MALZEME EKSTRÜZYONUYLA ÜRETİLMİŞ FARKLI BASKI YÖNLERİNE SAHİP PLA PARÇALARININ GERİLME GEVŞEMESİ DAVRANIŞININ ÇEKME VE EĞİLME TESTLERİYLE BELİRLENMESİ

Volkan Mesut KÜÇÜKAKARSU

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MALZEME EKSTRÜZYONUYLA ÜRETİLMİŞ FARKLI BASKI YÖNLERİNE SAHİP PLA PARÇALARININ GERİLME GEVŞEMESİ DAVRANIŞININ ÇEKME VE EĞİLME TESTLERİYLE BELİRLENMESİ

Volkan Mesut KÜÇÜKAKARSU

0000-0003-3989-8017

Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MALZEME EKSTRÜZYONUYLA ÜRETİLMİŞ FARKLI BASKI YÖNLERİNE SAHİP PLA PARÇALARININ GERİLME GEVŞEMESİ DAVRANIŞININ ÇEKME VE EĞİLME TESTLERİYLE BELİRLENMESİ

Volkan Mesut KÜÇÜKAKARSU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Son yıllarda, çeşitli endüstrilerde eklemeli imalat teknolojisinin yaygın olarak kullanılması, 3B yazdırılmış polimerlerin gerilme gevşemesi davranışının incelenmesini parçaların mekanik bütünlüğünü koruyabilmesi açısından önemli olduğunu ortaya koymuştur. Zira metal malzemelerde sürünme ve gerilme davranışı nispeten yüksek gerilme ve sıcaklık mertebelerinde ortaya çıksa da polimelerde bu davranışa oda sıcaklığında ve düşük gerilmelerde dahi karşılaşılmaktadır. 3Büretilen polimerlerin sanki-statik mekanik özellikleri gibi zamana bağlı gerilme gevşeme davranışı da, kullanılan 3B baskı parametrelerinden etkilenmektedir. Bu nedenle, bu çalışma, PLA'nın çekme ve eğme yüklemeleri altında gerilme gevşeme davranışını incelemekte ve özellikle farklı dolgu yönlerinin bu davranışı nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Bulgular, ±45° dolgu yöneliminin her iki yükleme tipinde diğer yönelimlere göre en az gevşemeye oranına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eğilme yüklemesinde tüm dolgu yönlerinde çekme yüklemsine göre daha yüksek gerilme gevşemesi olduğu tespit edilmiştir. Gerilme gevşemesi testlerinden elde edilen gerilme-zaman eğrileri Maxwell-Weichert modeline göre eğri uydurması gerçekleştirilerek, matematiksel modeldeki malzeme parameterleri her iki yükleme tipi ve tüm dolgu yönleri için elde edilmiştir. Tüm testler göz önüne alındığında PLA ‘nın gerilme gevşeme davranışını Maxwell-Weichert modeliyle tam olarak ifade edebilmek deneysel sürenin 750 saniyeden yüksek tutulması gerektiği,bunun yanında 20000 saniye üzerine uzatmanın gerekli olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: gerilim gevşemesi; PLA; malzeme ekstrüzyonu. 3 boyutlu yazıcı, Sürünme Mekaniği
2024, vii + 46 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

MALZEME EKSTRÜZYONUYLA ÜRETİLMİŞ FARKLI BASKI YÖNLERİNE SAHİP PLA PARÇALARININ GERİLME GEVŞEMESİ DAVRANIŞININ ÇEKME VE EĞİLME TESTLERİYLE BELİRLENMESİ

Volkan Mesut KÜÇÜKAKARSU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

In recent years, the widespread use of additive manufacturing technology in various industries has highlighted the importance of investigating the stress relaxation behavior of 3D-printed polymers for maintaining the mechanical integrity of components. While creep and stress relaxation behavior in metal materials typically occur at relatively high stresses and temperatures, in polymers, such behavior is observed even at room temperature and low stresses. The time-dependent stress relaxation behavior of 3D-printed polymers, similar to quasi-static mechanical properties, is also influenced by the 3D printing parameters employed.Therefore, this study examines the stress relaxation behavior of PLA under tensile and bending loads, particularly investigating how different filler orientations affect this behavior. The findings indicate that the ±45° filler orientation has the least relaxation ratio compared to other orientations in both types of loading. Additionally, higher stress relaxation is observed in bending loading for all filler orientations compared to tensile loading. Stress-time curves obtained from stress relaxation tests are fitted to the Maxwell-Weichert model, and material parameters in the mathematical model are obtained for both types of loading and all filler orientations. Taking all tests into consideration, it is determined that experimental duration needs to be kept above 750 seconds to accurately express the stress relaxation behavior of PLA with the Maxwell-Weichert model, and extending it beyond 20,000 seconds is deemed unnecessary.

Key words: stress relaxation; PLA; material extrusion, 3D Printer, Creep Mechanic

2024, vii + 46 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca bilgi ve desteklerini esirgemeyen, çalışmaları yakından takip ederek bana güç veren değerli tez danışman hocam Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca imkânlarından yararlandığım Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve bölümümüzün değerli öğretim üyelerine de bana kattığı bilgi, birikim ve tecrübeler için tek tek teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca mekanik özelliklerin belirlenmesindeki testlerde büyük bir titizlikle yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Kenan TÜFEKÇİ hocama da teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca yoğun çalışma dönemlerimde sabır gösterdiği ve her zaman motive ettiği için eşim Kübra Şevval Küçükakarsu'ya, özellikle bu günlerini en çok görmesini istediğim ve mühendislik algımın oluşmasında en çok etkisi olan rahmetli babam Faik Küçükakarsu'ya ve desteklerini her zaman hissettiren aileme sonsuz teşekkür ederim.

Volkan Mesut KÜÇÜKAKARSU
22/01/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR....viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....x
ŞEKİLLER DİZİNİ....xi
ÇİZELGELER DİZİNİ....xii
1. GİRİŞ…... 1
1.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri....4
1.2. SLA (Stereolithography Apparatus) 5
1.3.DLP (Digital Light Projection) 6
1.4. SLS (Selective Laser Sintering)....7
1.5.SLM (Selective Laser Melting)....8
1.6.FDM (Fused Deposition Modeling)....9
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 13
3. MATERYAL ve YÖNTEM....17
3.1. Deneysel Testler....19
3.2.İstatiksel Yöntem 22
4. BULGULAR....25
5. TARTIŞMA ve SONUÇ....31
KAYNAKLAR 33
ÖZGEÇMİŞ 34

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
σ	Bükme Gerilmesi
ε	Bükme Deformasyonu
P	Kuvvet
ε_0	Elastikiyet Modülü
τ_k	Dinamik Vizkozite
Exp_i	Deneysel Veri
Cal_i	Hesaplanan Veri
$S_{d_i}^2$	Deneysel Verinin Varyansı

Kısaltmalar	Açıklama
L	Uzunluk Birimi
t	Test Süresi
Mpa	Megapaskal
S	Zaman
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
SLA	Stereolitografi Aparatı
DLP	Dijital Işık Projeksiyonu
SLS	Seici Lazer Sinterleme
SLM	Seçici Lazer Ergitme
FDM	Ergimiş Biriktirme Modellemesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Eklemeli imalat Süreci (Mark Vitale ve diğerleri, 2016)……..	4
Şekil 1.2	SLA yazıcıların şematik gösterimi (Jeffrey W.Stansburya ve diğerleri, 2015)….	5
Şekil 1.3	SLA ve DLP karşılaştırılması……	6
Şekil 1.4	SLS 3B yazıcı şematik gösterimi (Xin Wang ve diğerleri, 2017)……..	8
Şekil 1.5	SLM metodu şematik gösterimi…….	9
Şekil 1.6	FDM tekniği şematik gösterimi…….	9
Şekil 1.7	ASTM D638 standardına uygun çekme numunesinin geometrik boyutları……..	11
Şekil 2.1	Şekil 2.1 3B yazıcılarda baskı yönü gösterimi……...	13
Şekil 3.1	(ASTM International. 2014)……..	17
Şekil 3.2	ASTM D638 ve ASTM D790 Standartları (ölçüler mm'dir)……	18
Şekil 3.3	Baskı açıları A) 0° B) 45° C) 90°……...	19
Şekil 3.4	Numuneler üzerinde dolgu açılarının görünümü A) 90° B)0° C)45°……	20
Şekil 3.5	Deneysel kurulum a) farklı iç dolgu yönergeleri için test örneklerinin şematik gösterimi b) çekme (sol) ve bükme (sağ) test düzeneği…….	20
Şekil 3.6	Basılmış test örnekleri, test edilmemiş (sağ) ve test edilmiş (sol) durumlar için a) çekme testi b) bükme testi……..	22
Şekil 3.7	Maxwell Modellerinin Genel Formu…….	22
Şekil 3.8	n değerlerine bağlı olarak gerilme gevşemesi modelinin uyum performansı……	24
Şekil 4.1	Kuvvetlendirilmiş çekme ve eğilme testlerinin gerilme-deformasyon eğrileri (Her dolgu oryantasyonu için 3 eğri gösterilmiştir)……...	25
Şekil 4.2	Tüm dolgu yönlendirmeleri için çekme ve eğilme testlerinin gerilme gevşemesi eğrileri…….	26
Şekil 4.3	Standart sapma ve uygun eğrilerle çekme gerilme gevşemesi……...	27
Şekil 4.4	Standart sapma ve uygun eğrilerle eğilme gerilme gevşemesi……...	28
Şekil 4.5	Maxwell-Weichert denklem teriminin kısa ve uzun vadeli etkisi (DÜ: düşük viskozite terimleri, YÜ: yüksek viskozite terimleri)……..	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	Çizelge 1.1 Başlıca eklemeli imalat yöntemleri……	4
Çizelge 3.1	(ASTM International. 2014)……..	18
Çizelge 3.2	3D Baskı Parametreleri…….	19
Çizelge 4.1	Çizelge 4.1 Maxwell-Weichert modelinden hesaplanan dinamik viskoziteler (Birim: Mpa.s'dır)……	29
Çizelge 4. 2	Gerilme gevşemesi yüzdeleri……	30

1. GİRİŞ

1980'lerde ilk katmanlı imalat sistemi geliştirildiğinden bu yana, bu teknoloji hızla evrim geçirmiş ve alt tekniklerindeki gelişmelerle birlikte giderek daha yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. 3D baskının çok yönlülüğü ve esnekliği, bir dizi endüstri ve uygulama için çeşitli fonksiyonel parçaların üretilmesini mümkün kılmaktadır. Havacılık ve uzay, tıp, otomotiv, robotik gibi birçok sektör, 3D baskının avantajlarından yararlanarak tasarım ve üretim süreçlerini dönüştürmüştür. Bu teknoloji, malzeme biriktirme, ışıkla sinterleme, selektif lazer sinterleme gibi çeşitli alt kategorileri içermektedir, bu da geniş bir malzeme yelpazesi ve karmaşıklıktaki tasarımların üretimine olanak tanımaktadır.

3D baskı, prototipleme süreçlerindeki hız ve maliyet avantajları sayesinde ürün geliştirme süreçlerini büyük ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca, kişiselleştirilmiş tıbbi implantlardan endüstriyel uygulamalardaki karmaşık yapıya sahip parçalara kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Havacılık sektöründe, özellikle hafif ve dayanıklı parçaların üretimi konusundaki potansiyel, tasarım özgürlüğü ve karmaşıklıkta artış gibi avantajları ön plana çıkmaktadır.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, malzeme seçenekleri genişlemiş ve 3D baskı süreçleri daha hassas, hızlı ve karmaşık hale gelmiştir. Yeni nesil malzemelerin ve süreçlerin keşfi, bu alandaki sınırları daha da genişletmiştir. Bu çalışma, 3D baskının evrimini ve giderek artan popülerliğini vurgulayarak, endüstriyel dönüşümü şekillendiren faktörleri ve bu teknolojinin sunduğu geniş perspektifi detaylı bir şekilde değerlendirmektedir.

Katmanlı imalat (Additive Manufacturing), yüksek hacimli üretim için geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında halen nispeten maliyetli olmasına rağmen, belirli uygulamalarda daha az maliyet etkili olabilir. Özellikle düşük hacimli üretim, karmaşık geometriler, prototip oluşturma ve ürün geliştirme, özelleştirme, onarım ve değiştirme gibi belirli uygulamalarda katmanlı imalatın maliyet avantajları belirgin hale gelmektedir.

Katmanlı imalatın bir diğer önemli avantajı, karmaşık geometrilerin ve tasarım özgürlüğünün üstesinden gelmesidir. Bu, özellikle endüstriyel tasarım ve üretim süreçlerinde, karmaşık parçaların ve yapıların üretilmesini kolaylaştırır. Prototip oluşturma ve ürün geliştirme aşamalarında, tasarım değişiklikleri hızla uygulanabilir ve ürün tasarımındaki esneklik, yenilikçi fikirlerin test edilmesini destekler.

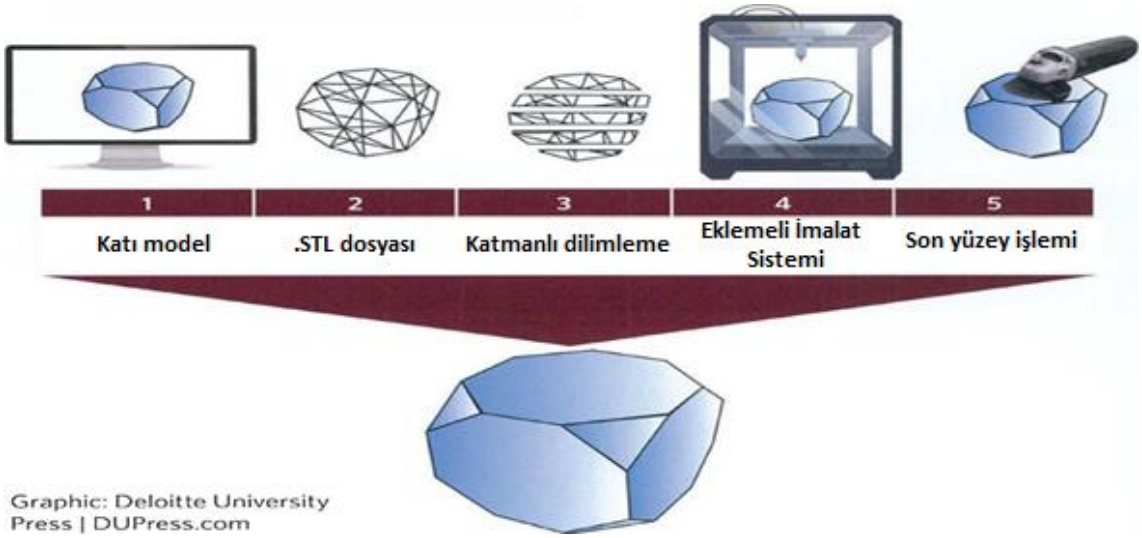
Katmanlı imalat, özelleştirilebilir üretim için de önemli bir alan sunar. Müşteri taleplerine göre özel parçaların üretimi, özellikle kişiselleştirilmiş tıbbi implantlardan endüstriyel ekipmanlara kadar birçok sektörde avantajlı olabilir. Bu özelleştirme yeteneği, tüketicilerin ihtiyaçlarına daha iyi uyum sağlamak ve ürünlerin tam olarak istenen spesifikasyonlara göre üretilmesini sağlamak adına önemlidir.

Ayrıca, katmanlı imalatın onarım ve değiştirme süreçlerinde etkili bir rol oynadığı görülmektedir. Hasar görmüş parçaların veya yedek parçaların hızlı bir şekilde üretilmesi, üretim tesislerinin verimliliğini artırabilir ve üretim süreçlerindeki kesintileri minimize edebilir. Ancak, katmanlı imalatın hala bazı sınırlamalara sahip olduğu unutulmamalıdır. Özellikle yüksek hacimli üretimde maliyet etkili olmaması, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda tam anlamıyla benimsenmesini sınırlayan faktörlerden biridir. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda katmanlı imalatın potansiyelini değerlendirmek ve geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırmak önemlidir.

3D baskı teknolojisinin çeşitli endüstrilerde fonksiyonel amaçlarla kullanılmaya başlamasıyla birlikte, başarılı bir şekilde benimsenmesi için yeterli mekanik özellikler kritik hale gelmiştir, çünkü bu özellikler parçanın tasarlandığı uygulamadaki performansını ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Mekanik özellikler, dayanıklılık, sertlik, tokluk, süneklik ve uzun ömürlülük gibi faktörleri içerir ve parçanın stres ve gerilmelere ne kadar iyi dayanabileceğini belirler. Bu mekanik özellikler, özellikle havacılık, tıp, otomotiv, ve robotik gibi endüstrilerde, 3D baskı ile üretilen parçaların dayanıklılığı ve performansının anahtar belirleyicileridir. Bu nedenle, endüstri uygulamalarında 3D baskı teknolojisinin daha geniş bir kabul görmesi ve bu parçaların güvenilirliğinin artırılması için mekanik özelliklerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması ve iyileştirilmesi önemlidir.

3B yazıcılar diğer adı ile eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing, AM) günümüzde çok geniş kullanıcı kitlesine ulaşmıştır. Günümüzde bir 3B yazıcı satın almak eskisi ile kıyaslandığında pahalı olmamakla birlikte çok kullanışlı masaüstü 3B yazıcılar bulunmaktadır (Jeffrey W. Stansburya ve diğerleri, 2015). 3B yazıcılar sayesinde oluşan bu geniş pazarda 300'ü aşkın yenilikçi şirket kurulmuştur ve kurulmaya devam etmektedir. Düşük fiyatları sayesinde 3B yazıcıları okullarda, evlerde, kütüphanelerde, atölyelerde ve daha birçok irili ufaklı kuruluşta görmek mümkün hale gelmiştir **(**Simon Bradshaw ve diğerleri, 2010- Erin Buehler ve diğerleri, 2014**)**. 3B yazıcılar günümüzde havacılık, inşaat, sağlık (Massimo Martorelli ve diğerleri, 2013), otomotiv (Jian-Yuan Lee ve diğerleri, 2017**)** ve daha birçok alanda ciddi şekilde kullanılmaktadır.

Bir model ya da parça Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM) sisteminde modellenir. Katı ya da yüzey modeli CAD/CAM ile oluşturulduktan sonra kökeni 3 boyutlu sistemlere dayanan dosya formatı olan "STL" (StereoLithography) olarak kaydedilir. STL formatı, yüzeyleri poligonlara yakınsar. Bilgisayar programı, modeli tanımlayan STL formatındaki dosyayı analiz eder ve üretim için kesit alanlar halinde dilimler [Şekil 1.1]. 3B yazım esas olarak iki boyutlu katmanların üst üste binmesi ile oluşan üç boyutlu modelin oluşma sürecine verilen isimdir (Tuan D. Ngo ve diğerleri, 2018). Geleneksel üretim yöntemleri bütün parçayı eksilterek ürüne ulaşırken, 3B yazıcılar katman katman ürüne ulaşma mantığı ile çalışırlar. Böylelikle verimli bir hammadde kullanımı sağlanırken minimum malzeme kaybı meydana gelir. Basit gibi görünen bu işlemler modelin yapısına bağlı olarak çok karmaşık hal alabilir ve işlem süresini oldukça uzatabilir. Uzayan işlem süresini kısaltmak için çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Stefanie Mueller ve diğerleri, 2014).



Şekil 1.1 Eklemeli imalat Süreci (Mark Vitale ve diğerleri, 2016)

1.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

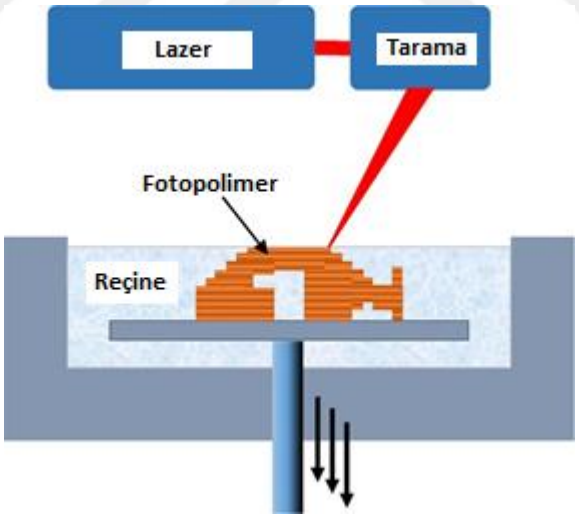
3B yazıcıların kullanım alanlarına ve kullanım amaçlarına göre farklı çeşitleri vardır. Bunlardan başlıcaları SLA, DLP, SLS, SLM, FDM/FFF olarak isimlendirilir **(**John Ryan C. Dizon ve diğerleri, 2017**)** Ek çizelge 1.1.

Çizelge 1.1 Başlıca eklemeli imalat yöntemleri

SLA		Stereolitografi
DLP		Dijital Işık Projeksiyonu
SLS		Seçici Lazer Sinterleme
SLM		Seçici Lazer Ergitme
FFF/FDM		Erimiş Filement Üretimi /Eriyik Yığma Modelleme

1.2. SLA (Stereolithography Apparatus)

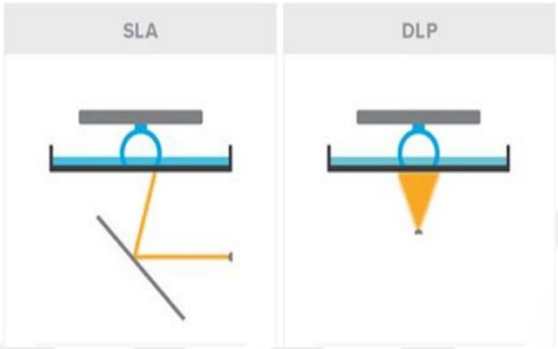
En kolay 3B yazıcı tekniği SLA tekniğidir. Fikir olarak SLA oda sıcaklığında sıvı halde bulunan foto polimer reçinenin ultraviyole ışık ile katılaştırılmasına dayanır. Bahsi geçen ultraviyole ışık bir lazer ve ayna vasıtası ile reçineye ulaştırılır. Katılaşan ilk katmanın üzerine diğer katmanların bina edilmesi ile nihai parça elde edilir. İnşa plakasında ilk önce bir dayanak noktası oluşturulur ve parça bu dayanak noktasının üzerine inşa edilir. Baskı bittiğinde parçanın üzerine tutunmuş fazla reçine temizlenir, destek noktaları çıkartılır ve parça son dokunuş olarak UV ışın altında bir süre bekletilerek kurutulur ve son halini almış olur. SLA printer tekniği şematik olarak gösterilmiştir [Şekil 1.2.]. SLA tekniğinde reçinenin ne kadar süre UV ışına maruz kalacağını istenilen z eksen adımına (çözünürlük) ve reçinenin türüne göre belirlenir. Standart SLA 3B yazıcılar ortalama olarak 30 mikron ile 200 mikron arasında hassasiyet gösterirler ancak Two-photon polymerization (2PP) tekniği ile teorik olarak ışığın kırınım limitlerinde çözünürlükler elde edilebilmiştir yaklaşık 100 nanometre (R. Liska ve diğerleri, 2007, Robert Infuehr ve diğerleri, 2007).



Şekil 1.2 SLA yazıcıların şematik gösterimi (Jeffrey W. Stansburya ve diğerleri, 2015)

1.3.DLP (Digital Light Projection)

Çalışma mantığı açısından DLP tekniği SLA ile çok benzerdir. Aralarındaki fark SLA tekniğinde ultraviyole ışınların bir lazer ve bir ayna ile iletilir ancak DLP tekniğinde ise lazer yerine yüksek çözünürlüklü ekran kullanılır bu ekranın pikselleri ultraviyole ışık üretmesi için özel olarak tasarlanmıştır. SLA ve DLP yöntemleri arasındaki fark gösterilmiştir [Şekil 1.3].

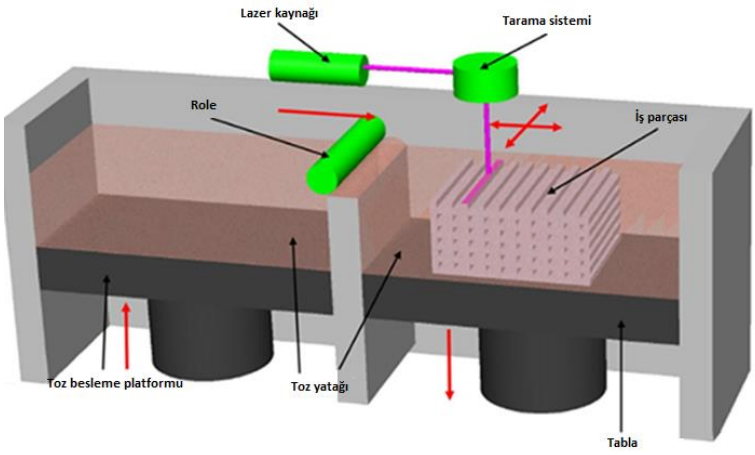


Şekil 1.3 SLA ve DLP karşılaştırılması

DLP yönteminde hassasiyet ekran çözünürlüğüne bağlıdır. DLP yönteminde tüm katman aynı anda UV ışına maruz kaldığı için SLA yöntemine göre daha hızlı baskı alınır ancak SLA tekniğinde ise yüksek hassasiyet ve daha küçük ve karmaşık parçaların üretilmesi mümkün olur. Sıvı reçine kullanılan bu yöntemlerde ürünün mekanik direnci çoğunlukla katmanların birbirine yapışma gücüne bağlıdır. Bütün 3B yazıcılarda yöne bağlı mekanik özelliklerde değişim gözlenmektedir. Bu değişimin SLA ve DLP gibi sıvı reçine kullanan tekniklerde oluşmasının minimize edilmesi kullanılan reçinenin viskozitesi ve reçinenin polimerizasyon özelliklerine bağlıdır. Viskoziteyi düşürüp polimerizasyon özellikleri arttırılabilirse baskı sonunda oluşabilecek kalıntı gerilmelerin (residual stress) ve baskı sonundaki banyo süresinin düşürülmesi sağlanabilir **(**Jeffrey W. Stansburya ve diğerleri, 2015**,** Zixiang Weng ve diğerleri, 2016**)**. Diğer yandan her bir katmanın birbirine bağlanması polimerizasyon ile yakından ilgilidir. Bazı uygulamalarda viskoziteyi çok artırarak nispeten destek materyallerine olan gereksinim kaldırılmıştır (Jeffrey W. Stansburya ve diğerleri, 2015**)**.

1.4. SLS (Selective Laser Sintering)

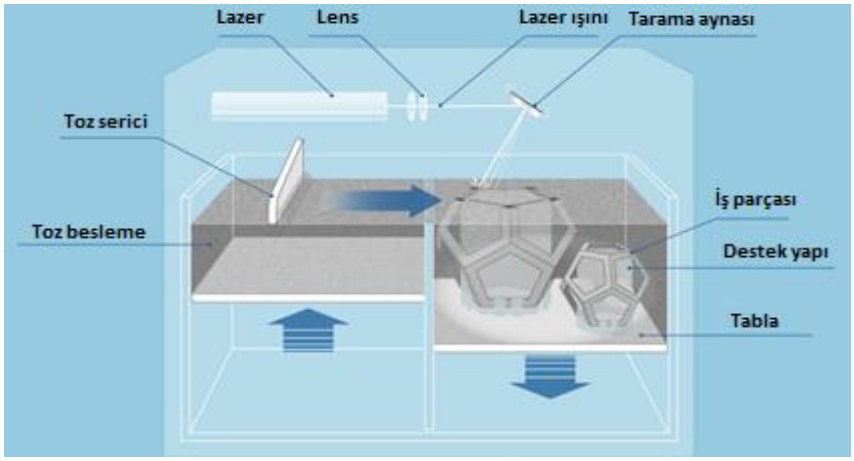
Geniş malzeme yelpazesi sunduğu için SLS tekniği en önemli 3B yazıcı teknikleri arasında bulunur. SLS tekniğinde sıvı reçine yerine toz partikülleri kullanılır. Bu teknikte kullanılan toz genellikle termoplastiklerden ve metallerden seçilir bu sayede baskı sonunda artık toz tekrardan kullanılabilir (Krassimir Dotchev ve Wan Yusoff, 2009). Geçiş sıcaklığında bulunan toz partikülleri bir lazer yardımı ile istenilen desende iki boyutlu olarak toz tanelerinin yüzeyleri ergitilerek sinterleme yapılmaktadır. Bu sintermeleme esnasında ortamdaki oksijen ve nemden arındırılarak sinterleme işleminin daha sağlıklı gerçekleşmesi için malzemenin türüne göre ortama inert gaz ilave edilmektedir. İnert gazların genel olarak kullanılma amacı istenmeyen kimyasal reaksiyonların numuneyi etkilemelerini önlemek içindir. Eritilen bu toz katmanının içerisine, sabit sıcaklıkta bekletilen toz, bir silindir vasıtası ile istenilen kalınlıkta serilir ve aynı işlem parça oluşana kadar tekrarlanır (Tuan D. Ngo ve diğerleri, 2018, Xin Wang ve diğerleri, 2017). Baskı sonlandığında soğuk ve katı olarak bulunan parça alınıp tozlardan temizlenir. Temizlenen tozlar tekrar kullanılmak üzere makineye geri yüklenebilir. SLS tekniği şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 1.4 SLS tekniğinde hassasiyet ve mekanik özellikler toz partiküllerinin boyutuna, katman yüksekliğine, lazerin hassasiyetine ve başlangıç sıcaklığına bağlıdır (Ian Gibson ve Dongping Shi, 1997, B. Caulfield ve diğerleri,2007). SLS tekniğinde kullanılan materyalin parametrelerinin çok iyi bilinmesi gereklidir öyle ki bu parametrelerin farklı kullanıldığı baskıların farklı mekanik özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. İstenilen mekanik özelliklere göre baskı sonunda fazladan işlemlere tabi tutularak (kaplama, yüzey düzleştirme vb.) parçanın mekanik özelliklerinde iyileştirme kazanılabilir. (Ian Gibson ve Dongping Shi, 1997). SLS tekniği baskının toz üzerinde yapılmasına yani parçanın altının sürekli doldurulmasından dolayı destek materyallerine ihtiyaç duymaz. SLS tekniğinde ürün yüzey pürüzlülüğü SLA tekniğine göre daha yüksektir (G D Kim ve Y T Oh, 2007).



Şekil 1.4 SLS 3B yazıcı şematik gösterimi (Xin Wang ve diğerleri, 2017)

1.5.SLM (Selective Laser Melting)

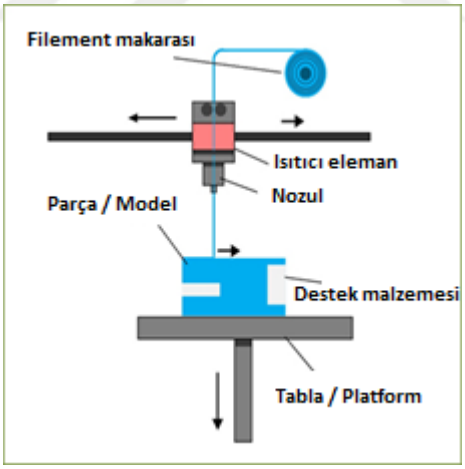
Seçici lazerle Toz Ergitme (Selective Lazer Melting) prosesi SLS tekniğine büyük oranda benzemektedir. Üretim başlamadan önce istenmeyen kimyasal reaksiyonları engellemek amacıyla ortam oksijen ve nemden vakumlama yöntemiyle arındırılır. Malzemenin türüne göre inert gaz seçilerek ortamda pozitif iç basınç oluşturulur. Amaç baskı esnasında oluşabilecek kaçakların ortamdan dışarı doğru çıkmasını sağlayarak kimyasal reaksiyonları engellemektir. Ayrıca parçada termal deformasyonları engellemek amacıyla sıcaklık gradyanını olabildiğince küçük tutmak için ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. Toz partikülleri, istenilen katman yüksekliğinde bir silindir vasıtasıyla serildikten sonra lazer ışınları aynalar aracılığıyla üretilecek malzemenin iki boyutlu geometrik kesitine enerji girdisi lazer ışını göndererek tarama yapmaktadır. Bu noktada SLS üç boyutlu yazıcılardan farkı, Malzemenin ergime sıcaklığının üzerinde bir enerji girdisi ile ergime gerçekleştirilmesidir. Parçanın en alt kesitinden en üst kesitine kadar bu işlem tekrarlanır. SLM metodunun üretim maliyeti SLS metoduna göre yüksektir.



Şekil 1.5 SLM metodu şematik gösterimi

1.6.FDM (Fused Deposition Modeling)

FDM tekniği günümüzde masaüstü yazıcılarda en çok kullanılan 3B yazıcı tekniğidir. FDM tekniğinde kablo şeklinde termoplastik materyal sıcaklığı, kullanılan termoplastik malzemenin türüne göre kontrol edilen sıcak uçta (nozzle) eritilerek platformun üzerine katman katman inşa edilir. FDM tekniği şematik olarak gösterilmiştir Şekil 1.6.



Şekil 1.6 FDM tekniği şematik gösterimi

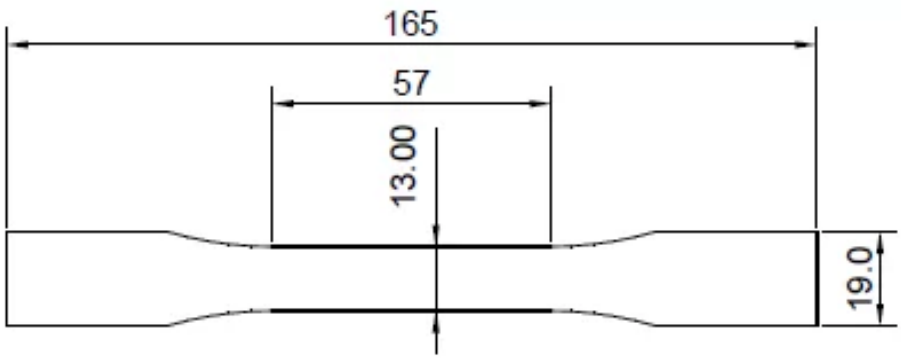
Dengesiz soğuma ile oluşan termal gerilmeleri engellemek için sıcak baskı alanı kullanılır. Sıcak baskı alanı oluşabilecek termal gerilmelerin önüne geçer. FDM tekniğinde iki ve daha fazla kafa (nozzle) kullanılarak farklı materyaller aynı parçada kullanılabilir. Bu sayede karmaşık ve destek materyalleri gerektiren parçalar için suda çözünen termoplastik ile destek yapılarını oluşturabilir. Parçanın mekanik özelliklerini

belirleyen faktörler şu şekilde sıralanabilir; katman kalınlığı, katman genişliği, baskı hızı, termoplastik malzemenin durumu (nemli malzemelerde farklı mekanik özellikler gözlemlenebilir), baskı yönü, doluluk oranı, hava kabarcıkları (aynı katmanda veya katmanlar arasında gözlemlenebilir), boşluklu yapı (Omar A. Mohamed ve diğerleri, 2015**,** Robert Sayre III, 2014). FDM tekniği diğer tekniklerle kıyaslandığında yüzey pürüzlülüğü açısından zayıf kalmaktadır. Bu eksikliğin giderilmesi için çeşitli çalışmalar mevcuttur (L.M. Galantucci ve diğerleri, 2010). Bu çalışmada çeşitli kimyasal işlemlerden geçirilen ürünün yüzey pürüzlülüğünde azalma gözlemlendiği gibi ayrıca mekanik özelliklerinde de gelişme gözlemlenmiştir. FDM tekniğinde SLS ve SLA tekniği ile kıyaslandığında, yöne bağlı mekanik özelliklerin değişimi (anizotropi) daha yüksektir. Anizotropik yapısını azaltmak için çeşitli çalışmalar mevcuttur (Steven Shaffer ve diğerleri, 2014). Gama ışını tekniği ile anizotropik yapının önüne geçilmeye çalışılmıştır.

3D baskı ile üretilen parçaların başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için mukavemet, sertlik ve tokluğun yanı sıra diğer mekanik özelliklerin de doğru bir şekilde belirlenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bu mekanik özelliklerin yanı sıra, malzeme özellikleri, üretim parametreleri ve baskı teknolojisi gibi faktörler de parçanın performansını etkileyebilir. Bu nedenle, 3D baskı malzemeleri ve süreçleri üzerine kapsamlı bir araştırma ve değerlendirme yapmak, endüstri uygulamalarında güvenilir ve dayanıklı parçaların üretimini desteklemek için hayati öneme sahiptir.

3D baskı ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin anlaşılması ve geliştirilmesi, bu teknolojinin endüstriyel uygulamalarda daha yaygın bir şekilde benimsenmesine ve kullanımının artmasına katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda, malzeme bilimi, mühendislik ve endüstriyel tasarım alanlarında yapılan araştırmalar, 3D baskı ile üretilen parçaların performansını optimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır

3D baskı ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini anlamak ve optimize etmek için malzeme seçimi, baskı parametreleri ve post-process işlemleri üzerine kapsamlı bir araştırma yapmak önemlidir. Kalıplama ve 3D baskı arasındaki bu mekanik farklılıklar, parça tasarımı, malzeme seçimi ve üretim sürecinin belirlenmesi aşamalarında dikkate alınmalıdır. Şekil 1.7'de D638'in ana ölçüleri verilmiştir.



Şekil 1.7 ASTM D638 standardına uygun çekme numunesinin geometrik boyutları (boyutlar mm'dir.)

Bu bağlamda, 3D baskı ve kalıplama yöntemleri arasındaki mekanik özelliklerin karşılaştırılması, her iki üretim sürecinin avantajlarını ve kısıtlamalarını anlamak için önemlidir. Ayrıca, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak hangi üretim yönteminin tercih edileceğini belirlemek için malzeme seçimi ve mühendislik tasarımının entegre bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Ayrıca katman katman biriktirme yöntemine özgü olarak, 3D baskı ile üretilen parçalar porozite ve anizotropiye sahiptir ki bu da mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Birçok araştırmacı, 3D baskı ile üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri inceleyerek, baskı parametreleri ve son işleme süreçlerinin rolünü anlamaya yönelik çalışmalar yapmıştır.

Genel olarak, işlem parametrelerinin optimize edilmesi, ısıl işlem gibi son işlemlerin uygulanması veya güçlendirilmiş malzemelerin kullanılması, mekanik dayanıklılığı artırabilir. Çoğu çalışmada, çekme, basınç, bükme, darbe testi gibi yöntemlerle elde edilen zamana bağlı olmayan mekanik özelliklerin yanı sıra yüzey pürüzlülüğü ve aşınma gibi diğer özellikler de araştırılmıştır.

Optimize edilmiş işlem parametreleri, ısıl işlemler veya güçlendirilmiş malzemelerin kullanımı, 3D baskı ile üretilen parçaların mekanik dayanıklılığını artırmak için etkili stratejiler olabilir. Araştırmalar, işlem parametrelerinin, özellikle baskı sıcaklığı ve hızının, parçanın yoğunluğu, iç yapısı ve yüzey kalitesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ısıl işlemler, parçaların mikroyapısını iyileştirerek mekanik özelliklerini artırabilir. İşlem parametrelerinin ve son işlemlerin, malzeme

seçimi ve tasarım süreçleriyle birlikte entegre bir şekilde ele alınması, 3D baskının endüstriyel uygulamalarda daha yaygın ve etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyabilir.

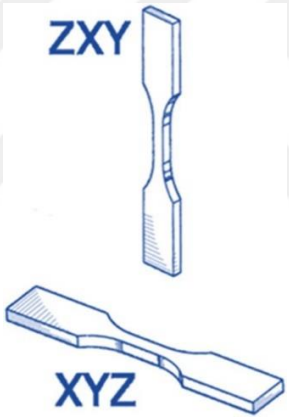
Metal malzemeler gibi, polimerler de uygun yüklenme ve sıcaklık koşullarında viskoelastisite/plastisite adı verilen zamana bağlı deformasyon davranışını sergileyen malzemelerdir. Malzemenin akma sınırının altında sabit stres altında (yavaş yüklenme altında) gerçekleşen plastik deformasyon, yani akma, polimerlerde düşük erime sıcaklıkları nedeniyle daha belirgin bir şekilde ortaya çıkar. Metal malzemelerin akma için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duymasına rağmen, polimerler yeterli stres seviyeleriyle oda sıcaklıklarında bile akma eğilimindedir. Bu durum, polimerlerin akma eğilimindeki düşük erime sıcaklıkları nedeniyle ortaya çıkar.

Aynı şekilde, polimerler için akma gibi, zamanla azalan bir stresi içeren stres rahatlaması da önemli bir çalışma alanıdır. Stres rahatlaması, sabit bir şekilde uygulanan gerilmeye karşı zamanla azalan bir stres içerdiğinden polimerler için önemli bir olaydır. Polimerlerin stres rahatlaması davranışı, uzun süreli dayanıklılık ve performansın kritik olduğu birçok uygulama için önemlidir. Özellikle havacılık, otomotiv, tıbbi cihazlar veya ambalaj sektörü gibi alanlarda ön plana çıkar. Polimer malzemelerin bu zamana bağlı deformasyon özellikleri, uzun vadeli performansı değerlendirmek ve tasarım stratejilerini belirlemek açısından önemli bir rol oynar.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Her tekniğin mekanik özelliklerini belirleyen kendine has bazı parametreleri vardır, yukarıda bunların bazılarından bahsedilmiştir. Ancak eklemeli imalat yöntemlerinde mekanik özellikleri belirleyen ortak parametreler mevcuttur. Bunlardan en önemlisi ve bu araştırmamızın da konusu olan parametre yöne bağlı mekanik özelliklerin değişimidir (Anizotropi). Anizotropi tanım olarak maddelerin fiziksel ya da mekanik özelliklerinin, yöne bağlı olarak değişmesidir. Bu değişim FDM tekniğinde diğer tekniklerle kıyaslandığında daha fazla görülmektedir.

Şekil 2.1.'de görüldüğü üzere baskı yönü anizotropik özellikle yakından ilişkilidir, örneğin ZXY yönü XYZ yönü ile karşılaştırıldığında mekanik özelliklerde farklılık gözlenmektedir.



Şekil 2.1 3 Boyutlu yazıcılarda baskı yönü gösterimi
(Angel R. Torrado ve David A. Roberson, 2016)

Literatürde 3B yazıcı ile elde edilen numunelerle yapılan tek eksenli çekme testi başta olmak üzere mekanik testleri içeren birçok çalışma mevcuttur (A.W. Fatimatuzahraa ve diğerleri, 2011**,** Sophia Ziemian ve diğerleri, 2015**,** B.M. Tymrak ve diğerleri, 2014**,** Behzad Rankouhi ve diğerleri, 2016**)**. Fakat test numunelerinden elde edilen sonuçlar yazdırma parametrelerine, numune geometrisi (kullanılan test standardı) ve buna bağlı yazdırma hataları ile karşılaşılabilmektedir. Bu konuda literatürde tam bir fikir birliği bulunmamakta ve farklı çalışmalar farklı standartlar ve parametreler kullanmaktadır **(**Diana Popescu ve diğerleri, 2018). Kullanılan test standartlarının, 3B yazıcılarla üretilmiş test numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemedeki tutarsızlığı

araştırmacıları standardın dışında test numuneleri kullanmaya itmiştir. **(**Antonio Lanzotti ve diğerleri, 2015). Bu çalışmalardan elde edilen mekanik özellikler hem kendi içerisinde hem de üretici firmalardan alınan değerlerden farklı çıkmaktadır. Kendi içerisinde numuneler basılırken farklı parametrelerin (yazdırma yönü, yazdırma doluluk oranı, katman kalınlığı, nozül kalınlığı, baskı sıcaklığı vb.) kullanılması elde edilen mekanik özelliklerin değerlerini ciddi oranda etkilemektedir. Firmaların yaptıkları testler ise 3B yazıcı ile oluşturulan numunelerden çok geleneksel yöntemlerle elde edilmiş numuneler olması sebebiyle sonuçlar yine farklılık göstermektedir. 3B baskı yönüne göre değişiklik gösteren mekanik özelliklerin anlaşılması ve parçanın mekanik özelliklerinin bu şekilde kullanılması eklemeli imalat yöntemleri açısından önem arz etmektedir.

Karbon fiber ve grafen ile takviye edilmiş bir HiPS matrisine sahip malzemenin çekme, basınç ve bükme yükleme modlarında sürünme ve stres gevşeme testleri gerçekleştirdi (Reis ve diğerleri, 2022). Çalışmaları, stres gevşemesinin diğer modlara kıyasla çekme modu için daha belirgin olduğunu göstermektedir. Malzemenin mekanik davranışını değerlendirmek için farklı yükleme koşullarını içeren geniş kapsamlı bir deneysel çalışma yaptı. (Reis ve diğerleri, 2022) Çalışma, malzemenin çekme modunda stres gevşemesinin diğer modlara göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. Karbon fiber ve grafen takviyeli HiPS matrisinin mekanik özellikleri, çekme yüklemesi altında daha belirgin bir stres gevşemesine işaret etmektedir. Bu bulgular, malzemenin gerilme altında nasıl davrandığını anlamak ve gelecekteki uygulamalarda daha dayanıklı malzemeler geliştirmek için önemlidir.

Bir başka çalışmada, karbon ve Kevlar ile takviye edilmiş PETG (Polietilen tereftalat-glikol) malzemesinden sıkıştırma örnekleri 3D yazıcı ile üretildi ve ardından sürünme, stres gevşeme testleri ile statik testler gerçekleştirildi. (Valvez ve diğerleri, 2022). Lif takviyesi, düz PETG'ye kıyasla daha yüksek sürünme ve stres gevşemesine neden oldu. Bu çalışma, karbon ve Kevlar lifleri ile güçlendirilmiş PETG malzemesinin mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yapılan deneyler, malzemenin zamanla nasıl deformasyona uğradığını ve stres gevşemesinin nasıl gerçekleştiğini incelemektedir. Elde edilen sonuçlar, lif takviyesinin malzemenin sürünme direncini artırdığını ve stres gevşemesini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, lif takviyesinin, düz PETG'ye kıyasla

malzemenin statik özelliklerini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, lif takviyeli malzemelerin mekanik davranışını anlamak ve gelecekteki uygulamalarda daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmak için önemlidir.

Bertocco ve ark. termal işlem görmüş PLA numunelerinin gevşeme davranışını farklı gerinme değerlerinde incelemişlerdir. Maxwell'e ek olarak 2 farklı matematiksel modeli deney sonuçlarını temsil etmek için kullanmışlardır. Bunların içinde Findley modelinin gerlime-zaman eğrilerini en uygun ifade olduğu belirlemişlerdir. Çalışma, PLA'nın gerilme gevşeme özelliklerini anlamak ve bu özelliklerin gerilme düzeyine bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bertocco ve ekibi, PLA numunelerini termal işleme tabi tutarak ve tabi tutmadan farklı gerinme düzeylerinde test etmişlerdir. Bulgular, PLA'nın termal işleme ve gerinme düzeyine bağlı olarak gerilme gevşeme davranışındaki değişiklikleri anlamak için önemlidir. Bu tür çalışmalar, biyo ayrışabilir plastik malzemelerin mühendislik uygulamalarında daha etkili ve güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi için önemli bir katkı sağlar.

Daver ve ark. FDM yöntemi ile üretilen poliolefin-kauçuk nanokompozitler üzerinde sürünme ve iyileşme testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma, poliolefin ve kauçuktan oluşan nanokompozit malzemelerin, FDM ile üretildiğinde gösterdiği sürünme ve iyileşme davranışlarını incelemeyi amaçlamamıştır. (Daver ve diğerleri, 2016).

Bu tür nanokompozit malzemeler, elastik ve dayanıklı tasarımlar için mühendislik uygulamalarında potansiyel bir alternatif olabilir. Araştırmacılar, nanokompozitin sürünme ve iyileşme davranışını analiz etmek için sırasıyla Burger ve Weibull dağılım modellerini kullanmışlardır. Bu modellerin belirlenen parametreleri daha sonra sonlu eleman analizinde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, deneysel ve analitik bulgularla uyumlu olmuştur. Ayrıca, çalışma, nanokompozitin iyileşme davranışı üzerinde uyumlaştırıcı maddelerin ve karbon nanotüplerin etkisini vurgulamıştır. Doğan, en yaygın kullanılan FDM filamentlerinin sürünme davranışı üzerinde stres ve sıcaklığın etkilerini inceledi. Çalışma, yükün sürünme davranışı açısından sıcaklıktan daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve PLA filamentinin, ABS ve Naylon gibi diğer filamentlere kıyasla sürünme karşısında en az dirence sahip olduğunu sonuçlandırmıştır.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların yanı sıra, literatürde diğer eklemeli imalat yöntemlerini kullanan birkaç çalışma daha bulunmaktadır. Seçici lazer sinterleme yöntemi ile üretilen Polimer-Alüminyum kompozitin gerilme gevşemesi ve sürünme özellikleri incelenmiştir. (Bochnia ve diğerleri, 2020). Gerilme gevşemesi testleri, farklı dolgu yönlerine sahip numuneler üzerinde yapılan bası testleri ile gerçekleştirilmiştir. Verilerin analitik modellemesi için genelleştirilmiş Maxwell-Wiechert modeli kullanılmıştır. Bu model, deneysel verilerin matematiksel olarak açıklanması için kullanılmıştır. Bu çalışma, Polimer-Alüminyum kompozitin gerilme gevşemesi ve sürünme özelliklerini anlamak ve Seçici Lazer Sinterleme yöntemi ile üretilen malzemelerin mekanik davranışını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu özel üretim yönteminin malzemenin mekanik performansını nasıl etkilediği konusunda önemli bilgiler sağlamaktadır.

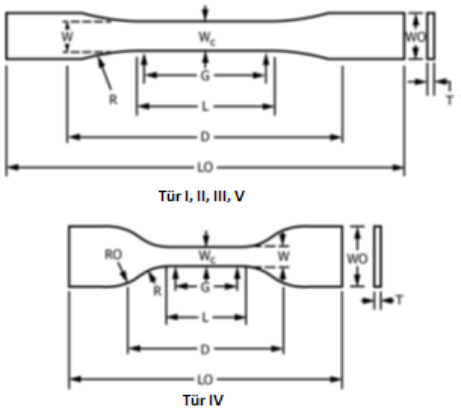
Farklı bir çalışmada, Polimer Jetting yöntemi ile üretilen bası numuneleri üzerinde gerilme gevşemesi testleri gerçekleştirilmiştir (Kundera ve diğerleri, 2018). PN EN ISO 3384 standardına göre iki farklı polimer reçinesi test edilmiştir Elde edilen sonuçlar, beş parametreli genelleştirilmiş Maxwell modelinin, ilgili polimerlerin gerilme gevşeme davranışını temsil ettiğini göstermiştir. Bu çalışma, Polimer Jetting yöntemi ile üretilen polimerlerin gerilme gevşeme özelliklerini anlamak ve bu özellikleri değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Standart test prosedürleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyler, iki farklı polimer reçinesinin gerilme gevşeme davranışını analiz etmiş ve genelleştirilmiş Maxwell modelinin bu davranışı en iyi şekilde temsil ettiğini göstermiştir. Bu bulgular, Polimer Jetting yöntemi ile üretilen malzemelerin mekanik performansının belirlenmesinde ve tasarlanmasında değerli bilgiler sağlamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Eklemeli imalat yönteminde en çok tercih edilen PLA (Polilaktik Asit) polimer malzemeleri, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan türetilmiş termoplastik bir malzeme türüdür. PLA malzemesinin en çok tercih nedenlerinden bir diğeri ise 150-160ºC arasında nispeten düşük bir erime noktasına sahip olduğundan malzeme ile baskı yapmak için daha az enerji gerektirir.

2012 Ocak ayında, ASTM International Committee F42'nin "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies" adı altında yayınladığı listede, eklemeli imalat yöntemleri için standartlar oluşturulmuştur. ASTM standart test yönetimi plastiklerin çekme özellikleri ile boyut tanımlaması aşağıda verilmiştir [Şekil 3.1] ve [Çizelge 3.1]. Bu test yöntemi geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak işlem geçmişine bağlı olarak mekanik özelliklerdeki farklılıkları ortaya koymaktadır.

Günümüzde, eklemeli imal edilmiş parçaların mekanik testleri için özel bir standart bulunmamaktadır. Araştırmacılar tarafından genellikle geleneksel olarak üretilen parçalar için olan standartlar kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada çekme ve bükme örneklerinin geometrik boyutları için sırasıyla ASTM D638 ve ASTM D790 standartları kullanılmıştır.

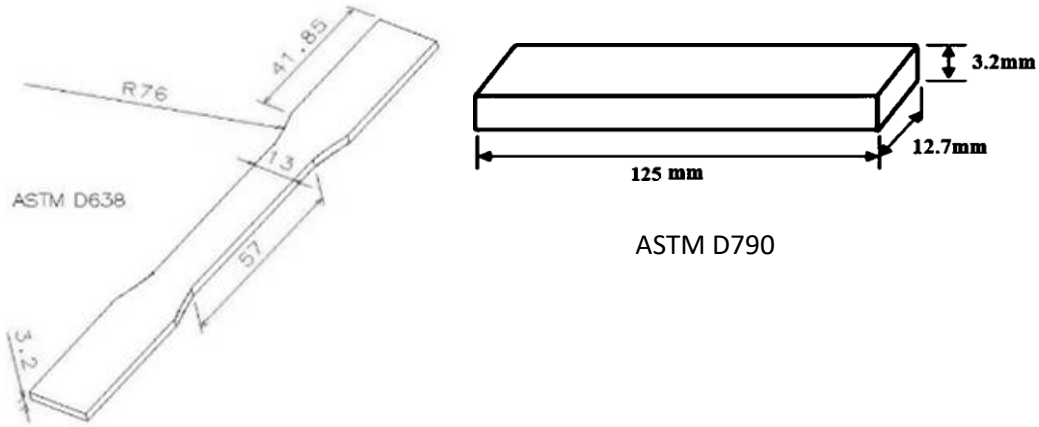


Şekil 3.1 (ASTM International. 2014)
ASTM standart test yönetimi plastiklerin çekme özellikleri ile boyut tanımlaması

Çizelge 3.1 (ASTM International. 2014)
Numune ölçüleri (Tabloda verilen ölçüler mm cinsindendir)

Boyutlar	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5
W — Dar bölüm genişliği	13	6	19	6	3,18
L - Dar bölüm uzunluğu	57	57	57	33	9.53
WO — Genel genişlik,	19	19	29	19	---
ÖÇ — Toplam uzunluk	165	183	246	115	63.5
G - Ölçü uzunluğu	50	50	50	---	7.62
G – Ölçü uzunluğu	---	---	---	25	---
D - Tutuşlar arasındaki mesafe	115	135	115	65	25.4
R — Fileto yarıçapı	76	76	76	14	12.7
RO — Dış yarıçap (Tip IV)	---	---	---	25	---

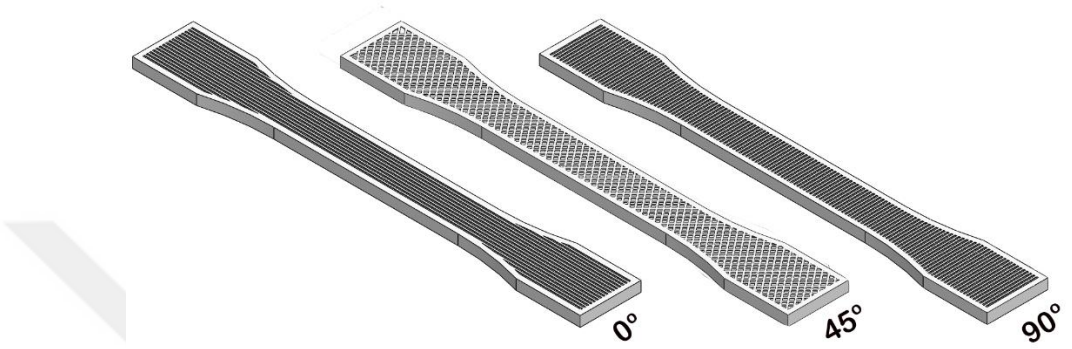
Eklemeli imalat yöntemi için hazırlanan ASTM D638 standartları 14 mm' ye kadar olan herhangi bir polimer malzemenin test edilmesi için geçerlidir (ASTM Interna-tional. 2014). Bu çalışmada ASTM D638 standartlarından Tip1 tercih edilmiştir. ASTM D638 ve ASTM D790 ile 0, 45, 90 derece baskı açıları olacak şekilde 3 farklı parametrede baskı alınmıştır. Bu parametreler D638 standardında ve ASTM D790 karşılaştırılmıştır. Teknik resimler Şekil 3.2. verilmiştir.



Şekil 3.2 ASTM D638 ve ASTM D790 Standartları (ölçüler mm'dir)

Eklemeli üretim yöntemi ile üretilen numunelerin üretim yönlerinin öneminden daha önce bahsedilmiştir. Anizotropi özelliğinde olan bu numunelerin eksenel yönde çekme uygulandığında gerilme-şekil değiştirmeye etkisi belirlenecektir. Test için hazırlanan

numuneler bir ticari firmadan satın alınan PLA malzemesidir. Her numune için baskı hızı, katman yüksekliği, baskı sıcaklığı, tabla sıcaklığı, doluluk oranı, nozzle çapı gibi baskının gerilme değerlerini etkileyecek parametreler sabit tutulup sadece baskı yönleri ile değişimlerdeki farklılık gözlenmek istenmiştir. Baskı yönlerinde 0°, 45°, 90° açılar referans alınarak her numune için üçer adet baskı alınmıştır Şekil 3.3.



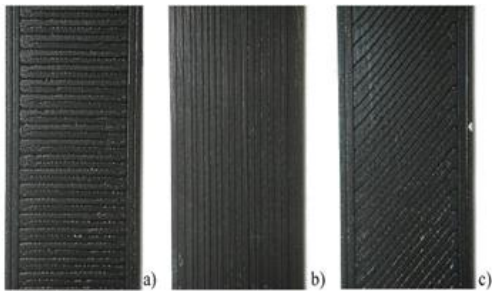
Şekil 3.3 Baskı açıları A) 0° B) 45° C) 90°

3.1. Deneysel Testler

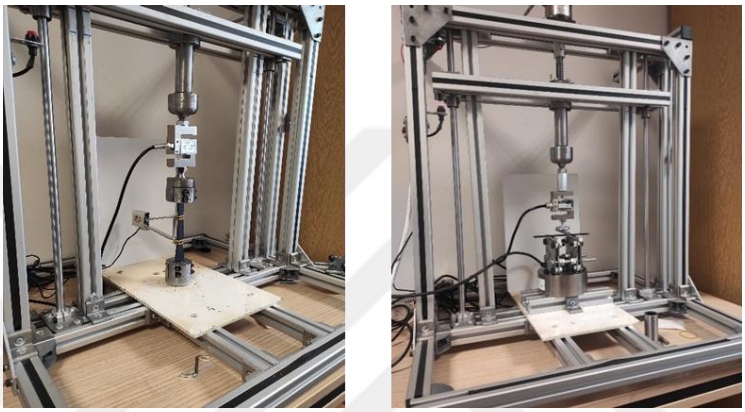
FDM baskısı için kullanılan malzeme, 1.75 mm çapında ve marka adı Uzaras olan yerel bir PLA'dır. FDM makinesi Creality Ender 3 Pro'dur. Test numunelerinin üretimi için Simplify3D programında dilimleme işlemi yapılmıştır. Örneklerin üretimi için kullanılan baskı parametreleri Çizelge 3.2. de verilmiştir. Örnekler, 0°, ±45° ve 90° olmak üzere 3 farklı iç dolgu yönergesi için basılmıştır (Şekil 3.4). Katman kalınlığı veya kontur çizgilerinin sayısı gibi bazı parametreler her örnek için sabit tutulmuştur. 45° numuneler simetrik çapraz çaprazlama konfigürasyonunda oluştur, yığın dizisi [+ 45 / −45]dir.

Çizelge 3.2 3D Baskı Parametreleri

Katman Yüksekliği [mm]	Eksrürizyon Genişliği [mm]	Dolgu Yoğunluğu [%]	Tabla Sıcaklığı [° C]	Nozul Sıcaklığı [° C]	Nozul Çapı [mm]	Baskı Hızı [mm/s]
0,3	0,5	100	55	190	0,4	50



Şekil 3.4 Numuneler üzerinde dolgu açılarının görünümü A) 90° B)0° C)45°



Şekil 3.5 Deneysel kurulum a) farklı iç dolgu yönergeleri için test örneklerinin şematik gösterimi b) çekme (sol) ve bükme (sağ) test düzeneği

Başlangıçta, düşük mukavemetli malzemeler için özel olarak tasarlanmış bir masaüstü test makinesi kullanılarak, statik çekme ve bükme testleri başarısızlık noktasına kadar gerçekleştirilmiştir. Bu makine, Atmega2560 (Microchip, ABD) mikrodenetleyici tarafından kontrol edilmektedir ve C++ dilinde geliştirilen bir yazılım kullanmaktadır. PC ve mikrodenetleyici arasındaki kullanıcı arayüz yazılımı C# (Microsoft Visual Studio 2022) dilinde yazılmıştır. Gerilme testi için kullanılan yük hücreleri (Tedea, ABD), sırasıyla 2 kN kapasiteye sahiptir ve bükme testi için 0.3 kN kapasiteye sahiptir. Displasman ölçümü, bir klipsli ekstensometre (NCS, Çin) kullanılarak yapılmıştır. Veri toplama kartının (Texas Instrument ADS1256, ABD) hızı, neredeyse statik gerilme/bükme testi ve stres gevşemesi gerilme/bükme testleri için sırasıyla 30 dps ve 1 dps olarak ayarlanmıştır. Baş hareket hızı, statik gerilme ve bükme testleri için 10 mm/dk olarak belirlenmiştir.

3D baskılı parçalar üzerinde özellikle sürünme veya gerilme gevşemesi testleri için belirlenmiş bir standart şu anda mevcut değildir, benzer şekilde neredeyse statik testlerin durumunda olduğu gibi. Önceki çalışmalar, stres rahatlaması testleri için iki farklı yaklaşım benimsemiştir. İlk yaklaşım, tüm test grupları için elastik aralık içinde sabit bir gerilme değerini korumayı içerirken, ikinci yaklaşım test gruplarını çekme veya bükme testlerinde maksimum dayanımına (veya basınç testlerinde akma dayanımına) karşılık gelen belirli bir yüzdeye sabit bir gerilme değerinde tutmayı içerir. Bu özel araştırmada, stres rahatlaması testleri için sabit gerilme değerleri, çekme ve bükme testlerinde gözlemlenen maksimum gerilmenin (%40'ı) belirli bir yüzdesine karşılık gelmesi amacıyla seçilmiştir.

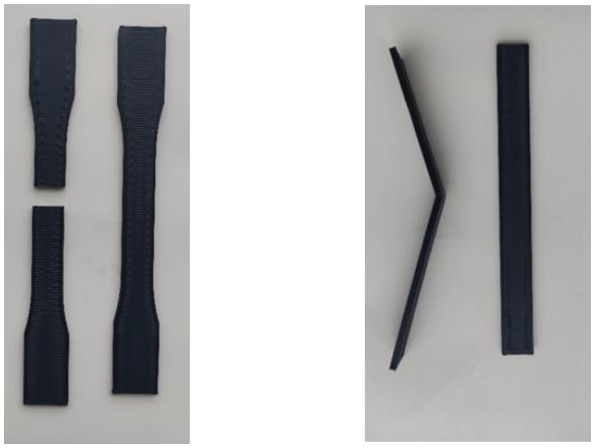
Her bir grup için çekme ve bükme stres rahatlaması testlerinde üç örnek üzerinde iki saat boyunca test gerçekleştirildi. Eğrilerin tekrarlanabilirliği göz önüne alındığında, 3 test yeterli bulunmuştur. Basılmış test örneklerinin test öncesi ve sonrası için temsili görüntüler verilmiştir.

Ölçülen kuvvet ve uzama değerleri, Denklemler (1) ve (2) kullanılarak bükme gerilme ve deformasyon değerlerine dönüştürülmüştür.

$$\sigma = 3PL/2bd^2 \tag{3.1}$$

$$\varepsilon = 6Dd/L^2 \tag{3.2}$$

Burada, σ bükme gerilmesini ve ε orta noktadaki dış fiberlerdeki bükme deformasyonunu ifade eder. P belirli bir noktadaki yük-deformasyon eğrisindeki yükü, L destek açıklığını, b ise kirişin genişliğini, D kirişin merkezindeki maksimum deformasyonu ve d ise kirişin derinliğini temsil eder.

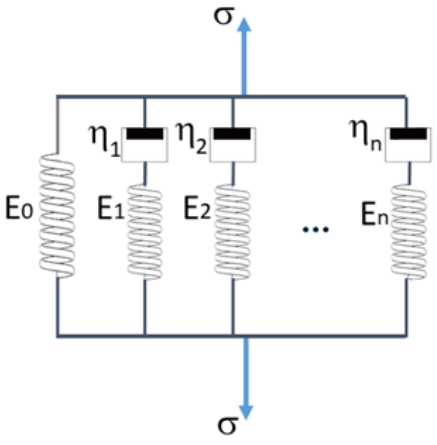


a) b)

Şekil 3.6 Basılmış test örnekleri, test edilmemiş (sağ) ve test edilmiş (sol) durumlar için a) çekme testi b) bükme testi

3.2.İstatiksel Yöntem

Maxwell-Weichert modeli, viskoelastik gerilme gevşemesi davranışını yansıtan en iyi matematiksel modellerden biridir. Bu model, malzemenin iki temel özelliğe sahip olduğunu varsayar; Hooke katı ve Newtonian sıvı. Maxwell-Weichert modeline karşılık gelen matematiksel ifade Denklem (3)'te verilmiştir. Maxwell modeline göre, viskoelastik davranan bir malzemenin davranışı iki bileşenle ifade edilir: bir yay ve bir damper. Yay, malzemenin elastik davranışını temsil ederken, damper, viskoz davranışını temsil eder.



Şekil 3.7 Maxwell Modellerinin Genel Formu

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \cdots + E_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) \quad (3.3)$$

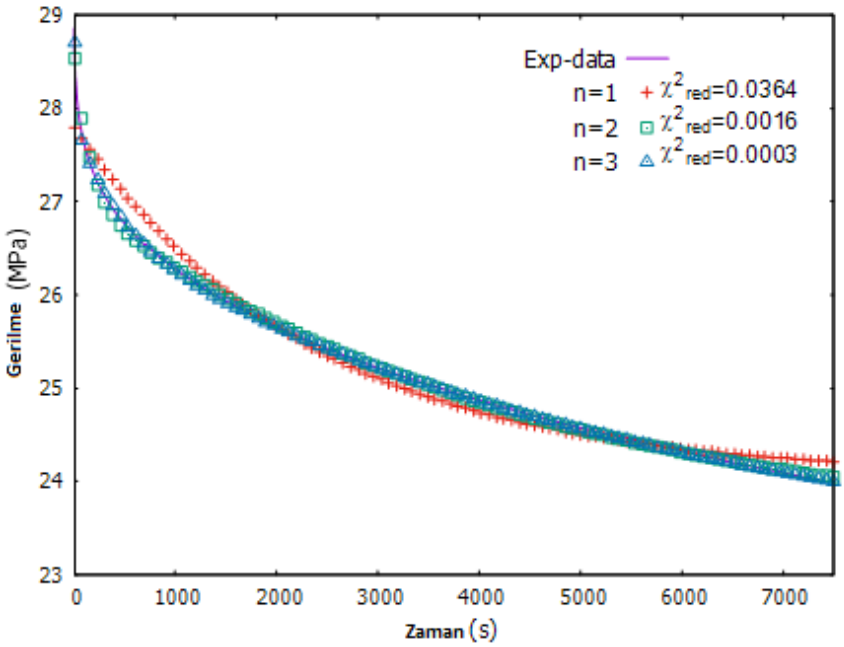
Burada ε_0 sabit deformasyonu, E_0 t→∞'de elastikiyet modülünü, $E_0 + E_1 + \cdots + E_n$ t=0'da eşdeğer elastikiyet modülünü, $\tau_k = \frac{\mu_k}{E_k}$dinamik viskoziteyi, τ gevşeme süresini ve t test süresini ifade eder.

Bu çalışmada, Azaltılmış Ki-Kare testi, uyum kalitesini değerlendirmek için en etkili Bu test, Denklem (4) ile basitçe ifade edilebilir:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(Exp_i - Cal_i)}{S_{d_i}^2} \tag{3.4}$$

Burada, Exp_i: deneysel veri, Cal_i: hesaplanmış veri, $S_{d_i}^2$: deneysel verinin varyansı. Denklemdeki paydada bulunan değer, deneysel ortalama ile analitik model değerleri arasındaki varyansı gösterirken; paydada bulunan değer, aynı parametrelere sahip örneklerin tekrarlanan deneylerindeki varyansı belirtir. Eğer ki-kare değeri 1'e yakınsa, deneysel ortalama ile analitik model arasındaki varyans, tekrarlanan deneylerdeki varyansa yakın demektir. 0'a yaklaşan bir ki-kare değeri, deneysel ortalama verisinin analitik modele çok iyi uyduğunu, ancak tekrarlanan deneylerin varyansının nispeten yüksek olduğunu gösterir. 1'den büyük bir ki-kare değeri, deneysel ortalamanın analitik modelle tutarsız olduğunu gösterir.

Kullanılan 3B baskılı PLA için modeldeki optimum n değerini belirlemek amacıyla azaltılmış ki-kare testi, temsilci bir gerilme rahatlaması eğilme testinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Analiz, tek bir deney verisi kullanılarak yapıldığından, Denklem (4)'te tekrarlanan deneylerin varyansı yazılım tarafından 1 olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, daha yakın bir ki-kare değeri sıfıra, deneysel ve analitik veriler arasındaki daha güçlü bir uyumu gösterir. Yüksek n değerinin, model eğrisinin deneysel eğriyle daha iyi eşleştiği görülmektedir. Basitlik açısından, n=2'nin tüm analizler için optimum değer olarak kabul edildiği sonucuna varılabilir.

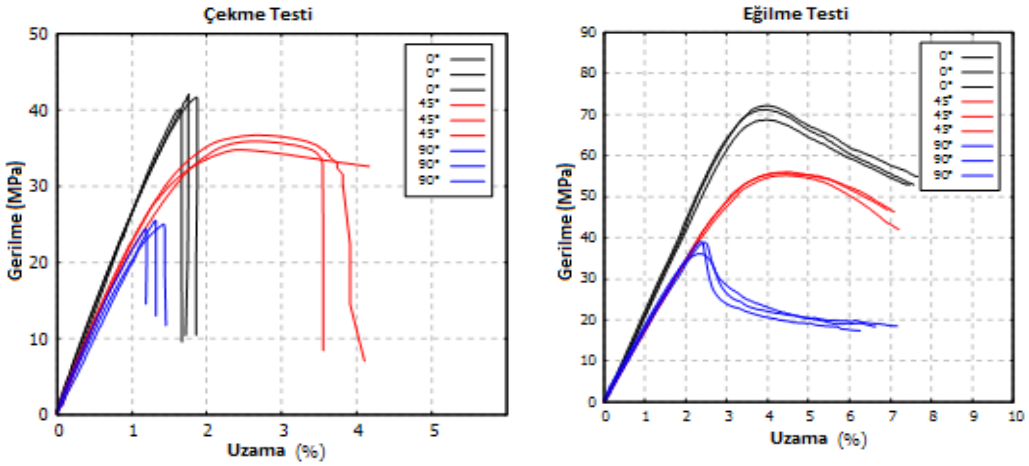


Şekil 3.8 n değerlerine bağlı olarak gerilme gevşemesi modelinin uyum performansı

4. BULGULAR

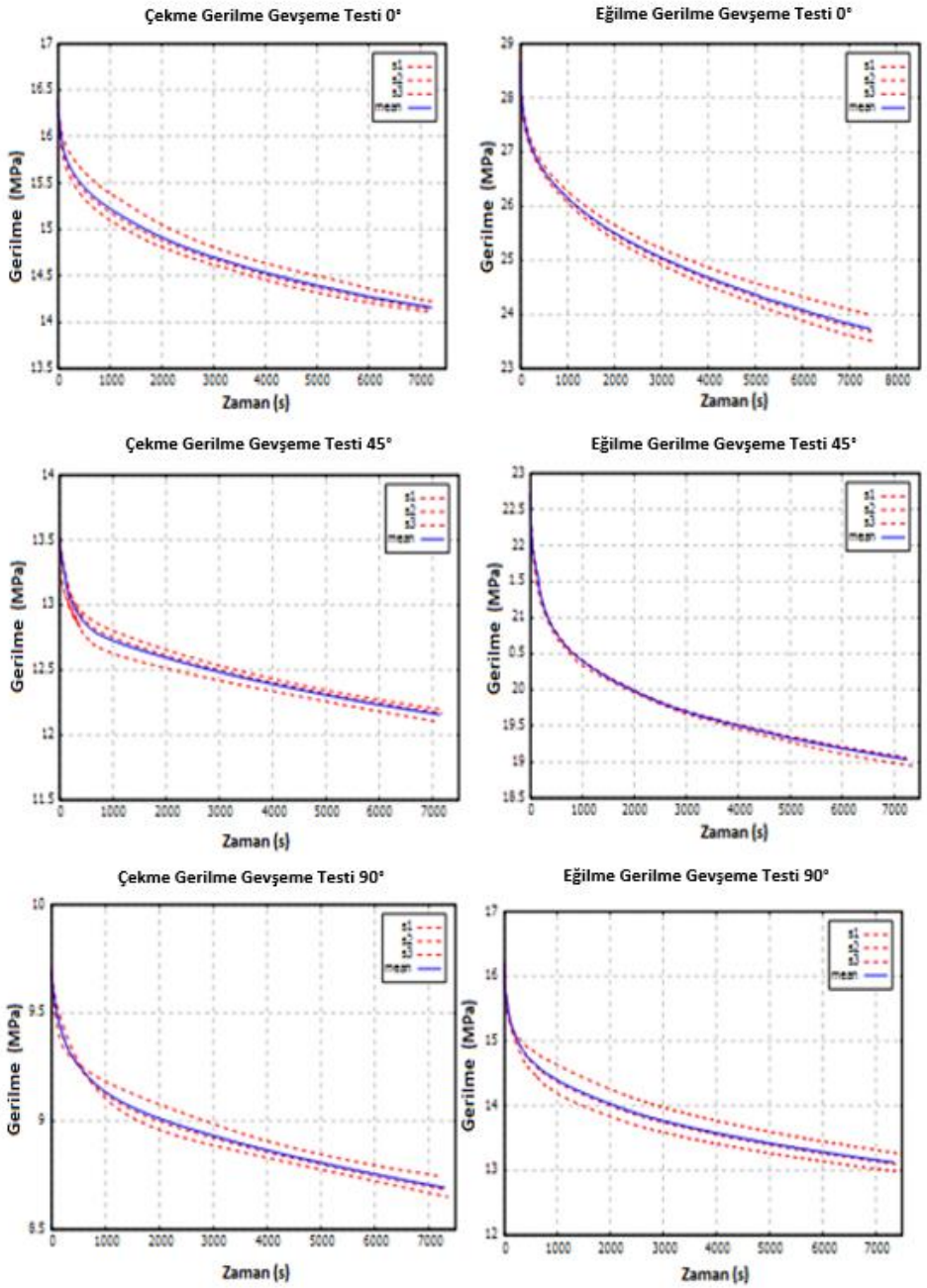
Şekil 4.1, gerilme gevşeme testlerinde kullanılacak sabit şekil değiştirme değerini belirlemek için kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini göstermektedir. Girişte verilen önceki çalışmalara uygun olarak, en yüksek mukavemet değerleri 0° dolgu yönüne sahip örneklerde, en düşük değerler ise 90° dolgu yönüne sahip örneklerde gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, dolgu yönünün 0° ila 90°'ye kaydıkça yükün, nispeten daha güçlü filament yerine yapışma yüzeyi tarafından giderek daha fazla taşınmasıdır. Her deneysel grup için elde edilen maksimum gerilmenin %40'ına karşılık gelen şekil değiştirme değerleri,testlerde uygulanacak sabit gerinme değeri olarak kullanılmıştır.

Çekme testinden elde edilen bulgulara dayanarak, ±45° dolgu yönünde olan numunelerin en yüksek sünekliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, bir numunenin çekme gerilmesine maruz kaldığında, maksimum kayma gerilmelerinin numune ekseni boyunca 45°'lik bir yönde oluştuğu ve bununda ±45°'lik numunelerde filament yapışma yüzeylerine denk geldiği ve bu yüzeylerde yüksek yer değiştirme elde edildiği olarak yorumlanabilir. Yani filament kendisindeki şekil değiştirmeye kıyasla ara yüzünde daha fazla göreceli hareket olduğu görülmektedir. Öte yandan, eğilme testlerinde kırılgan kırılma meydana gelmez, çünkü hasar kesitin belirli noktalarında yerel olarak başlar ve numunedeki eğilme miktarına bağlı olarak yavaşça ilerler.



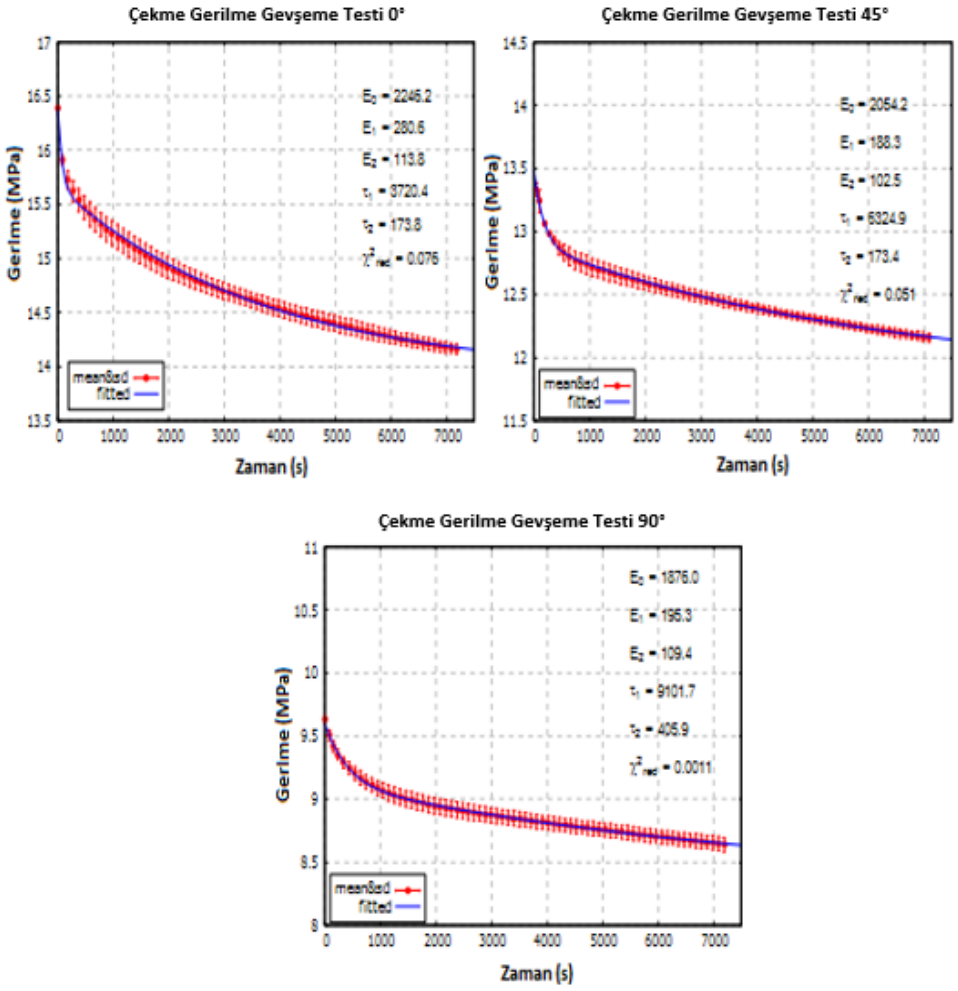
Şekil 4.1 Kuvvetlendirilmiş çekme ve eğilme testlerinin gerilme-deformasyon eğrileri (Her dolgu oryantasyonu için 3 eğri gösterilmiştir)

Şekil 4.2'da 0° dolgu yönü için temsili (ortalama) çekme ve eğilme gevşemesi test eğrileri gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler kesikli çizgilerle temsil edilirken, düz çizgiler ortalama eğriyi temsil etmektedir. Ki-kare testi uygulamadan önce, her deney grubu için ortalama ve standart sapma hesaplanmıştır.

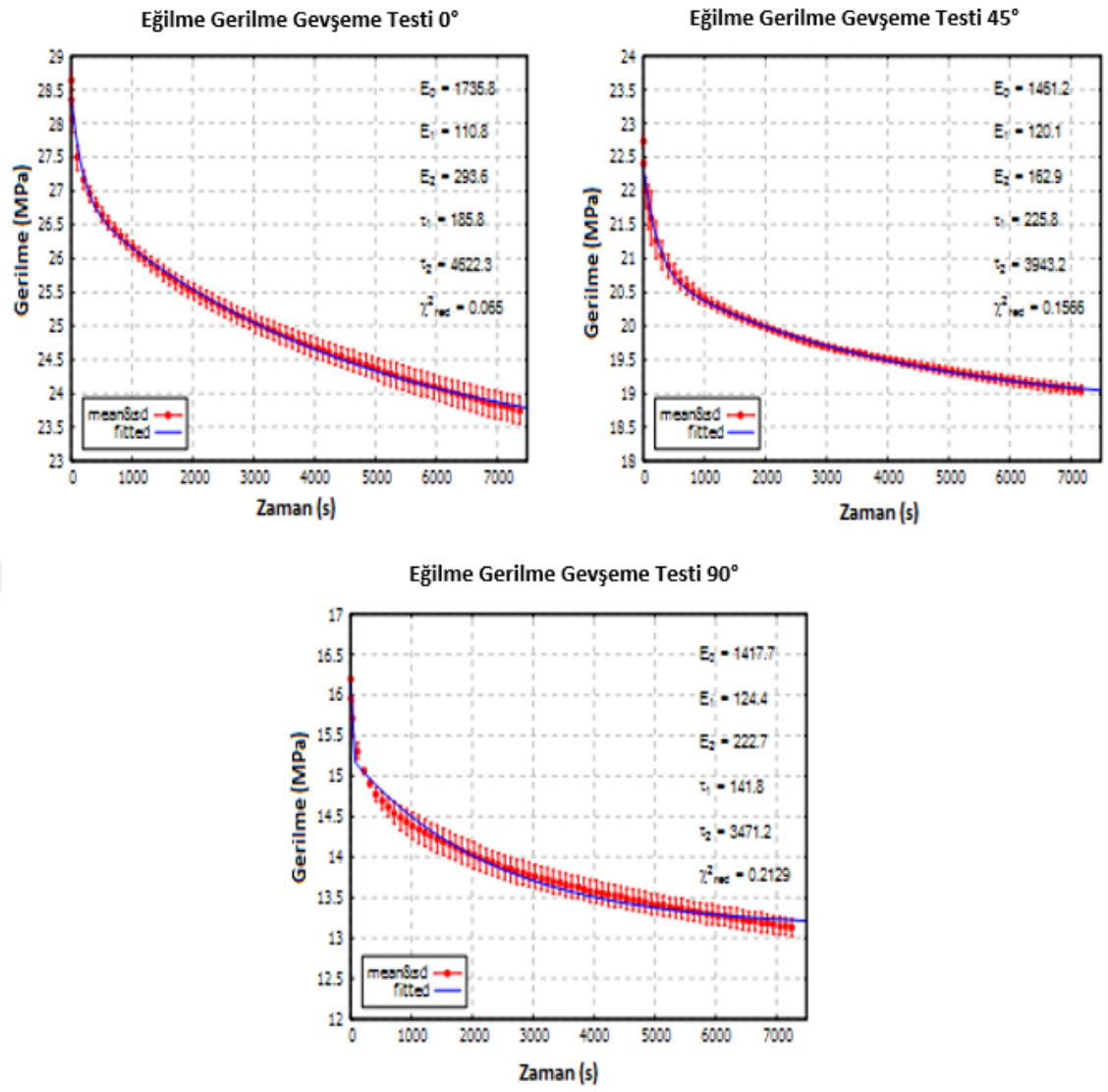


Şekil 4.2 Tüm dolgu yönleri için çekme ve eğilme testlerinin gerilme gevşemesi eğrileri

Şekil 4.3’de her dolgu yönü için çekme testinden elde edilen gerilme gevşemesi eğrileri göstermektedir. Grafikteki hata çubukları, çoklu deneylerden hesaplanan standart sapma değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca, grafikler deneysel verilerden türetilen ve bunların karşılık gelen standart sapmalarını içeren Maxwell-Weichert modeli katsayılarını sunmaktadır. Aynı grafikler, bu katsayıları kullanarak oluşturulan uygun eğrileri de göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 8, eğilme gevşemesi testlerinden elde edilen eğrileri ve bunlarla ilişkilendirilmiş uygun eğrileri sergilemektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'deki hem çekme hem de eğilme gevşemesi eğrilerinden kolayca görülebileceği gibi, model eğrisi test eğrisiyle çok iyi uyum sağlamıştır ve standart sapma çubuklarının ortasından geçer. Azaltılmış ki-kare değerleri, ortalama eğri ile model eğrisi arasındaki varyansın, tekrarlanan deney eğrileri arasındaki varyanstan çok daha düşük olduğu için yaklaşık 0'a yakın bulunmuştur.



Şekil 4.3 Standart sapma ve uygun eğrilerle çekme gerilme gevşemesi



Şekil 4.4 Standart sapma ve uygun eğrilerle eğilme gerilme gevşemesi

Gerilme gevşemesine bağlı olarak eşdeğer elastikiyet modülündeki değişiklik, iki belirli zaman (t= ve t=∞) için incelenebilir. Eğer Denklem (3) yazılırsa;

$\sigma_{t=0} = \varepsilon_0(E_0 + E_1 + E_2)$ ve, , $\sigma_{t\to\infty} = \varepsilon_0(E_0)$

İlk durumda, eşdeğer elastikiyet modülünün $(E_0 + E_1 + E_2)$ sanki-statik testlerden elde edilen elastikiyet modülüne yakın olduğu görülmektedir. İkinci durumda ise deney boyunca sabit kalan E_0 eşittir.

Malzemenin uzun gerinme maruz kaldığında stresin azalması, moleküler yapısının yeniden düzenlenmesi ve kayma mekanizmalarının aktive olması ile ilişkilidir. Bu

mekanizmaların anlaşılması, malzemenin dinamik viskozite özellikleriyle yakından ilişkilidir. Dinamik viskozite, özellikle Maxwell-Weichert modelinin katsayıları kullanılarak belirlenebilir, özellikle denklemdeki ikinci ve üçüncü terimler,

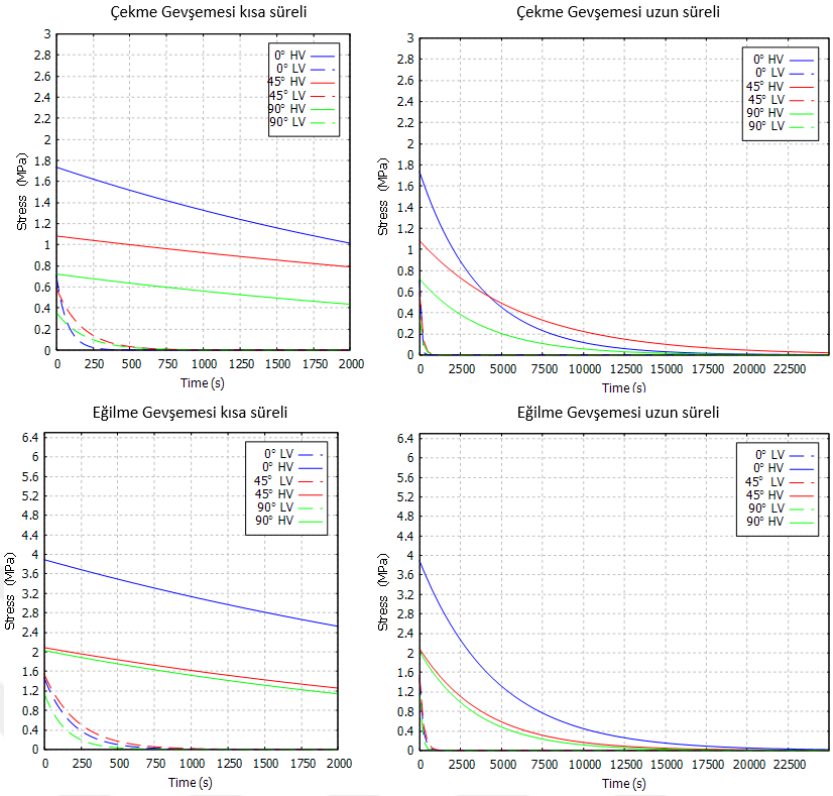
$\mu_1 = E_1\tau_1,\ \mu_2 = E_2\tau_2$ ifade edilir.

Test türüne ve dolgu yönlendirmesine bağlı olarak hesaplanan dinamik viskozite Çizelge4.1. 'de gösterilmiştir. Görülebileceği gibi, her denklem bir yüksek viskozite terimi ve diğer düşük viskozite terimini içermektedir. Çekme rahatlaması testlerinde ikinci terimler yüksek viskoziteleri, üçüncü terimler düşük viskoziteleri içerirken, eğilme rahatlaması testlerinde durum tam tersidir. Şekil 4.5.'de Maxell-Weichert denkleminin ikinci ve üçüncü terimlerinin stres rahatlaması davranışı üzerindeki etkisini kısa ve uzun zaman aralığında göstermektedir.

Çizelge 4.1 Maxwell-Weichert modelinden hesaplanan dinamik viskoziteler (Birim: MPa.s'dır)

	Çekme Gevşemesi		Eğilme Gevşemesi	
Dolgu Yönü	$\boldsymbol{\mu_1}$	$\boldsymbol{\mu_2}$	$\boldsymbol{\mu_1}$	$\boldsymbol{\mu_2}$
0°	1043944	8398	20586	1357107
±45°	1190979	17773	27118	642347
90°	1777659	44404	17923	773036

Kısa süreli rahatlama grafikleri, çekme testlerinde yaklaşık 500 s ve eğilme testlerinde yaklaşık 750 s sonra düşük viskozite terimlerinin ortadan kaybolduğunu göstermektedir. Diğer yandan, uzun süreli rahatlama grafikleri, yüksek viskozite terimlerinin etkisinin her iki test türü için de 20000 s sonrasında var olmadığını göstermektedir. Bu veriler göz önüne alındığında, 3D baskılı PLA malzemelerinin rahatlama testleri için ideal zamanın 750-20000 s arasında olması gerektiği sonucuna varılabilir.



Şekil 4.5 Maxwell-Weichert denklem teriminin kısa ve uzun vadeli etkisi (DÜ: düşük viskozite terimleri, YÜ: yüksek viskozite terimleri)

Başlangıç ve son gerilme değerleri ile gevşeme oranları Çizelge 4. 2.'de gösterilmiştir. 0° ve 90° dolgu yönlerine ait gevşeme yüzdeleri, çekme ve eğilme yüklemelerinde benzer değerlere sahiptir. Sanki-statik çekme testinde, ±45° dolgu yönlendirmesi için daha büyük deformasyon gözlemlenmiştir. Ancak, gerilme gevşeme testleri, ±45° dolgu yönlendirmesinin hem çekme hem de eğilme yüklemeleri için en düşük gerilme gevşemesini gösterdiğini ortaya çıkartmıştır. İki tür yüklemeyi karşılaştırıldığında, gevşeme miktarının çekme testlerine kıyasla eğilme testlerinde daha yüksek olduğu elde edilmiştir.

Çizelge 4. 2 Gerilme gevşemesi yüzdeleri

	Çekme			***Eğilme***		
Doluluk Yönü	$\sigma_{t=0}$	$\sigma_{t\to\infty}$	***% gevşeme***	$\sigma_{t=0}$	$\sigma_{t\to\infty}$	***% gevşeme***
0°	16.33	13.89	14.94	28.37	23.01	18.89
±45°	13.48	11.81	12.40	22.36	18.73	16.23
90°	9.55	8.21	14.03	16.09	12.91	19.76

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, eklemeli imalat yoluyla üretilen PLA'nın davranışında gerilme gevşemesinin önemli bir rol oynadığını göstermektedir ve bu etkiyi uzun bir süre boyunca sürekli deformasyon yaşayan parçaların uygulamalarında dikkate almak önemlidir. Farklı dolgu yönlerine sahip numuneler, ilgili sanki-statik testlerin yapılmasının ardından çekme ve eğilme yükleri altında gerilme gevşemesi testlerine tabi tutularak gerilme gevşeme davranışı incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

İki parametreli Maxwell-Weichert modeli, deneysel verilere yeterince uyum sağlamakta ve ek parametre içeren bir modelin kullanılmasına gerek olmadığını göstermektedir. İki yay-damper öğesini içeren Maxwell-Weichert modeline dayanarak, daha düşük katsayılı yay-damper öğesinin etkisi yaklaşık 750 saniye civarında azalırken, daha yüksek katsayılı yay-damper öğesinin etkisi yaklaşık olarak 20000 saniye sonra azalmaktadır. Bu nedenle, Maxwell-Weichert modelinin doğru bir temsilini elde etmek için, PLA için stres gevşemesi test süresinin 750 ile 20000 saniye aralığında olması önerilmektedir. Bu bulgular, PLA'nın zamanla meydana gelen mekanik davranışının anlaşılması ve öngörülmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

±45° dolgu yönleri hariç, 0° ve 90° dolgu yönlerinin, gerilme gevşemesi dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görüldü. ±45° dolgu yönlendirmesinin diğer yönlendirmelere göre daha dirençli olduğu gösterildi. Bu bulgular, 3B baskı parametrelerinin ve dolgu yönlendirmelerinin PLA'nın mekanik davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca, ±45° dolgu yönlendirmesinin, uzun süreli gerilme altında daha az gevşeme gösterdiği ortaya çıkmıştır, bu da uygulama senaryolarında bu özelliklerin dikkate alınmasının önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Çekme yükleme ile karşılaştırıldığında eğme yüklemesinde daha yüksek bir gerilme gevşemesi yüzdesi gözlemlenmektedir. Bu durum, filament arayüzü ve iç yapının değişen direnci ile ilişkilidir. Bu bulgu, malzemenin eğme yüklemesine maruz kaldığında gerilme gevşemesinin daha belirgin olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, malzemenin farklı yükleme modları altında gösterdiği mekanik davranışın anlaşılmasına

katkıda bulunarak, özellikle malzemenin uzun süreli maruz kalma durumlarında nasıl davrandığını değerlendirmek için önemli bir bilgi sağlamaktadır.

Bu çalışmanın elde ettiği sonuçların yanı sıra, katman yüksekliği, baskı hızı ve stres gevşemesi test sıcaklığı gibi diğer baskı parametreleri de daha fazla araştırma için incelenebilir. Bu parametrelerin incelenmesi, 3D baskı parametrelerinin PLA malzemesinin mekanik davranışı üzerindeki etkilerini daha geniş bir perspektiften anlamamıza ve gelecekteki çalışmalara rehberlik etmemize yardımcı olabilir.

KAYNAKLAR

Jeffrey W. Stansburya ve diğerleri, 2015. "3D printing with polymers: *Challenges amongexpanding options and opportunities*" 54–64.

Simon Bradshaw ve diğerleri, 2010. "*The Intellectual Property Implications Of Low-Cost 3d Printing*"

Massimo Martorelli ve diğerleri, 2013. "*A comparison between customized clear and removable orthodontic appliances manufactured using RP and CNC techniques*", Dental Materials, 29.

Jian-Yuan Lee ve diğerleri, 2017. *"Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*" , Applied Materials Today 7, 120-133.

Tuan D. Ngo ve diğerleri, 2018. "*Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*" 172-196.

Stefanie Mueller ve diğerleri, 2014. "*WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping*"

Mark Vitale ve diğerleri, 2016. "*An Overview of Additive Manufacturing*", Defense AT&L: November-December 2016.

Krassimir Dotchev ve Wan Yusoff, 2009. "*Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process*", Rapid Prototyping Journal 15/3, 192–203.

Ian Gibson ve Dongping Shi, 1997, "*Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process*", Rapid Prototyping Journal Volume 3 · Number 4 ,129–136.

Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Interna-tional. 2014. DOI:10.1520/D0638-14

Xin Wang ve diğerleri, 2017. "*3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective*", Composites Part B 110, 442-458.

Omar A. Mohamed ve diğerleri, 2015. "*Optimization of fused deposition modeling process parameters*: a review of current research and future prospects", Adv. Manuf., 3:42–53.

13 L.M. Galantucci ve diğerleri, 2010. " *Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling*", CIRP Annals - Manufacturing Technology 59 , 247–250.

Steven Shaffer ve diğerleri, 2014." *On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation*" Polymer 55, 5969-5979.

Diana Popescu ve diğerleri, 2018. "*FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review*", Polymer Testing 69, 157–166.

Antonio Lanzotti ve diğerleri, 2015. "*The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer*", Rapid Prototyping Journal 21/5, 604–617.

ASTM D790-10 2010 StandardTest Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1.

P. N. B. Reis, S. Valvez, J. A. M. Ferreira, Procedia Struct. Integr. 2022, 37, 934–940.

J. Bochnia, S. Blasiak, Polymers (Basel). 2020, 12(4), 830.

A.W. Fatimatuzahraa ve diğerleri, 2011. "*The effect of employing different raster orientations on the mechanical properties and microstructure of Fused Deposition Modeling parts*" 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA), Langkawi, Malaysia.