



3B baskı ile üretilen oksetik çekirdekli sandviç kompozit panellerin mekanik davranışının incelenmesi

Emre Demir^{a,b} ve Ayşe Çelik Bedeloğlu^{a,*}

^aPolimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, 16310, Türkiye.

^bBaykar, İstanbul, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş Eylül 21, 2025

Düzeltilme Mart 05, 2026

Kabul Mayıs 13, 2026

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Oksetik malzemeler

Sandviç kompozit

Eklemeli imalat

Negatif Poisson oranı

Eriyik biriktirme modelleme

ÖZET

Bu çalışmada, negatif Poisson oranına sahip oksetik çekirdek yapıların, sandviç kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki etkisi, eklemeli imalat (AM) yöntemi kullanılarak sistematik olarak araştırılmıştır. Pozitif Poisson oranına sahip geleneksel bal peteği yapılarla karşılaştırıldığında, yeniden girintili ve geliştirilmiş yeniden girintili olmak üzere üç farklı çekirdek konfigürasyonu, polilaktik asit (PLA) malzemesi kullanılarak eriyik biriktirme modelleme (FDM) tekniği ile üretilmiş ve bu yapılar karbon fiber takviyeli epoksi yüzey tabakaları ile birleştirilerek sandviç kompozit paneller elde edilmiştir. ASTM standartlarına uygun olarak çekme, üç nokta eğme ve basma testleri gerçekleştirilmiş; ayrıca Poisson oranları deneysel olarak belirlenmiş ve sonuçlar sonlu elemanlar analizleri (FEA) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, negatif Poisson oranına sahip çekirdek yapıların mekanik performansı artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle geliştirilmiş yeniden girintili tasarım, eğme testinde 160,83 MPa ve basma testinde 125 MPa ile en yüksek dayanım değerlerine ulaşarak dikkat çekmiştir. Bu bulgular, oksetik geometri tasarımının sandviç kompozitlerin karşılaştırmalı mekanik performansını iyileştirmede etkili bir yaklaşım olabileceğini göstermektedir.

Investigation of the mechanical behavior of auxetic core sandwich composite panels produced by 3d printing

ARTICLE INFO

Article history:

Received September 21, 2025

Received in revised form March 05, 2026

Accepted May 13, 2026

Available online

Keywords:

Auxetic materials

Sandwich composite

Additive manufacturing

Negative Poisson's ratio

Fused deposition modeling (FDM)

ABSTRACT

In this study, the effect of auxetic core structures with a negative Poisson's ratio on the mechanical performance of sandwich composites was systematically investigated using additive manufacturing (AM). Compared to conventional honeycomb structures with a positive Poisson's ratio, three different core configurations (re-entrant and improved re-entrant) were fabricated from polylactic acid (PLA) using the fused deposition modeling (FDM) technique. These core structures were then bonded with carbon fiber-reinforced epoxy surface layers to form sandwich composite panels. Tensile, three-point bending, and compression tests were conducted in accordance with ASTM standards, and Poisson ratios were determined experimentally. The results were then comparatively evaluated using finite element analyses (FEA). The results revealed that the cores with a negative Poisson's ratio significantly improved the mechanical performance of the sandwich composites. Among the tested designs, the improved re-entrant geometry achieved the highest strength values, reaching 160.83 MPa in the flexural test and 125 MPa in the compression test. These findings demonstrate that auxetic geometry design has the potential to improve the comparative mechanical performance of sandwich composites.

1.GİRİŞ

Hafiflik, yüksek dayanım ve enerji absorpsiyon kabiliyeti gibi üstün özellikler sunan sandviç kompozit yapılar, havacılıktan otomotive, savunma sanayinden inşaatla kadar birçok ileri mühendislik uygulamasında yaygın olarak

*Sorumlu yazar. Tel.: +90-506-239-9004; e-mail: ayse.bedeloglu@btu.edu.tr

kullanılmaktadır [1,2]. Bu tür yapılarda, iki dış yüzey tabakası arasına yerleştirilen hafif çekirdek yapı, sadece yük taşıyıcı dış tabakalar arasındaki bağlayıcı görevi görmekle kalmayıp aynı zamanda mekanik performansın belirleyici unsuru haline gelmektedir [3]. Geleneksel çekirdek malzemeler genellikle hexagonal petek yapılar, köpükler veya izotropik polimer dolgular olarak kullanılsa da, bu yapıların enerji sönümleme kabiliyeti, darbe dayanımı ve rijitlik açısından bazı sınırlamaları bulunmaktadır [4-5].

Son yıllarda, negatif Poisson oranına sahip oksetik (auxetic) malzemelerin bu sınırlamaları aşabilecek potansiyeli dikkat çekmektedir. Oksetik yapıların temel özelliği, yük altında klasik malzemelerin aksine enine yönde daralmadan genişleme eğilimidir. Bu özellik, enerji absorpsiyonunu artırmakta, lokal deformasyonları engellemekte ve darbe dayanımı gibi parametreleri iyileştirmektedir [6-8]. Bu nedenle oksetik yapıların, özellikle darbe sönümleme kapasitesi istenen sandviç panellerde çekirdek yapı olarak kullanımı giderek artmaktadır [9-10]. Oksetik yapılar; yeniden girintili kafes sistemleri (re-entrant lattices), döner birim hücreler, yıldız şekilli geometri sistemleri ve chiral yapılar gibi çeşitli topolojik varyasyonlar içermektedir [11-12]. Yeniden girintili yapı, en yaygın kullanılan oksetik geometri türlerinden biridir ve literatürde pozitif Poisson oranlı geleneksel petek yapıların yerini alabilecek üstünlükler sunmaktadır. Bu tür geometrilere, hücre duvarlarının özel aç ve yönelimleri sayesinde yük altında ters yönlü yer değiştirmeler gerçekleşmekte ve negatif Poisson davranışı ortaya çıkmaktadır [13-14].

Geleneksel imalat yöntemleri (kalıplama, kesme, termoformlama vb.), bu tür kompleks hücresel geometriye sahip oksetik yapıların seri üretimini teknik olarak zorlaştırmakta veya tamamen imkansız hale getirmektedir [15-16]. Ancak, son yıllarda hızla gelişen eklemeli imalat (additive manufacturing, AM) teknolojileri, özellikle FDM (Fused Deposition Modeling) gibi 3B baskılama teknikleri sayesinde, bu kompleks yapıları yüksek çözünürlükte ve düşük maliyetle üretmek mümkün hale gelmiştir [17-18]. Eklemeli imalatın sunduğu tasarım özgürlüğü, özellikle oksetik geometri gibi özelleştirilmiş çekirdek yapıların üretimi için önemli bir avantaj sağlamaktadır [19]. FDM teknolojisi, termoplastik polimerlerin (örneğin PLA, ABS, PETG vb.) ergitilip katman katman yığılması esasına dayanır ve bu süreçle oldukça detaylı iç geometriye sahip çekirdek yapılar üretilebilir. Bu çalışmada olduğu gibi, PLA (Polilaktik Asit) gibi biyobozunur, çevre dostu ve düşük viskoziteli malzemelerin kullanımı, eklemeli imalatın sürdürülebilirlik açısından avantajını artırmaktadır [20-21].

Literatürde, oksetik geometriye sahip sandviç çekirdeklerinin mekanik performansı üzerine yapılan çalışmalar, bu yapıların eğme, basma ve darbe dayanımı gibi parametrelerde klasik petek yapılara göre daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yeniden girintili (re-entrant) yapıların, deformasyon yönüne göre hücre duvarlarında oluşan ters moment etkisiyle yük altında çökmeden genişleme eğiliminde olduğu ve bu durumun enerji emilimini artırdığı bildirilmiştir [22]. Ek olarak, sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak yapılan çok sayıda simülasyon, oksetik yapıların izotropik davranış göstermediğini, dolayısıyla yük yönüne duyarlı performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bu nedenle çekirdek tasarımlarında geometri optimizasyonunun deneysel verilerle desteklenmesi kritik önemdedir [10,16].

Bu çalışma kapsamında, PLA bazlı üç farklı çekirdek yapı, yani bal peteği (pozitif Poisson oranlı), yeniden girintili (negatif Poisson oranlı) ve geliştirilmiş yeniden girintili (optimize negatif Poisson oranlı), FDM yöntemiyle üretilmiştir. Bu çekirdekler karbon fiber takviyeli epoksi yüzey tabakalarıyla birleştirilerek sandviç kompozit yapılara dönüştürülmüştür. PLA numunelerin temel mekanik özellikleri ASTM D638 ve ASTM D790

standartlarına göre belirlenmiş; sandviç kompozit numunelerin eğme ve basma davranışları ise sırasıyla ASTM C393 ve ASTM C365 standartları esas alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca Poisson oranı davranışı deneysel olarak incelenmiş ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Bu çalışmada değerlendirmeler, karşılaştırmalı dayanım sonuçları ve Poisson oranı davranışı ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle çekirdek kayma modülü, çekirdek kayma dayanımı, basma modülü ve ilerleyici hasar analizi gibi ilave parametreler mevcut veri seti kapsamında ayrıca sunulamamaktadır. Buna rağmen çalışma, farklı oksetik çekirdek geometrilerinin göreceli mekanik performansını sistematik olarak karşılaştırarak literatürde sınırlı sayıda bulunan deneysel-sayısal çalışmalara katkı sunmaktadır.

II. MALZEME VE METOT

2.1. Malzeme

Çekirdek yapıların baskıları için, 1,75 mm çapında poli(laktik asit) (PLA) filament PORİMA'dan satın alınmıştır. Kullanılan PLA filamentin yoğunluğu 23 °C sıcaklıkta 1,23 g/cm³'tür. Eriyik akış indeksi 17,3 g/10 dk olarak ölçülmüştür. Filamentin çekme mukavemeti 56 MPa, kopma uzaması ise %7'dir. Malzemenin elastisite modülü 2850 MPa olarak belirlenmiştir. Isıda eğilme sıcaklığı 55 °C, camsı geçiş sıcaklığı 55-60 °C aralığındadır. Erime noktası 120-170 °C arasında olup, yazdırma (nozul) sıcaklığı 200–230 °C aralığında önerilmektedir. Sandviç kompozitleri üretmek için kullanılan düz dokuma (plain weave) karbon kumaş (245 g/m²) (Kompozit Pazarı) ve L160/H260S MGS epoksi reçine (Dost Kimya) tedarik edilerek kullanılmıştır. Epoksi reçinenin yoğunluğu 23 °C sıcaklıkta 1,13 - 1,17 g/cm³ aralığındadır. Viskozitesi 700- 900 mPas arasındadır. Çekme mukavemeti 70 - 80 N/mm², basma mukavemeti 80 - 100 N/mm², eğme mukavemeti ise 110 - 140 N/mm² olarak verilmiştir. Kopma uzaması %5,0 - %6,5, elastisite modülü 3,2 - 3,5 kN/mm² değerlerindedir. Kürlenmesi, 23 °C'de 24 saattir. Karbon kumaşın filament yoğunluğu 23 °C sıcaklıkta 1,79 g/cm³'tür ve numarası 245 tex'dir. Çekme mukavemeti 3800 MPa, elastisite modülü 240 GPa ve kopma uzaması %1,6'dır.

2.2. Yöntem

2.2.1. Çekirdek yapının modellenmesi

Bu çalışmada üç farklı çekirdek hücre modeli tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında, çekirdek yapılar Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili hücre yapıları olarak belirlenmiştir. Bal Peteği hücre yapısı, oksetik özellik göstermeyen ve pozitif Poisson oranına sahip olacak şekilde tasarlanırken, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili hücre yapıları ise negatif Poisson oranı sergileyen oksetik yapılar olarak planlanmıştır.

Çekirdek yapıların tasarımı, SolidWorks bilgisayar destekli üç boyutlu modelleme ve tasarım yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı tasarımların karşılaştırılabilmesi için tüm modellerde hücre boyutları ve yüzey alanları sabit tutulmuştur. Kullanılan 3B yazıcının nozul çapı 0,4 mm olduğundan, hücre duvarı kalınlığı bu değerin katları olacak şekilde belirlenmiştir.

Her birim hücre için belirlenen tasarım parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Bu parametrelerde, h dikey hücre duvarlarının, l ise eğimli hücre duvarlarının uzunluğunu ifade ederken, α eğimli duvarların açısı değerini

göstermektedir. t , tüm hücre modellerinde duvar kalınlığını temsil etmektedir. Geliştirilmiş Yeniden Girintili modelde eklenen yarım dairesel modifikasyonda ise r , yarım dairenin yarıçapını belirtmektedir. Farklı tasarımlar arasında karşılaştırma yapılabilmesi için birim hücre sayısı ile yapıların toplam yüksekliği, genişliği ve derinliği birbirine yakın değerlerde tutulmuştur. Şekil 1’de, Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapıların birim hücre görselleri, sırasıyla 1(a), 1(b) ve 1(c) olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Modellere ait birim hücre boyutları.

Yapı	l (mm)	h (mm)	t (mm)	α (°)	r (mm)
Bal Peteği	5,20	9	0,8	30	-
Yeniden Girintili	5,20	9	0,8	-30	-
Geliştirilmiş Yeniden Girintili	5,20	9	0,8	-30	2,10

2.2.2. Çekirdek yapı numune üretimi

Eklemeli imalat ile çekirdek yapı baskısı için, kullanılan 3B yazıcı (Bluer 3B Yazıcı (Two Trees)), eriyik biriktirme modelleme (FDM) teknolojisi ile çalışmaktadır. Yazıcıda bir adet nozul bulunmaktadır ve nozul çapı 0,4 mm’dir. Maksimum baskı hacmi 230 x 230 x 280 mm boyutlarındadır. Baskı doğruluğu $\pm 0,1-0,2$ mm aralığında olup, katman kalınlığı 0,1-0,4 mm arasında ayarlanabilmektedir. Yazıcı 1,75 mm çapında filamentler ile uyumludur. Ekstrüzyon kafasının ulaşabileceği en yüksek sıcaklık 260 °C’dir.

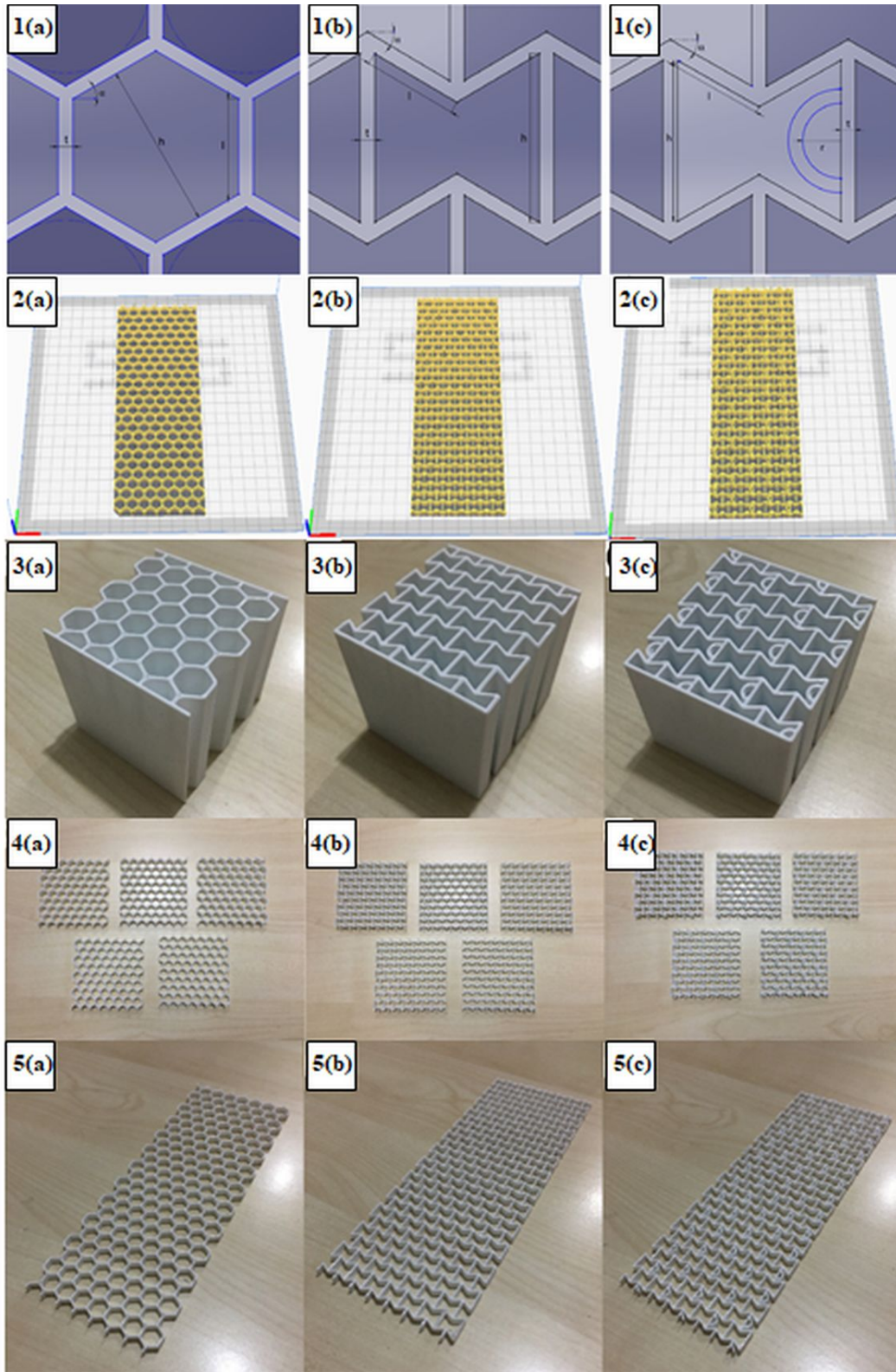
SolidWorks programında ASTM standartlarına uygun şekilde tasarlanan çekme, basma ve üç nokta eğme testi numuneleri STL uzantılı dosya şeklinde kaydedilerek, tasarlanan parçaların üretimi için doluluk oranı, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı gibi parametreleri belirlemekte yardımcı olan Cura (Ultimaker) dilimleme programına aktarılmıştır. Ayrıca Cura programı, üç boyutlu yazıcının baskı alabilmesi için model dosyasını okuyabileceği G-Code uzantılı formata çevirmektedir. PLA filament kullanılarak üretilen numunelerin üretim parametreleri şu şekildedir: Baskıda kullanılan malzeme PLA olup, nozul çapı 0,4 mm ve filament çapı 1,75 mm’dir. Baskı hızı 40 mm/s olarak ayarlanmıştır. Nozul sıcaklığı ilk katman için 220 °C, sonraki katmanlar için ise 200 °C olarak belirlenmiştir. Tabla sıcaklığı 60 °C’dir. Numuneler, %100 dolgu oranı ile üretilmiştir. 3D baskıda kullanılan katman yüksekliği (baskı katmanı kalınlığı) 200 μ m’dir.

G-Code formatına dönüştürülen çekme, basma ve üç nokta eğme numuneleri Micro SD kart aracılığıyla üç boyutlu yazıcıya aktarılmış ve tüm modeller fiziksel olarak üretilmiştir. Birim hücre geometrileri ile Cura dilimleme görüntüleri, kübik numuneler, basma numuneleri ve üç nokta eğme numunelerine ait temsili görseller Şekil 1’de sunulmuştur.

2.2.3. Sandviç kompozitlerin üretimi

Üretilen sandviç kompozit numuneler üç temel bileşenden oluşmaktadır: çekirdek yapı, yüzey tabakaları ve reçine. Alt ve üst yüzey tabakalarının üretiminde, takviye malzemesi olarak dokuma karbon fiber kumaş, matris malzemesi olarak ise epoksi reçine tercih edilmiştir. Üretim sürecinde, alt yüzeye dört kat karbon fiber kumaş serilmiş, üzerine çekirdek yapı yerleştirilmiş ve en üstte yine dört kat karbon fiber kumaş sıralı olarak konumlandırılmıştır. Her bir karbon fiber tabakası, epoksi ve sertleştirici karışımı (100:34 w/w) kullanılarak fırça yardımıyla tamamen ıslatılmıştır. Daha sonra hazırlanan numuneler vakum naylonu ile kaplanarak vakum

ortamına alınmıştır. Üretim işleminin ardından sandviç kompozit numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 1. Bal Petegi, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapıların birim hücre geometrileri (1(a), 1(b) ve 1(c)), üç nokta eğme test numunelerinin Cura dilimleme programına aktarılmış görüntüleri (2(a), 2(b) ve 2(c)), basılmış kübik numuneler (3(a), 3(b) ve 3(c)), çekirdek yapıda kullanılacak basma numuneleri (4(a), 4(b) ve 4(c)) ve üç nokta eğme numuneleri (5(a), 5(b) ve 5(c))

2.3. Karakterizasyon

2.3.1 Mekanik dayanım testleri

PLA filamentle üretilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi ASTM D638-4 standardına uygun olarak, standart “dog-bone” geometrisinde hazırlanmıştır [24]. Numunelerin boyutları $115 \times 19 \times 3,2$ mm olup, testler 250 kN kapasiteli Shimadzu AG-X-plus cihazı ile gerçekleştirilmiş ve her deney beş tekrar ile yapılmıştır. Üç nokta eğme testleri, numunenin iki destek üzerine yerleştirilip orta noktasına kuvvet uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. PLA numuneleri ASTM D790 standardına uygun dikdörtgen geometride hazırlanmıştır. Sandviç kompozit numuneler ise ASTM C393 standardına göre tasarlanmış ve aynı cihazda, her standart için beş tekrar ile test edilmiştir [25-26].

Hücrelerin oksetik davranışını gözlemlemek amacıyla literatüre uygun olarak geliştirilen kübik modellerin boyutları $50 \times 50 \times 50$ mm olarak belirlenmiş, farklı tasarımlarda hücre sayısının eşit olabilmesi için ± 5 mm tolerans uygulanmıştır. Basma testleri için çekirdek yapılar ASTM C365 standardına uygun olarak 75×75 mm boyutlarında tasarlanmıştır, kullanılan çekirdek numunelerin kalınlığı ise 9 mm olarak belirlenmiştir [27]. Sandviç kompozit numunelere uygulanan üç nokta eğme testleri ASTM C393 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler 200 mm uzunluk, 75 mm genişlik ve toplam 6,8 mm kalınlığa sahiptir. Bu kalınlık, 4,8 mm çekirdek yapı ve her iki yüzeyde 1 mm kalınlığında karbon fiber/epoksi tabakalardan oluşmaktadır. Testlerde açıklık uzunluğu yaklaşık 110 mm olarak belirlenmiş ve ASTM C393 standardında önerilen oranlar dikkate alınmıştır. Çalışmanın amacı, mutlak malzeme sabitlerini çıkarmaktan çok, aynı yüzey tabakası mimarisi altında farklı çekirdek geometrilerinin göreceli mekanik performansını karşılaştırmaktır. Bu nedenle eğme ve basma deneylerinde raporlanan dayanım değerleri, test sırasında elde edilen maksimum yükler esas alınarak nominal numune boyutları üzerinden hesaplanmış; tüm numunelerde aynı yüzey tabakası mimarisi korunarak karşılaştırmalı değerlendirme yapılmıştır.

2.3.2 Poisson oranının hesaplanması

Ayrıca, herhangi bir standarda bağlı kalmadan farklı tasarımlara sahip kübik numuneler, 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu numuneler basma testine tabi tutulmuş ve ekstansometre yardımıyla tasarımların Poisson oranları belirlenmiştir [28]. Poisson oranı, Denklem 1’de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır [29]:

$$v_{1,2} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

Burada;

$v_{1,2}$ = Poisson oranı

ε_2 = Malzemenin enine gerinim değeri

ε_1 = Malzemenin boyuna gerinim değeri

2.3.3 Sonlu elemanlar analizi

Oksetik ve oksetik olmayan sandviç yapıların davranışını sayısal olarak inceleyebilmek için öncelikle çekirdek malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş, geometrik sadeleştirme ve ağ yapısı tanımlamalarının ardından farklı yükleme koşulları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler Ansys yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Süreç; eğme ve basma deneylerinin simülasyonu, ağ yapısının oluşturulması, malzeme özelliklerinin tanımlanması, sınır şartlarının belirlenmesi ve sonuçların değerlendirilmesi adımlarından oluşmuştur. Sandviç yapılar bilgisayar ortamında modellenmiş, dörtgen kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapıları hazırlanmıştır. Gerçeğe en yakın sonuçları elde etmek için malzeme özellikleri deneysel test verileriyle programa girilmiştir. Çekirdek yapı için polilaktik asit, yüzey plakaları için ilgili malzemeler tanımlanmıştır. Son aşamada modellere yük uygulanarak statik analizler gerçekleştirilmiş ve farklı çekirdek geometrilerinin göreceli deformasyon davranışları değerlendirilmiştir. Bu çalışmada FEA, ayrıntılı hasar ilerleme modellemesi amacıyla değil, farklı çekirdek geometrilerinin yük altındaki göreceli davranışlarını karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Ara yüzey hasarı, ilerleyici kırılma ve ayrıntılı gerilme dağılımı analizleri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş olup gelecekteki çalışmalarda ele alınabilir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Basılmış PLA Plakalara Ait Çekme ve Üç Nokta Eğme Test Sonuçları

Öncelikle, çekirdek yapıda kullanılan PLA malzemesinin temel mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM D638-4 standardına uygun olarak üretilen beş numune çekme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürde bildirilen PLA değerleriyle karşılaştırılmıştır. Testler sonucunda ortalama çekme dayanımı 69,4 MPa ve kopma uzaması %8,7 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, literatürde PLA için raporlanan 60-70 MPa aralığıyla uyumludur [21].

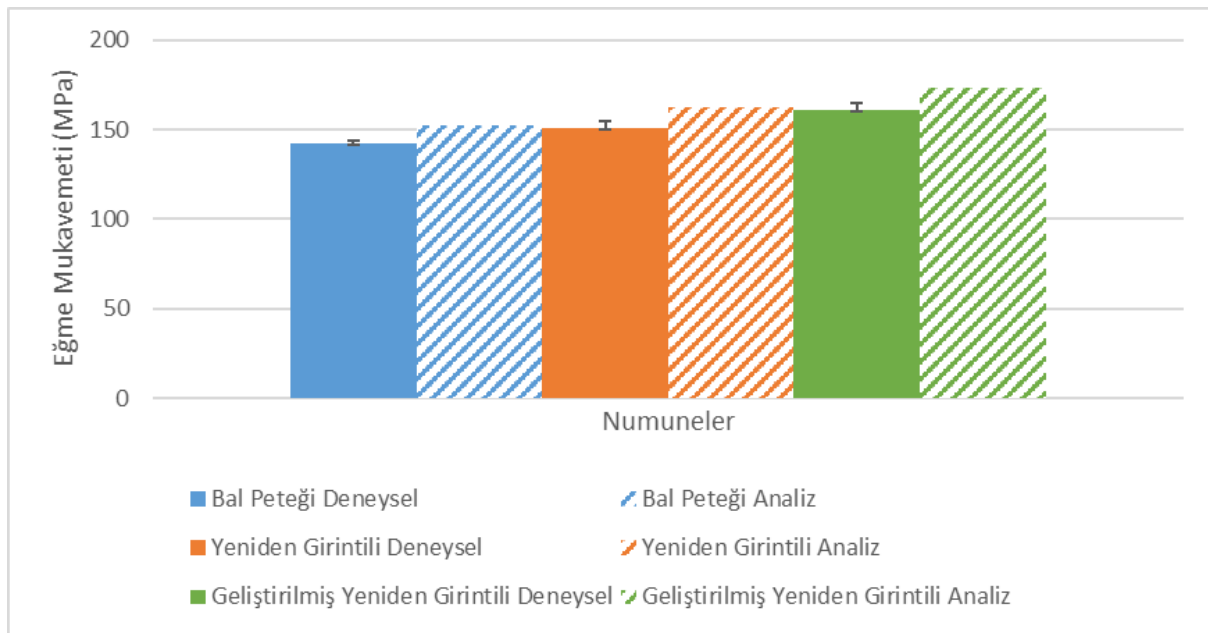
PLA malzemesinin eğilme davranışını belirlemek için ASTM D790 standardına uygun numunelerle üç nokta eğme testi yapılmıştır. Ortalama eğilme dayanımı 96,4 MPa, kopma uzaması %6,5 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar PLA'nın rijit ve gevrek yapısını ortaya koymakta ve çekirdek malzeme olarak kullanılabilirliğini doğrulamaktadır. Sonraki aşamada, Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili çekirdek geometrilerine sahip sandviç kompozitler basma ve üç nokta eğme testleri ile değerlendirilmiş, çalışma hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle yürütülmüştür.

3.2. Sandviç Kompozitlere Ait Mekanik Test ve Sayısal Analiz Sonuçları

3.2.1 Üç nokta eğme test ve sayısal analiz sonuçları

Üç nokta eğme testleri sonucunda ortalama eğme mukavemetleri; Bal Peteği yapıda 142,15 MPa, Yeniden Girintili yapıda 150,68 MPa ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapıda 160,83 MPa olarak belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları ise sırasıyla 152,54 MPa, 162,08 MPa ve 173,41 MPa bulunmuştur (Şekil 2). Deneysel veriler, negatif Poisson oranına sahip oksetik çekirdeklerin, pozitif Poisson oranlı Bal Peteği yapısına göre daha yüksek eğilme mukavemeti sergilediğini göstermektedir. Bu eğilim literatürde de raporlanmış olup, oksetik yapıların yük altında

daha stabil davrandığı ve deformasyon sırasında yükün daha geniş bir bölgeye yayılabildiği bildirilmektedir [30,13]. Deneysel ve sayısal veriler karşılaştırıldığında sapmalar Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapılar için sırasıyla %7,31, %7,56 ve %7,82 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, modelleme yaklaşımının deneysel eğilimleri makul düzeyde temsil edebildiğini göstermektedir. En yüksek eğilme dayanımı, kavisli destek elemanlarının sağladığı yapısal rijitlik sayesinde Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapıda elde edilmiştir [23]. Ayrıca, negatif Poisson oranının korunması ve desteklerin yük dağılımını iyileştirmesi, sonuçlara olumlu katkı sağlamıştır. Eğme testi sırasında, yüzey tabakalarında belirgin deformasyon gözlenirken çekirdek yapıda sınırlı deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, yükün büyük ölçüde yüksek rijitliğe sahip karbon fiber yüzey tabakaları tarafından taşındığını göstermektedir.

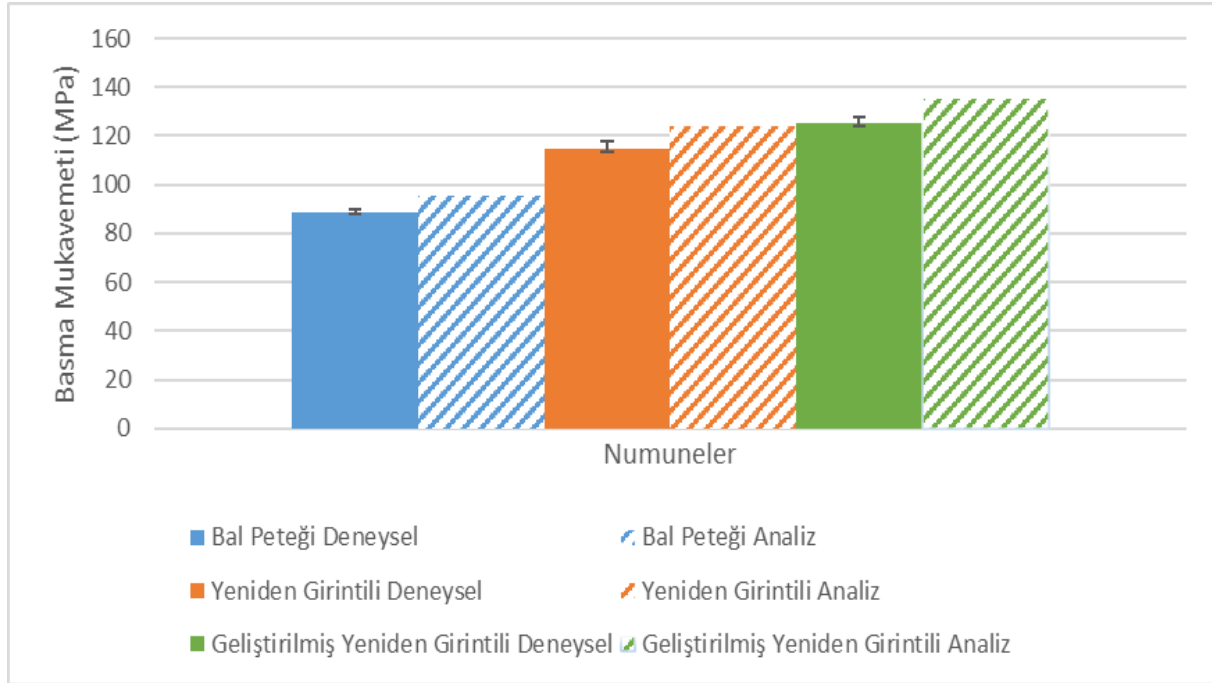


Şekil 2. Üç nokta eğme mukavemet deneysel ve analiz sonuç grafiği

3.2.2 Basma test ve sayısal analiz sonuçları

3B yazıcıyla üretilen farklı çekirdek yapılar, alt ve üst yüzeylerine karbon kumaşın epoksi ile yapıştırılmasıyla sandviç kompozitlere dönüştürülmüş ve bu numuneler basma testine tabi tutulmuştur. Basma dayanımı değerleri, numunelerin maksimum yük taşıma kapasitesine karşılık gelen noktadan elde edilmiştir; gerilme-gerinim eğrileri üzerinden modül tayini bu çalışmada gerçekleştirilmemiştir. Maksimum yükten hesaplanan görünür basma dayanımı, Bal Peteği yapıda 88,7 MPa, Yeniden Girintili yapıda 114,66 MPa, Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapıda ise 125 MPa olarak ölçülmüştür. Ansys analiz sonuçları sırasıyla 95,52 MPa, 123,87 MPa ve 135,73 MPa bulunmuştur (Şekil 3). En yüksek basma dayanımı, negatif Poisson oranına sahip Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapıda elde edilmiştir. Pozitif Poisson oranına sahip Bal Peteği yapısı ise en düşük dayanımı göstermiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farklar Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapılar için sırasıyla %7,69, %8,03 ve %8,59 olarak hesaplanmıştır. Pozitif Poisson oranına sahip Bal Peteği yapısında, yük altında yanıl daralma oluşmakta ve bu durum yerel burkulma riskini artırmaktadır. Buna karşılık, oksetik yapılar

(negatif Poisson oranı) enine yönde genişleyerek gerilme birikimlerini azaltmakta ve dayanımı yükseltmektedir. Bu eğilim literatürdeki çalışmalarla da uyumludur [24]. Ayrıca, eklenen destek elemanlarının yapısal kararlılığı artırması ve gerilme birikimini azaltması, basma dayanımındaki iyileşmeye katkı sağlamış olabilir.



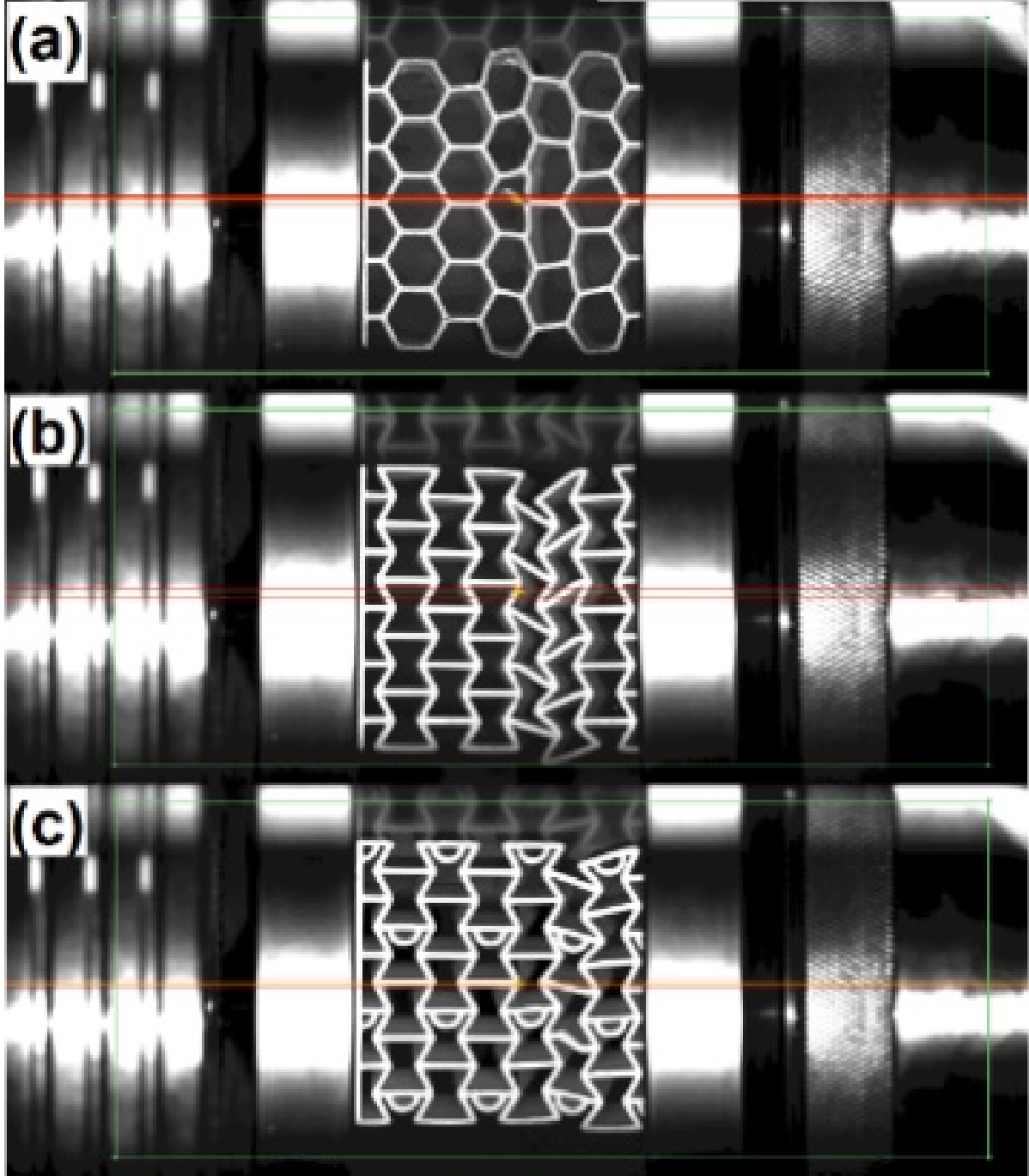
Şekil 3. Basma mukavemeti deneysel ve analiz sonuç grafiği.

3.3 Poisson oranlarına ait deneysel bulgular

Şekil 4'te, 3B yazıcıyla üretilen farklı çekirdek geometrilerine ait kübik numunelerin universal test cihazında basma testi sırasındaki deformasyon davranışları gösterilmektedir. Görsellerde kırmızı ve yeşil referans çizgileri kullanılarak numunelerin yük altındaki enine deformasyonları vurgulanmıştır. Bal peteği yapısında (Şekil 4a), basma yükü altında hücrelerin enine yönde daraldığı gözlemlenmiş olup bu durum pozitif Poisson oranına sahip klasik malzeme davranışını doğrulamaktadır. Buna karşılık, yeniden girintili (Şekil 4b) ve geliştirilmiş yeniden girintili (Şekil 4c) yapılarda, yük altında hücrelerin enine yönde genişlediği açıkça görülmektedir. Bu davranış, negatif Poisson oranına sahip oksetik yapıların karakteristik özelliğini ortaya koymaktadır. Özellikle geliştirilmiş yeniden girintili yapıda, hücre içi destek elemanlarının etkisiyle enine genişlemenin daha kontrollü gerçekleştiği ve bu nedenle Poisson oranının mutlak değerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu görsel bulgular, deneysel olarak hesaplanan Poisson oranı değerleri ile uyumlu olup, farklı çekirdek geometrilerinin deformasyon davranışını desteklemektedir.

Test sırasında sabit yük altında, ekstansometre kullanılarak enine ve boyuna eksenel gerilme değerleri ölçülmüş, bu veriler Denklem 1'deki formül yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, pozitif Poisson oranına sahip Bal Peteği yapısının değeri 0,5 olarak belirlenmiştir. Negatif Poisson oranı gösteren oksetik yapılardan Yeniden Girintili yapı -0,2, Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapı ise -0,15 değerine sahiptir. Geliştirilmiş modelin daha az

negatif Poisson oranı, hücre içindeki ek desteklerin yanal genişmeyi kısıtlamasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen Poisson oranı değerleri literatürdeki bulgularla uyumludur [28-29]. Bal peteği yapısının pozitif Poisson oranı, yük altında klasik malzeme davranışını gösterirken; yeniden girintili yapılar negatif Poisson oranıyla tipik oksetik özellik sergilemiştir [31-32]. Elde edilen bulgular, negatif Poisson oranına sahip yapıların bu çalışma kapsamında daha yüksek eğilme ve basma dayanımı sergilediğini göstermektedir; benzer eğilimler literatürde de raporlanmıştır [6,15,34]. Şekil 4'te verilen görseller, nicel ölçüm sunmaktan çok Poisson oranı hesaplamalarında elde edilen deformasyon yönünü nitel olarak desteklemek amacıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 4. (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. Kırmızı ve yeşil referans çizgileri, yükleme öncesi ve sonrası enine boyut değişimini görsel olarak vurgulamak amacıyla kullanılmıştır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, negatif Poisson oranına sahip oksetik çekirdek yapılar kullanılarak PLA esaslı sandviç kompozit paneller, geleneksel bal peteği yapılarla karşılaştırılmıştır. FDM yöntemiyle üretilen iki farklı oksetik geometri (yeniden girintili ve geliştirilmiş yeniden girintili), karbon fiber takviyeli yüzey tabakalarıyla birleştirilmiştir.

Yapılan mekanik testler sonucunda, PLA malzemesinin çekme ve eğme dayanımlarının sırasıyla 69,4 MPa ve 96,4 MPa olduğu ve çekirdek yapılar için yeterli rijitlik sağladığı belirlenmiştir. Eğilme testlerinde geliştirilmiş yeniden girintili yapı 160,83 MPa ile en yüksek değere ulaşırken, bal peteği yapı 142,15 MPa ile en düşük değeri göstermiştir. Basma testlerinde de benzer şekilde 125 MPa ile en yüksek değer geliştirilmiş yeniden girintili yapıda gözlenmiştir. Poisson oranı ölçümleri, bal peteği yapının pozitif (+0,50) değer sergilediğini, oksetik yapıların ise negatif değerler (-0,20 ve -0,15) gösterdiğini ortaya koymuştur. Sonlu elemanlar analizleri ile deneysel sonuçlar arasında benzer eğilimler elde edilmiştir.

Bu çalışmada FEA, deneysel eğilimleri destekleyici karşılaştırmalı bir araç olarak kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki %7–9 aralığındaki fark, modelin geometri kaynaklı performans farklılıklarını yakalayabildiğini göstermektedir. Sayısal değerlendirmeler, farklı çekirdek geometrilerinin yük altındaki göreceli deformasyon davranışlarının yorumlanmasına katkı sağlamıştır.

Sonuç olarak, oksetik çekirdek yapılar, bu çalışma kapsamında geleneksel bal peteği yapıya kıyasla daha yüksek eğilme ve basma dayanımı sergileme eğilimi göstermiştir. Ayrıca, düşük maliyetli ve erişilebilir bir üretim tekniği olan FDM yöntemiyle üretilibilmeleri, bu yapıların uygulama potansiyelini artırmaktadır. Bu tür panellerin, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi mekanik stabilitenin kritik olduğu uygulamalar açısından potansiyel taşıdığı değerlendirilmektedir. Enerji sönmeme davranışı bu çalışmada doğrudan değerlendirilmemiştir ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı polimer matrisleri, çok malzemeli üretim teknikleri ve geometri optimizasyonları ile performansın daha da artırılması önerilmektedir. Bununla birlikte, çekirdek kayma özellikleri, basma modülü ve ayrıntılı hasar gelişimi gibi parametrelerin gelecekte ilave deneysel ve sayısal çalışmalarla desteklenmesi yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Bitzer TN (1997) Honeycomb technology: Materials, design, manufacturing, applications and testing. Chapman & Hall, London.
2. Zenkert D (1995) An introduction to sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd, London.
3. Gibson LJ, Ashby MF (1997) Cellular solids: Structure and properties, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
4. Grenestedt JL (1998) Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. J Mech Phys Solids 46:29-50. [https://doi.org/10.1016/s0022-5096\(97\)00035-5](https://doi.org/10.1016/s0022-5096(97)00035-5)
5. Wang CC, McDowell DL (2004) In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs. J Eng Mater Technol 126:137-156. <https://doi.org/10.1115/1.1688363>
6. Lakes RS (1987) Foam structures with a negative Poisson's ratio. Science 235:1038-1040. <https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038>
7. Erdoğan İ, Toktaş İ (2023) Investigation of the auxetic of a novel geometric structure and improvement of Poisson's ratio at different inner thicknesses. Gazi Univ Fen Bilimleri Derg Part C Tasarım ve Teknoloji 11:893-902. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1346281>

8. Alderson A, Alderson KL (2007) Auxetic materials. *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng* 221:565-575. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO211>
9. Li Y, Yang X, Wang H (2015) Mechanical performance of sandwich structures with auxetic honeycomb cores. *Mater Des* 85:204-211. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.138>
10. Yang H, Li S, Zhang L (2020) Auxetic honeycomb structures with enhanced energy absorption under out-of-plane impact. *Int J Mech Sci* 182:105735. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105735>
11. Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM (2018) Auxetic metamaterials and structures: A review. *Smart Mater Struct* 27:023001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
12. Lim TC, Huynh NP, Lee HP (2019) Auxetic materials and structures. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12444-1>
13. Kolken HMA, Zadpoor AA (2017) Auxetic mechanical metamaterials. *RSC Adv* 7:5111-5129. <https://doi.org/10.1039/C6RA27300E>
14. Choi JB, Lakes RS (1992) Non-linear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio. *J Mater Sci* 27:5375-5381. <https://doi.org/10.1007/BF00541621>
15. Grima JN, Evans KE (2000) Auxetic behavior from rotating squares. *J Mater Sci Lett* 19:1563-1565. <https://doi.org/10.1023/A:1006781224002>
16. Wang Y, Yang H, Li S (2016) Finite element modeling of auxetic structures with re-entrant hexagon topology. *Mater Res Express* 3:065301. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/6/065301>
17. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng* 143:172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
18. Gibson I, Rosen DW, Stucker B (2021) Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, 3rd edn. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
19. Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Advincula RC (2018) Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Addit Manuf* 20:44-67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
20. Farah S, Anderson DG, Langer R (2016) Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Adv Drug Deliv Rev* 107:367-392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
21. Torrado AR, Roberson DA (2016) Failure analysis and anisotropy evaluation of 3D-printed tensile test specimens of different geometries. *J Fail Anal Prev* 16:154-164. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0060-x>
22. Li H, Zhang X, Yuan W (2022) Design and evaluation of modified re-entrant honeycomb structures for improved compressive performance. *Mater Today Commun* 31:103758. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103758>
23. Günay M, et al (2020) PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Derg* 23:73-79
24. Kaygusuz B, Özerinç S (2018) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen PLA bazlı yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Derg* 16:1-6.
25. Askland DR (1996) Mechanical testing and properties. In *The science and engineering of materials* ss 140-187. Boston, MA: Springer US.
26. Hassan AKF, Abdullah OA (2015) New methodology for prestressing fiber composites. *Univ J Mech Eng* 3:252-261
27. Bedeloğlu A, et al (2024) The flexural and compressive properties of sandwich composites with different 3D-printed core structures. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science* 4:98-112
28. Li T, et al (2018) Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Mater Des* 142:247-258. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.034>
29. Lekesiz H, Bhullar SK, Karaca AA, Jun MB (2017) Mechanical characterization of auxetic stainless steel thin sheets with reentrant structure. *Smart Mater Struct* 26:085022. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa73a4>
30. Grima JN, Alderson A, Evans KE (2005) Auxetic behaviour from rotating triangles. *J Mater Sci* 40:4721-4727. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-2679-y>
31. Zhang X, Wang X, Ren X, Liu X (2021) Mechanical performance of sandwich structures with different auxetic cores under quasi-static compression. *Mater Des* 203:109592. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109592>
32. Sadikbasha S, Pandurangan V (2023) High velocity impact response of sandwich structures with auxetic tetrachiral cores: analytical model, finite element simulations and experiments. *Compos Struct* 317:117064. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117064>
33. Xiao P, Lei B, Vescovini R, Shi Z (2024) Optimal design of composite sandwich panel with auxetic reentrant honeycomb using asymptotic equivalent model and PSO algorithm. *Compos Struct* 328:117761. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117761>

34. Türkoğlu İK, Kasım H, Yazıcı M (2022) Experimental investigation of 3D-printed auxetic core sandwich structures under quasi-static and dynamic compression and bending loads. Int J Protect Struct 14:63-86. <https://doi.org/10.1177/20414196221079366>