



Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced with fused deposition modeling (FDM)

Berkay Ergene^{1*}, Bekir Yalçın²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Pamukkale University, Denizli, 20160, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Türkiye

Highlights:

- Determining the energy absorption and mechanical performance of various cellular structures
- Poisson Ratio of honeycomb, re-entrant, hybrid and chiral structures.
- Dimensional accuracy of the 3D printed cellular structures.

Keywords:

- Fused deposition modeling
- Honeycomb
- Re-entrant
- Energy absorption
- Mechanical performance

Article Info:

Research Article

Received: 31.05.2021

Accepted: 27.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.945650

Correspondence:

Author: Berkay Ergene

e-mail: bergene@pau.edu.tr

phone: +90 554 281 4943

Graphical/Tabular Abstract

In Figure A, designed and tested cellular structures were given with details. Θ , t , h and l demonstrate the rib angle, rib thickness, height of unit cell and length of unit cell respectively.

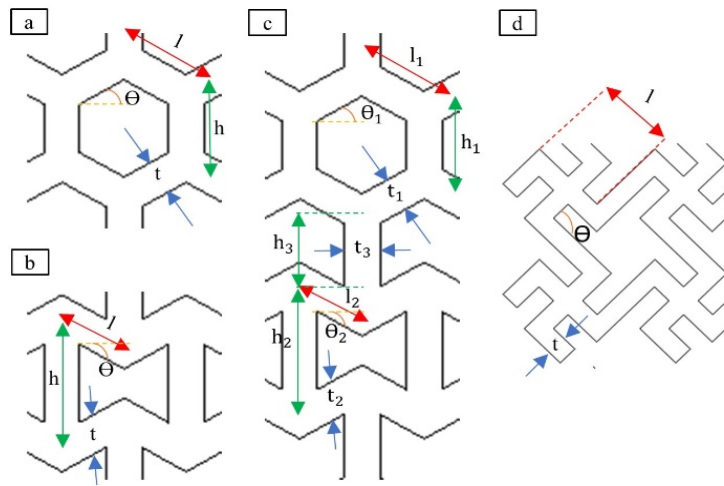


Figure A. Designed and tested cellular structures; a) honeycomb, b) re-entrant, c) hybrid, d) chiral

Purpose: This study aims to determine the dimensional accuracy, energy absorption, specific energy absorption, some mechanical properties such as elasticity modulus, tensile strength, compressive strength and lastly Poisson ratio of the various cellular structures manufactured by FDM method. Moreover, investigating the mechanical performances of cellular structures which are widely used in many fields under tension differ this paper than other performed studies in literature which only focus on the mechanical performances under compression status. Lastly, the effect of direction of the unit cells in cellular structures on mechanical properties, energy absorption and Poisson ratio values were examined.

Theory and Methods:

Cellular structures which have different unit cell forms were designed by AutoCAD program. Designed structures were 3D printed by FDM method from PLA material and then their dimensional accuracy was calculated with help of microscopic images performed in Image J program. Lastly, energy absorption, some mechanical properties and Poisson Ratio values of these cellular structures were obtained experimentally.

Results:

The results show that energy absorption levels and strength values of cellular structures affected directly related with the applied load type on them (tension or compression). Moreover, honeycomb structure with rib thickness of 0,5 mm (Hy 0,5) and re-entrant structure with rib thickness of 0,5 mm (Ry 0,5) exhibited the best energy absorption ability under tension and compression respectively.

Conclusion:

Type and direction of the unit cells in the cellular structures directly affect the mechanical properties and energy absorption capabilities of cellular structures under tension and compression.



Eriyik yığma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi

Berkay Ergene^{1*}, Bekir Yalçın²

Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 20160, Kınıklı, Denizli, Türkiye
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Eriyik yığma modelleme ile hücresel yapıların üretilebilirliğinin araştırılması
- Çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının belirlenmesi
- Geometrik özelliklerin hücresel yapıların enerji emme kabiliyetine etkisinin araştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.05.2021

Kabul: 27.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.945650

Anahtar Kelimeler:

Eriyik yığma modelleme,
balpeteği,
re-entrant,
enerji emme,
mekanik performans

ÖZ

Bu çalışmada, hafiflik ve yük absorpsiyonu gibi özellikleri ile kendine özgü kullanım alanı olan hücresel yapılardan geleneksel bal peteği yapı ile, yeni nesil negatif Poisson davranışa sahip re-entrant, kiral ve hibrit yapıların (re-entrant+bal peteği) mekanik özelliklerinin deneysel karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, PLA malzeme ve farklı geometrik parametreler kullanılarak bal peteği, re-entrant, kiral ve hibrit yapıya sahip standart deney numuneleri EYM ile optimum şartlarda imal edilmiştir. Eklemeli imal edilen numuneler ile, çekme ve basma testleri, sertlik testleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, hücresel yapıdaki birim hücrelerin yönünün ve giriş kalınlığının hücresel yapıların enerji absorpsiyon özelliğini etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, çekme ve basma durumunda en iyi yük absorpsiyonu sırasıyla giriş kalınlığı 0,5 mm olan ve birim hücreleri y yönüne bakan balpeteği yapı (Hy 0,5) ve re-entrant yapı (Ry 0,5) ile sağlanabilmiştir. Hücresel yapıların çekme ve basma dayanımları artan giriş kalınlığı ile birlikte artarken, ortalama Ra değeri ve sertlik değeri sırasıyla 14 µm ve 75 Shore D olarak ölçülmüştür. Re-entrant, kiral ve hibrit yapıda deformasyon miktarına bağlı olarak negatif Poisson oranı gözlemlenmesine rağmen, bal peteği yapılarda pozitif Poisson davranışı görülmüştür.

Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced with fused deposition modeling (FDM)

H I G H L I G H T S

- Investigation of the manufacturability of cellular structures with fused deposition modelling
- Determination of the mechanical performances of various cellular structures
- Exploring the effect of geometric features on the energy absorption abilities of cellular structures

Article Info

Research Article

Received: 31.05.2021

Accepted: 27.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.945650

Keywords:

Fused deposition modelling,
honeycomb,
re-entrant,
energy absorption,
mechanical performance

ABSTRACT

In this study, it was aimed to experimentally compare the mechanical properties of the traditional honeycomb structure, which is one of the cellular structures with its own specific area of use with its features such as lightness and load absorption, and the new generation re-entrant, chiral and hybrid structure (re-entrant + honeycomb) with negative Poisson behavior. In this context, standard test samples with honeycomb, re-entrant, chiral and hybrid structures were produced with fused deposition modelling (FDM) under optimum conditions by using PLA material and different geometric parameters. Tensile and compression tests, hardness tests and surface roughness measurements were carried out with the specimens that were additively manufactured. According to the results, it was determined that the direction of the unit cells in the cellular structure and the rib thickness affect the energy absorption properties of the cellular structures. While the tensile and compressive strengths of the cellular structures increased with increasing rib thickness, the average Ra value and hardness value were measured as 14 µm and 75 Shore D respectively. Although negative Poisson ratio was observed depending on the amount of deformation in re-entrant, chiral and hybrid structures, positive Poisson behavior was observed in honeycomb structures.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *bergene@pau.edu.tr, bekiryalcin@aku.edu.tr / Tel: +90 554 281 4943

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde, araştırma-geliştirme (AR-GE) yöntemlerinin bir sonucu olarak araştırmacıların ilgi odaklarının, minimum malzeme kullanımına bağlı olarak hafif, ancak aynı zamanda yeterli mekanik performansa ve yüksek spesifik dayanıma sahip hücresel yapılara kaydığı görülmektedir. Hücresel yapılar hafif olma, yüksek spesifik dayanım ve kırılma tokluğuna sahip olma, enerji ve ses sönümlenme [1-3] ve batmaya karşı direnç gösterme özelliklerine sahiptir. Ayrıca, hücresel yapıların elastisite modül (EM) ve Poisson oranı (PO) [4] değerlerinin değişimi, geometrik özelliklerinin değişimi ile sağlanabildiği için hücresel yapılar kompozit malzemelerde çekirdek yapısı [5, 6], otomobillerde çarpışma kutusu [7], kalça implantlarında kök yapısı [8, 9], havacılıkta uçak kanat yapılarında ve uçak burun konilerinde [10] tercih edilmektedir. Karmaşık geometri hücresel yapıların imalatında döküm, haddeleme ve frezeleme gibi konvansiyonel üretim yöntemlerinin yetersiz kaldığı ya da birden fazla imalat metodunun kullanılıp üretimin sağlanması durumunda ise üretim süresinin uzun ve maliyetli olduğu bilinmektedir [11]. Bu bağlamda, yapılan tasarım doğrultusunda, katmanlı üretimin baz alındığı eklemeli imalat yöntemleri ile karmaşık geometri hücresel yapıların çeşitli malzemelerden kolaylıkla üretilebildiği literatürdeki çalışmalar ışığında tespit edilmiştir. Eklemeli imalat teknolojileri toz yataklı ergitme, yapıştırıcı ile imalat, direkt enerji depolama, malzeme ekstrüzyon, malzeme püskürtme, sac laminasyon ve fotopolimerizasyon olarak 7 ana sınıfa ayrılmıştır [12]. Ana yöntemlerden malzeme ekstrüzyon metodunu temsil eden eriyik yığıma modelleme (EYM)'de malzeme yelpazesinin geniş ve üretim maliyetinin diğer eklemeli imalat yöntemlerine nazaran düşük olması nedeniyle çeşitli prototip parçaların yanı sıra hücresel yapıların imalatında da sıklıkla tercih edilmektedir [13-15]. EYM ile en çok otomotiv, biyomedikal, denizcilik ve gıda gibi bir çok sektörde kullanılan polimer bazı malzemelerin üretildiği bilinmektedir. Polimer malzemeli hücresel yapıların mekanik dayanımları, EM, PO, absorbe edilen enerji (AEE) ve spesifik absorbe edilen enerji (SAEE) miktarlarının tespitine yönelik bir dizi çalışmanın literatürde yer aldığı görülmektedir. Ingrole vd. [16] EYM ile ABS malzemeden ürettikleri balpeteği ve çeşitli formlardaki re-entrant yapıların mekanik performanslarını düzlem içi basma testi ile tayin etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde re-entrant yapının, balpeteği yapısına göre daha fazla enerji absorbe ettiğini ve hücresel yapıların geometrilerinde yapılan değişikliklerin mekanik özellikleri doğrudan etkilediği rapor edilmiştir. Panda vd. [17], EYM ile ürettikleri

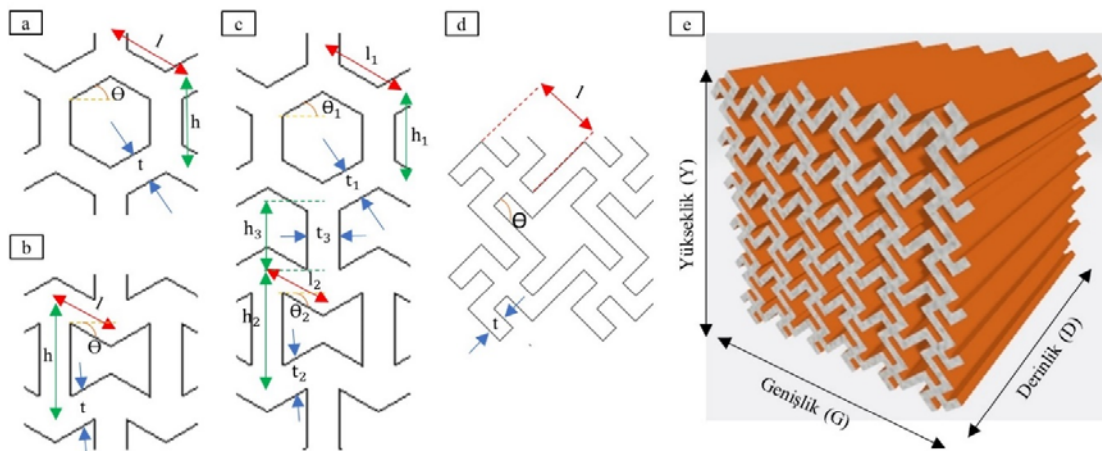
balpeteği yapısındaki hücresel yapıların duvar kalınlığı ve hücre boyutu gibi tasarım parametrelerinin, hücresel yapıların akma dayanımı ve EM gibi mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Başka bir çalışmada da re-entrant, balpeteği ve kiral yapıların hem düzlem içi hem de düzlem dışı basma davranışları deneysel olarak incelenmiş ve hücresel yapıların PO değerlerinde geometrileri kadar üzerine üzerine uygulanan yükün doğrultusunun da etkili olduğunu vurgulamışlardır [18]. Balpeteği ve re-entrant yapıların birbiri ile mukayeselerini içeren deneysel ve sonlu elemanlar analizi çalışmaları dışında, EYM ile PLA malzemeden imal edilen balpeteği ve re-entrant yapıları bünyesinde barındıran bazı hibrit yapıların mekanik performansları da irdelenmiş ve klasik balpeteği ve re-entrant yapıya göre geliştirilmiş mekanik performans sergiledikleri ifade edilmiştir [19]. İlave olarak, Kucewicz vd. [20] de içerisinde balpeteği formunun da bulunduğu çeşitli hücresel yapıları EYM ile ABS malzemeden üreterek, 0,5 gerinim değerine dek basma testine tabi tutarak AEE miktarları hakkında araştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde klasik balpeteği yapının alternatif olarak belirledikleri diğer hücresel yapılara nazaran daha fazla enerji absorbe ettiğini belirtmişlerdir. Gelişen teknoloji ile birlikte üç boyutlu (3-B) baskı teknolojisi ve şekil hafızalı polimer malzemeleri bir potada eriten dört boyutlu baskı teknolojisi ile de yenilikçi ve potansiyel çalışmaların ön plana çıktığı da görülmektedir [21]. Dört boyutlu teknolojiyle de hali hazırda balpeteği, re-entrant ve hibrit yapıların üretiminin sağlandığı çalışmalara yeni yeni rastlanmakta ve mekanik performansları incelenmektedir [22].

Bu çalışmada EYM ile PLA malzemeden optimum imalat parametreleri ile üretilen klasik balpeteği ve re-entrant yapı formunun yanı sıra yenilikçi hibrit ve kiral formdaki hücresel yapıların hem basma hem de çekme durumundaki mekanik performansları, hücresel yapıların kiriş kalınlıkları ve birim hücrelerinin yönü göz önünde bulundurularak deneysel olarak incelenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Test Numunelerinin Tasarımı ve Üretimi (Design and Manufacturing of Test Specimens)

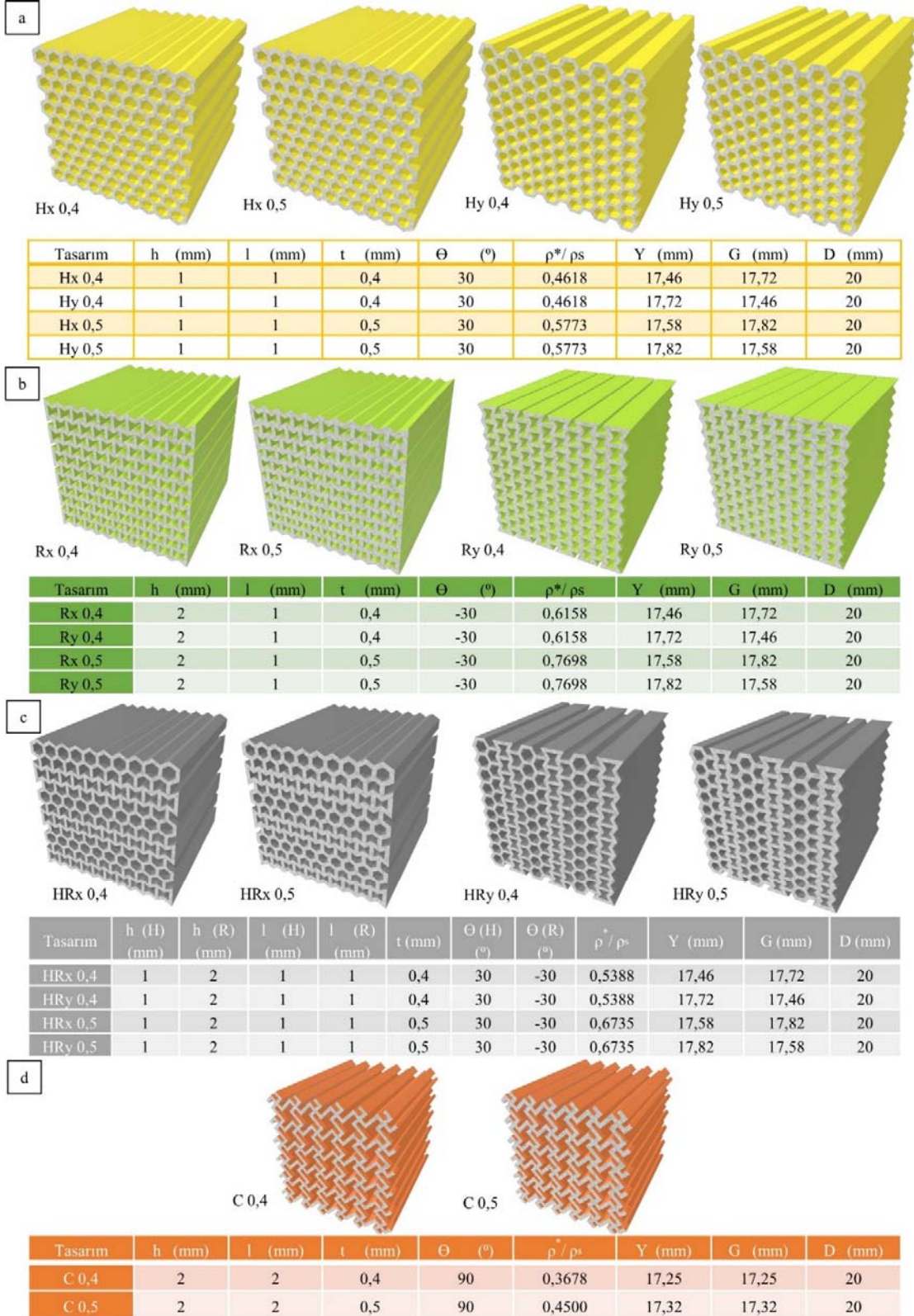
Şekil 1a, Şekil 1b, Şekil 1c ve Şekil 1d sırasıyla çekme ve basma numunelerinde kullanılan balpeteği, re-entrant, hibrit ve kiral birim hücreler ve boyutları gösterilmiştir. Birim hücrelerde h kiriş yüksekliğini, l kiriş uzunluğunu, t kiriş kalınlığını, θ ise kiriş açısını



Şekil 1. Birim hücrelerde boyutların gösterimi, a) balpeteği, b) re-entrant, c) hibrit, d) kiral, e) basma test numunesi üzerinde boyutların gösterimi (Representation of dimensions in unit cells, a) honeycomb, b) re-entrant, c) hybrid, d) chiral, e) representation of dimensions on compression test specimen)

belirtmektedir. Şekil 1e’de ise basma test numunelerinin yükseklik (Y), genişlik (G) ve derinlik (D) gibi genel boyutları paylaşılmıştır. Şekil 2’de AutoCAD programıyla tasarlanan balpeteği, re-entrant,

hibrit ve kiral birim hücreli hücresel yapı basma numunelerinin Y, G, D, birim hücrelerinin boyutları ve bağıl yoğunluk değerleri gösterilmiştir. Balpeteği yapılar H, re-entrant yapılar R, hibrit yapılar



Şekil 2. Tasarlanan hücresel yapıların boyutları ve bağıl yoğunluk değerleri, a) balpeteği, b) re-entrant, c) hibrit, d) kiral (Dimensions of designed cellular structures and their relative density values, a) honeycomb, b) re-entrant, c) hybrid, d) chiral)

HR ve kiral yapılar da C kodu ile tanımlanmış olup, bu kodlarda yer alan alt indis x ya da y ifadesi birim hücrelerin yönünü, alt indisin yanında yer alan 0,4 ya da 0,5 ifadesi de o hücresel yapının giriş kalınlığını tanımlamaktadır. Örneğin, HRx 0,5 ifadesi, ilgili hücresel yapının hibrit yapıda olduğunu, birim hücrelerinin x yönünde konumlandığını ve giriş kalınlığının 0,5 mm olduğunu açıklamaktadır. Balpeteği, re-entrant, ve hibrit yapıların bağlı yoğunlukları sırasıyla Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3 ile, kiral yapının bağlı yoğunluğu ise boş hacimin dolu hacme oranından tespit edilmiştir. İlgili eşitliklerde ρ^* hücresel yapının yoğunluğunu, ρ_s ise tam dolu (bulk) malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir [4, 23].

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\frac{t}{l} \left(\frac{h}{l} + 2 \right)}{2 \cos \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)} \quad (1)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\frac{t}{l} \left(\frac{h}{l} + 2 \right)}{2 \cos \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)} \quad (2)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{(4l_1 + h_1)t_1 + (4l_2 + h_2)t_2 + 2h_3t_3}{2l_1 \cos \theta_1 (h_1 + h_2 + 2h_3 + 2l_1 \sin \theta_1 - 2l_2 \sin \theta_2)} \quad (3)$$

Şekil 2a'da görüldüğü üzere, balpeteği yapıların birim hücrelerinin giriş yüksekliği (h), giriş uzunluğu (l), giriş kalınlığı (t) ve giriş açısı (θ) sırasıyla 1 mm, 1 mm, 0,4 mm veya 0,5 mm ve 30° 'dir. Re-entrant yapıların birim hücrelerinin giriş yüksekliği 2 mm, giriş uzunluğu 1 mm, giriş kalınlığı 0,4 ya da 0,5 mm ve son olarak giriş açısı da -30° 'dir (Şekil 2b). Re-entrant yapının giriş açısı negatif değerdedir olduğundan dolayı negatif PO davranışı sergilemesi beklenmektedir. Bünyesinde hem balpeteği hem de re-entrant yapı barındıran hibrit yapıdaki birim hücrelerin boyutları ise, balpeteği yapının giriş yüksekliği ve giriş uzunluğu ($h=l=1$ mm), giriş açısı 30° , re-entrant yapının giriş uzunluğu ($l=1$ mm), re-entrant yapının giriş yüksekliği ($h=2$ mm), giriş açısı -30° ve tüm giriş kalınlıkları ($t_1=t_2=t_3=0,4$ veya $0,5$ mm)'dir (Şekil 2c). Diğer üç modelin ardından, kiral yapıdaki birim hücrelerin uzunluğu (l), giriş kalınlığı (t) ve giriş açısı (θ) ise sırasıyla 2 mm ve 0,4 veya 0,5 mm ve 90° dir (Şekil 2d). Kiral yapıların 90° döndürülmesi durumunda aynı yapı formu elde edileceğinden, kiral yapıların tasarımı sırasında diğer yapılarda var olan birim hücrelerin x ya da y yönünde konumlanması değerlendirilmeye alınmamıştır. PLA malzemeden EYM ile üretilmek istenen çekme test numuneleri, plastik malzemelerin çekme testi için uygun standart olan ASTM D638-14 Tip II'ye göre AutoCAD 2020 programıyla tasarlanmıştır [24]. Gage genişliği ile kalınlığı birbirine eşit ve 6 mm olan çekme test numunelerinin tasarımı sırasında iki önemli noktaya dikkat edilmiştir. İlki, çekme test numunesinin gage kısmında yer alan birim hücrelerin boyutlarının, basma test numunesini oluşturan birim hücre boyutları ile aynı boyutlarda olması iken diğeri ise, hücresel yapıların yöne bağlı tasarımlarının çekme ve basma durumundaki mekanik performanslarını araştırdığımızdan dolayı bu yapıların içerisinde yer alan birim hücrelerin konumlanması yönüdür. Detaylı açıklayacak olursak, birim hücreleri balpeteği formunda olan bir Hx 0,4 basma numunesi ile, Hx 0,4 çekme numunesinin birim hücreleri aynı yöne bakacak şekilde tasarlanmamıştır. Test numunelerinin tasarımları öncelikle AutoCAD 2020 programından, stl formatında dışarı aktarılarak ara dilimleyici

programda açılmış, sanal imalat tablasına konumlandırılan modeller katmanlar halinde Ultimaker Cura 4.4.1 programıyla dilimlenerek optimum imalat parametrelerinin girilmesiyle birlikte imalata hazır hale gelmiştir. Optimum imalat parametrelerinin tespiti amacıyla Tablo 1'de sunulan farklı imalat parametreleriyle hücresel yapı numuneler üretilmiş ve optimum parametrelerin seçiminde hücresel yapı numunelerin ilgili üretim parametreleriyle makro ölçekte boyutsal bir hata meydana gelmeden üretilip üretilmeyeceği, üretilen hücresel yapılarda ise giriş kalınlık değerlerinde imalat boyutu ile tasarlanan boyut değeri arasındaki farkın, tasarımdaki giriş kalınlık değerleri olan 0,4 mm ile 0,5 mm dikkate alınarak %25'ten az olması hususuna dikkat edilmiştir. Ayrıca, optimum imalat parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan öncül üretimler sırasında doluluk oranı %100 olarak sabit alınmıştır. Öncül üretimler sonucunda elde edilen bulgulara göre, nozzle çapı 0,4 mm kullanıldığında ilgili hücresel yapıların üretilmediği görülmüştür. Katman kalınlık değerinin 0,15 mm, nozzle sıcaklığının değerinin 205°C ve tabla sıcaklığının 65°C olduğu durum dışındaki üretimlerde, hücresel yapılarda giriş kalınlık değerinde tasarım ile imalat sonrası yapılan ölçümler arasında %25'ten fazla fark tespit edilmiştir. Tablo 1'de verilen öncül deneylerin akabinde belirlenen optimum EYM imalat parametreleri, Tablo 2'de verilmiştir. Optimum EYM imalat parametreleri ile 1,75 mm çapa sahip Microzey saf PLA filament kullanılarak Zaxe marka üç boyutlu yazıcıda test numuneleri üretilmiştir. İmalat sırasında tüm test numuneleri imalat tablasına paralel olup, Z eksenine doğrultusunda inşa edilmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b'de sırasıyla üretilen çekme ve basma test numunelerinden bir kaç gösterilmiştir.

2.2. Mekanik Testler (Mechanical Tests)

EYM ile PLA malzemeden üretilen çekme ve basma numunelerinin testleri 0,2 mm/dk'lık çekme ve basma test hızı ile Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM'deki mekanik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri 10 kN kapasiteli Shimadzu AGS-X marka çekme-basma test cihazında numuneler kopana dek, basma testleri ise 100 kN kapasiteli MTS 370.10 marka çekme-basma test cihazında basma numunesi 0,5 birim şekil değişimi (ϵ) gösterene dek yapılmıştır. Basma testleri sırasında 24,1 MP çözünürlüğe sahip Canon EOS 250D 18-55 DC III DSLR marka fotoğraf makinası ile görüntüler alınmış ve bu görüntüler Image J programına aktarılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü üzere hücresel yapıların kenarlarındaki boyanmış noktalar arasındaki yatay ve dikey yöndeki mesafelerin test sırasındaki değişimi kaydedilerek basma yönü ve basma yönüne dik yöndeki ϵ değerleri birbirine bölünerek poisson oranları literatürdeki diğer çalışmaların paralelinde tespit edilmiştir [25-26].

3. Deneysel Bulgular ve Tartışma (Experimental Findings and Discussion)

3.1. Boyutsal Doğruluk, Yüzey Pürüzlülüğü ve Sertlik Ölçümü (Dimensional Accuracy, Surface Roughness and Hardness Measurement)

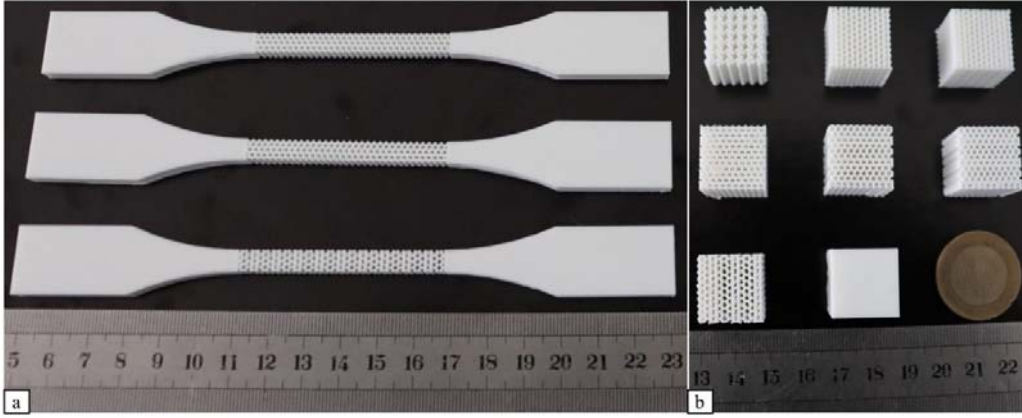
Üretilen test numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri Hommel Tester T 500 marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla ölçülmüş ve 5 ölçümün aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük

Tablo 1. Optimum imalat parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan üretimlerde kullanılan EYM imalat parametreleri (FDM parameters used for determining the optimum manufacturing parameters)

Katman kalınlığı (mm)	Nozzle çapı (mm)	Nozzle sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Tabla sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
0,1 ; 0,15 ; 0,2	0,2 ; 0,4	190 ; 205 ; 220	55 ; 65 ; 75

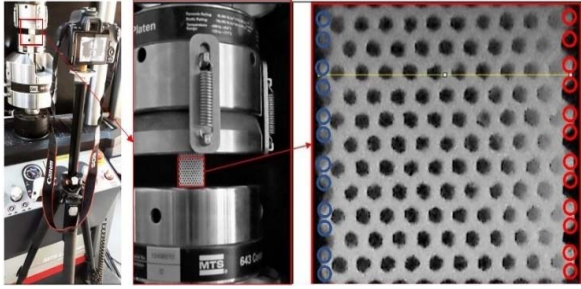
Tablo 2. Optimum EYM imalat parametreleri (Optimum FDM manufacturing parameters)

Katman kalınlığı (mm)	Doluluk oranı (%)	Nozzle çapı (mm)	Nozzle sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Tabla sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
0,15	100	0,2	205	65



Şekil 3. Üretilen çekme ve basma test numuneleri, a) çekme testi numuneleri, b) basma testi numuneleri
(Manufactured tensile and compression test specimens, a) tensile test specimens, b) compression test specimens)

değerlerinin 14 μm olduğu görülmüştür. Ayrıca, ilgili numunelerin sertlik ölçümleri Zwick marka sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiş ve 5 ölçümün aritmetik ortalaması alınarak bu yapıların sertlik değeri de 75 Shore D olarak bulunmuştur. Şekil 5a ve Şekil 5b'de üretilen test numunelerinin Nikon SMZ 800N marka mikroskop ile alınmış görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler üzerinden, Image J programı kullanılarak her bir boyut (h, l ve t) için 10 ölçüm alınarak, bu 10 ölçümün aritmetik ortalaması, imalat boyut değeri (\bar{l}) olarak kabul edilmiştir. Ölçümler sonucu elde edilen imalat boyut değerleri ile tasarım değerleri (T) karşılaştırılarak Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da paylaşılmıştır.



Şekil 4. Basma testi sırasında görüntü alımı ve Poisson oranı değerinin Image J program ile tespiti
(Image capturing during compression test and determination of Poisson's Ratio via Image J program)

Tablo 3'te çekme test numunelerinin (hibrit model hariç) birim hücrelerinin T ile \bar{l} değerleri verilmiş, aralarındaki boyutsal uyumsuzluk % F ile gösterilen yüzde fark değeri ile belirtilmiştir. T ile \bar{l} arasında hücrelerin kiriş kalınlıklarında %8 ile %21 değişen farklılıklar gözlemlenirken, kiriş uzunluğu (l) değerlerinde %0,3 ile %4,6, kiriş yüksekliği (h) değerlerinde ise %1,3 ile %2,8 aralığında farklılıklar tespit edilmiştir. Hibrit yapılar hem balpeteği hem de re-entrant yapı içerdiklerinden dolayı, h, l ve t sayıları diğer yapılara göre daha fazladır. Bundan dolayı, Tablo 3'te verilemeyen, hibrit yapıların T ve \bar{l} değerleri Tablo 4'te detaylı olarak sunulmuştur. Hibrit yapıda yer alan balpeteği ve re-entrant yapıların t ve l değerleri aynı olduğundan yalnızca h değerleri birden fazla olarak verilmiştir. Tablo 4'ten de görülebileceği üzere, T ve \bar{l} değerleri mukayese edildiğinde, kiriş kalınlıklarında (t_{0N}) maksimum fark %15,5 olarak tespit edilmiş olup, kiriş uzunluk değerlerinde % fark değeri %2,4 ile %2,9 arasında değişmektedir. Kiriş yükseklik değerlerine göre ise, farkların %1, 25 ile %2,2 aralığında değiştiği rapor edilebilir. Tablo 5'te basma test numunelerinin (hibrit model hariç) T ve \bar{l} değerleri sunulmuştur.

Tablo 5'te T ve \bar{l} değerleri mukayese edildiğinde, kiriş kalınlıklarında %8,4 ile %22,5 arasında, kiriş uzunluklarında %1,7 ile %5,7 arasında, kiriş yükseklik değerlerinde ise %1,4 ile %3 arasında farklılık belirlenmiştir. Tablo 6'da ise hibrit basma test numunelerinin T ve \bar{l} değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 6'ya göre, kiriş kalınlıklarında %10 ile %15,75, kiriş uzunluklarında %2,5 ile %3,2 ve kiriş yüksekliklerinde ise %1,4 ile %3,2 arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Sonuç olarak Tablo 3-6'daki değerler incelendiğinde genel olarak t_{0N} 'daki % F değerinin 0,4 mm kiriş kalınlığına sahip hücresel yapılarda, l_{0T} ve h_{0T} 'daki % F değerinin ise 0,5 mm kiriş kalınlığına sahip hücresel yapılarda daha yüksek mertebede olduğu rapor edilebilir.

3.2. Tam Dolu Numuneye Ait Mekanik Test Bulguları (Mechanical Test Results of Fully Solid Specimen)

Yapılan mekanik testler sonucunda Şekil 6a ve Şekil 6b'de sırasıyla tam dolu (hücresel yapı barındırmayan) numunelerin çekme ve basma testi sonucunda elde edilen gerinim-gerilim eğrileri verilmiştir.

Şekil 6a'daki çekme testi sonucunda elde edilen gerilim-gerinim eğrisi detaylı incelenecek olursa, tam dolu çekme numunesinin kopana dek yaklaşık 0,04 ϵ değeri gösterdiği ve 24,09 MPa çekme dayanımı sergilediği görülmektedir. Şekil 6b'ye göre ise ϵ değeri 0,5 olup, basma dayanımı değeri ise 96,65 MPa'dır. Ayrıca, çekme ve basma testlerinin sonucunda SAAE miktarını tespit etmekte kullanılacak olan tam dolu (bulk) malzemenin yoğunluk değeri aşağıdaki Eş. 4 kullanılarak elde edilmiştir.

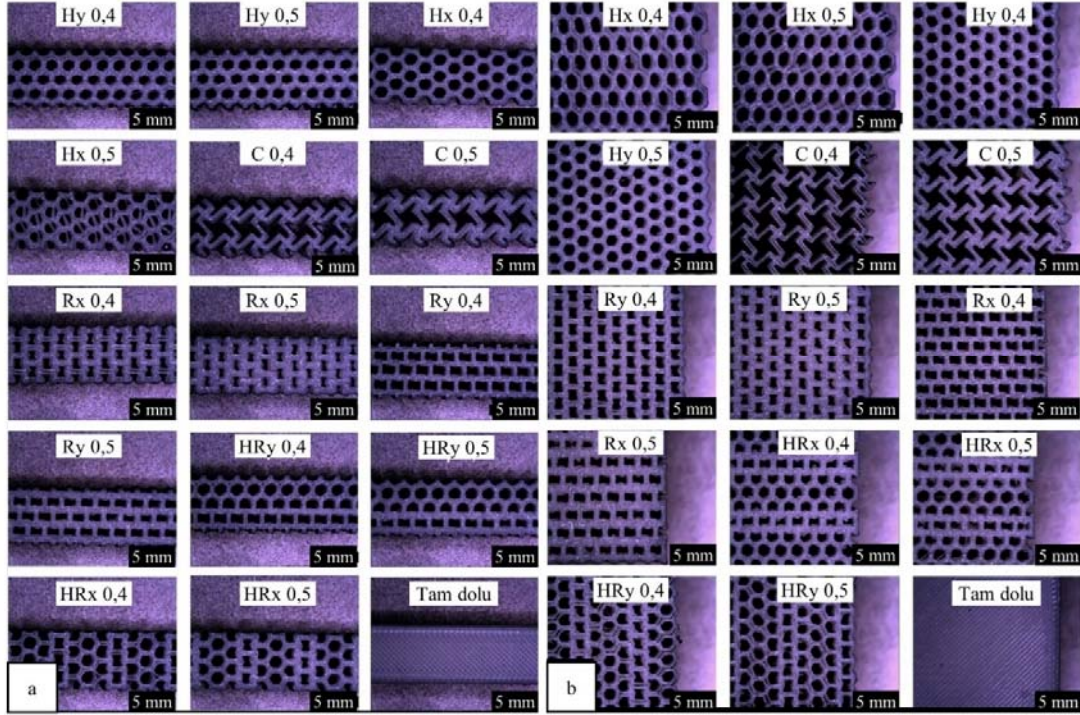
$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (4)$$

İlgili eşitlikte ρ_s tam dolu (bulk) malzemenin yoğunluğunu (g/cm^3), m kütlesini (g), V de hacmini (cm^3) ifade etmektedir. Tam dolu basma numunesinin kütlesi hassas terazi kullanılarak 6,968 g olarak ölçülmüş ve 6480 mm^3 'lük hacim değerine bölünerek tam dolu numunenin yoğunluğu $1,075 \text{ g}/\text{cm}^3$ olarak hesaplanmıştır.

3.3. Balpeteği Yapıların Mekanik Performansları (Mechanical Performances of Honeycomb Structures)

3.3.1. Balpeteği yapıların çekme durumunda mekanik performansları (Mechanical performances of honeycomb structures under tension)

Şekil 7a'da balpeteği yapıların çekme testi sonucu elde edilen gerilim-gerinim eğrisi verilmiştir. Şekil 7a'ya göre, kiriş kalınlığı (t) arttıkça,



Şekil 5. Üretilen çekme ve basma test numunelerinin mikroskopik görüntüleri, a) çekme testi numuneleri, b) basma testi numuneleri (Microscopic images of the produced tensile and compression test specimens, a) tensile test specimens, b) compression test specimens)

Tablo 3. Çekme test numunelerinde T ve İ değerlerinin karşılaştırılması (Hibrit model hariç)
(Comparison of design and manufacturing dimension values in tensile test specimens (Except hybrid model))

Numune	t _{ort}			l _{ort}			h _{1ort}			h _{2ort}			h _{3ort}		
	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F
HRx 0,4	0,4	0,462	15,5	1	1,024	2,4	1	1,016	1,6	2	1,975	1,25	1	1,014	1,4
HRx 0,5	0,5	0,538	7,6	1	1,029	2,9	1	1,022	2,2	2	1,973	1,35	1	1,018	1,8
HRy 0,4	0,4	0,462	15,5	1	1,024	2,4	1	1,016	1,6	2	1,975	1,25	1	1,014	1,4
HRy 0,5	0,5	0,538	7,6	1	1,029	2,9	1	1,022	2,2	2	1,973	1,35	1	1,018	1,8

Tablo 4. Hibrit çekme test numunelerinde T ve İ değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of design and manufacturing dimension values in hybrid tensile test specimens)

Numune	t _{ort}			l _{ort}			h _{ort}		
	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F
Hx 0,4	0,4	0,471	17,75	1	1,015	1,5	1	1,016	1,6
Hx 0,5	0,5	0,540	8	1	1,031	3,1	1	1,028	2,8
Hy 0,4	0,4	0,471	17,75	1	1,015	1,5	1	1,016	1,6
Hy 0,5	0,5	0,540	8	1	1,031	3,1	1	1,028	2,8
Rx 0,4	0,4	0,484	21	1	1,046	4,6	2	1,974	1,3
Rx 0,5	0,5	0,588	17,6	1	1,021	2,1	2	1,972	1,4
Ry 0,4	0,4	0,484	21	1	1,046	4,6	2	1,974	1,3
Ry 0,5	0,5	0,588	17,6	1	1,021	2,1	2	1,972	1,4
C 0,4	0,4	0,466	16,5	2	2,006	0,3	-	-	-
C 0,5	0,5	0,554	10,8	2	2,041	2,05	-	-	-

çekme dayanımlarının ve gerinim değerlerinin arttığı görülmüş, y yönünde konumlanan Hy 0,5 ve Hy 0,4 numunelerinin, x yönünde konumlanan Hx 0,5 ve Hx 0,4 numunelerine göre daha fazla dayanım sergilediği belirlenmiştir. Bu sonucu destekleyen bir çalışmada, Bhate vd. [27], EYM ile polimer malzemeden birim hücreleri x ve y yönünde konumlanan numuneleri üretmek üzere çekme testine tabi tutmuşlar ve elde ettikleri sonuçlar neticesinde, birim hücreleri y yönünde konumlanan balpeteği yapıların daha sünek davranış gösterdiğini açıklamışlardır. Ayrıca, Yalçın vd. [28] de, EYM ile ABS malzemeden ürettikleri gage kısmında balpeteği ya da re-entrant yapı içeren numunelerin çekme

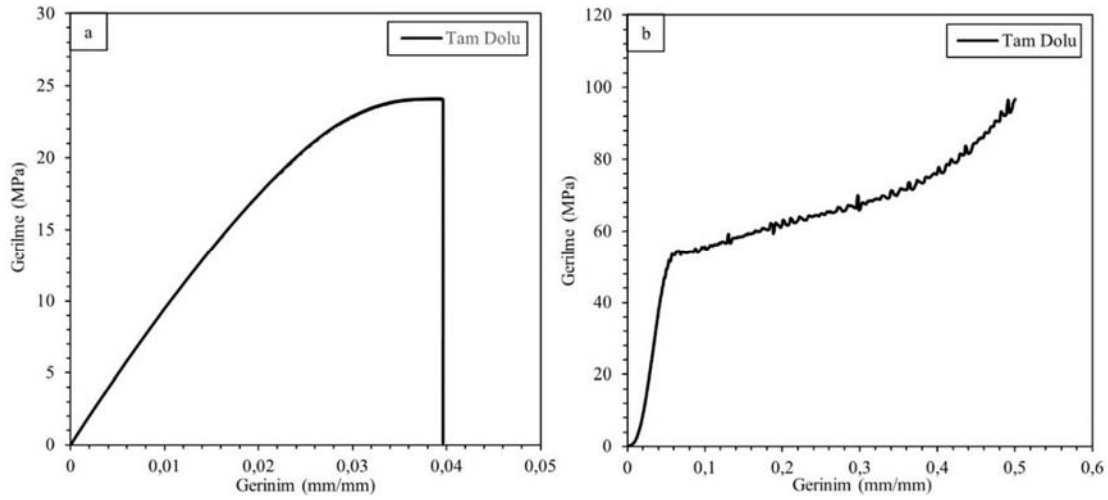
testleri sonucunda aynı eğilimde bulgular elde etmişlerdir. Şekil 7b'de balpeteği birim hücrelere sahip hücresel yapıların çekme dayanımları (ÇD), elastisite modülleri (EM), AEE ve SAEE miktarları verilmiştir. Şekil 7b'deki çekme dayanım değerleri gerilim-gerinim eğrisinde gerilmenin maksimum olduğu değer olarak tespit edilmiştir. Hücresel yapılardan Hy 0,5, 10,561 MPa maksimum çekme dayanımına sahipken, minimum çekme dayanımı 2,382 MPa ile Hx 0,4 yapıda elde edilmiştir. Balpeteği yapıların elastisite modülleri kıyaslandığında ise büyükten küçüğe doğru 591,74 MPa ile Hy 0,5 yapı, 463,21 MPa ile Hx 0,5 yapı, 381,07 MPa ile Hy 0,4 yapı ve son

Tablo 5. Basma test numunelerinde T ve İ değerlerinin karşılaştırılması (Hibrit model hariç)
(Comparison of design and manufacturing dimension values in compression test specimens (Except hybrid model))

Numune	t _{ort}			l _{ort}			h _{ort}		
	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F
Hx 0,4	0,4	0,473	18,25	1	1,017	1,7	1	1,017	1,7
Hx 0,5	0,5	0,542	8,4	1	1,030	3	1	1,030	3
Hy 0,4	0,4	0,473	18,25	1	1,017	1,7	1	1,017	1,7
Hy 0,5	0,5	0,542	8,4	1	1,030	3	1	1,030	3
Rx 0,4	0,4	0,490	22,5	1	1,057	5,7	2	1,972	1,4
Rx 0,5	0,5	0,591	18,2	1	1,023	2,3	2	1,971	1,45
Ry 0,4	0,4	0,490	22,5	1	1,057	5,7	2	1,972	1,4
Ry 0,5	0,5	0,591	18,2	1	1,023	2,3	2	1,971	1,45
C 0,4	0,4	0,468	17	2	2,053	2,65	-	-	-
C 0,5	0,5	0,549	9,8	2	2,037	1,85	-	-	-

Tablo 6. Hibrit basma test numunelerinde T ve İ değerlerinin karşılaştırılması
(Comparison of design and manufacturing dimension values in hybrid compression test specimens)

Numune	t _{ort}			l _{ort}			h _{1ort}			h _{2ort}			h _{3ort}		
	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F	T	İ	% F
HRx 0,4	0,4	0,463	15,75	1	1,025	2,5	1	1,024	2,4	2	1,969	1,55	1	1,022	2,2
HRx 0,5	0,5	0,540	10	1	1,032	3,2	1	1,030	3	2	1,972	1,4	1	1,031	3,1
HRy 0,4	0,4	0,463	15,75	1	1,025	2,5	1	1,024	2,4	2	1,969	1,55	1	1,022	2,2
HRy 0,5	0,5	0,540	10	1	1,032	3,2	1	1,030	3	2	1,972	1,4	1	1,031	3,1



Şekil 6. Tam dolu numunelerin gerilme-gerinim eğrileri, a) çekme testi, b) basma testi
(Stress-strain diagrams of fully solid specimens, a) tensile test, b) compression test)

olarak da 247,42 MPa ile Hx 0,4 yapı olarak sıralandığı görülmektedir (Şekil 7b). Hücresel yapıların AEE miktarları Eş. 5 kullanılarak tespit edilmiştir. Eş. 5'te; W absorbe edilen enerjiyi, σ gerilme değerini, ϵ ise gerinim değerini belirtmektedir. Hücresel yapıların SAEE miktarları ise AEE miktarının ilgili yapının bağıl yoğunluğuna ve tam dolu malzemenin yoğunluk değerine bölünmesiyle elde edilmektedir ve Eş. 6 kullanılarak belirlenmiştir. Eş. 6'da W_s , spesifik absorbe edilen enerji miktarını, $\Delta\rho$ bağıl yoğunluk değerini, ρ_s ise tam dolu yapının yoğunluk değerini ifade etmektedir [16].

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (5)$$

$$W_s = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\Delta\rho\rho_s} \quad (6)$$

Hücresel formdaki balpeteği yapılarda AEE miktarlarında 282,75 kJ/m³ ile Hy 0,5 ilk sırada yer alırken, onu sırasıyla 163,50 kJ/m³ ile Hy 0,4, 57,50 kJ/m³ ile Hx 0,5 ve 14,57 kJ/m³ ile Hx 0,4 takip etmektedir. Hücresel yapıların t değerlerinin 0,4 mm'den 0,5 mm'ye

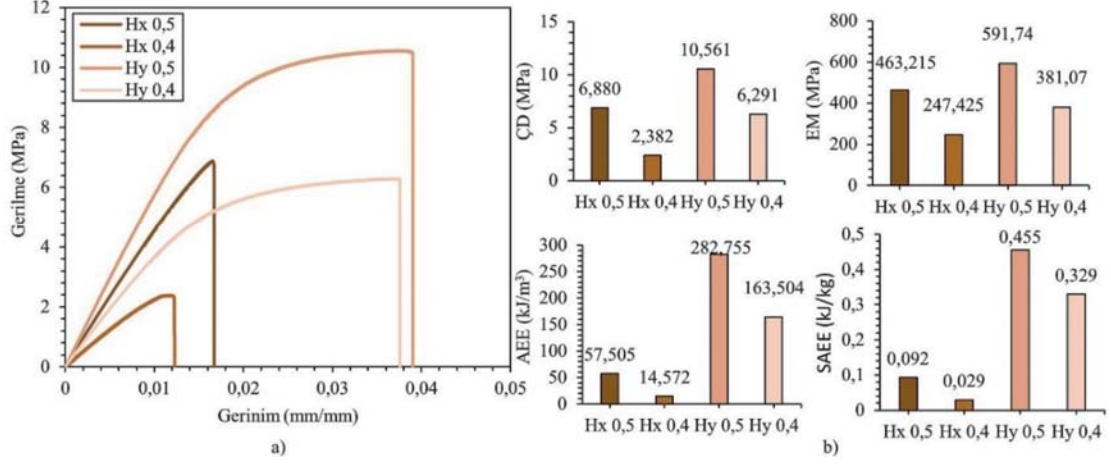
artması ve birim hücrelerin y yönünde konumlanması (Hy) AEE miktarını önemli ölçüde etkilemektedir (Şekil 7b). SAEE miktarları irdelendiğinde ise Hy 0,5 kodlu yapı 0,45 kJ/kg ile maksimum değere sahipken, Hy 0,4 kodlu yapı 0,32 kJ/kg, Hx 0,5 kodlu yapı 0,09 kJ/kg spesifik enerji absorbe etmektedir. Minimum SAEE miktarı ise 0,029 kJ/kg değeri ile Hx 0,4 kodlu yapıda ortaya çıkmaktadır. Hücresel yapıların bağıl yoğunluk oranlarının farklılığı iki grafiği birbirinden ayırdığı görülmektedir.

3.3.2. Balpeteği yapıların basma durumunda mekanik performansları (Mechanical performances of honeycomb structures under compression)

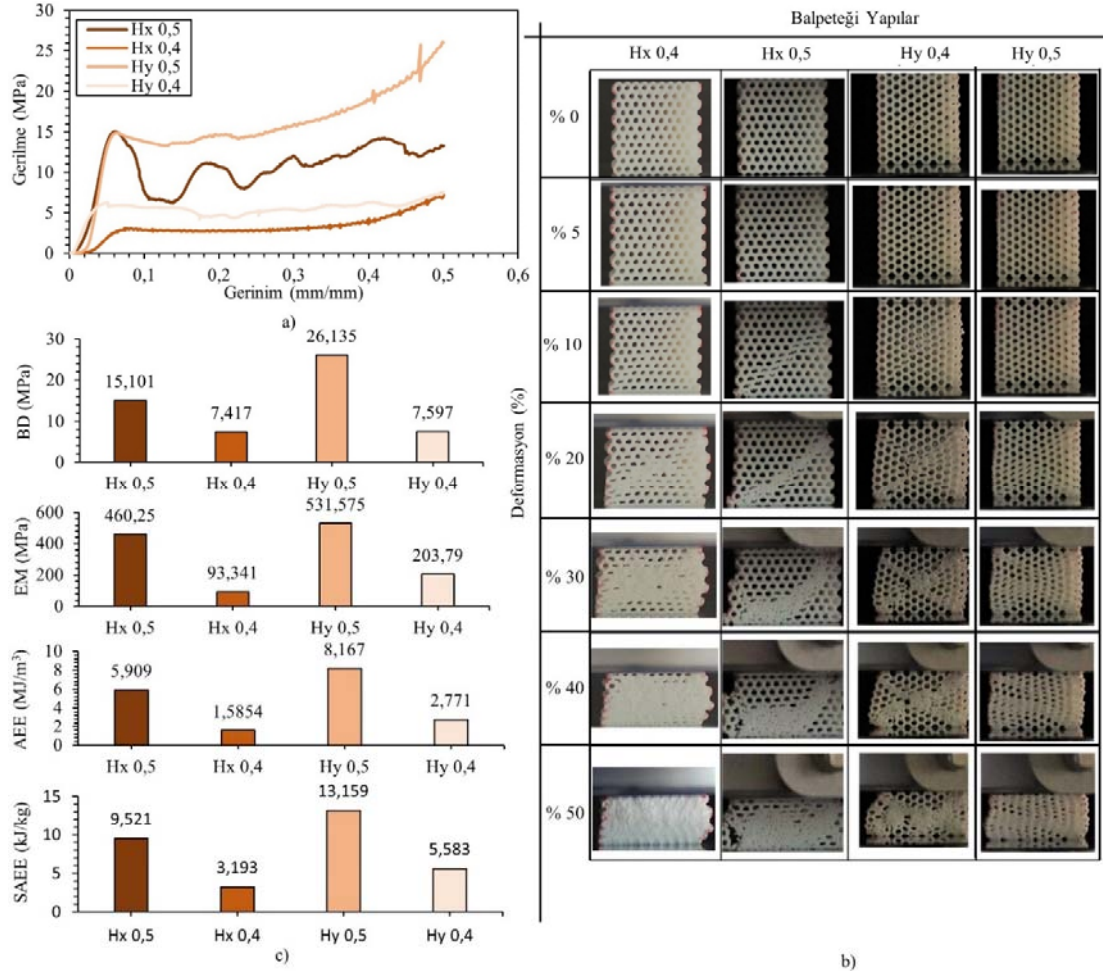
Balpeteği yapının basma gerilme-gerinim eğrisi Şekil 8a'da verilmiştir. Bulgulara göre, çekme durumunda olduğu gibi basma durumunda da balpeteği yapılarda t değerinin artmasıyla gerilme değerlerinde artış görülmektedir. çekme durumuna benzer şekilde y yönünde konumlanan hücrelere sahip balpeteği yapılarda (Hy 0,4 ve Hy 0,5) dayanım değerleri ve AEE miktarları, x yönünde konumlanan

hücelere sahip balpeteği yapılar (Hx 0,4 ve Hx 0,5) göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bu bulgulara paralel olarak (Şekil 8a), Habib vd. [29], birim hücreleri x ya da y yönünde konumlanan, farklı t değerlerindeki polimer balpeteği yapıları 3-B yazıcı ile üreterek

basma testine tabi tutmuşlardır. Hx yapıların plastik burkulmadan dolayı zigzag çizdiklerini, ancak bu durumun ince kırıli yapılarından daha çok kalın kırıli yapılarda gözlemlendiğini ve t değerinin artmasıyla basma dayanımının arttığını ifade etmişlerdir. Şekil 8b'de



Şekil 7. Balpeteği yapıların çekme testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) mekanik özellikleri (Outcomes obtained from tensile test of honeycomb structures, a) stress-strain diagram, b) mechanical properties)



Şekil 8. Balpeteği yapıların basma testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) çeşitli gerinimlerdeki deformasyon durumu, c) mekanik özellikleri (Outcomes obtained from compression test of honeycomb structures, a) stress-strain diagram, b) state of deformation at various strains, c) mechanical properties)

balpeteği basma test numunelerinin basma testi sırasında çeşitli ε değerlerindeki (%0, %5, %10, %20, %30, %40 ve %50) deformasyon görüntüleri verilmiştir. Bu bağlamda, %5 ε 'da yapılar üzerinde gözle görünür bir değişim meydana gelmemiş, %10 ε 'a ulaşıldığında ise yapı üzerinde ilk değişimler gözlemlenmiştir.

Hx 0,4 ve Hx 0,5'te 0.1 ε gerçekleştiğinde, köşegen boyunca sağ üst köşeden sol alt köşeye doğru bir çizgi boyunca deformasyon başladığı gözlemlenmiştir. 0.2 ε 'deki deformasyonun 0.1 ε ile oluşan deformasyon çizgilerine göre daha da belirginleştiği, 0.3 ε 'daki deformasyon ile Hx 0,4'te yapıda oluşan deformasyonun diğer birim hücrelerde de meydana geldiği görülmüştür. Hx 0,5'te ise oluşan köşegen boyunca deformasyon çizgisi etrafındaki hücrelerde bozulma meydana gelmektedir. 0.4 ve 0.5 ε 'da ise yapıların makroskobik düzeyde genişlediği tespit edilmiştir. Hx 0,4'te önemli ölçüde bir kırılma meydana gelmezken, Hx 0,5'te ise yapının sol alt köşesinde kısmi kırılmalar meydana gelmiştir. Hx yapıların aksine Hy yapılarında 0.1 ε ile deformasyon şeklinin "X" şeklinde oluştuğu ve bu durumun 0.3 ε ile doformasyonda daha belirgin olduğu Şekil 8b'den de anlaşılmaktadır. Son olarak, Hx 0,4'e benzer şekilde, Hy 0,4'te de hücrelerde lokal kırılmalar meydana gelirken, Hx 0,5 ve Hy 0,5'te bu kırılmalar gözlemlenmemiştir.

Balpeteği yapıların basma dayanımı (BD) değerleri maksimum değerlere göre belirlenmiş ve Şekil 8c'de verilmiştir. Şekil 8c'ye göre maksimum basma dayanımı 26,13 MPa ile Hy 0,5 yapıda, minimum basma dayanımı 7,41 MPa Hx 0,4 yapıda elde edilmiştir. Aynı kiriş kalınlığına sahip Hy ve Hx yapıları basma dayanımı açısından kıyaslandığında, 0,4 mm kiriş kalınlığında yaklaşık aynı basma dayanımına sahip oldukları görülürken, kiriş kalınlık değeri 0,5 mm olduğunda Hy 0,5 yapının, Hx 0,5 yapıya göre iki kat daha fazla basma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 8c'de balpeteği yapıların elastisite modülleri sırasıyla Hy 0,5 yapının 531,57 MPa, Hx 0,5 yapının 460,25 MPa, Hy 0,4 yapının 203,79 MPa ve Hx 0,4 yapının 93,34 MPa olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hücrelerin konumlanma yönünün ve kiriş kalınlık değerinin elastisite modülünü doğrudan etkilediği Şekil 8c'den anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, Zhang vd. [30] de, Gibson ve Ashby'nin de [4] ifade ettiği üzere, balpeteği yapının elastisite modülünün hücrelerin yönüne göre değişeceğini, yani makro düzeyde anizotropik davranış göstereceğini vurgulamışlardır. Balpeteği yapıların AEE miktarları da Şekil 8c'de verilmiş olup AEE miktarlarının çekme durumuna göre arttığı ve AEE miktarlarının Hy 0,5 için 8,16 MJ/m³, Hx 0,5 için 5,90 MJ/m³, Hy 0,4 için 2,77 MJ/m³ ve Hx 0,4 için ise 1,58 MJ/m³ olduğu belirlenmiştir. Paralellik gösteren başka bir çalışmada ise Dudka vd. [31] BY'u

yüksek olan balpeteği yapıların daha fazla enerji absorbe ettiğini ifade etmişlerdir. EM'ü ile ilgili grafikte olduğu gibi, kiriş kalınlık artışının ve birim hücrelerin y yönünde konumlanmasının AEE miktarını arttırdığı rapor edilebilir (Şekil 8c). Aynı şekilde, Habib vd. [29] de, Hy yapıların Hx yapıları göre daha fazla enerji absorbe ettiğini ve gerilim-gerinim eğrilerinin daha stabil olduğunu belirtip, Hy yapıların enerji absorbe etme uygulamaları için daha elverişli olduğunu rapor etmişlerdir. SAAE miktarları mukayese edildiğinde ise Hy 0,5'in 13,15 kJ/kg, Hx 0,5'in 9,52 kJ/kg, Hy 0,4'ün 5,58 kJ/kg ve Hx 0,4'ün 3,19 kJ/kg spesifik enerji absorbe ettiği söylenebilir (Şekil 8c).

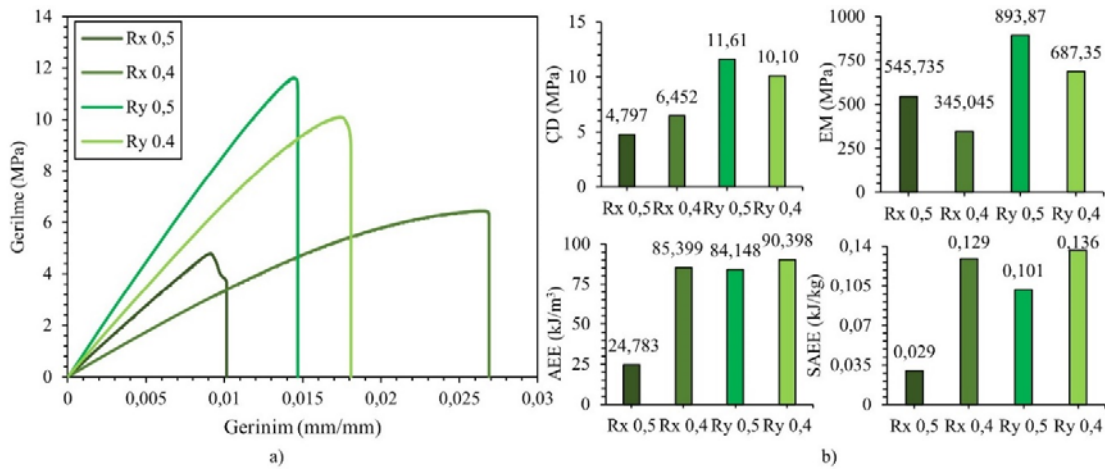
3.4. Re-entrant Yapıların Mekanik Performansları (Mechanical Performances of Re-entrant Structures)

3.4.1. Re-entrant yapıların çekme durumundaki mekanik performansları (Mechanical performances of re-entrant structures under tension)

Re-entrant test numuneleri çekme testine tabi tutulmuş ve Şekil 9a'daki gerilim-gerinim eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen eğriler değerlendirildiğinde, re-entrant yapılardan Ry 0,5 yaklaşık 0,015 gerinim değerine sahipken, Ry 0,4 ise yaklaşık 0,018 gerinim değerine sahiptir. Anlaşılabileceği üzere, kiriş kalınlığı daha düşük olan yapı daha sünek bir davranış göstermiştir.

Re-entrant yapılardan Rx 0,4 ve Rx 0,5 değerlendirildiğinde ise, Rx 0,5'ün yaklaşık 0,01 gerinim değerine sahip olduğu görülürken, Rx 0,4 ise yaklaşık 0,027 gerinim değerine sahiptir. Ry yapıların Rx yapılardan daha fazla gerilime sahip olması, daha önce Yalçın vd. [28] tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile de uyum halindedir. Re-entrant yapıların çekme dayanımlarına bakacak olursak (Şekil 9b), Ry 0,5'in 11,61 MPa, Ry 0,4'ün 10,10 MPa, Rx 0,4'ün 6,45 MPa, Rx 0,5'in ise 4,79 MPa çekme dayanımına sahiptir. Ry 0,5 ve Ry 0,4 yapılarının Rx 0,5 ve Rx 0,4'e oranla önemli ölçüde daha yüksek çekme dayanımları ihtiva ettiği görülmektedir. Re-entrant yapıların EM değerlerinde ise Ry 0,5 893,37 MPa ile en yüksek değere sahipken, onu 687,35 MPa ile Ry 0,4, 545,73 MPa ile Rx 0,5 ve 345,0 MPa değeri ile Rx 0,4 takip etmektedir (Şekil 9b). İlgili durum, re-entrant yapıların Şekil 9a'da verilen gerilim-gerinim eğrilerinden de görülebilmektedir.

Mekanik performansların değerlendirilmesi açısından diğer bir önemli ölçüt olan AEE miktarları incelenirse, Ry 0,4'ün 90,39 kJ/m³, Rx 0,4'ün 85,39 kJ/m³, Ry 0,5'in 84,14 kJ/m³ ve Rx 0,5'in 24,78 kJ/m³ enerji absorbe ettiği hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere, 0,4 mm t



Şekil 9. Re-entrant yapıların çekme testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) mekanik özellikleri
(Outcomes obtained from tensile test of re-entrant structures, a) stress-strain diagram, b) mechanical properties)

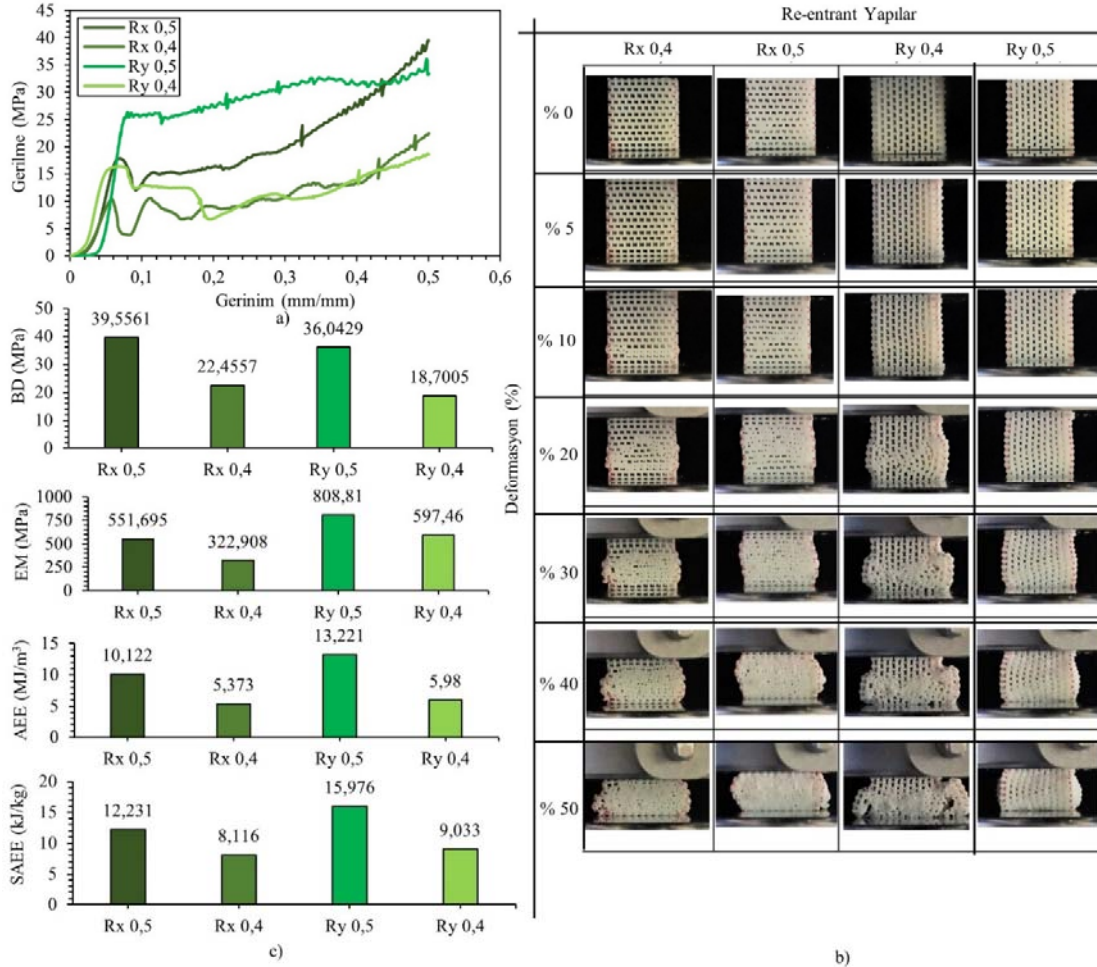
değerine sahip re-entrant yapılar birim hücrelerin konumlanma yönüne bakılmaksızın daha yüksek enerji emme kabiliyetini göstermişlerdir (Şekil 9b). Rx 0,5'in gerek çekme dayanımının düşük olması, gerekse de diğer yapılar kadar sünek davranış göstermemesi AEE miktarını da bir hayli düşürdüğü söylenebilir. Hücresel yapıların basma dayanımlarının da hesaplamalarında yer aldığı SAEЕ miktarlarını irdeleyecek olursak, Ry 0,4, 0,13kJ/kg ile maksimum değere sahipken, minimum değer ise yaklaşık 0,03 kJ/kg ile Rx 0,5'te görülmektedir. Ayrıca, belirtilmelidir ki, re-entrant yapıların SAEЕ miktarları, AEE miktarlarından önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Şekil 9b).

3.4.2. Re-entrant yapıların basma durumundaki mekanik performansları (Mechanical performances of re-entrant structures under compression)

Şekil 10a'da verilen re-entrant yapıların gerilim-gerinim eğrilerine göre, birim hücreleri x ve y yönünde konumlanan yapıların kendi içlerinde benzer davranış sergiledikleri görülmektedir (Rx 0,4 ile Rx 0,5 ve Ry 0,4 ile Ry 0,5). Ry 0,4 ve Ry 0,5 elastik bölgeden sonra daha durağan bir eğri oluştururken, Rx 0,4 ve Rx 0,5 ise gerinim değerlerinin artmasıyla artış eğilimi gösteren bir eğri oluşturmuştur. Ayrıca, Ry 0,5 dışındaki diğer yapılarda elastik bölgeden sonra ani bir çukurlaşma görülmektedir ki bu durum da 0.1 ϵ yakınlarında yapıdaki birim hücrelerden bir ya da bir kaçının deforme olmaya başladığını

göstermektedir (Şekil 10a ve Şekil 10b). Ayrıca, t değerinin artmasıyla gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir ki bu durum da, Dong vd. [25]'nin ince ve kalın duvarlı balpeteği yapıların basma testleri ile ilgili yaptıkları çalışmanın sonuçları ile uyumludur.

Şekil 10b'de re-entrant yapıların ϵ değerlerine göre deformasyon durumları verilmiştir. Rx 0,4'te, 0.1 ϵ değerine dek önemli bir deformasyon oluşmazken, 0.1 ϵ değerinde en alt sıranın bir üstündeki sırada başlayan deformasyon, 0.2 ϵ değerinde üçgen şeklinde bir deformasyon meydana getirmiştir. Bu durum 0.3 ϵ 'da üçgen şeklindeki deformasyon çizgisi arasında kalan birim hücrelerin de deforme olmasıyla yapının alt kısmında yoğun bir çökme meydana gelmiş ve bu durum ilerleyen gerinim değerleri ile daha da artmıştır. Kiriş kalınlığının daha büyük olduğu Rx 0,5'te ise deformasyon Rx 0,4'ün aksine üst sıralarda başlamış ve benzer şekilde artan gerinim değerleri ile yapının diğer kısımlarında da yoğun bir şekilde tespit edilmiş ve yapıdaki birim hücrelerin kırılmaya izin vermeden daha homojen bir şekilde yığıldığı görülmüştür. Ry 0,4 ve Ry 0,5 mukayese edildiğinde ise, Ry 0,4'te 0.1 ϵ değerinde başlayan makro deformasyonun 0.2 ϵ değerinde daha da arttığı ve 0.3 ϵ değerinden itibaren yapının ani kırılmalar nedeniyle şeklini tamamiyle kaybetmeye başladığı söylenebilir. Ry 0,5'te ise 0.3 ϵ değerine dek önemli bir deformasyon oluşmazken, kısmi küçük stabil olmayan durumlar gözlemlenmiştir (Şekil 10a ve Şekil 10b). 0.3 ϵ değerinden itibaren ise sağ taraftaki hücreler daha fazla deforme olarak ">"



Şekil 10. Re-entrant yapıların basma testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) çeşitli gerinimlerdeki deformasyon durumu, c) mekanik özellikleri (Outcomes obtained from compression test of re-entrant structures, a) stress-strain diagram, b) state of deformation at various strains, c) mechanical properties)

şeklinde bir deformasyona yol açmıştır. Ry 0,4'te görülen yapının şeklini tamamiyle kaybetme durumu burda gözlemlenmemiş ve dolayısıyla yapının gerilme-gerinim eğrisinde görülen pikler yerine yukarı doğru düzenli bir eğilim gözlemlenmiştir.

Re-entrant yapıların basma dayanımları Şekil 10c'de verilmiştir. En yüksek basma dayanımı 39,55 MPa ile Rx 0,5'te görülmüştür. Re-entrant yapılarda basma durumunda, çekme durumuna göre oluşan dayanım değerlerinin sıralamasında farklılık gözlemlenmekte, örneğin, Rx 0,5'in çekme dayanımı minimum değere sahipken, basma durumunda bu durum değişmiş ve maksimum basma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ek olarak, basma durumunda, t değerlerinin çekme durumuna göre daha baskın olduğu ifade edilebilir. Bir diğer önemli bulgu ise re-entrant yapıların balpetergi yapılarına göre daha yüksek basma dayanımı sergilemesidir. Benzer bulgular, Ingrole vd.'nin gerçekleştirmiş olduğu t değerinin sabit tutularak yapıldığı çalışmada da görülmüştür [16]. Aynı çalışmada [16] t değerinin değiştirilmesinin etkisi de ileride araştırılması gereken bir konu olarak dile getirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile ilgili konu da araştırılmıştır. EM değerleri tartışıldığında ise, 808,81 MPa ile Ry 0,5'in maksimum, 322,90 MPa ile Rx 0,4'ün ise minimum değere sahip olduğu rapor edilebilir.

AEE miktarlarına bakıldığında, Ry 0,5 13,22 MJ/m³ ile ilk sırada yer alırken, Rx 0,4 5,37 MJ/m³ değeri ile son sırada yer almaktadır. Kiriş kalınlıklarının etkisi, AEE miktarlarında da ön plana çıkmıştır (Şekil 10c). Şekil 10c'de verilen SAEE miktarlarına göre, AEE miktarlarını veren grafikteki durum değişmiş ve bağıl yoğunluk değerlerinin hesaplamaya katılmasıyla birlikte, 0,4 mm t değerine sahip re-entrant yapıların 0,5 mm t değerine sahip yapıların sahip olduğu değerlere yaklaştığı görülmüştür. SAEE miktarlarında da, AEE miktarlarında olduğu üzere Ry 0,5 maksimum, Rx 0,4 ise minimum değere sahip olmuştur (Şekil 10c).

3.5. Hibrit Yapıların Mekanik Performansları (Mechanical Performances of Hybrid Structures)

3.5.1. Hibrit yapıların çekme durumundaki mekanik performansları (Mechanical performances of hybrid structures under tension)

Bünyesinde hem balpetergi hem de re-entrant yapıları barındıran hibrit yapıların çekme testi sonucu oluşturulan gerilim-gerinim eğrileri Şekil 11a'da verilmiştir. Şekil 11a'ya göre, HRy 0,4 ve HRy 0,5'in, HRx 0,4 ve HRx 0,5'e oranla daha sünek davranış gösterdikleri görülmektedir. Ayrıca, her iki grupta da (hem x yönündeki hem y

yönündeki yapılar) t değeri 0,4 mm olan yapılar, t değeri 0,5 mm olan yapılara göre daha sünek davranış göstermişlerdir. Kırılana dek en büyük gerinim değeri yaklaşık 0,015 ile HRy 0,4'te görülürken, en küçük gerinim değeri ise yaklaşık 0,012 değeri ile HRx 0,5'te olmuştur.

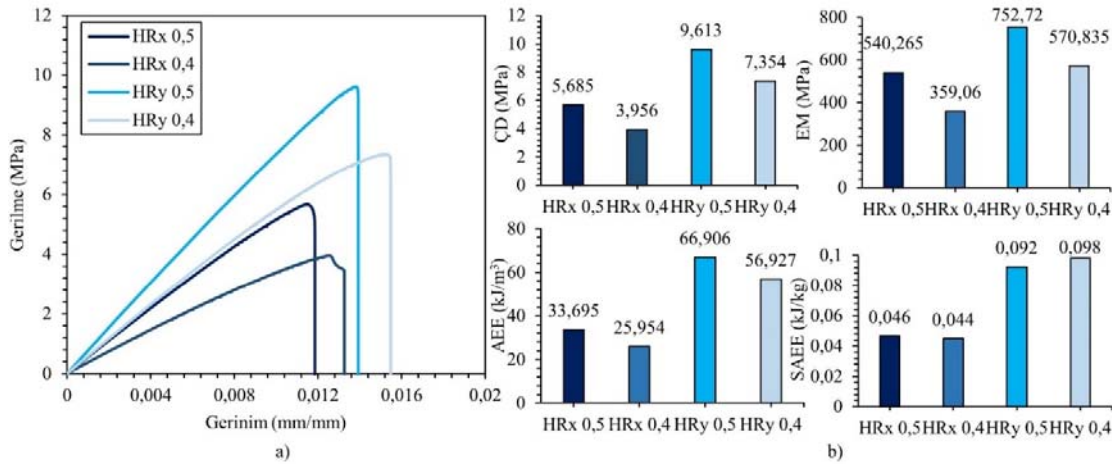
Şekil 11b'de hibrit yapıların çekme dayanımları kıyaslanmış olup, 9,61 MPa çekme dayanımıyla HRy 0,5 ilk sırada yer alırken, 3,95 MPa ile HRx 0,4 minimum değere sahiptir. Görüldüğü üzere, HRy yapıların HRx yapılara nazaran daha fazla çekme dayanımı sergilediği görülmektedir. EM değerlerine bakıldığında da HRy 0,5, 752,72 MPa ile maksimum EM değerine sahiptir. Minimum EM değeri ise 359,06 MPa değeri ile HRx 0,4'te elde edilmiştir.

Kiriş kalınlığının 0,4 mm'den 0,5 mm'e çıkmasıyla beraber EM değerleri de benzer oranda artmıştır (Şekil 11b). Şekil 11b'de sırasıyla AEE ve SAEE miktarları verilmiştir. HRy 0,5 kırılana dek 66,90 kJ/m³ ile maksimum enerji absorbe etmiştir. SAEE miktarları incelendiğinde ise, HRy 0,4 0,098 kJ/kg değeri ile maksimum HRx 0,4 de 0,044 kJ/kg ile minimum spesifik enerji absorbe etmiştir.

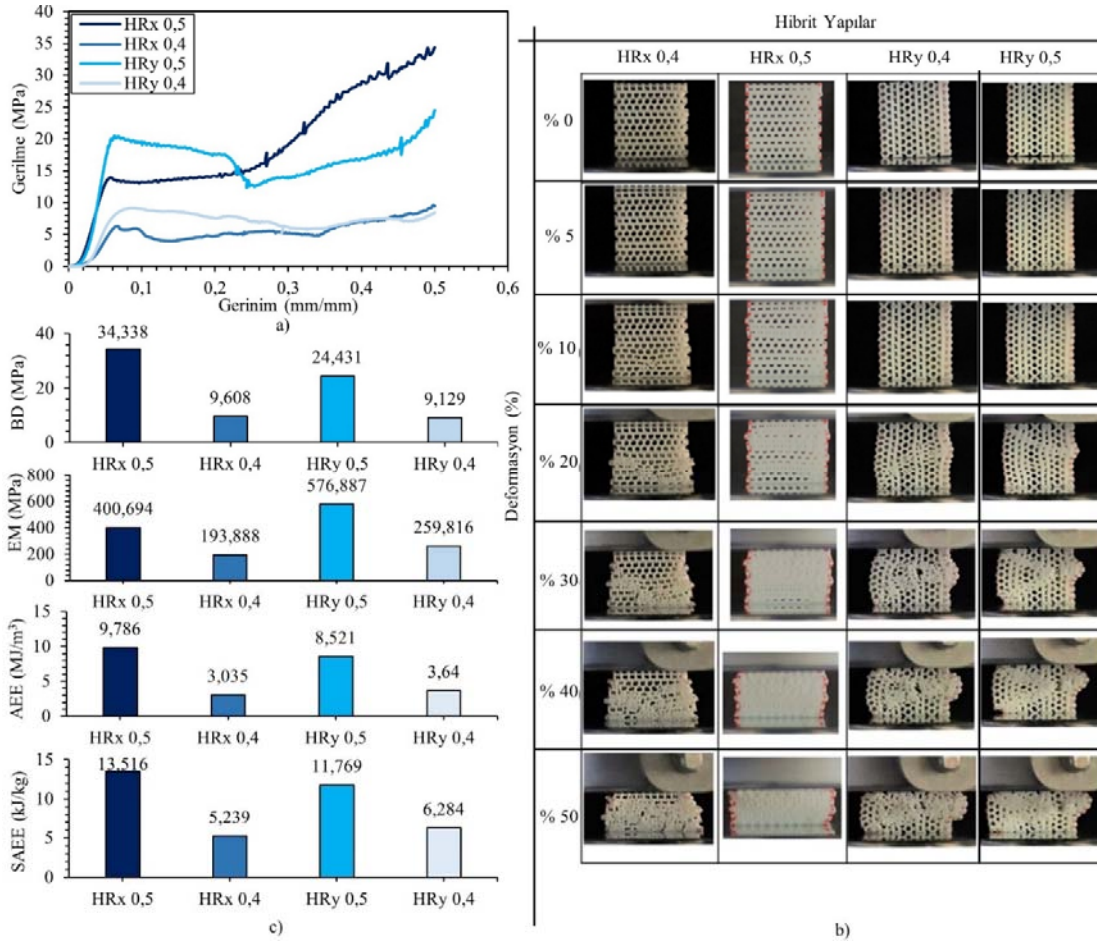
3.5.2. Hibrit yapıların basma durumundaki mekanik performansları (Mechanical performances of hybrid structures under compression)

Hibrit yapıların gerilim-gerinim eğrileri Şekil 12a'da verilmiştir. 0.5 ε değerine dek HRx 0,5 ve HRy 0,5 yapıların, HRx 0,4 ve HRy 0,4 yapılara göre daha fazla gerilmeye maruz kaldıkları görülmektedir.

Hibrit yapıların başlangıç durumundan 0.5 ε değerine dek deformasyon durumu Şekil 12b'de verilmiştir. HRx 0,4'te deformasyon makro düzeyde 0.1 ε değerinde yapının alt kısmında görülürken, artan ε değerleri ile oluşan deformasyon da giderek artmış ve yapının en üst sırası dışında tamamında aktif olmuştur. HRx 0,5'te ise 0.1 ε değerinde 3. ve 5. sıralarda başlayan deformasyon, 0.3 ε'da arada kalan 4. sırayı da kapatmış ve yapının tamamında görülmüştür. Bu yapıların gerilim-gerinim eğrileri ile bir ilişki kuracak olursak, HRx 0,4'te meydana gelen bölgesel deformasyon ve çatlaklardan dolayı gerilim-gerinim eğrisinde yukarı doğru önemli bir eğim görülmezken, HRx 0,5'in gerilim-gerinim eğrisinde ise yukarı doğru bir eğim net bir şekilde görülmektedir (Şekil 12a). Hibrit yapıların basma dayanımları, EM değerleri, AEE ve SAEE miktarları Şekil 12c'de verilmiştir. Şekil 12c'ye göre HRx 0,5'in basma dayanım değeri 34,33 MPa ile en yüksek değerdir. HRx 0,5'i 24,43 MPa basma dayanımı ile HRy 0,5 takip etmektedir. HRx 0,4 ve HRy 0,4'ün basma dayanımları ise sırasıyla 9,60 MPa ve 9,12 MPa'dır. EM değerlerinde



Şekil 11. Hibrit yapıların çekme testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) mekanik özellikleri
(Outcomes obtained from tensile test of hybrid structures, a) stress-strain diagram, b) mechanical properties)



Şekil 12. Hibrit yapıların basma testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) çeşitli gerinimlerdeki deformasyon durumu, c) mekanik özellikleri (Outcomes obtained from compression test of hybrid structures, a) stress-strain diagram, b) state of deformation at various strains, c) mechanical properties)

ise en yüksek değer HRy 0,5'te elde edilirken, minimum değer ise HRx 0,4'te tespit edilmiştir (Şekil 12c). Şekil 12c'de verilen AEE miktarları incelendiğinde HRx 0,5'in HRy 0,5'in 1,15 katı kadar, HRy 0,4'ün ise HRx 0,4'ün 1,2 katı kadar daha fazla enerji absorbe ettiği belirlenmiştir. Anlaşılacağı üzere, t değeri 0,5 mm iken birim hücreleri x yönünde konumlanan yapılar daha fazla enerji absorbe ederken, t değeri 0,4 mm olduğunda bu durum tersine dönmüştür. SAAE miktarları irdelendiğinde ise, HRx 0,5'in HRx 0,4'ün 2,58 katı, HRy 0,5 ise HRy 0,4'ün 1,87 katı kadar spesifik absorbe enerji etmektedir. AEE miktarlarındaki sıralama, SAAE miktarlarında da geçerliliğini sürdürmüştür. HRx 0,5 13,51 kJ/kg değeri ile maksimum düzeyde spesifik enerji absorbe eden yapıdır (Şekil 12c).

3.6. Kiral Yapıların Mekanik Performansları (Mechanical Performances of Chiral Structures)

3.6.1. Kiral yapıların çekme durumundaki mekanik performansları (Mechanical performances of chiral structures under tension)

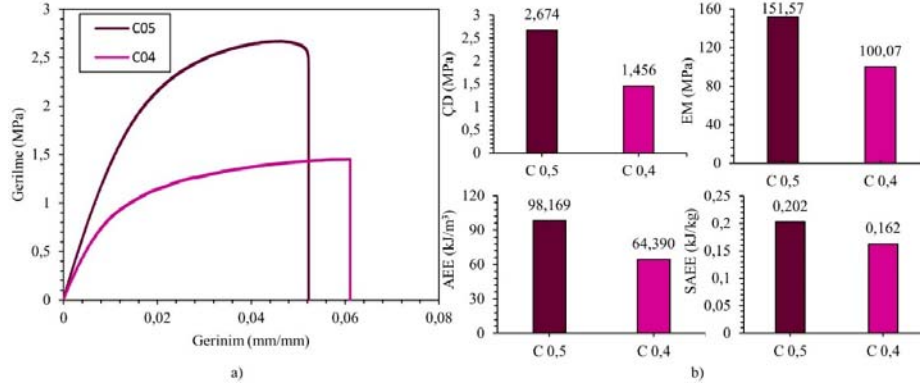
Dört farklı tasarımdan sonucunu veren kiral yapıların gerilim-gerinim eğrisi Şekil 13a'da verilmiştir. C 0,5'in yaklaşık 0,061 ϵ ile, 0,052 ϵ değerine sahip C 0,4'ten daha gevrek bir davranış sergilediği görülmektedir. C 0,5'in sırasıyla 2,67 MPa çekme dayanımı ve 151,57 MPa EM değerine, C 0,4'ün ise 1,45 MPa çekme dayanımı ve 100,07 MPa EM değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 13b). AEE miktarlarında da C 0,5'in 98,16 kJ/m³ değeri ile, 64,39 kJ/m³ enerji absorbe eden C 0,4'ün yaklaşık 1,52 katı kadar enerji absorbe

etmektedir (Şekil 13b). Ayrıca, AEE miktarlarında var olan 1,52 kat fark değerinin, SAAE miktarları durumunda 1,24 kata kadar düştüğü gözlemlenmektedir. C 0,5 ve C 0,4 sırasıyla 0,202 kJ/kg ve 0,162 kJ/kg spesifik enerji absorbe etmiştir.

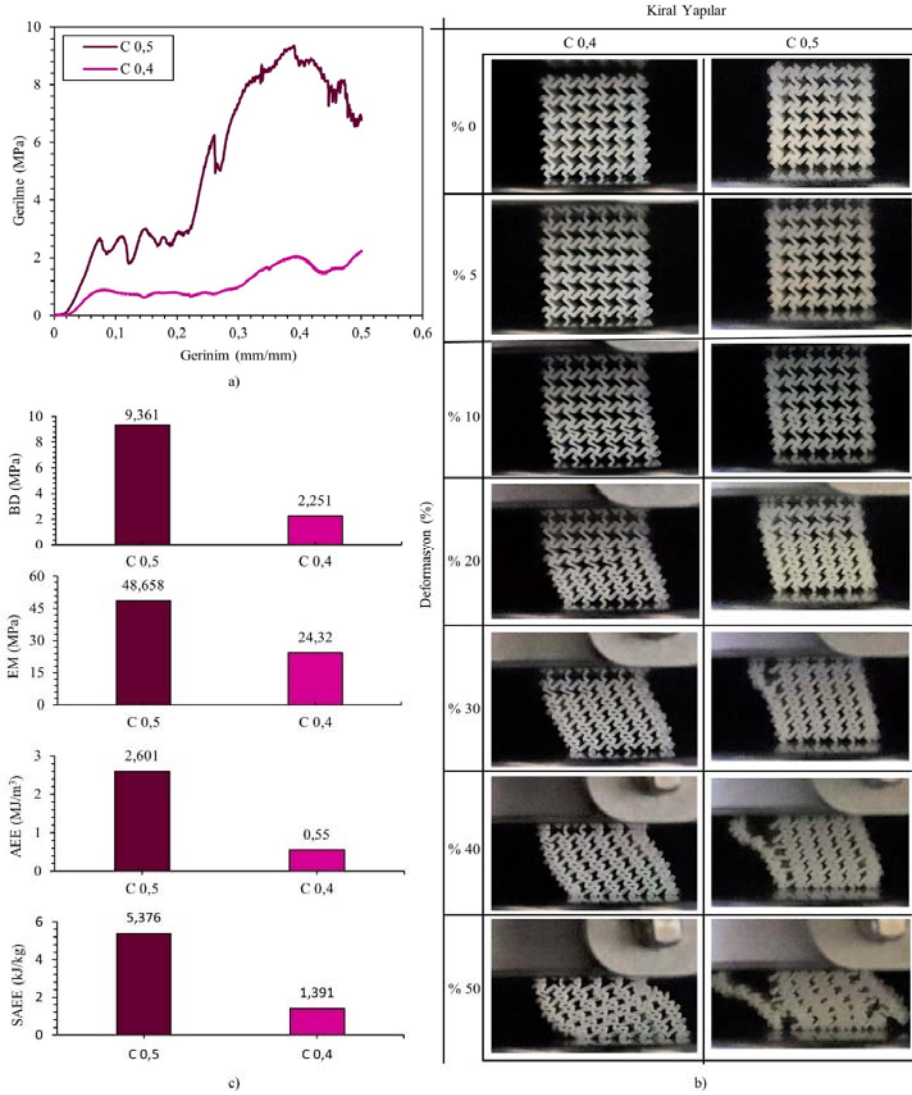
3.6.2. Kiral yapıların basma durumundaki mekanik performansları (Mechanical performances of chiral structures under compression)

Kiral yapıların basma testi sonucunda elde edilen gerilim-gerinim eğrileri Şekil 14a'da sunulmuştur. İlgili eğriler incelendiğinde, C 0,5'in C 0,4'e oranla daha dalgalı bir eğri oluşturduğu, C 0,4'ün ise daha stabil davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Kiral yapıların Şekil 14b'de verilen gerinim değerlerine göre deformasyon durumları incelendiğinde, C 0,4'ün 0,05 ϵ ile birlikte bir miktar sola doğru eğildiği, 0,1 ϵ ile eğilmenin daha net bir şekilde görüldüğü ve yapının alt kısmında yer alan birim hücrelerin giderek kapanmaya başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, 0,1 ϵ 'da başlayan hücrelerin kapanma durumu, artan gerinim değerleri ile birlikte aşağıdan yukarıya doğru yapının diğer birim hücrelerine de tesir etmiştir. Sonuç olarak, yapı, 0,5 ϵ değerine ulaşmasına rağmen yapı üzerinde makro düzeyde kopmalar / ayrılmalar meydana gelmemiştir. C 0,5'in deformasyon durumuna bakacak olursak, 0,1 ϵ değerine dek önemli bir değişimin meydana gelmediği ancak, bu değerden itibaren en alt sıranın bir üstündeki sırada birim hücrelerin kapanmaya başlayarak yapının sola doğru eğilmeye başladığı görülmektedir. Kapanan hücrelerin sayısı 0,2 ϵ değerine en üst sıra dışında yapının



Şekil 13. Kiral yapıların çekme testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) mekanik özellikleri (Outcomes obtained from tensile test of chiral structures, a) stress-strain diagram, b) mechanical properties)



Şekil 14. Kiral yapıların basma testiyle elde edilen bulgular, a) gerilim-gerinim eğrisi, b) çeşitli gerinimlerdeki deformasyon durumu, c) mekanik özellikleri (Outcomes obtained from compression test of chiral structures, a) stress-strain diagram, b) state of deformation at various strains, c) mechanical properties)

tamamına ulaşırken, 0,3 ϵ değerinde en üst sıradaki hücreler de kapanarak yapının tamamı kapalı duruma gelmiştir. 0,3 ϵ değeri ile birlikte, artan gerilme sonucu yapının sol üst köşesinden lokal

kırılmalar meydana gelmiştir. Artan gerinim değeri ile birlikte oluşan lokal kırılmanın derinliği artarak tamamıyla yapıdan ayrılabilir hale gelmiştir. 0,5 ϵ değerine ulaşıldığında ise sol tarafta yer alan

kırılmanın yanı sıra, sağ alt köşeden başlayan başka bir kırılma da tespit edilmiştir. Şekil 14c’de ise kiral yapıların basma dayanımları verilmiştir. Basma dayanımlarına göre, C 0,5 9,36 MPa basma dayanımına sahipken, C 0,4’ün basma dayanımı 2,25 MPa mertebesindedir. Kiral yapıların potansiyel bir uygulaması olarak, Lee vd. [32] çalışmalarında, 3-B baskı yöntemiyle polimer malzemeden vücutta damarların yerine koyulabilen, bünyesinde ökzetik davranış gösteren kiral yapı barındıran vasküler greft yapı imal etmişlerdir. Çalışmalarının sonucu olarak ise, kiral yapı vasküler greftlerin çekme durumunda daralmak yerine genişlediklerinden dolayı avantaj sağladıkları vurgulanmıştır. EM değerlerinde de C 0,5’in 48,65 MPa, C 0,4’ün ise 24,32 MPa olduğu tespit edilmiştir (Şekil 14c). Ayrıca iki yapı arasındaki en büyük fark, AEE miktarlarında görülmüştür. C 0,5 ve C 0,4 sırasıyla 2,60 MJ/m³ ve 0,55 MJ/m³ enerji absorbe etmişlerdir. İlgili yapıların SAEE miktarlarında ise, 5,37 kJ/kg değeri C 0,5’e, 1,39 kJ/kg değeri ise C 0,4’e aittir (Şekil 14c).

3.7. Hücresel Yapıların Poisson Oranı Değerleri (Poisson's Ratio Values of Cellular Structures)

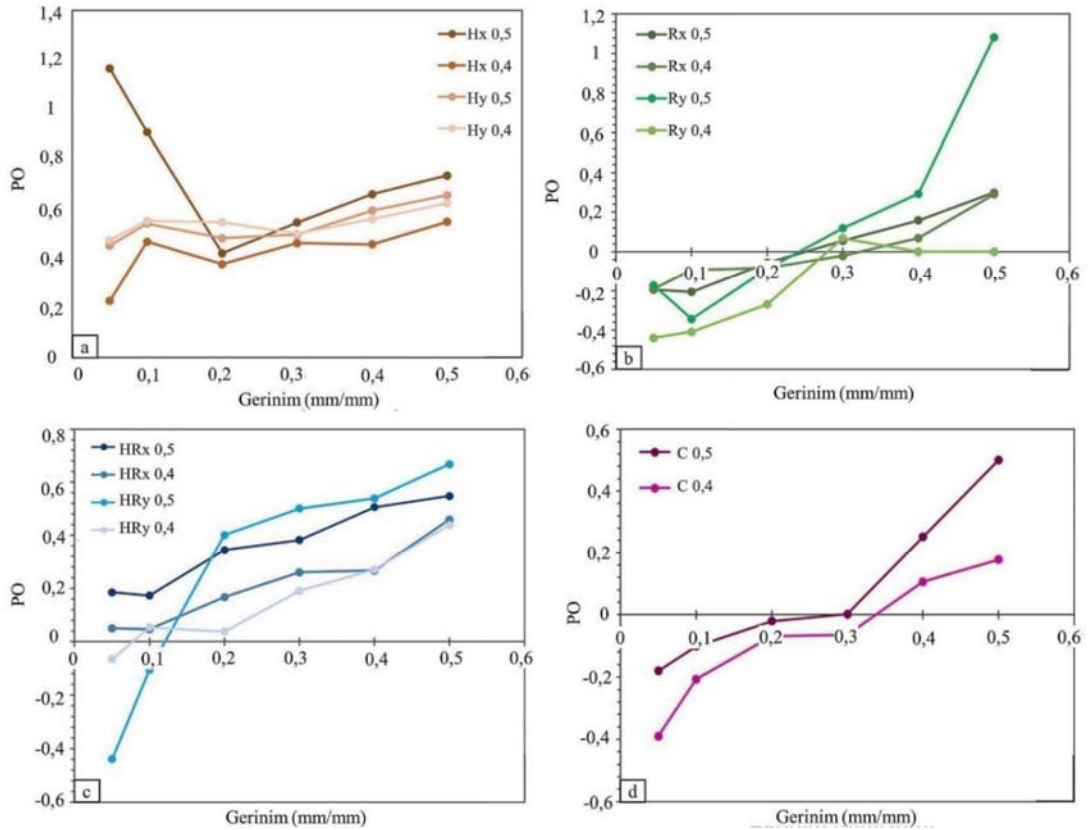
Şekil 15’te hücresel yapıların basma durumu altında, farklı ϵ değerlerindeki (0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 mm/mm) Poisson oranı (PO) değerleri verilmiştir.

Şekil 15a’ya göre balpeteği yapılarının tamamının beklenildiği üzere pozitif değerlere sahip olduğu ve bu değerlerin 0,3 ile 0,9 arasında değiştiği belirlenmiştir. Balpeteği yapıların PO değerleri değişen ϵ değerleri ile birlikte dalgalanma göstermiştir. Hx 0,4 ve Hx 0,5’in PO değerleri arasında önemli bir fark bulunurken, aynı durum Hy 0,4 ile Hy 0,5 arasında görülmektedir. Bu iki yapının ϵ değerlerine karşılık gelen PO değerleri benzerlik göstermektedir. Şekil 15b’ye göre, tüm re-entrant yapılar ilk ϵ değeri olan 0,05 mm/mm’de

konvansiyonel yapıların aksine negatif PO sergilerken, 0,1 ϵ değerine geçildiğinde Rx 0,4 dışında bu durum değişmiş ve yapılar pozitif PO göstermeye başlamışlardır. Rx 0,4 ve Rx 0,5 PO değerleri açısından benzer eğilim gösterirken, aynı durum Ry 0,4 ile Ry 0,5 arasında görülmektedir. Artan ϵ değerleri ile birlikte PO değerleri büyük ölçüde artış göstermiştir (Ry 0,4’ün 0,4 ile 0,5 ϵ değerleri arasındaki geçişi dışında). Hibrit yapılardan HRx 0,4, HRx 0,5, HRy 0,4 ve HRy 0,5’in PO değerleri ise sırasıyla; 0,42 – 0,63, 0,19 – 0,57, 0,26 – 0,91 ve 0,34 – 0,83 aralığında değişmektedir. Genel hatlarıyla PO değerlerinin ϵ değerlerinin artmasıyla giderek arttığı söylenebilir (Şekil 15c).

Şekil 15d’ye göre, kiral yapılar her iki t değerinde de oldukça benzer bir eğilim göstermişlerdir. C 0,5 in PO değerleri 0,05 ϵ değerinde -0,25, 0,1 ϵ değerinde -0,09, 0,2 ϵ değerinde yaklaşık 0, 0,3 ϵ değerinde 0,07, 0,4 ϵ değerinde 0,32 ve son olarak 0,5 ϵ değerinde ise 0,77’dir. C 0,4’ün PO değerleri ise 0,05’ten 0,5’e dek sırasıyla -0,36, -0,20, -0,05, 0,02, 0,2 ve 0,45 olarak tespit edilmiştir. C 0,5’in 0,2 ϵ değerine, C 0,4’ün ise 0,3 ϵ değerine dek negatif PO’na sahip olduğu görülürken, bu ϵ değerlerinden sonra PO değerlerinin pozitif dönerken konvansiyonel malzeme gibi bir davranış sergiledikleri tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada, literatürde sırasıyla negatif ve pozitif PO oranına sahip hücresel yapılar olarak nitelendirilen re-entrant yapı ile balpeteği yapı bir araya getirilerek oluşturulan hibrit yapıların ve negatif PO değerine sahip kiral yapıların mekanik performansları farklı giriş kalınlıklarında (0,4 mm ve 0,5 mm) ve hücre yönelimlerinde (x ve y yönü) incelenmiştir. Elde edilen tüm bulgular değerlendirilecek olursa, çekme ve basma dayanımları açısından re-entrant yapıların ön plana çıktığı, re-entrant yapıyı çekme durumunda bal peteği, basma durumunda ise hibrit yapının izlediği görülmüştür.



Şekil 15. Hücresel yapıların PO değerleri, a) balpeteği yapı, b) re-entrant yapı, c) hibrit yapı, d) kiral yapı
(Poisson's ratio values of cellular structures, a) honeycomb structure, b) re-entrant structure, c) hybrid structure, d) chiral structure)

AEE bakımından ise çekme durumunda bal peteği yapı ilk sırada yer alırken, 2,674 MPa ile en düşük çekme dayanımına sahip olmasına rağmen yüksek süneklik değerinden dolayı kiral yapı, re-entrant ve hibrit yapının önüne geçerek ikinci sırada yer almıştır. Son olarak basma durumundaki AEE değerleri incelendiğinde ise, sırasıyla re-entrant, hibrit, bal peteği ve kiral yapı büyükten küçüğe doğru sıralanmaktadır. Sonuç itibarıyla, yapılan bu deneysel çalışma ile, biyomedikal, otomotiv ve savunma alanındaki uygulamalarda kullanılabilme potansiyeline sahip olan hücresel yapıların hücrelerinin konumlanma yönü ve kiriş kalınlıklarının yanı sıra yüklenme durumlarına göre mekanik performansları detaylı olarak incelenerek, araştırmacıların bilgisine sunulmuştur.

4. Sonuçlar (Conclusions)

0,4 ve 0,5 mm kiriş kalınlıklarına ve farklı hücre yönelmesine (x ve y) sahip balpeteği, re-entrant, kiral ve hibrit hücresel yapıların çekme ve basma karakteristiklerinin deneysel olarak incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Hücresel yapıların tasarım ve imalat sonrası hücre boyutlarında maksimum %22,5 sapma tespit edilmiştir. Ra yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değeri sırasıyla ortalama 14 μm ve 75 Shore D olarak ölçülmüştür.
- Hücresel yapıların kiriş kalınlığının artmasıyla çekme ve basma dayanımları artmıştır. En yüksek çekme dayanımı 11,61 MPa ile Ry 0,5 yapıda, en düşük çekme dayanımı ise 1,45 MPa ile C 0,4 yapıda ölçülmüştür.
- En yüksek basma dayanımı 39,55 MPa ile Rx 0,5 yapıda, en düşük basma dayanımı ise 2,25 MPa ile C 0,4 yapıda tespit edilmiştir. Çekme ve basma durumunda re-entrant yapı en iyi davranışı sergilerken kiral yapı en kötü performansı göstermiştir.
- Genel olarak re-entrant yapının elastisite modülü en yüksek, kiral yapının elastisite modülü ise en düşük olarak belirlenmiştir. Hücresel yapılardaki hücrelerin yönü, mekanik özellikleri önemli düzeyde etkilemiştir. Çekme durumunda en yüksek elastisite modülü 893,87 MPa ile Ry 0,5 yapıda, en düşük elastisite modülü ise 100,07 MPa ile C 0,4 yapıda tespit edilmiştir. Hücresel yapıların basma durumundaki elastisite modül değerleri karşılaştırıldığında ise, en yüksek elastisite modül, 808,81 MPa ile Ry 0,5'te, en düşük elastisite modül ise 24,32 MPa ile C 0,4'te tespit edilmiştir.
- Hücresel yapıların absorbe edilen enerji miktarları çekme ve basma durumunda büyük farklılıklar göstermektedir. Ry yapıların Rx yapılarına göre daha fazla eğimli kiriş içermesi absorbe edilen enerji miktarlarını artırmıştır. Ayrıca, balpeteği yapı çekme durumunda, re-entrant yapı ise basma durumunda en fazla enerji absorbe etmiştir. Çekme durumunda, absorbe edilen maksimum enerji 282,75 kJ/m³ ile Hy 0,5 yapıda, minimum enerji ise 14,57 kJ/m³ ile Hx 0,4 yapıda elde edilmiştir. Basma durumunda absorbe edilen enerji maksimum 13,22 MJ/m³ ile Ry 0,5 yapıda minimum 0,55 MJ/m³ ile C 0,4 yapıda elde edilmiştir.
- Nihai olarak, balpeteği yapılar pozitif poisson davranışı sergilerken, diğer hücresel yapılar belli bir deformasyon oranından sonra negatif Poisson davranışı göstermektedir. Negatif Poisson davranışının özellikle basma durumunda enerji emme kabiliyetini artırdığı görülmüştür.
- Gelecek çalışmalarda, hücresel yapılarda kullanılan hücre sayısının optimizasyonu yapılarak, ASTM D638-14- Tip 2'ye göre beşer adet numune üretilerek, deneysel ve sonlu elemanlar analizi yöntemlerini bir arada içeren bir çalışma gerçekleştirilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Maconachie T., Leary M., Lozanovski B., Zhang X., Qian M., Faruque O., Brandt M., SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges, *Materials & Design*, 183, 108137, 2019.

2. Helou M., & Kara S., Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31 (3), 243-261, 2018.
3. Alomar Z., & Concli F., Compressive behavior assessment of a newly developed circular cell-based lattice structure, *Materials & Design*, 205, 109716, 2021.
4. Gibson L.J., & Ashby M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, 1999.
5. Zhang Y., Xiao M., Zhang X., Gao L., Topological design of sandwich structures with graded cellular cores by multiscale optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics*, 361, 112749, 2020.
6. Çakan B.G., Ensarioğlu C., Küçükakarsu V.M., Tekin İ.E., Çakır M.C., Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1657-1667, 2021.
7. Simpson J., & Kazancı Z., Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices, *Thin-Walled Structures*, 150, 106676, 2020.
8. Kolken H.M.A., Janbaz S., Leeflang S.M.A., Lietaert K., Weinhans H.H., Zadpoor A.A., Rationally designed meta-implants: A combination of auxetic and conventional meta-biomaterials, *Mater. Horizons*, 5 (1), 28-35, 2018.
9. Ergene B., Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (1), 469-484, 2022.
10. Jenett B., Calisch S., Cellucci D., Cramer N., Gershenfeld N., Swei S., Cheung K.C., Digital Morphing Wing: Active Wing Shaping Concept Using Composite Lattice-Based Cellular Structures, *Soft Rob.*, 4 (1), 33-48, 2017.
11. Chua C.K., & Leong K.F., *3D printing and additive manufacturing: Principles and applications*, World Scientific Publishing Company, Fifth Edition of Rapid Prototyping, 2016.
12. Yalçın B., & Ergene B., Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemler İmalat Teknolojisi ve Metalurjisi, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9 (3), 65-88, 2017.
13. Qi C., Jiang F., Remennikov A., Pei L.Z., Liu J., Wang J.S., Liao X.W., Yang S., Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs, *Composites Part B*, 197, 108117, 2020.
14. Wang S., Zhang M., Wang Y., Huang Z., Fang Y., Experimental studies on quasi-static axial crushing of additively-manufactured PLA random honeycomb-filled double circular tubes, *Composite Structures*, 261, 113553, 2021.
15. Görgülüarslan R.M., Determining geometric bounds used in lattice structure design and optimization based on additive manufacturing constraints, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 607-626, 2021.
16. Ingrole A., Hao A. & Liang R., Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, *Materials & Design*, 117, 72-83, 2017.
17. Panda B., Leite M., Biswal B.B., Niu X. & Garg A., Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures, *Measurement*, 116, 495-506, 2018.
18. Alomarah A., Masood S.H., Ruan D., Out-of-plane and in-plane compression of additively manufactured auxetic structures, *Aerospace Science and Technology*, 106, 106107, 2020.
19. Ali M.H., Batai S., Karim D., Material minimization in 3D printing with novel hybrid cellular structures, *Materialstoday: Proceedings*, 42 (5), 1800-1809, 2021.
20. Kucwicz M., Baranowski P., Malachowski J., Poplawski A. & Platek P., Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures, *Materials & Design*, 142, 177-189, 2018.
21. Ergene B., & Yalçın B., 4 boyutlu baskı teknolojisi ve uygulama alanlarının araştırılması, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12 (3), 108-117, 2020.
22. Liu K., Han L., Hu W., Ji L., Zhu S., Wan Z., Yang X., Wei Y., Dai Z., Zhao Z., Li Z., Wang P., Tao R., 4D printed zero Poisson's ratio metamaterial with switching function of mechanical and vibration isolation performance, *Materials & Design*, 196, 109153, 2020.
23. Broccolo S.D., Laurenzi S., Scarpa F., Auxhex – A Kirigami inspired zero Poisson's ratio cellular structure, *Composite Structures*, 176, 433-441, 2017.

24. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, <https://www.astm.org/Standards/D638>, Erişim tarihi: Mayıs 10, 2021.
25. Dong Z., Li Y., Zhao T., Wu W., Xiao D., Liang J., Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb, *Materials & Design*, 182, 108036, 2019.
26. Xiao D., Dong Z., Li Y., Wu W., Fang D., Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: Experiment and finite element analysis, *Materials Science & Engineering A*, 758, 163-171, 2019.
27. Bhate D., Soest J., Reeher J., Patel D., Gibson D., Gerbasi J. & Finfrock M., A validated methodology for predicting the mechanical behavior of Ultem-9085 honeycomb structures manufactured by fused deposition modeling, 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, 1-12, 2016.
28. Yalçın B., Ergene B. & Şekeroğlu İ., The Influence of Rib Thickness and Cell Orientation on Tensile Behaviour of various topologies produced from Abs material with additive manufacturing. 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, Istanbul, 416-421, 17-19 December, 2019.
29. Habib F.N., Lovenitti P., Masood S.H. & Nikzad M., In-plane energy absorption evaluation of 3D printed polymeric honeycombs, *Virtual and Physical Prototyping*, 12 (2), 117-131, 2017.
30. Zhang X. & Yang D., Mechanical Properties of Auxetic Cellular Material Consisting of Re-Entrant Hexagonal Honeycombs, *Materials*, 9 (11), 1-13, 2016.
31. Dudka A.A., Platek P., Durejko T., Baranowski P., Malachowski J., Sarzynski M. & Czujko T., Static and Dynamic Loading Behavior of Ti6Al4V Honeycomb Structures Manufactured by Laser Engineered Net Shaping (LENSTM) Technology. *Materials*, 12 (8), 1-20, 2019.
32. Lee J.W., Soman P., Park J.H., Chen S. & Cho D.W., A Tubular Biomaterial Construct Exhibiting a Negative Poisson's Ratio. *PLOS ONE*, 11 (5), 1-14, 2016.

