

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) FİLAMENLERİN NEMLİ ORTAMA MARUZ KALMALARI SONUCU MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE CHANGE IN THE MECHANICAL AND PRINT PROPERTIES OF THE POLY(LACTIC ACID) FILAMENTS USED IN 3D PRINTERS AS A RESULT OF EXPOSURE TO HUMID ENVIRONMENT

Yazarlar (Authors): Gökçen Şahin^{ID*}, Hasan Özyıldırım^{ID}, Anıl Şahin^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Şahin G., Özyıldırım H., Şahin A., "3 Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Poli(Laktik Asit) Filamentlerin Nemli Ortama Maruz Kalmaları Sonucu Mekanik Ve Baskı Özelliklerindeki Değişimin Araştırılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 204-219, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1221552

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

3 BOYUTLU YAZICILARDA KULLANILAN POLİ(LAKTİK ASİT) FİLAMENTLERİN NEMLİ ORTAMA MARUZ KALMALARI SONUCU MEKANİK VE BASKI ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

Gökçen Şahin^a, Hasan Özyıldırım^b, Anıl Şahin^c

^a Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji, TÜRKİYE

^b Trakya Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi, TÜRKİYE

^c Trakya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: gokcensahin@trakya.edu.tr

(Received: 20.12.22; Revised: 16.04.23; Accepted: 11.08.23)

ÖZ

Bu çalışmada, 3 boyutlu (3B) yazıcılarda kullanılan poli(laktik asit) (PLA) filamentlerinin ve Eriyik Yığılma Modelleme (EYM) esaslı 3B yazıcı kullanılarak üretilen PLA standart çekme numunelerinin mekanik ve baskı özelliklerinin nemli ortamlarda nasıl değiştiği incelenmiştir. Filamentler 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortama 5, 10, 15, 20 gün süreler ile maruz bırakılarak şartlandırılmış numuneler üretilmiştir. Bu filamentlere ve üretilen standart çekme numunelerine çekme testi uygulanmış, FTIR spektrometresi ile analizleri yapılmış ve kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Şartlandırılmış filament ve standart çekme numunelerinin çekme dayanımları 20. günde sırası ile 3,7 MPa (%6,8) ve 3,6 MPa (%6,8) düştüğü fakat bekletme süresinin çekme dayanımları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları bekletme gün sayısı ile orantılı olarak azalmış ve çekme dayanımındaki en büyük düşüş 11,6 MPa (%29,5) değerinde 15. günde gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: PLA Filament, 3B Yazıcı, Filamentlerin Mekanik Özellikleri, 3B baskı.

INVESTIGATION OF THE CHANGE IN THE MECHANICAL AND PRINT PROPERTIES OF THE POLY(LACTIC ACID) FILAMENTS USED IN 3D PRINTERS AS A RESULT OF EXPOSURE TO HUMID ENVIRONMENT

ABSTRACT

In this study, it was investigated how the mechanical and printing properties of poly(lactic acid) (PLA) filaments used in 3D printers and PLA standard tensile samples produced using 3D printer based on Fused Deposition Modeling (FDM) change in humid environments. Conditioned samples were produced by exposing the filaments to 25 °C temperature and 80% relative humidity for 5, 10, 15, 20 days. Tensile test was applied to these filaments and produced standard tensile samples, analyzed with FTIR spectrometer and scanning electron microscope (SEM) images of fracture surfaces were taken. The tensile strengths of the conditioned filament and standard tensile samples decreased by 3.7 MPa (6.8%) and 3.6 MPa (6.8%) on the 20th day, respectively, but the holding time did not have a significant effect on the tensile strengths. The tensile strength of standard tensile specimens printed from conditioned filament decreased in proportion to the number of days of holding, and the greatest decrease in tensile strength occurred on the 15th day at a value of 11.6 MPa (29.5%).

Keywords: PLA Filament, 3D Printer, Mechanical Properties of Filaments, 3D printing.

1. GİRİŞ

3B baskı yenilikçi ve çok yönlü bir teknoloji aşaması olarak ortaya çıkmış, üretim verimliliğini arttırmak için yeni imkanlar sağlamıştır. 3B baskı teknolojileri 1980'lerden beri vardır. Son zamanlardaki malzeme, makine ve yazılımdaki hızlı gelişmeler ile daha geniş bir kullanıcı kitlesi için erişilebilir haldedir. Günümüzde masaüstü 3B yazıcıların maliyeti bireysel ve endüstriyel kullanıcılar için elde edilebilir seviyededir. Mevcut düşük maliyetli masaüstü ve tezgah üstü, profesyonel 3B yazıcılar ev ürünleri, yara örtüleri, dikişler, diş telleri, ambalaj, havacılık, otomotiv, tıp ve endüstri alanlarındaki birçok uygulamada tercih edilen bir seçenek olmuştur [1-3]. 3B yazıcılar pratik olmaları ve kolay kullanımları sayesinde inovasyonu hızlandırmakta; imalat, mühendislik, sağlık, eğitim, diş hekimliği, odyoloji ve mücevherat gibi çeşitli sektörlerdeki işletmeler tarafından kullanılmaktadır. Çok sayıda amatör kullanıcı hobi veya iş amaçlı olarak bu yazıcı ve filamentleri kullanmaktadır [4-5].

Polilaktik asit (PLA) biyolojik olarak parçalanabilen ve %100 yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çok yönlü kullanımı olan bir polimerdir [3,6-7]. PLA farklı kullanımlarının yanı sıra 3B baskıda hem profesyonel hem de amatör kullanıcılar tarafından kullanılan en yaygın biyobozunur filamenttir. Çoğu masaüstü 3B yazıcıda baskı için önerilen "varsayılan" malzemedir [8-12]. PLA filamenti yazdırma esnasında toksik koku üretmediği için kapalı ortamlarda kullanımı güvenlidir. PLA filamentin yazdırılması kolaydır ve yazdırma esnasında genellikle sorun çıkarmaz [2,8-12].

PLA filamentlerde sıklıkla karşılaşılan problemlerin başında filamentlerin nem, sıcaklık gibi çevresel şartlara maruz kalmaları sonucu baskı kalitelerinde yaşanan olumsuz değişimler ve mekanik dayanımlarındaki azalmadır [13]. 50 °C sıcaklık ve %90 bağıl nemli ortamda, hem amorf hem de kristal enjeksiyon kalıplama dereceli PLA reçine numuneleri önemli nem emilimi göstererek hidrolizin gerçekleşmesine izin verirler [14]. 70 °C ve %80 bağıl nemli ortamda nem ve sıcaklık koşullandırması sırasında kimyasal değişim meydana gelir ve polimer zincir kırılması gerçekleşir [15]. Sıcaklıktaki artış, nem alma oranındaki ve kristalleşme miktarındaki artışa

neden olur. Suya daldırılmış numunelerin kristallik derecelerindeki artışlarla bağlantılı olarak camsı geçiş ve erime sıcaklıklarındaki düşüşler, kurutulmuş PLA numuneler ile karşılaştırıldığında açık bir şekilde belirlenmiştir [16]. Neme maruz kalma mekanik özelliklerde de önemli düşüşlere neden olmaktadır [17].

İncelenen literatür çalışmalarında eksiklik olarak belirlenen PLA filamentlerin ve baskı ürünlerinin farklı sürelerdeki değişen mekanik, baskı ve kimyasal özelliklerindeki değişimi araştırmak amacı ile araştırmacılar tarafından nem şartlandırma koşulu olarak seçilmiştir. Bu şartlar altında numunelerin mekanik, baskı ve yüzey özellikleri gibi parametreleri incelenmiştir. Bunun için PLA filamentler oda sıcaklığı kabul edilen 25 °C sıcaklık ve ülkemizdeki ortalama en yüksek nem oranı olan %80 bağıl nemli ortam koşulları oluşturularak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bekletme süresi olarak yapılan ön çalışmalar neticesinde 5, 10, 15 ve 20 günlük süreler seçilmiştir. Bu ortamlarda şartlandırılmış filamentlerden çeşitli numuneler üretilmiştir. Filamentlerin mekanik özelliklerinin değişiminin belirlenebilmesi için hem filament hem de filamentlerden üretilen standart çekme numuneleri çekme testine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmış, nemin filamentler üzerindeki kimyasal etkisini değerlendirmek için FTIR analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ülkemizin ortalama nem koşullarının PLA filamentlerin vakumlu poşetlerinden açıldıktan sonra kullanımı veya çeşitli kompozitlerine etkisinin araştırılması amacı için yapılacak çalışmalarda kullanılabilecek optimum bekletme gün sayısı tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Deneyleerde Kullanılan Filament

Çizelge 1. PLA filamentin teknik özellikleri.

Üretici Firma	Microzey
Malzeme Cinsi	PLA
Filament Yoğunluk	1,24 g/cm ³
Filament Çapı	1,75 mm/±0,05 mm
Baskı Sıcaklığı	200-220 °C
Baskı Tabla Sıcaklığı	60-80 °C
Baskı Hızı	25-100 mm/s
Baskı Tabla Önerisi	Buildtak/pei

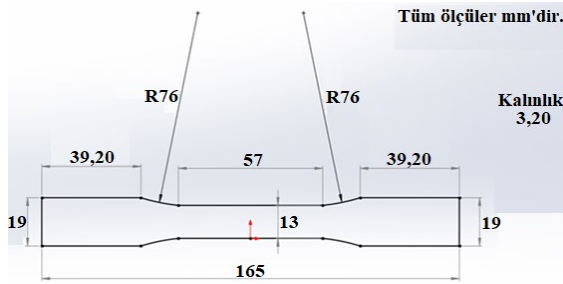
Deneylerde PLA'dan üretilmiş 1,75 mm çapında 0,5 kg ağırlıkta makaraya sarılı ve vakumlu pakette bulunan ticari beyaz renkli filament kullanılmıştır. Filamente ait teknik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

2.2. Numunelerin Üretilmesi

Numuneler (Şekil 1) çekme dayanımlarının belirlenmesi için ASTM D638-14 (Plastiklerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemi) Standartı Tip I numuneye uygun ölçülerde PLA filamentlerden üretilmişlerdir [18]. Numune şekli ve boyutları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çekme numunesi.



Şekil 2. ASTM D638-14 Tip I'e göre standart çekme numunesi boyutları.

Numunelerin 3B yazıcıda yazdırılabilmesi için dilimleyici yazılımı olarak Ultimaker Cura 3B baskı yazılımı kullanılmıştır. PLA numunelerin yazdırılması için kullanılan parametreler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çekme deneylerinde kullanılacak olan standart çekme numuneleri verilen yazdırma parametreleri uygulanarak Creality marka EYM teknolojili (Model: CR-10 S4, Creality, Shenzhen, China) 3B yazıcıda yazdırılmıştır (Şekil 3). Tüm yazdırma işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve her bir yazdırma işleminde 5 adet numune yazdırılmıştır (Şekil 3).

Yazdırılan tüm numunelere yapılacak deneysel çalışmalara göre seri numaraları verilmiştir. Verilen seri numaralarında; F-REF referans PLA filament numunesini, F-2580 25 °C ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış PLA filament numunesini, K-REF referans PLA filamentten basılmış standart çekme numunesini, K-2580 25 °C ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış PLA standart çekme

numunesini, FK-2580 25 °C ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış PLA filamentten basılmış standart çekme numunesini, 5, 10, 15, 20 değerleri ise nemli ortamda bekletme gün sayısını temsil etmektedir.

Çizelge 2. 3B yazıcıda PLA numunelerin yazdırılması için kullanılan parametreler.

Filament Cinsi	PLA
Nozul	
Nozul Çapı	0,4 mm
Kalite	
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Dolgu	
Dolgu Yoğunluğu	%100
Dolgu Şekli	Grid
Malzeme	
Yazdırma (Nozul) Sıcaklığı	210 °C
Yazdırma (Baskı) Tablası Sıcaklığı	60 °C
Hız	
Yazdırma Hızı	60 mm/s
Gezinti	
Geri Çekmeyi Etkinleştirme	Evet
Soğutma	
Baskı Soğutma Etkinleştirme	Evet
Fan Hızı	%100
Baskı Tabla Yapışması	
Baskı Tabla Yapışması Çeşidi	Brim

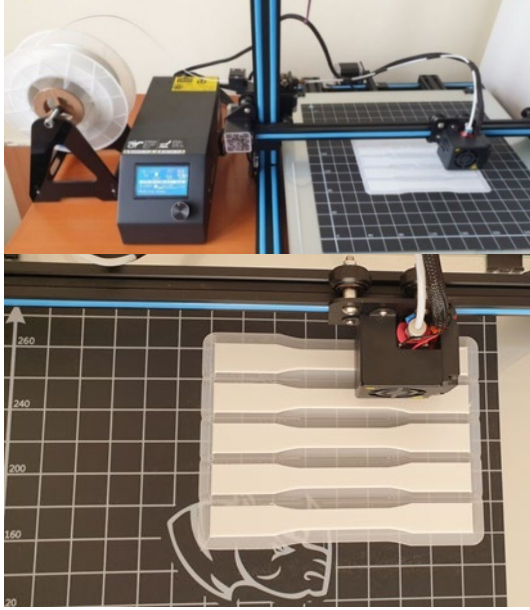
2.3. Numunelerin Şartlandırılması

Filament ve üretilen standart çekme numuneleri nemin PLA üzerindeki etkisinin incelenmesi için iklimlendirme kabini içerisinde 25±0.5 °C sıcaklık ve %80±2 bağıl nem de 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmişlerdir.

2.4. Numunelere Yapılan Analiz ve Deneyler

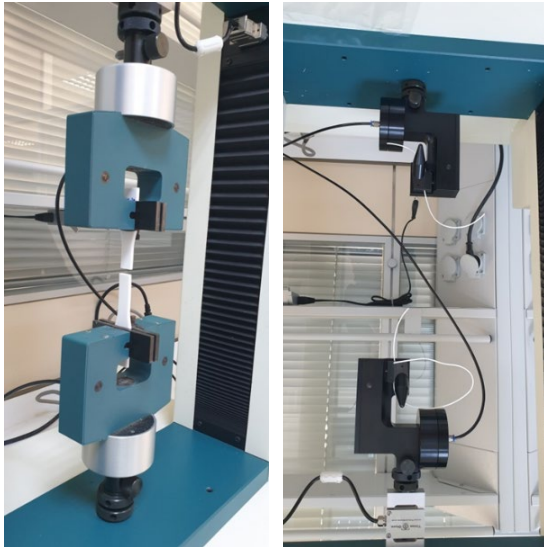
Filament ve standart çekme numunelerine çekme deneyleri ASTM D638-14 standardına göre Tinius Olsen Universal Testing Machines (Model: H10KS, Tinius Olsen, United Kingdom) test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Çekme deneyleri esnasında cihazdan çekme kuvveti (N) ve yer değiştirme (mm) değerleri elde edilmiştir. Çekme deneyleri filament numunelere 200 mm/dk ve standart çekme numunelerine 5 mm/dk [18-19] kafa ilerleme hızında uygulanmıştır.

FTIR analizleri Perkin Elmer (Model: Frontier, Perkin Elmer, United States) FT-IR, NIR and FIR Spectroscopy cihazında yapılmıştır.



Şekil 3. Standart çekme numunelerinin yazdırılması.

Numunelere ait baskı ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Zeiss (Model: EVO® LS10, Zeiss, Oberkochen, Germany) elektron mikroskopunda 50-2000x büyütme aralıklarında alınmıştır.



Şekil 4. Standart çekme ve filament numunelerin çekme deneyi.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Filament ve üretilen standart çekme numuneleriyle yapılan çekme deneyleri sonucunda test cihazından kuvvet (N) ve uzama (mm) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak numunelere ait çekme dayanımı (MPa)–uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Tüm numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası

elde edilen çekme dayanımları Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 3. Çekme deneyi sonuçları.

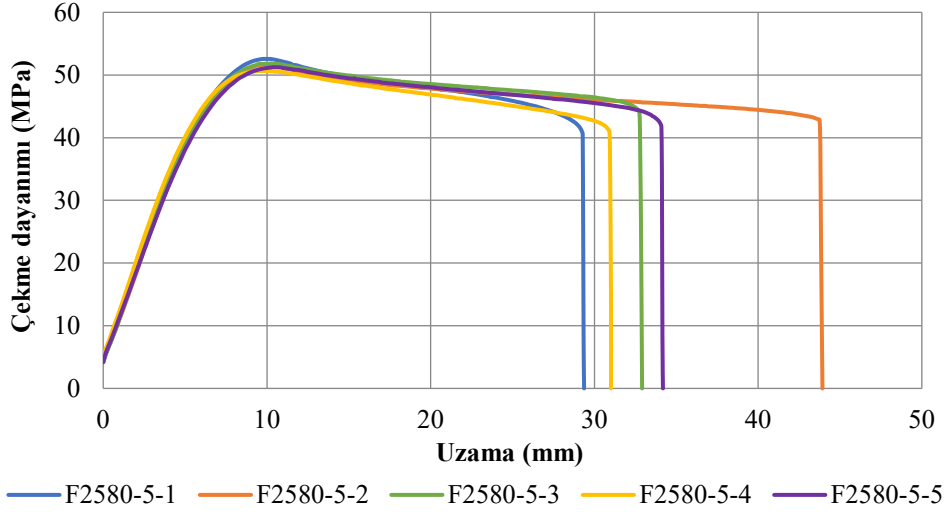
Deney Numarası	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)
F2580-5	Filament	51,6±0,71
F2580-10	Filament	52,2±0,65
F2580-15	Filament	51,2±0,67
F2580-20	Filament	51,0±0,93
FK2580-5	Çekme	34,3±0,54
FK2580-10	Çekme	31,2±0,28
FK2580-15	Çekme	27,7±0,43
FK2580-20	Çekme	28,0±0,58
K2580-5	Çekme	50,2±0,71
K2580-10	Çekme	50,5±0,76
K2580-15	Çekme	50,0±0,78
K2580-20	Çekme	49,6±0,47

3.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının ve SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

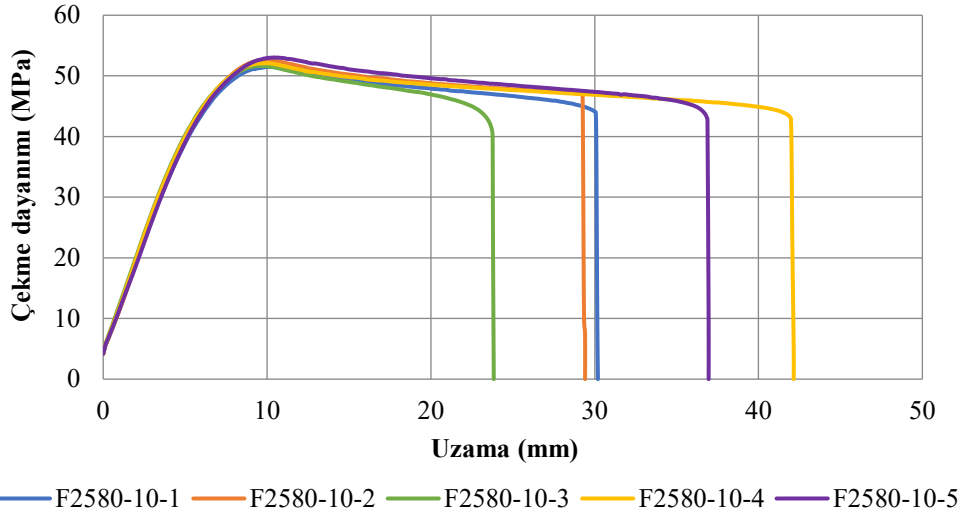
PLA filamentini 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrası numunelere ait çekme dayanımı (MPa)–uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Filament numuneler için çizilen eğriler Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5’te filament numunelere ait çekme dayanımı–uzama eğrileri incelendiğinde referans ve şartlandırılmış tüm numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermişler belirli bir uzama gösterip kopmuşlardır. Bu da malzemelerin sünek olduğunu göstermektedir. Numunelerin nemli ortamda bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde olumlu veya olumsuz yönde önemli bir etkisi olmamıştır.

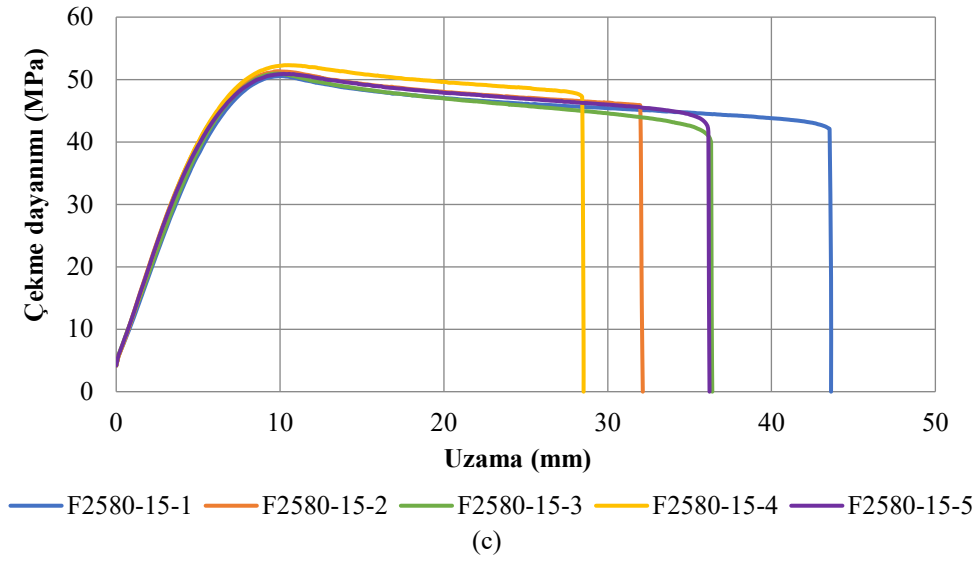
Filament numunelere ait çekme dayanımı grafiği incelendiğinde (Şekil 6) en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı nemli ortamda 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Nemli ortamda bekletme süresinin artması ile numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. Ancak çekme dayanımlarındaki azalma tüm sürelerde birbirine yakındır. Dayanımın değişmesinde süre önemli bir etken olmamıştır. 20 günlük numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6.8 oranında azalmıştır.



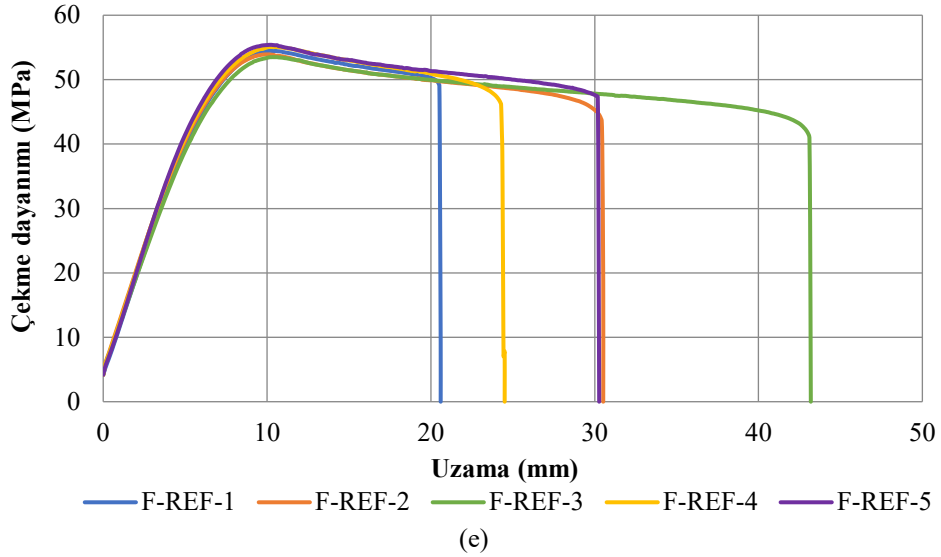
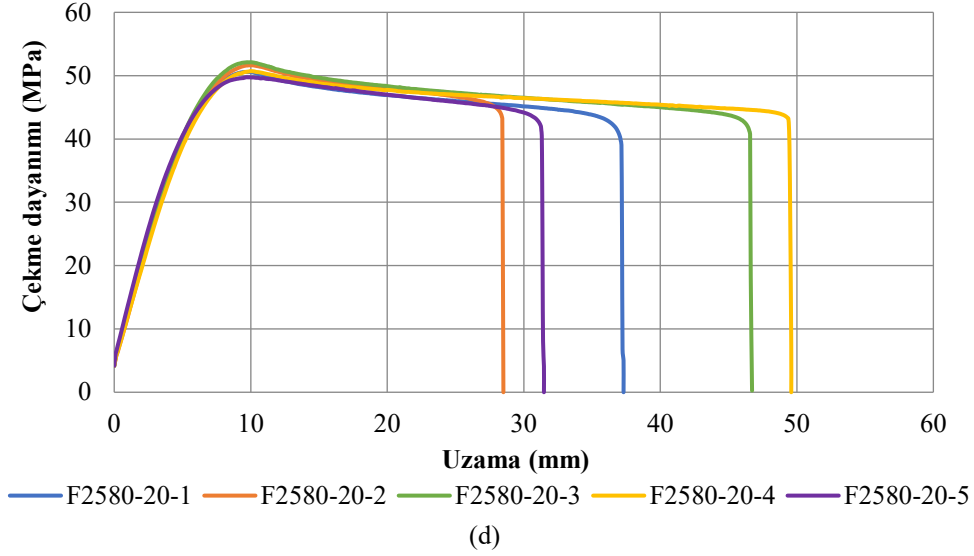
(a)



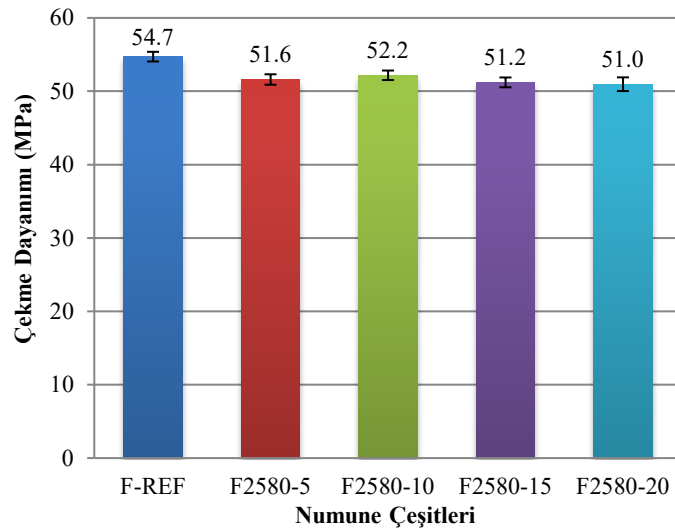
(b)



(c)



Şekil 5. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış filament numunelerin çekme dayanımları (a) 5 gün, (b) 10 gün, (c) 15 gün, (d) 20 gün, (e) referans.

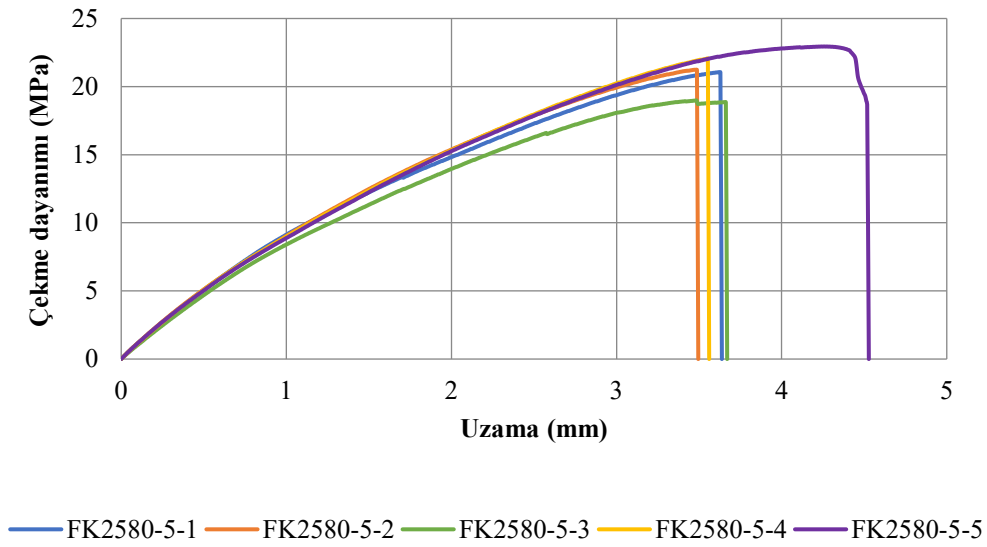


Şekil 6. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filament numunelerin çekme dayanımları.

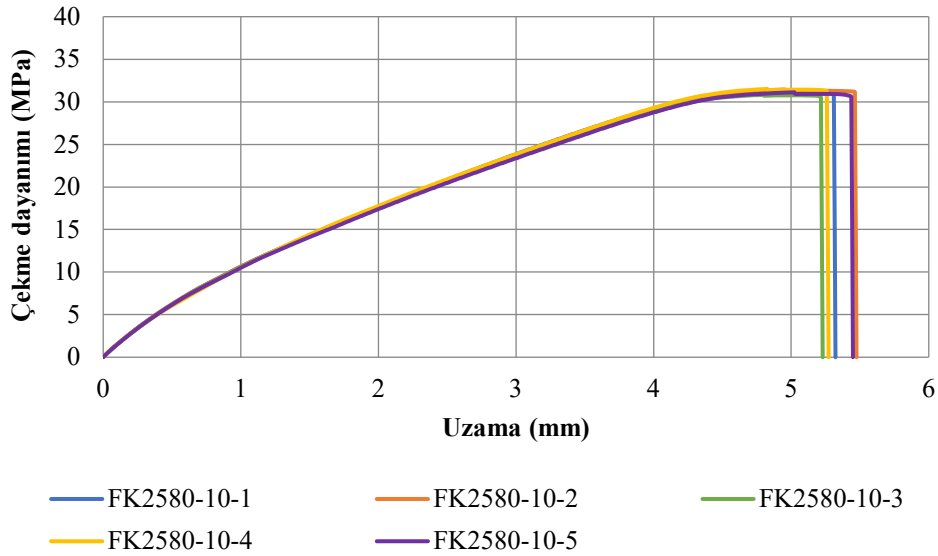
25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde filamenti 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için şartlandırılmış olan bu filamentlerden üretilen standart çekme numunelerine çekme deneyi uygulanmış ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Çizilen bu eğriler Şekil 7’de verilmiştir.

Referans numuneye ait (Şekil 7e) ve 10 gün süre ile şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesine ait (Şekil 7b) eğrileri incelendiğinde her iki numune de maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş ve belirli bir uzama gösterip kopmuştur. Bu da

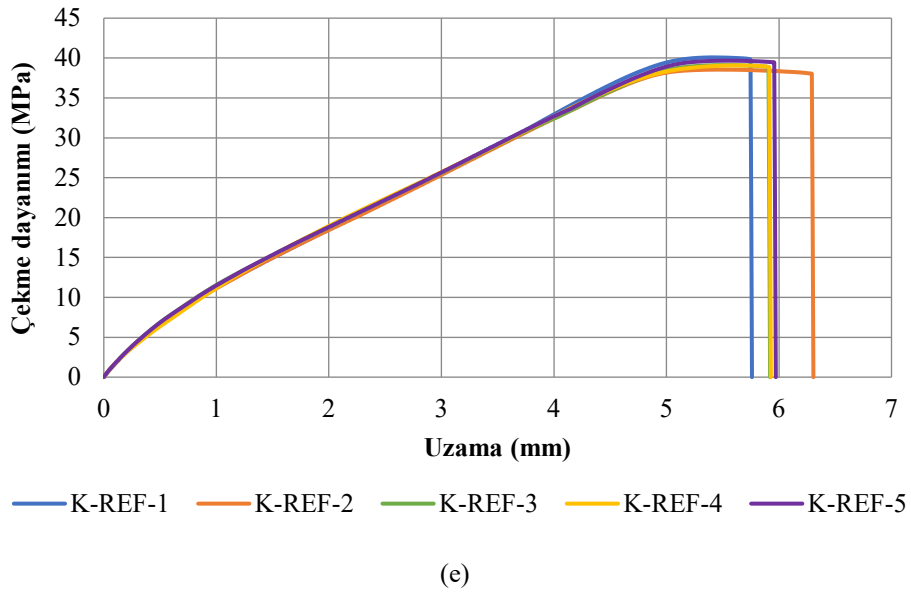
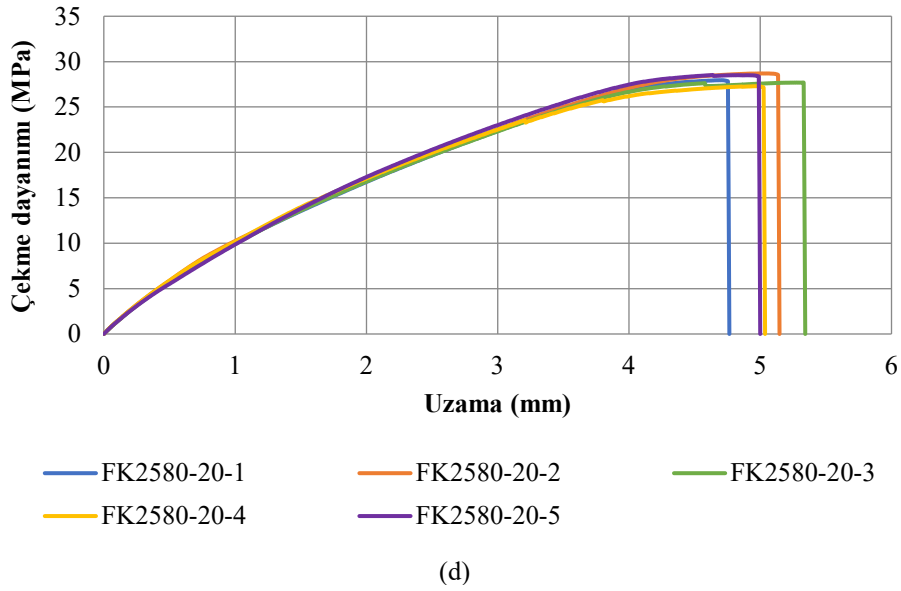
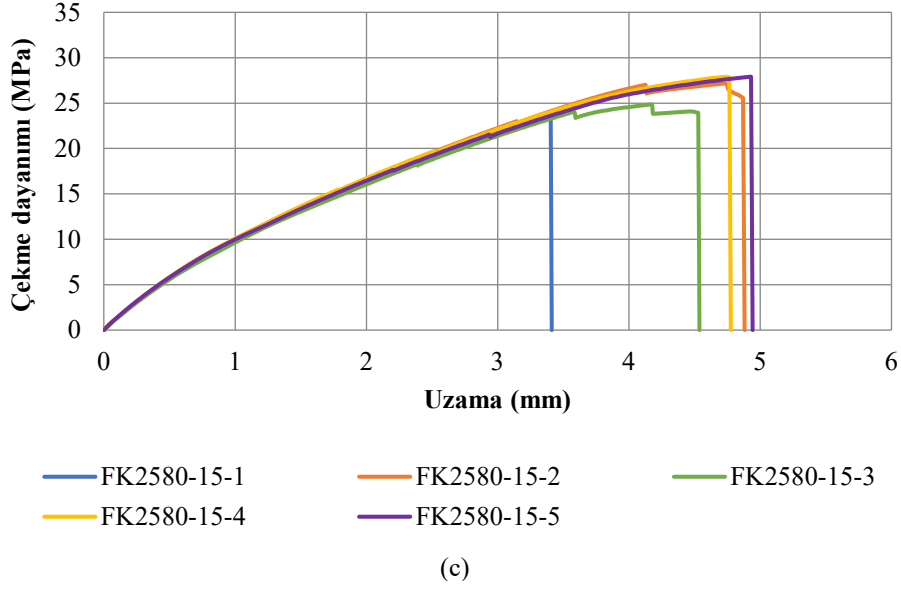
malzemelerin yarı sünek olduğunu göstermektedir. Fakat şartlandırılmış filamentlerden basılan standart çekme numunelerine ait (Şekil 7a, c, d) eğrileri incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında kopmuşlardır. Bu da malzemenin gevrek olduğunu göstermektedir. Filamentlerin nemli ortamda bekletilmelerinin basılan standart çekme numunelerinin hasar davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Fakat 10 gün süre ile şartlandırılmış filamentten üretilen numunenin çekme dayanımı azalmasına rağmen referans numune ile benzer kopma davranışı sergilemiştir.



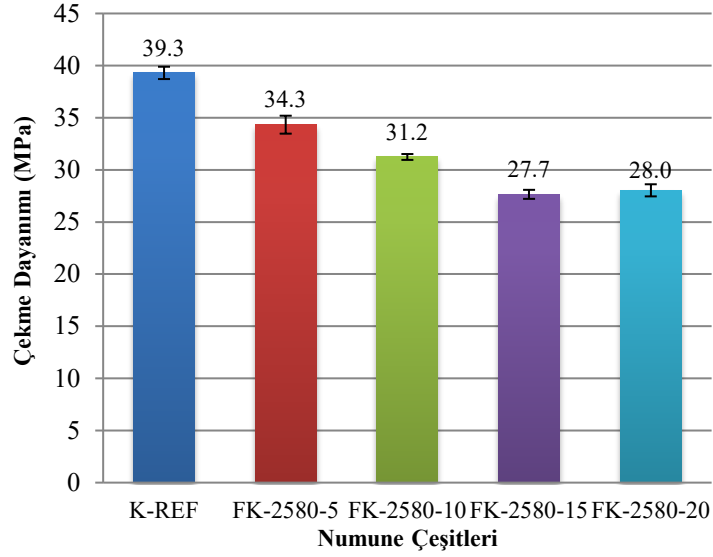
(a)



(b)



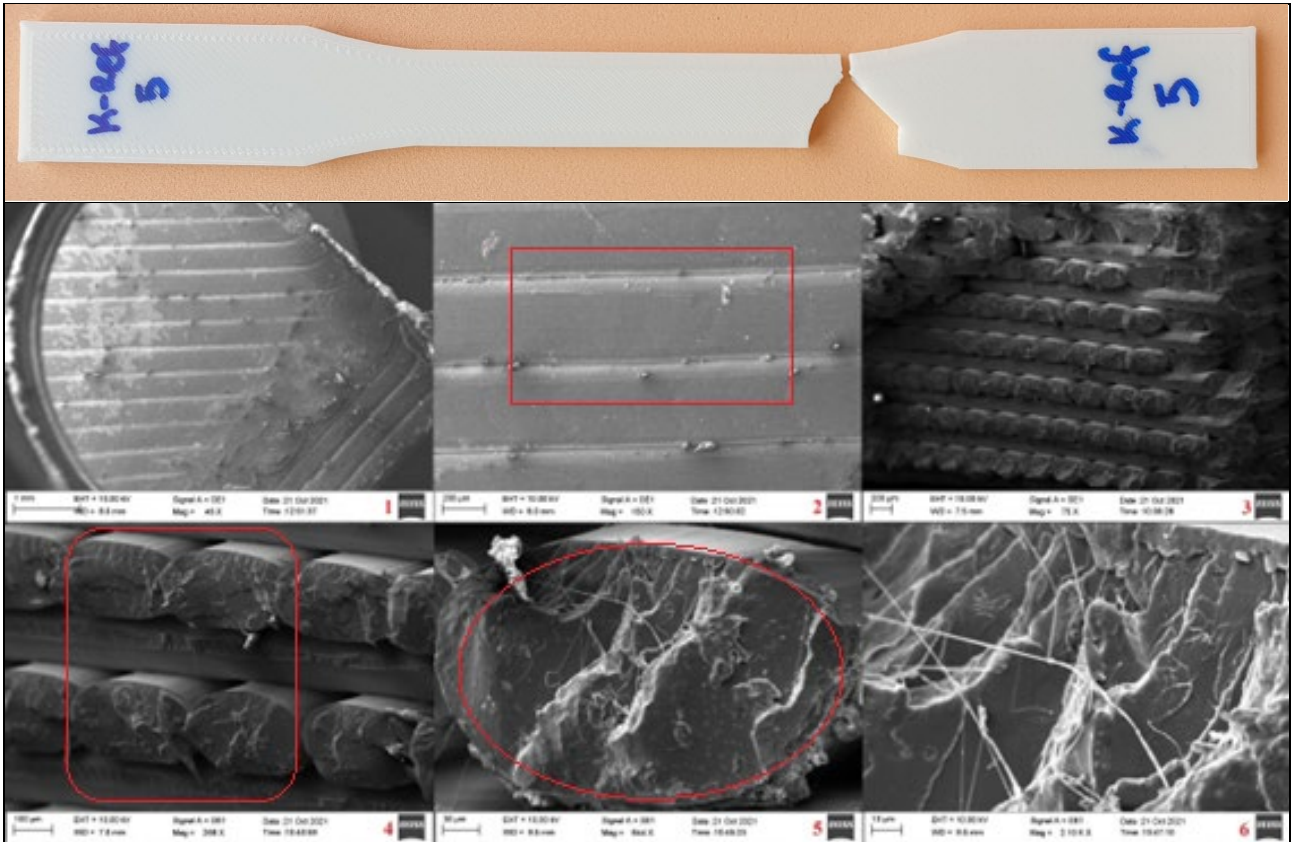
Şekil 7. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları (a) 5 gün, (b) 10 gün, (c) 15 gün, (d) 20 gün, (e) referans.



Şekil 8. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentlerden basılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları.

Şartlandırılmış filamentlerden basılan standart çekme numunelerine ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 8) incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 15 gün şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesinde elde

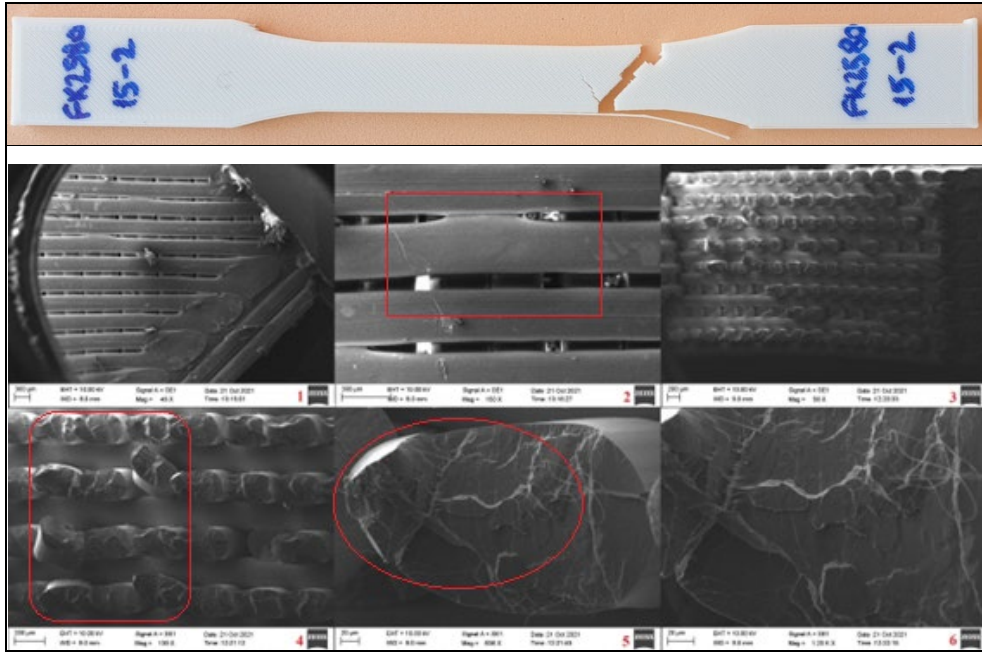
edilmiştir. Bekleme süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır. 15 gün bekletilen numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %29 oranında daha düşüktür.



Şekil 9. Şartlandırılmamış PLA filamentten basılan referans standart çekme numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 9 ile verilen referans standart çekme numunesine ve Şekil 10 ile verilen 15 gün şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesine ait 3, 4, 5 ve 6. SEM görüntüleri incelendiğinde; referans numunede kırılma daha yumuşak ve sünek olarak gerçekleşirken şartlandırılmış olan numunede kırılma daha keskin, gevrek olarak gerçekleşmiştir. Şartlandırılmış filamentler kırılma esnasında aynı anda farklı noktalardan da kırılmıştır (Şekil 10-4). Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 7) kırılma durumlarını desteklemektedir.

Şekil 9'daki 1. ve 2. görüntüler referans standart çekme numunesinin yüzeylerini, Şekil 10'daki 1. ve 2. görüntüler ise 15 gün şartlandırılmış filamentten basılan standart çekme numunesinin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler şartlandırılmış numunedeki baskı kalitesinin düştüğünü göstermektedir. Referans numune yüzeylerinde baskı esnasında filamentler birbirine yapışmıştır oysa şartlandırılmış numunede filamentler arasında çok fazla boşluk oluşmuş filamentler birbirine yapışmamıştır. Bu da baskı ve yüzey kalitesinin bozulmasına ve çekme dayanımının azalmasına neden olmuştur.



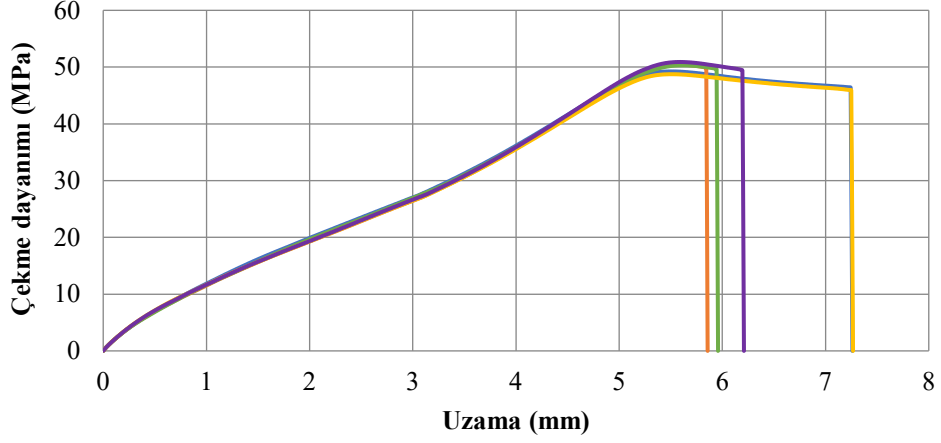
Şekil 10. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentten basılan standart çekme numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

PLA standart çekme numuneleri 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortam içerisinde 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletmenin etkisinin incelenmesi için numunelere çekme deneyi uygulanmış ve çekme dayanımı (MPa)-uzama (mm) eğrileri çizilmiştir. Standart çekme numuneleri için çizilen eğriler Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 11'de referans ve şartlandırılmış standart çekme numunelerine ait çekme dayanımı-uzama eğrileri gösterilmektedir. Referansa ait (Şekil 11e) ve şartlandırılmış numunelere ait (Şekil 11a, b, c, d) eğrileri birlikte incelendiğinde numuneler maksimum çekme dayanımı noktasında boyun vermiş ve belirli bir uzama sonrası kopmuşlardır.

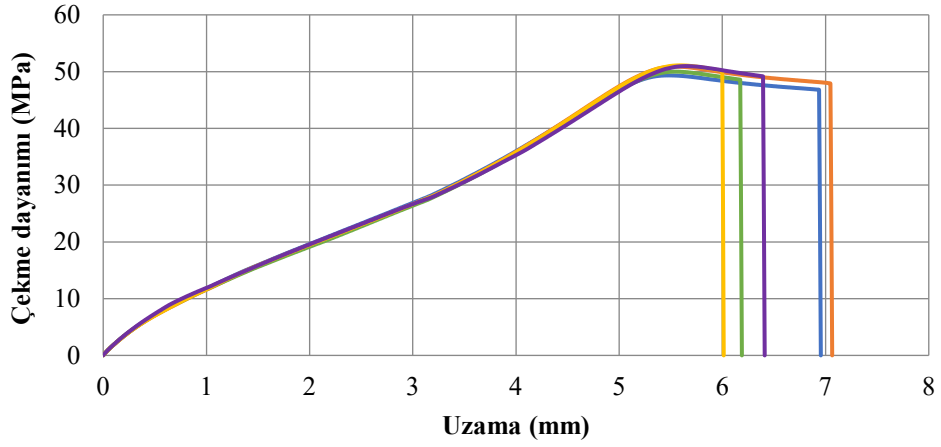
Bu durumda numunelerin sünek olduklarını göstermektedir. Standart çekme numunelerinin nemli ortamda 5, 10, 15, 20 gün bekletilmelerinin sünek davranışları üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

Standart çekme numunelerine ait çekme dayanımı grafiği (Şekil 12) incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı referans numunede en düşük çekme dayanımı ise 20 gün bekletilmiş numunede elde edilmiştir. Bekletme süresinin artması ile doğru orantılı olarak numunelerin çekme dayanımları azalmıştır fakat bu azalma birbirine yakındır. 20 gün bekletilen numunede çekme dayanımı referans numuneye göre %6,8 oranında azalmıştır.



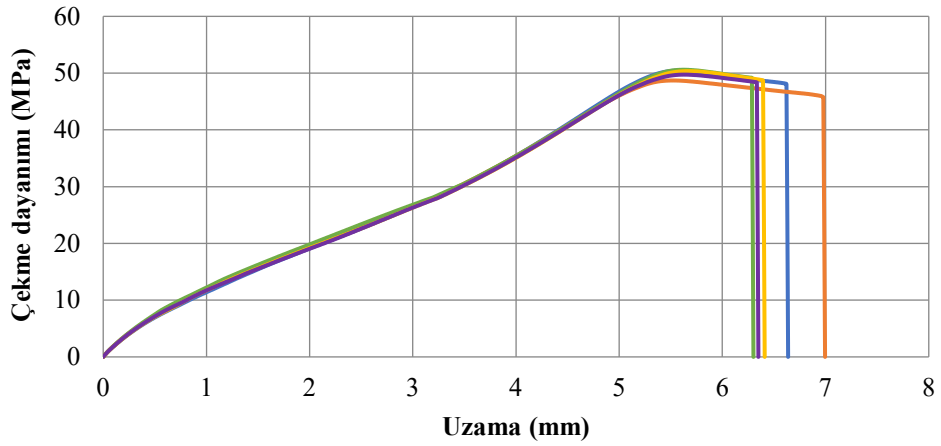
— K2580-5-1 — K2580-5-2 — K2580-5-3 — K2580-5-4 — K2580-5-5

(a)



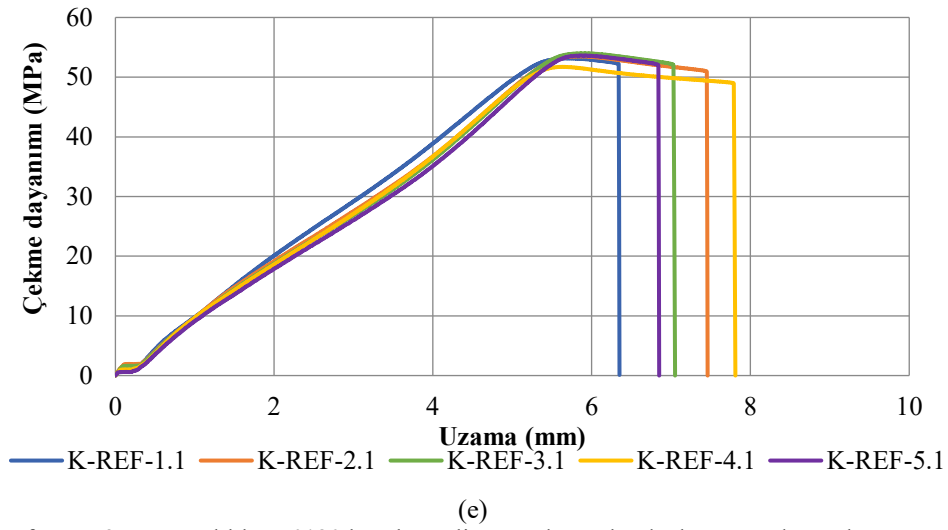
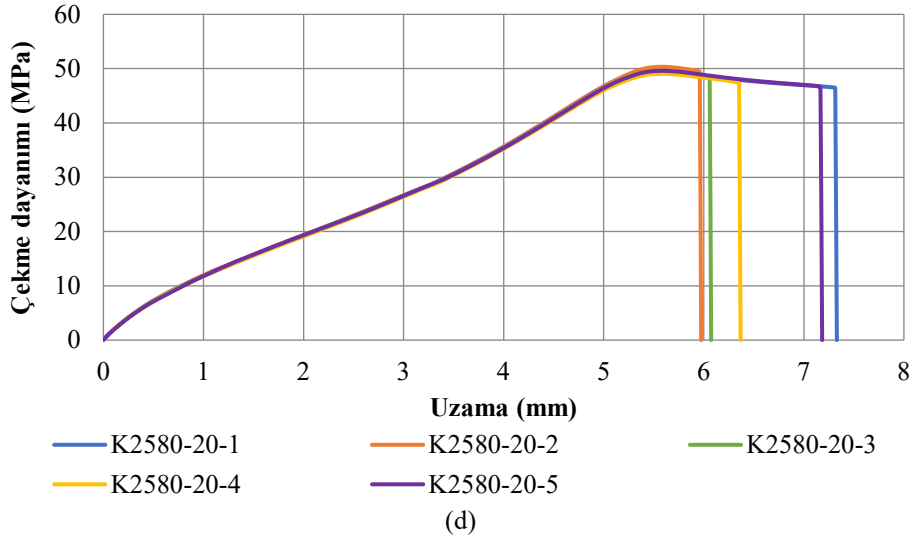
— K2580-10-1 — K2580-10-2 — K2580-10-3 — K2580-10-4 — K2580-10-5

(b)

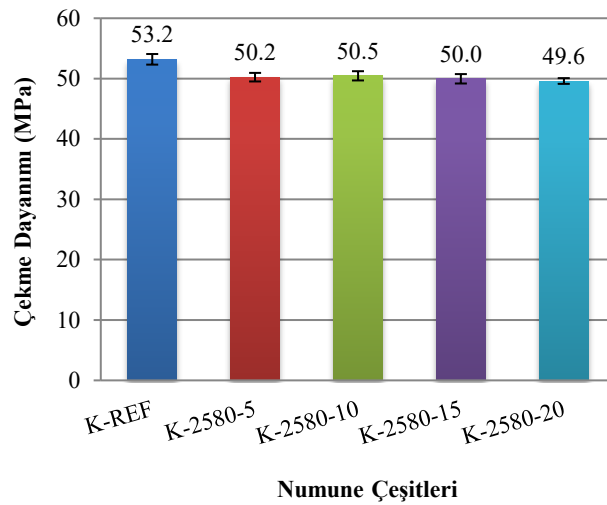


— K2580-15-1 — K2580-15-2 — K2580-15-3 — K2580-15-4 — K2580-15-5

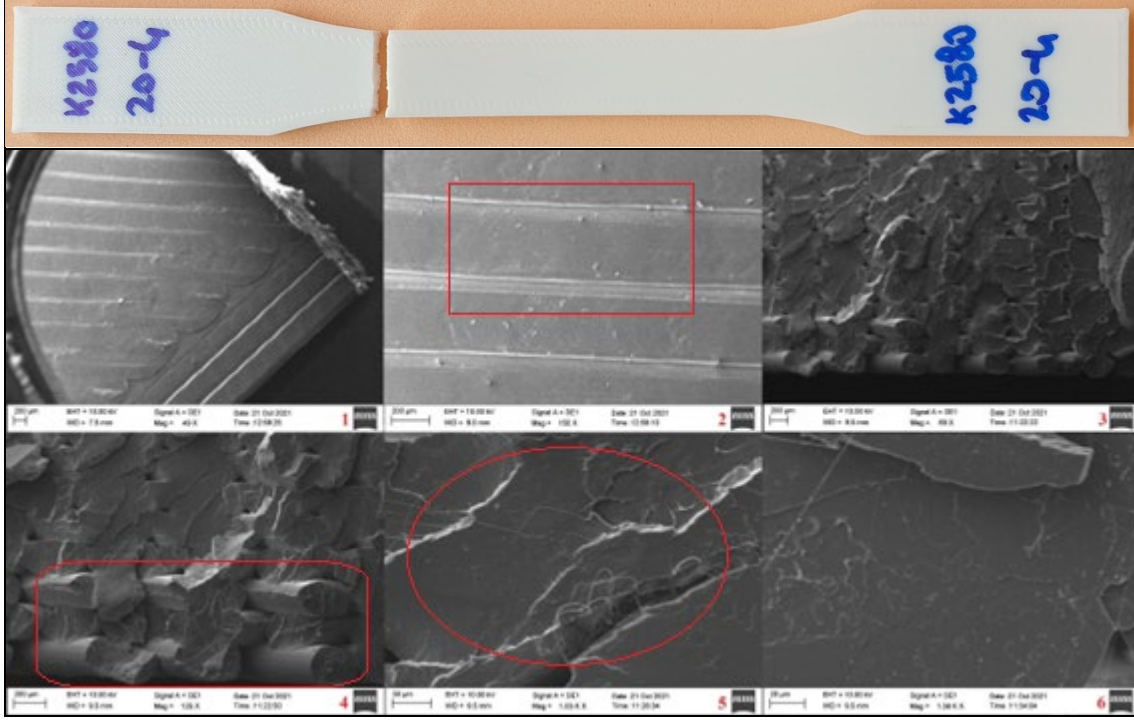
(c)



Şekil 11. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda şartlandırılmış standart çekme numunelerinin çekme dayanımları (a) 5 gün, (b) 10 gün, (c) 15 gün, (d) 20 gün, (e) referans.



Şekil 12. Referans, 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 5, 10, 15 ve 20 gün süre ile bekletilmiş PLA standart çekme numunelerinin çekme dayanımları.



Şekil 13. 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş PLA standart çekme numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü, numune ve kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 9 ile verilen referans standart çekme numunesine ve Şekil 13 ile verilen 20 gün bekletilmiş standart çekme numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde; 3, 4, 5 ve 6. görüntülerde numunelerin ve numuneler içerisindeki filamentin kırılma yüzeyleri görülmektedir. Hem referans numune hem de şartlandırılmış numunede kırılma sünek olarak gerçekleşmiştir. Daha önce verilen çekme dayanımı-uzama eğrileri de (Şekil 11) bu sünek kırılma durumunu desteklemektedir.

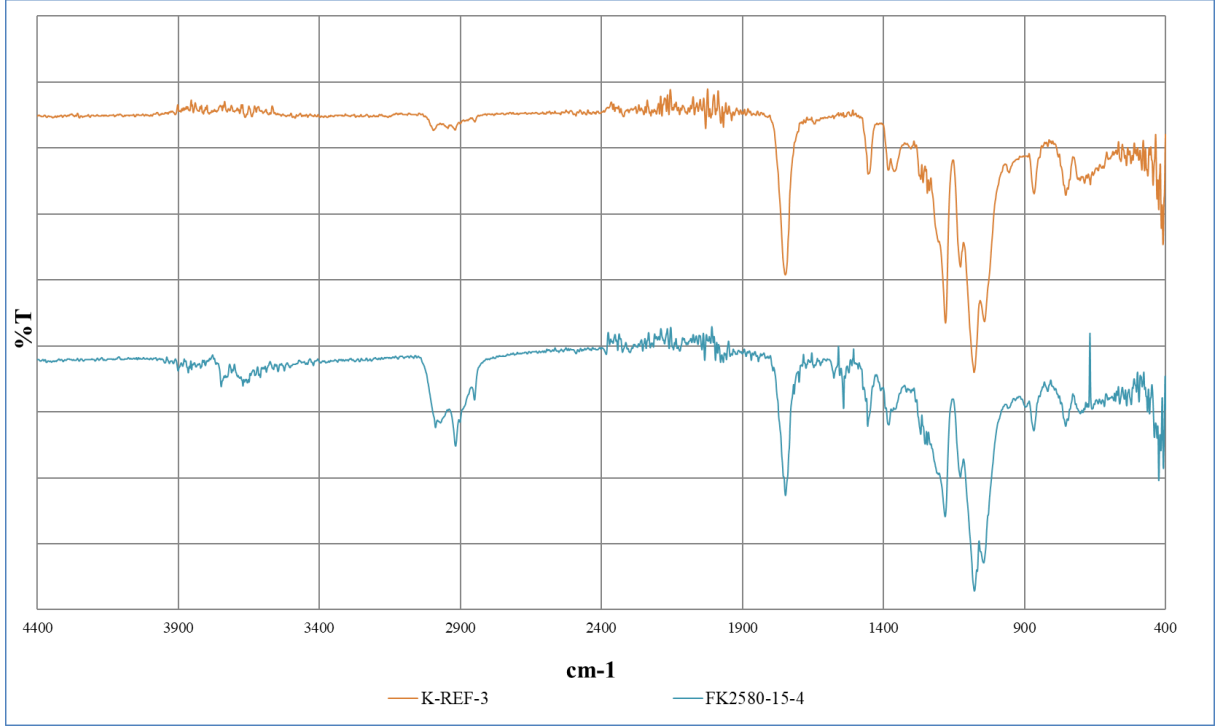
Şekil 9'daki 1. ve 2. görüntüler referans standart çekme numunesinin yüzeylerini, Şekil 13'teki 1. ve 2. görüntüler ise şartlandırılmış standart çekme numunesinin yüzeylerini göstermektedir. Tüm bu görüntüler incelendiğinde referans ve şartlandırılmış numune yüzeylerinin benzerliği görülmektedir. Şartlandırmanın numunenin yüzey kalitesi üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi olmamıştır. Her iki yüzey de düzgündür ve filamentler birbirine yapışmıştır.

3.2. FTIR Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

PLA filamentini nemli ortamda bekletmenin üretilen standart çekme numunelerine etkisinin incelenmesi için referans ve nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş filamentten basılan standart çekme numunesine FTIR analizleri yapılmıştır. Analiz sonrası numunelere ait %T (geçirgenlik), cm^{-1} (dalga sayısı) değerleri elde edilmiş ve geçirgenlik-dalga sayısı eğrileri çizilmiştir (Şekil 14).

Şekil 14'teki spektrumda PLA'ya ait tipik bantlar görülebilmektedir. PLA filamentten üretilen standart çekme numunelerinin; C-C gerilme bandı 866 cm^{-1} 'de; C-O gerilme bantları 1078 cm^{-1} ve 1180 cm^{-1} 'de; C-H bandı 1361 cm^{-1} 'de; CH_3 bükülme absorpsiyon bandı 1453 cm^{-1} ; C=O ester karbonil gerilme grupları 1748 cm^{-1} 'de; ve C-H gerilme pikleri 2919 cm^{-1} ve 2997 cm^{-1} 'de görülmektedir [20].

Şartlandırılmış PLA filamentten üretilen standart çekme numunelerinde, O-H gruplarına ait yeni pikler 3750 cm^{-1} 'de görülmektedir (Şekil 14).

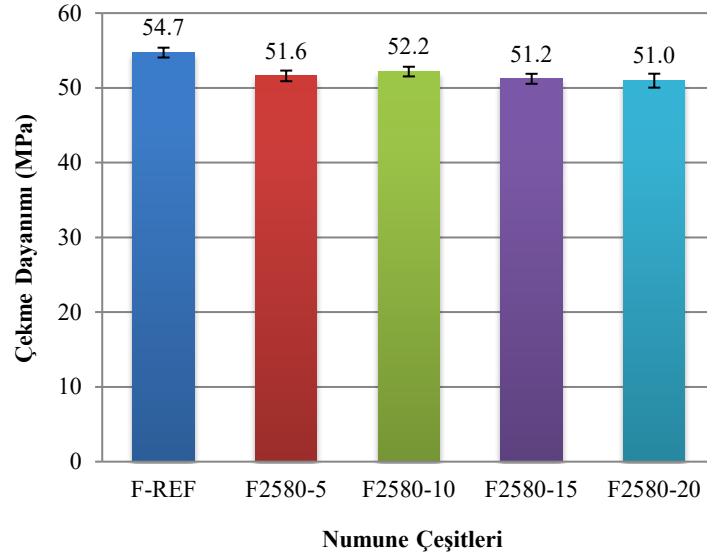


Şekil 14. Referans, nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş PLA filamentten üretilen standart çekme numunelerinin FTIR analizleri.

4. SONUÇLAR

Tüm filament numunelere ait çekme dayanımları Şekil 15'teki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Şartlandırılmış tüm filament

numunelerin çekme dayanımları bekletme gün sayısı farketmeksizin düşmüştür. En yüksek dayanım düşüşü nemli ortamda 20 gün süre ile bekletilmiş filamentte gerçekleşmiştir.



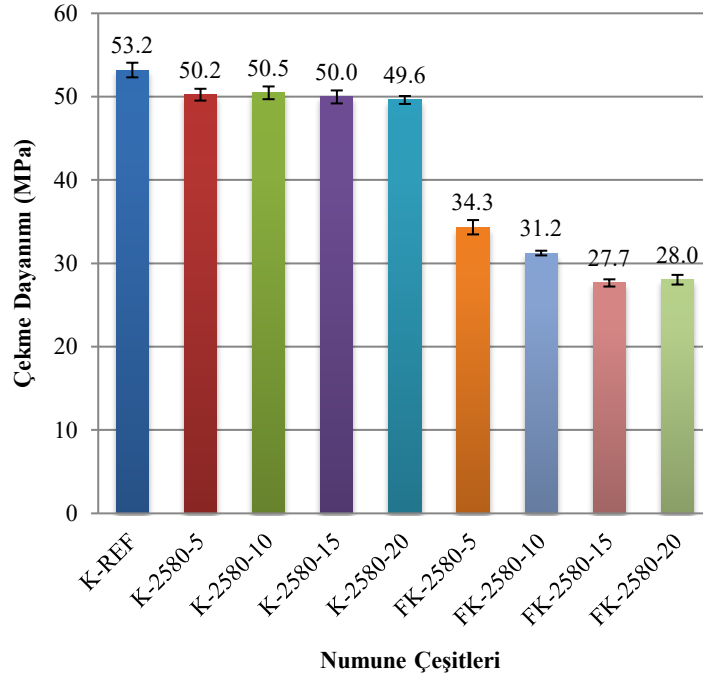
Şekil 15. Referans ve şartlandırılmış filament numunelerin çekme dayanımları.

Tüm şartlandırılmış standart çekme numunelerine ve şartlandırılmış filamentten üretilen standart çekme numunelerine ait çekme dayanımları Şekil 16'daki grafik ile toplu olarak verilmiştir. Şartlandırılmış PLA filamentten yazdırılan standart çekme numunelerinin çekme dayanımları ve baskı kaliteleri bekletme gün

sayısı farketmeksizin düşmüştür. En yüksek dayanım düşüşü 15 gün süre ile şartlandırılmış filamentten yazdırılan standart çekme numunesinde gerçekleşmiştir. Şartlandırılmamış filamentten yazdırılıp daha sonra şartlandırılmış standart çekme numuneleri birbirlerine hem yüzey olarak hem

de çekme dayanımları olarak benzer sonuçlar sergilemişlerdir. Tüm deneysel sonuçlar incelendiğinde nemli ortama maruz kalmış filamentlerden yapılan numune baskılarında

baskı kalitelerinin ve çekme dayanımlarının azalmasında numunelerin basıldıktan sonra nemli ortama maruz kalmasına kıyasla çok daha etkili olduğu bulunmuştur.



Şekil 16. Referans ve şartlandırılmış filamentten basılan tüm standart çekme numunelerinin çekme dayanımları.

Nemli ortama farklı sürelerde maruz bırakılan PLA filamentin ve bu filamentlerden basılan standart çekme numunelerinin mekanik ve baskı özelliklerinin nasıl değiştiğinin belirlenmesi için yapılan bu araştırma sonucunda;

1. Nemli ortama maruz kalmış PLA filamentten yapılan 3B baskılarda baskı kalitelerinin ve çekme dayanımlarının azaldığı görülmüştür.

2. Standart çekme numunelerinin baskı kaliteleri ve çekme dayanımlarındaki en büyük düşüş 25 °C sıcaklık ve %80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmiş filamentlerden üretilen standart çekme numunelerinde görülmüştür.

3. PLA filamentten basılmış standart çekme numunelerinin nemli ortama maruz kalmaları sonucu yüzey özelliklerinde ve çekme dayanımlarında önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.

4. Nemli ortama maruz kalmış PLA filamentlerin yazdırılması esnasında filamentlerin birbirine yapışmaması gibi baskı problemleri ile karşılaşılabilir.

PLA filament ve filament ürünlerinin nemli ortamlardan fiziksel ve kimyasal olarak nasıl etkilendiği amacı ile yapılan bu çalışmada; filamentin 25 °C sıcaklık ve % 80 bağıl nemli ortamda 15 gün süre ile bekletilmesinden sonra yazdırılan standart çekme numunelerinde en büyük dayanım düşüşü görülmüştür. Filamentlerde ve şartlandırılmamış filamentten basılan standart çekme numunelerinde nemli ortamın etkisi fazla olmamıştır. Bu sebeple ülkemiz nem koşullarının PLA veya kompozit türevlerinden üretilecek filamentlerin yazdırma özelliklerine etkisinin araştırılması için yapılacak sonraki çalışmalarda deneysel koşullar olarak 25 °C sıcaklık, %80 bağıl nemli ortam ve 15 günlük bekletme süresinin kullanılmasının uygun olacağı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan parametrelere bağlı olarak elde edilen sonuçlar akademik araştırmalara ve endüstriyel olarak filament üretimi yapan firmaların ürünlerine katkı sağlayacak niteliktedir. Farklı parametreler ve burada araştırma kapsamı dışında bırakılmış filamentler ve filamentlerden elde edilen ürünler ile yapılacak akademik çalışmalar endüstriyel ürünlerin gelişmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Baran, E.H., Erbil, H.Y., "Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review", *Colloids and Interfaces*, Vol. 3, Issue 2, Page 43, 2019.
2. Musa, L., Kumar, N.K., Rahim, S.Z.A., Rasidi, M.S.M., Rennie, A.E.W., Rahman, R., Kanani, A. Y., Azmi, A.A., "A review on the potential of polylactic acid based thermoplastic elastomer as filament material for fused deposition modelling" *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 20, Pages 2841-2858, 2022.
3. Lopes, M.S., Jardini, A.L., Filho, R.M., "Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications", *Procedia Engineering*, Vol. 42, Pages 1402-1413, 2012.
4. Low, Z., Chua, Y.T., Ray, B.M., Mattia, D., Metcalfe, I.S., Patterson, D.A., "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques", *Journal of Membrane Science*, Vol. 523, Pages 596-613, 2017.
5. Savini, A., Savini, G.G., "A short history of 3D printing, a technological revolution just started", 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference, Pages 1-8, Tel-Aviv, 2015.
6. Atakok, G., Kam, M., Koc, H.B., "Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 18, Pages 1542-1554, 2022.
7. Lohar, D.V., Nikalje, A.M., Damle, P.G., "Development and testing of hybrid green polymer composite (HGPC) filaments of PLA reinforced with waste bio fillers", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 62, Part 2, Pages 818-824, 2022.
8. Allthat3d, "18 3D Printer Filament Types And Uses Comparison Guide", <https://www.allthat3d.com/3d-printer-filament>, November 15, 2021.
9. All3dp, "The 7 Main Types of 3D Printing Technology in 2022", <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology>, November 15, 2021.
10. Martin, "3D Printer Filament Types | Properties, Uses & Comparison", <https://the3dprinterbee.com/3d-printing-filament-guide-properties-uses>, November 15, 2021.
11. MatterHackers, "3d Printer Filament Comparison Guide", <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>, November 15, 2021.
12. 3dinsider, "16 Different Types of 3D Printing Materials", <https://3dinsider.com/3d-printing-materials>, November 15, 2021.
13. Kalinke C., Oliveira, P.R., Neumsteir, N.V., Henriques, B.F., Aparecido, G.O., Loureiro, H.C., Janegitz, B.C., Bonacin, J.A., "Influence of filament aging and conductive additive in 3D printed sensors", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 1191, Page 339228, 2022.
14. Harris, A.M., Lee, E.C., "Heat and Humidity Performance of Injection Molded PLA for Durable Applications" *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 115, Issue 3, Pages 1380-1389, 2010.
15. Porfyrus, A., Vasilakos, S., Zotiadis, C., Papaspyrides, C., Moser, K., Schueren, L., Buyle, G., Pavlidou, S., Vouyiouka, S., "Accelerated ageing and hydrolytic stabilization of poly(lactic acid) (PLA) under humidity and temperature conditioning" *Polymer Testing*, Vol. 68, Pages 315-332, 2018.
16. Kamau-Devers, K., Kortum, Z., Miller, S.A., "Hydrothermal aging of bio-based poly(lactic acid) (PLA) wood polymer composites: Studies on sorption behavior, morphology, and heat conductance", *Construction and Building Materials*, Vol. 214, Pages 290-302, 2019.
17. Sajna, V., Nayak, S.K., Mohanty, S., "Weathering and Biodegradation Study on Graft Copolymer Compatibilized Hybrid Bionanocomposites of Poly(Lactic Acid)", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, Pages 2895–2906, 2016.
18. ASTM Standard D638-14, "Standard test method for tensile properties of plastics", 2014.
19. Letcher, T., Waytashek, M., "Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Montreal, 2014.
20. Przekop, R.E., Kujawa, M., Pawlak, W., Dobrosielska, M., Sztorch, B., Wieleba, W., "Graphite Modified Polylactide (PLA) for 3D Printed (FDM/FFF) Sliding Elements" *Polymers*, Vol. 12(6):1250, Pages 1-22, 2020