

FDM Yöntemi ile PLA Malzemeden Elde Edilen Kelvin ve Truncated Cuboctahedron Kafes Yapıların Çekme Dayanımlarının Araştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 18.06.2025

Kabul/Accepted: 16.11.2025

Yayımlandı/Published: 08.04.2026

Investigation of Tensile Strengths of Kelvin and Truncated Cuboctahedron Lattice Structures Obtained from PLA Material by FDM Method

Cem ERTEK 

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye



©2026 The Authors Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Eklemeli imalat, dijital ortamda oluşturulan bir modelin katmanlı olarak üst üste malzeme eklenmesiyle fiziksel bir ürüne dönüştürülmesini sağlayan bir üretim teknolojisidir. ISO/ASTM 52900:2021 standardına göre yedi ana kategoriye ayrılan bu yöntemlerden biri olan FDM (Fused Deposition Modelling: Ergiyik Biriktirmeli Modelleme), ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), PC (polikarbonat) ve PLA (Polilaktik Asit) gibi termoplastik malzemelerle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin önemli avantajlarından biri, içi boş ve karmaşık geometrilere sahip kafes yapıların üretimine imkân sağlamasıdır. Kafes yapılar, kimyasal bileşimlerinden çok geometrik özellikleriyle belirlenen mekanik performansları sayesinde hafiflik, gözeneklilik ve yüksek spesifik dayanım gibi avantajlar sunar. Bu çalışmada, FDM yöntemiyle PLA kullanılarak üretilen Kelvin ve Truncated Cuboctahedron (TC) kafes yapıların çekme dayanımı karşılaştırılmış, literatürde bu iki yapının doğrudan karşılaştırdığı bir çalışmaya rastlanmaması nedeniyle özgün bir katkı hedeflenmiştir. Her iki yapı, aynı ayırıt genişliği (0.8 mm) ve ayırıt boyu (4 mm) ile CAD (SolidWorks) ortamında tasarlanmış, ISO 527-2-2012 standardına uygun çekme numuneleriyle birleştirilerek, TC, Kelvin ve tam dolu olmak üzere üç farklı numune grubu oluşturulmuştur. Numuneler, %100 doluluk oranı, 0.3 mm nozul çapı, 0.15 mm katman kalınlığı, 220 °C baskı sıcaklığı gibi sabit parametrelerle FDM yöntemiyle imal edilmiş ve çekme testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, TC yapının akma dayanımı (0.87 MPa), maksimum çekme dayanımı (1.002 MPa) ve elastisite modülü (67.51 MPa) bakımından Kelvin yapıya göre daha üstün olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan ANOVA analizi ile bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($p < 0.05$) belirlenmiş, ayırıt boyutları eşit olmasına rağmen birim hücre geometrisindeki farklılığın mekanik performans üzerinde belirleyici olduğu sonucuna varılmıştır.

Abstract

Additive manufacturing transforms a digital model into a physical object by sequentially depositing layers of material. According to ISO/ASTM 52900:2021, additive manufacturing methods are classified into seven categories, including Fused Deposition Modelling (FDM), which is widely used with thermoplastics such as ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), and PLA (Polylactic Acid). A key advantage of FDM is its ability to produce lattice structures with complex hollow geometries. Lattice structures are favored in applications requiring lightweight and porous designs due to their mechanical properties arising primarily from geometry rather than chemical composition. This study compares the tensile performance of Kelvin and Truncated Cuboctahedron (TC) lattice structures manufactured from PLA via FDM. Since no prior studies have directly compared these two structures under the same conditions, this work provides an original contribution. Both geometries were designed in the CAD (SolidWorks) environment with the identical strut width (0.8 mm) and length (4 mm) and combined with tensile samples in accordance with the ISO 527-2-2012 standard to create three different sample groups: TC, Kelvin and fully loaded. Specimens were fabricated using fixed parameters: 100% infill, 0.3 mm nozzle diameter, 0.15 mm layer height, and 220 °C printing temperature. Tensile tests showed the TC structure had higher yield strength (0.87 MPa), maximum tensile strength (1.002 MPa), and elastic modulus (67.51 MPa) compared to Kelvin. ANOVA analysis confirmed these differences were statistically significant ($p < 0.05$). Despite identical strut dimensions, differences in unit cell geometry significantly affected mechanical performance.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat; FDM; Kafes yapı; PLA

Keywords: Additive manufacturing; FDM; Lattice structure; PLA

1. Giriş

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri, özellikle karmaşık geometriye ve iç boşluklara sahip tasarımların imalatını mümkün kılarak imalat sektörüne yeni ufuklar kazandırmış ve endüstriyel üretimden kişisel projelere kadar geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Eklemeli imalat yöntemlerinin temel ilkesi, bir CAD programı ile

hazırlanan dijital modellerin katman katman fiziksel nesnelere dönüştürülmesidir. Bu sayede tasarımlar daha özgür, imalat daha hızlı, esnek, az fireli ve maliyet etkin hale gelmiştir. ISO/ASTM 52900:2021 standardı, Eİ teknolojilerinin temel ilkelerini ve terminolojisini belirler ve eklemeli imalat yöntemleri yedi ana kategoriye ayrılır. Her bir kategori belirli imalat yöntemleri ve kullanılan

malzemelerle tanımlanır. Söz konusu yedi grupta metaller, polimerler, seramikler ve reçineler gibi farklı malzemeler kullanılmaktadır. Polimerler grubunda, malzeme ekstrüzyonu, ticari olarak Fused Filament Fabrication (FFF) veya Fused Deposition Modelling (FDM: Ergiyik Biriktirmeli Modelleme) olarak adlandırılmaktadır (Başçı vd., 2021). Farklı Eİ teknikleri arasında en yaygın olanlar mürekkep püskürtmeli modelleme (MJM) ve FDM'dir (Tümer vd., 2021). FDM, hızlı imalat, maliyet etkinliği, kolay erişilebilirliği, geniş malzeme seçeneği ve karmaşık parçalar elde etme kabiliyeti sayesinde tercih edilen bir yöntemdir (Rajan vd., 2022).

2020 sonrası, FDM yönteminde önemli gelişmeler kaydedilmiş ve endüstriyel uygulamalarda daha yaygın hâle gelmiştir (Gibson vd., 2020). FDM yönteminde, süreç optimizasyonu, endüstriyel uygulamalar ve malzeme biliminde önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Süreç optimizasyonu açısından, baskı hızı, yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerde ilerlemeler kaydedilmiştir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknikleri, FDM süreçlerinin daha verimli ve kontrollü hâle gelmesini sağlamıştır. Örneğin, gerçek zamanlı izleme ve hata tespiti sistemleri baskı kalitesini artırmıştır (Isiani vd., 2025). Endüstriyel uygulamalarda ise FDM, havacılık, otomotiv ve tıp sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Wang vd., 2022). Malzeme geliştirmede ise PLA, ABS ve ASA gibi geleneksel termoplastiklerin yanı sıra karbon fiber, cam fiber ve metal parçacık takviyeli polimerler geliştirilmiştir. Bu malzemeler yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir (Dey vd., 2021). Ayrıca, PEEK, PEI ve PPSU gibi aşınma dayanımı yüksek, performanslı termoplastiklerin FDM'de kullanımı endüstriyel uygulamalar için önemli bir gelişmedir (Das vd., 2020).

Günümüzde geleneksel plastiklerle ilişkili çevresel kaygılar nedeniyle sürdürülebilir malzemelere olan talep artmaktadır. PLA, mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan temin edilir ve bu özelliği ile petrol bazlı plastiklere alternatiftir (Kılıç vd., 2017). Ayrıca PLA, biyobozunurluğu ve biyouyumluluğu sayesinde önde gelen bir biyopolimerdir (Erkul vd., 2023). Çalışmada PLA tercih edilmiştir; çünkü biyouyumluluk, biyobozunurluk ve FDM tabanlı eklemeli imalatta geniş uygulanabilirlik sunar. ABS, ASA ve PETG gibi diğer termoplastiklerle kıyaslandığında, PLA karmaşık kafes yapıların imalatı için avantaj sağlamaktadır. ABS yüksek mukavemet sunmasına rağmen biyobozunur değildir ve VOC salımı yapar. ASA ise UV dayanımı açısından avantaj sağlar ancak işlenebilmesi için daha yüksek sıcaklık gerektirir. PETG, kimyasal direnç ve esneklik yönünden güçlüdür fakat PLA'ya kıyasla daha az serttir. Genel olarak PLA uygun

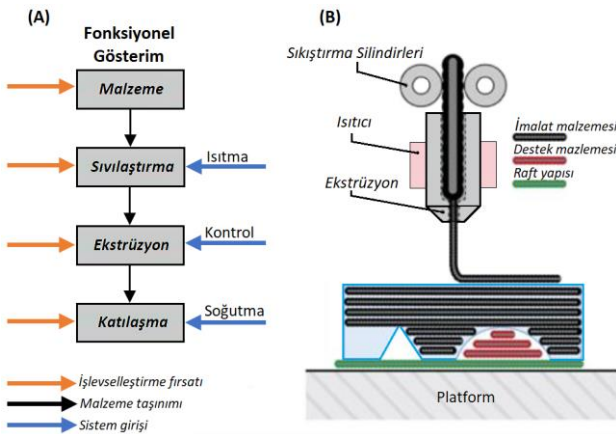
mekanik özellikler sağlar ve yenilenebilir kaynaklardan elde edildiğinden, çevresel etkisi düşüktür (Prajapati vd., 2024; Bolat vd., 2023).

Çevresel ve mekanik üstünlükleri sayesinde PLA yalnızca sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda yapısal uygulamalarda da tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Bu durum, PLA'nın özellikle birim hücrelerden oluşan kafes yapılar gibi karmaşık geometrilere sahip hafif ve dayanıklı yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Birim hücreler, kiriş ve kolonların düğüm noktalarında birbirine bağlandığı, içi boş ünitelerdir ve kafes yapılar birim hücrelerin düzenli tekrarından oluşur. Eklemeli imalat, genellikle dairesel, kare, dikdörtgen, beşgen ve altıgen birim hücrelerden oluşan kafes yapıları esas alır. FDM ve PLA ile oluşturulan kafes yapı çalışmalarında, farklı etkenlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tang vd., 1 mm kalınlığında küre biçimli birim hücrelerle oluşturulan kafes yapılarla basma testleri yapmıştır (Tang vd., 2020). Kothandaraman vd., kare kafes yapıları kullanarak S/N oranı ve ANOVA yardımıyla FDM parametrelerini optimize etmeyi amaçlamıştır (Kothandaraman vd., 2024). Mani vd., farklı kafes yapıların yarı-statik delinme hasarını ve mekanik özelliklerini incelemiştir (Mani vd., 2024). Güdür vd., farklı üç kafes yapı ve üç malzeme ile FDM ile elde edilen numunelerin çekme dayanımlarını karşılaştırmıştır (Güdür vd., 2023). Motgi vd., katman kalınlıkları ve kafes türlerinin çekme mukavemetine etkisini ele almıştır (Motgi vd., 2025). Ben vd., farklı doluluk oranları ve imalat açıları kullanarak PLA kafes numunelerinin mekanik özelliklerini araştırmıştır (Ben vd., 2024). Leon vd., farklı kafes geometrilerinin mekanik karakterizasyonunu analiz etmiştir (Leon vd., 2021).

Kafes yapıların, özellikle yapısal verimliliği yüksek olan TC ve Kelvin tipleri, son yıllarda çeşitli araştırmalara konu olmaktadır. Literatürde bu yapıların mekanik performansına odaklanan çalışmalar bulunmaktadır. TC kafes yapıları, bağlantı sayısının çokluğu sayesinde yüksek mekanik dayanım sergileyen ve gerilme-dominant karaktere sahip yapılardır; bu özellikleri sayesinde yüksek rijitlik ve taşıma kapasitesi sunarak uzun ömürlü ve güvenilir çözümler sağlar (Silva vd., 2021). Ayrıca TC kafes yapılar elastik modül, Poisson oranı ve akma dayanımı açısından umut verici sonuçlar göstermektedir (Hedayati vd., 2016). Öte yandan Kelvin kafes yapıları, üç boyutlu uzayı boşluksuz doldurabilen nadir yapılardan biridir ve bu sayede homojen bir gözeneklilik dağılımı sergiler. Eğilme-dominant deformasyon mekanizmasına sahip olduğundan darbe ve şok yükleri altında yüksek enerji emme kapasitesi sunar. Ayrıca izotropik davranış göstererek farklı yönlerden gelen yükleri eşit şekilde

karşılar ve mekanik performansı artırır (Wei vd., 2025). Kelvin kafes yapılar, sözü edilen nitelikleriyle mekanik özelliklerin optimize edilmesi ve biyolojik uyumluluk açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Barzgar vd., 2024; Moreno-Pérez vd., 2025). PLA filamentlerle FDM, tıbbi implantlar, otomotiv, havacılık ve şekli hafızalı parçalar gibi uygulamalarda yüksek performanslı kafes yapılar geliştirilmesini sağlar (Jain vd., 2022).

Bu çalışmada, FDM yöntemiyle PLA kullanılarak imal edilen farklı kafes yapıların mekanik performanslarını karşılaştırmayı ve eklemeli imalat alanındaki mühendislik uygulamalarına özgün katkı sunmayı amaçlanmıştır. Yapılan literatür taramalarında TC ve Kelvin kafes yapıların mekanik özellikleri farklı çalışmalarla incelenmiş olsa da doğrudan birbirleriyle karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla çalışmada, aynı ayır boyu ve sabit FDM parametreleri altında iki farklı birim hücre geometrisinin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini sistematik biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulguların, araştırmacıların optimum kafes tasarımını seçme ve performansı artırma süreçlerine olumlu katkısı olacağına inanılmaktadır.



Şekil 1. FDM mimarisi A) Sistemin çalışma şekli B) Sistem uygulamasının şematik gösterimi (Başçı Ü.G vd., 2021)

2. Materyal ve Metot

FDM, dijital bir 3B modelin fiziksel bir nesneye dönüştürülmesini sağlar (Jadhav vd., 2022). Bu süreçte termoplastik filamentler (PLA, ABS vb.) bir nozul yardımıyla ergitilerek katmanlar halinde biriktirilir ve her katman, bir öncekinin üzerine eklenerek nihai parça oluşur (Turner vd., 2021). Bir FDM cihazının bölümleri ve çalışma sistemi Şekil 1'de şematik olarak verilmektedir. Düşük maliyeti, yüksek doğruluğu ve termoplastiklerle karmaşık geometrilerin imalatını kolaylaştırması sayesinde FDM yöntemi, çalışmada kıyaslanan TC ve Kelvin kafes yapıların istenilen geometrik doğruluk ve gözeneklilikle imal edilmesini sağlar. Böylece deney

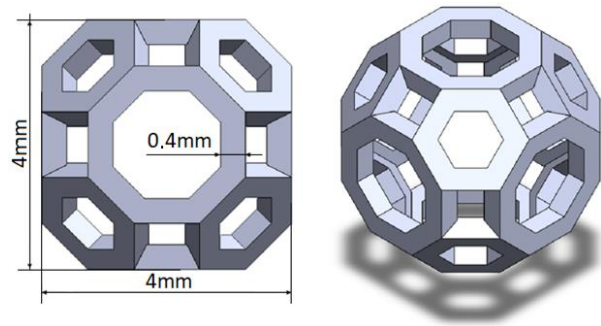
numuneleri karşılaştırmalı mekanik testler için en uygun niteliklere sahip olur.

2.1 Malzeme seçimi ve deney numunelerinin tasarımı

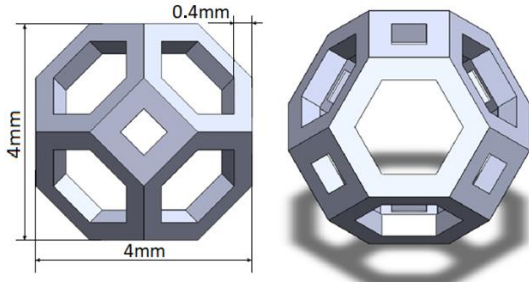
Çalışmada malzeme olarak PLA tercih edilmiştir; bu seçim, PLA'nın FDM tabanlı eklemeli imalatta geniş uygulanabilirliği, iyi mekanik özellikleri ve tekrarlanabilirliği ile gerekçelendirilmiştir (Dey vd., 2021; Prajapati vd., 2024). PLA ayrıca çevresel açıdan avantajlı olup, biyobozunur ve kolay temin edilebilir bir malzemedir (Kılıç vd., 2017; Bolat vd., 2023).

Deney numunelerinin tasarımında TC ve Kelvin birim hücreleri seçilmiştir. TC kafesler, gerilme-dominant mekanizması ve yüksek bağlantı sayısı sayesinde yüksek rijitlik ve taşıma kapasitesi sunarken (Silva vd., 2021; Hedayati vd., 2016); Kelvin kafesler eğilme-dominant deformasyon mekanizması, homojen gözeneklilik ve izotropik davranış sayesinde darbe ve şok yükleri altında yüksek enerji emme kapasitesi sağlamaktadır (Wei vd., 2025; Barzgar vd., 2024). TC ve Kelvin kafes yapıların mekanik özellikleri farklı çalışmalarla incelenmiş olsa da doğrudan birbirleriyle karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada ise aynı FDM parametreleri ve aynı ayır boyuna sahip TC ve Kelvin kafes yapıları oluşturulmuş ve birim hücre geometrilerindeki farklılıkların çekme dayanımı üzerindeki etkisi sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

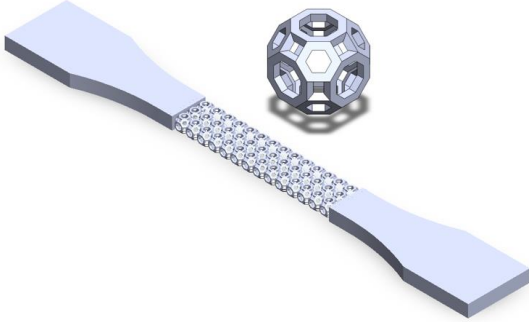
Deneysel çalışma için CAD (SolidWorks) programı ile TC (Şekil 2) ve Kelvin (Şekil 3) olmak üzere ayır genişliği 0.4mm; ayır uzunluğu 4mm olan farklı iki birim hücre tasarlandı. Ardından bu birim hücrelerden meydana gelen kafes yapılar tasarlanarak ISO 527-2-2012 (Plastics-Determination of Tensile properties) standardına uygun kafes yapıları çekme numuneleri oluşturuldu (Şekil 4-5). Ayrıca, kafes yapıları deney numunelerinin imalatında kullanılacak PLA filamentin (ABG marka), sahip olması gereken mekanik değerlerde olup olmadığını belirleyebilmek için ISO 527-2-2012 standardına verilen ölçülerde bir de dolu çekme numunesi CAD (SolidWorks) programı ile oluşturuldu (Şekil 6b).



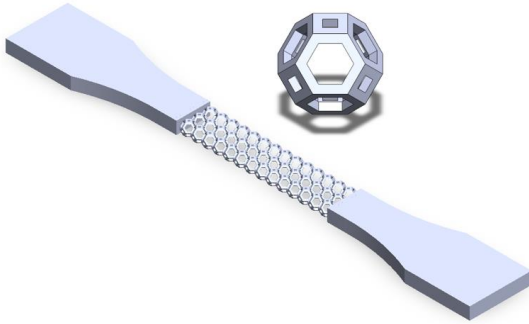
Şekil 2. TC birim hücre



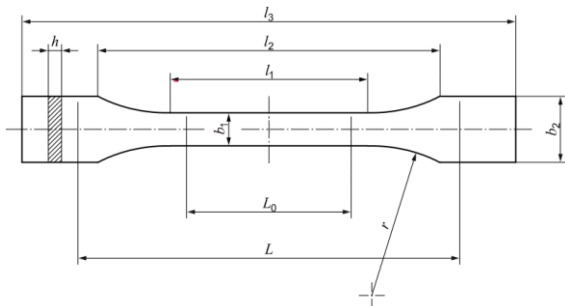
Şekil 3. Kelvin birim hücre



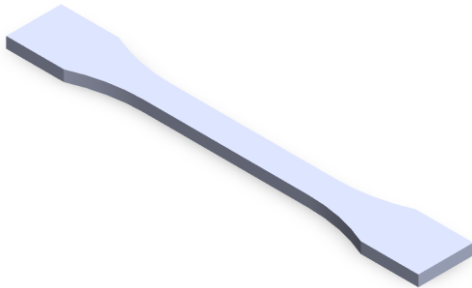
Şekil 4. TC birim hücre ve TC kafes yapı çekme numunesi tasarımları



Şekil 5. Kelvin birim hücre ve Kelvin kafes yapı çekme numunesi tasarımları



a)



b)

Şekil 6. ISO 527-2-2012 standardına uygun dolu çekme numunesi a) boyutları, b) CAD programı ile tasarımı

Çizelge 1. ISO 527-2-2012 standardına göre 3D baskı ile elde edilen çekme numunesi ölçüleri

| Uzunluk | Numunenin bölgeleri | Ölçü (mm) |
|---------|-----------------------------|----------------|
| l_3 | Toplam uzunluk | ≥ 150 |
| l_1 | Dar kısmın uzunluğu | 60.0 ± 0.5 |
| r | Yarıçap | 60 ± 0.5 |
| l_2 | Geniş bölümler arası mesafe | 108 ± 1.6 |
| b_2 | Uçlardaki genişlik | 20.0 ± 0.2 |
| b_1 | Dar kısımdaki genişlik | 10.0 ± 0.2 |
| h | Kalınlık | 4.0 ± 0.2 |
| L_0 | Ölçü uzunluğu | 50.0 ± 0.5 |
| L | Çeneler arası ilk mesafe | 115 ± 1 |

TC ve Kelvin kafes yapıları kıyaslayabilmek için boşluk oranları (Gözenek yoğunlukları) bilinmelidir. Bunun için Eşitlik (1) ve (2) den yararlanıldı.

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

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

Hesaplamalarda kullanılan dolu ve kafes yapı hacimleri için kullanılan CAD (SolidWorks) programında hesaplatıldı. Eşitliklerde kafes yapılar için kullanılan 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. PLA çekme numunelerinin boşluk oranları

| Çekme Numuneleri | V_D (mm^3) | V_{GH} (mm^3) | V_{TGY} (mm^3) | ϕ (%) |
|------------------|------------------|---------------------|----------------------|------------|
| Dolu | 8607.58 | 0 | 8607.58 | 100 |
| TC | 8607.58 | 6842.59 | 1764.99 | 20.505 |
| Kelvin | 8607.58 | 6843.36 | 1764.22 | 20.496 |

Çizelge 2’deki veriler ve hesaplamalardan görüleceği üzere TC ve Kelvin kafes yapıların boşluk oranları arasında oldukça küçük bir fark var ve bu durumda birbirine eşit kabul edilebilirler.

2.2 FDM ile deney numunelerinin imalatı

Tasarımları yapılan farklı üç deney numunesinden PLA filament (ABG marka) kullanılarak FDM yöntemiyle üçer adet imal edildi (Şekil 7). Numunelerin imalat parametreleri Çizelge 3’de verilmektedir. Her ne kadar PLA’nın ergime sıcaklığı literatürde ve filament üreticilerinin teknik verilerinde genel olarak belirtilmiş olsa da bu çalışmada kullanılan PLA çekme numunelerinin imalat parametreleri herhangi bir kaynaktan doğrudan alınmamış, ISO 527-2:2012 standardına uygun numune boyutları dikkate alınarak yürütülen kapsamlı ön

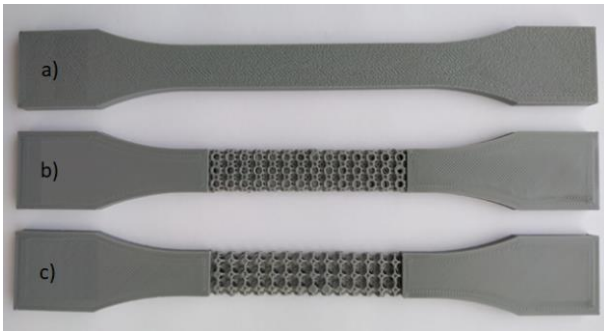
çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Bu süreçte, standart ölçülere uygun birim hücre ve kafes boyutları (ayrıt kalınlığı ve uzunluğu) çok sayıda deneme ile optimize edilmiş; ardından bu boyutların imalata uygun şekilde elde edilebilmesi için gerekli nozul çapı ve katman kalınlığı tespit edilmiştir. Ayrıca kafes geometrilerinin net bir şekilde basılabilmesi amacıyla baskı hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı parametreleri yine tekrarlı deneylerle en uygun değerlere ulaştırılmıştır. Dolayısıyla, çalışmada kullanılan imalat parametreleri özgün bir süreçle geliştirilmiş olup, numunelerin güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde üretilmesini sağlamıştır.

Çizelge 3. PLA çekme numunelerinin imalat parametreleri

| Katman kalınlığı (mm) | Baskı hızı (mm/s) | Dolgu (%) | Nozul çapı (mm) | Nozul sıcaklığı (°C) | Tabla sıcaklığı (°C) |
|-----------------------|-------------------|-----------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 0.15 | 80 | 100 | 0.3 | 220 | 60 |



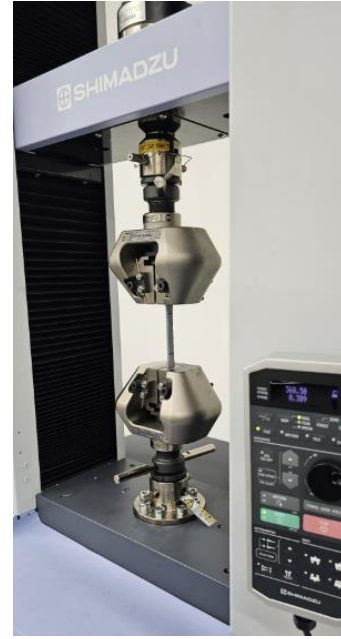
Şekil 7. PLA malzeme kullanılarak FDM yöntemiyle deney numunelerinin imalatı (ELEGOO Neptün 3 Pro)



Şekil 8. PLA malzemeden imal edilmiş a) Dolu b) TC c) Kelvin, test öncesi çekme numuneleri.

2.3 Numunelere uygulanan çekme testi

İmalatları tamamlanan deney numunelerine ISO 527-2-2012 standardında belirtildiği gibi 1mm/dak hızında ve 20-25°C laboratuvar sıcaklığında çekme testi (Shimadzu AGS-X 50kN) uygulandı (Şekil 9-10).



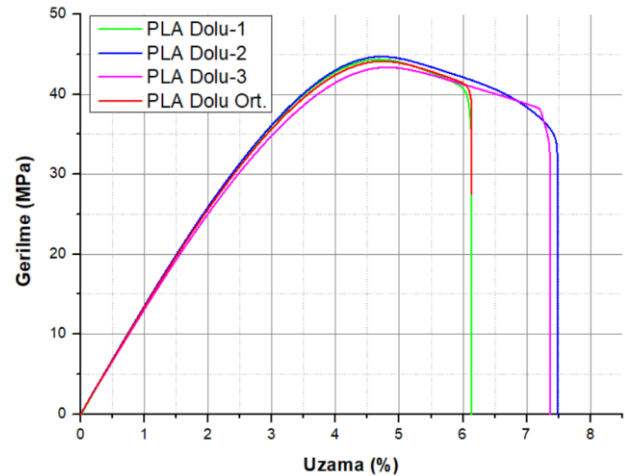
Şekil 9. PLA Numunelere çekme testi uygulaması



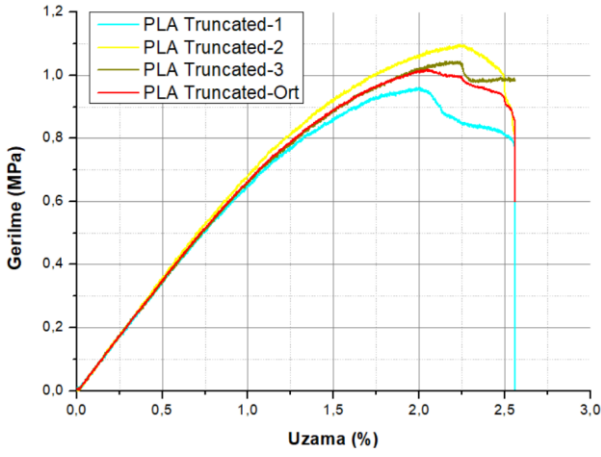
Şekil 10. PLA malzemeden imal edilmiş a) Dolu b) TC c) Kelvin test sonrası çekme numuneleri.

3. Bulgular

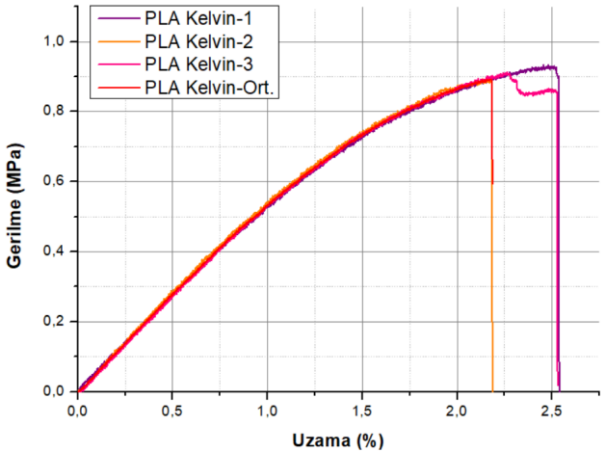
Çekme testi sonucunda dolu, TC ve Kelvin numunelere ait Gerilme (σ)-Uzama (%) grafikleri Şekil 11-12-13'te verilmektedir.



Şekil 11. Dolu numunelere ait Gerilme-Uzama grafikleri



Şekil 12. TC numunelere ait Gerilme-Uzama grafikleri



Şekil 13. Kelvin numunelere ait Gerilme-Uzama grafikleri

PLA malzemenin referans mekanik değerleri Çizelge 4'te verilmektedir (MatWeb, 2025). Bu çizelgede sunulan değerler, MatWeb veri tabanından alınmış genel özellikleri temsil etmektedir ve çalışmaya yalnızca karşılaştırma amacıyla eklenmiştir.

Çizelge 4. PLA malzemenin mekanik değerleri

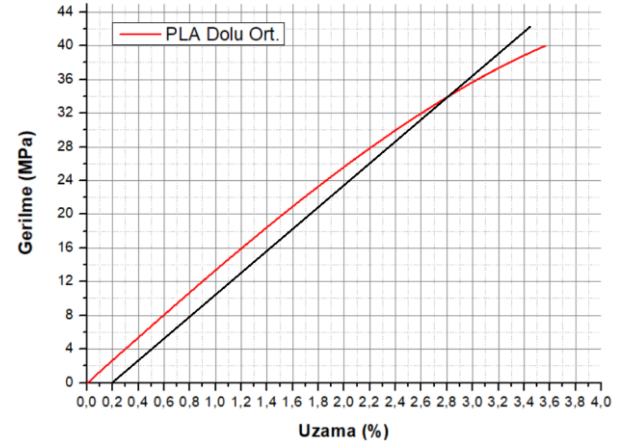
| | Çekme elastisite modülü (MPa) | En büyük çekme dayanımı σ_{max} (MPa) | Akma dayanımı σ_{Ak} (MPa) |
|-----|-------------------------------|--|-----------------------------------|
| PLA | 2.32 – 13800 | 0.160 - 3000 | 8.00 - 103 |

Çalışmada kullanılan PLA filamentin mekanik özellikleri ise ISO 527-2:2012 standardına uygun olarak hazırlanan dolu çekme numuneleri üzerinden ölçülmüş ve bu deneysel değerler hem metin içerisinde hem de Çizelge 5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

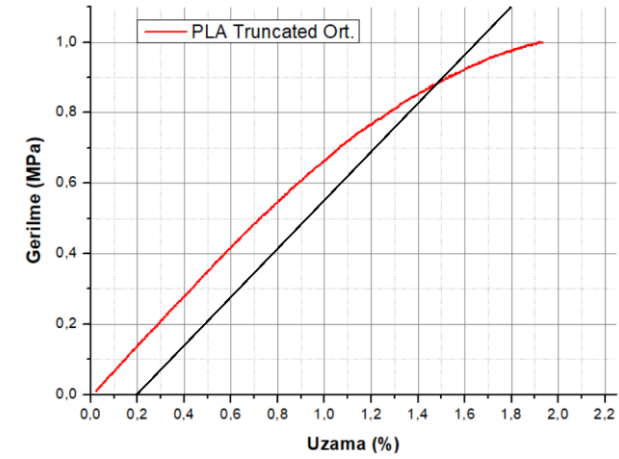
Ortalama değer grafiklerinde orantı sınırı dikkate alınarak, %0.2 uzama noktasından çizilen ofset kullanılarak (Şekil 14-15-16) numunelerin akma gerilmeleri belirlenmiştir.

Numunelerin çekme testi sonuçlarına göre hesaplanan en büyük gerilme, elastisite modülü ve akma gerilmesi değerleri Çizelge 5'te verilmektedir. Bu değerler, ISO 527-2-2012 standardına uygun olarak 1 mm/dak çekme hızı ve

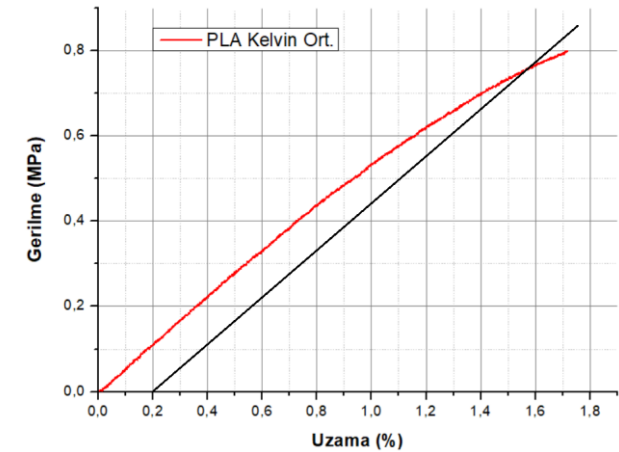
20-25°C laboratuvar sıcaklığında, her grup için üçer numune ile yapılan testlerle elde edilmiştir.



Şekil 14. Dolu numunelere ait ortalama değer grafiğine göre akma noktası tespiti



Şekil 15. TC numunelere ait ortalama değer grafiğine göre akma noktası tespiti



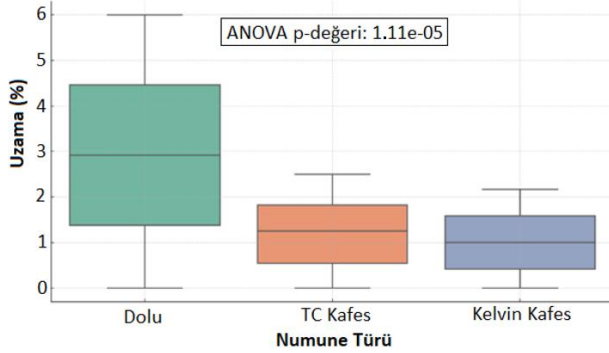
Şekil 16. Kelvin numunelere ait ortalama değer grafiğine göre akma noktası tespiti

Çizelge 5. PLA numunelerin çekme testi sonucu değerleri

| | Dolu | TC | Kelvin |
|--|---------|-------|--------|
| Çekme elastisite modülü (MPa) | 1348.72 | 67.51 | 56.05 |
| En büyük çekme dayanımı σ_{max} (MPa) | 44.14 | 1.002 | 0.89 |
| Akma dayanımı σ_{Ak} (MPa) | 34 | 0.87 | 0.75 |

Dolu malzemeye uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı (34 MPa), en büyük çekme dayanımı (44.14 MPa) ve elastisite modülü (1348.72 MPa) değerlerinin, PLA malzeme için belirtilen referans aralıklarla (Çizelge 4: MatWeb verileri) uyumlu olduğu ve kafes yapılı test numunelerinin imalatında kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Dolu, TC ve Kelvin PLA numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen % Uzama değerlerine ait ANOVA testi grafiği Şekil 17'de verilmektedir.



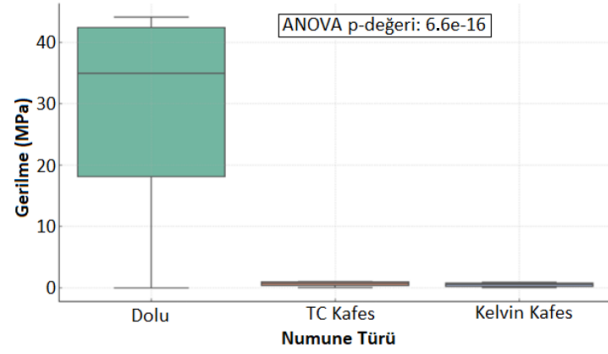
Şekil 17. Farklı yapıdaki PLA numunelerin uzama dağılımları

Numunelerin uzama verilerine göre yapılan ANOVA analizi sonucunda elde edilen son derece düşük p-değeri ($1.11 \times 10^{-5} < 0.05$), gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, dolu numunelerin daha yüksek uzama değerleri sergilediğini ve plastik deformasyon kapasitesinin daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. TC ve Kelvin kafesler, görece düşük uzama değerleri göstermektedir; bu durum, yapısal olarak daha az malzeme içermeleri ve süreksizlikler barındırmalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, her iki kafes türü de gerilme altında daha erken kopma eğilimi sergilemektedir. Bununla birlikte, TC kafesin Kelvin kafese kıyasla biraz daha fazla uzama göstermesi, bu yapıların yük altındaki deformasyon kapasitelerinde küçük farklılıklar olduğuna işaret etmektedir.

Yürütülen çalışmaya benzer bir araştırmada, PLA kullanılarak farklı kafes yapılarında (Triangular, Hexagonal, Octagonal) ve dolu çekme numuneleri FDM yöntemi ile hazırlanmış, dolu numuneye ait çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinin kafes yapılı numunelerinkinden yüksek olduğu, ancak mukavemet/ağırlık oranı bakımından kafes yapıların üstün olduğu bulunmuştur (Tang vd., 2020). Ayrıca farklı kafes geometrilerinde (Star, 3D honeycomb, honeycomb, gyroid ve Hilbert curve) ve %30 doluluk oranında yapılan çalışmada, Honeycomb deseni en yüksek çekme dayanımına ve uzama değerine ulaşırken, Hilbert deseninin performansının en düşük olduğu gözlenmiştir (Eryildiz, 2021). Farklı kafes geometrileri (Hourglass, gyroid, octahedral, triangular ve grid) ile yapılan bir başka

çalışmada ise triangular geometrinin elastisite modülünde %30 artış ve dayanımda %17 artış sağladığı; gyroid desenin ise en düşük performansı gösterdiği bildirilmiştir (Özgül ve Tatlı, 2021). Bu literatür bulguları, hücre geometrisinin çekme davranışı üzerinde belirleyici olduğunu desteklemektedir.

Dolu, TC ve Kelvin PLA numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme değerlerine ait ANOVA testi grafiği Şekil 18'de verilmektedir.



Şekil 18. Farklı yapıdaki PLA numunelerin gerilme dağılımları

Numunelerin gerilme verilerine göre yapılan ANOVA analizi sonucunda elde edilen son derece düşük p-değeri ($6.6 \times 10^{-16} < 0.05$), gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermektedir.

Dolu numune, en yüksek gerilme dayanımına sahip olup, bu durum tam dolu numunelerde yükün tüm kesit alanına eşit dağılması ve malzemenin yapısal bütünlüğünün maksimum olmasına bağlanabilir. TC ve Kelvin kafesler, dolu numuneye kıyasla daha düşük dayanım göstermektedir; TC kafes, Kelvin kafese göre biraz daha iyi dayanım sergilemiştir. Bu durum, kafes geometrisinin mekanik performans üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

Yapılan çalışma ile TC'nin akma dayanımı (0.87 MPa), en büyük çekme dayanımı (1.002 MPa) ve çekme elastisite modülü (67.51 MPa) değerlerinin, Kelvin'in akma dayanımı (0.75 MPa), en büyük çekme dayanımı (0.89 MPa) ve çekme elastisite modülü (56.05 MPa) değerlerinden yüksek olduğu görüldü. Bu durum, birim hücre topolojisinin yapısal davranış üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koyan ve farklı malzeme (Ti-6Al-4V) ile oluşturulan TC kafes yapılı benzer çalışmalarla uyumludur (Hedayati vd., 2016).

Literatürde yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, birim hücre topolojisinin rijitlik, dayanım ve enerji soğurma gibi mekanik özellikler üzerinde belirleyici olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, karmaşık bağlantı ağlarına sahip hücrelerin yük altında daha dengeli davranış ve yüksek mekanik performans sağladığı rapor edilmiştir (Park vd., 2021; Distefano vd., 2023; Nogueira vd., 2024). Ayrıca

topoloji odaklı çalışmalar, belirli hücre tiplerinin (örneğin bazı truncated-geometri ailesi üyeleri) basma ve genel mekanik testlerde öne çıktığı ve davranışın düğüm sayısı ile ayrit konfigürasyonuna bağlı olduğu gösterilmiştir (Li vd., 2024). Birim hücre ölçeğindeki boyutlandırma ve düğüm/malzeme oranı etkilerinin mekanik anizotropiyi azalttığı ve kırılma davranışını iyileştirdiği de bildirilmiştir (Liu vd., 2023). Bu çalışmaların çoğu basma dayanımı odaklı olmakla birlikte, elde edilen genel eğilimler, TC ve Kelvin kafes yapıların çekme dayanımlarının kıyaslandığı bu çalışma için de çekme deneylerinde gözlenen TC üstünlüğünü açıklamada tutarlı bir çerçeve sunmaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

- Elde edilen bulgular, kafes yapının mekanik performansını hem makro hem mikro ölçekte belirleyen iki kritik faktörü ortaya koymaktadır. Makro ölçekte, neredeyse aynı boşluk oranına sahip TC ve Kelvin kafesler karşılaştırıldığında, akma dayanımı, elastisite modülü ve kırılma davranışı gibi mekanik özelliklerde anlamlı farklılıklar gözlenmiştir. Bu bulgu, boşluk oranının tek başına mekanik performansı tanımlayan bir parametre olmadığını; yük aktarımı, gerilme dağılımı ve deformasyon davranışını belirleyen makro ölçekli kafes geometrisinin kritik rol oynadığını göstermektedir.
- Mikro ölçekte ise, TC ve Kelvin kafeslerde gözlenen performans farklarının temel nedeni birim hücre topolojisidir. TC kafeslerdeki daha yoğun düğüm/basma bağlantıları, ayrit yöneliş çeşitliliği ve izotropik/anizotropik yük aktarımı mekanik üstünlüğü desteklemiştir. Bu durum, doluluk oranı eşit yapılar arasında bile performansı belirleyen temel ölçütün hücresel topoloji olduğunu ortaya koymaktadır.
- Doluluk oranı ve kafes geometrisinin birlikte mekanik davranışı şekillendirdiği tespit edilmiştir. Tam dolu yapılar daha yüksek dayanım ve uzama değerleri sunarken, kafes yapılar hafiflik ve enerji sönmüleme açısından avantaj sağlamaktadır. ANOVA analizi, doluluk oranı ve geometrik yapıların çekme altındaki uzama ve gerilme davranışını doğrudan etkilediğini göstermiştir.
- TC ve Kelvin kafes yapıların, hafiflik ve mekanik dayanım gerektiren uzay-havacılık, otomotiv ve medikal implant uygulamalarında (özellikle gözeneklilikleri sayesinde osteointegrasyonu destekleyen durumlarda) kullanılabilir potansiyele sahip olduğu görülmüştür.
- Ayrit kalınlığı, birim hücre geometrisi ve doluluk oranı gibi parametrelerin optimize edilmesiyle mekanik zayıflıkların giderilebileceği sonucuna varılmıştır. Böylece farklı uygulamalara uygun optimum mekanik değerler elde edilebilir.

- Gelecek çalışmalarda, yeni kafes geometrilerinin geliştirilmesi, FDM parametrelerinin optimize edilmesi ve yeni malzeme bileşimlerinin araştırılmasıyla mekanik performansın artırılacağı değerlendirilmektedir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak
Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar

- Barzgar Torghabeh, A., Barzgar Torghabeh, I., & Kafaee Razavi, M. (2024). 3D Printed PLA Porous Scaffolds with Engineered Cell Size and Porosity Promote the Effectiveness of the Kelvin Model for Bone Tissue Engineering. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309(12), 2400212. <https://doi.org/10.1002/mame.202400212>
- Başçı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2021). Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: FDM ile Eklemeli İmalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.838281>
- Ben hadj Hassine, S., Chatti, S., Louhichi, B., & Seibi, A. (2024). Experimental study of the tensile behavior of structures obtained by FDM 3D printing process. *Polymers*, 16(11), 1562. <https://doi.org/10.3390/polym16111562>
- Bolat, Ç., Ergene, B., & Ispartalı, H. (2023). A comparative analysis of the effect of post production treatments and layer thickness on tensile and impact properties of additively manufactured polymers. *International Polymer Processing*, 38(2), 244-256. <https://doi.org/10.1515/ipp-2022-4267>
- Das, A., Chatham, C. A., Fallon, J. J., Zawaski, C. E., Gilmer, E. L., Williams, C. B., & Bortner, M. J. (2020). Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers. *Additive Manufacturing*, 34, 101218. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101218>
- Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N. (2021). A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of manufacturing and materials processing*, 5(3), 69. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030069>

- Distefano, F., Mineo, R., & Epasto, G. (2023). Mechanical behaviour of a novel biomimetic lattice structure for bone scaffold. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 138, 105656. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105656>
- Erkul, Ş. N., & Uçaroğlu, S. (2023). Topraklarda Polilaktik Asitin (PLA) Biyobozunması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(1), 25-40. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1246168>
- Eryildiz, M. (2021). The effects of infill patterns on the mechanical properties of 3D printed PLA parts fabricated by FDM. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 7(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.23939/ujmems2021.01-02.001>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing. *Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- 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. <https://doi.org/10.55546/jmm.1357217>
- Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., & Zadpoor, A. A. (2016). Mechanical behavior of additively manufactured porous biomaterials made from truncated cuboctahedron unit cells. *International Journal of Mechanical Sciences*, 106, 19-38. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.11.033>
- Isiani, A., Crittenden, K., Weiss, L., Odirachukwu, O., Jha, R., Johnson, O., & Abika, O. (2025). In-Situ Monitoring and Process Control in Material Extrusion Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Journal of Experimental and Theoretical Analyses*, 3(3), 21. <https://doi.org/10.3390/jeta3030021>
- Jadhav, A., & Jadhav, V. S. (2022). A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2094-2099. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.558>
- Jain, R., & Gupta, N. (2022). Design optimization of PLA lattice in 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1577-1583. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.186>
- Kılınc, M., Tomar, O., & Çağlar, A. (2017). Biyobozunur gıda ambalaj malzemeleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 988-996. <https://doi.org/10.5578/fmbd.66307>
- Kothandaraman, L., & Balasubramanian, N. K. (2024). Optimization of FDM printing parameters for square lattice structures: Improving mechanical characteristics. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.033>
- León-Becerra, J., González-Estrada, O. A., & Quiroga, J. (2021). Effect of relative density in in-plane mechanical properties of common 3D-printed polylactic acid lattice structures. *ACS omega*, 6(44), 29830-29838. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04295>
- Li, Y., Jiang, D., Zhao, R., Wang, X., Wang, L., & Zhang, L. C. (2024). High mechanical performance of lattice structures fabricated by additive manufacturing. *Metals*, 14(10), 1165. <https://doi.org/10.3390/met14101165>
- Liu, H., Gu, D., Qi, J., Zhang, H., Yuan, L., Shi, K., ... & Zhang, Y. (2023). Dimensional effect and mechanical performance of node-strengthened hybrid lattice structure fabricated by laser powder bed fusion. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), e2240306. <https://doi.org/10.1080/17452759.2023.2240306>
- Mani, M., Murugaiyan, T., & Shanmugam, V. (2024). Mechanical characterization and puncture resistance of 3D-printed PLA lattice structures. *Polymer Engineering & Science*, 64(10), 5006-5021. <https://doi.org/10.1002/pen.26897>
- Moreno-Pérez, L. C., Peña-Peña, J. F., Alcántara-Quintana, L. E., Olivares-Pinto, U., & Ruiz-Aguilar, C. (2025). Mechanical and In vitro evaluation of cell structures for bone tissue engineering. *Materials Today Communications*, 42, 111476. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111476>
- Motgi, R., Jatti, V. K., Tamboli, S., & Dhalait, J. (2025). Lattice Structure Optimization of 3D Printed TPMS under Different Loading Conditions Using Regression Machine Learning. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. <https://doi.org/10.22075/mac.2025.35429.1732>
- Nogueira, P., Lopes, P., Oliveira, L., Alves, J. L., Magrinho, J. P., Deus, A. M. D., ... & Silva, M. B. (2024). Evaluation of lattice structures for medical implants: a study on the mechanical properties of various unit cell types. *Metals*, 14(7), 780. <https://doi.org/10.3390/met14070780>
- Özgül, H. G., & Tatlı, O. (2021). Mechanical characterization of polylactic acid polymer 3D printed materials: the effects of infill geometry. *Revista de Metalurgia* 57(3). <https://doi.org/10.3989/revmetalm.202>
- 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. <https://doi.org/10.3390/ma15010097>

İnternet kaynakları

- Prajapati, S., Sharma, J. K., Kumar, S., Pandey, S., & Pandey, M. K. (2024). A review on comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS, TPU, and PETG manufactured engineering components by using fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.018>
- Rajan, K., Samykano, M., Kadrigama, K., Harun, W. S. W., & Rahman, M. M. (2022). Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3), 1531-1570.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08860-7>
- Silva, R. G., Estay, C. S., Pavez, G. M., Torres, M. J., & Viñuela, J. Z. (2021). Assessment of analytical relationships for mechanical properties of truncated octahedron and diamond lattice structures. *Materials Today Communications*, 29, 102756.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102756>
- Tang, C., Liu, J., Yang, Y. A. N. G., Liu, Y., Jiang, S., & Hao, W. (2020). Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures. *Composites Part C: Open Access*, 3, 100076.
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100076>
- Top, N. (2019). Doku mühendisliği için eklemeli imalat kullanılarak yeni bir kemik iskelesi tasarımı ve üretimi, Master Tezi, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. (2014). A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 20 (3): 192–204.
<https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>
- Tümer, E. H., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-based 3D printing applications of PLA composites: A review. *Coatings*, 11(4), 390.
<https://doi.org/10.3390/coatings11040390>
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- Wei, Y. P., Li, H. Q., Ma, Y. C., Miao, Z. Q., Yu, B., & Lin, F. (2025). Kelvin lattice structures fabricated by laser powder bed fusion: Design, preparation, and mechanical performance. *China Foundry*, 22(2), 117-127.
<https://doi.org/10.1007/s41230-025-5007-z>