

PAPER DETAILS

TITLE: Eriyik Yigma Modelleme ile Üretilen Kafes Yapili Parçaların Bağil Mukavemetinin İncelenmesi

AUTHORS: Mevlüt Yunus Kayacan, Arda Çagatay Akçay, Emre Yılmaz, Ahmet Üzün

PAGES: 278-300

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2785400>

Eriyik Yığma Modelleme ile Üretilen Kafes Yapılı Parçaların Bağlı Mukavemetinin İncelenmesi

Mevlüt Yunus KAYACAN¹, Arda Çağatay AKÇAY², Emre YILMAZ³, Ahmet ÜZÜN^{4*}

^{1,2,3,4}Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Merkez/Isparta

¹<https://orcid.org/0000-0003-3557-9537>

²<https://orcid.org/0000-0003-1030-6479>

³<https://orcid.org/0000-0001-5354-4317>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-4478-8253>

*Sorumlu yazar: ahmetuz077@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 21.11.2022

Kabul tarihi: 06.04.2023

Online Yayınlanma: 20.12.2023

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat

PLA

TPU

Basma testi

Özgül mukavemet

Eriyik yığma modelleme

ÖZ

Geniş kullanım alanına sahip Eklemeli İmalat yöntemlerinden Eriyik Yığma Modellemenin (EYM) tercih edilirliliği gittikçe artmaktadır. Genellikle, yüksek mekanik özelliklere ihtiyaç duyulmayan, fonksiyonellik yerine kozmetik unsurların ön planda olduğu ürünlere yönelik uygulamalarda tercih edilmektedir. EYM yöntemi için geliştirilen yeni malzemelerin, elastomer ve kompozitlerle zenginleşmesi sonucunda farklı uygulama alanları da karşımıza çıkmaya başlamıştır. Bu çalışma kapsamında, standart PLA filamentlerin yanı sıra, elastomer özellikteki TPU (Termoplastik Poliüretan) ve kompozit yapıdaki karbon elyaf takviyeli TPU malzemelerin mekanik özelliklerine odaklanılmıştır. Farklı üretim stratejileri ve kafes yapıların kullanılması sonucunda elde edilen ürünlerin basma dayanımı ve bağlı mukavemeti araştırılmıştır. Böylece kafes yapılar ve imalat stratejileri ile düşük maliyetli ve bağlı mukavemeti yüksek yapılar daha kısa imalat sürelerinde elde edilebilmiştir. Ayrıca, özellikle TPU ve karbon elyaf katkılı TPU malzemelerin basma testleri sonucunda geri yaylanma “spring back” ile başlangıç geometrisine dönme davranışı sergilediği tespit edilmiştir.

Investigations of The Relative Strength of Lattice Infilled Parts Manufactured by Fused Deposition Modelling

Research Article

Article History:

Received: 21.11.2022

Accepted: 06.04.2023

Published online: 20.12.2023

Keywords:

Additive manufacturing

PLA

TPU

Compression testing

Specific strength

Fused deposition modeling

ABSTRACT

Fused deposition modeling (EYM), one of the most common methods of additive manufacturing, has been widely used in recent years. It is generally preferred in applications for products where high mechanical properties are not required and where visuality is at the forefront instead of functionality. However, as a result of the enrichment of new materials developed for the EYM method with elastomers and composites, different application areas have emerged. This study focuses on the mechanical properties of elastomeric TPU (Thermoplastic Polyurethane) and carbon fiber-reinforced TPU materials in addition to the traditionally used PLA filaments. The compressive strength and relative strength values resulting from the use of different processing strategies and lattice structures were investigated. Thus, lightweight, low-cost, and high-relative strength structures that can be produced in a shorter time with lattice structures and processing strategies have been obtained. Furthermore, compression tests revealed that TPU and carbon fiber-reinforced TPU materials, in particular, returned to their initial geometry with spring back.

To Cite: Kayacan MY., Akçay AÇ., Yılmaz E., Üzün A. Eriyik Yığma Modelleme ile Üretilen Kafes Yapılı Parçaların Bağlı Mukavemetinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(Ek Sayı): 278-300.

Giriş

Teknolojik ürünlerin hafifletilmesi verimlilik ve maliyet açısından önem taşımaktadır. Günümüzde çoğu sanayi sektörünün hedefi ürünün mekanik özelliklerini kaybetmeden hafifletilmiş olarak tasarlayıp üretmektir. Bu etkenler göz önüne alındığında geleneksel imalat yöntemlerinin yerini yeni imalat yöntemleri almıştır. Eklemeli imalat yöntemleri geleneksel imalat yöntemlerinin aksine toplam kütleden eksiltilerek parça üretmek yerine en baştan katmanlar eklenerek parça üretmek esasına dayanmaktadır. Böylece eklemeli imalat ile geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmeyecek veya zor ve yüksek maliyetli karmaşık geometrilere sahip parçaları üretme imkânı sağlanmıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinden Eriyik Yığma Modelleme (EYM) diğer yöntemlere göre (stereolitografi {SLA}, seçici lazer ergitme {SLM} vb.) daha basit çalışma prensibi ve düşük imalat maliyeti sayesinde en çok tercih edilen yöntemlerdendir. EYM metodunun çalışma prensibi, filament adı verilen ham malzemenin makine kontrolünde ısıtılmış nozula iletilmesi ve nozul çıkışının boyutlarındaki iplikleri katmanlar halinde tabla üzerine sererek ürün imal edilir. Termoplastik malzemeler ile imalat yapan bu yöntem istenilen boyutlarda ve bu boyutlara uygun seçilen cihazlarda, karmaşık geometrilerde ürünler imal etmek mümkündür. Her ürün kendine özgü özelliklerle sahiptir ve ihtiyaçlara göre üretilir. Bir mühendislik uygulamasında parçanın taşıyabileceği maksimum yük önemliyken insan vücudunda kullanılacak parçanın vücuda uyumluluğu daha fazla önem taşımaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat, yüksek ürün kalitesi için en önemli adımlardan birisi kullanılacak ham madde seçimi olmaktadır (Popescu ve ark., 2018; Gordelier ve ark. 2019; Pereira ve ark., 2019; Solomon ve ark., 2021; Kristiawan ve ark., 2021). EYM eklemeli imalat yönteminde ham madde daire kesit alana sahiptir ve tel formundadır. EYM’de kullanılan bu ham maddelere filament adı verilmektedir. Bu filamentler genel olarak 1.75, 2.85 ve 3.00 mm çapındadır. PLA (Polilaktik asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), TPU (Termoplastik Poliüretan), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) ve özel filamentler (karbon elyaf katkılı, ahşap katkılı vb.) yaygın olarak kullanılan filamentlere örnek olarak verilebilirler (Ergene ve Bolat, 2022; Ergene ve ark. 2023). Filamentler termoplastik malzemelerdir. Termoplastik (ısıyla yumuşayan plastik) malzemeler belirli sıcaklıklara kadar ısıtılınca malzeme özelliklerini kaybetmeyip kolay şekil verilebilen ve soğuyunca tekrardan katılaşarak formunu koruyan plastik polimer malzemelerdir. İmalat sonrası katılaşmış formdaki PLA’nın çekme gerilmesi 55–70 MPa arasındadır (Slapnik ve ark. 2021). TPU’nun çekme gerilmesi ise 50 MPa değerindedir (Alias ve ark. 2019).

Eklemeli imalatın sağladığı diğer bir önemli avantaj ise ürün verimliliğidir. Bu çalışmada bağıl mukavemet birim yoğunluk başına düşen gerçek gerilme olarak kullanılmıştır. Bağıl mukavemeti arttırmak için karmaşık kafes yapılarından yararlanılmıştır. Bu kafes yapıları sayesinde geleneksel yöntemlerle imal edilmiş ürünlere göre bağıl mukavemeti yüksek ürünler imal edilmiştir. Bu sayede geleneksel imalat ile imal edilen ürünlere göre daha hafif ancak daha dayanıklı ürünler imal edilmiştir (Liu ve ark., 2018; Anandkumar ve Babu; 2019; Pan ve ark., 2020).

Kafes yapılar yüksek dayanım ve ağırlık oranı özellikleri ile periyodik olarak düzenlenmiş üç boyutlu birim hücrelere sahip çoğunlukla içi boş yapılardır. Kafes yapıların özellikleri doğrudan birim hücrenin şekline ve yapısına bağlı olduğu için tasarımdan tasarıma farklı mekanik özellikler gösterebilmektedir. Biyomedikal, uzay araçları, uçak ve otomotiv gibi birçok alandaki çeşitli ihtiyaçlara uygun mekanik davranışlar sergileyecek biçimde düzenli veya düzensiz yapılarda kafes yapıları tasarlanabilmektedir. Kafes yapılar ihtiyaca uygun şekilde belirli bir kuralla göre veya kuralsız olarak tasarlanabilmektedir (Feng ve ark., 2018; Tamburrino ve ark., 2018; Kumar ve ark., 2020; Akdoğan ve Vanlı, 2020; Kummert ve ark., 2021).

Kafes yapılar birim hücre düzenine veya düzensiz tekrarlanabilme yapısına göre periyodik ve stokastik kafes yapılar olarak isimlendirilmektedir. Literatüre göre, kafes yapıların mekanik özellikleri dizilimlerine ve şekillerine göre değişiklik göstermektedir. Kafes yapılar mekanik davranışlarına göre ikiye ayrılır, çekme-etkin yapılar ve eğilme-etkin yapılar olarak isimlendirilir. Açık hücreli kafes yapılar eğilme-etkin davranış gösterirken kapalı hücreli yapılar çekme-etkin davranış sergilemektedir. Birim hücreler bir sıraya göre dizilmişse ağısı (stokastik olmayan) olarak isimlendirilirler. Deformasyon davranışı, birim hücrelerin sınırlarını belirlemektedir ve bu davranış ile birim hücrenin esneme veya bükülme özellikleri öğrenilir (Cheng ve ark., 2018; Yáñez ve ark., 2018; Ling ve ark., 2019; Nasrullah ve ark., 2020; Korshunova ve ark., 2021; Holmes ve ark., 2022). Octet-Truss kafes yapısı çubuk tipi kafes yapılardan bir tanesidir. Üç ekseninde eşit ya da yakın değerlerde mukavemet göstermektedir. Re-entrant kafes yapısı yüzey tipinde kafes yapılardandır. Re-entrant, bir ekseninde diğerlerinden daha fazla uzama göstermektedir. Gyroid, tüm eksenlerinde periyodik çoğaltılabilen, minimum yüzey alanına sahip kafes yapılardan biridir. Gyroid mekanik dayanımı ve fonksiyonel avantajları ile özellikle sağlık alanında hücre gelişimine yarar sağlamasıyla, implantlarda sıklıkla tercih edilen bir kafes yapısıdır (Korkmaz ve ark., 2022).

Bu çalışmada farklı malzemelerin aynı kafes yapılarında ne gibi mekanik davranışlar sergilediği incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında farklı kafes yapılar da kullanılarak, birbirleri arasında ne gibi farklı mekanik özellikler olacağı incelenmiştir. Literatürdeki diğer çalışmadan farklı olarak farklı malzemeler ve kafes yapı kombinasyonları ile imal edilen numunelerin bağlı mukavemetler bakımından karşılaştırmalarına yer verilmiştir. Karşılaştırmalarda, bağlı mukavemet ve bağlı yoğunluk önemli kriterler olarak belirlenmiştir.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada malzeme olarak poliaktik asit (PLA), termoplastik poliüretan (TPU) ve karbon elyaf katkılı termoplastik poliüretan (TPU+%1,5 CF) filamentler kullanılmıştır. PLA, sert bir yapıya sahiptir (79,5 shore D) (Singh ve ark., 2020). Dayanıklısıdır ve darbelere karşı dirençlidir. Yaklaşık %6 uzama gerinimine sahiptir, ancak kırılğan bir davranış sergiler. Termoplastik Poliüretanlar (TPU), yüksek kimyasal dayanımı, yüksek yorulma direnci, yüksek aşınma direnci ve yüksek darbe dayanımına sahiptir. %500'ün üzerinde uzama kabiliyetine sahiptir. Yağlara, çözücülere, kimyasallara karşı

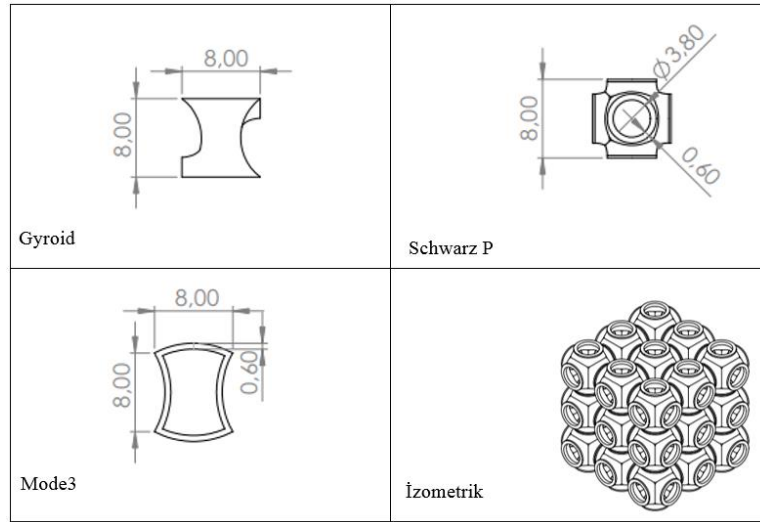
dirençlidir. Karbon elyaf katkılı termoplastik poliüretan (TPU+%1,5 CF), bileşimindeki karbon elyaf katkı malzemesi sayesinde, takviyesiz standart TPU'ya kıyasla, yüksek çekme mukavemeti, yüksek ısı toleransı ve daha yüksek kimyasal direnç sağlar. Bu malzemedeki karbon elyaf katkısı ile diğer iki malzemeye kıyasla elektriksel iletkenliği daha yüksektir. İmalatta kullanılan PLA, TPU ve TPU+1.5%CF filamentlerine ait teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir (Murariu ve ark., 2016; Sattar ve ark., 2015).

Tablo 1. Filamentlerin teknik özellikleri

	PLA	TPU	TPU+CF
Özgül Ağırlık (gr/cm³)	1,25	1,22	1,23
Shore Sertliği (D)	79.5	41.8	14
Aşınma Kaybı (mm³)	4,2	40	34
Gerilim Modülleri (N/mm²)	• %50 N/A • %100 3,6 • %300 N/A	• 3,1 • 4,8 • 9,6	• 5,2 • 7,2 • 13,0
Kopma Uzaması (%)	10	810	520
Yırtılma Mukavemeti (N/mm²)	65	90	75

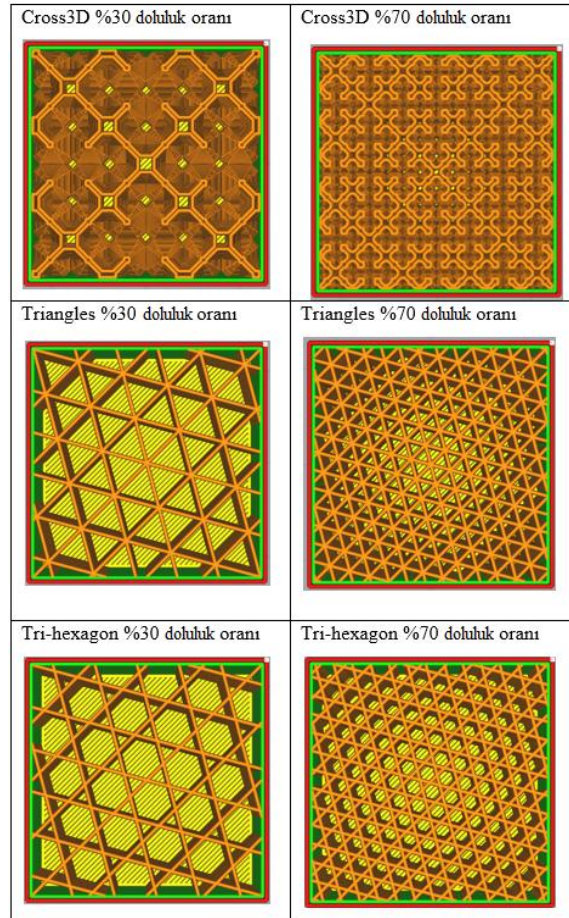
Literatürdeki kafes yapılar incelenerek en iyi mekanik özellikleri vereceği düşünülen 5 farklı kafes yapı ve 3 farklı dolgu deseni belirlenmiştir. Gyroid, Schwarz P ve Mode 3 kafes yapılar ele alınmıştır. Tam dolu numuneler ise tri-hexagon, triangles ve cross 3D dolgu desenleri ile imal edilmiştir. Dolu numuneler için %30 ve %70 doluluk oranı tercih edilmiştir (Helou ve ark., 2018; Nazir ve ark., 2019; Tao ve ark., 2021; Karkun ve Dharmalingam, 2022).

Gyroid ve Schwarz P, 8x8x8 mm boyutunda birim hücrelerden oluşturulmuştur. Kartezyen koordinat sistemine göre üç eksen (x, y ve z) üç adet birim hücre kullanılarak, toplam 27 adet geometri oluşturulmuştur. Mode 3, 8x8 mm boyutunda birim hücrelerden oluşturulmuştur. Birim hücreler 24 mm uzunluk boyunca yan yana ve üst üste getirilerek yapılar oluşturulmuştur. Kafes yapıların duvar kalınlıkları Gyroid, Schwarz P, Mode 3 için 0,6 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca bir destek yapı kullanılmaksızın imalat gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de kafes yapıları oluşturan birim hücre yapılarına yer verilmiştir. (Birimler “mm” cinsindendir.)



Şekil 1. Kafes Yapıları Oluşturan Birim Hücreler

Dolu numune parçası olarak seçilen Tri-hexagon, Triangles ve Cross 3D desenleri yüzde 30 ve yüzde 70 doluluk oranlarındaki kesitleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Dolu numune parçalarının tasarımları Ultimaker Cura programında hazırlanmıştır.



Şekil 2. Tri-Hexagon, Triangles ve Cross 3D Desenleri, Yüzde 30 ve Yüzde 70 Doluluk Oranlarındaki Kesitleri

Kullanılan malzemelerin görsel olarak kolay ayırt edilebilmesi için farklı renkler tercih edilmiştir. Beyaz renk PLA filamentini, kırmızı renk TPU filamentini ve siyah renk Karbon elyaf katkılı TPU filamentini temsil etmektedir. Her filament ve her bir kafes yapı için 4'er adet numune imal edilmiştir. Mekanik özellikleri incelemek için 33 adet, deneyde yaşanabilecek olası hatalar için ise 11 adet ilave numune imal edilmiştir. Numunelerin imalat toleransı " $\pm 0,1$ mm" olarak elde edilmiştir. Creality CR-6 SE bowden tipli EYM eklemeli imalat makinesi kullanılmış ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Creality CR-6 SE teknik özellikleri

Baskı Boyutu	235x235x250 mm
Baskı Hızı	80-100 mm/sn
Nominal Gerilim	100v-240v AC 50/50 Hz
Nominal Güç	350 W
Çıkış Voltajı	DC 24 V
Katman kalınlığı	0,1-0,4 mm
XY Konum Hassasiyeti	$\pm 0,01$ mm
Baskı çözünürlüğü	$\pm 0,1$ mm
Nozul Sıcaklığı	≤ 260 °C
Nozul Çapı	0,4 mm
Nozul sayısı	1
Tabla Sıcaklığı	≤ 110 °C

İmalatı gerçekleştirilecek numunelerin, ASTM D1621 standardına uygun şekilde katı modelleri oluşturulmuştur. İmalat sonrası numunelerin ASTM D1621 standartlarına uygunlukları gerekli boyutsal ölçümler alınarak kontrol edilmiştir. Üretim sırasında sorunlarla karşılaşılması ve hassas numune elde edilmesi amacıyla deneme imalatları gerçekleştirilmiştir. Deneme imalatında 30 mm/s, 40 mm/s ve 50 mm/s hızları her malzeme için denenmiştir. Her malzeme özelinde hızlar tabladan ayrışma, imalatın süresi ve ipliklenme gibi parametreler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. PLA için 50 mm/s hız belirlenmiştir. PLA için üç farklı nozul sıcaklığı denenmiştir. 205 °C, 210 °C ve 215 °C nozul sıcaklığı denenmiştir. PLA'nın nozulda sıvanma ve ipliklenme gibi hataların olmadığı imalatı 205 °C'de gerçekleşmiştir. TPU ve karbon katkılı TPU içinde 230 °C, 235 °C ve 240 °C olarak üç farklı nozul sıcaklığı denenmiştir. TPU'da 230 °C ve karbon katkılı TPU'da ise 240 °C nozul sıcaklığı hatasız imalat için belirlenmiştir. Diğer parametreler literatürde göz önüne alınarak Cura yazılımının standart parametreleri olarak kullanılmıştır (Tao ve ark., 2021). Deneme imalatları sonucunda optimum imalat parametreleri elde edilerek imalat parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen optimum imalat parametreleri aşağıdaki Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Optimum imalat parametreleri

Filament	PLA	TPU	Karbon Katkılı TPU
Nozul çapı	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Nozul sıcaklığı	205 °C	230 °C	240 °C
Katman kalınlığı	0,2	0,2	0,2
Tablaya tutunma biçimi	Tek katmanlı destek	Tek katmanlı destek	Tek katmanlı destek
Tabla sıcaklığı	60 °C	60 °C	60 °C
Duvar kalınlığı	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Üst kalınlık	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Alt kalınlık	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
İmalat hızı	50 mm/sn	30 mm/sn	30 mm/sn
Geri çekme	Var	Yok	Var
Katman kalınlığı	0,2	0,2	0,2
Soğutma fan hızı	%100	%100	%100
Dolu numunelerin doluluk oranı	%100, %70, %30	%100, %70, %30	%100, %70, %30
Dolu numunelerin dolumunun deseni	Line, tri-hexagon, triangles, cross3d	Line, tri-hexagon, triangles, cross3d	Line, tri-hexagon, triangles, cross3d

İmal edilen numunelerden elde edilen test sonuçları ile gerçek gerilme, bağıl mukavemet, yüzde epsilon, elastisite modülü, akma dayanımı, basma ve kopma dayanımları hesaplanmıştır. Bağıl mukavemet, gerçek gerilmenin yüzde gerçek bağıl yoğunluğa bölünmesiyle elde edilmiştir. Denklem (1)'de bağıl mukavemetin formülü verilmiştir.

$$\text{Bağıl Mukavemet} = \frac{\text{Gerçek Gerilme}}{\% \text{Gerçek Bağıl Yoğunluk}} \quad (1)$$

Gerilme, birim yüzeye düşen yükleme miktarı olarak tanımlanır. Gerilmeler, incelenen kesit yüzeye dikey etkiyorsa, bu gerilmeler normal gerilme (σ) olarak tanımlanır. Bu çalışmada normal gerilme kullanılmıştır ve Denklem (2)'de Normal gerilmenin formülü verilmiştir. “A” kesit alanı ifade etmektedir. “F” yüzeye etki eden dik kuvveti ifade etmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Gerinim (ϵ), birim şekil değiştirme, yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki duruma göre şeklinin ne oranda değiştirdiğini ifade eder. Denklem (3)'de birim gerinim formülü verilmiştir. “ l_0 ” numunenin ilk boyunu ifade etmektedir. “L” numunenin son boyunu ifade etmektedir. “ ΔL ” ilk boy ile son boy arasındaki farkı ifade etmektedir.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{l_0} = \frac{L - l_0}{l_0} \quad (3)$$

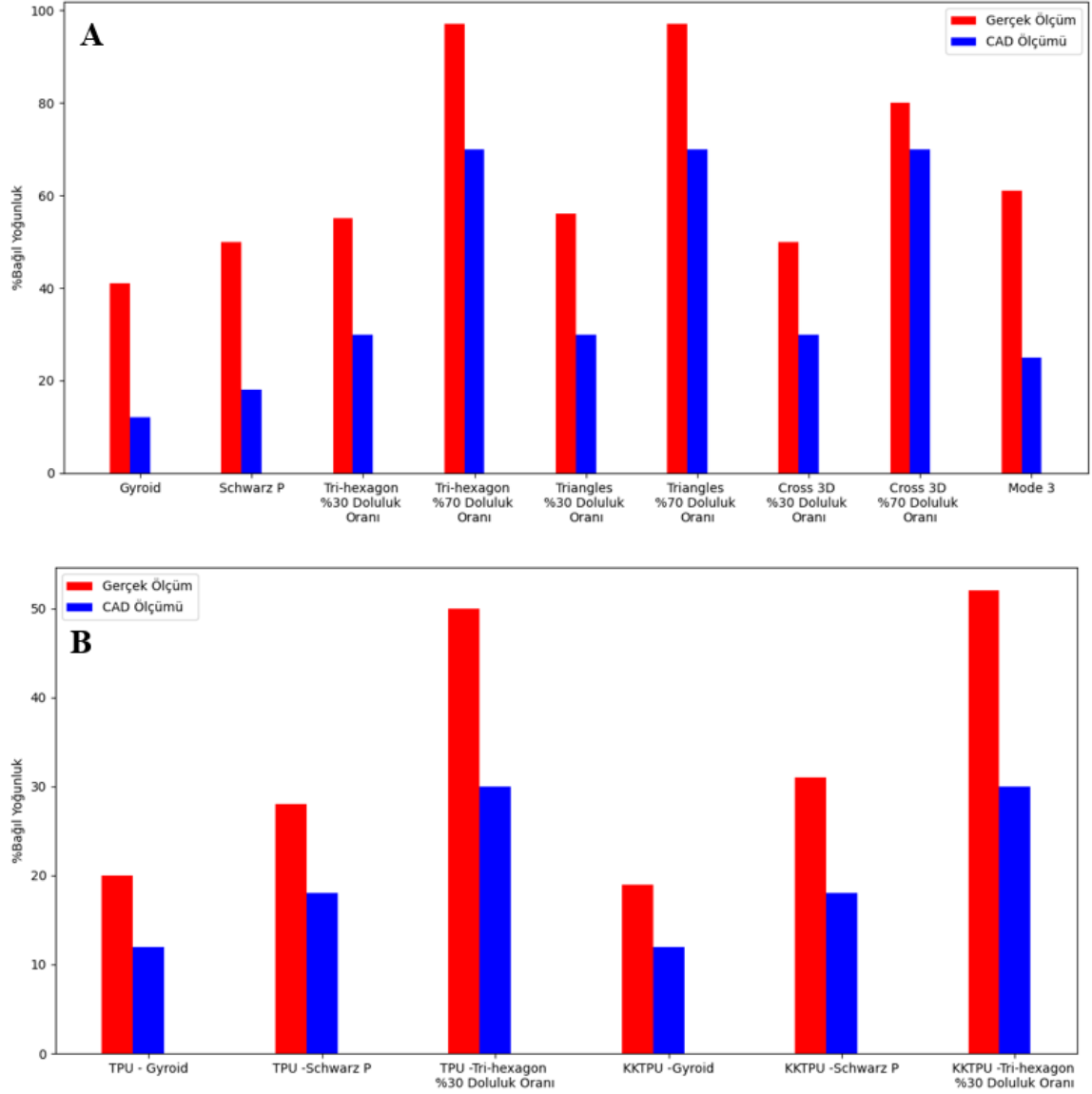
Elastisite modülü (E), malzemenin birim kesit alandaki birim boyu bir kat arttırmak için uygulanması gereken birim kuvveti gösterir. Aşağıda Denklem (4)'de elastisite modülünün formülü verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma l_0}{\Delta L} \quad (4)$$

Basma numunelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini belirlemek için kalibrasyonu doğrulanmış 100kN'luk yük uygulayabilen Hidrolik/Statik & Dinamik Deney Cihazı olan MTS 370.10 test cihazı kullanılmıştır. Testler 6mm/dk hız ile yapılmıştır. Her iki cihazda da PLA numunelerinin kafes yapılı olanları 18 mm deforme edilirken, dolum desenine sahip numuneler 16mm deforme edilmiştir. TPU numunelerinin kafes yapıları 18 mm deforme edildiğinde herhangi bir veriye ulaşamadı. Bu yüzden TPU numuneleri 25 mm deforme edilmiştir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemesinde ise kafes yapılı numuneler 18mm deforme edilirken, dolum desenine sahip numuneler 16 mm deforme edilmiştir.

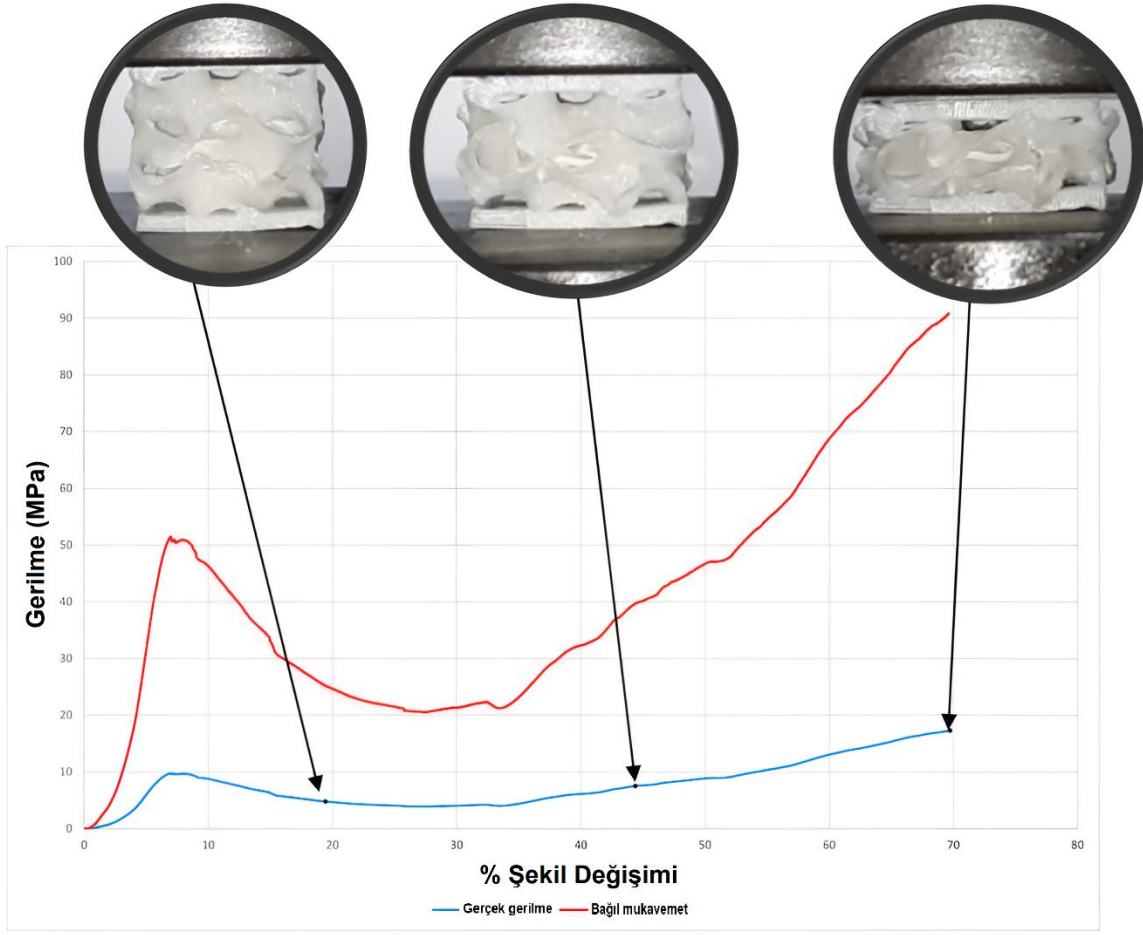
Bulgular ve Tartışma

Şekil 3'de tasarlanan modellerin ve üretilmiş olan numunelerin bağıl yoğunluklarının farklı olduğu anlaşılmaktadır. Kafes yapılı numunelerin mekanik testleri yaygın olarak bağıl yoğunluklar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir (Ergene ve Yalçın, 2022). Bu durum dilimleme programı ve makine hassasiyetinin yetersiz kalmasından dolayı oluşmuştur. PLA, TPU ve TPU+CF malzemeleri için yüzde bağıl yoğunluklar kendi içlerinde karşılaştırıldığında en düşük gerçek yoğunluğa sahip numuneler; PLA için %41 bağıl yoğunluk ile Gyroid birim hücreli numune, TPU için %20 bağıl yoğunluk ile Gyroid birim hücreli numune ve TPU+%1,5CF için %19 bağıl yoğunluk ile Gyroid birim hücreli numune olmuştur. Bu çıktılarına göre her malzeme için kritik olan geometri türünün Gyroid olduğuna karar verilmiştir. Detay incelemeler her üç malzeme için de Gyroid birim hücreli numuneler üzerine yoğunlaştırılmıştır.



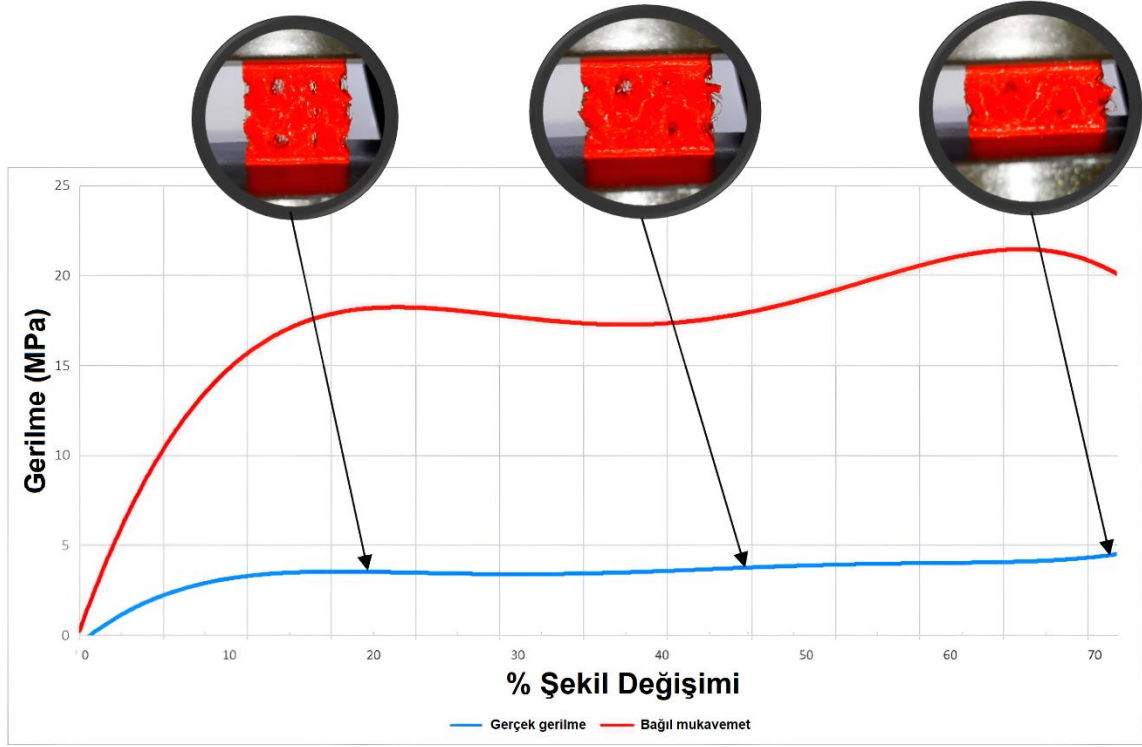
Şekil 3. A) PLA Numuneleri Bağlı Yoğunlukları, B) TPU ve Karbon Elyaf Katkılı TPU Numunelerinin Bağlı Yoğunlukları

Basma deneyi sırasında PLA malzemeden üretilmiş Gyroid birim kafes yapısına sahip numunenin gerçek gerilme değeri yaklaşık 10 MPa'a kadar artış göstermiştir ve akma noktasına ulaşmıştır. Elastik sınırdan sonra gerilme değerinde düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş kafes yapıların deforme olarak geometrisinin bozulması nedeniyle mekanik dayanım gösterememesinden kaynaklanmıştır. Kuvvette artış devam ettikçe kafes yapılar sıkışmış ve yeniden mekanik dayanım artışı başlamıştır. Son anda numune yaklaşık 18MPa'a kadar bir gerçek gerilme oluşturmuştur. PLA malzemesinin gerçek gerilme grafiğinde gösterdiği düşüş ve yükselişlerden anlaşıldığı üzere sert ve tok polimerik özellik göstermiştir (Bergström ve Hayman, 2016). PLA malzemesinden üretilen Gyroid birim hücrelerine sahip numuneye ait gerilme-şekil değiştirme dayanımı grafiği Şekil 4'de gösterilmiştir.



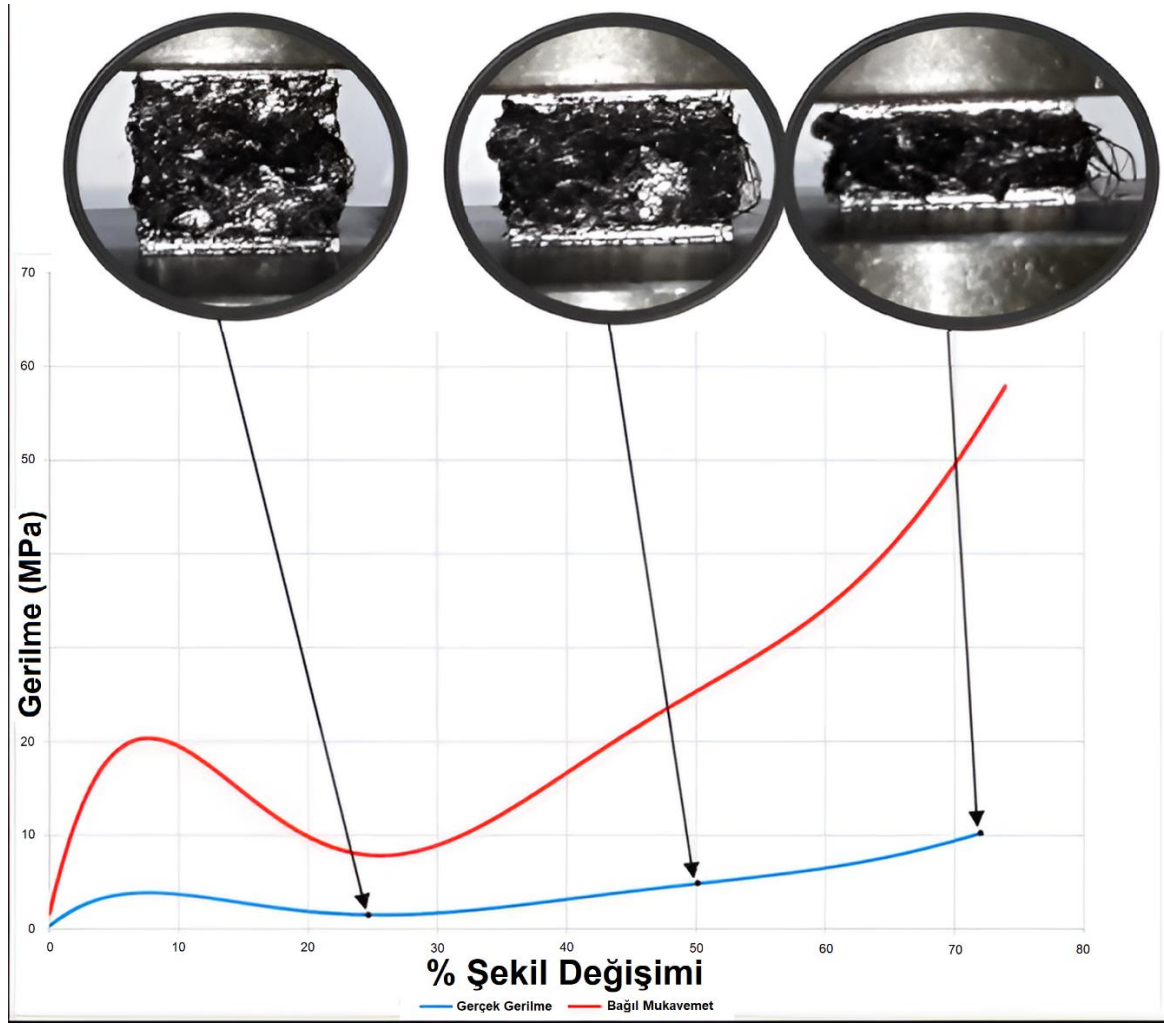
Şekil 4. PLA Malzemesi Gyroid Numunesine Ait Gerçek Gerilme ve Bağıl Mukavemet

Basma deneyi sonucunda oluşturulan gerilme-şekil değişimi incelenen TPU malzemesinden üretilen Gyroid birim hücrelerine sahip numunenin elastik sınırına ulaşamamıştır. Basma testi sonrası üzerindeki yüklemenin kaldırılması sonucunda numune başlangıç geometrisine tam olarak dönebilmiştir. Yaklaşık 4 MPa'a kadar bir gerçek gerilme göstermiş olmasına rağmen herhangi bir akma gözlemlenmemiştir. Ayrıca uygulanan deformasyon sonucunda numunede herhangi bir kırılma görülmemiştir. Numune 25 mm'ye kadar basılmış ve üzerindeki kuvvet kalktıktan sonra 24 saat içinde geri yaylanma göstererek ilk hali olan 28mm'ye geri dönmüştür. TPU malzemeden üretilen Gyroid numunesinde, PLA malzemesinden üretilen Gyroid numunesine göre %25 daha az bir gerçek gerilme olmuştur. TPU malzemesi gerçek gerilme grafiğinde gösterdiği sürekli artıştan anlaşıldığı üzere elastomer özelliği göstermiştir (Qi ve Boyce, 2005). TPU malzemesinden üretilen Gyroid birim hücresine sahip numuneye ait gerilme-şekil değiştirme dayanımı grafiği Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. TPU Malzemesinin Gyroid Birim Hücreli Numunesine Ait Gerçek Gerilme ve Bağıl Mukavemet

Basma deneyi sonucunda oluşturulan gerilme-şekil değişimi incelenen karbon elyaf katkılı TPU filamentten üretilen Gyroid basma numunesi 4 MPa gerilme değerinde akma noktasına ulaşmıştır. Uygulanan deformasyon sonucunda numunede ezilmeler görülmüştür. Karbon elyaf katkısı nedeniyle malzemenin geri yaylanma özelliği %1,05 azalmıştır. Buna rağmen parça yaklaşık 24 saat içinde geri yaylanma etkisi göstererek 26,6 mm'ye geri dönmüştür. Karbon elyaf katkılı TPU malzemesi gerçek gerilme grafiğinde görülen sürekli artıştan anlaşıldığı üzere elastomer özelliği göstermiştir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemesinden üretilen Gyroid birim hücresine sahip numuneye ait gerilme-şekil değiştirme dayanımı grafiği Şekil 6'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Karbon Elyaf Katkılı TPU Malzemedan Oluşan Gyroid Birim Hücreli Numunesine Ait Gerçek Gerilme ve Bağıl Mukavemet

%Bağıl yoğunluğa göre bakıldığında kritik olarak belirlenen Gyroid birim kafes yapısının farklı malzemelerdeki gerçek dayanımlarını ve bağıl mukavemetlerini değerlendirilmiştir. Test sonuçlarının farklı kafes yapılarına ve malzemelere göre farklılaştığı Tablo 4 ve Tablo 5’den anlaşılmaktadır. PLA numunelerin akma dayanımları ve %70 gerinim anındaki gerilmesi Tablo 4’de, TPU ve Karbon Katkılı TPU numunelerin akma dayanımları ve %70 gerinim anındaki gerilmesi Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 4. PLA Numunelerin Akma Dayanımları ve %70 Gerinim Anındaki Gerilmesi

No	PLA	Gerçek Akma Dayanımı (MPa)	Bağlı Akma dayanımı (MPa)	%70 gerinim anındaki gerçek gerilme (MPa)	%70 gerinim anındaki bağlı gerilme (MPa)
P1	Gyroid	10	52	18	91
P2	Schwarz P	7	24	18	65
P3	Tri-hexagon %30 doluluk oranı	42	75	43	76
P4	Tri-hexagon %70 doluluk oranı	49	51	81	85
P5	Triangles %30 doluluk oranı	31	56	52	87
P6	Triangles %70 doluluk oranı	47	50	81	86
P7	Cross 3D %30 doluluk oranı	18	38	32	61
P8	Cross 3D %70 doluluk oranı	22	27	82	94
P9	Mode 3	7	19	53	140

Tablo 5. TPU ve Karbon Katkılı TPU Numunelerin Akma Dayanımları ve %70 Gerinim Anındaki Gerilmesi

	TPU	Gerçek Akma Dayanımı (MPa)	Bağlı Akma dayanımı (MPa)	%70 gerinim anındaki gerçek gerilme (MPa)	%70 gerinim anındaki bağlı gerilme (MPa)
T1	Gyroid	4	17	5	20
T2	Schwarz P	1,5	5	3	12
T3	Tri-hexagon %30 doluluk oranı	3	7	8	15
	TPU+%1,5CF	Gerçek Akma Dayanımı (MPa)	Bağlı Akma dayanımı (MPa)	%70 gerinim anındaki gerçek gerilme (MPa)	%70 gerinim anındaki bağlı gerilme (MPa)
C1	Gyroid	4	21	10	58
C2	Schwarz P	2,5	7,5	12	40
C3	Tri-hexagon %30 doluluk oranı	21	39	25	45

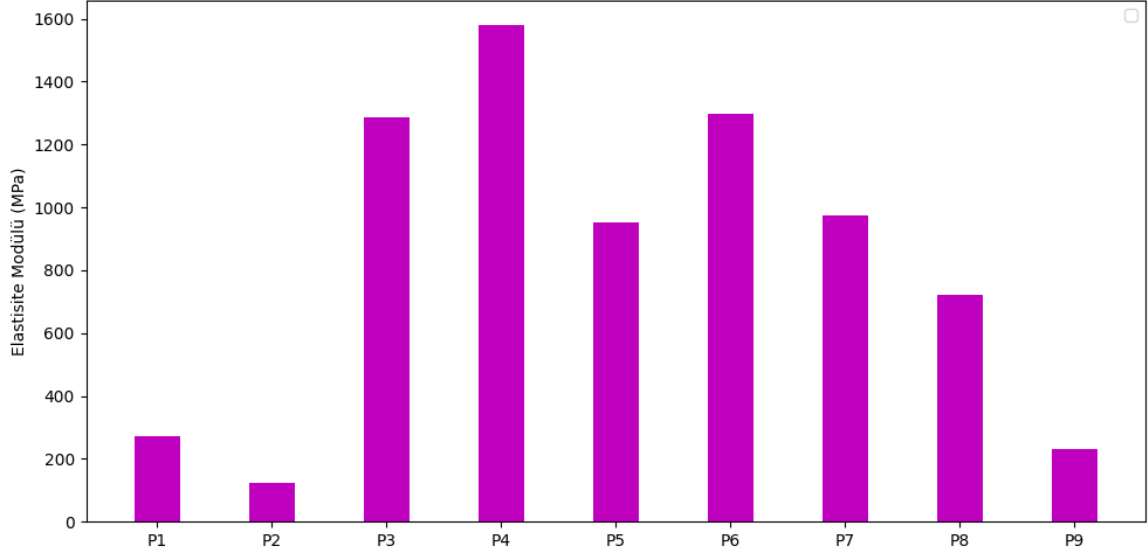
Kafes yapılar nedeniyle bağlı yoğunluğun ortaya çıktığı tasarımlarda çekme-basma gibi mekanik özellikler bağlı mukavemet ile ilişkilendirilmektedir (Ergene ve ark., 2021). PLA malzemeden üretilen numuneler içerisinde test sonuçlarına göre %70 doluluk oranına sahip Tri-hexagon numunenin gerçek akma dayanımı 49 MPa ile en yüksek değere sahiptir. PLA malzemesinden üretilen numuneler içerisinde %70 doluluk oranına sahip Tri-hexagon numune Gyroid'e göre 4,9 kat daha yüksek gerçek akma dayanımına sahiptir. PLA malzemeden üretilen numuneler içerisinde bağlı akma dayanımı 75

MPa ile en yüksek olan %30 doluluk oranına sahip tri-hexagon numunedir. PLA malzemeden üretilen numuneler içerisinde %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon numune Gyroid'den 1,44 kat daha yüksek bağıl akma dayanımına sahiptir. PLA ile üretilen numuneler içerisinde %70 gerinim anındaki gerçek gerilme incelendiğinde 82 MPa ile en yüksek sonucu %70 doluluk oranına sahip Cross 3D numune vermiştir. PLA malzemesinden üretilen numuneler içerisinde %70 doluluk oranına sahip Cross 3D numunenin %70 gerinim anındaki gerçek gerilmesi Gyroid numunesine göre 1,58 kat daha yüksek sonuç vermiştir. PLA'dan üretilen numuneler içinde %70 gerinim anındaki bağıl gerilmeler incelendiğinde 140 MPa ile en yüksek sonucu Mode 3 numune vermiştir. PLA malzemeden üretilen Mode 3 numunenin %70 gerinim anındaki bağıl gerilmesi Gyroid numuneye göre 1,54 kat yüksek çıkmıştır.

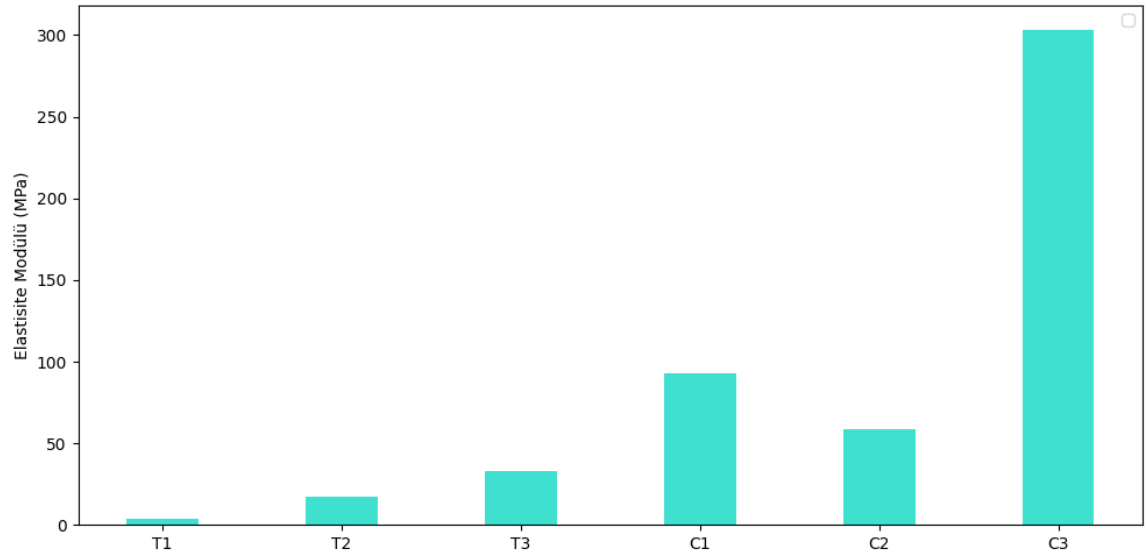
TPU malzemeden üretilen Gyroid numunenin gerçek akma dayanımı 4 MPa ile en yüksek değere sahiptir. TPU malzeme ile üretilen Gyroid numune 17 MPa bağıl akma dayanımı ile aynı malzeme türündeki numuneler arasında en yüksek değere ulaşmıştır. TPU malzemeden üretilen numunelerin %70 gerinim anındaki gerçek gerilmesi incelendiğinde 8 MPa ile en yüksek sonucu %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon numune vermiştir. TPU malzemeden üretilen numuneler arasında %70 doluluk oranına sahip Cross 3D numunenin %70 gerinim anındaki gerçek gerilmesi Gyroid numuneye göre 1,6 kat daha yüksek sonuç vermiştir. TPU malzemeden üretilen numunelerden Gyroid %70 gerinim anındaki bağıl gerilmeleri incelendiğinde, 20 MPa ile en yüksek değeri göstermiştir.

Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numuneler içerisinde %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon numune 21 MPa gerçek akma dayanımı ile en yüksek değere sahiptir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numunelerde %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon, Gyroid numuneye göre 5,25 kat daha yüksek gerçek akma dayanımı göstermiştir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numuneler içinde 39 MPa bağıl akma dayanımı ile %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon daha üstün özelliklere sahiptir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numuneler içerisinde 30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon % numunesi Gyroid numuneye göre 1,86 kat daha yüksek bağıl akma dayanımına sahiptir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numuneler içerisinde %70 gerinim anındaki gerçek gerilmesi incelendiğinde 25 MPa ile en yüksek sonucu Tri-hexagon %30 doluluk oranına sahip numune vermiştir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numunelerde %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon numunenin %70 gerinim anındaki gerçek gerilmesi Gyroid numunesine göre 2,5 kat daha yüksek performansı vermiştir. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilen numunelerden Gyroid %70 gerinim anında, 58 MPa ile en yüksek sonucu vermiştir.

Elastisite modülü yüksek olan polimer malzeme gevrek bir davranış sergilemektedir. Aksine elastisite modülü düşük çıkan bir plastik malzeme ise elastomerik bir davranış sergileyebilmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen elastisite modülleri Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. (Şekil 7 ve Şekil 8'deki "X" ekseninde yer alan ifadeler Tablo 4 referans alınarak hazırlanmıştır.)



Şekil 7. PLA Numunelerinin Elastisite Modülleri

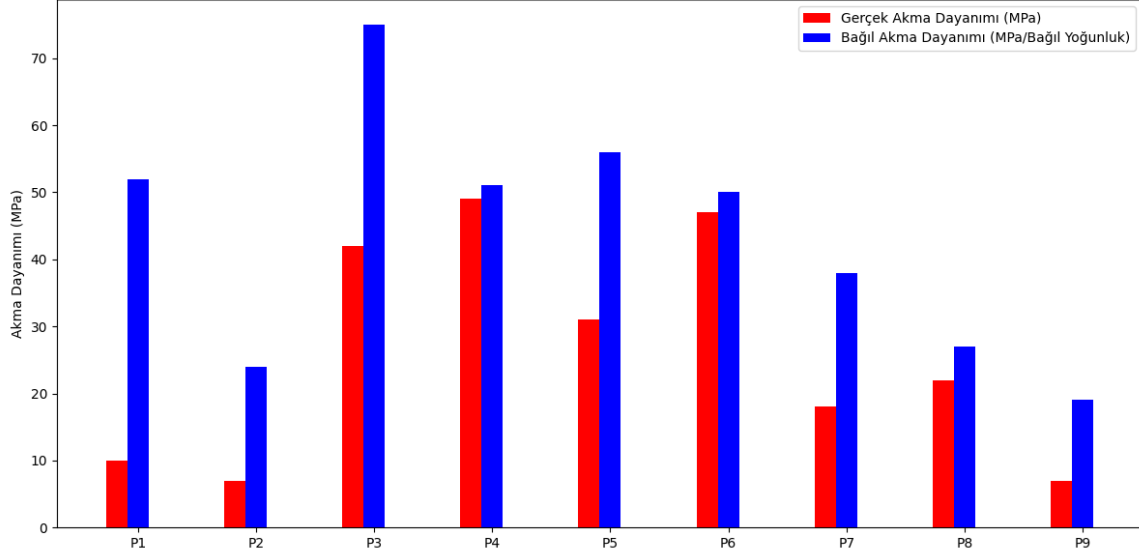


Şekil 8. TPU ve Karbon Katkılı TPU Numunelerinin Elastisite Modülleri

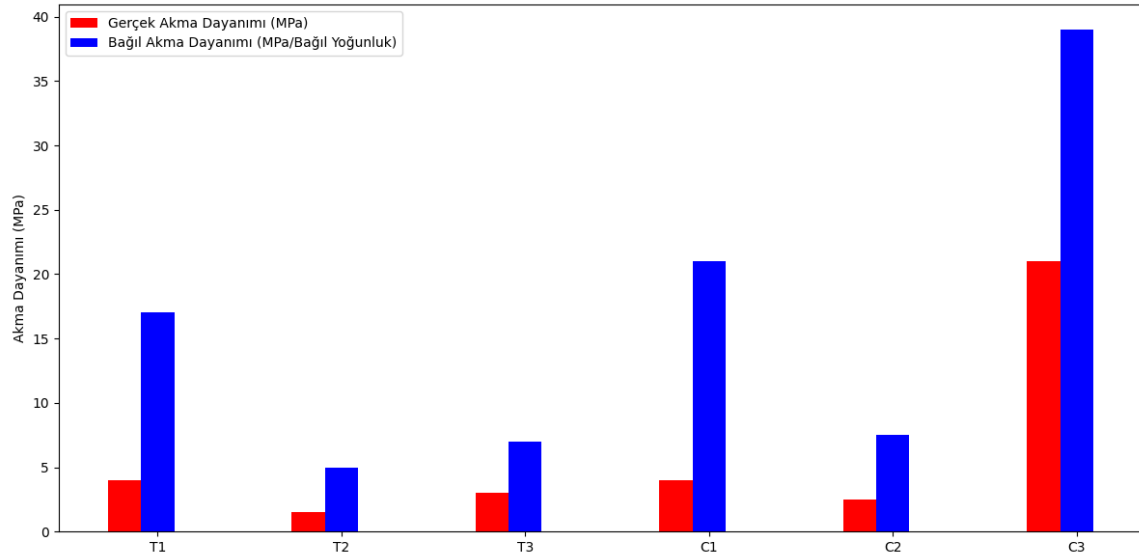
Anlaşılabacağı üzere PLA malzemesinden üretilen numuneler genel olarak sert ve tok plastik özelliği göstermiştir. PLA malzemedan üretilen numunelerden %70 doluluk oranına sahip Tri-hexagon (P4) 1579 MPa elastisite modülüne erişmiştir.

TPU numunelerinin elastisite modülleri incelendiğinde numunelerin elastomer davranış sergilediğini görülmüştür. TPU malzemedan üretilen tüm numunelerde geri yaylanma ve yapılarında bozulma meydana gelmediği gözlemlenmiştir. TPU ile üretilen Gyroid numunenin (T1) Elastisite modülü 4 MPa ile en düşük seviyeye ulaşmıştır. Karbon elyaf katkı TPU numunelerin elastisite modülleri PLA numunelerine göre düşüktür ancak TPU numunelere göre yüksektir. Karbon elyaf katkısı, TPU'nun elastomerik davranışların azalmasına neden olmuştur. Karbon elyaf katkı TPU malzemedan üretilen

numunelerden Schwarz P (C2) 59 MPa ile en düşük elastisite modülüne sahip ve tüm karbon elyaf katkılı TPU numuneler arasında elastomer davranış göstermişlerdir. Farklı malzeme ve farklı kafes yapıları kullanılarak elde edilen numunelerin gerçek akma dayanımı ve bağıl akma dayanımı Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir. (Şekil 9 ve Şekil 10’daki “X” ekseninde yer alan ifadeler Tablo 4 referans alınarak hazırlanmıştır.)



Şekil 9. PLA Numunelerinin Akma Dayanımları

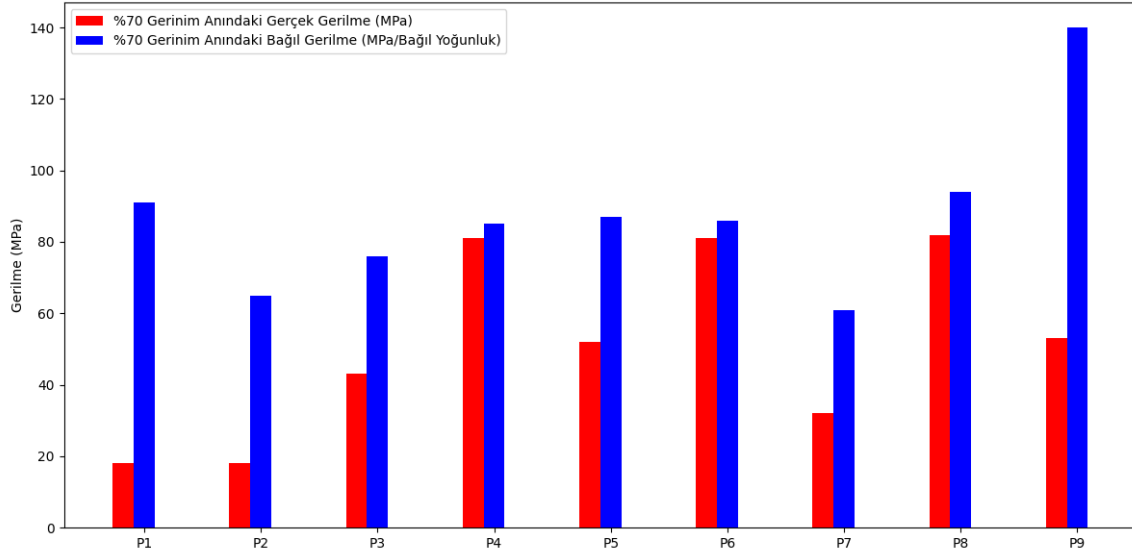


Şekil 10. TPU Numunelerinin Akma Dayanımları

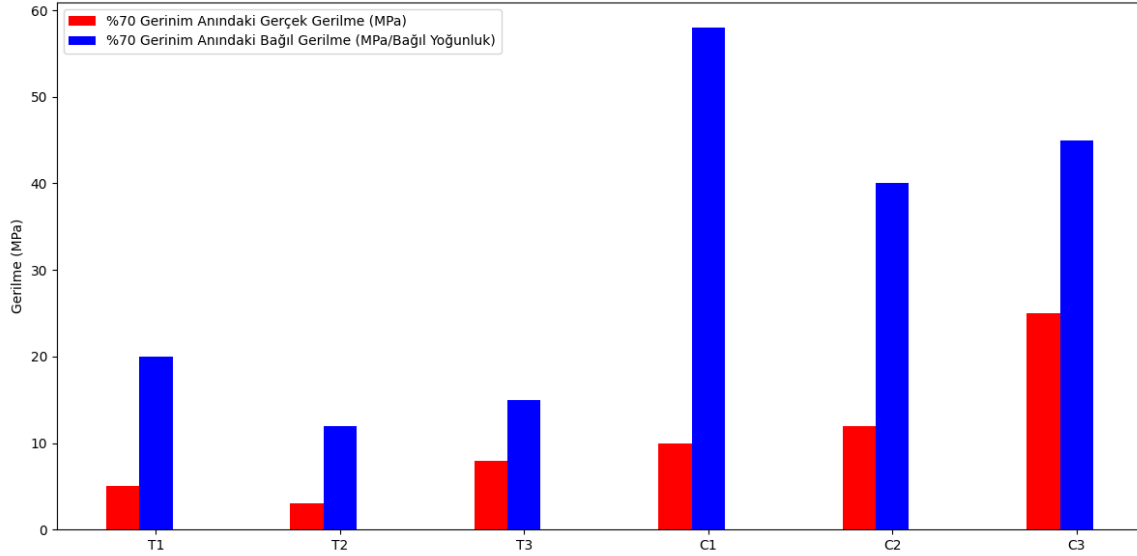
Gerçek akma dayanımı en yüksek PLA numune %70 doluluk oranına sahip numunesi Tri-hexagon (P4) olmuştur. Ancak PLA numunelerden 30% doluluk oranına sahip Tri-hexagon (P3) en iyi bağıl akma dayanımını göstermiştir. Ağırlığın önemli olduğu durumlarda %30 doluluk oranına sahip Tri-

hexagon diğer kafes yapılara göre daha yüksek akma dayanımı sağlamıştır. Yüksek akma dayanımı gereken durumlarda 70% doluluk oranına sahip Tri-hexagon numunesi ile hedeflenen özellikler sağlanabilir. PLA ile üretilen Gyroid (P1) 5 kat yüksek bağıl akma dayanımı sağlamıştır.

TPU malzemeden üretilmiş Gyroid (T1) en yüksek gerçek akma dayanımına ve en yüksek bağıl akma dayanımına sahiptir. Bu durum kafes yapının narin unsurlar ve keskin köşe/radyus gibi unsurlara sahip olmamasından oluşmuştur. TPU'dan üretilmiş Gyroid numunesinin gerçek akma dayanımı bağıl akma dayanımına göre yaklaşık 4 kat fazladır. Karbon elyaf katkılı TPU malzemeden üretilmiş %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon (C3) en yüksek gerçek akma dayanımı ve bağıl akma dayanımını göstermiştir. Ancak karbon elyaf katkılı TPU'dan üretilmiş Gyroid (C1) 5 kat daha yüksek bağıl akma dayanımı vermiştir. Farklı malzeme ve farklı kafes yapıları kullanılarak elde edilen numunelerin %70 gerçek ve bağıl gerinimi Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir. (Şekil 11 ve Şekil 12'deki "X" ekseninde yer alan ifadeler Tablo 4 referans alınarak hazırlanmıştır.)



Şekil 11. PLA numunelerinin maksimum gerinim değerleri



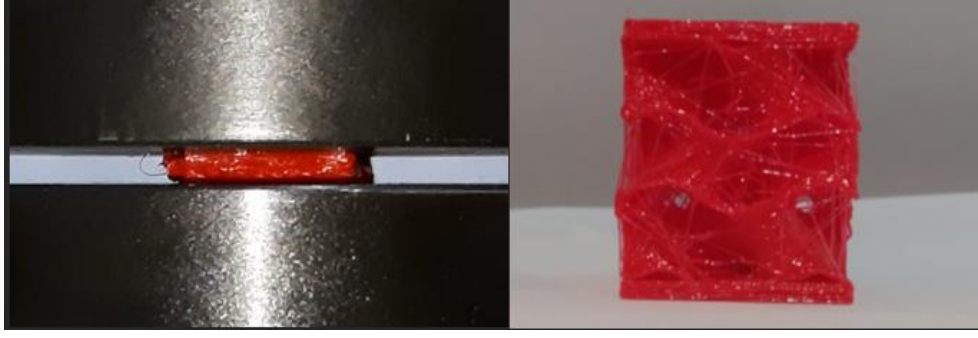
Şekil 12. TPU numunelerinin maksimum gerinim değerleri

PLA'dan üretilen en iyi gerinme değeri doluluk oranına sahip numunesidir (P8). PLA numuneler arasında en yüksek %70 bağıl gerinimi Mode 3 numunesi (P9) göstermiştir. Bağıl ve gerçek %70 gerinim dayanımı arasındaki en yüksek fark 87 MPa ile Mode 3 numunesinde olmuştur. Bağıl ve gerçek %70 gerinim dayanımı arasındaki en yüksek oransal fark ise yaklaşık 5 kat farkla Gyroid (P1) olmuştur.

TPU'dan imal edilen numunelerden, en yüksek %70 gerçek gerinim %30 doluluk oranına sahip geometri Tri-hexagon (T3) olarak belirlenmiştir. %70 bağıl dayanımın en yüksek olduğu numune ise Gyroid numunesi olmuştur. Karbon elyaf katkılı TPU numunelerden en yüksek gerçek %70 gerinimi %30 doluluk oranına sahip Tri-hexagon (C3) göstermiştir. En yüksek %70 bağıl gerinim Gyroid (C1) numunede görülmüştür. Gerçek ve bağıl gerinim arasındaki en yüksek oransal fark 5,8 ile Gyroid numunede olmuştur.

Geri yaylanma

Parçalara uygulanan basma yükünün kalkmasından sonra parça orijinal boyuna geri dönebilir. Geri yaylanma olarak tanımlanan bu durum akma dayanımı, elastik modül ve malzeme geometrisi özelliklerinden etkilenmektedir (Atul ve Babu, 2019). Malzeme üzerindeki yüklemenin kalkması ile kalıcı deformasyonunun olmadığı elastik bölge 1dk-2 saat içinde başlangıç durumuna ulaşmaktadır. TPU ile üretilen Gyroid kafes numunenin basma esnasında ve basmadan 24 saat sonra oluşan geometri Şekil 10'de verilmiştir.



Şekil 13. Gyroid Numunenin Basma Anı ve 24 Saat Sonrası

TPU ile üretilen Gyroid numune boyu 28 mm'dir. Numune basma işleminde 25 mm basılarak boyu 3 mm'ye kadar kısaltılmıştır. Basma işlemi sonrasında ise numune elastomer davranış gösterip geri yaylanmıştır. Geri yaylanma sonucu malzeme yaklaşık 24 saat sonra ilk boyu olan 27,95 mm'ye erişmiştir. Kafes yapıları ile elde edilen mekanik özellikleri ve malzemelerin elastomerik davranışları bir araya geldiğinde bağıl mukavemeti yüksek ve deformasyon oluşmadan fonksiyonel kullanılabilen parçaların elde edilebilmesi mümkündür. (Öteyaka ve ark., 2022)

Sonuç

EYM yöntemi ile PLA, TPU, %1,5 karbon elyaf katkılı TPU malzemelerden elde edilen kafes yapılı basma numuneleri imal edilmiştir. Mekanik özelliklerden bağıl mukavemet, elastisite modülü, akma dayanımı ve maksimum basma dayanımı incelenmiştir.

- 1) Tablo 4'deki verilere göre en yüksek bağıl akma dayanımı değeri %30 doluluk oranına sahip tri-hexagon numunede görülmüştür. Bağıl mukavemet değeri yüksek olan numuneler parça hafifletmede etkin bir rol oynar. Homojen iç yapılarla %70 oranında hafifletilmiş parçaların fonksiyonel uygulamalarda kullanılması ile istenen mekanik özellikler daha az malzeme sarfiyatıyla sağlanabilir.
- 2) TPU ile üretilmiş numuneler kuvvet kaldırıldıktan sonra geri yaylanma etkisi göstererek ilk hallerine geri dönmüştür. Ayrıca, karbon elyaf katkılı TPU ile üretilmiş numunelerde kuvvet kaldırıldıktan sonra yine geri yaylanma etkisi görülmüştür. Ancak karbon elyaf katkısı nedeniyle numunelerin elastisite modülleri yükselmiş ve başlangıç geometrilerine tamamen ulaşmamıştır. %30 doluluk oranına sahip tri-hexagon numuneler kıyaslandığında, %1,5 karbon elyaf katkılı TPU'nun elastik modülü 9 kat, akma dayanımı 4 kat, maksimum basma dayanımında 3 kat artış göstermiştir.
- 3) Malzemenin elastisite modülü yükseldikçe bağıl mukavemetin arttığı gözlemlenmiştir. %1,5 karbon elyaf katkılı TPU malzemelerde bağıl mukavemet, TPU malzemeden daha yüksektir. Yapılan deneyde Tablo 5'deki sonuçlara göre TPU ve karbon elyaf katkılı TPU'da %70 gerinim anındaki bağıl gerilme değeri diğerlerine göre Gyroid numunede daha yüksek

görülmüştür. Bu sebeple iki malzeme için en iyi mekanik özellikleri Gyroid numune göstermiştir.

- 4) Sonraki çalışmalarda Gyroid birim kafes yapısı kullanılarak farklı filament malzemeleri üzerinde denemeler yapılarak daha iyi sonuçlar elde edilmesi hedeflenebilir. Fonksiyonel olarak kullanılan parçaya Gyroid kafes yapı ve TPU malzeme kullanılarak incelenebilir.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Yazar 2 ve Yazar 3 elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve kullanılan malzemelerin temin edilmesi başlıklarında; Yazar 4 yazım denetimi, içerik açısından makalenin kontrol edilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

Kaynakça

- Akdoğan A., Vanlı AS. Natural fiber thermoplastic composites in terms of new production technologies: A review. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 26(1): 30-36.
- Alias NF., Ismail H. An overview of toughening polylactic acid by an elastomer. Polymer-Plastics Technology and Materials 2019; 58(13): 1399-1422.
- Anandkumar R., Babu SR. EYM filaments with unique segmentation since evolution: a critical review. Progress in Additive Manufacturing 2019; 4(2): 185-193.
- Atul ST., Babu ML. A review on effect of thinning, wrinkling and spring-back on deep drawing process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2019; 233(4): 1011-1036.
- Bergström JS., Hayman D. An overview of mechanical properties and material modeling of polylactide (PLA) for medical applications. Annals of Biomedical Engineering 2016; 44(2): 330-340.
- Cheng L., Liang X., Belski E., Wang X., Sietins JM., Ludwick S., To A. Natural frequency optimization of variable-density additive manufactured lattice structure: theory and experimental validation. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2018; 140(10): 1-16.

- Ergene B., Bolat Ç. An experimental investigation on the effect of test speed on the tensile properties of the PETG produced by additive manufacturing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 2022; 6(2): 250-260.
- Ergene B., Yalçın B. Eriyik yığma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücreli yapıların mekanik performanslarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2022; 38(1): 201-218.
- Ergene B., Ispartalı H., Karakılınç U. Üç boyutlu baskı ile çeşitli katman yüksekliklerinde üretilen PET-G parçaların farklı sıcaklıklardaki ağırlık düşürme darbe yanıtı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2023; 38(3): 1345-1360.
- Ergene B., Şekeroğlu 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* 2021; 15(2): 8169–8177.
- Feng J., Fu J., Lin Z., Shang C., Li B. A review of the design methods of complex topology structures for 3D printing. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* 2018; 1(1): 1-16.
- Gordelier TJ., Thies PR., Turner L., Johanning L. Optimising the EYM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. *Rapid Prototyping Journal* 2019; 25(6): 953-971.
- Helou M., Kara S. Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 2018; 31(3): 243-261.
- Holmes DW., Singh D., Lamont R., Daley R., Forrestal DP., Slattery P., Pickering E., Paxton NC., Powell SK., Woodruff MA. Mechanical behaviour of flexible 3D printed gyroid structures as a tuneable replacement for soft padding foam. *Additive Manufacturing* 2022; 50: 102555.
- Karkun MS., Dharmalingam S. 3D printing technology in aerospace industry—A review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* 2022; 9(2): 4.
- Korkmaz ME., Gupta MK., Robak G., Moj K., Krolczyk GM., Kuntoğlu M. Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes* 2022; 81: 1040-1063.
- Korshunova N., Alaimo G., Hosseini SB., Carraturo M., Reali A., Niiranen J., Auricchio F., Rank E., Kollmannsberger S. Image-based numerical characterization and experimental validation of tensile behavior of octet-truss lattice structures. *Additive Manufacturing* 2021; 41: 101949.
- Kristiawan RB., Imaduddin F., Ariawan D., Arifin Z. A review on the fused deposition modeling (EYM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering* 2021; 11(1): 639-649.
- Kumar A., Collini L., Daurel A., Jeng JY. Design and additive manufacturing of closed cells from supportless lattice structure. *Additive Manufacturing* 2020; 33: 101168.
- Kummert C., Schmid HJ., Risse L., Kullmer G. Mechanical characterization and numerical modeling of laser-sintered TPE lattice structures. *Journal of Materials Research* 2021; 36(16): 3182-3193.

- Ling C., Cernicchi A., Gilchrist MD., Cardiff P. Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading. *Materials & Design* 2019; 162: 106-118.
- Liu J., Gaynor AT., Chen S., Kang Z., Suresh K., Takezawa A., Li L., Kato J., Tang J., Wang CCL., Cheng L., Liang X., To AC. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 2018; 57(6): 2457-2483.
- Murariu M., Dubois P. PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews* 2016; 107: 17-46.
- Nasrullah AIH., Santosa SP., Dirgantara T. Design and optimization of crashworthy components based on lattice structure configuration. In *Structures* 2020; 26: 969-981.
- Nazir A., Abate KM., Kumar A., Jeng JY. A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019; 104(9): 3489-3510.
- Öteyaka MÖ., Aybar K., Öteyaka HC. A comparative study of the effect of polyurethane nanofiber and powders filler on the mechanical properties of carbon fiber and glass fiber composites. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2022; 28(1): 51-57.
- Pan C., Han Y., Lu J. Design and optimization of lattice structures: A review. *Applied Sciences* 2020; 10(18): 6374.
- Pereira T., Kennedy JV., Potgieter J. A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing* 2019; 30: 11-18.
- Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciuc F., Marinescu R. EYM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing* 2018; 69: 157-166.
- Qi HJ., Boyce MC. Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes. *Mechanics of Materials* 2005; 37(8): 817-839.
- Sattar R., Kausar A., & Siddiq M. Advances in thermoplastic polyurethane composites reinforced with carbon nanotubes and carbon nanofibers: A review. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 2015; 31(2): 186-224.
- Singh R., Kumar R., Singh M, Preet P. On compressive and morphological features of 3D printed almond skin powder reinforced PLA matrix. *Materials Research Express* 2020; 7(2): 025311.
- Slapnik J., Pulko I., Rudolf R., Anžel I., Brunčko M. Fused filament fabrication of Nd-Fe-B bonded magnets: Comparison of PA12 and TPU matrices. *Additive Manufacturing* 2021; 38: 101745.
- Solomon IJ., Sevel P., Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in EYM. *Materials Today: Proceedings* 2021; 37: 509-514.
- Tamburrino F., Graziosi S., Bordegoni M. The design process of additively manufactured mesoscale lattice structures: a review. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 2018; 18(4): 040801.

- Tao Y., Kong F., Li Z., Zhang J., Zhao X., Yin Q., Xing D., Li P. A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology* 2021; 15: 4860-4879.
- Yáñez A., Cuadrado A., Martel O., Afonso H., Monopoli D. Gyroid porous titanium structures: a versatile solution to be used as scaffolds in bone defect reconstruction. *Materials & Design* 2018; 140: 21-29.