



Impact behavior of PET-G parts produced by fused deposition modelling depending on layer height and test temperature

Berkay Ergene^{1*}, Hasan Ispartalı², Uçan Karakılınç³

¹Pamukkale University, Faculty of Technology, Mechanical Engineering Department, 20160, Kınıklı, Denizli, Türkiye

²Süleyman Demirel University, Innovative Technologies Application and Research Center, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

³Isparta University of Applied Sciences, Vocational School of Technical Sciences, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

Highlights:

- Drop-weight impact response of 3D printed PET-G parts at different test temperatures
- Determination of tensile strength and hardness of the PET-G specimens with various layer heights
- Macroscopic and microscopic detections on crack propagation and damage zone at PET-G parts

Keywords:

- Fused deposition modelling
- PET-G
- Drop-weight impact response
- Energy absorption
- Test temperature

Article Info:

Research Article

Received: 30.01.2022

Accepted: 03.06.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1065131

Correspondence:

Author: Berkay Ergene

e-mail: bergene@pau.edu.tr

phone: +90 554 281 4943

Graphical/Tabular Abstract

The determination of the energy absorption abilities of the 3D printed PET-G parts is crucial due to their potential usage fields such as automotive, biomedical and aerospace. Figure A demonstrates the real time drop weight impact test equipment and absorbed energy values depending on layer height and test temperatures.

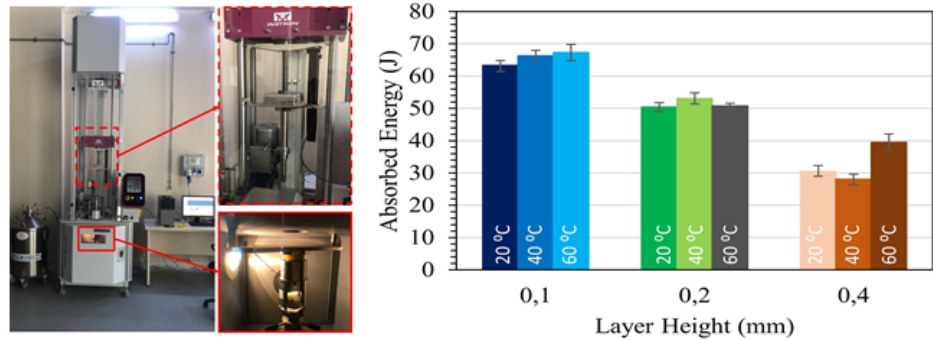


Figure A. Illustration of the drop-weight impact test equipment and absorbed energy values of the specimens with different layer heights at various test temperatures

Purpose:

In this performance, the effect on layer height on the drop-weight impact response of 3D printed PET-G samples with fused deposition modelling (FDM) was examined at the various ambient temperature of 20°C, 40°C, and 60°C besides determining the hardness and tensile strength of the specimens.

Theory and Methods:

PET-G drop-weight, tensile and hardness test specimens were designed in AutoCAD 2020 program according to ASTM standards and then they were manufactured with 3D printer which uses fused deposition modelling method. After that, drop-weight impact test, tensile test and hardness measurement were examined.

Results:

The results show that a maximum average hardness value of 69,4 Shore D was obtained at the specimen with layer height of 0,4 mm even though the minimum average tensile strength of 39,24 MPa was observed at the same specimen. Besides, it was determined that the effect of layer height is more dominant than the test temperature for energy absorption. In conclusion, maximum absorbed energy of 67,335 J was observed at the specimen with a layer height of 0,1 mm and tested at ambient temperature of 60°C. On the other hand, the specimen with a layer height of 0,4 mm and tested at ambient temperature of 40°C exhibited the minimum absorbed energy of 28,070 J. Lastly, according to macroscopic and microscopic detections, no cracks were observed in the samples with a layer height of 0.4 mm, while it was determined that cracks were formed extending from the center to the corners in the samples with a layer height of 0.1 mm and 0.2 mm.

Conclusion:

It can be pointed out that the layer height of the 3D printed PET-G specimen and ambient test temperatures directly affect the energy absorption levels of the specimens and damage types change depending on these variables.



Eriyik yığma modelleme ile üretilen PET-G parçaların katman yüksekliğine ve test sıcaklığına bağlı darbe davranışı

Berkay Ergene^{1*}, Hasan Ispartalı², Uçan Karakılıncı³

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Kınıklı, Denizli, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

³Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Üç boyutlu baskı ile üretilen PET-G parçaların farklı test sıcaklıklarındaki ağırlık düşürme darbe yanıtı
- Farklı katman yüksekliklerindeki PET-G numunelerin sertlik ve çekme dayanımının belirlenmesi
- PET-G parçalarda çatlak yayılımı ve hasar bölgesinde makroskopik ve mikroskopik tespitler

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.01.2022

Kabul: 03.06.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1065131

Anahtar Kelimeler:

Eriyik yığma modelleme,
PET-G,
ağırlık düşürme darbe yanıtı,
enerji emme,
test sıcaklığı

ÖZ

Son yüzyılda, polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polietilen tereftalat glikol (PET-G) gibi polimer malzemeler hafif, ucuz, sürdürülebilir olması ve mühendislik uygulamaları için yeterli dayanımı sağladıklarından dolayı bir çok endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Plastik malzemeler çoğunlukla ekstrüzyon metoduyla üretilse de, üç boyutlu (3B) baskı yöntemi de geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajlarından dolayı son on yılda araştırmacıların dikkatini çekmektedir. 3B baskı ile üretilen polimerlerle ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların çoğunlukla çekme, basma, üç nokta eğme gibi mekanik performansını belirleyici testler üzerine odaklandığı görülmektedir. Bu çalışmada ise, eriyik yığma modelleme (EYM) metoduyla üretilen PET-G parçaların sertlik ve çekme dayanımının belirlenmesinin yanı sıra, parçaların 20°C, 40°C ve 60°C gibi farklı ortam sıcaklıklarındaki ağırlık düşürme darbe davranışına, katman yüksekliğinin (0,1 mm, 0,2 mm ve 0,4 mm) etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki, maksimum ortalama sertlik 69,4 Shore D ile katman yüksekliği 0,4 mm olan parçada ölçülmüştür. Katman yükseklik değeri arttıkça yapıların sertlik değerlerinin arttığı, çekme dayanım değerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, parçaların enerji emme miktarlarında katman yüksekliğinin test sıcaklığına göre daha önemli bir rol oynadığı ifade edilebilir. Son olarak makroskopik ve mikroskopik tespitlere göre 0,4 mm katman yüksekliğine sahip numunelerde herhangi bir çatlak gözlemlenmezken, katman yüksekliği 0,1 mm ve 0,2 mm olan numunelerde ise merkezden köşelere doğru uzanan çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir.

Impact behavior of PET-G parts produced by fused deposition modelling depending on layer height and test temperature

H I G H L I G H T S

- Drop-weight impact response of 3D printed PET-G parts at different test temperatures
- Determination of tensile strength and hardness of the PET-G specimens with various layer heights
- Macroscopic and microscopic detections on crack propagation and damage zone at PET-G parts

Article Info

Research Article

Received: 30.01.2022

Accepted: 03.06.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1065131

Keywords:

Fused deposition modelling,
PET-G,
drop-weight impact
response,
energy absorption,
test temperature

ABSTRACT

In the last century, polymer materials such as polylactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), and polyethylene terephthalate glycol (PET-G) are widely used in many industrial fields due to being light, cheap, sustainable, and providing enough strength for engineering applications. Although plastic materials are mostly manufactured by the extrusion method, the 3D printing method is also taking the attention of researchers in the last decade because of its advantages over traditional methods. When the literature efforts about 3D printed polymers are examined, it can be seen that they are mostly focused on mechanical performance-determining processes such as tensile, compression, and three-point bending. In this performance, the effect on layer height on the drop-weight impact behavior of 3D printed PET-G samples with fused deposition modelling (FDM) was examined at the various ambient temperature of 20°C, 40°C, and 60°C besides determining the hardness and tensile strength of the specimens. The results show that a maximum average hardness value of 69,4 Shore D was obtained at the specimen with layer height of 0,4 mm. It was determined that as the layer height value increased, the hardness values of the structures increased and the tensile strength values decreased. Besides, it can be stated that the layer height plays a more important role in the energy absorption amounts of the parts than the test temperature. Lastly, according to macroscopic and microscopic detections, no cracks were observed in the samples with a layer height of 0,4 mm, while it was determined that cracks were formed extending from the center to the corners in the samples with a layer height of 0,1 mm and 0,2 mm.

1. Giriş (Introduction)

Popüler olarak hızlı prototipleme ve üç boyutlu (3B) baskı olarak bilinen eklemeli imalat teknolojisi [1, 2], diğer üretim yöntemleriyle imalatı mümkün olmayan ya da birden fazla üretim yönteminin bir araya gelmesiyle imalatı mümkün olan kafes yapılar gibi karmaşık geometriye sahip parçaların üretimine olanak sağlamaktadır [3-6]. Ayrıca, eklemeli imalat teknolojisi ile talaşlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi parçadan malzeme kaldırarak üretim yapmak yerine, malzemeleri birbirine katman ekleyerek üretim yapıldığı için malzeme israfı minimum seviyededir [7, 8]. Ek olarak, eklemeli imalat teknolojisi otomotiv [9], uzay-havacılık [10], biyomedikal [11], denizcilik ve mimari gibi birçok alanda [12, 13] önemli bir role sahip olup sırasıyla çarpışma kutusu [14], uçak kanat yapıları [15], implantlar [16], iskele yapıları [17] ve ilaç salınım sistemleri [18], pervane [19] ve mimari yapılar [20] bu alanların başlıca uygulamalarındandır. Bilindiği üzere eriyik yığıma modelleme metodu (EYM) ucuz, kolay ulaşılabilir ve geniş malzeme portföyüne sahip olmasından dolayı en sık kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olup [21], bu yöntemde eritilen filament, nozzle'dan geçerek tasarlanan parçayı oluşturmak üzere katman katman üretim platformuna inşa edilmektedir [22-25]. PET-G, PLA, PVA (polivinil alkol), ABS, TPE (termoplastik elastomer), PC (poli karbonat) ve grafenli katkılı PLA EYM prensibiyle çalışan 3B yazıcılarda kullanılan ana filament malzemelerini oluşturmaktadır [26]. 3B yazıcılarda en çok tercih edilen filamentlerden olan PET-G, glikol ile modifiye edilmiş polietilen tereftalat (PET) bazlıdır. Dahası, PET-G filament ile yapılacak 3B baskılarda 220°C ile 250°C aralığında nozzle sıcaklığına ve minimum 60°C imalat tabla sıcaklığına gereksinim duyulmaktadır [27]. Ek olarak, PET-G malzemeler transparan, esnek, mükemmel kimyasal direnç ve yüksek poroziteye sahip olduklarından dolayı [28, 29], kemik modelleri [30], kişiye özgü laboratuvar donanımı [31], ve ortopedi alanındaki uygulamalarda [32] talep görmektedir.

Literatürdeki çalışmalar derinlemesine incelendiğinde, doluluk oranı, dolgu deseni, üretim açısı, katman yüksekliği, baskı hızı, imalat platform sıcaklığı, nozzle sıcaklığı ve üretim yönü gibi imalat parametrelerinin PET-G parçanın mekanik özelliklerine etkisi ve diğer malzeme çeşitleriyle kıyaslamasının yapıldığı, birçok çalışmada görülmüştür. Örneğin, Srinivasan vd. [33] katman yüksekliği ve doluluk oranının, 3B baskı ile üretilen parçanın mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucu olarak ise, artan katman yüksekliği ile birlikte çekme dayanım değerlerinin azaldığı vurgulanmıştır. Diğer yandan, doluluk oranı arttıkça, çekme dayanım değerlerinde de artış görülmüştür. Singh vd. [34] kıyaslamalı olarak gerçekleştirdikleri çalışmada PET-G ve karbon katkılı PET-G filamentten ürettikleri çekme test numunelerinde doluluk oranının ve üretim yönünün etkisini irdelemişler ve karbon fiber katkılı PET-G filamentten üretilen numunelerin, sadece PET-G filamentten üretilen numunelere nazaran daha yüksek mekanik performans sergilediğini rapor etmişlerdir. Bir diğer çalışmada, Yadav vd. [35] doluluk oranının, 3B baskı ile üretilen PET-G, ABS ve PET-G ile ABS malzemelerin kombinasyonu şeklinde üretilen numunelerin çekme dayanımına etkisini incelemeye odaklanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde, doluluk oranının değişimi ile birlikte numunelerin çekme dayanımlarının doğrudan etkilendiği ileri sürülmüştür. Ayrıca, Durgashyam vd. [36] EYM metoduyla üretilen PET-G malzemelerin mekanik dayanımları üzerine çalışmış olup, düşük katman yüksekliği ve yüksek doluluk oranının PET-G malzemenin üretilen yapıların mekanik özelliklerini geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise, Szykiedans vd. [37] PET-G filamente cam malzeme eklenmesi durumunda çekme test sonuçlarına göre ilgili numunenin çekme dayanımının, katkısız PET-G filamentten üretilen numuneye göre daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. Srinivasan vd. [38] de, 3B baskı ile üretilen PET-G

parçalarda çekme dayanımına dolgu deseninin etkisini araştırmış olup, ızgara deseni ile üretilen numunelerin çekme dayanım değerleri açısından diğer dolgu desenleriyle üretilen numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği öne sürülmüştür. Son olarak da, Hsueh vd. [39] 3B baskı ile PLA ve PET-G malzemenin üretilen parçaların mekanik ve termal özelliklerine baskı parametrelerinin etkisini araştırmış olup, her iki malzeme türü için de daha yüksek nozzle sıcaklık değerlerinin daha iyi mekanik özelliklere neden olduğunu dile getirmişlerdir.

EYM ile üretilen polimer malzemelerin sertliklerinin araştırıldığı çalışmalara odaklanıldığında, Srinidhi vd. [40] farklı dolgu desenlerinin EYM ile üretilen PET-G ve karbon fiber katkılı PET-G parçaların sertliklerine olan etkisini incelemişler ve ızgara tipi dolgu deseniyle imal edilen parçaların sertlik değerlerinin, çizgi, kübik ve bal peteği formundaki dolgu desenleriyle üretilen parçaların sertlik değerlerine göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise [41], farklı yazdırma hızı, doluluk oranı ve katman yüksekliğinin PET-G malzemenin üretilen parçaların sertliklerine olan etkisi Taguchi L9 deney tasarımı ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Bir diğer çalışmada da Kumar vd. [42], EYM ile farklı doluluk oranlarında üretilen PET-G ve karbon fiber katkılı PET-G parçaların camı geçiş sıcaklığının üzerinde bir ısıtma işlemi tabii tutulması durumunda sertlik ve çekme dayanım değerlerinin nasıl değiştiğini gözlemlemişler ve ısıtma işleminin gerçekleşmesi ve doluluk oranının artmasıyla birlikte sertlik ve çekme dayanım değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Szust ve Adamski ise [43] PET-G numunelere uygulanan ısıtma işlemi ve tuzla yeniden ergitme işlemlerinin, numunelerin çekme dayanım değerlerini arttırdığını öne sürmüşlerdir. Shubham vd. [44], EYM ile üretilen ABS parçalarda katman yüksekliğinin, parçaların sertliğine olan etkisini araştırırken, Hervan vd. [45] ise katman yüksekliği ve üretim yönünün PLA parçaların sertliklerine olan etkisini rapor etmişlerdir.

3B baskı ile üretilen PET-G parçaların çekme dayanımı ve sertlik araştırmaları dışında, bu parçaların darbe davranışları hakkında da bazı çalışmalar yapılmıştır. Polimerlerin emdiği enerji miktarını belirlemek için daha çok Izod ve Charpy testi gibi sarkaç darbe testlerinin kullanıldığı söylenebilir. Sarkaç darbe testlerinde, adından da anlaşılacağı gibi, bir sarkaç tarafından numuneye çarpma için eksen üzerinde dönen bir çekiç kullanılmaktadır. Darbe noktası, kuvvet sadece yatay düzlemde yönlendirildiği zaman sarkaç yayının en alt noktasında meydana gelmektedir. Ağırlık düşürme darbe testinde ise bu durumun aksine numunenin üzerine bir kütle düşürülmekte ve etki bir yük hücreci vasıtasıyla ölçülmektedir. Ayrıca çarpma kuvveti sadece ağırlık düşürme testinde dikey düzlemde yönlendirilmektedir. Dahası, ağırlık düşürme darbe testi, malzeme özellikleri hakkında daha fazla bilgi sunan deformasyonu ölçtüğünden dolayı, sarkaç darbe testlerinden farklılık göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Santos vd. [46] 3B baskı teknolojisi ile üretilen PLA ve PET-G hücresel yapıların düşük hız darbe testi yanıtını deneysel olarak araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, aynı geometriye sahip PLA yapılarla kıyasla PET-G yapıların enerji emmede daha başarılı olduğunu savunmuşlardır. İlave olarak, PET-G malzemenin darbe sönümleme uygulamaları için kullanılabilir bir malzeme çeşidi olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan diğer çalışmalarda da [47, 48], PET-G filamentten üretilen parçaların, yüksek esneme kapasitesi ve iyi mekanik özelliklerinden dolayı darbe sönümleme uygulamalarında PLA malzemenin yerine iyi bir aday olduğu rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada ise, Tezel vd. [49] PET-G, PLA, ABS ve PC gibi çeşitli mühendislik polimerlerini Izod darbe testine tabi tutarak, katman yüksekliği ve üretim oryantasyonunun polimerlerin darbe özelliklerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneyler sonucunda, katman yüksekliğinin başka bir ifadeyle katman kalınlığının artmasıyla numunelerin darbe dayanımını doğrudan etkilediğini ileri

sürmüşlerdir. Açıklayıcı bir örnek vermek gerekirse, PET-G'nin darbe mukavemeti, PC'ye benzer şekilde katman yüksekliğinden etkilenirken, ABS'den daha düşük darbe mukavemeti ve PLA'dan ise daha yüksek darbe mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen kapsamlı literatür taraması sonucunda, EYM ile üretilen PET-G parçaların mekanik performanslarının incelendiği birçok çalışmanın olduğu, ancak, EYM ile üretilen PET-G parçaların darbe davranışlarının incelendiği çalışmaların çok sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Özellikle, test sıcaklığı ve katman yüksekliğinin değişiminin EYM ile üretilen PET-G parçaların darbe özelliklerine etkisini inceleyen detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bağlamda, bu çalışmada farklı katman yüksekliklerine (0,1 mm, 0,2mm, 0,4 mm) sahip 3B baskı ile üretilmiş PET-G parçaların farklı test sıcaklıklarındaki (20°C, 40°C, ve 60°C) darbe yanıtları deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca, 3B baskı ile üretilen farklı katman yüksekliklerine sahip PET-G parçaların çekme dayanımları gerçekleştirilen çekme testleri ile, sertlik değerleri ise Shore D skalasına göre yapılan standartlara uygun sertlik ölçümleri ile belirlenmiştir.

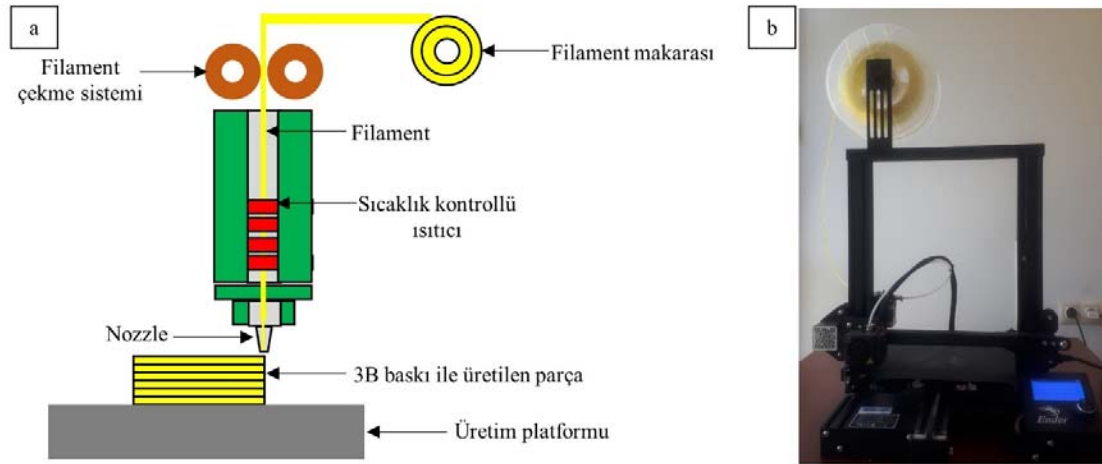
2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

EYM'nin şematik görünümü ve 3B yazıcının gerçek görünümü sırasıyla Şekil 1a ve Şekil 1b'de verilmiştir. Öncelikle, AutoCAD 2020 programında tasarlanan numuneler stl formatında kaydedilmiş ve akabinde Ultimaker Cura 4.4.1 dilimleyici programa aktarılmıştır. Daha sonra, numuneler sanal imalat tablası üzerine yerleştirilmiş ve EYM parametreleri ilgili dilimleyici programda atanmıştır. 3B yazıcı ile üretilecek olan çekme test numuneleri, ağırlık düşürme darbe test

numuneleri ve sertlik ölçüm numuneleri Tablo 1'de detaylı bir şekilde verilen EYM parametreleri ile imal edilmiştir. Tablo 1'de verilen EYM parametreleri ve dilimlenen 3B modelle birlikte, dilimleyici program vasıtasıyla oluşturulan g-kodları USB bellek ile makine boyutu 440x410x465 mm, imalat tabla boyutu 220x220x250 mm ve maksimum hareket hızı 180 mm/s'ye ulaşabilen Creality Ender 3 Pro marka 3B yazıcıya [50] aktarılmıştır. Ayrıca, Tablo 2'de üretici firmadan temin edilen PET-G filamentte ait malzeme özellikleri verilmiş olup, üretim sırasında Microzey marka sarı renkli PET-G filamentler kullanılmıştır. Tablo 2'den de görülebileceği üzere, ilgili filamentler 1,75 mm çapa, 1,29 g/cm³ yoğunluğa, 46 MPa çekme dayanımına, 2100 MPa elastisite modülüne sahip olup, optimum ısıtılmış üretim tabla sıcaklığı 60°C ile 80°C aralığında, filamentin ergime sıcaklığı ise 210°C ile 250°C aralığında olması üretici firma tarafından tavsiye edilmektedir [51]. Şekil 2a ve Şekil 2b'de sırasıyla ASTM D638-14 Tip 4'e göre [52] tasarlanan çekme test numunesi ve EYM ile üretilmiş çekme test numune örnekleri verilmiştir. ASTM D2240-15 standardına göre [53] tasarlanan sertlik test numunesi ve ağırlık düşürme darbe test numunesinin boyutları aynı olup uzunluk ve genişliği 60 mm, yüksekliği ise 20 mm'dir. Şekil 2c'de ilgili numunelerin tasarım, Şekil 2d'de ise EYM ile üretilen numunenin gerçek görüntüsü paylaşılmıştır. PET-G malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla plastik malzemelerin çekme test standardı olan ASTM D638-14 Tip 4'e göre 3B yazıcı ile üretilen beşer adet çekme test numuneleri doluluk oranı %100, katman yüksekliği ise 0,1 mm, 0,2 mm ve 0,4 mm olacak şekilde üç farklı değerde üretilmiştir. Ayrıca, bilindiği üzere, literatürdeki bilgiler 3B baskı ile üretilen parçaların kalitesinin büyük oranda katmanların birbirine yapışma kalitesine bağlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Numunelerin üretimi sırasında kullanılan EYM parametreleri (FDM parameters used during manufacturing of specimens)

| Katman yüksekliği (mm) | Doluluk oranı (%) | Dolgu deseni | Yazdırma hızı (mm/s) | Nozzle sıcaklığı (°C) | İmalat tabla sıcaklığı (°C) | Destek yapı & yapışma türü | Üretim açısı (°) | Kontur sayısı | Dış çevre yol sayısı | Fan hızı (%) |
|------------------------|-------------------|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|---------------|----------------------|--------------|
| 0,1; 0,2; 0,4 | 100 | Çizgi | 50 | 230 | 60 | Yok | 45/-45 | 2 | 2 | 100 |



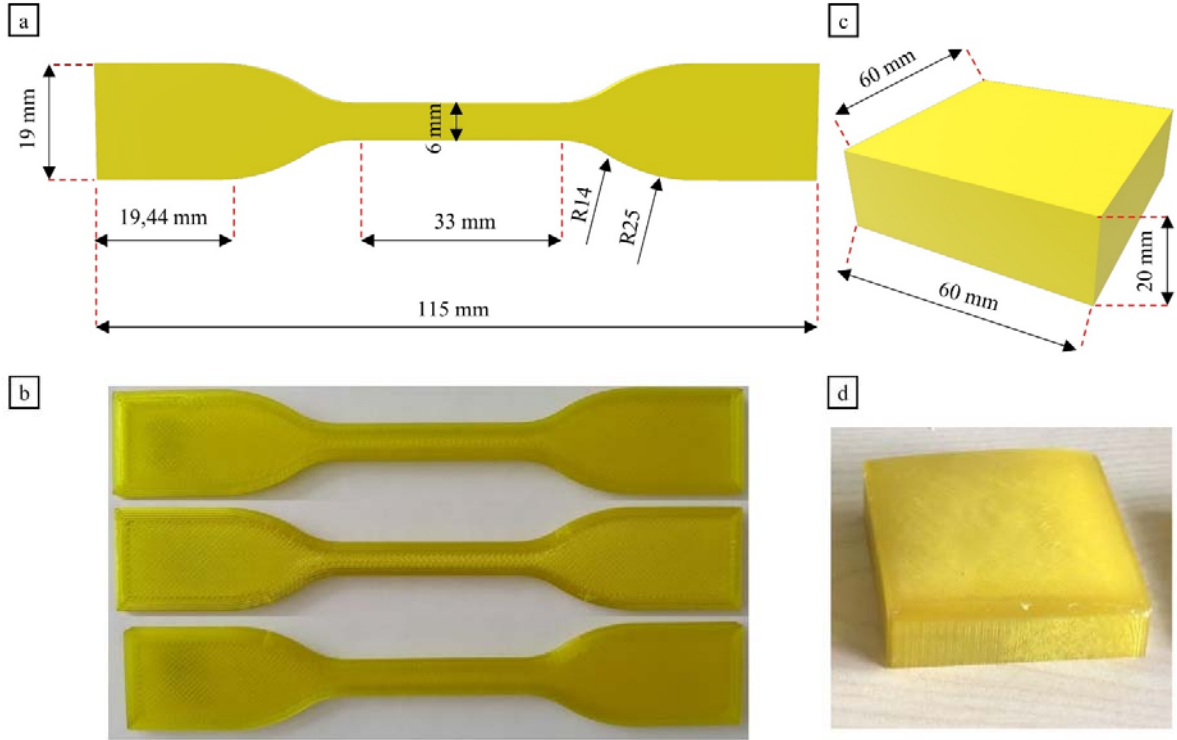
Şekil 1. PET-G ağırlık düşürme darbe, sertlik ve çekme test numunelerinin eklemeli imalat süreci, a) EYM metodunun şematik gösterimi, b) 3B yazıcının gerçek görüntüsü (Additive manufacturing process of PET-G drop-weight impact, hardness and tensile test specimens, a) Schematic view of FDM method, b) Real view of the 3D printer)

Tablo 2. PET-G filamentin malzeme özellikleri (Material properties of PET-G filament)

| Çap (mm) | Yoğunluk (g/cm ³) | Çekme dayanımı (MPa) | Elastisite modülü (MPa) | İmalat tabla sıcaklığı (°C) | Ergime sıcaklığı (°C) |
|----------|-------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1,75 | 1,29 | 46 | 2100 | 60 - 80 | 210 - 250 |

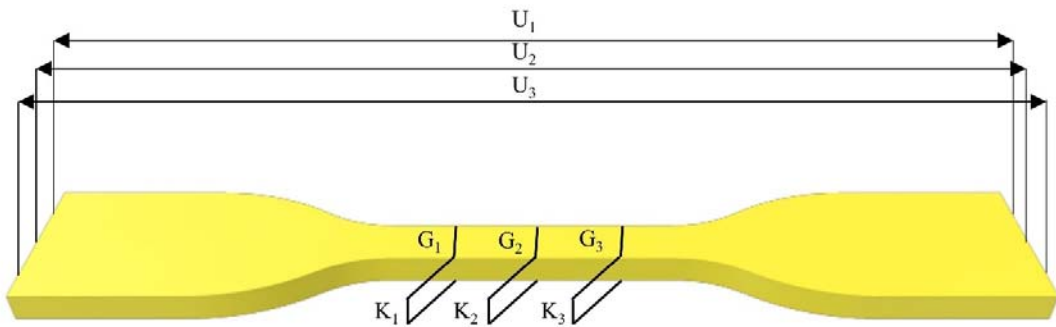
Ek olarak, imalat tabla sıcaklığı da parça kalitesini etkileyen diğer bir önemli unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. İmalat tabla sıcaklığı ile nozzle sıcaklığı arasındaki farkın yüksek olması durumunda yüksek termal gerilmeler ve parçaların köşe bölgelerinden kalkma yaptığı bilinmektedir [54, 55]. Bu nedenlerden dolayı, imalat tabla sıcaklığı üretici firmanın tavsiye ettiği sıcaklık değerleri arasında olan 60°C'ye ısıtılmıştır. Üretim açısı ise katmanlı imalatın doğasından dolayı oluşabilen katmanlar arası mükemmel olmayan yapışma eğilimine bağlı olarak ortaya çıkan problemleri minimize etmek amacıyla 45°/45° olarak tercih edilmiştir [56]. EYM ile üretilen çekme test numuneleri çekme testlerine tabi tutulmadan önce, çekme test numunelerinin boyutsal doğruluğu Şekil 3'te gösterilen ölçümler gerçekleştirilerek tespit edilmiştir. Boyutsal ölçümler sırasında Orion

marka 0,01 mm hassasiyete sahip dijital kumpas kullanılmıştır. Numunelerin boyu (U), genişliği (G) ve kalınlığından (K) üçer adet ölçüm alınmış ve alınan bu ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması imalat sonrası boyut, imalat sonrası boyut ile tasarım boyutu arasındaki doğruluk oranı ise boyutsal doğruluk olarak ifade edilmiştir. Ayrıca, PET-G çekme test numuneleri İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan deplasman kontrollü 50 kN yük hücresi kapasitesine sahip Shimadzu AG-IS marka çekme test cihazı ile 5 mm/dakika hızla çekme testine tabi tutulmuştur. Böylelikle, çekme testleri sırasında ortaya çıkan kuvvet – deplasman verileri Trapezium 2 yazılımıyla kaydedilmiş ve bu veriler gerilme – birim şekil değişimi eğrilerinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Sertlik deney numunelerinin en az 6 mm kalınlığa sahip olması ve numunenin yan



Şekil 2. Test numunelerinin boyutları ile birlikte şematik gösterimi, a) ASTM D638-14 Tip 4'e göre tasarlanan çekme test numunesi, b) EYM ile üretilen çekme test numuneleri, c) Aynı boyutlardaki ağırlık düşürme darbe test numunesi ve ASTM D2240-15'e göre tasarlanan sertlik test numunesi

(Schematic view of the test specimens with dimensions, a) Designed tensile test specimen according to ASTM D638 Type 4, b) Tensile test specimens which are produced with FDM, c) Designed drop weight test specimen and hardness test specimen with same dimension according to ASTM D2240-15, d) Drop weight or hardness test specimen which is produced with FDM)



Şekil 3. EYM ile üretilen test numunelerinin boyutsal doğruluklarını belirlemek amacıyla yapılan ölçümlerin gösterimi (Illustration of the measurements which were conducted to determine the dimensional accuracy of the FDM test specimens)

boyutlarının en az 12 mm ölçüme izin verecek kadar yeterli boyutta olması gerektiği bilinmektedir. Ayrıca, test numunesinin yüzeyleri düz ve test yatağı yüzeyine paralel olmalıdır, böylece baskı ayağı penetrasyon noktasından en az 6 mm yarıçaplı bir alanda numune ile temas edebilir [53]. İlgili ASTM D2240-15 standart koşullarını sağlayabilmesi amacıyla numune boyutları uzunluğu ve genişliği 60 mm, kalınlığı ise 20 mm olarak belirlenmiştir. PET-G numunelerin üretiminden sonra, sertlikleri Zwick-Roell marka sertlik ölçüm cihazı ile ASTM D2240-15 standardına uygun olarak beş farklı noktadan ölçülmüştür.

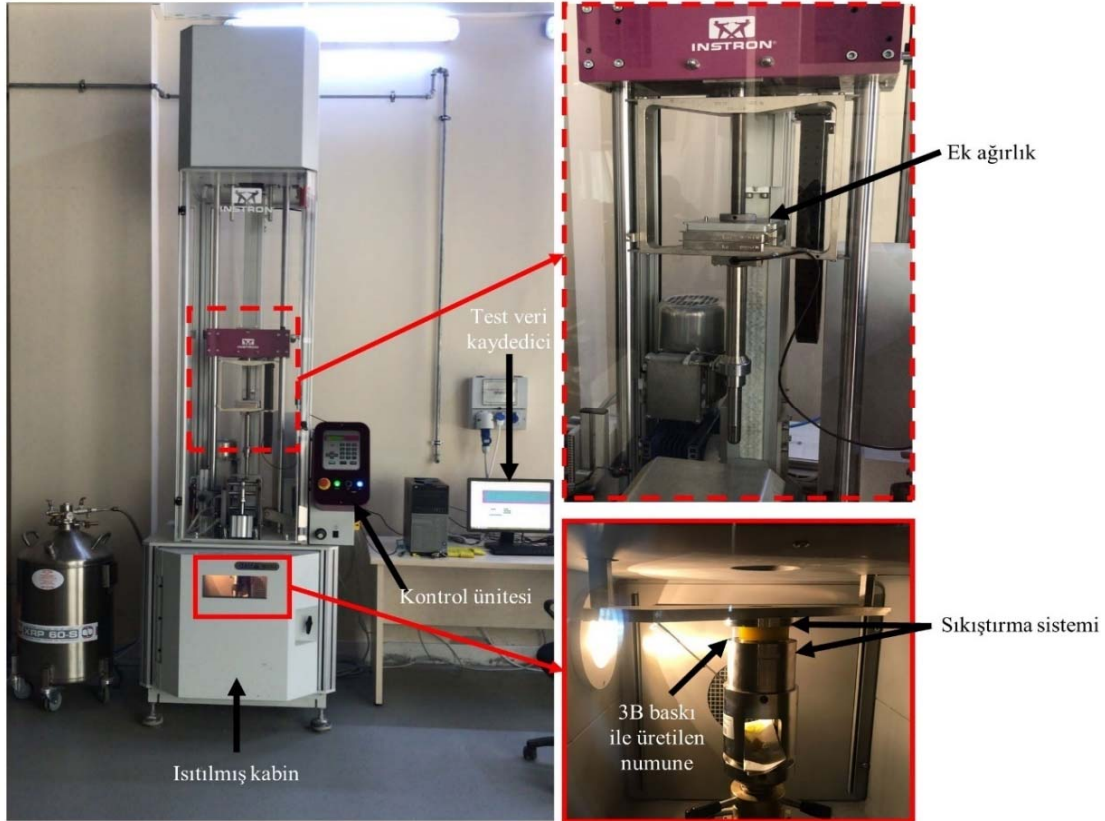
Şekil 4'te ağırlık düşürme darbe test düzeneği verilmiştir. Ağırlık düşürme darbe testleri -70°C ile 150°C aralığında çalışabilen entegre kabine, 90 kN kapasiteli sensöre ve gerinim ölçerli tüpe sahip Instron Ceast 9350 marka düşürme kulesi aracılığıyla yapılmıştır. Ayrıca, Süleyman Demirel Üniversitesi bünyesindeki Yenilikçi Teknolojiler Araştırma ve Uygulama Merkezi (YETEM)'de bulunan ilgili ağırlık düşürme darbe test düzeneği 0,59 J ile 1800 J enerji aralığında, 0,77 m/s ile 24 m/s darbe hızı aralığında, düşme yüksekliği 0,03 m ile 1,10 m aralığında ve son olarak da düşen ağırlık değeri 2 kg ile 70 kg aralığında opsiyonel olarak test yapılabilmektedir. Ek olarak, PET-G numunelerin ağırlık düşürme darbe test parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur. Tüm testler süresince, 4,5 kg'lık bir çelik kütle, 16 mm çapındaki yarım küre şeklindeki çelik çarpma tertibatına eklenmiştir. Son olarak da, 4,43 m/s'lik hız, ilgili kütle için 1 m'lik yüksekliğe

yerleştirilip, o noktadan yer çekimi etkisiyle serbest düşmesi sonucu elde edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. EYM ile Üretilen Numunelerin Boyutsal Doğruluğuna ait Bulgular (Results of Dimensional Accuracy of Specimens Produced by FDM)

EYM ile üretilen çekme test numunelerini üzerinden alınan boyutsal ölçüm sonuçları ve elde edilen boyutsal doğruluk değerleri Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6 sırasıyla numunelerin uzunluk, genişlik ve kalınlık ölçüm değerleri ile birlikte boyutsal doğruluklarını göstermektedir. Numunelerin uzunluk ölçüm değerlerinin paylaşıldığı Tablo 4'e göre, üretilen numunelerin uzunluğundaki boyutsal doğruluk değerlerinin %99,706 ile %99,997 aralığında değiştiği görülmüştür. Öte yandan, numunelerin genişliklerine ait boyutsal ölçüm değerlerinin verildiği Tablo 5 incelendiğinde ise, numunelerin genişliğindeki boyutsal doğruluk değerlerinin %92,833 ile %97,233 arasında değiştiği belirlenmiştir. Tablo 6'da sunulan numunelerin kalınlığındaki boyutsal doğruluk değerlerinin de %95,312 ile %98,937 aralığında değişim göstermektedir. Elde edilen bulgular sayesinde EYM ile üretilen PET-G numunelerin boyutsal doğruluk değerleri ortaya konmuştur. Literatürde gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da, Hanon vd. [57] EYM ile üretilen polimer malzemelerin boyutsal doğruluk değerlerinin yaklaşık %98 bandında olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 4. Ağırlık düşürme darbe test düzeneği (Drop-weight impact test equipment)

Tablo 3. Ağırlık düşürme darbe test parametreleri (Drop-weight impact test parameters)

| Test sıcaklığı (°C) | Darbe hızı (m/s) | Darbe enerjisi (J) | Düşme yüksekliği (m) | Ek ağırlık (kg) |
|---------------------|------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| 20, 40, 60 | 4,43 | 100 | 1 | 4,5 |

Tablo 4. Çekme test numunelerinin uzunluğunun boyutsal doğruluğu
(Dimensional accuracy of the length of the tensile test specimens)

| Numune no | Katman yüksekliği (mm) | Uzunluk ölçümü (mm) | | | U _{ortalama} | U _{tasarım} | Doğruluk (%) |
|-----------|------------------------|---------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| | | U ₁ | U ₂ | U ₃ | | | |
| 1 | 0,1 | 114,95 | 114,93 | 114,91 | 114,930 | | 99,939 |
| 2 | 0,1 | 114,62 | 114,69 | 114,68 | 114,663 | | 99,706 |
| 3 | 0,1 | 115,12 | 115,10 | 115,12 | 115,113 | | 99,901 |
| 4 | 0,1 | 114,87 | 114,89 | 114,78 | 114,846 | | 99,866 |
| 5 | 0,1 | 114,80 | 114,74 | 114,96 | 114,833 | | 99,854 |
| 6 | 0,2 | 114,99 | 115,01 | 115,01 | 115,003 | | 99,997 |
| 7 | 0,2 | 115,03 | 115,02 | 115,01 | 115,02 | | 99,982 |
| 8 | 0,2 | 114,92 | 114,92 | 114,91 | 114,916 | 115 | 99,926 |
| 9 | 0,2 | 114,95 | 114,91 | 114,94 | 114,933 | | 99,941 |
| 10 | 0,2 | 114,96 | 114,90 | 114,92 | 114,926 | | 99,935 |
| 11 | 0,4 | 115,01 | 114,99 | 115,02 | 115,006 | | 99,994 |
| 12 | 0,4 | 115,01 | 114,99 | 114,99 | 114,996 | | 99,996 |
| 13 | 0,4 | 114,89 | 114,92 | 114,91 | 114,906 | | 99,918 |
| 14 | 0,4 | 114,92 | 114,93 | 114,92 | 114,923 | | 99,933 |
| 15 | 0,4 | 114,97 | 114,91 | 114,93 | 114,936 | | 99,944 |

Tablo 5. Çekme test numunelerinin genişliğinin boyutsal doğruluğu
(Dimensional accuracy of the width of the tensile test specimens)

| Numune no | Katman yüksekliği (mm) | Genişlik ölçümü (mm) | | | G _{ortalama} | G _{tasarım} | Doğruluk (%) |
|-----------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| | | G ₁ | G ₂ | G ₃ | | | |
| 1 | 0,1 | 6,23 | 6,16 | 6,23 | 6,206 | | 96,566 |
| 2 | 0,1 | 6,16 | 6,19 | 6,17 | 6,173 | | 97,116 |
| 3 | 0,1 | 6,44 | 6,44 | 6,43 | 6,436 | | 92,733 |
| 4 | 0,1 | 6,32 | 6,24 | 6,27 | 6,276 | | 95,400 |
| 5 | 0,1 | 6,15 | 6,22 | 6,13 | 6,166 | | 97,233 |
| 6 | 0,2 | 6,44 | 6,45 | 6,45 | 6,446 | | 92,566 |
| 7 | 0,2 | 6,34 | 6,33 | 6,32 | 6,330 | | 94,500 |
| 8 | 0,2 | 6,26 | 6,26 | 6,27 | 6,263 | 6 | 95,616 |
| 9 | 0,2 | 6,28 | 6,27 | 6,29 | 6,280 | | 95,333 |
| 10 | 0,2 | 6,27 | 6,23 | 6,24 | 6,246 | | 95,900 |
| 11 | 0,4 | 6,43 | 6,44 | 6,41 | 6,426 | | 92,900 |
| 12 | 0,4 | 6,43 | 6,42 | 6,44 | 6,430 | | 92,833 |
| 13 | 0,4 | 6,33 | 6,30 | 6,32 | 6,316 | | 94,733 |
| 14 | 0,4 | 6,32 | 6,31 | 6,32 | 6,316 | | 94,733 |
| 15 | 0,4 | 6,28 | 6,25 | 6,24 | 6,256 | | 95,733 |

Tablo 6. Çekme test numunelerinin kalınlığının boyutsal doğruluğu
(Dimensional accuracy of the thickness of the tensile test specimens)

| Numune no | Katman yüksekliği (mm) | Kalınlık ölçümü (mm) | | | K _{ortalama} | K _{tasarım} | Doğruluk (%) |
|-----------|------------------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| | | K ₁ | K ₂ | K ₃ | | | |
| 1 | 0,1 | 3,34 | 3,36 | 3,35 | 3,350 | | 95,312 |
| 2 | 0,1 | 3,34 | 3,33 | 3,32 | 3,320 | | 96,250 |
| 3 | 0,1 | 3,31 | 3,31 | 3,31 | 3,310 | | 96,562 |
| 4 | 0,1 | 3,29 | 3,28 | 3,35 | 3,306 | | 96,687 |
| 5 | 0,1 | 3,29 | 3,28 | 3,31 | 3,293 | | 97,093 |
| 6 | 0,2 | 3,14 | 3,14 | 3,18 | 3,153 | | 98,531 |
| 7 | 0,2 | 3,13 | 3,14 | 3,13 | 3,133 | | 97,906 |
| 8 | 0,2 | 3,16 | 3,15 | 3,16 | 3,156 | 3,2 | 98,625 |
| 9 | 0,2 | 3,18 | 3,14 | 3,17 | 3,163 | | 98,843 |
| 10 | 0,2 | 3,19 | 3,15 | 3,16 | 3,166 | | 98,937 |
| 11 | 0,4 | 3,33 | 3,29 | 3,32 | 3,313 | | 96,468 |
| 12 | 0,4 | 3,33 | 3,32 | 3,31 | 3,320 | | 96,250 |
| 13 | 0,4 | 3,35 | 3,36 | 3,33 | 3,346 | | 95,437 |
| 14 | 0,4 | 3,34 | 3,36 | 3,33 | 3,343 | | 95,531 |
| 15 | 0,4 | 3,18 | 3,16 | 3,16 | 3,166 | | 98,937 |

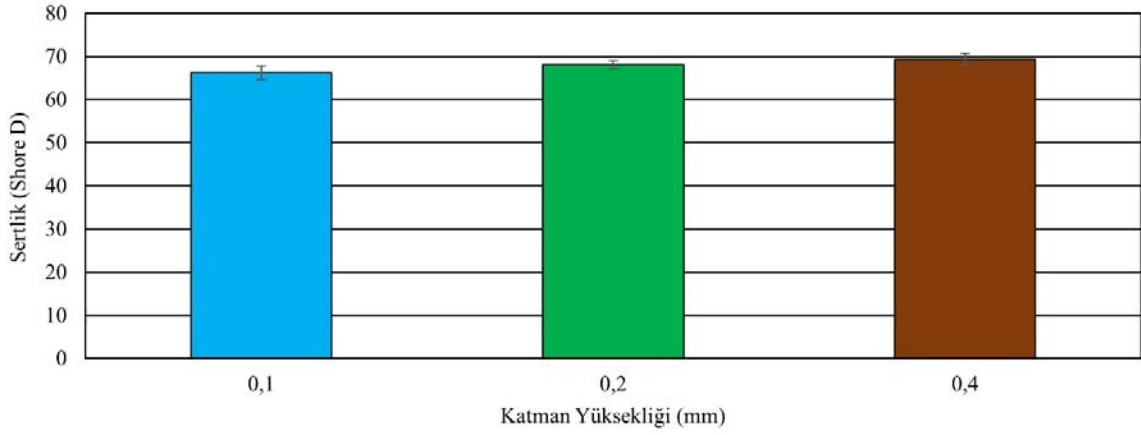
3.2. Sertlik ve Çekme Test Bulguları (Hardness and Tensile Test Results)

ASTM D2240-15 standardına göre yapılan sertlik test sonuçlarına göre, maksimum ortalama sertlik değeri 69,4 Shore D katman yüksekliği (KY) 0,4 mm olan numunede ölçülmüştür. Aksine, minimum ortalama sertlik değeri 66,3 Shore D ise katman yüksekliği 0,1 mm olan numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, 3B baskı ile üretilen numunelerde katman yüksekliğindeki artışın ilgili numunenin sertlik değerlerini de arttırdığı rapor edilebilir (Şekil 5). Benzer bulgular Kumar vd. [41] ve Shubham vd. [44]'nin yaptıkları çalışmalarda da gözlemlenmiştir.

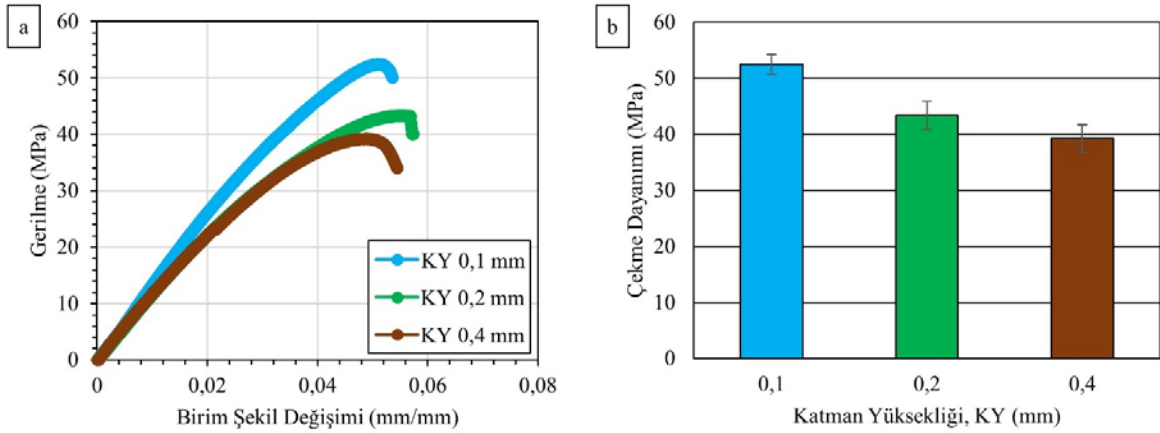
Şekil 6a çekme testine tabi tutulan 3B baskı ile üretilen PET-G çekme test numunelerine ait ortalama gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini göstermektedir. Şekil 6b'de ise, çekme dayanım değerlerinin katman yüksekliğine (KY) bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekil 6b'den de görülebileceği üzere, katman yüksekliği 0,1mm, 0,2 mm ve 0,4 mm iken sırasıyla ortalama çekme dayanım değerleri 52 MPa, 43 MPa ve 39 MPa olarak ölçülmüştür. Katman kalınlık değerlerinin artmasıyla çekme dayanım değerlerinin azalması Srinivasan vd. [33], Durgashyam vd. [36] ve Teraiya vd. [58]'nin gerçekleştirdiği çalışmaların bulguları ile uyum halindedir. Başka bir

çalışmada da Kumar vd. [41] farklı imalat parametreleri kullanarak EYM ile ürettikleri karbon fiber katkılı PET-G numunelerde katman yüksekliği ve doluluk oranının numunelerin çekme dayanımı üzerine olan etkisini incelemişler ve her iki parametrenin çekme dayanım değerlerinde üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bir diğer çalışmada Yadav vd. [59] gerçekleştirdikleri çalışmada 0,05 ile 0,14 aralığındaki katman yükseklikleriyle ürettikleri PET-G numunelerin çekme dayanım değerlerinin, değişen katman yüksekliğine bağlı olarak 36 MPa ile 40 MPa aralığında dalgalanma gösterdiğini dile getirmişlerdir. Özen vd. [60] de farklı standartlardaki çekme test numunelerini çekme testlerine tabi tutarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, EYM ile üretilen PET-G numunelerin çekme dayanım değerlerinin 28 MPa ile 44 MPa aralığında olduğunu rapor etmişlerdir. Literatürdeki başka bir çalışmada da [61], EYM ile üretilen 0,2 mm, 0,25 mm ve 0,30 mm katman yüksekliğine sahip PET-G numuneler çekme testlerine tabi tutulmuş ve artan katman yüksekliği ile birlikte bu çalışma sonuçlarında da görüldüğü üzere numunelerin çekme dayanım değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Nihai olarak, katman yüksekliğinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi, diğer çalışmalarda [28, 33, 38, 39] araştırmacıların EYM parametrelerinden dolgu deseni, doluluk oranı, yapım yönü ve baskı hızının çekme dayanımlarına etkisini ortaya koyduğu şekilde tespit edilmiştir.



Şekil 5. Katman yüksekliğine bağlı olarak numunelerin sertliklerinin değişimi (Variation of the hardness of the specimens depending on layer height)



Şekil 6. EYM ile üretilen PET-G numunelerin çekme test sonuçları, a) Gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, b) Katman yüksekliğine bağlı olarak çekme dayanımlarının değişimi (Tensile test results of the PET-G specimens that were manufactured with FDM, a) Stress-strain curve, b) Variation of the tensile strength depending on layer height)

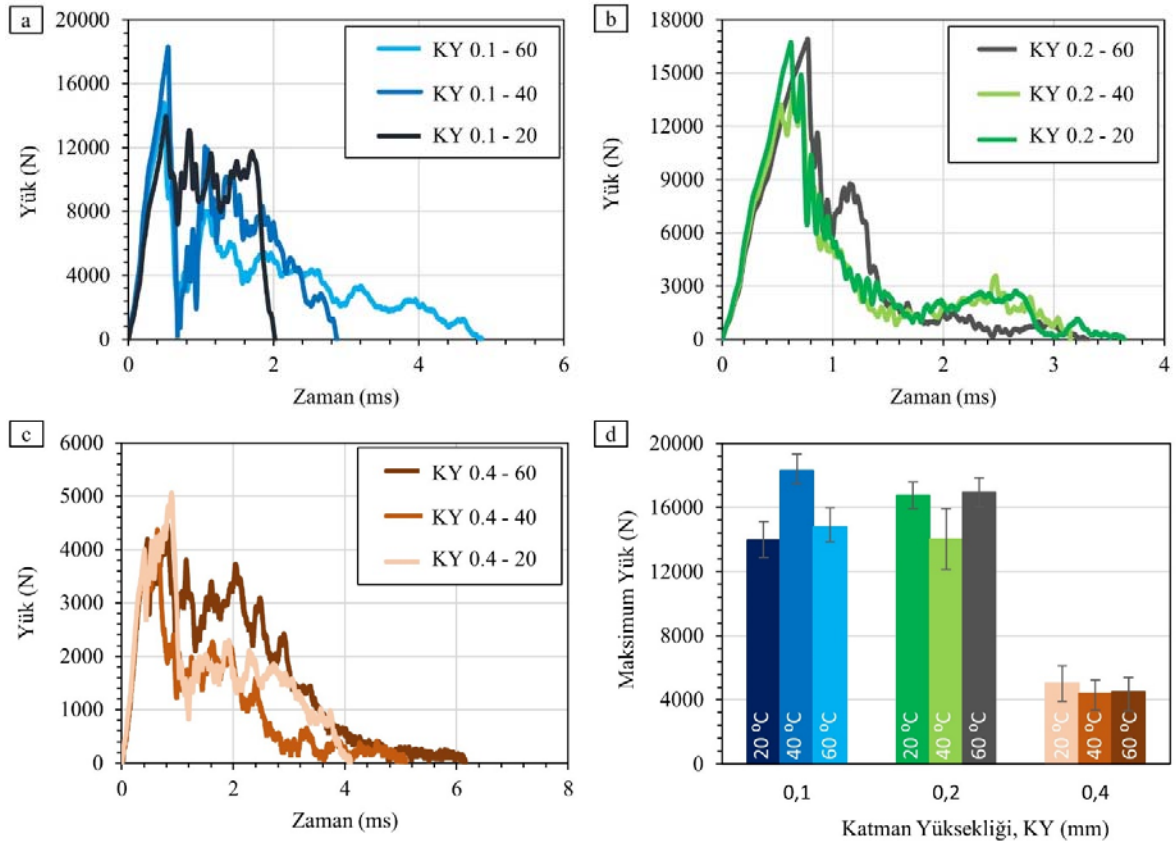
3.3. Ağırlık Düşürme Darbe Test Bulguları (Results of Drop Weight Impact Test)

Enjeksiyon kalıplama ve döküm ile üretilen malzemelere ek olarak, son zamanlarda birçok endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan EYM yöntemi ile üretilen malzemelerin ani yükler altındaki dinamik davranışını anlamak için darbe dayanımlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Eğer üç ana darbe test türü mukayese edilecek olursa, Sarkaç çarpma sistemine dayanan Charpy ve Izod, malzemenin tokluğu ve kırılması için emilen enerji hakkında bilgi vermektedir. Bununla birlikte, ağırlık düşürme sistemine dayalı ağırlık düşürme darbe testi ise, yük dağılımı, maksimum yük ve toplam enerji emilimi açısından daha fazla bilgi sağlamaktadır [62, 63]. Literatürdeki bu bilgiler ışığında, farklı sıcaklık değerlerinde ağırlık düşürme darbe testlerine tabi tutulan PET-G numunelere ait yük-zaman ve enerji-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 7a, Şekil 7b ve Şekil 7c detaylı olarak incelenecek olursa, tüm test sıcaklıkları için testler sırasında oluşan maksimum yüklerin yaklaşık 0,5 mikrosaniyede meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, katman yüksekliği 0,1 mm'den 0,2 mm'ye değiştiğinde maksimum yük değerlerinde önemli bir değişim meydana gelmezken, katman yüksekliği 0,4 mm olduğunda ise maksimum yük değerinde dramatik bir düşüş tespit edilmiştir. Maksimum ortalama yük değeri 18320 N olarak katman yüksekliğinin 0,1 mm ve test sıcaklığının 40°C olduğu durumda ölçülürken, minimum ortalama yük değeri 4380 N ise aynı

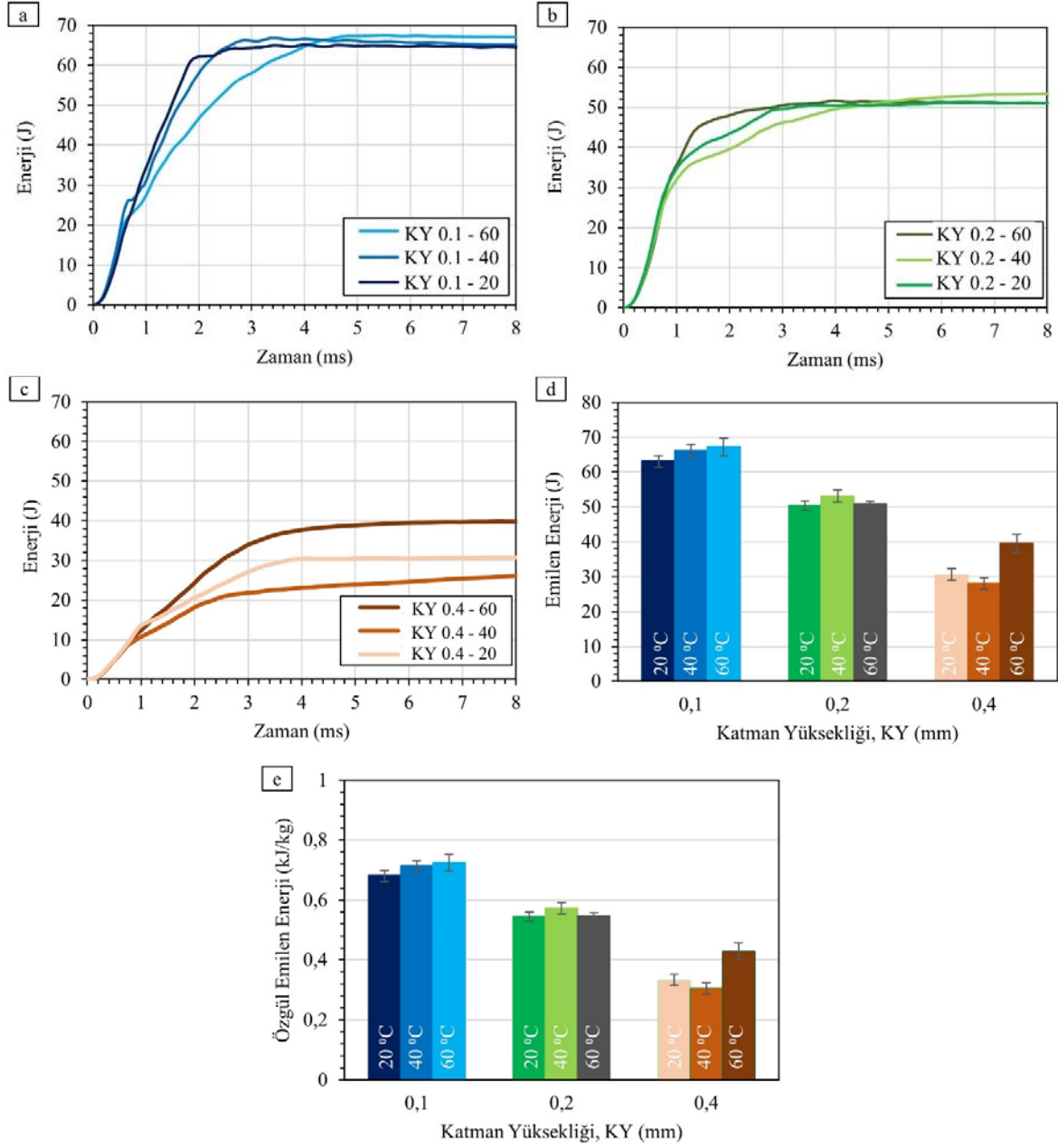
test sıcaklık değerinde (40°C) ve katman yüksekliği 0,4 mm olan numunede meydana gelmiştir. Maksimum ortalama yük değerleri oda sıcaklığında (20°C) en yüksekten en düşüğe doğru sırasıyla katman yüksekliği 0,2 mm, 0,1 ve 0,4 mm olan numunelerde görülmüş olup (Şekil 7d), bu çalışma sonucunda elde edilen bu bulgu, Tezel vd. [49]'nin yapmış olduğu çalışmanın bulguları ile katman yüksekliğinin değişimi ile ortalama yük değerleri açısından uyum içerisindedir. Ayrıca, ağırlığın numuneler üzerindeki temas süresi, katman yüksekliği ve test sıcaklığının artmasıyla artış göstermektedir (Şekil 7a, Şekil 7b ve Şekil 7c).

3B baskı ile üretilen PET-G numunelerin enerji emme kabiliyetleri Şekil 8'de değerlendirilmiştir. Emilen enerji miktarları testler sırasında elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin altında kalan alanlardan hesaplanmıştır. Emilen enerjilerin hesaplanmasında kuvvetin ilk uygulandığı nokta ve kuvvet değerinin sıfıra düştüğü nokta aralığındaki deplasman ve kuvvet değerleri kullanılmıştır. Şekil 8a'ya göre, maksimum enerji katman yüksekliği 0,1 mm olan ve 60°C sıcaklıkta test edilen numune tarafından emilmiştir. Ek olarak, test sıcaklığı 60°C'den sırasıyla 40°C ve 20°C'ye düşürüldüğünde, emilen enerji miktarlarında da %1,53 ve %5,96 düşüş tespit edilmiştir (Şekil 8d). Diğer yandan, 0,2 mm katman yüksekliği için enerji-zaman grafiğini gösteren Şekil 8b, Şekil 8a ile mukayese edilirse, ikisinin de oldukça benzer bir eğilime sahip oldukları görülmektedir. Ancak, katman yüksekliği 0,2 mm olan numunelerin her bir test sıcaklığı için katman yüksekliği 0,1 mm olan numunelere nazaran %20 ile %25



Şekil 7. EYM ile üretilen PET-G numunelerin ağırlık düşürme darbe test sonuçları, a) KY 0,1 mm olan numune için zaman-yük grafiği, b) KY 0,2 mm olan numune için zaman-yük grafiği, c) KY 0,4 mm olan numune için zaman-yük grafiği, d) Değişen KY ve test sıcaklığına göre maksimum yük miktarı grafiği

(Drop-weight impact test results of the PET-G specimens that were manufactured with FDM, a) Time-load graph for the specimen with layer height (LH) of 0,1 mm, b) Time-load graph for the specimen with LH of 0,2 mm, c) Time-load graph for the specimen with LH of 0,4 mm, d) Maximum load graph depending on layer height and test temperature)



Şekil 8. EYM ile üretilen PET-G numunelerin ağırlık düşürme darbe test sonuçları, a) KY 0,1 mm olan numune için zaman-enerji grafiği, b) KY 0,2 mm olan numune için zaman-enerji grafiği, c) KY 0,4 mm olan numune için zaman-enerji grafiği, d) Değişen KY ve test sıcaklığına göre emilen enerji miktarı grafiği, e) Değişen KY ve test sıcaklığına göre özgül emilen enerji miktarı grafiği, (Drop-weight impact test results of the PET-G specimens that were manufactured with FDM, a) Time-energy graph depending on layer height (LH) of 0,1 mm, b) Time-energy graph depending on LH of 0,2 mm, c) Time-energy graph depending on LH of 0,4 mm, d) Absorbed energy graph depending on layer height and test temperature, e) Specific absorbed energy graph depending on layer height and test temperature)

aralığında daha az enerji emdikleri belirlenmiştir. Benzer şekilde, katman yüksekliği 0,4 mm olan numunelerin de katman yüksekliği 0,2 mm olan numunelere göre %22 ile %48 arasında daha az enerji emdiği rapor edilebilir. Şekil 8c'de ise katman yüksekliği 0,4 mm olan PET-G numunelerin enerji-zaman grafikleri verilmiştir.

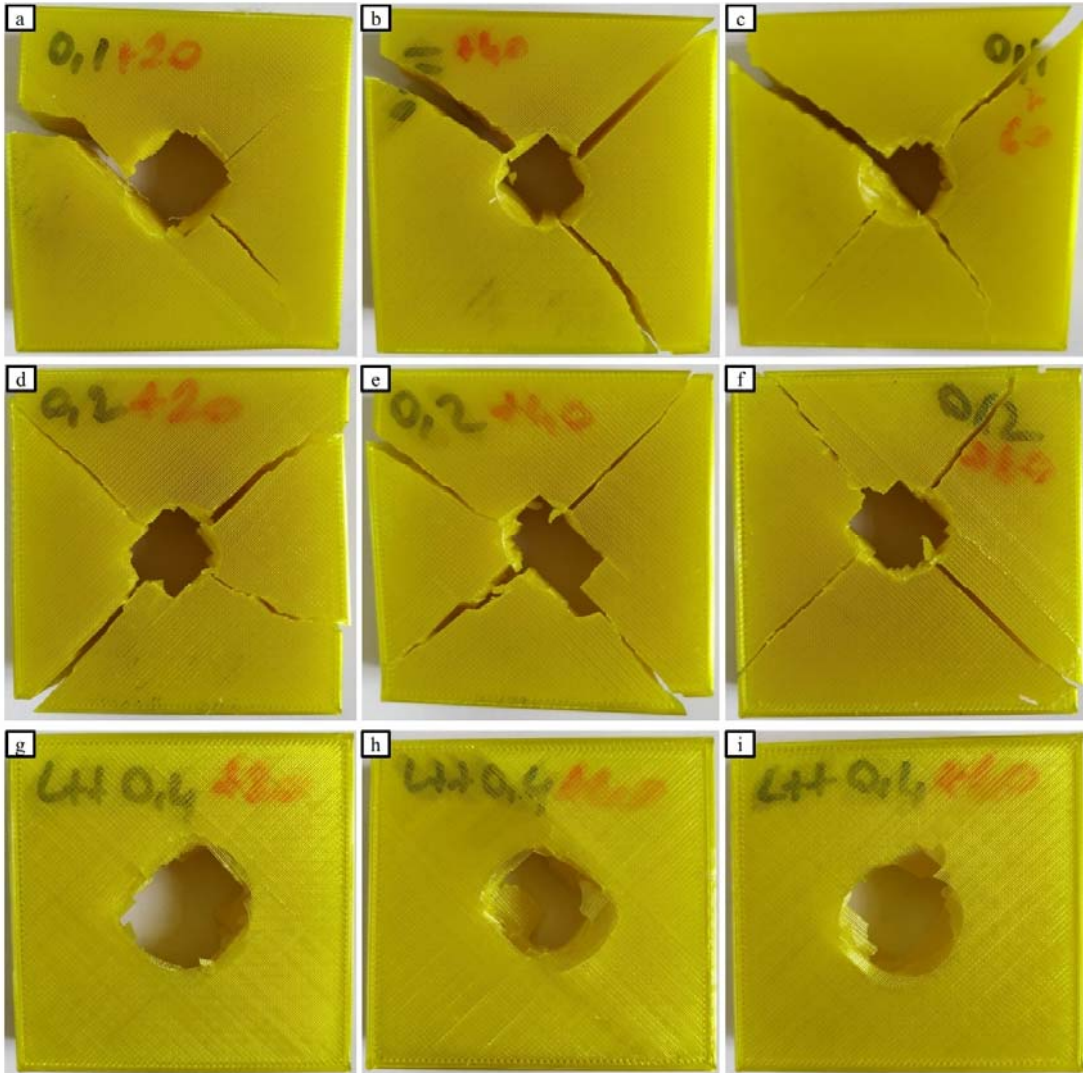
Şekil 8c ve Şekil 8d'ye bakılarak, maksimum ortalama emilen enerji olan 39,52 J'un 60°C test sıcaklığında gerçekleştiği ifade edilebilir. Bunun yanı sıra, katman yüksekliği 0,4 mm olan numunelerin emdiği enerji aralığının diğer katman yüksekliklerine sahip numunelere göre

daha fazla olduğu bir diğer önemli çıkarımdır (Şekil 8c ve Şekil 8d). Sonuç olarak, katman yüksekliği ile emilen enerji arasında direkt bir ilişki görülse de, değişen test sıcaklıkları için emilen enerji değerleri arasında doğrudan bir ilişki tespit edilmemiş olup, numunelerin farklı test sıcaklıklarında emdiği enerjilerin farklılıklar gösterdiği sonucuna varılmıştır. Son olarak Şekil 8e'de ise, emilen enerji değerlerinin, Shimadzu TX-423L model hassas terazi ile ölçülen ilgili parçaların ağırlıklarına bölünmesiyle elde edilen özgül emilen enerji değerlerine ait grafik paylaşılmıştır. Şekil 8e'ye göre, en yüksek özgül emilen enerji 0,73 kJ/kg değeri ile katman yüksekliği 0,1 mm olan ve 60°C'de

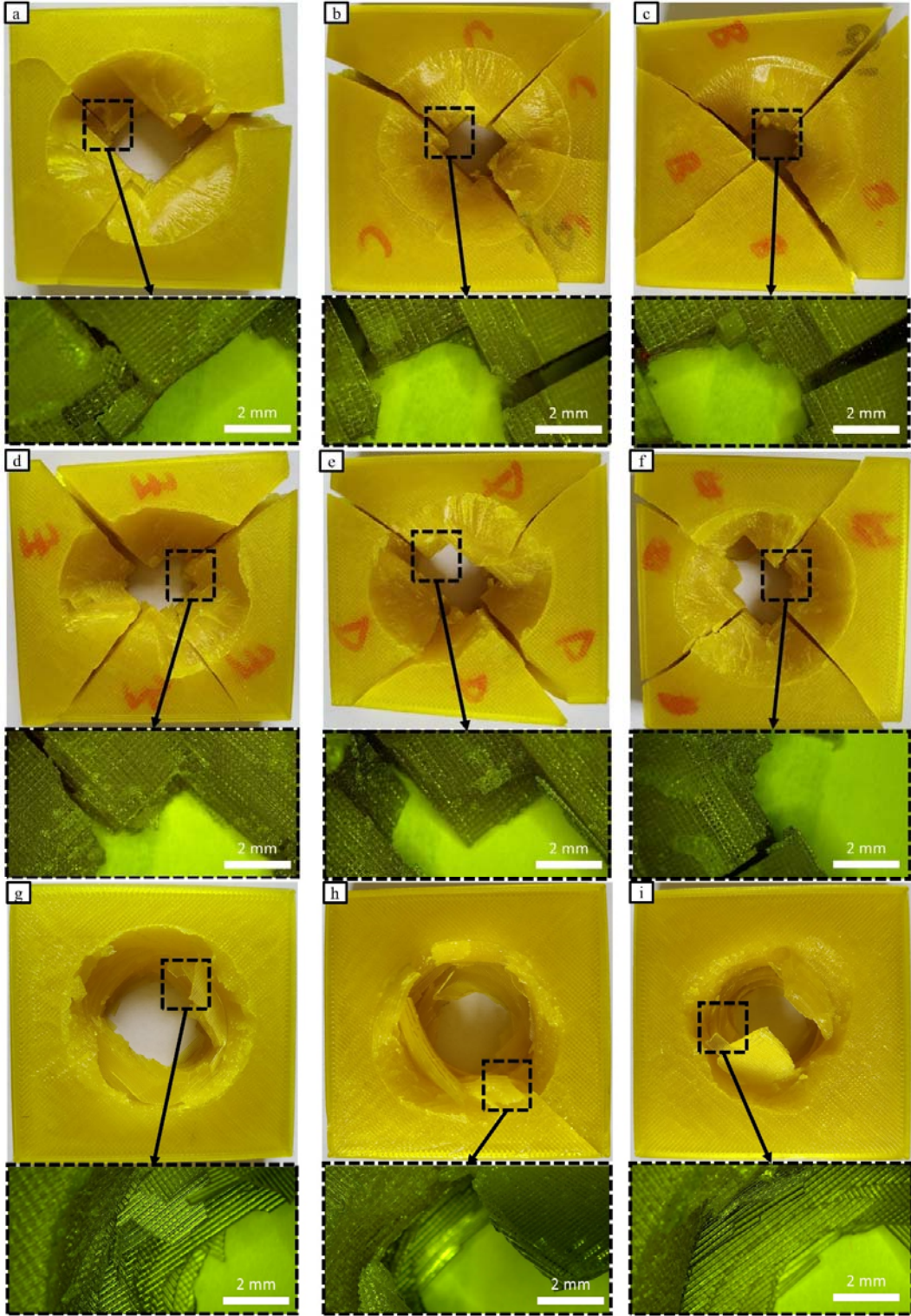
test edilen parçada gözlemlenirken, en düşük özgül emilen enerji ise 0,30 kJ/kg değeri ile katman yüksekliği 0,4 mm olan ve 40°C'de test edilen parçada tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Şimşir vd. [64] taşıt tamponlarında kullanılan, Polipropilen (PP) malzemeden ürettikleri numuneleri 5 m/s'lik hızla ağırlık düşürme darbe testine tabi tutmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlardan görüldüğü üzere, PP malzemeden üretilen parçanın yaklaşık olarak 0,74 kJ/kg özgül enerji emdiği belirlenmiş olup, ilgili sonuç PET-G parçanın emdiği özgül enerji ile mukayese edilebilir seviyededir. Bir diğer çalışmada ise, Wang vd. [65] keten fiber katkılı polimer kompozit parçalarda parça kalınlığının emilen enerji miktarına etkisini araştırmış ve artan parça kalınlığı ile birlikte emilen enerji miktarlarının da artış gösterdiğini rapor etmiştir. Ayrıca, ilgili çalışmanın sonuçlarından anlaşıldığı üzere, kalınlığı 7,66 mm olan parçanın 0,45 kJ/kg ile en fazla özgül enerji emdiği görülmektedir.

Son olarak da, otomobillerin çarpışma kutularının enerji emme kabiliyetlerinde geometrik şekillerinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada [66], cam fiber katkılı polimer çarpışma kutusunun sahip olduğu geometrilere göre 3,46 kJ/kg ile 6,42 kJ/kg aralığında özgül enerji emdiği rapor edilmiştir.

Şekil 9 ve Şekil 10'da sırasıyla farklı sıcaklıklarda test edilen ve farklı katman yüksekliklerine sahip numunelerin ağırlık düşürme darbe testine maruz bırakıldıktan sonraki üst ve alt yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10 kıyaslandığında, Şekil 10'da görülebileceği üzere test edilen numunelerin alt yüzeylerinde daha büyük hasar alanları meydana gelmiştir. Bu nedenle, çatlak ilerlemelerini daha iyi açıklayabilmek için yakın plan çekimler, Nikon SMZ800 model optik mikroskop ve DpxView-Pro yazılımı ile alınan mikroskopik görüntülerle desteklenmiştir.



Şekil 9. Farklı test sıcaklıklarında (TS) ağırlık düşürme darbe testine tabi tutulmuş farklı katman yüksekliklerine (KY) sahip numunelerin üst yüzeylerinin görünümü, a) TS 20°C, KY 0,1 mm, b) TS 40°C, KY 0,1 mm, c) TS 60°C, KY 0,1 mm, d) TS 20°C, KY 0,2 mm, e) TS 40°C, KY 0,2 mm f) TS 60°C, KY 0,2 mm, g) TS 20°C, KY 0,4 mm, h) TS 40°C, KY 0,4 mm, i) TS 60°C, KY 0,4 mm (Top view of the specimens which have different layer height and subjected to drop-weight impact tests at different temperatures, a) Test temperature (TT) of 20°C, layer height (LH) of 0,1 mm, b) TT of 40°C, LH of 0,1 mm, c) TT of 60°C, LH of 0,1 mm, d) TT of 20°C, LH of 0,2 mm, e) TT of 40°C, LH of 0,2 mm f) TT of 60°C, LH of 0,2 mm, g) TT of 20°C, LH of 0,4 mm, h) TT of 40°C, LH of 0,4 mm, i) TT of 60°C, LH of 0,4 mm)



Şekil 10. Farklı test sıcaklıklarında (TS) ağırlık düşürme darbe testine tabi tutulmuş farklı katman yüksekliklerine (KY) sahip numunelerin alt yüzeylerinin görünümü, a) TS 20°C, KY 0,1 mm, b) TS 40°C, KY 0,1 mm, c) TS 60°C, KY 0,1 mm, d) TS 20°C, KY 0,2 mm, e) TS 40°C, KY 0,2 mm f) TS 60°C, KY 0,2 mm, g) TS 20°C, KY 0,4 mm, h) TS 40°C, KY 0,4 mm, i) TS 60°C, KY 0,4 mm (Bottom view of the specimens which have different layer height and subjected to drop-weight impact tests at different temperatures, a) Test temperature (TT) of 20°C, layer height (LH) of 0,1 mm, b) TT of 40°C, LH of 0,1 mm, c) TT of 60°C, LH of 0,1 mm, d) TT of 20°C, LH of 0,2 mm, e) TT of 40°C, LH of 0,2 mm f) TT of 60°C, LH of 0,2 mm, g) TT of 20°C, LH of 0,4 mm, h) TT of 40°C, LH of 0,4 mm, i) TT of 60°C, LH of 0,4 mm)

Şekil 9 detaylı olarak incelendiğinde ise, katman yüksekliği 0,1 mm ve 0,2 mm olan numunelerde test edildikleri tüm sıcaklıklarda devamlı çatlakların meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 9a-f). Öte yandan, katman yüksekliği 0,4 mm olan numunelerin üst yüzeylerinde ise herhangi bir çatlakla rastlanılmamıştır (Şekil 9g-i). Bu durum, Şekil 7 ve Şekil 9'un birlikte değerlendirilmesiyle açıklanabilir. 0,4 mm katman yüksekliğine sahip olan 20°C test sıcaklığında maksimum ortalama yük olarak 5060 N taşıyabilirken, aynı sıcaklıktaki testlerde katman yüksekliği 0,2 mm olan numune 16755 N, katman yüksekliği 0,1 mm olan numune ise 13960 N maksimum ortalama yük taşıdığı görülmektedir (Şekil 7). Sonuç olarak, katman yüksekliği 0,1 mm ve 0,2 mm olan numunelerin katman yüksekliği 0,4 mm olan numunelere göre katman sayısının fazlalığından dolayı daha rijit bir davranış gösterdiği ve darbe sırasında temas eden vurucunun bünyesine girerken daha fazla direnç gösterdiği yorumu yapılabilir. Bir noktadan sonra ise, vurucunun temasıyla birlikte merkezden köşelere doğru uzanan çatlaklar meydana gelmiş ve Kabir vd. [62]'nin 3B baskı ile Naylon 6 filamentten üreterek ağırlık düşürme darbe testine tabi tuttuklarını numunelerde görüldüğü üzere, tam bir hasar durumu bu çalışmada da gözlemlenmiştir.

Yakın çekim görüntüler ve mikroskopik görüntüler Şekil 10'da görüldüğü üzere hasar alanının nasıl oluştuğunu ve çatlak ilerlemelerinde katman yüksekliklerinin etkisini ortaya koymaktadır.

Şekil 10'da katman yüksekliğinin hasar bölgesi oluşumuna etkisi görülmektedir. Anlaşıldığı üzere, vurucu çıkış bölgesinde, giriş bölgesine göre daha büyük bir hasar alanı meydana getirmekte olup, oluşan hasar alanı katman yüksekliğinin artmasıyla birlikte azalmaktadır (Şekil 10a, Şekil 10d ve Şekil 10g). Bu durumdan şu çıkarım yapılabilir: vurucu, numunenin katman yüksekliği daha yüksek olduğunda numuneye daha kolay girebilmekte ve bunun sonucunda numune daha düşük enerji emme potansiyeli sergilemektedir. Ayrıca, katman yüksekliğindeki artışla birlikte, yapı içerisindeki boşluklar artmakta ve katmanların birbiriyle yapışma durumu azalmaktadır. Bilindiği üzere, kırılmanın meydana gelmesi için kritik kırılma tokluk değerinin aşılması gerekmektedir. Camısı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının çok altında olan polimerlerde çoğunlukla sünek kırılma meydana gelirken, camısı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığının üzerinde olan polimerlerde ise genellikle gevrek kırılma oluşmaktadır. PET-G malzemenin camısı geçiş sıcaklığının 75°C-85°C aralığında olduğu düşünüldüğünde, gevrek kırılma gerçekleşmesi beklenmektedir [67-69]. Ek olarak, katman yüksekliği 0,1 mm ve 0,2 mm olan numunelerdeki çatlak ilerleyişi detaylı incelendiğinde (Şekil 10a-f), çatlakların merkezden köşelere doğru köşegen boyunca uzandığı tespit edilmiştir. Son olarak da, farklı test sıcaklıklarında teste tabi tutulan numunelerin mikroskopik görüntüleri incelendiğinde ve birbirleri arasında kıyaslandığında, kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiştir (Şekil 10).

Elde edilen tüm deneysel bulgular neticesinde, katman kalınlığı ve test sıcaklık parametrelerinin EYM ile üretilen PET-G parçaların darbe davranışlarına etkisi bu çalışma ile birlikte ortaya konulmuştur. Gelecek çalışmalarda ise aynı parçalar karbon ya da cam fiber katkılı PET-G filamentten ve farklı doluluk oranlarında üretilip deneylere tabi tutularak, fiber katkısının ve doluluk oranının bu parçaların darbe davranışlarına olan etkileri de araştırılabilir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Mühendislik polimerlerinin eriyik yığıma modelleme yöntemiyle üç boyutlu baskısı, endüstrinin birçok alanındaki araştırmacı ve mühendislerin ilgisini çekmektedir. Bu ilginin doğrultusunda, katman yüksekliğinin ve ortam sıcaklığının enerji emilimi üzerindeki etkisinin araştırılmasının önemli ortaya çıkmış ve gerçekleştirilen bu deneysel çalışma ile aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Katman yüksekliğinin artmasıyla birlikte numunelerin sertlik değerleri de artış göstermektedir.
- Sertlik sonuçlarının aksine, artan katman yüksekliği ile birlikte çekme dayanım değerleri ise azalmıştır.
- En yüksek maksimum ortalama yük değeri 18320 N test sıcaklığı 40°C ve katman yüksekliği 0,1 mm olduğu durumda meydana gelirken, en düşük maksimum ortalama yük değeri 4380 N ise aynı test sıcaklığında katman yüksekliği 0,4 mm olan numunede görülmüştür.
- Bütün katman yükseklikleri değerlendirmeye alındığında, test sıcaklığı ile maksimum yük ya da enerji emme değerleri arasında doğrudan bir ilişki tespit edilmemiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde, PET-G numunelerin enerji emme düzeyleri değişkenlik göstermektedir. Öte yandan, test sıcaklığının artmasıyla vurucu ile numune arasındaki temas süresinde genel paralel bir artış eğilimi belirlenmiştir.
- Maksimum ortalama yük değerleri katman yüksekliği 0,4 mm'den 0,2 mm'ye azaldığında, dramatik bir düşüş sergilemektedir.
- Katman yüksekliği 0,2 mm olan numunelerin emdikleri enerji miktarı katman yüksekliği 0,1 mm olan numunelerden %20 ile %25 aralığında daha düşükken, katman yüksekliği 0,4 mm olan numunelere göre ise %22 ile %48 aralığında daha fazladır.
- Makroskopik ve mikroskopik görüntüler incelendiğinde, katman yüksekliği 0,4 mm olan numunelerde çatlak görülmezken, katman yüksekliği 0,1 mm ve 0,2 mm olan numunelerde ise merkezden köşelere doğru uzanan çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Maurya N.K., Rastogi V., Singh P., Feasibility analysis of manufacturing using rapid prototyping: A review, *Materialstoday: Proceedings*, 47 (13), 3711-3715, 2021.
2. Pugliese R., Beltrami B., Regondi S., Lunetta C., Polymeric biomaterials for 3D printing in medicine: An overview, *Annals of 3D Printed Medicine*, 2, 100011, 2021.
3. Liu W., Song H., Wang Z., Wang J., Huang C., Improving mechanical performance of fused deposition modeling lattice structures by a snap-fitting method, *Materials & Design*, 181, 108065, 2019.
4. Habib F.N., Iovenitti P., Masood S.H., Nikzad M., Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology, 155, 86-98, 2018.
5. Ergene B., Yalçın B., Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced by fused deposition modeling (FDM) method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 201-217, 2023.
6. Kas M., Yılmaz O., Radially graded porous structure design for laser powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 296, 117186, 2021.
7. Yaman U., Fabrication of topologically optimized parts via direct 3D printing, *Gazi University Journal of Science Part C*, 7 (1), 236-244, 2019.
8. Jafferson J.M., Chatterjee D., A review on polymeric materials in additive manufacturing, *Materialstoday: Proceedings*, 46 (2), 1349-1365, 2021.
9. Nichols M.R., How does the automotive industry benefit from 3D metal printing?, *Metal Powder Report*, 74 (5), 257-258, 2019.
10. Mohanavel V., Ali K.S.A., Ranganathan K., Jeffrey J.A., Ravikumar M.M., Rajkumar S., The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector, *Materials Today: Proceedings*, 47, 405-409, 2021.
11. Ergene B., Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (1), 469-484, 2022.
12. Ergene B., Sekeroglu İ., Bolat Ç., Yalçın B., An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15 (2), 8169-8177, 2021.
13. Chan S.S.L., Pennings R.M., Edwards L., Franks G.V., 3D printing of clay for decorative architectural applications: Effect of solids volume

- fraction on rheology and printability, *Additive Manufacturing*, 35, 101335, 2020.
14. Ingrole A., Aguirre T.G., Fuller L., Donahue S.W., Bioinspired energy absorbing material designs using additive manufacturing, 119, 104518, 2021.
 15. Tsushima N., Tamayama M., Arizona H., Makihara K., Geometrically nonlinear aeroelastic characteristics of highly flexible wing fabricated by additive manufacturing, *Aerospace Science and Technology*, 117, 106923, 2021.
 16. Petersmann S., Spoerk M., Steene W.V.D., Üçal M., Wiener J., Pinter G., Arbeiter F., Mechanical properties of polymeric implant materials produced by extrusion-based additive manufacturing, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 104, 103611, 2020.
 17. Ziolkowska P.S., Labowska M.B., Detyna J., Michalak I., Gruber P., A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40 (2), 624-638, 2020.
 18. Borandeh S., Bochove B.V., Teotia A., Seppala J., Polymeric drug delivery systems by additive manufacturing, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 173, 349-373, 2021.
 19. Tianying H., Shengfu Y., Anguo H., Guozhi Y., Path planning and forming of large multi-arc additive collaborative manufacture for marine propeller bracket, 68, 1191-1201, 2021.
 20. Pajonk A., Prieto A., Blum U., Knaack U., Multi-material additive manufacturing in architecture and construction: A review, *Journal of Building Engineering*, 45, 103603, 2022.
 21. Zhang F., Wei M., Viswanathan V.V., Swart B., Shao Y., Wu G., Zhou C., 3D printing technologies for electrochemical energy storage, *Nano Energy*, 40, 418-431, 2017.
 22. Awasthi P., Banerjee S.S., Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: challenges and opportunities, *Additive Manufacturing*, 46, 102177, 2021.
 23. Ergene, B. Experimental research on mechanical behaviors of additively manufactured cellular structures from titanium and polymer based materials, PhD Thesis, Mechanical Engineering Department, Isparta University of Applied Sciences, Isparta-Turkey, 2020.
 24. Li C., Shi X.J., Tuo X.H., Gong Y.M., Guo J., Study on the Relationship between the Bonding Surface and Mechanical Properties of PLA/Epoxy Laminated Composites, *International Polymer Processing*, 36 (4), 410-416, 2021.
 25. Kallel A., Koutiri I., Babaeitorkamani E., Khavandi A., Tamizifar M., Shirinbayan M., Tcharkhtci A., Study of Bonding Formation between the Filaments of PLA in FFF Process, *International Polymer Processing*, 34 (4), 434-444, 2019.
 26. Vicent A.C., Tambuwala M.M., Hassan S.S., Barh D., Aljabali A.A.A., Birkett M., Arjunan A., Aroca A.S., Fused deposition modelling: Current status, methodology, applications and future prospects, *Additive Manufacturing*, 47, 102378, 2021.
 27. Subbarao C.V., Reddy Y.S., Inturi V., Reddy M.I., Dynamic mechanical analysis of 3D printed PETG material, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 1057, 012031, 2021.
 28. Kovacova M., Kozakovicova J., Prochazka M., Janigova I., Vysopal M., Cernickova I., Krajovic J., Spitalský Z., Novel hybrid PETG composites for 3D printing, *Appl. Sci.* 10, 3062, 2020.
 29. Gordeev E.G., Degtyareva E.S., Ananikov V.P., Zelinsky N.D., Analysis of 3D Printing Possibilities for the Development of Practical Applications in Synthetic Organic Chemistry, *Russian Chemical Bulletin*, 65, 1637-1643, 2016.
 30. Haffner M., Quinn A., Hsieh T.Y., Strong E.B., Steele T., Optimization of 3D print material for the recreation of patient-specific temporal bone models, *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, 127, 338-343, 2018.
 31. Capel A.J., Rimington R.P., Lewis M.P., Christie S.D.R., 3D printing for chemical, pharmaceutical and biological applications, *Nat. Rev. Chem.*, 2, 422-436, 2018.
 32. Redaelli D.F., Abbate V., Storm F.A., Ronca A., Sorrentino A., Capitani C.D., Biffi E., Ambrosio L., Colombo G., Frascini P., 3D printing orthopedic scoliosis braces: a test comparing FDM with thermoforming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 111, 1707-1720, 2020.
 33. Srinivasan R., Prathap P., Raj A., Kannan S.A., Deepak V., Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts, *Materialstoday: Proceedings*, 27 (2), 1877-1883, 2020.
 34. Singh D., Reddy A.R., Arjula S., Characterization of Additive Manufactured PETG and Carbon Fiber-PETG, *Int., J. Res. Appl. Manag.*, 4 (2), 152-156, 2018.
 35. Yadav D., Chhabra D., Garg R.K., Ahlawat A., Phogat A., Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network, *Materialstoday: Proceedings*, 21 (3), 1583-1591, 2020.
 36. Durgashyam K., Reddy M.I., Balakrishna A., Satyanarayana, K., Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method, *Materialstoday: Proceedings*, 18 (6), 2052-2059, 2019.
 37. Szykiedans K., Credo W., Osinski D., Selected mechanical properties of PETG 3-D prints, *Procedia Engineering*, 177, 455-461, 2017.
 38. Srinivasan R., Kumar K.N., Ibrahim A.J., Anandu K.V., Gurudhevan R., Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part, *Materialstoday: Proceedings*, 27 (2), 1801-1805, 2020.
 39. Hsueh M.H., Lai C.J., Wang S.H., Zeng Y.S., Hsieh C.H., Pan C.Y., Huang W.C., Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling, *Polymers*, 13 (11), 1758, 2021.
 40. Srinidhi M.S., Soundararajan R., Satishkumar K.S., Suresh S., Enhancing the FDM infill pattern outcomes of mechanical behavior for as-built and annealed PETG and CFPETG composites parts, *Materials Today: Proceedings*, 45, 7208-7212, 2021.
 41. Kumar M.A., Khan M.S., Mishra S.B., Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics, *Materialstoday: Proceedings*, 27 (2), 975-983, 2020.
 42. Kumar K.S., Soundararajan R., Shanthosh G., Saravanakumar P., Rattesh M., Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM, *Materialstoday: Proceedings*, 45, 2186-2191, 2021.
 43. Szust A., Adamski G., Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints, *Engineering Failure Analysis*, 132, 105932, 2022.
 44. Shubham P., Sikidar A., Chand T., The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling, *Key Engineering Materials*, 706, 63-67, 2016.
 45. Hervan S.Z., Altunkaynak A., Parlar Z., Hardness, friction and wear characteristics of 3D-printed PLA polymer, *Journal of Engineering Tribology*, 235, 1590-1598, 2020.
 46. Santos F.A., Rebelo H., Coutinho M., Sutherland L.S., Cismasiu C., Farina I., Fraternali F., Low velocity impact response of 3D printed structures formed by cellular metamaterials and stiffening plates: PLA vs. PETG, *Composite Structures*, 256, 113128, 2021.
 47. Dolzyk G., Jung S., Tensile and fatigue analysis of 3d-printed polyethylene terephthalate glycol, *J Fail Anal Prev.*, 19, 511-518, 2019.
 48. Guessasma S., Belhabib S., Nouri H., Printability and tensile performance of 3d printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling, *Polymers*, 11 (7), 1220, 2019.
 49. Tezel T., Ozenc M., Kovan V., Impact properties of 3D-printed engineering polymers, *Materialstoday: Communications*, 26, 102161, 2021.
 50. Creality Products, https://www.creality.com/goods-detail/ender-3-3d-printer?gclid=Cj0KCCQIAxc6PBhCEARIsAH8Hff2HYmFEgz2bAm2nX4qfPmNysIV_YEczQCcNaK4DC66I0y8qMt8GNh4aAk1nEALw_wcB, 3 January 2022.
 51. Microzey, Microzey PET-G filament özellikleri, <https://www.microzey.com/microzey-sari-pet-g-filament-1-kg-08733161001541885>, 17 March 2022.
 52. ASTM D638-14, Standard test method for tensile properties of plastics. Technical Report. West Conshohocken, PA; 2014.
 53. ASTM International, ASTM D2240-15e1, Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. 2015.
 54. Singh S., Ramakrishna S., Singh R., Material issues in additive manufacturing: a review, *Journal of Manufacturing Process*, 25, 185-200, 2017.
 55. Gurralla P.K., Regalla S.P., Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling, *Virtual Phys Prototyp.*, 9, 141-149, 2014.
 56. Rebelo H.M.B., Development and study of a high-performance protective solution against blast loads, PhD Thesis, UNL-FCT, 2020.

57. Hanon M.M., Zsidai L., Ma Q., Accuracy Investigation of 3D Printed PLA with Various Process Parameters and Different Colors. *Materials Today: Proceedings*, 42 (5), 3089-3096, 2021.
58. Teraiya S., Vyavahare S., Kumar S., Experimental Investigation on Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of PETG Parts Made by Fused Deposition Modelling, *Advances in Manufacturing Process*, 283-293, 2020.
59. Yadav D., Chhabra D., Gupta R.K., Phogat A., Ahlawat A., Modeling and analysis of significant process parameters of FDM 3D printer using ANFIS, *Materialstoday: Proceedings*, 21 (3), 1592-1604, 2020.
60. Özen A., Auhl D., Völlmecke C., Kiendl J., Abali B.E., Optimization of Manufacturing Parameters and Tensile Specimen Geometry for Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Printed PET-G, *Materials*, 14, 2556, 2021.
61. Özen A., Abali B.E., Völlmecke C., Gerstel J., Auhl D., Exploring the Role of Manufacturing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties in Fused Deposition Modelling (FDM) Using PETG, *Applied Composite Materials*, 28, 1799-1828, 2021.
62. Kabir S.M.F., Mathur K., Seyam A.F.M., Impact resistance and failure mechanism of 3D printed continuous fiber-reinforced cellular composites, *The Journal of The Textile Institute*, 112 (5), 752-766, 2020.
63. Ruiz-Herrero J., Rodriguez-Perez M., Saja, J.D., Design and construction of an instrumented falling weight impact tester to characterise polymer-based foams, *Polymer Testing*, 24 (5), 641–647, 2005.
64. Şimşir E., Yavuz İ., Erik M.Ç., Comparison of energies absorbed at different speeds of polymer materials used in vehicle bumpers, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9 (4), 932-942, 2021.
65. Wang W., Chouw N., Jayaraman K., Effect of thickness on the impact resistance of flax fibre-reinforced polymer, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35 (7), 1277-1289.
66. Hussain N.N., Regalla S.P., Rao Y.V., Dirgantara T., Gunawan L., Jusuf A., Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235 (1), 114-130, 2021.
67. Argon A., Fracture of polymers, In *the Physics of Deformation and Fracture of Polymers*, 391-434, Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
68. Awaja F., Zhang S., Tripathi M., Nikiforov A., Pugno N., Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Progress in Materials Science*, 83, 536-573, 2016.
69. Yoon J.D., Cha S.W., Change of glass transition temperature of polymers containing gas, *Polymer Testing*, 20, 287-293, 2001.

