RSC Advances*, 6(114), 113762–113772. <https://doi.org/10.1039/c6ra23610c>



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ramazan Alper YAPICI

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi Makine Mühendisliği, 2010

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

2010-2013 talaşlı imalat, çelik dövme, ağır sanayi sektörlerinde muhtelif firmalar
2013-... Türk Patent ve Marka Kurumu, bakım-onarım ve yapı işleri

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler:

Necmi Düşünceli, Ramazan Alper Yapıcı. Poli (Laktik Asit) (PLA) ve Poli (Laktik Asit) (PLA)/hidroksiapatit (HA) nano-kompozit'e ait temel eğrilerin farklı referans sıcaklıkları için oluşturulması. 5. Uluslararası Türk Dünyası Fen Bilimleri ve Mühendislik Kongresi 15-17 Eylül 2023, Bişkek – Kırgızistan.