



Academic Research Journal of Technical Vocational Schools

artes@cumhuriyet.edu.tr

Founded: 2022

Available online, ISSN: 2822-5880

Publisher: Sivas Cumhuriyet University

Investigation of Tensile Strengths of Honeycomb and T-Rib Lattice Structures Obtained by Additive Manufacturing Method Using Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) Material

Cem Ertek^{1,a*}¹Independent Researcher, Sivas, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 28/04/2025

Accepted: 03/06/2025

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) offers unique advantages in producing complex geometries, hollow structures, and lattice frameworks that are difficult to achieve with conventional methods. Fused Deposition Modelling (FDM) is one of the most widely used AM techniques, utilizing various thermoplastic polymers. Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) is commonly preferred in FDM due to its high impact resistance, chemical durability, and ease of processing. This study investigates the mechanical properties of Honeycomb and T-Rib lattice structures fabricated via FDM using PETG material. These lattice structures provide benefits such as lightweight design, energy absorption, and customizable mechanical performance, making them suitable for diverse engineering applications. It is known that manufacturing parameters, including layer thickness, printing temperature, and printing speed, significantly influence mechanical properties. In the first phase, Honeycomb and T-Rib designs with 0.8 mm edge width and 4 mm edge length were modeled using CAD software. The designs were integrated into tensile test specimens compliant with ISO 527-2-2012 standards, including fully solid specimens for comparison. Specimens were produced with 100% infill, 0.4 mm nozzle diameter, 0.18 mm layer thickness, 90 mm/s printing speed, 70 °C build plate temperature, and 235 °C printing temperature. Tensile tests conducted at 1 mm/min revealed that the Honeycomb structure exhibited a yield strength of 6.9 MPa, ultimate tensile strength of 7.11 MPa, and tensile modulus of 332.49 MPa, whereas the T-Rib structure showed values of 14.6 MPa, 15.94 MPa, and 634.60 MPa, respectively. Although the lattice edge dimensions were identical, differences in unit cell geometry led to significant variations in mechanical performance. One-way Analysis of Variance (ANOVA) indicated statistically significant differences ($p < 0.05$) between the lattice types, particularly in ultimate tensile strength and tensile modulus. These results confirm that lattice geometry affects material behavior not only physically but also statistically.

Keywords: Additive manufacturing, FDM, lattice structure, PETG, strength performance.

Eklemeli İmalat Yöntemi ile Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) Malzeme Kullanılarak Elde Edilen Honeycomb ve T-Rib Kafes Yapıların Çekme Dayanımlarının Araştırılması

Süreç

Geliş: 28/04/2025

Kabul: 03/06/2025

Öz

Eklemeli İmalat (Eİ), geleneksel yöntemlerle üretilmeyen karmaşık geometriler, içi boş ve kafes yapılar imalatında önemli avantajlar sağlar. Ergiyik Biriktirmeli Modelleme (Fused Deposition Modelling - FDM), termoplastik polimerlerin kullanıldığı en yaygın Eİ yöntemidir. Polietilen Tereftalat Glikol (PETG), yüksek darbe dayanımı, kimyasal direnç ve işlenebilirliği sayesinde FDM’de sık tercih edilen bir malzemedir. Bu çalışmada, FDM ve PETG kullanılarak imal edilen Honeycomb ve T-Rib kafes yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu kafes yapılar hafiflik, enerji emilimi ve özelleştirilebilir mekanik performansları nedeniyle mühendislikte yaygın uygulanmaktadır. Kafes yapıların katman kalınlığı, baskı sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametrelerin mekanik özelliklere etkisi bilinmektedir. Çalışmada, 0,8 mm ayırıt genişliği ve 4 mm ayırıt uzunluğuna sahip Honeycomb ve T-Rib tasarımları CAD ortamında hazırlanmış ve ISO 527-2-2012 standardına uygun çekme numuneleri tasarlanmıştır. Numuneler, %100 doluluk oranı, 0,4 mm nozul çapı, 0,18 mm katman kalınlığı, 90 mm/s baskı hızı, 70 °C tabla ve 235 °C baskı sıcaklığı ile FDM yöntemiyle üretilmiştir. 1 mm/dak çekme testi sonucunda, Honeycomb’un akma gerilmesi 6,9 MPa, en büyük çekme gerilmesi 7,11 MPa ve elastisite modülü 332,49 MPa iken, T-Rib için bu değerler sırasıyla 14,6 MPa, 15,94 MPa ve 634,60 MPa olarak ölçülmüştür. Her iki yapıdaki ayırıt boyutları benzer olsa da geometrik farklılıklar mekanik performansta belirgin farklara yol açmıştır. Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) sonuçları, mekanik özellikler açısından yapı tipi etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir ($p < 0,05$). Bu durum, kafes yapının geometrisinin malzeme davranışlarını istatistiksel olarak da etkilediğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, FDM, kafes yapı, PETG, mukavemet performansı.

Copyright



This work is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International License

^a cemertek@gmail.com

^{id} <https://orcid.org/0000-0001-5686-7664>

How to Cite: Ertek, C. (2025). Investigation of Tensile Strengths of Honeycomb and T-Rib Lattice Structures Obtained by Additive Manufacturing Method Using Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) Material. Academic Research Journal of Technical Vocational Schools, 4(1):39-48

Giriş

Eklemeli imalat (Eİ), döküm ve talaşlı imalat gibi geleneksel imalat tekniklerinden farklı olarak malzemenin katman katman oluşturulmasına dayanmaktadır (Patil vd., 2024). Karmaşık geometrilerin kalıp gerektirmeden düşük hacimlerde ve düşük maliyetle imal edebilmesi Eİ'nin avantajlarından biridir (Ali vd., 2024). Eİ son yıllarda büyük ilgi görmüştür, ancak Eİ tekniklerinden Stereolitografi (SLA), Ergiyik Biriktirmeli Modelleme (FDM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) 1980'lere dayanmaktadır. O zamandan beri, FDM teknolojisi olgunlaşmıştır ve baskı için farklı termoplastik türleri kullanılmıştır (Grigoriev vd., 2024 - Srinivasan vd., 2020). Düşük maliyetli çeşitli filamentler ve FDM yazıcılar, güvenli kullanım ve operasyon kolaylığının yanı sıra bu teknolojinin hızlı gelişiminin nedenleri olmuştur (Pandžić vd. 2022). Ergimiş Filamentle İmalat (FFF) olarak da bilinen FDM, hammaddenin %90'ını kullanarak neredeyse net şekilli parçalar oluşturur ve bu nedenle çevre dostu bir süreç olarak kabul edilebilir (Subbarao vd., 2021). Karbon fiber takviyeli polietilen tereftalat glikol (PETG) bazlı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde dolgu deseni, yüzdesi ve katman kalınlığı gibi parametrelerin etkileri, sadece deneysel olarak değil aynı zamanda sayısal olarak da araştırılmıştır (Alarifi vd., 2023). PETG, Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polilaktik Asit (PLA) gibi polimer bazlı farklı filamentler kullanarak FDM ile farklı kafes tasarımları (Hacim merkezli kübik, yüz merkezli kübik ve jiroid) imal edilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir (Güdür vd., 2023). Bir başka çalışmada, programlama koşullarının, geometrinin ve baskı parametrelerinin FDM baskılı PETG parçalarının çekme performansı ve şekil dönüşümü üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Soleyman vd., 2022). PETG filament kullanarak FDM ile elde edilen parçada, dolgu yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğü ve çekme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dolgu yoğunluğundaki artışın, çekme mukavemetinde artma, yüzey pürüzlülüğünde azalma sağladığını belirtmişlerdir (Srinivasan vd., 2020). Aramid elyaf takviyeli PETG (PETG-KF) kompozitinin, Taguchi L16 ortogonal dizisini kullanarak dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı, baskı hızı ve yönlendirme gibi FDM yöntemi ile imalatla çeşitli parametreleri, optimize edilmeye çalışılmıştır (Kuchampudi vd., 2024). PETG'nin plastisitesinin ve şekil hafızası performansının biyoyumlu ve toksik olmayan bir kopolimer olan Etilen-Vinil Asetat (EVA) ilavesiyle artırılması araştırılmıştır. PETG-EVA karışımlarını elde etmek için bileşenlerin ağırlık yüzdelereğini değiştirmişlerdir (Ali vd., 2024). Farklı dolgu türleri (ızgara, tarak ve üçgen) kullanarak PLA ve PETG'nin FDM ile kullanımında, malzeme tasarrufu olasılığı araştırılmıştır. Ayrıca bu dolgu türleri ile mukavemet değişimi de analiz edilmiştir (Grigoriev vd., 2024). Karbon fiber takviyeli PETG'nin FDM baskısını ve farklı dolgu desenlerinin ve yüzdelereğini basma dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Patil vd., 2024).

Yapılan literatür araştırmalarında, FDM yöntemi ile PETG malzeme kullanarak Honeycomb ve T-rib kafes yapıların çekme testi sonucu elde edilebilecek mekanik değerlerinin kıyaslandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışma ile söz konusu kafes yapıların her ikisinde de ayırıt kalınlıkları, imalat değişkenleri (katman kalınlığı ve baskı sıcaklığı, baskı hızı vb.) sabit tutularak geometrik farklılıklarının, mekanik özellikleri üzerine etkileri kıyaslanarak incelenmiş ve literatüre bu yönde bir katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Materyal ve Metot

PETG

Eİ, özellikle FDM yöntemiyle, karmaşık geometrilerin düşük maliyetle ve hızlı imal edilebilmesini sağlamaktadır. PETG, FDM'de yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polyesterdir. PETG, PLA'nın kolay işlenebilirliği ile ABS'nin mukavemetini birleştiren özellikleri sayesinde prototipleme, fonksiyonel parça imalatı ve özel tasarımlar için tercih edilmektedir. PETG, PET'nin glikol ile modifiye edilmiş bir türevidir ve amorf yapısı sayesinde kristalleşme eğilimi düşüktür, bu da eklemeli imalatla işlenmesini kolaylaştırır (Mercado-Colmenero vd., 2020). Başlıca özellikleri şunlardır:

- **Mekanik Dayanıklılık:** PETG, yüksek darbe direnci, çekme mukavemeti (yaklaşık 31-69 MPa) ve esneklik sunar, bu özellikleriyle fonksiyonel parçalar için oldukça uygun bir malzemedir (Raja vd., 2024).
- **Kimyasal ve Termal Direnç:** Kimyasal maddelere (yağlar, çözücüler) ve 70-80°C'ye kadar sıcaklıklara karşı dayanıklıdır, bu da endüstriyel uygulamalarda avantaj sağlar (Subbarao vd., 2021).
- **Biyoyumluluk:** Sterilizasyon direnci ve biyoyumluluğu, PETG'yi biyomedikal uygulamalarda, örneğin kemik doku mühendisliği iskeleleri için uygun kılar (Hassan vd., 2020).
- **Geri Dönüştürülebilirlik:** PETG'nin geri dönüştürülmesi üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemenin mekanik geri dönüşüm süreçlerine uygun olduğunu göstermektedir. Ancak, geri dönüşüm döngüleri arttıkça viskozite ve elastikiyette azalma gözlemlenmiş, buna rağmen, üç ekstrüzyon döngüsünden sonra üretilen parçaların mekanik özellikleri, ticari filamentlerle karşılaştırılabilir düzeyde kalmıştır (Seno vd., 2024).
- **Kolay İşlenebilirlik:** PETG'nin işlenebilirliği, sadece 3D baskı ile sınırlı değildir. Bu malzeme, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi geleneksel plastik işleme yöntemleriyle de kolayca işlenebilir. Bu özellikleri sayesinde, PETG, çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir (Sepahi vd., 2021). 220-260°C ekstrüzyon sıcaklığı ve 75-90°C ısıtılmış tabla ile PLA'ya yakın kolaylıkta basılır, ancak ABS'den daha az büzülme gösterir (Özen vd., 2021).

Başlıca Uygulama Alanları

- **Biyomedikal:** PETG kafes yapılar, kemik doku mühendisliği iskelelerinde ve ortopedik desteklerde kullanılır. Biyouyumluluğu ve düşük su emilimi (%0.15-0.3), osseointegrasyon için uygunluk sağlar (Hassan vd., 2020).
- **Otomotiv:** Hafif ve dayanıklı kafes yapılar, iç trim parçaları, koruyucu kapaklar ve prototip bileşenlerde kullanılır. PETG kimyasal direnci sayesinde, yağ ve yakıt temasına dayanıklıdır (Hsueh vd., 2021).
- **Endüstriyel Uygulamalar:** PETG kafes yapılar, ısı değiştiricilerde ve akustik panellerde malzeme verimliliği sağlar. Düşük yoğunluklu tasarımlar, enerji tasarrufu ve maliyet avantajı sunar (Hsueh vd., 2021).

PETG malzemeye ait mekanik değerler Çizelge 1'de verilmektedir (MatWeb, 2025).

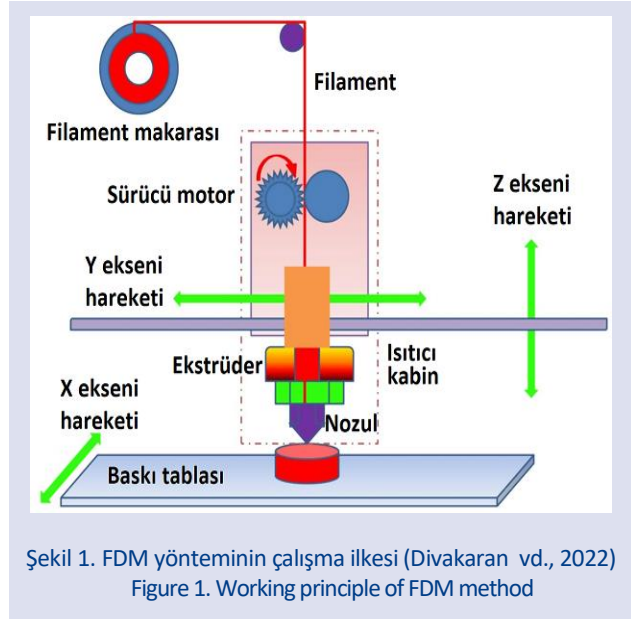
Çizelge 1. PETG malzemenin mekanik değerleri
Table 1. Mechanical values of PETG material.

	Çekme elastisite modülü (MPa)	En büyük çekme gerilmesi $\sigma_{\max}$ (MPa)	Akma Gerilmesi σ_{Ak} (MPa)
PETG	1100 – 20300	20 - 100	23 - 101

FDM

FDM(Fused Deposition Modeling: Ergiyik Biriktirmeli Modelleme) yönteminde imalat için çeşitli termoplastik filamentler (ipliksi hale getirilmiş termoplastikler) kullanılmaktadır. Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Butadien Stiren (ABS) ve Akrilonitril Stiren Akrilat (ASA), bu yöntemde kullanılan geleneksel malzemelerdir. Bunların yanı sıra, Polieter Eter Keton (PEEK), Polieterimid (PEI) ve Polifenilsülfon (PPSU) gibi malzemeler de yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve mekanik özellikler gerektiren endüstriyel uygulamalarda FDM'de kullanılan yüksek performanslı termoplastiklerdir. Son yıllarda ahşap tozu, metal tozu, karbon fiber ve cam elyaflar takviyeler gibi farklı malzemeler eklenerek kompozit filamentlerle de uygulamalar yapılmaktadır.

FDM yönteminde, termoplastik filament bir besleme mekanizması aracılığıyla ısıtılmış ekstrüder kafasına iletilir. Ekstrüder kafası, filamentin türüne uygun bir ergime sıcaklığına kadar ısıtılır ve ergiyik durumuna gelen malzeme, hassas şekilde hareket eden nozuldan ince bir iplikçik halinde ilk katmanı oluşturmak üzere imalat platformu üzerine, sonraki katmanlarda ise bir önceki katmanın üzerine ekstrüde edilir. Nozulun X,Y ve Z eksenlerindeki hareketleri bilgisayar kontrollü bir sistem tarafından belirlenir. X-Y düzlemindeki hareketi, nesnenin her bir katmanının geometrisini oluşturur. Z eksenindeki hareket ise her katman tamamlandığında platformun veya ekstrüder kafasının dikey yönde yer değiştirmesiyle sağlanır. Bu katmanlı yığılma süreci, nihai üç boyutlu nesne elde edilene kadar devam eder (Yang vd., 2020).



Birim Hücreler

Birim hücre, kafes yapıların temel yapı taşıdır ve üç boyutlu uzayda tekrar eden en küçük geometrik birimdir (Görgülüarslan, 2021). Birim hücrelerin tasarımı, kafes yapıların mekanik özelliklerini özelleştirmede kritik bir rol oynar (Gülcan, 2021). Birim hücreler, kiriş ve kolonların düğüm noktalarında birbirine bağlandığı içi boş ünitelerdir. En yaygın kullanılan birim hücre tipleri şunlardır:

Kübik tabanlı birim hücreler

- **Basit Kübik (Simple Cubic):** En temel birim hücredir ve düşük mekanik dayanımına rağmen üretim kolaylığı sağlar (Park vd., 2021).
- **Hacim Merkezli Kübik (BCC):** Merkezde ek bir düğüm noktası ile yüksek dayanım sunar (Görgülüarslan, 2021).
- **Yüzey Merkezli Kübik (FCC):** Homojen mekanik özellikler sağlar (Park vd., 2021).

Üçlü periyodik minimal yüzey (TPMS) Tabanlı Birim Hücreler

TPMS tabanlı birimler, matematiksel olarak tanımlı, sıfır ortalama eğrilığe sahip yüzeylerdir ve yüksek yüzey-alan-hacim oranıyla dikkat çeker (Yan vd., 2021). TPMS yapılar, biyomedikal implantlar, enerji soğurma ve ısı transferi uygulamalarında kullanılır. Başlıca TPMS tabanlı birim hücreler şunlardır:

- **Gyroid:** Minimal yüzeyli bir TPMS yapısı olup biyomedikal implantlarda yüksek osseointegrasyon sağlar (Chouhan vd., 2024).
- **Schwarz:** Yüksek gözeneklilik ve ısı transferi avantajı sunar (Sathishkumar vd., 2023).
- **Diamond TPMS:** Yüksek mekanik dayanım ve hafiflik sunar, özellikle yapısal optimizasyonlarda tercih edilir (Yan vd., 2021).

Elmas (Diamond) Tabanlı Birim Hücreler

- **Elmas yapılar:** TPMS dışı, tetrahedral düzenlemesiyle yüksek dayanım-ağırlık oranı sağlar ve havacılıkta tercih edilir (Shah vd., 2022).

Kafes Yapılar

Eİ, karmaşık geometrilere sahip hafif ve dayanıklı yapılar elde etme imkânı sunarak mühendislik uygulamalarında devrim olmuştur. Kafes yapılar, düzenli olarak tekrarlanan birim hücrelerden meydana gelen, iç boşlukları bulunan yapılardır. Hafiflikleri, yüksek özgül mukavemetleri ve enerji soğurma kapasiteleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi alanlarda geniş uygulama bulmuştur (Yang vd., 2025). Kafes yapılar, birim hücrelerin geometrik parametrelerine bağlı olarak farklı mekanik özellikler sergiler (Gülcan, 2021). Hücre geometrisi (örneğin, kübik, petek, gyroid, diamond), göreceli yoğunluk (malzeme hacminin toplam hacme oranı) ve hücre boyutu gibi tasarım parametreleri, kafes yapıların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler (Ali vd., 2022). Tasarım sürecinde, uygulamanın gerektirdiği mukavemet, rijitlik, ağırlık ve maliyet gibi faktörler dikkate alınarak en uygun kafes yapısı ve parametreleri belirlenir (Yang vd., 2025). Birim hücre boyutu, gözeneklilik ve dikme oryantasyonu gibi faktörler performansı etkiler.

Kafes Yapıların Özellikleri

Kafes yapılar, gözenekli ve düzenli geometrik yapıları sayesinde aşağıdaki özellikleri sunar:

- **Yüksek özgül mukavemet:** Düşük yoğunluklarına rağmen yüksek dayanım sağlarlar.
- **Enerji soğurma kapasitesi:** Darbelere karşı yüksek enerji sönümleme özelliği gösterirler (Li vd., 2022).
- **Isı transferi:** Geniş yüzey alanları sayesinde etkili ısı transferi sağlarlar.
- **Biyoyumluluk:** Gözenekli yapıları, doku entegrasyonu için uygundur (Liu vd., 2024).

Bu özellikler, özellikle TPMS tabanlı kafes yapılar kullanıldığında daha belirgin hale gelmektedir. Ayrıca, imalat değişkenlerinin ve birim hücre geometrisinin bu özellikler üzerinde doğrudan etkisi vardır (Liu vd., 2024).

Kafes Yapı Türleri

Kafes yapılar, kullanılan birim hücre tipine göre sınıflandırılır:

- **Strut tabanlı yapılar:** Hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik, Octet-Truss gibi düğüm ve çubuklardan oluşan yapılar.
- **Yüzey tabanlı yapılar:** TPMS yapıları, örneğin Gyroid ve Schwarz yüzeyleri.
- **Biyo-esinlenmiş yapılar:** Doğadaki yapılar örnek alınarak tasarlanan, özelleştirilebilir anizotropiye sahip yapılardır (Boda vd., 2024).

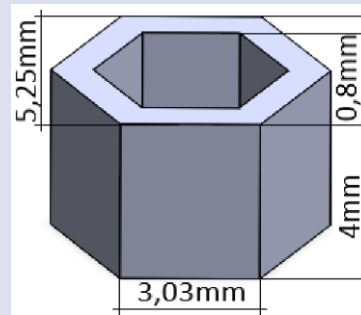
Strut tabanlı yapılar çoğunlukla mekanik dayanım açısından avantaj sunarken, yüzey tabanlı yapılar daha yüksek enerji emilimi ve biyoyum potansiyeli ile öne çıkar.

Kafes yapılar, hafiflik ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi avantajlarıyla eklemeli imalatla öne çıkarken, PETG'nin bu yapılarla kullanımı biyomedikal, otomotiv ve endüstriyel uygulamalarda yenilikçi çözümler sunmaktadır.

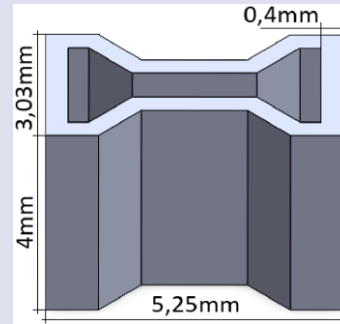
Deney numunelerinin tasarımı

CAD programı ile deneysel çalışmada kullanılmak üzere ayırıt genişliği 0,8mm; ayırıt uzunluğu 4mm olan Honeycomb (Şekil 2) ve ayırıt genişliği 0,4mm; ayırıt

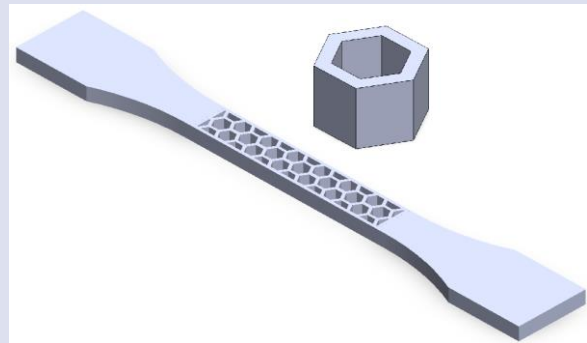
uzunluğu 4mm olan T-rib (Şekil 3) geometrilerinde farklı iki birim hücre tasarlandı. Bu birim hücrelerin birleşiminden oluşan kafes yapılar ve ISO 527-2-2012 (Plastics-Determination of Tensile properties) standardına uygun kafes yapılı çekme numuneleri tasarlandı. Kıyaslamanın doğru olabilmesi için T-rib birim hücrelerle kafes yapı oluşturulurken 0,4mm ayırıt genişlikleri yan yana birleştirilerek 0,8mm ayırıt genişliği elde edildi ve böylece Honeycomb birim hücrelerle oluşturulan kafes yapıların ayırıt genişlikleri ile eşitlendi (Şekil 4-5). Ayrıca, kafes yapılı deney numunelerinin imalatında kullanılacak PETG malzemenin, gereken mekanik değerlere sahip olup olmadığını belirleyebilmek için ISO 527-2-2012 standardında verilen ölçülere uygun içi dolu çekme numunesi de CAD programında tasarlandı (Şekil 6).



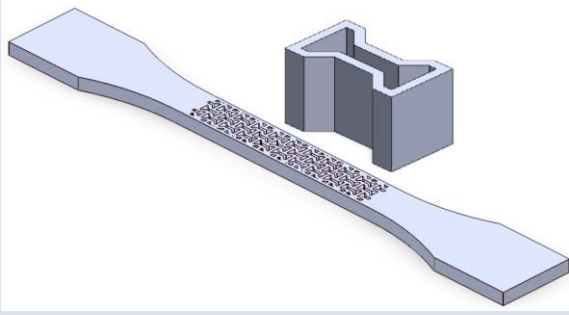
Şekil 2. Honeycomb birim hücre
Figure 2. Honeycomb unit cell



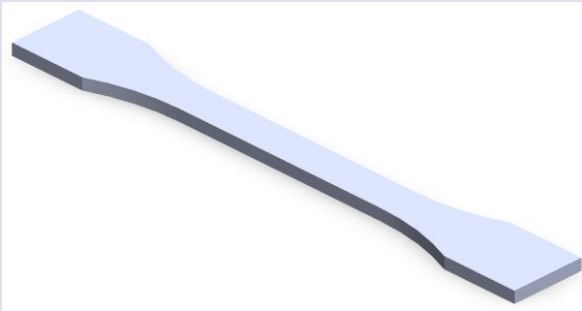
Şekil 3. T-rib birim hücre
Figure 3. T-rib unit cell



Şekil 4. T-rib birim hücre
Figure 4. T-rib unit cell



Şekil 5. T-rib birim hücre ve T-rib kafes yapılı çekme testi numunesi tasarımları
Figure 5. T-rib unit cell and T-rib lattice structured tensile test specimen designs



Şekil 6. ISO 527-2-2012 standardına uygun tam dolu çekme testi numunesi
Figure 6. Fully loaded tensile test specimen in accordance with ISO 527-2-2012 standard

Honeycomb ve T-rib kafes yapılarını kıyaslamada boşluk oranları (Gözenek yoğunlukları) değerleri ele alınabilir. Bunun için gerekli hesaplamalar, Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak yapılır.

$$V_{TGY} = V_D - V_{GH} \quad (1)$$

$$\phi (\% \text{ Gözenek Yoğunluğu}) = (V_{TGY} / V_D) \times \%100 \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan dolu ve kafes yapılı hacimler, tasarımların yapıldığı CAD programı ile hesaplatıldı. Eşitliklerde kafes yapılara ait değerler: V_D : Dolu hacim, V_{GH} : Gözenekli hacim, V_{TGY} : Toplam gözenek yoğunluğu ve ϕ : % Gözenek yoğunluğu şeklindedir (Top, 2019).

Boşluk oranlarına ait veriler ve hesaplamalar Çizelge 2'de verildi.

Çizelge 2. PETG malzemenin mekanik değerleri
Table 2. Mechanical values of PETG material.

Çekme Numuneleri	V_D (mm ³)	V_{GH} (mm ³)	V_{TGY} (mm ³)	ϕ (%)
Dolu	8607,58	0	8607,58	100
Honeycomb	8607,58	7070,97	1536,61	17,85
T-rib	8607,58	7536,76	1070,82	12,44

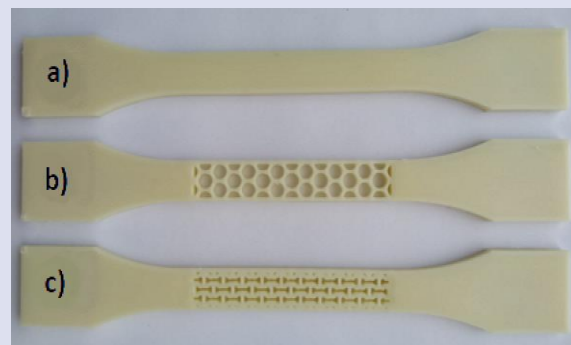
Çizelge 2'deki veriler ve hesaplamalar sonucunda Honeycomb ve T-rib kafes yapıların ayırıt genişlik ve uzunlukları her ne kadar aynı olsa da boşluk oranları arasında geometri farklılıklarından kaynaklanan bir fark olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. PETG çekme numunelerinin imalat parametreleri.
Table 3. Manufacturing parameters of PETG tensile specimens.

Katman yüksekliği (mm)	Baskı hızı (mm/s)	Dolgu oranı (%)	Nozul çapı (mm)	Nozul sıcaklığı (°C)	Tabla sıcaklığı (°C)
0,18	90	100	0,4	230	70



Şekil 7. PETG malzeme kullanılarak FDM yöntemiyle deney numunelerinin imalatı
Figure 7. Manufacturing of test specimens using PETG material using the FDM method



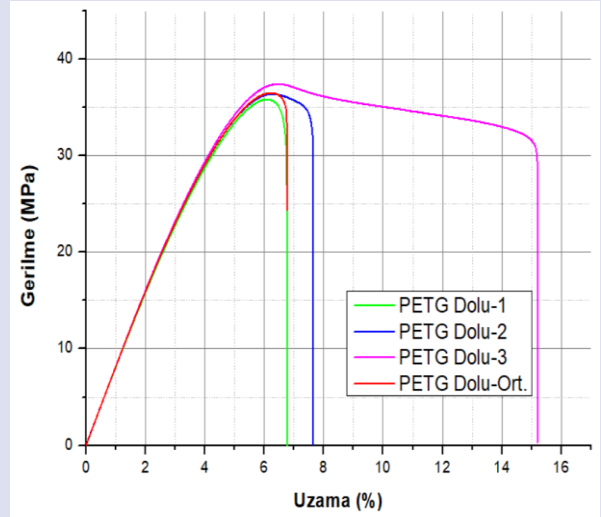
Şekil 8. PETG malzemeden imal edilmiş a) Dolu b) Honeycomb c) T-rib, test öncesi çekme testi numuneleri
Figure 8. Manufacturing of test specimens using PETG material using the FDM method Tensile test specimens made of PETG material a) Solid b) Honeycomb c) T-rib, before testing.

Numunelere uygulanan çekme testi

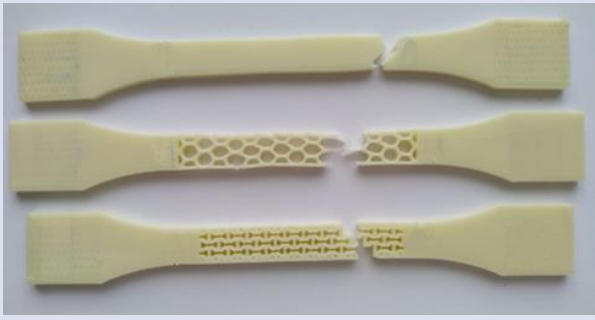
İmalatları tamamlanan deney numunelerine ISO 527-2-2012 standardında belirtildiği gibi 1mm/dak hızında çekme testi uygulandı (Şekil 9-10).



Şekil 9. PETG Numunelere çekme testi uygulaması
Figure 9. Tensile test application on PETG specimens



Şekil 11. Dolu numunelere ait Gerilme-Uzama grafikleri
Figure 11. Strength-Strain graphs of filled specimens



Şekil 10. PETG malzemeden imal edilmiş a)Dolu b) Honeycomb c) T-rib test sonrası çekme testi numuneleri.

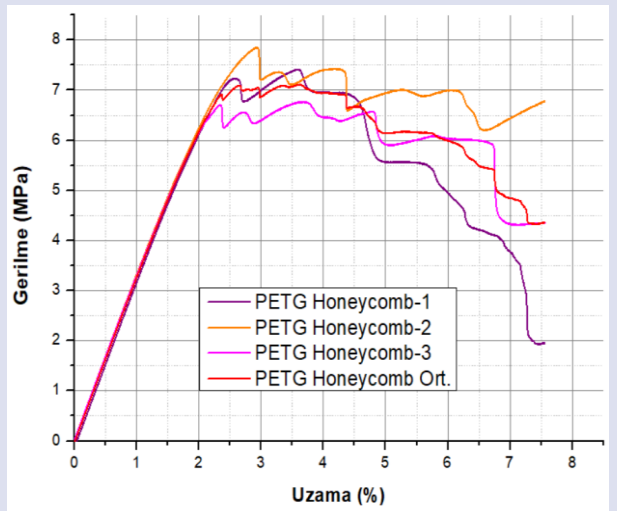
Figure 10. Tensile test specimens made of PETG material
a) Solid b) Honeycomb c) T-rib, after testing.

Şekil 12’de Honeycomb kafes yapıya sahip üç adet numuneye uygulanan çekme testi sonuçlarına ve bu sonuçların ortalamalarına ait Gerilme (MPa)-Uzama (%) grafikleri verilmektedir. PETG Honeycomb yapılar arasında Honeycomb-1 yüksek dayanım (yaklaşık 7,8 MPa) sağlarken, Honeycomb-2 ve -3 daha esnek bir davranış sergilediği görüldü. Honeycomb-Ort, bu çeşitliliği ortalama olarak hem dayanım (yaklaşık 6,7-7,8 MPa civarı) hem de uzama kapasitesi (%6-7) açısından dengeli bir malzeme performansı ortaya koyduğu kabul edilebilir. Honeycomb-Ort için en büyük gerilme değeri, ham test verilerinden yararlanarak 7,11 MPa olarak belirlendi ve Çizelge 4’te verildi. Ortalama eğri, malzemenin tipik kullanımda beklenen mekanik davranışını temsil edebilir ve tasarım optimizasyonu için referans olabilir.

Bulgular

Çekme testi sonucunda dolu, Honeycomb ve T-rib numunelere ait Gerilme (σ)-Uzama (%) grafikleri Şekil11-12-13’te verilmektedir.

Şekil 11’de üç adet dolu numuneye uygulanan çekme testi sonuçlarına ve bu sonuçların ortalamalarına ait Gerilme (MPa)-Uzama (%) grafikleri verilmektedir. Numunelerin tamamı elastik bölgede benzer eğim göstermekte, bu da elastik modüllerinin birbiriyle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Maksimum gerilme değerleri yaklaşık 32–40 MPa aralığında değişmektedir. Bu değer, ham test verilerinden yararlanarak 36,51 MPa olarak belirlendi ve Çizelge 4’te verildi. Numunelerden ikisi maksimum gerilme sonrası ani kırılma göstermişken, bir numune (%15’e kadar uzama) daha sünek davranış sergilemiştir. Ortalama değerler eğrisi incelendiğinde, PETG dolu numunelerin yüksek gerilme dayanımına sahip olmakla birlikte, belirli oranda sünek deformasyon kapasitesine de sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, PETG’nin darbe emici özelliğe sahip olduğunu ve gerilme altındaki yapı elemanlarında güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 12. Honeycomb numunelere ait Gerilme-Uzama grafikleri

Figure 12. Yield point determination according to the average value graph of filled specimens

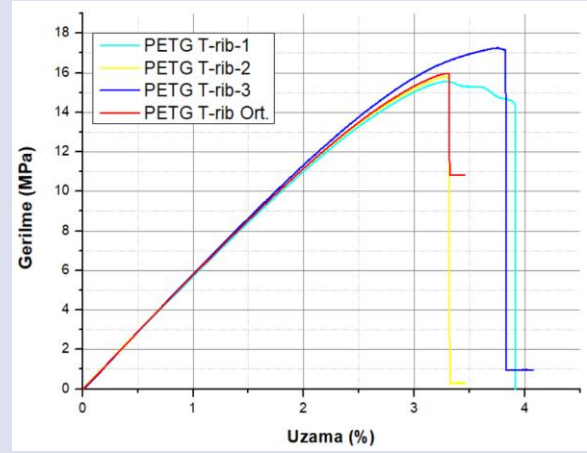
Şekil 13'te T-rib kafes yapıya sahip üç adet numuneye uygulanan çekme testi sonuçlarına ve bu sonuçların ortalamalarına ait Gerilme (MPa)-Uzama (%) grafikleri verilmektedir. PETG T-rib yapılar, Honeycomb yapılara kıyasla genel olarak daha yüksek gerilme dayanımı gösterdiği belirlendi (17,2 MPa'a kadar). T-rib-1 yüksek başlangıç dayanımıyla öne çıkarken, T-rib-2 ve -3 daha esnek bir davranış sergiledi. T-rib Ort için en büyük gerilme değeri, ham test verilerinden yararlanarak 15,94 MPa olarak belirlendi ve Çizelge 4'te verildi. Ayrıca %3 uzama ile T-rib Ort'un dengeli bir malzeme performansı sağladığı görüldü. Bu durumda, T-rib tasarımının daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu, ancak esneklik açısından Honeycomb-Ort'a kıyasla daha sınırlı olduğu söylenebilir.

Şekil 11-12 ve 13'te Gerilme (MPa)-Uzama (%) grafikleri verilen içi dolu, Honeycomb ve T-rib kafes yapıları numunelerin belirgin bir akma sınır görülmemektedir. Numunelerin akma dayanımlarının tespiti için Şekil 14-15 ve 16'dan yararlanıldı ve 0.2% kalıcı uzama (offset yield strength) yöntemi kullanıldı.

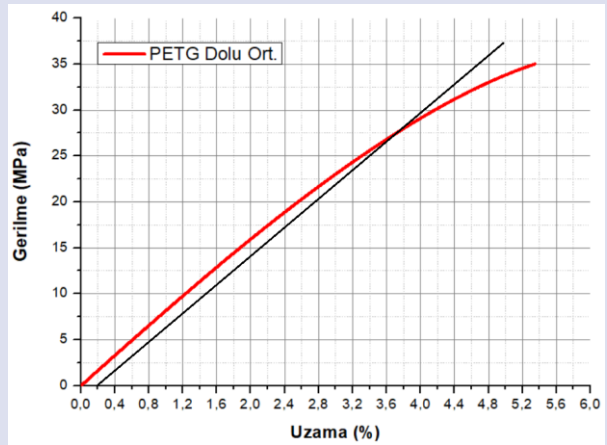
Şekil 14'te akma sınırı belirgin olmayan dolu PETG numunelerinin ortalama test verilerine göre çekme testi grafiği verilmektedir. PETG Dolu Ort, 23-26 MPa civarında bir akma dayanımına sahip olduğu görüldü. Bu değer, ham test verilerinden yararlanarak 25,5 MPa olarak belirlendi ve Çizelge 4'te verildi. Uzama kapasitesi (%5,2-5,6), malzemenin kırılmadan önce önemli ölçüde bir deformasyon sergilediği tespit edildi.

Şekil 15'te akma sınırı belirgin olmayan PETG Honeycomb numunelerinin ortalama test verilerine göre çekme testi grafiği verilmektedir. PETG Honeycomb Ort, 6,8-6,9 MPa civarında bir akma dayanımına sahip olduğu görüldü. Bu değer, ham test verilerinden yararlanarak 6,9 MPa olarak belirlendi ve Çizelge 4'te verildi. Uzama kapasitesi (%2,2-2,3) olarak tespit edildi. Bu uzama kapasitesinin, malzemenin sınırlı bir deformasyon alabileceğini, ancak dolu yapılara kıyasla daha düşük dayanım gösterdiğini işaret etmekte. Honeycomb kafes yapısının, muhtemelen ağırlık azaltma avantajı sağlarken dayanımı düşürdüğü söylenebilir.

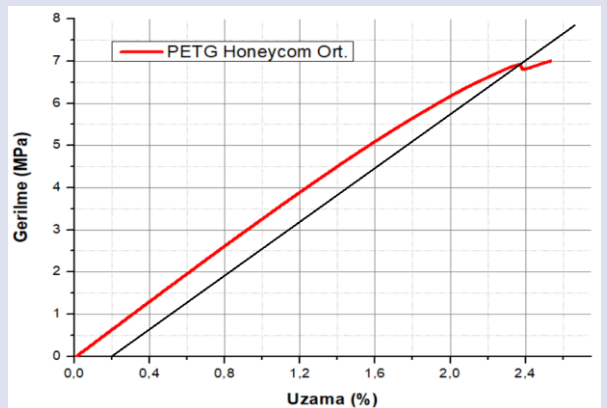
Şekil 16'da akma sınırı belirgin olmayan PETG T-rib numunelerinin ortalama test verilerine göre çekme testi grafiği verilmektedir. PETG T-rib Ort, 14,4-14,8 MPa civarında bir akma dayanımına sahip olduğu görüldü. Bu değer, ham test verilerinden yararlanarak 14,6 MPa olarak belirlendi ve Çizelge 4'te verildi. Uzama kapasitesi (%3,2-3,4) olarak tespit edildi. Bu uzama kapasitesinin, malzemenin orta düzeyde deformasyon alabileceğini gösteriyor. T-rib yapısı, Honeycomb'a kıyasla daha yüksek dayanım sağlarken, dolu yapıya göre daha hafif bir alternatif olabilir.



Şekil 13. T-rib numunelere ait Gerilme-Uzama grafikleri
Figure 13. Strength-Strain graphs of T-rib specimens



Şekil 14. Dolu numunelere ait ortalama değer grafiğine göre akma noktası tespiti
Figure 14. Yield point determination according to the average value graph of filled specimens



Şekil 15. Honeycomb numunelere ait ortalama değer grafiğine göre akma noktası tespiti
Figure 15. Yield point determination according to the average value graph of Honeycomb specimens

Numunelerin çekme testi sonuçlarına göre hesaplanan en büyük gerilmeleri, elastisite modülleri ve ortalama değer grafiklerinin orantı sınırı dikkate alınarak %0,2 uzama noktasından çizilen ofset ile belirlenen akma gerilmeleri Çizelge 4'te verilmektedir.

Dolu malzeme ile yapılan çekme testi sonucunda elde edilen çekme elastisite modülü (824,91 MPa) değeri her ne kadar PETG malzeme için Çizelge 1'te verilen değer aralığının altında olsa da alt sınıra yakın bir değer sergilemesinin yanı sıra akma gerilmesi (25,5 MPa) ve en büyük çekme gerilmesi (36,51 MPa) değerlerinin gereken aralıkta bulunması, deney numunelerinin imalatı için seçilen PETG malzemenin kullanılabilir niteliklere sahip olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4. PETG numunelerin çekme testi sonucu değerleri
Table 4. Tensile test result values of PETG specimens.

	Dolu	Honeycomb	T-rib
Çekme elastisite modülü (MPa)	824,91	332,49	634,60
En büyük çekme gerilmesi σ_{max} (MPa)	36,51	7,11	15,94
Akma Gerilmesi σ_{Ak} (MPa)	25,5	6,9	14,6

Dolu, HC ve T-rib PETG numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen % Uzama değerlerine ait Anova testi grafiği Şekil 17'de verilmektedir.

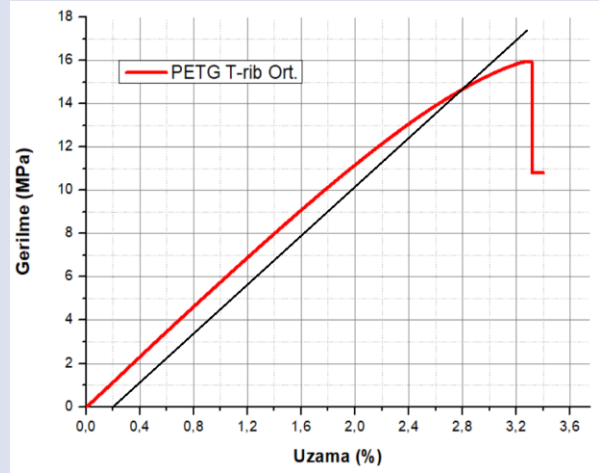
Numunelerin uzama verilerine göre yapılan ANOVA analizi sonucunda elde edilen son derece düşük p-değeri ($0,0017 < 0,05$), gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir.

Yapılan analiz sonucunda, gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu tespit edilmiştir ($p < 0,05$). Dolu numune ile her iki kafes yapısı arasında, ayrıca T-rib ve HC kafes yapıları arasında da anlamlı farklılıklar bulunduğunu ortaya koymuştur.

Dolu, HC ve T-rib PETG numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen Gerilme değerlerine ait Anova testi grafiği Şekil 18'de verilmektedir.

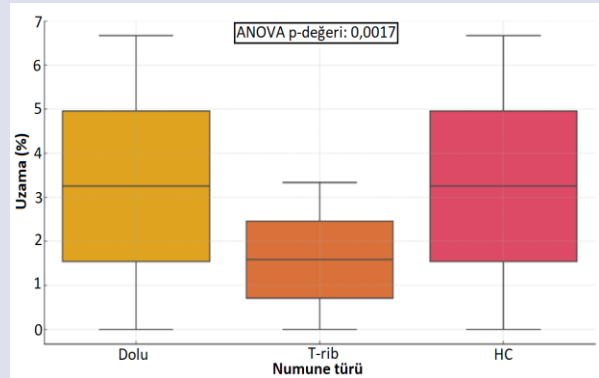
Numunelerin gerilme verilerine göre yapılan ANOVA analizi sonucunda elde edilen son derece düşük p-değeri ($7,40 \times 10^{-16} < 0,05$), gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir.

Tüm gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark vardır ($p < 0,05$). En büyük fark PETG Dolu ile PETG HC arasında gözlenmiştir. PETG T-rib ve HC yapıların mekanik performansları da birbirinden anlamlı derecede farklıdır; bu, iki farklı kafes yapının bile farklı mekanik sonuçlar doğurduğunu gösterir. Bu sonuçlar, yapısal tasarımın sadece doluluk değil, aynı zamanda kafes tipine göre de mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.



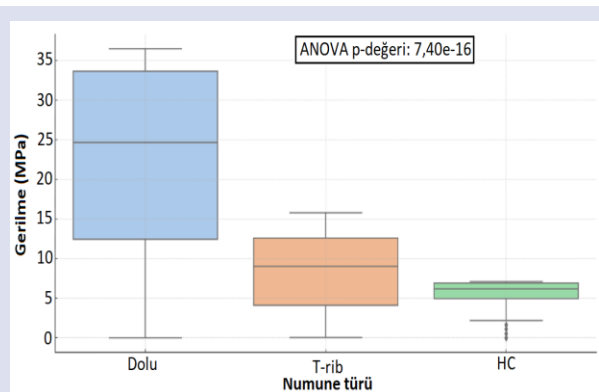
Şekil 16. T-rib numunelere ait ortalama değer grafiğine göre akma noktası tespiti

Figure 16. Yield point determination according to the average value graph of T-rib specimens



Şekil 17. Farklı yapıdaki PETG numunelerin uzama dağılımları

Figure 17. Elongation distributions of PETG samples with different structures.



Şekil 18. Farklı yapıdaki PETG numunelerin gerilme dağılımları

Figure 18. Strength distributions of PETG samples with different structures

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, FDM yöntemiyle imal edilen PETG esaslı Dolu yapı, T-rib kafes yapı ve Honeycomb (HC) kafes yapı içeren numunelerin çekme testleri gerçekleştirildi ve mekanik performansları karşılaştırıldı. Çalışmanın sonunda Honeycomb'un akma gerilmesi (6,9 MPa), en büyük çekme gerilmesi (7,11 MPa) ve çekme elastisite modülü (332,49 MPa) değerlerinin; T-rib'in akma gerilmesi (14,6 MPa), en büyük çekme gerilmesi (15,94 MPa) ve çekme elastisite modülü (634,60 MPa) değerlerinden büyük olduğu belirlendi.

Kafes yapıların geometri farklılıklarının boşluk oranını değiştirdiği görüldü.

Gerilme-Uzama grafiklerinden Honeycomb geometrinin ortalama uzama değerinin (%7,5), T-rib geometrinin ortalama uzama değerinin (%3,5) iki katından fazla olduğu görüldü. Bu durumda süneklige ihtiyaç duyulan kullanım alanları için Honeycomb kafes yapıların uygun olacağı sonucuna varıldı.

Elde edilen % Uzama verileri ile yapılan tek yönlü varyans analizi (ANOVA) sonucunda, üç grup arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğu belirlendi ($p < 0,05$). Bulgular, numunelerin iç yapısal geometrisinin uzama kapasitesi üzerinde belirgin etkilere neden olduğunu göstermektedir. Özellikle T-rib yapının, test sırasında daha erken kopması, bu yapının diğerlerine kıyasla daha sınırlı bir plastik deformasyon kapasitesine sahip olduğunu işaret etmektedir. Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla da uyumludur (Ziemian vd., 2012).

Elde edilen gerilme verileri ile yapılan tek yönlü varyans analizi (ANOVA) sonucunda, üç grup arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğu belirlendi ($p < 0,05$). Numunelerde yapısal formun (dolu ya da kafes) gerilme dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Dolu yapılar, çekme testinde çok daha yüksek dayanım gösterirken, kafes yapılar daha düşük ancak potansiyel olarak daha hafif ve enerji emici özellikler sunabilir. Yük taşıma gereksiniminin yüksek olduğu uygulamalarda Dolu yapılar tercih edilmelidir. Hafiflik veya esneklik isteniyorsa HC veya T-rib kafes yapılar tercih edilebilir, ancak bu durumda mekanik dayanım göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla da uyumludur (Palaniyappan, S., vd., 2024).

Birim hücrelerin ayrırt genişliklerinin ve uzunluklarının aynı olmasına rağmen, geometrik farklılıklarının, kafes yapıların çekme elastisite modülü, en büyük çekme gerilmesi ve akma gerilmesi değerlerinde önemli farklılıklar görülmesine neden olduğu belirlendi.

Araştırmaya konu olan Honeycomb ve T-rib kafes yapılar, ayrırtlarının genişlikleri ve uzunluklarında istenilen mekanik değerleri elde edecek şekilde yapılacak değişikliklerle uzay-havacılık, otomotiv, askeri malzemeler gibi ağırlık azaltımının önemli olduğu alanlarda kullanılabilir.

Kafes yapıların ayrırt genişlikleri artırılarak veya azaltılarak imal edilecek parça için ihtiyaç duyulan mekanik değerler (Çekme, basma, elastisite modülü) amaca uygun şekilde elde edilebilir.

FDM ile elde edilen kafes yapıların mekanik özelliklerini geliştirmeye, uygulama alanlarını genişletmeye yönelik olarak işlem parametrelerini ve malzeme bileşimlerini optimize etmek amacıyla yeni araştırmalar yapmak yerinde olacaktır. Yeni kafes geometrisi tasarımları ve yeni malzeme keşifleri verimli sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Alarifi, I. M. (2023). Mechanical properties and numerical simulation of FDM 3D printed PETG/carbon composite unit structures. *Journal of materials research and technology*, 23, 656-669.
- Ali, M., Sajjad, U., Hussain, I., Abbas, N., Ali, H. M., Yan, W. M., & Wang, C. C. (2022). On the assessment of the mechanical properties of additively manufactured lattice structures. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 142, 93-116.
- Ali, S. J., Rahmatbadi, D., Baghani, M., & Baniassadi, M. (2024). Experimental Evaluation of Mechanical Properties, Thermal Analysis, Morphology, Printability, and Shape Memory Performance of the Novel 3D Printed PETG-EVA Blends. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309(10), 2400069.
- Boda, R., Panda, B., & Kumar, S. (2024). Bioinspired nested-isotropic lattices with tunable anisotropy for additive manufacturing. *arXiv preprint arXiv:2405.11596*.
- Chouhan, G., & Bala Murali, G. (2024). Designs, advancements, and applications of three-dimensional printed gyroid structures: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 238(2), 965-987.
- Divakaran, N., Das, J. P., PV, A. K., Mohanty, S., Ramadoss, A., & Nayak, S. K. (2022). Comprehensive review on various additive manufacturing techniques and its implementation in electronic devices. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 477-502.
- Grigoriev, S., Nikitin, N., Yanushevich, O., Krikheli, N., Khmyrov, R., Strunevich, D., ... & Smirnov, A. (2024). Mechanical properties variation of samples fabricated by fused deposition additive manufacturing as a function of filler percentage and structure for different plastics. *Scientific Reports*, 14(1), 28344.
- Görgülüarslan, R. M. (2021). Kafes yapı tasarım ve optimizasyonunda kullanılan geometrik sınırların eklemeli imalat kısıtlarına bağlı olarak belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(2), 607-626.
- Güdür, C., Türkoğlu, T., & Eren, İ. (2023). Effect of lattice design and process parameters on the properties of PLA, ABS AND PETG polymers produced by fused deposition modelling. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(2), 561-570.
- Gülcan, O. (2021). Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine etki eden faktörler. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 19(2), 64-81.
- Hassan, M. H., Omar, A. M., Daskalakis, E., Hou, Y., Huang, B., Strashnov, I., ... & Bártolo, P. (2020). The potential of polyethylene terephthalate glycol as biomaterial for bone tissue engineering. *Polymers*, 12(12), 3045.
- Hsueh, M. H., Lai, C. J., Wang, S. H., Zeng, Y. S., Hsieh, C. H., Pan, C. Y., & Huang, W. C. (2021). Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling. *Polymers*, 13(11), 1758.

- Kuchampudi, S. V., Meena, K. L., & Chekuri, R. B. R. (2024). An experimental investigation on 3d printing of PETG-KF-based composites: optimization of process parameters for improved mechanical properties. *Cogent Engineering*, 11(1), 2379989.
- Li, D., Qin, R., Xu, J., Zhou, J., & Chen, B. (2022). Improving mechanical properties and energy absorption of additive manufacturing lattice structure by struts' node strengthening. *Acta Mechanica Sinica*, 35(6), 1004-1020.
- Liu, R., Chen, W., & Zhao, J. (2024). A review on factors affecting the mechanical properties of additively-manufactured lattice structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(10), 4685-4711.
- Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-Garcia, E., Rodriguez-Santiago, M., & Martin-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of petg polymers manufactured with fdm technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, 12(10), 2202.
- Özen, A., Auhl, D., Völlmecke, C., Kiendl, J., & Abali, B. E. (2021). Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (FDM) 3D-printed PETG. *Materials*, 14(10), 2556.
- Palaniyappan, S., Sivakumar, N. K., Sikder, P., Alodhayb, A., & Muthuramamoorthy, M. (2023). Topological design factor optimization in the development of periodic-type honeycomb lattice structure on the carbon fiber reinforced polyethylene terephthalate glycol composite. *Polymer Composites*, 44(12), 8640-8657.
- Pandžić, A., & Hodžić, D. (2022). Tensile mechanical properties comparison of PETG, ASA and PLA-strongman FDM printed materials with and without infill structure. In *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium*. <https://doi.org/10.2507/33rd.daaam.proceedings> (Vol. 31).
- Park, K. M., Min, K. S., & Roh, Y. S. (2021). Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. *Materials*, 15(1), 97.
- Patil, S., Sathish, T., Giri, J., & Felemban, B. F. (2024). An experimental study of the impact of various infill parameters on the compressive strength of 3D printed PETG/CF. *AIP Advances*, 14(9).
- Raja, S., Jayalakshmi, M., Rusho, M. A., Selvaraj, V. K., Subramanian, J., Yishak, S., & Kumar, T. A. (2024). Fused deposition modeling process parameter optimization on the development of graphene enhanced polyethylene terephthalate glycol. *Scientific Reports*, 14(1), 30744.
- Sathishkumar, N., Arunkumar, N., Rohith, S. V., & Hariharan, R. R. (2023). Effect of varying unit cell size on energy absorption behaviour of additive manufactured TPMS PETG lattice structure. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(6), 1379-1391.
- Seno Flores, J. D., de Assis Augusto, T., Lopes Vieira Cunha, D. A., Gonçalves Beatrice, C. A., Henrique Backes, E., & Costa, L. C. (2024). Sustainable polymer reclamation: recycling poly (ethylene terephthalate) glycol (PETG) for 3D printing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19(1), 16.
- Sepahi, M. T., Abusalma, H., Jovanovic, V., & Eisazadeh, H. (2021). Mechanical properties of 3D-printed parts made of polyethylene terephthalate glycol. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 6851-6861.
- Shah, G. J., Nazir, A., Lin, S. C., & Jeng, J. Y. (2022). Design for additive manufacturing and investigation of surface-based lattice structures for buckling properties using experimental and finite element methods. *Materials*, 15(11), 4037.
- Soleyman, E., Aberoumand, M., Rahmatabadi, D., Soltanmohammadi, K., Ghasemi, I., Baniassadi, M., ... & Baghani, M. (2022). Assessment of controllable shape transformation, potential applications, and tensile shape memory properties of 3D printed PETG. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 4201-4215.
- Srinivasan, R., Ruban, W., Deepanraj, A., Bhuvanesh, R., & Bhuvanesh, T. (2020). Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1838-1842.
- Subbarao, C. V., Reddy, Y. S., Inturi, V., & Reddy, M. I. (2021). Dynamic mechanical analysis of 3D printed PETG material. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1057, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
- Yan, C., Hao, L., Yang, L., Hussein, A. Y., Young, P. G., Li, Z., & Li, Y. (2021). Triply periodic minimal surface lattices additively manufactured by selective laser melting. Academic Press.
- Yang, J., Liu, H., Cai, G., & Jin, H. (2025). Additive Manufacturing and Influencing Factors of Lattice Structures: A Review. *Materials*, 18(7), 1397.
- Ziemian, C., Sharma, M., & Ziemian, S. (2012). Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. *Mechanical engineering*, 23, 159-180.