



## Experimental investigation of the creep behavior of test specimens manufactured with fused filament fabrication using different manufacturing parameters

Oğuz Doğan\*<sup>ID</sup>, Muhammed Safa Kamer<sup>ID</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 46040, Kahramanmaraş, Türkiye

### Highlights:

- Creep test samples production with fused filament fabrication (FFF) method in 3D printer
- Creep tests for polymer materials
- Effect of different production parameters on creep strength

### Keywords:

- Additive manufacturing
- Fused filament fabrication (FFF)
- 3D printing
- Creep tests

### Article Info:

Research Article

Received: 30.05.2022

Accepted: 01.09.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1122973

### Acknowledgement:

The consumables used in this study were provided by Kahramanmaraş Sutcu Imam University within the scope of the project numbered 2020/7 – 17 M. We would like to thank Kahramanmaraş Sutcu Imam University for their valuable contributions.

### Correspondence:

Author: Oğuz Doğan

e-mail:

oguzdogan@ksu.edu.tr

phone: +90 344 300 4587

### Graphical/Tabular Abstract

In this study the effects of 3D printing process parameters (printing angle, nozzle diameter, layer thickness) and test parameters (temperature and loading) on the short-term creep behavior of the 3D printed test samples are investigated experimentally. This study is consisted of four main stages which is defined in Figure A and the more details about this study are given in below statements.

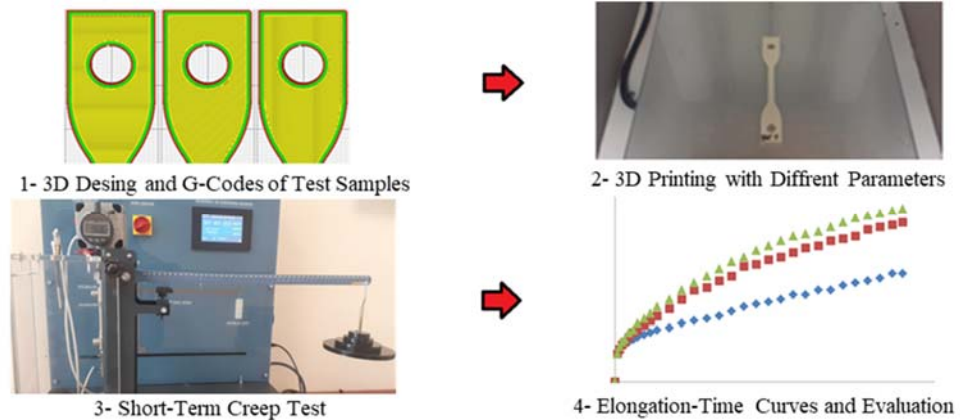


Figure A. Followchart of this study

### Purpose:

The main purpose of this study is to reveal the effects of the 3D printing process parameters on the short-term creep behavior of the 3D printed test samples

### Theory and Methods:

The creep tests samples are produced FFF method by using 3D printer for different printing parameters according to the ASTM D638 – 14 type IV. Creep tests were performed for the produced test specimens under different temperature and loading conditions. The primary and secondary creep zones of the material were defined from the creep tests.

### Results:

The most effective parameter on creep is the ambient temperature. It is seen that the creep strength increases significantly with increasing nozzle diameter also, the creep strength decreases with the decrease of layer height. Test specimens produced in the same axis with the loading direction have less creep strength than the specimens produced perpendicular to the loading direction. the amount of creep increases as the stress value applied on the test specimen increases.

### Conclusion:

It has been determined that each parameter has significant effects on the creep behavior of the test specimens produced with the 3D printer.



## Farklı imalat parametreleri kullanılarak eriyik yığıma modelleme ile imal edilen test numunelerinin sürünme davranışlarının deneysel olarak incelenmesi

Oğuz Doğan\*<sup>ID</sup>, Muhammed Safa Kamer<sup>ID</sup>

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46040, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- 3 boyutlu (3B) yazıcıda eriyik yığıma modelleme (EYM) yöntemi ile sürünme test numunesi imal edilmesi
- Polimer malzemeler için sürünme testleri
- Farklı imalat ve test parametrelerinin sürünme özelliklerine etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.05.2022

Kabul: 01.09.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1122973

### Anahtar Kelimeler:

Ekleme imalat,  
eriyik yığıma modelleme,  
3B yazdırma,  
sürünme testi

### ÖZ

Ekleme imalat teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen ürünler daha fazla kullanılır hale gelmiştir. Ekleme imalat yönteminin birçok farklı tekniği bulunmaktadır. Bu tekniklerden bir tanesi malzeme ekstrüzyonu tekniğidir. Eriyik yığıma modelleme (EYM) yöntemi bu teknik kapsamında en fazla kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Özellikle 3B yazıcıların yaygınlaşmasıyla birlikte EYM yöntemi yoğun şekilde kullanılır hale gelmiştir. 3B yazıcılar kullanılarak EYM ile gerçekleştirilen imalat süreçlerinde birçok farklı parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler ürünün mekanik, fonksiyonel ve görsel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. 3B yazıcılarla polimer malzemeler kullanılarak imal edilen ürünlerin boyutlarında statik yüklenme koşullarında sürünmeden dolayı önemli değişiklikler olmaktadır. Bu nedenle farklı imalat parametrelerinin 3B yazıcılarla EYM yöntemi ile imal edilen polimer malzemelerin sürünme davranışı üzerine etkilerinin incelenmesi tasarımcılar açısından faydalı olacaktır. Bu çalışmada farklı imalat parametreleri (yazdırma açısı, nozul çapı, katman yüksekliği) ile 3B yazıcıda polilaktik asit (PLA) malzeme kullanılarak sürünme test numuneleri imal edilmiştir. İmal edilen test numuneleri için farklı sıcaklık ve yüklenme koşulları altında sürünme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde malzemenin birincil ve ikincil sürünme bölgeleri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen testler sonucunda, test bölgesi sıcaklığının sürünme üzerinde etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yazdırma açısı, katman yüksekliği ve nozul çapı değişiminin de 3B yazıcı ile üretilen polimer malzemenin sürünme davranışına önemli ölçüde etkidiği belirlenmiştir.

## Experimental investigation of the creep behavior of test specimens manufactured with fused filament fabrication using different manufacturing parameters

### H I G H L I G H T S

- Creep test samples manufacturing with fused filament fabrication (FFF) method in 3 dimensional (3D) printer
- Creep tests for polymer materials
- Effect of different manufacturing and test parameters on creep properties

### Article Info

Research Article

Received: 30.05.2022

Accepted: 01.09.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1122973

### Keywords:

Additive manufacturing,  
fused filament fabrication,  
3D printing,  
creep test

### ABSTRACT

The use of additively manufactured products has increased with the rapid development of the additive manufacturing technologies. There are many different techniques of additive manufacturing method. Material extrusion technique is one of these techniques. Fused filament fabrication (FFF) method is one of the most used methods within the scope of this technique. Especially the FFF method has become intensely used, with the widespread use of 3D printers. Many different parameters are used in the manufacturing processes performed with FFF using 3D printers. These parameters directly affect the mechanical, functional and visual properties of the product. There are significant changes in the dimensions of the products manufactured using polymer materials with 3D printers, due to creep under static loading conditions. For this reason, it will be beneficial for designers to examine the effects of different manufacturing parameters on the creep behavior of polymer materials manufactured with 3D printers using FFF method. In this study, creep test specimens were manufactured using Polylactic acid (PLA) material in a 3D printer with different manufacturing parameters (printing angle, nozzle diameter, layer thickness). Creep tests were carried out for the manufactured test specimens under different temperature and loading conditions. The primary and secondary creep stages of the material were taken into account in the tests. As a result of the tests performed, it was determined that the ambient temperature was the most effective parameter on creep. In addition, it was determined that the variation of printing angle, layer thickness and nozzle diameter significantly affected the creep behavior of the polymer material manufactured with the 3D printer.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*oguzdogan@ksu.edu.tr, msafakamer@ksu.edu.tr / Tel: +90 344 300 4587

## 1. Giriş (Introduction)

Ekleme imalat üç boyutlu model verilerinden parçalar yapmak için eksiltici imalat ve biçimlendirici imalat yöntemlerinin aksine genellikle malzemelerin katmanlar halinde birleştirme süreci olarak tanımlanmaktadır [1]. Günümüzde çok sayıda eklemeli imalat yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları seçici lazer eritme (SLM), seçici lazer sinterleme (SLS), eriyik yığıma modelleme (EYM), stereolitografi (SLA) yöntemleridir. Her bir yöntemin kendisine özgü çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [2]. Genel olarak incelendiğinde Ngo vd. [3] eklemeli imalatın avantajlarını tasarım özgürlüğü, özelleşme (bireyselleşme), atık minimizasyonu ve karmaşık yapıların üretilebilmesi olarak sıralamaktadır. İleri teknolojik gelişimin yanı sıra eklemeli imalat üzerine araştırılması gereken dezavantajlar ve zorluklar da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar ve zorluklar Abdulhameed vd. [4] tarafından, parça boyutu sınırlamaları, anizotropik mekanik özellikler, çıkıntılı yüzeylerin oluşturulması, yüksek maliyetler, düşük üretim verimliliği, üst katmanlardaki boşluklar, yetersiz ekstrüzyon, katman hizasızlığı, aşırı ekstrüzyon, seri imalat zorluğu ve kullanım malzemelerinin sınırlandırılması olarak özetlenmektedir.

Ekleme imalat tekniklerinden biri olan malzeme ekstrüzyonu tekniği içerisinde bulunan eriyik yığıma modelleme (EYM) yönteminin kullanımı 3B yazıcıların yaygınlaşması ile birlikte gittikçe artmaktadır. EYM yöntemi, imal edilen parçanın yekpare olarak katmanlar halinde üretilmesi mantığına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, hammadde öncelikle ısıtılarak akışkan hale getirilir ve eksen kontrolüne sahip bir nozuldan geçirilerek, imal edilecek parçanın katmanlar halinde üretilmesi sağlanır. 3B yazıcı ile gerçekleştirilen imalat çalışmalarında, ürünün mekanik, fonksiyonel ve görsel özelliklerini doğrudan etkileyen birçok imalat parametresi bulunmaktadır. Bu nedenle 3B yazıcı ile imalat yaparken, ürünün kullanılacağı yere göre imalat parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Literatür incelendiğinde, birçok araştırmacının 3B yazıcı imalat parametrelerinin imal edilen ürünlerin çeşitli mekanik özelliklerine olan etkilerini incelediği görülmektedir. Popescu vd. [5] 3B yazıcı ile imal edilen ürünler için en belirleyici mekanik özelliklerin çekme, basma, eğilme ve darbe dayanımları olduğunu vurgulamışlardır. Kamer vd. [6] farklı yazdırma hızının, çekme dayanımı üzerine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yazdırma hızının artmasıyla çekme dayanımının düştüğünü belirlemişlerdir. Kamer vd. [7] farklı dolgu desenleri, nozul ve tabla sıcaklıkları kullanılarak imal edilen numunelerin eğme dayanımlarını araştırmışlardır. Tezel vd. [8] farklı malzemeler kullanarak 3B yazıcı ile imal edilen test numunelerinde, katman yüksekliği ve yazdırma yönünün darbe dayanımı üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. En yüksek darbe dayanımının 0,3mm katman yüksekliğinde PC malzeme ile imal edilen numunelerde olduğunu tespit etmişlerdir. He vd. [9] 3B baskı parametrelerinin (baskı yönü, nozul çapı, katman yüksekliği) dinamik, termo-mekanik yükler altında ABS (akrilonitril bütadien stiren) malzeme ile imal edilen ürünlerin yorulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çakan vd. [10] 3B yazıcı ile farklı yazdırma açılarına sahip, öksetik bal peteği yapılarının darbe dayanımlarını deneysel olarak ele almışlardır. Ayrıca gerçekleştirdikleri deneyleri sonlu elemanlar analizleri ile de doğrulamışlardır. Bazı çalışmalarda ise 3B yazıcı ile imal edilen ürünlerin boyutsal doğruluğunun artırılması için yeni tasarım yöntemleri geliştirilmiştir [11].

Polimer malzemelerin mekanik özellikleri belirlenirken incelenen çalışmalarda genellikle çekme, basma, eğme, darbe gibi yüklerin malzemenin akma veya kopma dayanımı üzerine çıkartıldığı ve malzemenin hasar alınca kadar deneylerin devam ettirildiği görülmektedir. Bazı durumlarda ise akma veya kopma dayanımı

üzerine çıkılmadan da malzeme hasara uğrayabilmektedir. Bu durumlardan bir tanesi malzemelerin sürünme olayı nedeni ile hasara uğramasıdır. Sürünme, sabit sıcaklık ve yükleme etkisi altında malzemelerde zamanla meydana gelen kalıcı deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Polimer malzemelerin sürünme davranışı, boyutsal kararlılığın gerekli olduğu endüstriyel uygulamalarda önemlidir. Bu nedenle polimer malzemelerin sürünme davranışı belirlenmeli ve tasarımlar buna göre yapılmalıdır. Özellikle 3B yazıcı ile imal edilen polimer malzemelerin sıcaklık etkisi altındaki sürünme davranışı üzerine literatürde sınırlı kaynak olduğu görülmektedir. Romeijn vd. [12] UV (Ultraviyole) radyasyonu, sıcaklık, nem gibi çevresel faktörlerin, 3B yazıcı ile Polietilen Tereftalat Glik (PETG) malzeme kullanılarak imal edilen test numunelerinin eğilme gerilmesi altındaki sürünme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Zhang vd. [13] farklı yazdırma yönlerine sahip ABS malzeme kullanılarak 3B yazıcı ile imal edilen test numunelerinin çekme, sürünme ve yorulma davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Pilz vd. [14] mineral yağlı sıvı ortama batırılmış yumuşak köpük numuneler üzerinde, küçük yükler ve bası sürünme deneyleri için özel bir sürünme test cihazı üretmişlerdir. Ayrıca, köpük malzemelerin termo-mekanik davranışını dinamik-mekanik analiz (DMA) ile incelemişlerdir. Xu vd. [15] eklemeli imalat ile imal edilen kaynak edilemeyen nikel bazlı bir süper alaşımın kısa süreli sürünme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Tezel vd. [16] 3B yazıcı ile PLA ve PLA kompozit malzemeler kullanılarak imal edilen test numunelerinin, çekme yönündeki sürünme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, yazdırma açısı, katman yüksekliği ve gerilme seviyelerini değişken parametre olarak ele almışlardır. Ye vd. [17] 3B yazıcıda PLA-max malzemesinden farklı yazdırma açısı ve katman yükseklikleri için sürünme test numuneleri imal etmişlerdir. Farklı yükleme koşulları altında, imal edilen test numunelerini sabit sıcaklık altında sürünme testlerine tabi tutmuşlardır. Sürünme testlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, malzemenin sürünme davranışını tahmin edebilecek değiştirilmiş bir Burger modeli önermişlerdir. Modifiye edilen modelin, farklı imalat parametreleri için numunelerin sürünme deformasyonunu doğru bir şekilde hesaplayabildiğini ortaya koymuşlardır. Mohamed vd. [18] EYM yöntemi ile PC-ABS malzeme kullanılarak üretilen numunelerin eğilme sürünme sertliğini araştırmışlardır. Başka bir çalışmada yazarlar, süreç parametrelerinin EYM yöntemiyle üretilen numunelerin sürünme ve geri kazanım davranışları üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır [19]. Rashid vd. [20] güçlendirilmiş 3B kompozitlerin sürünme ve toparlanma davranışını araştırmışlardır.

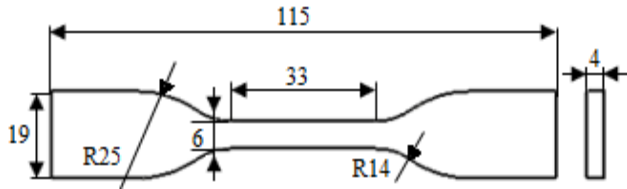
Gerçekleştirilen literatür araştırmasına göre 3B yazıcı ile EYM metodu kullanılarak imal edilen numunelerin genellikle çekme, eğilme, basma, darbe gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Ancak 3B yazıcı ile EYM metodu kullanılarak imal edilen numunelerin sürünme özelliklerini araştırarak sınırlı sayıda kaynağa rastlanmakta olup, tespit edilen çalışmaların en fazla üç değişkenin sürünme özellikleri üzerine etkisini araştırdığı görülmektedir. Ayrıca, polimerler için çok önemli bir parametre olan ortam sıcaklığı değişiminin sürünmeye olan etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle literatürde görülen bu eksiklikler bu çalışmanın en önemli motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 3B yazıcı ile PLA malzeme kullanılarak üretilen test numunelerine sürünme testleri uygulanmıştır. 3B yazıcıda kullanılan farklı imalat parametrelerinin sürünme davranışı üzerine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yazdırma açısı, nozul çapı, katman yüksekliği değişken imalat parametreleri, ortam sıcaklığı ve gerilme seviyesi değişken test parametreleri olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda uzama – zaman grafikleri yorumlanarak her bir parametrenin sürünme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## 2. Materyel ve Metot (Material and Method)

### 2.1. Sürünme Test Numunelerinin İmalatı (Manufacturing of Creep Test Samples)

Bu çalışmada farklı imalat parametrelerine sahip, 3B yazıcı ile EYM yöntemi ile imal edilen sürünme test numunelerinin sürünme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Sürünme test numuneleri Ultimaker 2 Extended+ 3B yazıcı kullanılarak imal edilmiştir. Üretimlerde kullanılan yazıcının toplam baskı hacmi x-y-z eksenleri için sırasıyla 223x223x305 mm olup, boyut toleransı ise yine aynı eksenler için sırasıyla 12,5µm – 12,5 µm – 5 µm arasındadır. Boyutsal toleransların düşük olması kullanılan yazıcının güvenilirliğini artırmaktadır.

Çalışmada kullanılan test numuneleri öncelikle ASTM D638 – 14 [21] tip IV’te belirtilen boyutlara uygun olarak Solidworks 2017 CAD programında tasarlanmıştır. Şekil 1’de ASTM D638-14 standardı tip IV test numunesi ölçüleri teknik resim üzerinden görülmektedir. Tasarlanan numune geometrisi “.stl” dosya formatına çevrilerek CURA 4.13.0 programına aktarılmıştır. CURA 4.13.0 programı 3B yazıcı için gerekli olan G kodlarının oluşturulması amacı ile kullanılmaktadır. Ayrıca yine bu program sayesinde 3B yazıcı ile farklı imalat parametreleri de belirlenebilmektedir.



Şekil 1. ASTM D638-14 standardı tip IV test numunesi ölçüleri  
(Test specimen dimensions ASTM D638-14 standard type IV) [21]

Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan test numunelerinin imalat ve test parametreleri verilmiştir. İmalat parametreleri ortak ve değişken parametreler olarak ikiye ayrılmıştır. Ortak parametreler, filament üreticisinin teknik veri dokümanında belirlenen standart değerler olarak dikkate alınmıştır. Değişken parametreler ise bu çalışmada incelenen her bir durum için ayrı ayrı belirlenmiştir. Ayrıca testlerde ortam sıcaklığının ve yüklenme miktarının 3B yazıcı ile üretilen test

numunelerinin sürünme davranışı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Değişken imalat parametrelerinden yazdırma açısı 0° - 45° - 90° olarak belirlenmiştir. 3B yazıcı ile imalat yapılırken yazdırma açısı yükün geliş yönüne göre 0° ile 90° arasında değiştirilebilmektedir. Yazdırma açısı etkisinin en iyi görülebilmesi için bu değerler Durum I için seviye olarak belirlenmiştir. 45° yazdırma açısı varsayılan ayar olduğundan nominal değer olarak dikkate alınmış ve diğer durum analizlerde sabit tutulmuştur. Nozul çapı belirlenirken elimizde olan nozul çapları birer seviye olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde 0,4mm’ye sahip nozul çapı varsayılan değer olduğundan nominal değer olarak belirlenmiştir. Katman yüksekliği kullanılan nozul çapı ile sorunsuz imalatın gerçekleştirilebileceği ve etkinin gözlemlenebileceği bir aralıkta olmasına dikkat edilerek belirlenmiştir. 0,2mm katman yüksekliği 0,4mm nozul çapı için varsayılan değer olduğundan katman yüksekliği nominal değeri olarak ele alınmıştır. Değişken test parametrelerinden ortam sıcaklığı değerleri PLA malzemesinden imal edilen bir ürünün kullanılacak sıcaklık değerleri arasından seçilmiştir. Deney düzeneğinde bir soğutma sistemi bulunmadığından, oda sıcaklığının altına inmek mümkün olmamıştır. Bu nedenle en düşük sıcaklık olarak oda sıcaklığı belirlenmiştir. PLA malzemesi için camı geçiş sıcaklığı 60°C civarı olduğundan bu sıcaklığın üzerinde bir sürünme deneyi gerçekleştirmek anlamsız olacağından en yüksek sıcaklık değeri 60°C olarak belirlenmiş olup, bu iki limit değerinin ara değeri olarak 40°C diğer bir seviye olarak belirlenmiştir. PLA malzemesinden imal edilen ürünlerin en fazla oda sıcaklığında kullanılacağı düşünüldüğünden, 25°C oda sıcaklığı nominal değer olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan Ultimaker PLA (inci beyazı) filamenten ait akma mukavemet değeri 49,5MPa ( $\sigma_{AK}$ ) olarak teknik dokümanlarda verilmektedir [27]. Buna göre yaklaşık olarak  $\sigma_{AK}^*0,1$  (5MPa),  $\sigma_{AK}^*0,2$  (10MPa) ve  $\sigma_{AK}^*0,3$  (15MPa) dikkate alınarak gerilme seviyeleri belirlenmiştir. Belirli bu değerlerden ortalama değer olan  $\sigma_{AK}^*0,2$  (10MPa) diğer durumlar için nominal değer olarak belirlenmiştir. 5MPa gerilme altında sürünme miktarı değerlerinin görece olarak düşük, 15MPa için ise yüksek olduğu görülmüştür. Diğer durumlarda sürünme miktarı değerlerinin karşılaştırmasının daha kolay yapılabilmesi için 10MPa gerilme değeri nominal değer olarak belirlenmiştir.

Sürünme test numuneleri Ultimaker marka, 2,85mm çapa sahip, PLA (inci beyazı) filamentler kullanılarak üretilmiştir. Ultimaker PLA (inci beyazı) filamenten ait mekanik özellikler Tablo 2’de verilmiştir [27].

Tablo 1. Sürünme numuneleri için imalat ve test parametreleri (Manufacturing and test parameters for creep specimens)

İmalat- Test Parametresi	Durum I	Durum II	Durum III	Durum IV	Durum V	
Ortak İmalat Parametreleri	Malzeme	Ultimaker PLA				
	Ekstrüzyon sıcaklığı	210°C				
	Tabla sıcaklığı	60°C				
	Dolgu yoğunluğu	100 %				
	Dolgu dokusu	Zig – Zag				
Yazdırma hızı	60 mm/s					
Değişken İmalat Parametreleri	Yazdırma Açısı	0°- 45°- 90°	45°	45°	45°	
	Nozul çapı (mm)	0,4	0,4- 0,6- 0,8	0,4	0,4	
	Katman yüksekliği (mm)	0,2	0,2	0,1- 0,15- 0,2	0,2	
Değişken Test Parametreleri	Ortam Sıcaklığı (°C)	25	25	25	25- 40- 60	
	Gerilme (MPa)	10	10	10	10	
					5- 10- 15	

**Tablo 2.** PLA mekanik özellikleri (Mechanical properties of PLA) [27]

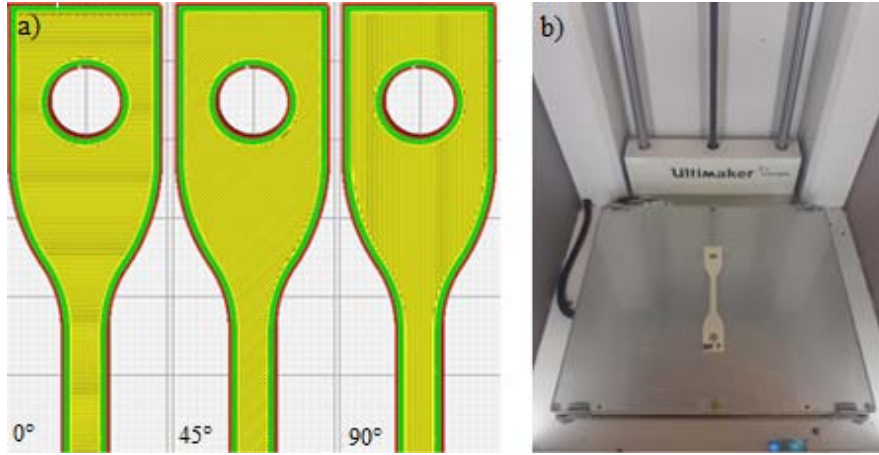
Mekanik Özellik	Değer
Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	2346,5
Akma gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	49,5
Kopma gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	45,6
Eğilme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	103
Eğilme modülü (N/mm <sup>2</sup> )	3150
Akma noktasındaki uzama (%)	3,3
Kopma noktasındaki uzama (%)	5,2
Sertlik (Shore D probu)	83

Test numuneleri her bir durum için kendi içinde CURA 4.13.0 programında oluşturulan aynı G kodları kullanılarak, birer birer ve yazıcı tablasının merkezine konumlandırılacak şekilde imal edilmiştir. Bu sayede imal edilen test numunelerinin mümkün olan en yakın özelliklerde üretilmesi sağlanmıştır. Şekil 2'de farklı yazdırma açıları için CURA 4.13.0 programında oluşturulan desen görünümü ve 3B yazıcı üzerinde imalatı tamamlanan bir sürünme test numunesi gösterilmektedir. Yazıcının yatay şekilde numuneyi imal etmesi 0°, dikey şekilde imal etmesi ise 90° olarak tanımlanmaktadır. Bu yönelimlerin program içerisinde özel olarak tanımlanması gerekmektedir. 45° imalat açısı ise varsayılan ayar olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Bu nedenle I. durum dışındaki diğer tüm durumlarda test numuneleri varsayılan ayar olan 45° imalat açısına göre üretilmiştir. Benzer şekilde diğer değişken parametreler için de referans değer olarak üretici tarafından belirlenen varsayılan ayarlar kullanılmıştır.

## 2.2. Sürünme Testleri (Creep Tests)

Sürünme testleri Şekil 3'te gösterilen, farklı sıcaklıklarda testler yapılabilmesi için özel olarak tasarlanan sürünme test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın tasarım ve imalatı ile ilgili geniş bilgiye [22] numaralı referanstan ulaşılabilir. 3B yazıcı ile imal edilen sürünme test numuneleri test bölgesine Şekil 3'de gösterildiği gibi cıvata ve pullar yardımı ile sabitlenmektedir. Kuvvet kolunun diğer ucuna ise standart ağırlıklar eklenerek, test numunesinin sürekli olarak aynı statik yüke maruz kalması sağlanmaktadır. Sürünme cihazının test bölgesi özel olarak pleksi malzemeden üretilen bir koruma ile muhafaza edilmektedir. Bu muhafaza sayesinde test bölgesi sıcaklığının daha kısa sürede kontrol altına alınması sağlanmaktadır. Sürünme test cihazı üzerinde sürünme miktarının ölçülebilmesi için Etopoo marka elektronik mikrometre kullanılmıştır. Bu mikrometre 0 - 12,7mm aralığını 1 µm hassasiyetle ölçebilmektedir. Test bölgesinin sıcaklığı ise PT100 sıcaklık sensörü ile anlık olarak ölçülmektedir. Bu sıcaklık sensörü, -50°C ile 250°C arasındaki sıcaklığı 0,1°C hassasiyetle ölçebilmektedir. Sıcaklık sensörü ve elektronik mikrometre üzerinden toplanan sıcaklık ve uzama verileri, sürünme test cihazı üzerindeki PLC modülüne aktarılarak anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılır. Sürünme test cihazının yazılımı sayesinde bilgisayar ortamına iletilen sıcaklık ve uzama verileri zamana bağlı olarak "excel" formatında elde edilebilmekte ve yorumlanabilmektedir.

Sürünme testleri ASTM D2990-17 [23] standardında belirtilen yöntem ve koşullara göre gerçekleştirilmiştir. Sürünme testleri iklimatik laboratuvarında sabit oda sıcaklığında (25°C)



**Şekil 2.** a) Farklı yazdırma açıları için desen görünümü b) İmal edilmiş sürünme test numunesi  
(a) G code view for different printing angles b) Manufactured creep test sample)



**Şekil 3.** Sürünme test cihazı genel görünümü (General view of creep test device)

gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığı dışında 40°C ve 60°C' de gerçekleştirilen testlerde, istenilen ortam sıcaklığı ekran üzerinden ayarlanmaktadır. Test bölgesi sıcaklığı istenilen sıcaklığa gelene kadar ısıtıcı açık konumda kalarak test bölgesini ısıtmaktadır. Test bölgesi sıcaklığı istenilen sıcaklığa ulaştığında ısıtıcı otomatik olarak kapanmaktadır. Test bölgesi sıcaklığı istenilen sıcaklığın 0,5°C altına düşerse ısıtıcı tekrar çalışmakta ve test bölgesini istenilen seviyeye getirmektedir. Bu sayede test bölgesi sıcaklığı minimum dalgalanmalarla kontrol edilebilmektedir. Ayrıca sürünme olayı dış titreşimlerden kolaylıkla etkilendiği için sürünme cihazı titreşimden mümkün olduğunca izole edilmiş bir masa üzerine monte edilmiştir.

Sürünme testleri koruyucu mandalın indirilmesi ile başlamaktadır. Bu andan itibaren sıcaklık ve uzama verileri anlık olarak bilgisayar ortamında toplanarak kayıt altına alınmaktadır. Tablo 1'de gösterilen her bir durum için sürünme testleri 3 saat (10800 s) boyunca gerçekleştirilmiştir ve bu süre boyunca sürünme miktarı (uzama değerleri) elektronik mikrometre tarafından zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sürünme miktarı değerleri yorumlanarak her bir parametrenin, numunelerin sürünme davranışı üzerine olan etkisi incelenmiş, literatürde benzer bir çalışmaya rastlandı ise kıyaslamalar yapılarak tartışılmıştır.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

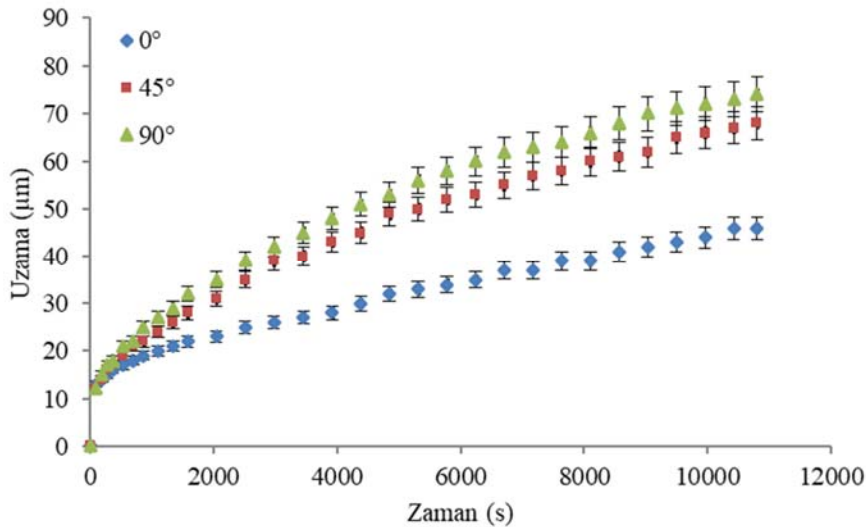
Sürünme olayının genel olarak üç aşamadan oluştuğu söylenebilir. Bu aşamalara birincil, ikincil ve üçüncül sürünme bölgeleri denmektedir. Birincil sürünme, testlerin başında meydana gelmektedir ve sürünme, sabit bir oranda değil, çoğunlukla geçicidir. İkinci aşamaya ulaşılan kadar sürünmeye karşı direnç artmaktadır. Bunun sebebi malzeme üzerinde gözlenen gerinim sertleşmesi (pekleşme) olayıdır. İkincil sürünmede, sürünme oranı kabaca sabit hale gelmektedir. Bu aşamaya genellikle kararlı durum sürünmesi de denmektedir. Üçüncül sürünmede ise malzemenin uzun zaman içerisinde boyun vermesi veya iç boşlukları nedeniyle kesit alanının azalmasından dolayı sürünme oranı hızlanmaya başlar. Bu durumun ilerlemesine izin verildiğinde malzemede kopma meydana gelecektir. Bu çalışmada farklı 3B imalat parametrelerine sahip PLA malzeme kullanılarak üretilen test numunelerinin birincil ve ikincil sürünme bölgeleri incelenmiştir. Üçüncül sürünme bölgesinin elde edilmesi çok uzun zaman aldığından, bu çalışmanın kapsamına alınmamıştır. Sürünme testleri sırasında elektronik mikrometreden alınan uzama değerleri PLC modül tarafından belirli zaman aralıklarında kayıt edilmiştir. Bu

aralıklar uzamanın hızlı olduğu birincil sürünme bölgesinde daha kısa, uzamanın yavaşladığı ikincil sürünme bölgesinde daha uzun sürelerle (0-360s arasında 90s, 360-855s arasında 165s, 855-1575s arasında 240s, 1575-10800s arasında 465s aralıkla) kayıt altına alınarak uzama – zaman grafikleri elde edilmiştir. Tablo 1'de belirtilen her bir durum için elde edilen uzama – zaman grafikleri bu bölümde sırasıyla sunularak yorumlanmıştır. Testler her bir durum için en az üç tane benzer sonuç elde edilene kadar tekrar edilmiştir. Sürünme deneyleri sırasında yukarıda belirtilen zaman aralıkları içerisindeki her bir ölçüm noktasındaki elektronik mikrometreden ölçülen uzama değerleri arasındaki farkın %5'i geçmemesi durumunda elde edilen eğriler birbiri ile benzer sonuç olarak kabul edilmiştir. Birbiri ile benzer olan sonuçlardan ise ortalamaya en yakın olan grafik sonuçlarda verilerek yorumlanmıştır. Elde edilen uzama sonuçları bir grafik oluşturduğu için doğrudan üç deneyin ortalaması değil, elde edilen üç benzer eğri arasındaki ortalama değere sahip olan gerçek bir uzama – zaman eğrisi sonuçlarda verilmiştir. Ayrıca grafiklere hata çubukları eklenerek gerçekleştirilen diğer deney sonuçlarının verilen sürünme eğrisine göre ne kadar bir farkla yaklaştığı net bir şekilde görülebilmektedir.

#### 3.1. Farklı Yazdırma Açılımları İçin Sürünme Test Sonuçları (Creep Test Results for Different Printing Angles)

Şekil 4'te farklı yazdırma açıları için (Tablo 1 – Durum I) elde edilen uzama – zaman grafiği görülmektedir. 0° – 45° ve 90° yazdırma açıları için sürünme olayının ilk iki aşaması olan birincil ve ikincil (sabit durum) sürünme aşamaları net bir şekilde görülmektedir. Buna göre 0° yazdırma açısına sahip numunelerin en düşük, 90° yazdırma açısına sahip numunelerin ise en yüksek sürünme miktarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 2a incelendiğinde 0° yazdırma açısına sahip numunelerin imalat yönlerinin yüklemeye doğrultusuna dik olduğu, 90° yazdırma açısına sahip numunelerin imalat yönlerinin ise yüklemeye yönü ile aynı doğrultuda olduğu görülmektedir. İmalat yönü yüklemeye doğrultusuna dik olan numunelerin (yazdırma açısı 0°) katmanları, yüklemeye doğrultusunda yeteri kadar uzama yeteneğine sahip olmadığından, bu numunelerde sürünme miktarının daha düşük olduğu söylenebilir. Diğer yandan imalat yönü yüklemeye yönü ile aynı doğrultuda olan numuneler (yazdırma açısı 90°) ise yüklemeye doğrultusunda rahatlıkla uzayabilmektedir. Bu nedenle 90° yazdırma açısına sahip numunelerin sürünme miktarı daha yüksektir. 10800s sonundaki



Şekil 4. Farklı yazdırma açıları için sürünme test sonuçları (Creep test results for different printing angles)

sürünme miktarı değerleri karşılaştırılacak olursa, 90° yazdırma açısına sahip numunelerin, 0° yazdırma açısına sahip numunelere göre 1,6 kat daha fazla sürünmeye maruz kaldığı görülmektedir. Ancak bu durum numunelerin çekme dayanımı ile karıştırılmamalıdır. 0° yazdırma açısına sahip numunelerin katmanları belli bir yükten sonra birbirinden kolayca kopacağı için çekme dayanımı çok daha düşük olacaktır. Aynı zamanda yüklemeye doğrultusuna dik imalat yönü malzemeyi sanki gevrek malzemeymiş gibi davranmaya yönlendirmektedir. 90° imalat açısına sahip numunelerde ise yüksek yüklerde katmanlar birbirlerinden ayrılmayacak ve yüklemeye doğrultusunda kendileri kopana kadar uzayacaktır. Her bir katmanın kendi kopma dayanımı, katmanların birbirinden ayrılma dayanımına göre fazla olduğu için 90° imalat açısına sahip numunelerde mukavemet daha yüksek olacaktır. Bu durum Kamer vd. tarafından farklı yazdırma açılarına sahip PLA ve ABS malzemeden imal edilen eğilme [7] ve çekme [24] test numunelerinin mukavemetlerini inceleyen çalışmada ortaya koyulmuştur. 90° imalat açısına sahip numunelerin en yüksek mukavemete sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Hsueh vd. [25] farklı imalat açılarının çekme mukavemetine etkisini deneysel olarak incelemiştir. 90° imalat açısına sahip numunelerin en yüksek dayanıma sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bundan sonraki durum numunelerinde, varsayılan ayar olan 45° yazdırma açısına sahip desen kullanılmıştır.

### 3.2. Farklı Nozul Çapları için Sürünme Test Sonuçları (Creep Test Results for Different Nozzle Diameters)

Şekil 5'te farklı nozul çapları için (Tablo 1 – Durum II) sürünme testlerinden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Bu çalışmada 3 farklı nozul çapı (0,4 - 0,6 ve 0,8mm) kullanılarak test numuneleri imal edilmiştir. Nozul çapı 0,4mm (standart nozul çapı) için üç saatlik süre sonucunda yaklaşık 70µm'lik bir sürünme görülürken, 0,6mm nozul çapı için 30µm, 0,8mm için ise 25µm'lik sürünme tespit edilmiştir. Nozul çapının artması ile birlikte, malzemenin sürünme miktarında büyük ölçüde azalma görülmektedir. Kabaca nozul çapının iki katına çıkması ile sürünme miktarında 10800s'lik deney sonucunda 2,8 kat azalma gözlemlenmiştir. Ancak sürünme miktarındaki azalış miktarı nozul çapının artması ile birlikte giderek azalmakta olup, lineer bir davranış göstermemektedir. Literatür incelendiğinde nozul çapının artmasıyla, 3B yazıcı ile üretilen malzemelerin yoğunluğunun ve çekme dayanımının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca nozul çapının artması ile birlikte 3B yazıcı ile imalat süresinin de önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir [26]. Nozul çapı artışının sürünme miktarı üzerine etkisini inceleyen herhangi bir kaynağa rastlanmamasına

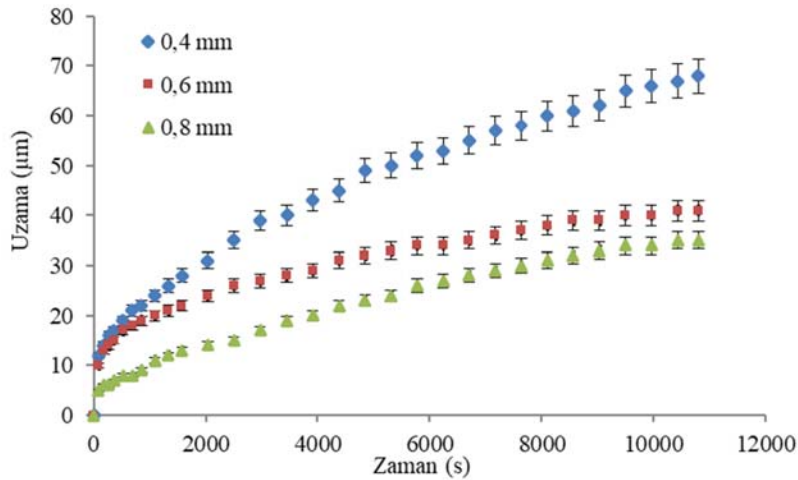
karşın, bu yönü ile de değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.

### 3.3. Farklı Katman Yükseklikleri için Sürünme Test Sonuçları (Creep Test Results for Different Layer Thickness)

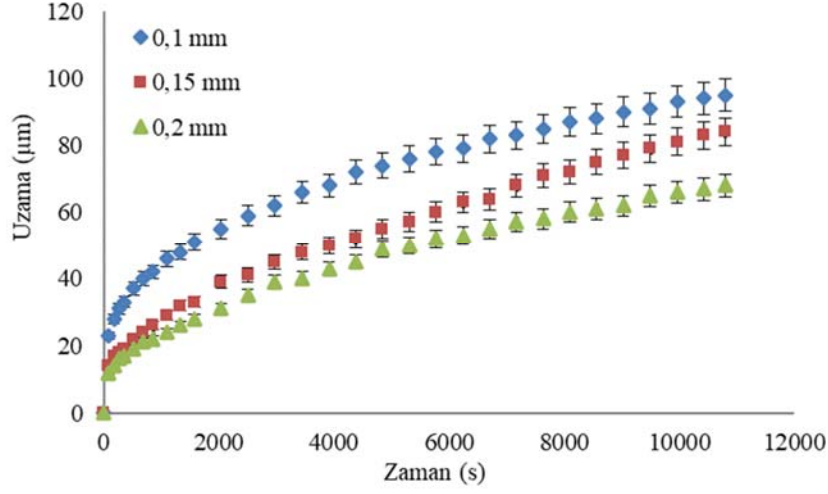
Bu çalışmanın üçüncü bölümünde ise farklı katman yüksekliklerinin (Tablo 1 – Durum III) sürünme davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Katman yüksekliği belirlenirken en önemli faktör kullanılan nozul çapıdır. CURA 4.13.0 programında 0,4mm'lik bir nozul için 0,2mm katman yüksekliği varsayılan olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Bu nedenle varsayılan değer üzerine çıkmadan 0,1 – 0,15 ve 0,2mm katman yükseklikleri için numuneler imal edilmiştir. Katman yüksekliğinin azalmasıyla birlikte, aynı hacmi üretebilmek için nozulun çok daha fazla yol kat etmesi gerekecektir. Bu nedenle katman yüksekliğinin azalmasıyla aynı hızdaki imalat süresinde artış meydana gelmektedir. Ancak malzemenin yüzey kalitesi artmaktadır. Şekil 6 incelendiğinde, katman yüksekliğinin azalmasıyla sürünme miktarının arttığı görülmektedir. Katman yüksekliğinin azalmasıyla birlikte, birbiri ile temas eden katman sayısı artacaktır. Dolayısıyla her bir katman arasındaki eriyen ve tekrar katılan yüzey sayısının da artışı söz konusu olacaktır. Yük taşıyan kesitteki eriyen ve tekrar katılan bölge miktarının artması numunenin yüke karşı direncini azalttığından sürünme miktarı artmaktadır. 10800s'lik sürünme deneyi sonucunda katman yüksekliğinin 0,2mm'den 0,1mm'ye çekilmesi ile birlikte sürünme miktarında yaklaşık %30 artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Benzer sonuçlara [16] numaralı referansta da rastlanmıştır.

### 3.4. Farklı Ortam Sıcaklıkları için Sürünme Test Sonuçları (Creep Test Results for Different Ambient Temperatures)

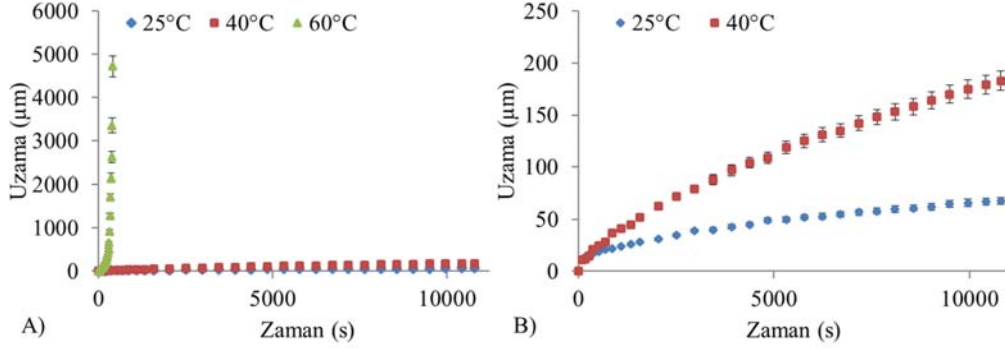
Sıcaklık, malzemenin sürünme davranışı üzerinde önemli etkisi olan dış etkenlerden biridir. Sıcaklığın artmasıyla, malzemeyi oluşturan atomların kinetik enerjileri de artar. Bu sayede malzeme içerisindeki dislokasyon hareketleri daha düşük kuvvetlerde meydana geleceğinden, sürünme daha kolay olacaktır. Şekil 6a ve 6b'de farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen (Tablo 1 – Durum IV) sürünme testi sonuçları görülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sıcaklığın bu çalışma için sürünme üzerindeki en etkili parametre olduğu söylenebilir. 60°C test bölgesi sıcaklığında test numunesi çok hızlı bir şekilde uzayarak, yaklaşık 4,5mm sonra hasara uğramıştır. PLA malzeme için camsı geçiş sıcaklığı 60°C olarak üretici firma kataloglarında mevcuttur [27]. Camsı geçiş sıcaklığı polimer



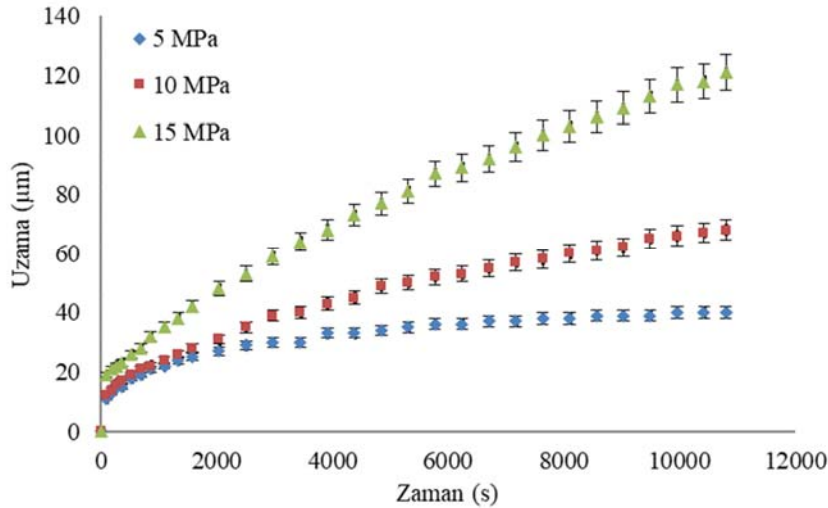
Şekil 5. Farklı nozul çapları için sürünme test sonuçları (Creep test results for different nozzle diameters)



Şekil 6. Farklı katman yükseklikleri için sürünme test sonuçları (Creep test results for different layer thickness)



Şekil 7. Farklı ortam sıcaklıkları için sürünme test sonuçları a) genel görünüm b) detay görünüm (Creep test results for different ambient temperatures a) general view b) detailed view)



Şekil 8. Farklı gerilme seviyeleri için sürünme test sonuçları (Creep test results for different stress levels)

malzemeler için ayırt edici bir özelliktir. Bu sıcaklığın üzerinde polimer malzeme camsı özelliklerini yitirip viskoz özellikler kazanmaya başlar. Bir başka değişle malzeme katı özelliğini kaybedip akışkan özelliğe geçmeye başlar. Gerçekleştirilen testler göz önünde bulundurulduğunda, bu durumun doğrulandığı söylenebilir. Çünkü

başka hiçbir deneyde, PLA malzeme kullanılarak üretilen sürünme test numunesi bu kadar fazla uzayarak hasar almamıştır. Şekil 7a'da 25°C ve 40°C'de gerçekleştirilen test sonuçları net bir şekilde görülemediğinden bu testlerin sonuçları Şekil 7b'de daha detaylı olarak gösterilmektedir. Sıcaklığın 25°C'den 40°C'ye çıkmasıyla,



10800s sonucunda sürünme miktarı yaklaşık olarak üç kat artmıştır. Sonuç olarak sıcaklığın artması ile sürünme miktarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

### 3.5. Farklı gerilme seviyeleri için sürünme test sonuçları (Creep test results for different stress levels)

Bu çalışmada incelenen son parametre ise test numunesi üzerinde oluşan farklı gerilme seviyeleridir. Aynı imalat parametreleri ile üretilen, test numuneleri üç farklı gerilme seviyesi için (5 – 10 ve 15MPa) sürünme testine tabi tutulmuştur. Bunun için deney cihazı üzerinde kuvvet koluna farklı yükler asılarak veya kuvvet kolu kısaltılarak ayarlama yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan cihaz her iki yöntem için de uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada deney cihazı üzerindeki kuvvet koluna farklı yükler asılarak gerilme seviyeleri değiştirilmiştir. Şekil 8’de farklı gerilme seviyeleri için (Tablo 1 – Durum V) sürünme test sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde numune üzerinde meydana gelen gerilme miktarı arttıkça sürünme miktarının da arttığı söylenebilir. 10800s’lik sürünme deneyleri sonucunda gerilme değerinin 5MPa’dan 15MPa’ya yükselmesi ile sürünme miktarı yaklaşık olarak 3 kat artmıştır. Ayrıca gerilme seviyesinin artması ile maksimum sürünme miktarındaki artış miktarı da artmaktadır. Bu nedenle gerilme seviyesi ile sürünme arasında doğrudan lineer bir bağlantı olduğu söylenemez.

### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, farklı imalat parametreleri ile 3B yazıcıda EYM yöntemi ile imal edilen PLA test numunelerinin farklı sıcaklık ve yüklem koşulları altındaki sürünme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Beş farklı durum analizi için yazdırma açısı, nozul çapı, katman yüksekliği değişken imalat parametreleri, test bölgesi sıcaklığı ve gerilme seviyesi ise değişken test parametreleri olarak ele alınmış ve bu parametrelerin malzemenin sürünme özelliklerine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sürünme testleri ASTM D2990-17 standardında belirtilen yönteme göre gerçekleştirilmiş olup, her bir test 3 saat (10800s) sürdürülmüştür. Test sonuçlarına göre her bir parametre için birincil ve ikincil sürünme bölgeleri tespit edilmiştir. Buna göre bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Bu çalışmada incelenen parametreler arasında sürünme üzerindeki en etkili parametrenin test bölgesi sıcaklığı olduğu tespit edilmiştir. Test bölgesi sıcaklığının artmasıyla, malzemenin sürünme miktarının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin camsı geçiş sıcaklığı aşıldığında malzeme viskoz hale gelmekte ve hızlıca hasara uğramaktadır.
- Yazdırma açısının sürünme üzerinde önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Yükleme yönü ile aynı doğrultuda imal edilen test numunelerinin, yüklem yönüne dik imal edilen numunelere göre sürünme miktarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Nozul çapının artmasıyla sürünme miktarının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Nozul çapının 0,4mm’den 0,8mm’ye çıkarılmasıyla sürünme miktarının yaklaşık olarak 2,8 kat azaldığı tespit edilmiştir.
- Katman yüksekliğinin azalmasıyla sürünme miktarının arttığı tespit edilmiştir. Katman yüksekliğinin 2 kat azalmasıyla sürünme miktarı yaklaşık olarak %30 oranında artmaktadır. Buna göre bu çalışma içerisinde incelenen parametreler arasında sürünme üzerindeki görece en etkisiz parametrenin katman yüksekliği olduğu söylenebilir.
- Test numunesi üzerine uygulanan gerilme arttığında, sürünme miktarının da arttığı belirlenmiştir. Yükleme miktarının artması ile sürünme miktarındaki artış miktarının da giderek arttığı tespit edilmiştir.

### Kaynaklar (References)

1. ISO/ASTM 52900:2021(en) Additive manufacturing-General principles-Fundamentals and vocabulary, 2021.
2. Özsolak O., Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler, International Journal of Innovative Engineering Applications, 3 (1), 9-14, 2019.
3. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, Composites, Part B, 143, 172-196, 2018.
4. Abdulhameed O., Al-Ahmari A., Ameen W., Mian S.H., Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications, Advances in Mechanical Engineering, 11 (2), 1-27, 2019.
5. Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciu F., Marinescu R., Process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review, Polymer Testing, 69, 157 – 166, 2018.
6. Kamer M.S., Temiz Ş., Yaykaşlı D.H., Kaya A., Akay O., Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (3), 1197-1212, 2022.
7. Kamer M.S., Dogan O., Temiz Ş., Yaykaşlı H., Investigation of the mechanical properties of flexural test samples produced using different printing parameters with a 3d printer, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 36 (3), 835-846, 2021.
8. Tezel T., Ozenc M., Kovan V., Impact properties of 3D-printed engineering polymers. Materials Today Communications, 26, 102161, 2021.
9. He F., Khan M., Effects of printing parameters on the fatigue behaviour of 3D-printed ABS under dynamic thermo-mechanical loads, Polymers, 13, 2021.
10. Gulcimen Cakan B., Ensarioglu C., Küçükakarsu V., Tekin İ., Çakır M., Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (3), 1657-1668, 2021.
11. Yaman U., Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 94, 2187–2197, 2018.
12. Romeijn T., Singh K., Behrens M., Paul G., Effect of accelerated weathering on the creep behaviour of additively manufactured Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG), Journal of Polymer Research, 28 (352), 1-10, 2021.
13. Zhang H., Cai L., Golub M., Zhang Y., Yang X., Schlarman K., Zhang J., Tensile, creep, and fatigue behaviors of 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene, Journal of Materials Engineering and Performance, 27, 57–62, 2017.
14. Pilz G., Guttmann P., Oesterreicher F., Pinter G., Experimental method for creep characterization of polymeric foam materials in media immersion, Mech Time-Depend Mater, 24, 421-433, 2020.
15. Xu J., Gruber H., Deng D., Peng R.L., Moverare J.J., Short-term creep behavior of an additive manufactured non-weldable Nickel-base superalloy evaluated by slow strain rate testing, Acta Materialia, 179, 142-157, 2019.
16. Tezel T., Kovan V., Topal E.S., Effects of the printing parameters on short-term creep behaviors of three-dimensional printed polymers, Journal of Applied Polymer Science, 136, 47564, 2019.
17. Ye J., Yao T., Deng Z., Zhang K., Dai S., Liu X., A modified creep model of polylactic acid (PLA-max)materials with different printing angles processed by fused filament fabrication, Journal of Applied Polymer Science, 138 (17), 50270, 2021.
18. Mohamed O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L., Investigation on the flexural creep stiffness behavior of PC-ABS material processed by fused deposition modeling using response surface definitive screening design, JOM, 69, 498–505, 2016.
19. Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L., Influence of processing parameters on creep and recovery behavior of FDM manufactured part using definitive screening design and ann. Rapid Prototyping Journal, 23, 998–1010, 2017.
20. Al-Rashid A., Koç M., Creep and recovery behavior of continuous fiber-reinforced 3DP composites, Polymers, 13, 1644, 2021.
21. ASTM D638-14 Standard test method for tensile properties of plastics; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2015.

22. Dogan O., Design and manufacturing of creep test device for polymer materials, 13th International Conference on Engineering & Natural Sciences, Burdur, Turkey, 162-168, 2022.
23. ASTM D2990-17 Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2017.
24. Hsueh M.H., Lai C.J., Chung C.F., Wang S.H., Huang W.C., Pan C.Y., Zeng Y.S., Hsieh C.H., Effect of printing parameters on the tensile properties of 3d-printed polylactic acid (pla) based on fused deposition modeling, *Polymers*, 13, 2387, 1-16, 2021.
25. Kamer M.S., Temiz Ş., Yaykaşlı H., Kaya A., Investigation of the mechanical properties of tensile test samples produced in different colors and different infill patterns with a 3d printer, *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 26 (3), 829-848, 2021.
26. Triyono J., Sukanto H., Saputra R.M., Smaradhana D.F., The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material, *Open Engineering*, 10, 762-768, 2020.
27. Ultimaker PLA, Technical datasheet, 2018.