



Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion

Betül Gülçimen Çakan^{*}, Cihat Ensarioğlu, Volkan M. Küçükakarsu, İbrahim E. Tekin, M. Cemal Çakır
Uludağ University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Görükle Campus, 16059, Bursa, Turkey

Highlights:

- Producing auxetic honeycomb boxes by material extrusion
- Performing drop impact tests of the produced boxes
- Examination of the drop impact tests using finite element method

Keywords:

- Auxetic
- Energy absorption
- Finite element method
- Drop test
- Material extrusion

Article Info:

Research Article
Received: 30.11.2020
Accepted: 21.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.829758

Acknowledgement:

This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) (BİDEB 2209-A, Project No: 1919B011900797).

Correspondence:

Author: Betül Gülçimen Çakan
e-mail:
bgulcimen@uludag.edu.tr
phone: +90 224 294 2003

Graphical/Tabular Abstract

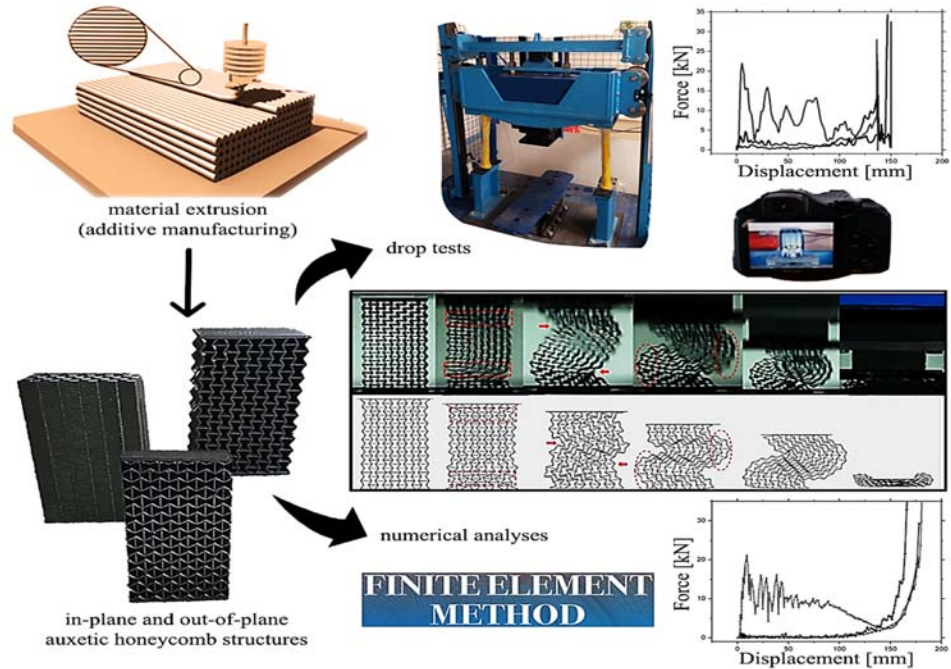


Figure A. Investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes

Purpose: The aim of the study was to evaluate the in-plane and out-of-plane mechanical behaviour of auxetic honeycomb boxes under impact loading, both experimentally and numerically.

Theory and Methods:

Auxetic honeycomb boxes were produced by material extrusion using Power ABS filament. Drop tests were performed for x and y (in-plane) and z (out-of-plane) directions. Finite element method was employed to simulate the drop test experiments.

Results:

The experimental and numerical results have shown that in in-plane loadings, crush force efficiency (CFE) and crush forces were lower, in agreement with each other.

Conclusion:

The energy absorption property of auxetic honeycomb geometry is superior in the case of out-of-plane loading.



Malzeme ekstrüzyonuyla üretilmiş öksetik bal peteği kutuların yöne bağlı darbe davranışının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi

Betül Gülçimen Çakan*^{ID}, Cihat Ensarioğlu^{ID}, Volkan M. Küçükakarsu^{ID}, İbrahim E. Tekin^{ID}, M. Cemal Çakır^{ID}
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Malzeme ekstrüzyonuyla öksetik bal peteği kutular üretilmesi
- Üretilen kutuların düşürme darbe testlerinin yapılması
- Düşürme darbe testlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 30.11.2020
Kabul: 21.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.829758

Anahtar Kelimeler:

Öksetik,
enerji sönümleme,
sonlu elemanlar yöntemi,
düşürme testi,
malzeme ekstrüzyonu

ÖZ

Negatif Poisson oranına sahip olan öksetik yapılar, mekanik enerji/darbe sönümleme açısından iyi özelliklere sahiptir. Bu yapılar; havacılık-uzay ve savunma sektörlerindeki sandviç yapıları kompozitlerde, zırh üretiminde veya koruyucu spor ekipmanı üretiminde uygulama alanı bulmuştur. Bu çalışmada, öksetik bal peteği yapısının darbe yüklemesi altında farklı yönlerdeki (düzlem-içi ve düzlem-dışı) mekanik davranışı incelenmiştir. Düzlem-içi (x ve y) ile düzlem-dışı (z) yönler için Power ABS filamentini kullanarak malzeme ekstrüzyonuyla öksetik bal peteği yapısına sahip kutular üretilmiştir. Deneysel çalışmada, düşürme test cihazı ile dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, bu 3 yön için sonlu elemanlar modelleri oluşturularak eksplisit analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar, birbiriyle uyumlu olarak, düzlem-dışı yükleme durumunda öksetik bal peteği geometrisinin enerji sönümleme özelliğinin daha üstün olduğunu göstermiştir. Düzlem-içi yüklemelerde, çarpışma kuvveti verimliliği (ÇKV) ve çarpışma kuvvetleri daha düşük seviyede kalmıştır.

Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion

H I G H L I G H T S

- Producing auxetic honeycomb boxes by material extrusion
- Performing drop impact tests of the produced boxes
- Examination of the drop impact tests using finite element method

Article Info

Research Article
Received: 30.11.2020
Accepted: 21.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.829758

Keywords:

Auxetic,
energy absorption,
finite element method,
drop test,
material extrusion

ABSTRACT

Auxetic structures, which have a negative Poisson's ratio, have good mechanical energy/impact absorption properties. These structures have found application in sandwich composites in the aerospace and defence industries, in the production of armour or protective sports equipment. In this study, the mechanical behaviour of the auxetic honeycomb structure in different directions (in-plane and out-of-plane) under impact loading was investigated. For the in-plane (x and y) and out-of-plane (z) directions, boxes with an auxetic honeycomb structure were produced by material extrusion method using Power ABS filament. In the experimental study, dynamic tests were carried out with a drop test machine. Besides, explicit analyses were performed by creating finite element models for these 3 directions. The experimental and numerical results have shown that the energy absorption property of auxetic honeycomb geometry is superior in the case of out-of-plane loading, in agreement with each other. In in-plane loadings, crush force efficiency (CFE) and crush forces were lower.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnce cidarlı yapılar; temel geometri, hücre sayısı/yapısı, takviye dolgu malzemesi, tetikleme geometrileri, değişken cidar kalınlığı, gibi açılardan incelenerek enerji sönmleme elemanı olarak kullanılmaktadır [1]. Bunların içinde, hücresel yapılar, doğal veya insan yapımı olsun, hafifliklerine rağmen üstün mekanik dayanım ve enerji sönmleme özelliklerine sahip olmaları sayesinde uzay-havacılık, savunma uygulamaları başta olmak üzere medikal, nakliye, otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olan bal peteği yapısı, sandviç yapı kompozit elemanlarda ve enerji sönmlemenin önem kazandığı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır [2].

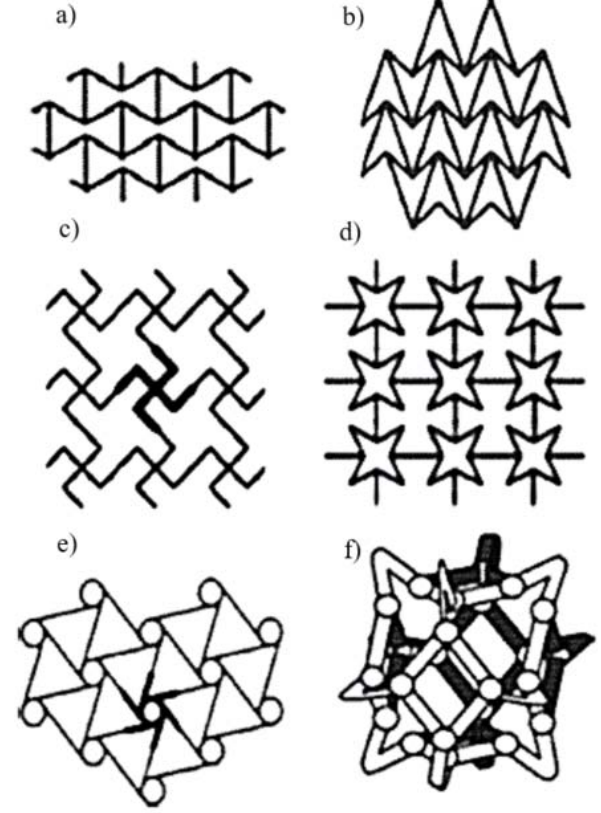
Son yıllarda ilgi alanı olmuş bir konu da öksetik olarak adlandırılan, negatif Poisson oranına sahip yapılarıdır. Bilindiği gibi pozitif Poisson oranına sahip malzemelerde çekme kuvveti etkisi altında çekme yönünde uzama gerçekleşirken, kuvvete dik yönde kısılma meydana gelir. Bal peteği yapısında da bu genel durum geçerlidir, ancak petek yapısının değiştirilmesiyle, yani hücre duvarlarının tersine çevrilmesiyle yapı negatif Poisson oranına sahip olmaktadır. Buna bağlı olarak, bu yapılarda (çekmede) kuvvete dik yönde de uzama meydana geldiği gösterilmiştir [3]. İlk olarak Evans vd. 1991 yılında bu tarz yapıları öksetik (auxetic) olarak adlandırmaya başlamıştır [4, 5]. Öksetik hücresel yapıların, öksetik olmayanlara göre; intendasyon (batma) ve kayma deformasyonuna karşı daha yüksek direnç gösterdikleri, sinyal ve akustikte de daha iyi sönmleme özellikleri gösterdikleri belirtilmiştir [6-8].

Öksetik yapının, süngerimsi kemik dokusu gibi, doğada bazı hazır örnekleri bulunmakla beraber; bunların sayısının az, uygulanabilirliğinin kısıtlı olması, suni üretim ihtiyacını doğurmuştur. Bu malzemelerin, ilk olarak polimerden sentezlenmesi sağlanmıştır [7]. Gün geçtikçe artan ilgiyle, farklı öksetik geometrilerin (Şekil 1) geliştirilmesi ve üretilmesi sağlanmıştır [8].

Mekanik enerji/darbe sönmleme açısından da iyi özelliklere sahip olan öksetik hücresel yapılar, öksetik olmayan bal peteği yapıları gibi, havacılık-uzay ve savunma sektörlerindeki sandviç yapı kompozitlerde, zırh üretiminde [9] veya spor uygulamalarında koruyucu ekipman üretiminde [10] uygulama alanı bulmuştur.

Öksetik olmayan bal peteği yapısının, düzlem-içi ile düzlem-dışı yüklem altında farklı deformasyon davranışları gösterdiği ve enerji sönmleme söz konusu olduğunda düzlem-dışı yüklemenin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [2]. Öksetik yapılar için de düzlem-içi ve düzlem-dışı deformasyon davranışları üzerine çalışmalar olmakla beraber, bu çalışmalar genellikle statik / sanki-statik şartlar altındaki durumlar için olmuştur. Bunlara örnek olarak, Dong vd. öksetik bal peteği yapısında hücre kalınlığının mekanik davranışa etkisini basma testleriyle ve aynı zamanda nümerik analizlerle incelemiştirler. Sonuç

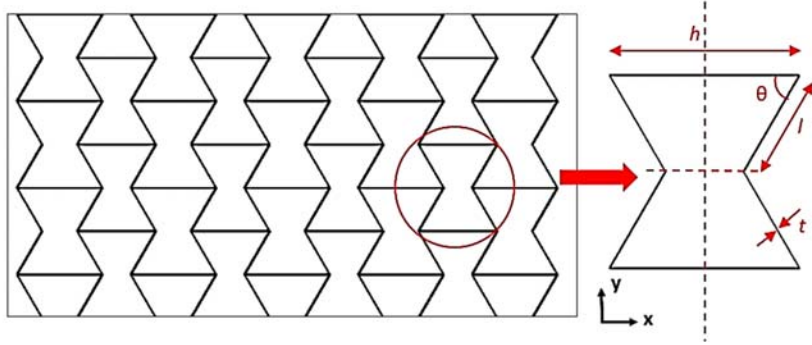
olarak, hücre kalınlığının farklı deformasyon modlarına sebep olduğunu göstermişlerdir [11].



Şekil 1. Öksetik davranış gösteren çeşitli geometriler [7], a) Öksetik bal peteği / girintili bal peteği b) Çift-V yapısı c) Lozenge kafes yapısı d) Yıldız şekilli bal peteği e) Kiral bal peteği f) 3B re-entrant hücre
(Major geometries exhibiting auxetic behaviour a) Auxetic honeycomb/Re-entrant honeycomb b) Double-V structure c) Lozenge Grids d) Star honeycomb e) Chiral honeycomb f) 3D Re-entrant cell)

Öksetiklerin dinamik durumdaki, yani darbe altındaki mekanik davranışı yine bazı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Bu çalışmalarda daha çok nümerik metod kullanılmıştır. Tatlier, öksetik bal peteği yapısının düzlem-içi dinamik enerji sönmleme davranışını nümerik olarak incelemiştir [12]. Bunun için öksetik yapılarda birim hücrenin düzlem-içi boyunca x eksenine (Şekil 2) farklı açılar yapacak şekilde yönlendirilmiş durumu için 2D analizler gerçekleştirilmiş ve en iyi sönmlemeyi x eksenine 90° açılı yerleştirilmiş durumda elde etmiştir. Çalışmamızda yönler, bu çalışmadakiyle aynı şekilde tayin edilmiştir.

Yine başka bir nümerik çalışmada, öksetik girintili bal peteğinin çarpışma enerjisini sönmleme performansı, öksetik olmayan bal peteğinkine ile karşılaştırılmıştır. Öksetik bal peteğinin geleneksel bal peteğinden farklı olan deformasyon karakteri, daha yüksek plato gerilmeleri ve dolayısıyla daha yüksek sönmlenen enerji değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır. Ayrıca öksetik bal peteğinin



Şekil 2. Öksetik bal peteği geometrisi ve birim hücre parametreleri: $\theta=60^\circ$; $h=15,8$ mm; $l=9,31$ mm; $t=0,46$ mm
(Auxetic honeycomb geometry and unit cell parameters $\theta=60^\circ$; $h=15,8$ mm; $l=9,31$ mm; $t=0,46$ mm)

düzlem-içi x ve y-yönleri için, çarpışma hızı ve hücre duvarı boyut oranı (aspect ratio) etkisi parametrik olarak incelenerek, düzlem-içi darbe davranışına yönelik dinamik çarpışma dayanımı için analitik bir ifade elde edilmiştir [13].

Qiang vd. öksetik girintili bal peteği ve bunun yanında iki farklı öksetik geometrinin düzlem-içi dinamik enerji sönmüleme davranışını karşılaştırmıştır [14]. Öksetik girintili bal peteğinin diğer öksetik yapılara kıyasla hem düşük hem de yüksek hızda iyi özellikler göstermesi sebebiyle daha kararlı davrandığını belirtmişlerdir. Modellerin doğrulanması için, 3 boyutlu yazım tekniği ve SOMOS8000 ticari adlı bir filament ile numune üretimini sağlayıp, bunları basma testine tabi tutmuşlardır.

Enerji sönmüleme karakteristiği ile ilgili bir çalışmada ise öksetik girintili bal peteğinin geometrik olarak 2 farklı modifikasyonu tasarlanarak nümerik olarak incelenmiştir [15]. Bu 2 yeni tasarım, aynı çarpışma hızları için daha yüksek plato gerilmesi, dolayısıyla daha yüksek enerji sönmüleme özelliği göstermiştir.

Bir başka çalışmada, kiral bal peteği hücresel geometrisine (Şekil 1e) sahip numuneler, Ti6Al4V alaşımı kullanılarak, toz yatak füzyon esaslı 3B yazım yöntemlerinden biri olan elektron demeti eritme ile (EBM-Electron Beam Melting) üretilmiştir. Basma testi ile mekanik karakterizasyon gerçekleştirilmiştir [16].

Başka bir grup, yine EBM yöntemini ve aynı Ti alaşımını kullanarak çift-V öksetik hücre (Şekil 1b) yapısına sahip öksetik numuneleri üretilen basma testlerini gerçekleştirmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçlar değerlendirilerek, çarpışma verimliliğinin narinlik oranına bağlı olarak değişimi incelenmiştir [17].

Evlen vd. [18], en yaygın ve en düşük maliyetli [19] 3B yazım yöntemlerinden biri olan malzeme ekstrüzyonu ile (spesifik olarak, ergiyik biriktirme yöntemi, FDM-Fused Deposition Modelling), bu yöntemde en sık kullanılan 3 filamentli (PLA, ABS, Power ABS) ve farklı üretim parametrelerini kullanarak numuneler üretmiştir. Araştırmacılar, bu numuneleri çekme mukavemeti ve sertlik açısından karşılaştırmıştır. En yüksek çekme gerilmesi PLA

filamentte çıkarken, en yüksek % uzama Power ABS filamentinde tespit edilmiştir. Literatürde Power ABS, İzod testi sonuçlarına göre darbe yüklemesi için uygun bir filament olarak geçmektedir [18]. Gerilme değerleri PLA'ninkine göre daha düşük olsa da bu düşüklük sınırlıdır. Öte yandan, Power ABS filamentlerin süneklik değeri daha yüksektir. Dolayısıyla, Power ABS filamentlerin darbe dayanımı (tokluk) özelliği daha iyi olmaktadır. En sık kullanılan bir diğer filament olan ABS, darbe dayanımı açısından Power ABS filamentten daha iyi performans gösterebilse de Power ABS filament baskı (3B yazım) açısından daha başarılı sonuçlar vermektedir.

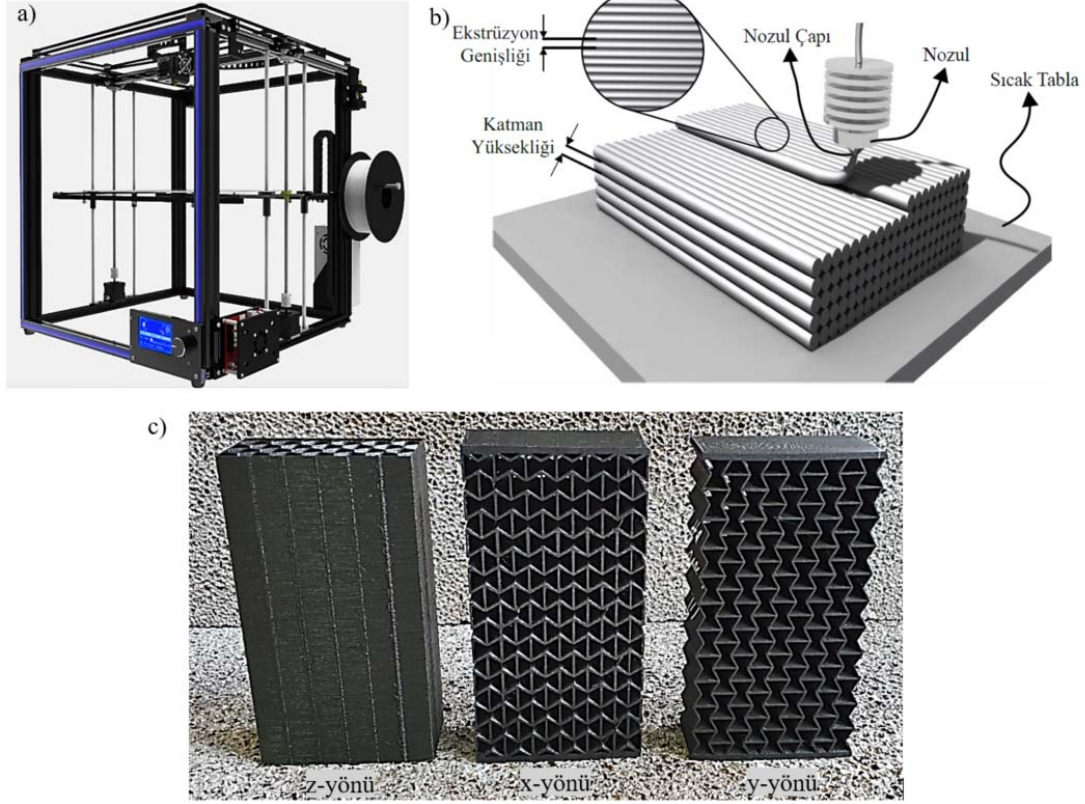
Bu çalışmada, öksetik bal peteği yapısının düzlem-içi (x ve y) ve düzlem-dışı (z) darbe sönmüleme özelliği, deneysel ve nümerik olarak, çarpışma testleri ile incelenmiştir. Numuneler, malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle ve Power ABS filamentli kullanılarak üretilmiştir. Böylece, literatürde darbe yüklemesine uygun olduğu İzod testleri yardımıyla raporlanmış ve malzeme ekstrüzyonu yönteminde yüksek baskı performansı verdiği bildirilmiş olan Power ABS filamentle üretilen malzemelerin çarpışma performansları analiz edilmiştir. Deneysel incelemede, üretilen numuneler yüksek hızda düşürme testine tabi tutulmuştur. Nümerik incelemede, düşürme testlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri gerçekleştirilmiştir.

Makalemizde, öncelikle; numune üretiminde, gerçek testlerde (düşürme testleri) ve sanal testlerde (nümerik analizler) kullanılan malzeme, cihaz ve yöntemler anlatılmıştır. Ardından, gerçek ve sanal testlerin bulguları verilmiş, bulgular yorumlanarak karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Test Numunelerinin Üretimi (Production of Test Specimens)

Geleneksel yöntemler ile hücresel yapıların üretiminin zor ve maliyetli olması sebebiyle, numunelerin üretimi malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de öksetik bal peteği geometrisi ve birim hücrenin boyutları verilmiştir. Hücre boyutları seçilirken literatürdeki çalışmalar [14] göz önüne alınarak ön çalışma yapılmıştır.



Şekil 3. Numunelerin üretimi: a) 3B yazıcı, b) Yazdırma parametreleri, c) Power ABS filamentle üretilen numuneler (sırasıyla, z, x ve y-yönleri)

(Production of samples: a) 3D printer, b) Printing parameters, c) Samples printed with Power ABS filament (z, x and y directions respectively))

Tablo 1. 3B yazıcıda kullanılan yazdırma parametreleri (Printing parameters used for 3D printing)

Katman Yüksekliği [mm]	Ekstrüzyon Genişliği [mm]	Tabla Sıcaklığı [°C]	Nozul Sıcaklığı [°C]	Nozul Çapı [mm]	Baskı Hızı [mm/s]
0,3	0,46	80	230	0,4	50

Enerji sönmüleme davranışı ve malzeme ekstrüzyonu yöntemindeki parametreler dikkate alınarak hücre boyutları seçilmiştir. Öksetik yapıların modellenmesi için SolidWorks CAD programı kullanılmıştır. Oluşturulan 3 boyutlu CAD modeller stl formatında kaydedildikten sonra 3B yazıcı ara yüz programına (Simplifly3D) aktararak gerekli parametreler oluşturulmuştur. Modellerin G-kodları hazırlanarak yazıcıya aktarılmış, numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan 3B yazıcı Tronxy 5S modeldir ve yazdırma boyutu kapasitesi 330x330x400 mm³'tür. Yazıcının nozul çapı 0,4 mm olarak seçilmiştir. Şekil 2'de verilen birim hücre parametrelerinden t kalınlığı 0,46 mm olarak alınmıştır. Duvar t kalınlığının 0,46 mm olarak seçilme sebebi, nozul çapına göre t yönü boyunca tek sıra yığma yapılmak istenmesidir. Öksetik kutular, 100x50 mm² dikdörtgen bir kesite ve 180 mm yüksekliğe sahip olacak ve birim öksetik hücreler, düzlem-İçi (x ve y) ile düzlem-dışı (z) yönlendirilmiş olacak şekilde ayrı ayrı üretilmiştir (Şekil 3). Açık kasa (ortam sıcaklığından etkilenen) 3B yazıcılar ile ABS (Akrilonitril Butadiyen Stiren) filamentlerinin basımı çok zordur. Numunelerin

büyüküğü ve basım süresinin uzunluğu sebebiyle; ABS filamentinin, baskı performansı iyileştirilmiş ve açık kasa yazıcıda basımı daha kolay bir versiyonu olan Power ABS filamentini kullanılmıştır. Power ABS filamentlerinin süneklik özelliği de genellikle daha iyidir. Çalışmada, kullanılan 3B yazıcıyla optimum baskı kalitesi veren, Tablo 1'de sunulmuş olan yazdırma parametreleri kullanılmıştır. Üretilen numunelerin kütleleri ve yazdırma süreleri, Tablo 2'de verilmiştir

Tablo 2. Üretilen numunelerin kütleleri ve yazdırma süreleri (Mass and printing durations of produced samples)

Yön	Kütle [g]	Yazdırma Süresi
x	232	18 saat 32 dakika
y	220	16 saat 32 dakika
z	209	17 saat 16 dakika

2.2. Düşürme Test Düzenegi (Drop Test Setup)

Düşürme testleri, 500 kN kapasiteli dinamik yük hücresi ve 300 mm kapasiteli lineer pozisyon sensörüne (0,01 mm

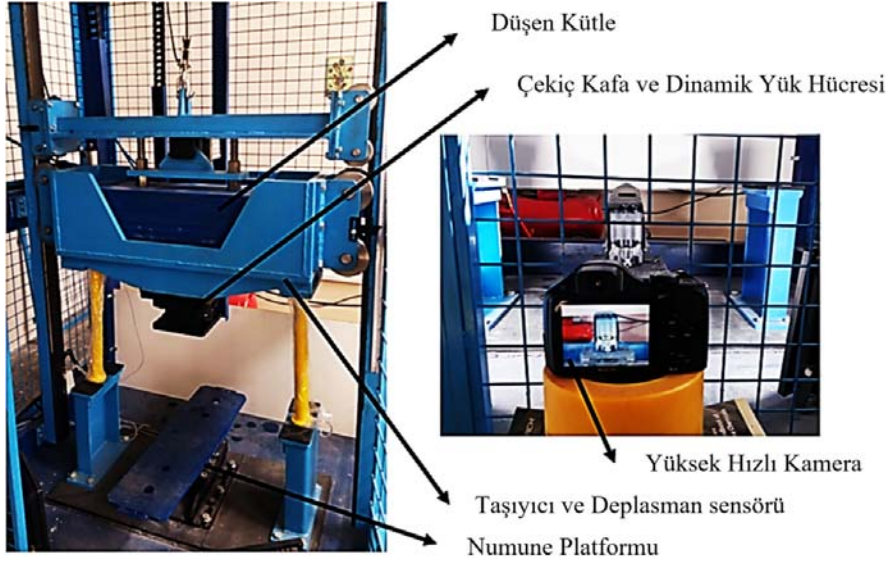
hassasiyet, 5 m/s maksimum çalışma hızı) sahip Şekil 4'teki test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Yük hücresi ve pozisyon sensörü çekiç kafa üzerinde yer almaktadır. Dolayısıyla, kuvvet ve yer-değiştirme değerlerinin ölçümü bu kafaya göre yapılmaktadır. Yüksek hızlı kamera kullanılarak deformasyon davranışları, 420 kare/s hızında ve 224x168 piksel görüntü boyutunda kayıt altına alınmıştır. Testlerde, çarpışma hızı 3,3 m/s (~12 km/sa) ilk hızla gerçekleştirilmiştir. Bunun için, çarpışma kütlesi (580 kg) 0,555 m yükseklikten serbest düşmeye bırakılmıştır. Bu durumda, numuneye uygulanan mekanik enerji 3,16 kJ olmuştur.

2.3. Nümerik Model (Numerical Model)

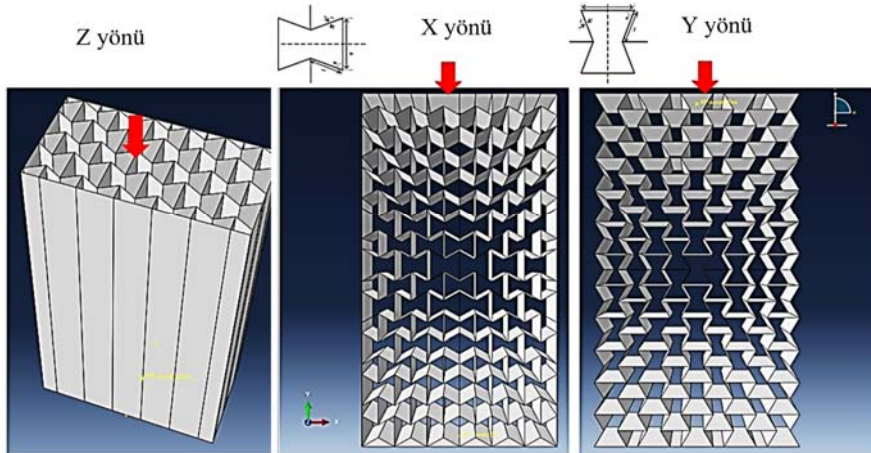
Öksetik numunelerin, 100 mm x 50 mm x 180 mm boyutlarında 3 boyutlu yüzey modelleri (Şekil 5), analizlerin

gerçekleştirileceği Abaqus sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuştur. Daha sonra bu modellere 0,46 mm et kalınlığı tanımlanmıştır. Düşürülen kütle rijit olarak modellenip, kendisine tanımlanan referans noktasına 580 kg'lık yük atanmıştır. Analiz süresinden kazanç sağlamak amacıyla deneylerdeki gibi belli bir mesafeden kütle düşürülmesi yerine kütleye aynı potansiyel enerji değerine eşit olacak şekilde çarpışma hızı atanmıştır. Buna göre, hesaplanan ilk çarpışma hızı yaklaşık olarak 3,3 m/s'dir. Kutular 5 mm eleman boyutu ve S4R (4 düğüm noktalı, azaltılmış integrasyon) yüzey eleman tipi kullanılarak sonlu elemanlara ayrılmıştır. Dinamik testler için eksplisit çözüm yapılacağı için kontak tipi de eksplisit genel kontak olarak seçilmiştir.

Malzeme tanımlamada, yüksek gerinim hızları için en çok kullanılan modellerden olan Johnson-Cook modeli kullanılmıştır. Literatürde dinamik testlerin, statik / sanki-



Şekil 4. Düşürme test düzeneği (Drop test setup)



Şekil 5. Düzlem-içi (x ve y) ile düzlem-dışı (z) yönler için oluşturulan öksetik bal peteği yapılı kutular (Auxetic boxes modelled for in-plane (x and y) and out-of-plane (z) directions)

statik testler kadar yaygın olmaması sebebiyle; analizlerde kullanılacak malzeme modellerine ait sabitleri belirlemek daha zordur. Bu çalışmada, kullanılan ABS filamentinin bir türevi olması sebebiyle, ABS filamentine ait Johnson-Cook malzeme sabitleri kullanılarak üretilen gerilme-birim şekil değiştirme datası kullanılmıştır. Bu sabitler (Tablo 3), ABS polimeri için farklı hız ve sıcaklıklarda çekme testlerinin gerçekleştirildiği bir çalışmadan alınmıştır [20]. A, B, C, m, n, malzeme sabitleri; $\dot{\epsilon}_0$, referans gerinin hızıdır.

Ayrıca deformasyon esnasında malzemede oluşan hasarı da göz önüne almak için belirli bir gerinim değerine ulaşan elemanların modelden silinmesi sağlanarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bununla alakalı olarak, 0,1-0,4 aralığında denenen gerilme değerleri içerisinde 0,2 değeri, deneysel sonuçlara en yakın değerleri verdiği için analizlerde kullanılmıştır. Kuczewicz vd. de öksetik olmayan bal peteği kullanarak sanki-statik şartlar için gerçekleştirdikleri analizlerde, bu şekilde bir hasar tanımlamasının deneysel eğrilerle daha uyumlu sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [21].

Tablo 3. ABS filamentine ait Johnson-Cook malzeme sabitleri [20] (Johnson-Cook parameters for ABS filament [20])

A	B	C	m	n	$\dot{\epsilon}_0$
39 MPa	48 MPa	0,053	0,879	1,5	$8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Düşürme Testi Sonuçları (Drop Test Results)

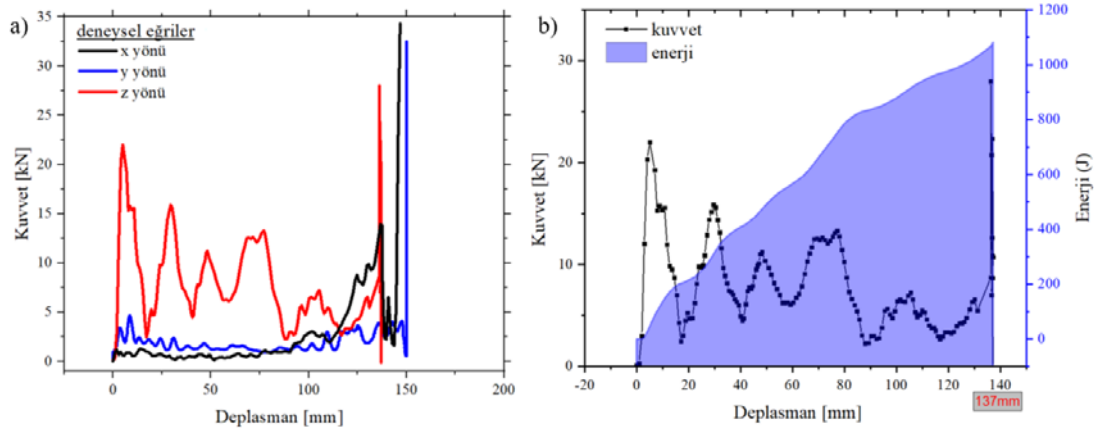
Düzlem-içi (x, y) ve düzlem-dışı (z) yükleme sonucunda elde edilen çarpışma kuvveti-deplasman eğrileri Şekil 6a'da verilmiştir. z-yönünde, x ve y-yönlerindeki göre daha yüksek çarpışma kuvveti değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Deplasman değerleri, yani numunelerin son sıkışma miktarlarına gelince; z-yönünde, x ve y'dekine (düzlem-içi yüklemeler) göre bir miktar daha az sıkışma olduğu (x, y, z-yönleri için sırasıyla, 144, 149, 137 mm)

görülmektedir. Şekil 6b'de z-yönü için sönmülenen enerjinin deplasmana bağlı olarak değişimi verilmiştir. Tüm yönler için enerji değerleri, kuvvet-deplasman eğrisi altında kalan alanın yoğunlaşma noktasına (ϵ_D) kadar integrasyonu ile hesaplanmıştır (Tablo 4). x ve y-yönlerinde, yapının düşük direnç göstermesiyle kuvvet değerleri düşük seyretmiştir. Ancak, deformasyonun son aşamalarında kuvvet değerlerinde artış gerçekleşmiştir. Bu artış, x-yönlü yüklemelerde daha fazla olmuştur. Bunun sebebi, katlanmalar sırasında hücrelerde gerçekleşen burkulma mekanizmasının (Şekil 8) x-yönlü yükleme durumunda (y-yönlü yüklemesine göre) sınırlı kalmasıdır. Böylece, yapı düşey yönde birikmiş ve deformasyona daha fazla direnç göstermiştir.

x ve y-yönlü yapılar, eğilme-baskın (bending-dominated) bir deformasyon gösterdiği için, kuvvetler daha düşük değerlerde ancak daha stabil seyretmiştir. z-yönlü yapıda ise, uzama-baskın (stretch-dominated) bir deformasyondan dolayı, kuvvetler, daha yüksek değerlere ulaşmış ve genliği daha yüksek olan dalgalanmalı bir seyir göstermiştir.

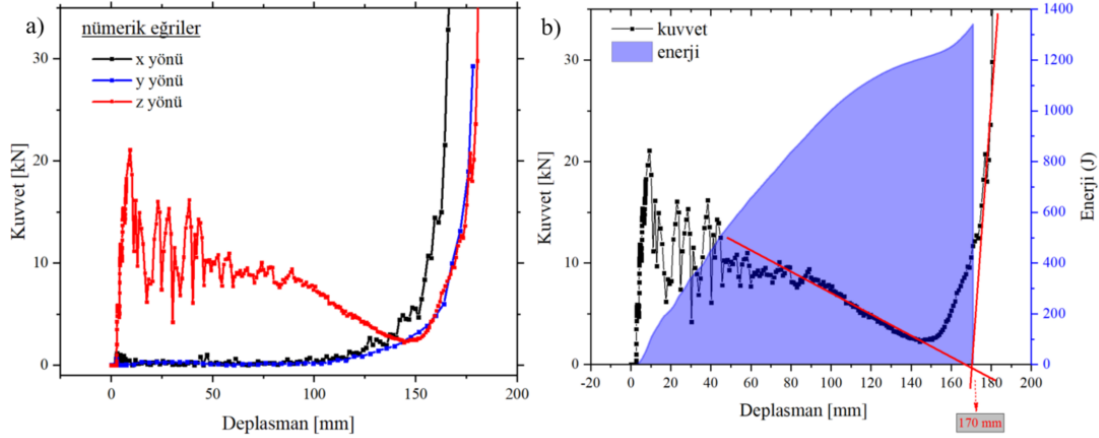
3.2. Nümerik Sonuçlar (Numerical Results)

Şekil 7a'da sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Deneysel sonuçlara benzer şekilde, z-yönü özellikle başlangıçta daha yüksek kuvvet değerleri göstermiş, yaklaşık 75 mm 'lik sıkışma miktarından sonra kuvvet değerleri düşmüştür. Kuvvet değerlerindeki büyük salınımlar, deneysel eğride tüm deformasyon süreci boyunca yer alırken, nümerik eğride deformasyonun ilk bölümlerinde yer almıştır. Nümerik ve deneysel eğriler arasındaki bu fark, ABS malzemenin darbe altında daha kırılğan davranmasından ve bu sebeple birim hücrelerde test boyunca gerçekleşen hasarın kuvvetteki bu yerel düşüşleri oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Sonlu elemanlar modelinde ise hasar modeli tanımlı olmadığı için malzemenin sadece tanımlı olan elastik ve plastik davranışı görülmektedir. Başlangıçtaki maksimum çarpışma kuvveti değerinin, deneysel değere oldukça yakın (yaklaşık 21 kN) olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Düzlem-içi (x, y) ve düzlem-dışı (z) yükleme altında elde edilen deneysel grafikler, a) Kuvvet-deplasman eğrileri b) Sönmülenen enerji (düzlem-dışı (z) için)

(Experimental graphs for in-plane (x and y) and out-of-plane (z) loadings, a) force-displacement curves b) absorbed energy for z direction)



Şekil 7. Düzlem-içi (x, y) ve düzlem-dışı (z) yükleme altında elde edilen nümerik grafikler, a) Kuvvet-deplasman eğrileri b) Sönümlenen enerji (düzlem-dışı (z) için)
(Numerical graphs for in-plane (x and y) and out-of-plane (z) loadings a) force-displacement curves b) absorbed energy for z direction)

Tablo 4. Deneysel-nümerik testlerden elde edilen sonuçlar (Experimental vs. numerical results)

Yön	Deneysel				Nümerik			
	Enerji [J]	F _{ort} [kN]	F _{maks} [kN]	ÇKV	Enerji [J]	F _{ort} [kN]	F _{maks} [kN]	ÇKV
x	326	2,3	13,8	0,16	208	1,3	6,5	0,20
y	288	1,9	4,5	0,42	135	0,8	5,9	0,14
z	1081	7,9	22	0,35	1337	7,9	20,8	0,38

Deneysel sonuçlara benzer şekilde, x-yönlü yapı için, deformasyonun son aşamalarında, son pik kuvvet oluşmadan önce, kuvvetlerin kademeli olarak arttığı görülmektedir.

Sönümlenen enerji değeri için kuvvet-deplasman eğrisinin altında kalan alan hesaplanmıştır (Şekil 7b). Bu eğrilerde, numunelerin tamamen sıkıştığı, yani katı olarak davrandığı deplasman değeri (yoğunlaşma noktası, ϵ_D), son iki bölgeye çizilen teğetlerin (kırmızı çizgiler) kesişim noktası olarak [22] belirlenmiştir. Yoğunlaşma noktaları x, y, z-yönleri için sırasıyla, 152, 167, 170 mm olarak belirlenmiştir. Tüm yönler için, belirlenen bu noktalara kadar integral alınarak faydalı enerji [2] hesaplanmıştır (Tablo 4).

3.3. Deneysel-Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması (Comparison of Experimental-Numerical Results)

Enerji sönümlenme performansı değerlendirilirken, sönümlenen enerjinin yanı sıra ortalama kuvvet (F_{ort}) ve çarpışma kuvveti verimliliği (ÇKV) gibi kriterler göz önüne alınır. Ortalama çarpışma kuvveti, Eş. 1'deki gibi, sönümlenen enerjinin deplasmana oranı olarak hesaplanır. Bu çalışmada, F_{ort} hesaplandıktan sonra, maksimum çarpışma kuvveti belirlenerek ortalama kuvvetin bu kuvvete oranıyla ÇKV değeri (Eş. 2) bulunmuştur. Bu değer 1'e yakın olması arzu edilir. Bu duruma yaklaşılması, çarpışma kuvvetlerinde ani artışların, yani ani ivmelenmelerin olmadığı ideal çarpışma halini temsil eder.

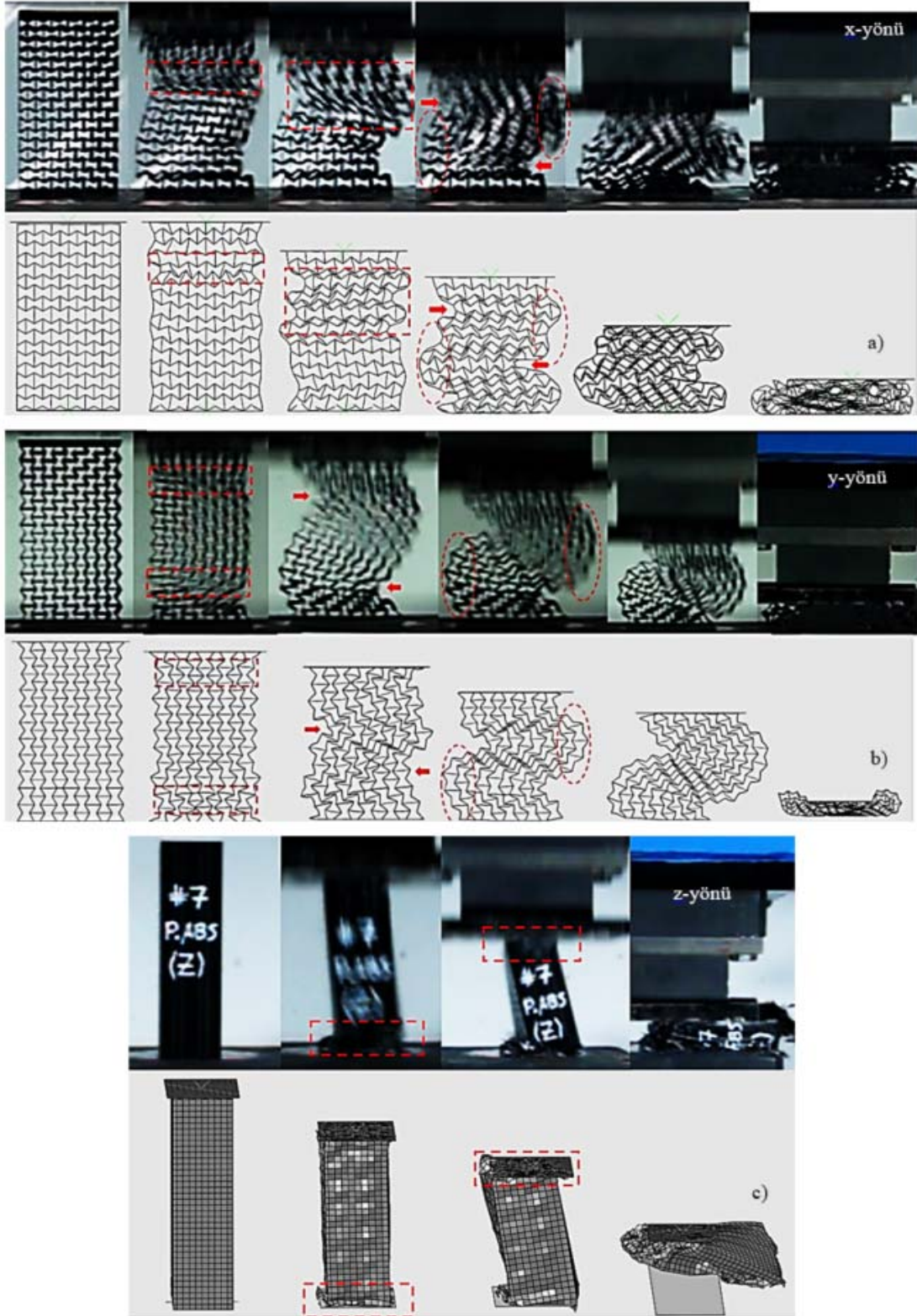
$$F_{ort} = \frac{\text{Enerji Emilimi}}{\text{Deplasman}} \quad (1)$$

$$\text{ÇKV} = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (2)$$

Deneysel ve nümerik eğriler kullanılarak hesaplanan, enerji sönümlenme performansına ait sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. x ve y-yönlerinin düşük çarpışma kuvvetlerine sahip olması sebebiyle, hem deneysel hem de nümerik sonuçlarda, bu yönlerdeki sönümlenen enerji, z-yönündekine göre çok daha düşüktür. Deneysel ve nümerik sonuçların (enerji, F_{ort} , F_{maks} ve ÇKV), z-yönünde birbirlerine oldukça yakın çıktığı görülmüştür. ÇKV ve enerji sönümlenme değeri, z-yönünde, diğer yönlerdekinden daha yüksek çıkmıştır.

Nümerik eğriler genel olarak deneysel eğrilerin karakteristiğini benzer şekilde yansıtmıştır, ancak sıkışma miktarları deneysel sonuçlardakine göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebeplerinden biri, nümerik analizlerde; kullanılan ABS malzeme parametrelerinin, deneylerde kullanılan malzemeninkine göre daha gevrek bir davranışı temsil etmesi ve kırılmalarla yapının dağılarak daha fazla sıkışması olabilir.

Şekil 8'de numunelerin deneysel ve nümerik deformasyon görüntüleri verilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar birbirine oldukça benzer deformasyon davranışları göstermiştir. x ve y-yönünde, yükleme etkisiyle, numunelerde ilk olarak yerel deformasyon bölgeleri (dikdörtgen içerisine alınan bölgeler) oluşmuştur. Daha sonra, deformasyonun artmasıyla, numunenin 2 noktadan (elips içerisine alınan bölgeler) burkulmaya uğradığı



Şekil 8. Düzlem-içi (x, y) ve düzlem-dışı (z) yükleme altında deneysel (üst) ve nümerik (alt) deformasyon davranışı, a) x-yönü b) y-yönü c) z-yönü (Experimental (top) and numerical (bottom) deformation modes for in-plane (x and y) and out-of-plane (z) loadings a) x-direction b) y-direction c) z-direction)

görülmektedir. Ezilmenin gerçekleştiği, deformasyonun son evrelerinde ise, hücrelerde meydana gelen kırılmalarla

birlikte numune tamamen sıkışmıştır. Deformasyonun tamamlanmaya başladığı bölgede, y-yönlü yapı ile

karşılaştırıldığında, x-yönlü yapıda düşey yönde birikip yoğunlaşma daha fazla olmuştur. Bu davranış, deneysel ve nümerik düşey kuvvet değerlerine artış olarak (Şekil 6a ve Şekil 7a) yansımıştır.

z-yönüne gelince, deformasyon ve hasar ilk olarak alt kısımda, daha sonra üst kısımda oluşmuştur. İlerleyen süreçte, numune yaklaşık olarak orta noktadan burkulup katlanmıştır. Son olarak, tamamen sıkışarak katı gibi davranmaya başlamıştır. Deneysel ve nümerik kuvvet-deplasman eğrileri benzer karakterde seyretmiş, ancak, deneysel eğrilerde deformasyon daha yüksek kuvvetlerde gerçekleşmiş ve daha düşük deplasmanda tamamlanmıştır (Tablo 4, Şekil 6a ve Şekil 7a).

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bal peteği başta olmak üzere hücreli yapılar, sundukları hafifliğin yanında iyi enerji sönmüleme özellikleri açısından birçok alanda uygulama bulmuştur. Son zamanlarda ise öksetik özellik gösteren, yani negatif Poisson oranına sahip geometriler araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu çalışmada, bu geometrilerden biri olan öksetik bal peteğinin, darbe etkisi altında düzlem-içi (x ve y) ve düzlem-dışı (z) enerji sönmüleme davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Deneysel ve nümerik sonuçlar, düzlem-dışı yüklemde, düzlem-içi yönlerdekine göre, çarpışma kuvveti verimliliğinin (ÇKV) ve enerji sönmülemenin daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu durum, öksetik olmayan hücreli yapılarındaki ile benzerdir.

x ve y-yönleri, birbirlerininkinden çok farklı olmamakla beraber, z-yönündekine göre çok daha düşük çarpışma kuvvetlerine sahip olmuştur. Sıkışma miktarlarında ise 3 yön arasında büyük farklar oluşmamıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark, sıkışma miktarlarında belirgin olmuştur. Bunun, deneysel çalışmadakine kıyasla, nümerik çalışmada tanımlanan malzeme modelinin daha gevrek davranış göstererek hasar sonucu daha fazla sıkışma gerçekleştirmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Düzlem-içi deformasyonda (x ve y), çarpışmanın başlangıcında yerel deformasyon bölgeleri oluşmuş, ardından bu bölgelerde burkulma meydana gelmiş, son olarak ezilme devam ederek deformasyon tamamlanmıştır. Ezilme sırasında, hücrelerde kırılmalar oluşmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya TÜBİTAK BİDEB 2209-A - Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Proje No: 1919B011900797) kapsamında destek sağlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Meriç D., Gedikli H., Numerical investigation of energy absorption behaviors of variable thickness tubes,

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (4), 1939-1956, 2020.

2. Gibson L.J., Ashby M.F., Cellular solids: Structure and properties, Cambridge University Press, Cambridge, 2014.
3. Gibson L.J., Ashby M.F., Schajer G.S., Robertson C.I., The mechanics of two dimensional cellular materials, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 382, 25-42, 1982.
4. Evans K.E., Nkansah M.A., Hutchinson I.J., Rogers S.C., Nature, Molecular network design, 353, 124, 1991.
5. Grima J.N., Gatt R., Ravirala N., Alderson A., Evans K.E., Negative Poisson's ratios in cellular foam materials. Materials Science and Engineering A., 423, 214-218, 2006.
6. Mir M., Ali M.N., Sami J., Ansar U., Review of mechanics and applications of auxetic structures, Advances in Materials Science and Engineering, 2014.
7. Bhullar S. K., Three decades of auxetic polymers: A review. e-Polymers, 15 (4), 205-215, 2015.
8. Carneiro V. H., Meireles J., Puga H., Auxetic materials-A review, Materials Science-Poland, 31 (4), 561-571, 2013.
9. Underhill R. S., Defense Applications of auxetic materials, DSIAC Journal, 1, 1, 2014.
10. Duncan O., Shepherd T., Moroney C., Foster L., Venkatraman P. D., Winwood K., Allen T., Alderson A., Review of auxetic materials for sports applications: Expanding options in comfort and protection, Applied Sciences, 8 (6), 941-973, 2018.
11. 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 and Design, 182, 108036, 2019.
12. Tatlier M.S., A numerical study on energy absorption of reentrant honeycomb structures with variable alignment, International Journal of Crashworthiness, 2019.
13. Hou X., Deng Z., Zhang K., Dynamic crushing strength analysis of auxetic honeycombs, Acta Mechanica Solida Sinica, 29, 5, 2016.
14. Qiang, G.C., Gao, Q., Wang, L., Dynamic crushing behaviors of four kinds of auxetic structures, SAE Technical Paper, 2019.
15. Li D., Yin J., Dong L., Lakes R. S., Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson's ratio, Journal of Materials Science, 53, 3493-3499, 2018.
16. Warmuth F., Osmanlic F., Adler L., Lodes M.A., Körner C., Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via electron beam melting selective, Smart Materials and Structures, 26, 2017.
17. Gao Q., Ge C., Zhuang W., Wang L., Ma Z., Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading, Materials and Design, 161, 22-34, 2019.
18. Evlen H., Erel G., Yılmaz E., Açık ve kapalı sistemlerde doluluk oranının parça mukavemetine etkisinin incelenmesi, Politeknik Dergisi, 21 (3), 651-662, 2018.
19. Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic

- composites by fused deposition modelling: Effect of fiber content and process parameters on mechanical properties Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 663-674, 2019.
- 20.** Louche H., Piette-Coudol F., Arrieux R., Issartel J., An experimental and modeling study of the thermomechanical behavior of an ABS polymer structural component during an impact test, International Journal of Impact Engineering, 36 (6), 847-861, 2009.
- 21.** Kucewicz M., Baranowski P., Malachowski J., Poplawski A., Platek P., Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures, Materials and Design, 142, 177–189, 2018.
- 22.** Paul A., Ramamurty U., Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam, Materials Science and Engineering A, 281, 1-7, 2000.

