



3 BOYUTLU BASKIDA DOLGU BİÇİMİNİN ÇEKME DAYANIMINA ETKİSİ

Özbil Özmen^{1*}, Hasan Kemal Sürmen², Aziz Sezgin¹

¹İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul, Türkiye
²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, TBMYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknoloji Bölümü, 34500, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Eklemeli İmalat,
Ergiterek Yığıma ile
Modelleme (FDM),
Polilaktik Asit (PLA),
Dolgu Deseni,
Çekme Dayanımı.*

Öz

Bu çalışmada 3B baskı teknolojilerinden biri olan ergiterek yığıma ile modelleme (FDM) üretim teknolojisi ve polilaktik asit (PLA) malzemesi kullanılarak farklı dolgu deseni ve yönüne sahip çekme testi numuneleri üretilmiş ve dolgu deseni ve yönünün çekme dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Beş farklı dolgu deseni (eş merkezli, ızgara, üçgen, 3B altıgen, zik zak) ve üç farklı dolgu desen açısına (0°, 45°, 90°) sahip aynı ağırlıkta 10 adet numune ve bir adet de tam dolu numune FDM teknolojisi ile basılarak toplam 11 adet numune üretilmiştir. Tüm numunelere mekanik çekme testi uygulanmıştır. Mekanik çekme testi sonucunda; ikinci (90° dolgu desen açılı, eş merkezli) ve on birinci (90° dolgu desen açılı, zik zak) numunelerin aynı ağırlıktaki diğer numunelere göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu numunelerin yüksek dayanıma sahip olması, baskı desen yönünün çekme yönüyle bağlantılı olduğunu ve dolayısıyla baskı desen açılarının ve yönlerinin uygulanan kuvvetler doğrultusunda seçilmesinin büyük avantaj sağladığını göstermektedir. Ayrıca %30 doluluk oranındaki ikinci numunenin %100 doluluk oranına sahip birinci numuneye göre özgül dayanımının yaklaşık %25 oranında daha yüksek olduğu çekme testi sonucunda gözlemlenmiştir. Bu çalışma göstermiştir ki 3B baskı prosesinde dolgu tipi ve açısının parçaların çalışma ve yüklenme durumlarına göre planlanmasıyla daha yüksek dayanıma sahip, hafif ve daha az maliyetli tasarımlar elde edilebilir.

THE EFFECT OF INFILL PATTERN IN 3-DIMENSIONAL PRINTING ON TENSILE STRENGTH

Keywords

*Additive Manufacturing,
Fused Deposition Modeling
(FDM),
Polylactic Acid (PLA),
Infill Pattern,
Tensile Strength.*

Abstract

In this study, test specimens with different infill patterns and orientations were manufactured by using one of the 3D printing technologies, Fused Deposition Modeling (FDM) manufacturing technology, and polylactic acid (PLA) material, and the effects of the infill pattern and direction on the tensile strength were investigated. 10 samples of the same weight with five different infill patterns (concentric, grid, triangle, 3D hexagon, zig-zag) and three different infill pattern angles (0°, 45°, 90°) and one solid sample (100% infill) were fabricated with FDM technology. A mechanical tensile test was applied to all specimens. As a result of the mechanical tensile test; it was determined that the second specimen (90° infill pattern angle, concentric) and eleventh specimen (90° fill pattern angle, zig zag) had higher strength than the other specimens with the same weight. It has been seen that the high strength of the concentric specimen is related to the direction of the infill pattern, and therefore the selection of the infill pattern angles and directions in the direction of the applied forces provides a great advantage. In addition, as a result of the tensile test, it was observed that the specific strength of the second specimen with 30% infill was approximately 25% higher than the first specimen with 100% infill. This study has shown that more durable, lighter and low-cost designs can be achieved by planning the infill type and angle for the 3D printing process according to the working and loading conditions.

* İlgili yazar / Corresponding author: ozbil.ozmen@ogr.iuc.edu.tr, +90-507-872-3274

Alıntı / Cite

Özmen, Ö., Sürmen, H.K., Sezgin, A., (2023). 3 Boyutlu Baskıda Dolgu Biçiminin Çekme Dayanımına Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(1), 336-348.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Ö. Özmen, 0000-0001-8813-5097
H.K. Sürmen, 0000-0001-8045-9193
A. Sezgin, 0000-0001-6861-5309

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	30.03. 2022
Revizyon Tarihi / Revision Date	26.09. 2022
Kabul Tarihi / Accepted Date	14.10. 2022
Yayın Tarihi / Published Date	27.03. 2023

THE EFFECT OF INFILL PATTERN IN 3 DIMENSIONAL PRINTING ON TENSILE STRENGTH

Özbil Özmen^{1†}, Hasan Kemal Sürmen², Aziz Sezgin

¹Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 34320, Istanbul/Turkey

²Istanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 34500, Istanbul/Turkey

Highlights

- Tensile tests of 11 3D printed samples with different infill types and infill angles were performed
- Samples with infill patterns of concentric (90°) has the highest specific strength
- Adjusting the infill configuration according to the working conditions provides a great advantage

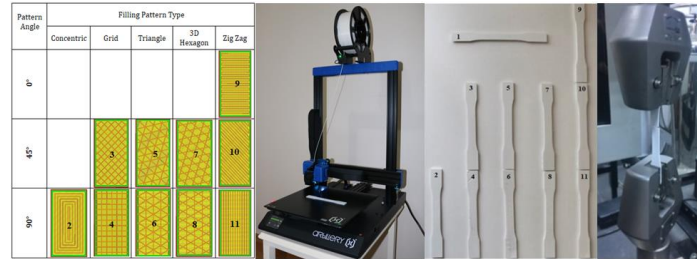
Graphical Abstract

Figure. Steps for investigating the effect of infill pattern in 3D printing

Purpose and Scope

This study aims to investigate the effects of the infill type and direction on the tensile strength of the 3D printing samples and find a relation with the specific strength. Thus, the 3D printing process was evaluated in terms of lightweight and durability.

Design/methodology/approach

10 specimens of the same weight and one fully filled specimen with five different infill patterns (concentric, grid, triangle, 3D hexagon, zig-zag) and three different infill pattern angles (0°, 45°, 90°), a total of 11 specimens were manufactured by printing with FDM technology. Mechanical tensile test was performed for all specimens and results were compared.

Findings

It was found that the second specimen (90° infill pattern angle, concentric) had the highest strength with a maximum tensile stress of 29.85 MPa among the specimens with the same weight. In addition, it was determined that the fifth specimen (45° infill pattern angle, triangular) had the lowest strength with a maximum tensile stress of 19.41 MPa. Approximately, the difference between these two results was greater than 1.5 times. The highest specific strength is the second specimen (concentric, 90°) with 4.98 MPa/g and the lowest specific strength is the fifth specimen (triangle, 45°) with 3.24 MPa/g. Similar results was seen with the comparison of the specific strengths. It was determined that the specific strength of the second specimen with 30% infill was approximately 25% higher than the first specimen with 100% infill.

[†] Corresponding author: ozbil.ozmen@ogr.iuc.edu.tr, +90-507-872-3274

Research limitations/implications

The limited number of specimens can be stated as a limitation of this study. By increasing the number of specimens and test repetitions, the effect of different pattern types and angles on tensile strength can be evaluated in future studies. In this study, each of the samples with different patterns was designed with the same weight to examine the specific strengths. However, the distance between the fillings varied for each pattern. It should be noted that this may affect the results.

Practical implications

In this study, tensile tests of eleven 3D printed samples with different infill types and infill angles were performed. Adjusting the infill configuration according to the working and loading conditions provides a great advantage.

Social Implications

This study has shown that more durable structures can be manufactured with less time and material in the 3D printing process. Therefore, environmental pollution can be reduced and efficient use of time can be achieved.

Originality

In this study, the effects on the strength of 3D printed parts were investigated by considering the infill pattern type, angles and directions.

1. Giriş (Introduction)

Üç boyutlu (3B) baskı günümüzde kullanım alanı hızla artan, tasarım aşamasından imalat aşamasına doğrudan geçişin sağlanabildiği pratik bir imalat yöntemidir (Gibson vd., 2015; Bozkurt vd., 2021). 3B baskı (eklemeli imalat) yöntemi dâhilinde birbirinden farklı yaklaşımlarla imalat yapan birçok teknoloji geliştirilmiştir. Ergiterek yığma ile modelleme (FDM), steryolitografi (SLA), seçmeli lazer sinterleme (SLS), elektron ışınli ergitme (EBM), dijital ışık işleme (DLP), lamine nesne imalatı (LOM) gibi çeşitli 3B imalat yöntemleri otomotiv, havacılık, biyomedikal, tıp, gıda ve eğlence gibi farklı sektörlerde ihtiyaçlara cevap vermektedir (Dizon vd., 2018; Sürmen, 2019). Bu teknolojiler arasında FDM teknolojisi; kullanım kolaylığı, düşük maliyet, çevre dostu olması, çeşitli ve çok sayıda masaüstü tipi yazıcı modelinin olması gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen 3B baskı teknolojisidir (Sürmen, 2019). FDM teknolojisinde parçalar, filament halindeki malzemenin ekstrüder tarafından eritilerek yığılması ile elde edilen katmanların birbiri üzerine eklenmesiyle imal edilirler (Kozior ve Kundera, 2017; Mazurchevici vd., 2020). FDM teknolojisi ile çalışan 3B yazıcılarda yaygın olarak polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat (PC), termoplastik poliüretan (TPU), naylon gibi termoplastik malzemeler kullanılmaktadır (Harshitha ve Rao, 2019; Dey ve Yado, 2019). Polilaktik asit (PLA) filamenti, mısırs nişastası gibi yıllık olarak yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinden dolayı diğer filamentlere göre daha çevre dostudur (Iwata, 2015). PLA filamenti kolay temin edilebilen ve ABS filamentine göre daha az duman ve koku açığa çıkarması sebebiyle de daha çok tercih edilen bir termoplastik malzemedir (Pakkanen vd., 2017).

FDM teknolojisi ile üretilen parçaların özgül dayanımı, maliyeti, üretim süresi gibi özellikleri; dilimleme yazılımında girilen dolgu yoğunluğu, dolgu deseni gibi parametrelerle belirlenebilmektedir (Günay vd., 2020). Dolgu yoğunluğu parçanın iç-yapısındaki boşlukların ne kadar doldurulacağını belirleyen parametredir. Dolgu yoğunluk yüzdesi ne kadar yüksekse parça imalatı o kadar uzun sürer. Dolgu yoğunluk yüzdesi ne kadar düşük ise parça daha hafif olur ve daha kısa sürede üretilir. Dolgu yoğunluğu parçanın mukavemetini de doğrudan etkiler (Yarwindran vd., 2006).

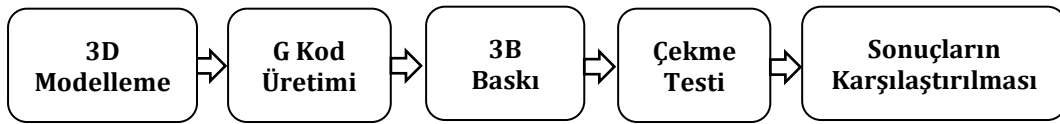
3B baskı teknolojilerinin yaygınlaşması ve bu teknolojilerin fonksiyonel parçaların üretiminde giderek daha çok kullanılması, araştırmacıları dolgu yoğunluğu, dolgu deseni ve dolgu desen yönü gibi parametrelerin üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeye yöneltmiştir. Bacak ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada FDM teknolojisi ile PLA filamentini kullanarak farklı baskı hızı, farklı sıcaklık ve farklı dolgu yoğunluğuyla üretilen numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmişlerdir (Bacak vd., 2021). Hanon ve arkadaşları ise yapmış oldukları çalışmada; FDM teknolojisiyle farklı baskı parametrelerinin kullanarak PLA ve HT-PLA olmak üzere iki farklı malzeme ile üretilen çekme testi numunelerinin mekanik özelliklerini tespit etmişlerdir (Hanon vd., 2021). Cristian ve Laszlo'nun FDM teknolojisi kullanılarak yaptıkları bir diğer çalışmada ise; çeşitli desen tipleri ile ABS malzemesi kullanılarak 3B baskı ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri değerlendirilmiştir (Cristian ve Laszlo, 2017).

Bu çalışmada, FDM 3B baskı teknolojisi ve PLA malzemesi kullanılarak farklı yönlere sahip farklı tipteki dolgu desenlerinin çekme dayanımına etkisi incelenmiştir. Aynı ağırlıktaki farklı dolgu yoğunluklarına, farklı dolgu desenlerine (eş merkezli, izgara, üçgen, 3B altıgen, zik zak) ve farklı dolgu desen açalarına (0°, 45°, 90°) sahip 10 adet numune ile %100 doluluk oranına sahip bir numune 3B yazıcıda basılarak üretilmiştir. Üretilen tüm numunelere mekanik çekme testi uygulanarak çekme gerilmeleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar

karşılaştırılarak dolgu deseni ve dolgu yönünün çekme dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışma ile özellikle yük altında fonksiyonel olarak kullanılmak üzere 3B baskı ile üretilecek parçaların dilimleme yazılımında desen tiplerinin ve yönlerinin daha doğru bir şekilde belirlenebilmesi için önemli bulgular elde edilmiş ve literatüre katkı sağlayacak değerlendirmeler yapılmıştır.

2. Malzeme ve Deneysel Yöntem (Material and Experimental Method)

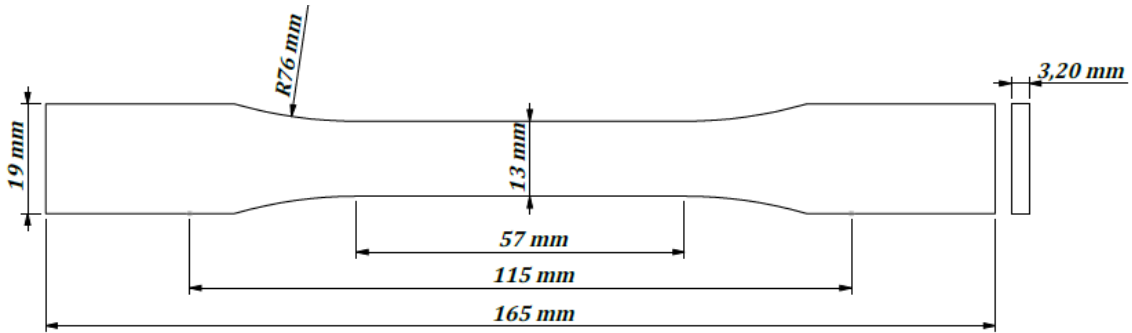
Çekme testi numunelerinin 3B modeli, plastik malzemelerin çekme özelliklerini belirlemek için kullanılan ASTM D638 test yöntemi (ASTM International, 2015) standardına uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan numunenin katı modeli Ultimaker Cura® dilimleme yazılımına aktarılmıştır. Dilimleme programında nozul çapı, katman yüksekliği, duvar kalınlığı, baskı sıcaklığı, levha sıcaklığı, yazdırma sıcaklığı gibi baskı parametreleri tüm numuneler için eşit olup dolgu deseni, dolgu desen açısı ve dolgu yoğunluğu gibi parametreler değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Baskı parametreleri ayarlanan numunelerin G kodları oluşturulmuş ve üretime hazır hale getirilerek 3B yazıcıya aktarılmıştır. FDM teknolojisi ile PLA malzemesini kullanarak 3B yazıcıda 11 adet çekme testi numunesi üretilmiştir. 3B yazıcıda üretilen her bir numuneye mekanik çekme testi uygulanmış ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın süreci Şekil 1'de gösterilen iş akış semasında olduğu gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 1. İş akış şeması (Work flow diagram)

2.1. 3B Modelleme (3D Modeling)

Bu çalışmanın 3B modeli, ayrıntılı ölçüleri Şekil 2'de gösterildiği gibi, ASTM D638 Tip-1 (ASTM International, 2015) standart ölçülerinden yararlanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan numunenin 3B modeli STL formatında dilimleme yazılımına aktarılmıştır.




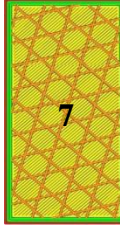


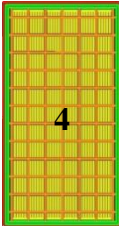
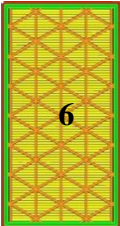




Şekil 2. Çekme testi uygulanan numunelerin geometrik özellikleri ve boyutları
(Geometric properties and dimensions of the specimens subjected to the tensile test)

2.2. G Kod Üretimi (G Code Generation)

Tablo 2'de gösterilen 3B baskı parametreleri Ultimaker Cura® dilimleme yazılımında seçilerek tüm numunelerin baskısında uygulanmıştır. Baskı hızı, katman kalınlığı, duvar kalınlığı, baskı sıcaklığı, tabla sıcaklığı gibi parametreler, numunemizin boyutları dikkate alınarak kullanılan yazıcının baskı özelliklerine, kullanılan malzeme türüne ve kullanılan filament markasına göre belirlenmiştir. Bu çalışmada farklı desen tipleri birbiriyle kıyaslandığı için 3B baskı parametreleri hepsi için sabit alınarak çalışma yürütülmüştür.

Tablo 1. Numune dolgu deseni tipleri (Specimen infill pattern type)

Desen Açısı	Dolgu Deseni Tipi				
	Eş Merkezli	Izgara	Üçgen	3D Altıgen	Zik Zak
0°					
45°					
90°					

Şekil 3'te gösterilen birinci numunenin dolgu yoğunluğu %100 oranında düzenlenmiştir. 3B yazıcıda üretilen diğer 10 numunenin ağırlığı aynı olacak şekilde dolgu yoğunluğu, dolgu deseni ve desen açısı gibi parametreleri dilimleme yazılında değiştirilerek numunelerin baskı özellikleri oluşturulmuştur (Tablo 1).

2.3. 3B Baskı (3D Printing)

G kodları oluşturulan numuneler üretilmek üzere FDM teknolojisi ile çalışan bir 3B yazıcıya (Artillery Sidewinder X2) aktarılmıştır. Filament halindeki PLA malzemesinin ekstrüder tarafından 205°C baskı sıcaklığında eritilerek 55°C'deki levha üzerine yığılmasıyla elde edilen katmanların üst üste eklenmesi sonucunda numuneler elde edilmiştir.

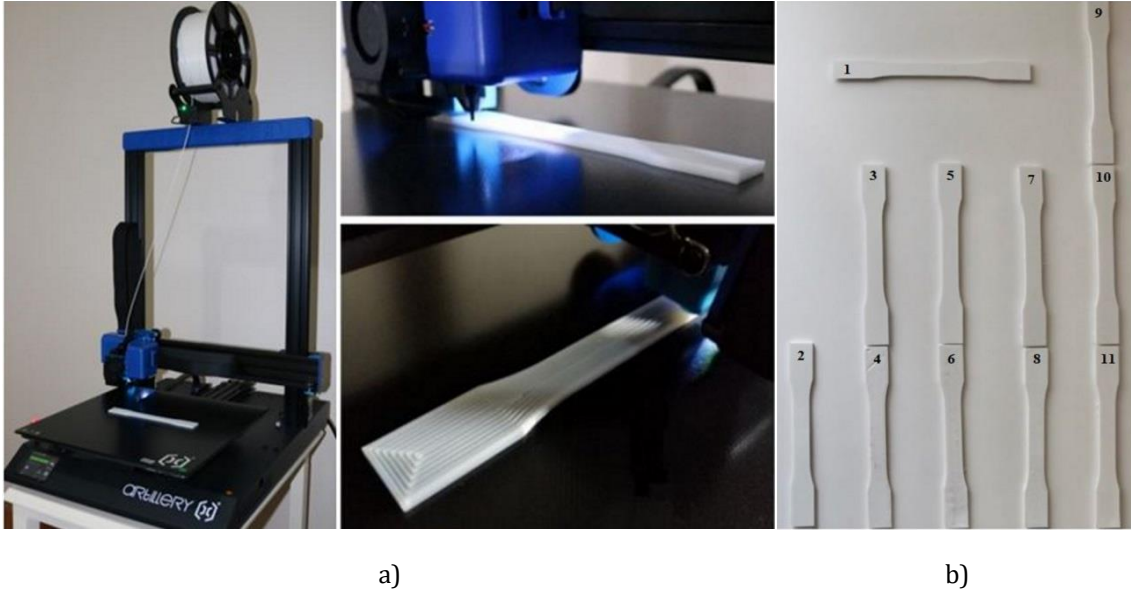
Tüm numuneler mekanik özellikleri Tablo 3'te belirtilen Ultimaker marka polilaktik asit (PLA) filamentini (Ultimaker PLA, 2017) kullanılarak 3B yazıcıda 5 farklı dolgu deseni ve 3 farklı dolgu desen açısıyla Şekil 3'te gösterildiği gibi toplam 11 adet olarak üretilmiştir.

Tablo 2. Numunelerin üretiminde kullanılan 3B baskı parametreleri (3D printing parameters used in the production of specimens)

Ayarlar	Parametreler	Birim	Değer
Kalite	Katman Yüksekliği	mm	0,2
	İlk Katman Yüksekliği	mm	0,3
Duvar	Duvar Kalınlığı	mm	1,2
	Duvar Hattı Genişliği	mm	0,4
Dolgu	Dolgu Şekli		Eş merkezli, Izgara, Üçgen, 3B altıgen, Zik zak
	Dolgu Desen Yönleri	°	0, 45, 90
	Dolgu Katman Kalınlığı	mm	0,2
Nozul	Nozul Ölçüsü	mm	0,4
	Uyumlu Malzeme Çapı	mm	1,75
Malzeme	Filament Tipi		PLA
	Filament Rengi		Beyaz
	Ekllemeli İmalat Teknolojisi		FDM
	Baskı Sıcaklığı	°C	205
	Levha Sıcaklığı	°C	55
Hız	Yazdırma Hızı	mm/s	80
	Dış Duvar Hızı	mm/s	40
	İç Duvar Hızı	mm/s	60
Soğuma	Fan Hızı	%	100

Tablo 3. Çalışmada kullanılan PLA malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Ultimaker PLA, 2017)
(Physical and mechanical properties of PLA material used in the study)

Özellikler	Test Metodu	Değer, Birim
Özgül Ağırlık	ASTM D1505	1,24 g
Germe Katsayısı	ISO 527 (1 mm/min)	2346,5MPa
Akma Çekme Gerilimi	ISO 527 (50mm/min)	49,5 MPa
Kopma Çekme Gerilimi	ISO 527 (50mm/min)	45,6 MPa
Akma Uzaması	ISO 527 (50mm/min)	%3,30
Kopma Uzaması	ISO 527 (50mm/min)	%5,20
Eğilme Mukavemeti	ISO 178	103 MPa
Eğilme Katsayısı	ISO 178	3150 MPa



Şekil 3. a) Numunelerin 3B baskı yöntemi ile üretimi (Production of specimens by 3D printing method), b) Üretilmiş farklı dolgu deseni ve açılara sahip numuneler (Produced specimens with different filling patterns and angles)

2.4. Çekme Testi Deneyi (Tensile Test Experiment)

Mekanik çekme testi, farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, genellikle numunenin kopuncaya kadar gerilmesini kapsamaktadır (Akın, 2006). Çekme testleri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan Şekil 4'te gösterilen INSTRON marka test cihazı kullanılarak yapılmıştır.

3B yazıcıyla PLA filamentini kullanılarak üretilen 11 adet numunenin tamamına oda sıcaklığında 5mm/min hız ile çekme testi uygulanmıştır. Her bir numunenin mekanik çekme testi sonucunda, gerilim-gerinim grafikleri, maksimum çekme gerilmeleri ve % uzama değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 4. Çekme testinin numunelere uygulanışı (Application of the tensile test to specimens)

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Deneysel mekanik çekme testinin sonuçları da Tablo 4'te belirtilmiştir. Tek eksenli çekme testi uygulanan numunelerin ayrıntılı görselleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre; aynı ağırlıktaki 10 numune arasında 29.85 MPa maksimum çekme gerilmesi ile ikinci numunenin (90° dolgu desen açılı, eş merkezli) en yüksek dayanıma sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı ağırlıktaki numuneler arasında 19.41 MPa maksimum çekme gerilmesi ile beşinci numunenin (45° dolgu desen açılı, üçgen) ise en düşük dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4. Mekanik çekme testi sonuçları (Mechanical tensile test results)

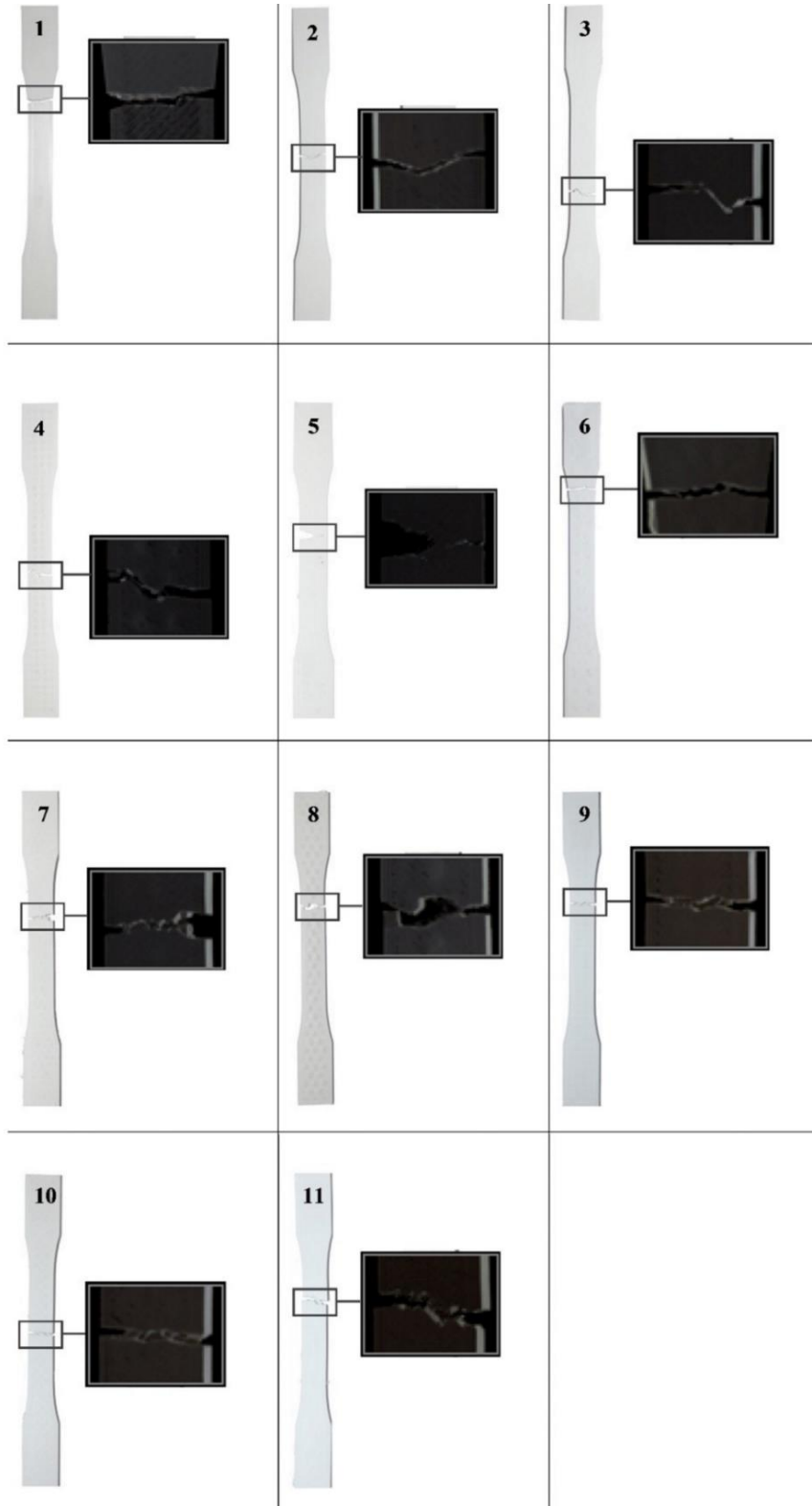
Numune No	Dolgu Deseni	Desen Açısı	Zaman [s]	Uzama [mm]	Uygulanan Yük [N]	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)
1.	Tam Dolgu		29,50	2,45	1489,68	35,81
2.	Eş Merkezli	90°	30,80	2,56	1241,88	29,85
3.	Izgara	45°	29,00	2,41	903,86	21,73
4.	Izgara	90°	28,60	2,38	985,33	23,69
5.	Üçgenler	45°	28,10	2,34	807,51	19,41
6.	Üçgenler	90°	30,10	2,50	1036,01	24,90
7.	Üçlü Altıgen	45°	29,80	2,48	909,59	21,87
8.	Üçlü Altıgen	90°	26,80	2,23	912,19	21,93
9.	Zik Zak	0°	28,40	2,36	886,84	21,32
10.	Zik Zak	45°	30,20	2,51	919,97	22,12
11.	Zik Zak	90°	30,80	2,56	1138,07	27,36

Rismalia ve arkadaşlarının PLA malzemesi ile dolgu deseni ve dolgu yoğunluğunun çekme özelliğine olan etkisini araştırmışlardır (Rismalia vd., 2019). Araştırmacılar dolgu yoğunluğu arttıkça çekme dayanımının arttığını (Bacak vd., 2021; Rismalia vd., 2019) gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada da diğer numunelerle aynı geometrik boyutlarda tam dolu olarak basılan numune diğer numunelerden 1,5 kat daha ağırdır. Bu numuneye yapılan çekme testi sonucunda 35.81 MPa maksimum çekme gerilmesi elde edilmiştir. Ancak özgül dayanım dikkate alındığında ikinci, altıncı ve on birinci numunelerin daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

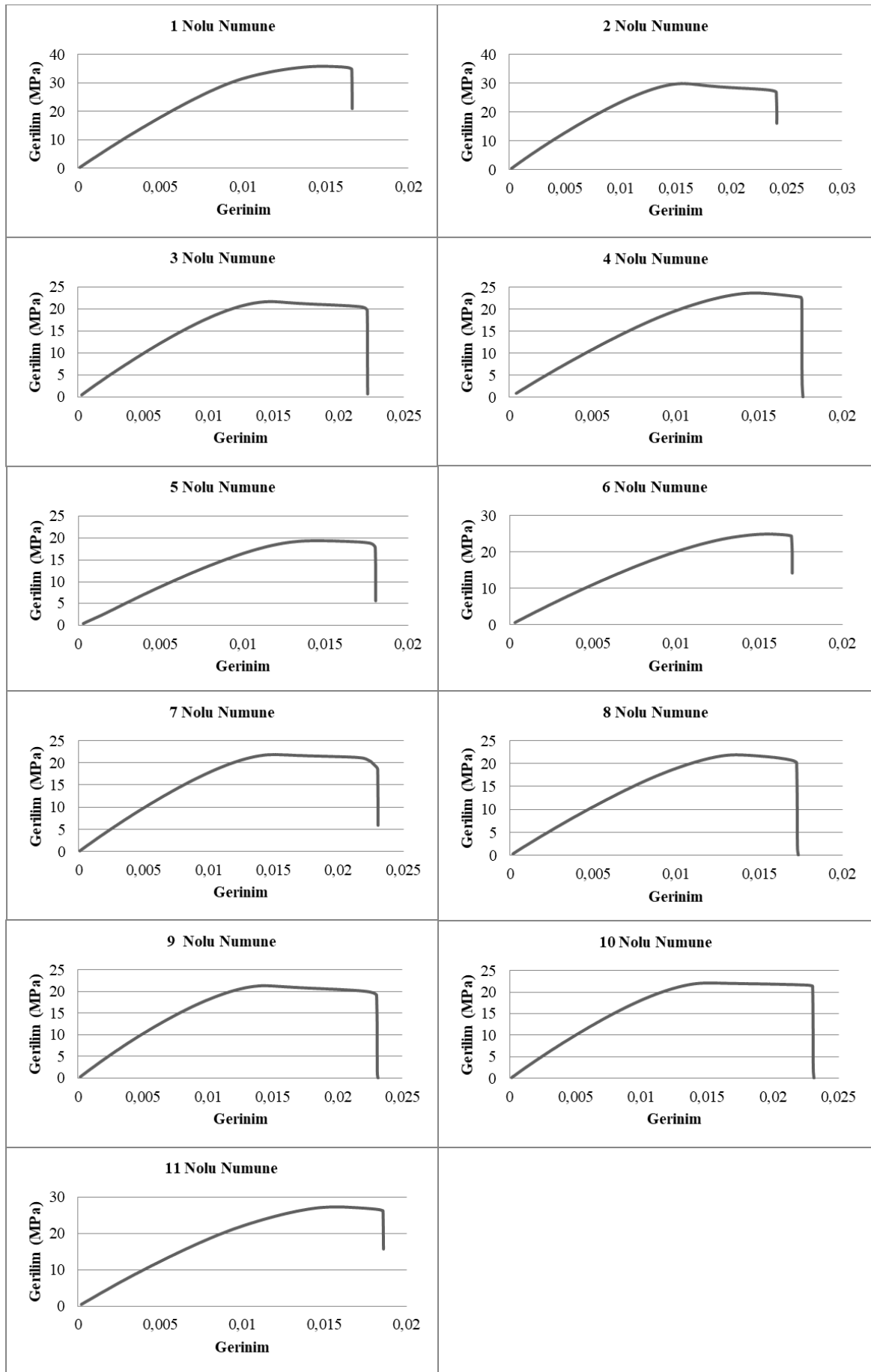
Numuneler arasındaki her bir dolgu desen tipinin desen açıları arasındaki dayanımı ile ilgili ilişkiye bakıldığında; ızgara, üçgen, üçlü altıgen, zik zak dolgu desen tiplerinin 90° desen açısındaki numunelerin 45° desen açısındaki numunelere göre daha dayanıklı olduğu mekanik çekme testi sonuçlarında görülmüştür. 45° dolgu desen açısına sahip numuneler arasındaki dayanım sırası zik zak > üçlü altıgen > ızgara > üçgen dolgu desenleri şeklindedir. 90° dolgu desen açısına sahip numuneler arasındaki dayanım sırası ise; eş merkezli > zik zak > üçgen > ızgara > üçlü altıgen dolgu desenleri şeklindedir.

Şekil 6'da numunelerin gerilim-gerinim grafiğinde, uygulanan yükler karşısındaki akma, çekme, kopma dayanımları, elastik ve plastik şekil değiştirdiği bölgeler gösterilmektedir. Grafikteki verilere ve Tablo 4'teki çekme testi sonuçlarına göre; ikinci numunenin (90° dolgu desen açılı, eş merkezli) ve on birinci numunenin (90° dolgu desen açılı, zik zak) uzama miktarları eşit olup, 2.56 mm uzama ile aynı ağırlıktaki diğer numuneler arasında en yüksek uzamaya sahip oldukları görülmektedir. Aynı ağırlıktaki numuneler arasındaki en az uzamanın 2.23 mm ile sekizinci numuneye (90° dolgu desen açılı, üçlü altıgen) ait olduğu tespit edilmiştir.

Her bir dolgu desen tipinin desen açıları arasındaki uzamayla ilgili ilişkisine bakıldığında, ızgara ve üçlü altıgen dolgu desen tiplerinde 45° dolgu desen açısına sahip numunelerdeki uzamanın 90° dolgu desen açısına sahip numunelerden daha fazla olduğu gözlemlenirken, üçgen dolgu desenine ait numunelerde ise tam tersi uzama durumu gözlemlenmiştir. Zik zak dolgu desen tipinin desen açıları arasındaki uzama sırası 90° > 45° > 0° şeklinde tespit edilmiştir.



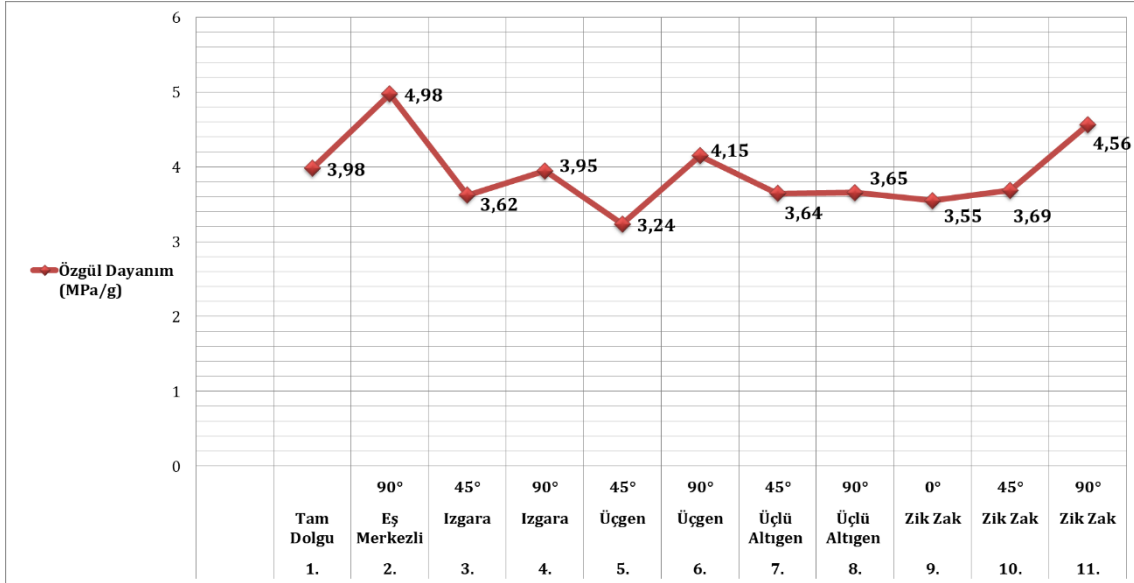
Şekil 5. Tek eksenli çekme testi uygulanmış numuneler (Uniaxial tensile tested specimens)



Şekil 6. Numunelerin gerilim-gerinim grafikleri (Stress-strain plots of specimens)

Özgül dayanım, yoğunluğa göre bölünmüş bir malzemenin gücü anlamına geldiği gibi dayanım-kütle oranı olarak da bilinir. Çalışmadaki numunelerin hacimleri birbirine eşit olduğu için doğrudan kütleler değişkenlik göstermektedir. Özgül dayanım, mühendislikte tasarımının hafif ve dayanıklılığını gösteren bir parametredir. Beş farklı dolgu deseni ve üç farklı dolgu desen açısına sahip aynı ağırlıkta on numune ve bir adet de tam dolu numunenin özgül dayanımları arasındaki farkı göstermek için özgül dayanım ilişkisi incelenmiştir.

Şekil 7'de karşılaştırılan özgül dayanım değerlerine göre; en yüksek özgül dayanımın 4.98 MPa/g ile ikinci numunede (eş merkezli, 90°) olduğu ve en düşük özgül dayanım ise; 3.24 MPa/g ile beşinci numunede (üçgen, 45°) olduğu görülmüştür. Dolgu desen tiplerinin farklı desen açıları arasındaki ilişkisine göre; ızgara ve üçgen dolgu desen tiplerinde 90° desen açısındaki numunelerin 45° desen açısındaki numunelere göre daha yüksek özgül dayanıma sahip olduğu görülürken üçlü altıgen dolgu desenindeki 7. ve 8. numunelerin özgül dayanım değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Zik zak dolgu desenindeki 11, 10 ve 9. numunelerin özgül dayanım ilişkisi ise 90° > 45° > 0° desen açısı şeklindedir.



Şekil 7. Numunelerin özgül dayanımlarının karşılaştırılması (Comparison of specific strengths of specimens)

Bacak ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonucunda tam dolu numuneye en yakın özgül dayanıma sahip numunenin %20 doluluk oranındaki çapraz 3D dolgu desen tipine ait olduğu anlaşılmaktadır (Bacak vd., 2021). Bizim çalışmamızda ise, tam dolu numuneye en yakın özgül dayanıma sahip numunenin %30 doluluk oranındaki 90° ızgara dolgu desen tipindeki numuneye ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca %30 doluluk oranına sahip ikinci numunenin özgül dayanımının tam dolu oranına sahip birinci numuneden yaklaşık %25 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7).

Sonraki çalışmalarda 3B baskı ile üretilmiş farklı geometrik özelliklere sahip parçalar için dayanım açısından en uygun dolgu deseninin belirlenmesi ve böylece parça geometrisine göre dolgu desen tipinin seçimi ile ilgili bir yaklaşım geliştirilebilir.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada; FDM 3B baskı teknolojisi ve PLA malzemesi kullanılarak 3B yazıcıda çekme testi numuneleri üretilmiş, dolgu deseni ve desen yönünün çekme dayanımına olan etkileri incelenmiştir. 3B yazıcıda, farklı dolgu yoğunluklarına sahip, 5 farklı dolgu deseninde (eş merkezli, ızgara, üçgen, 3B altıgen, zik zak) ve 3 farklı dolgu desen açısında (0°, 45°, 90°) aynı ağırlıkta 10 adet numune ve bir adet de tam dolu numune ile birlikte 11 adet numune üretilmiştir. Tüm numunelere mekanik çekme testi uygulanmıştır. Deneysel mekanik çekme testi sonuçlarına göre; ikinci numunenin (90° dolgu desen açılı, eş merkezli) diğer 10 numune ile karşılaştırıldığında 29.85 MPa maksimum çekme gerilmesi ile en yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Aynı ağırlıktaki 10 numune arasında 19.41 MPa maksimum çekme gerilmesi ile dayanımı en düşük olan numunenin ise; beşinci numuneye (45° dolgu desen açılı, üçgen) ait olduğu tespit edilmiştir.

Rismalia ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonucunda PLA filamentinin aynı doluluk oranlarındaki dolgu desen tipleri arasındaki dayanım sırası eş merkezli > ızgara > üçlü altıgen dolgu desenleri şeklindedir (Rismalia vd., 2019). Yaptığımız çalışma sonucunda ise, 90° dolgu desen açısına sahip numuneler arasındaki dayanım sırası; eş

merkezli > zik zak > üçgen > ızgara > üçlü altıgen dolgu desenleri şeklinde olduğu görülmüştür. Çalışmamızda elde edilen sonuçların Rismalia ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada elde edilen sonuçlarla örtüştüğü anlaşılmaktadır. İkinci numunenin (90° dolgu desen açılı, eş merkezli) ve on birinci numunenin (90° dolgu desen açılı, zik zak) dayanımlarının yüksek olması baskı desen yönünün çekme yönüyle bağlantılı olduğu ve dolayısıyla baskı sırasında baskı desen açılarının ve yönlerinin uygulanan kuvvetler doğrultusunda seçilmesinin büyük avantaj sağladığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, dolgu deseni ve yönünün çekme dayanımına olan etkisi incelendiğinde 3B baskı ile üretilen parçaların anizotropik bir özellik gösterdiği söylenebilir. Bacak ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonucunda %20 doluluk oranındaki ızgara dolgu desen tipindeki numunenin tam dolu numuneye göre özgül dayanımının yaklaşık %9,77 oranında daha düşük olduğu anlaşılmaktadır (Bacak vd., 2021). Yaptığımız çalışma sonucunda ise; 45° dolgu desen açılı ızgara dolgu deseni tipindeki numunenin tam dolu numuneye göre özgül dayanımı %9,05 oranında daha düşük olduğu tespit edilerek, ızgara dolgu deseninin tam dolu numuneye göre özgül dayanımı arasındaki birbiriyle örtüşen yakın bir ilişkisi tespit edilmiştir.

Çekme testleri sonucunda %30 doluluk oranına sahip ikinci numunenin (eş merkezli) özgül dayanımının %100 doluluk oranına sahip birinci numuneye göre yaklaşık %25 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, dayanım-ağırlık ilişkisi dikkate alındığında 3B baskı metodu ile üretilen parçaların tasarımı yapılırken desen yönünün çekme kuvvetinin uygulandığı yöne göre belirlenmesinin daha düşük doluluk oranları ile daha az malzeme kullanarak hafif ve dayanıklı fonksiyonel parçaların üretilebileceğini göstermektedir. Bu çalışma ile eklemeli imalat kullanılarak üretilen parçalarda iç dolgu desen tipi ve yönünün doğru bir şekilde planlanmasının parçaların dayanımına etkileri daha iyi anlaşılmıştır.

Çalışmada 3B baskıda dolgu biçiminin çekme dayanımına etkisi; 0°, 45° ve 90° açılı eş merkezli, ızgara, üçgen, 3B altıgen, zik zak olmak üzere 5 farklı desen tipi, 11 numune kullanılarak araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Numune sayısının sınırlı olması bu çalışmanın bir kısıtı olarak belirtilebilir. Numune sayısı ve test tekrar sayısı artırılarak farklı desen tipleri ve açılarının çekme dayanımına etkisi ilerleyen çalışmalarda detaylandırılarak değerlendirilebilir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Agencies of the U.S. Department of Defense, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, Designation: D638 – 14, 2015.
- Akın E., The Investigation of Notched Tensile Test with Finite element method, Master Thesis, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2006.
- Bacak S, Özkavak H. V., Sofu M. M., Comparison of Mechanical Properties of 3D-Printed Specimens Manufactured Via FDM with Various Inner Geometries. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(2), 1444-1454, 2021.
- Bozkurt Y., Gülsoy H. Ö., Karayel E., The Use of Additive Manufacturing Technologies in the Production of Medical Equipment, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8 (2), 962-980, 2021.
- Cristian D., Laszlo R., Effects of Raster Orientation, Infill Rate and Infill Pattern on the Mechanical Properties of 3B Printed Materials, *Acta Universitatis Cibiniensis – Technical Series*, 23-29, 2017.
- Dey A., Yodo N; A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics: Review, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019.
- Dizon J. R. C., Espera, A. H., Chen Q., Advincula R. C., Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers, *Additive Manufacturing*, 20, 44-67, 2018.
- Gibson L., Rosen D., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed., Springer, New York, 1-2, 2015.
- Günay M., Gündüz S., Yılmaz H., Yaşar N., Kaçar R., Optimization of 3D Printing Operation Parameters for Tensile Strength in PLA Based Specimen, *Journal of Polytechnic*, 23(1), 73-79, 2020.
- Hanon M. M., Marczis R., Zsidai L., Influence of the 3B Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(1), 38-46, 2021.
- Harshitha, V., Rao, S. S., Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3B printer using PLA and ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, 19(2), 583-588, 2019.
- Iwata T., *Biodegradable and Bio-Based Polymers: Future Prospects of Eco-Friendly Plastics*, *Sustainable Chemistry*, 3210-3215, 2015.
- Kozior, T., Kundera, C., Evaluation of the influence of parameters of FDM technology on the selected mechanical properties of models, *Procedia Engineering*, 192, 463-468, 2017.
- Mazurchevici A. D., Nedelcu D., Popa R., Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 27, 179-192, 2020.
- Pakkanen J., Manfredi D., Minetola P. and Iuliano L., About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3B Printing, *State of the Art and Research Opportunities*, Springer International Publishing AG, 776-785, 2017.

- Rismalia M., Hidajat S. C., Permana I. G. R., Hadisujoto B., Muslimin M. and Triawan F., Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3B printed PLA material, 4th Annual Applied Science and Engineering Conference Series 1402, 2019.
- Sürmen, H. K. Additive Manufacturing (3D Printing): Technologies and Applications. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(2), 373-392, 2019.
- Ultimaker. PLA TDS. <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962720-Ultimaker-PLA-TDS>. Yayın tarihi Mayıs 16, 2017. Erişim tarihi Aralık 5, 2021.
- Yarwindran M., Sa'aban N. A., Ibrahim M., Periyasamy R., Thermoplastic Elastomer Infill Pattern Impact on Mechanical Properties 3B Printed Customized Orthotic Insole, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11(10), 6519-6524, 2006.