



## Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer

Serdar Kaveloğlu<sup>1\*</sup>, Şemsettin Temiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Machinery and Metal Technologies, Vocational School of Technical Sciences, Kahramanmaraş Sütçü Imam University, 46040, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, İnönü University, 44280, Malatya, Türkiye

### Highlights:

- Low-velocity impact test samples production with additive manufacturing (AM) method in 3D printer
- Impact tests for polymer materials
- Effect of cell width and cell wall thickness on impact strength

### Keywords:

- Honeycomb
- Sandwich composite
- Low speed impact
- 3D printer

### Article Info:

Research Article  
Received: 08.09.2022  
Accepted: 12.01.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1172545

### Acknowledgement:

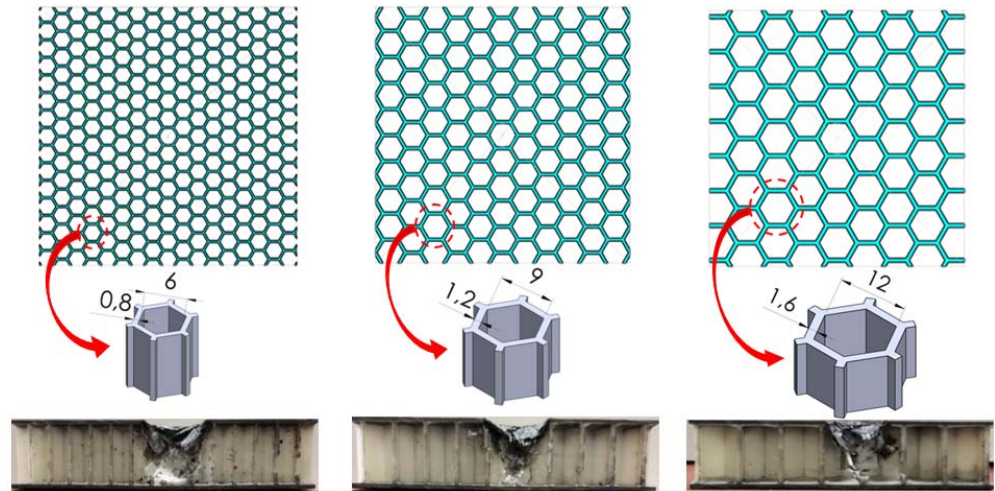
The consumables used in this study were provided by Inonu University within the scope of the project numbered FDK-2020-2349. We would like to thank Inonu University for their valuable contributions.

### Correspondence:

Author: Serdar Kaveloğlu  
e-mail: skaveloglu@ksu.edu.tr  
phone: +90 344 300 2519

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the low-velocity impact performances of sandwich composites in honeycomb geometry with three different cell widths and cell wall thicknesses but close surface areas were investigated. Three different cell width and cell wall thickness sizes of the core produced in the 3D printer and the cross-sectional views of the samples after the impact test are shown in Figure A.



**Figure A.** Three honeycomb cell widths and cell wall thicknesses used in the study and cross-sectional views of the samples after the impact test

### Purpose:

The main aim of this study is to reveal the effects of different cell widths with similar surface areas on the low-velocity impact behavior of 3D printed sandwich composite test specimens.

### Theory and Methods:

The cores of the sandwich composites were produced using a 3D printer using the additive manufacturing method. The tests of the samples were carried out according to the ASTM D7766 impact test standard by bonding the cores with CFRP plates. Impact behavior of samples with different cell widths at impact energies of 30J, 40J, 60J, 80J and 100J were presented with graphics and figures.

### Results:

In the impact tests, as the impact energy increased, the damage height in the samples increased. While the striker perforated the top surface at 60J impact energy and damaged the core, it only damaged the bottom surface at 80J impact energy. At 100J impact energy, it completely perforated the sample.

### Conclusion:

The behavior of the test samples produced in the 3D printer against five different impacts was determined.



## 3 Boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe performanslarının araştırılması

Serdar Kaveloğlu<sup>1\*</sup>, Şemsettin Temiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 46040, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 44280, Battalgazi, Malatya, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- 3B yazıcıda eklemeli imalat (Eİ) yöntemi ile düşük hızda darbe test numunelerinin üretimi
- Polimer malzemeler için darbe testleri
- Hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığının darbe dayanımına etkisi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.09.2022

Kabul: 12.01.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1172545

### Anahtar Kelimeler:

Bal peteği,  
sandviç kompozit,  
düşük hızda darbe,  
3 boyutlu yazıcı

### ÖZ

Bal peteği sandviç kompozitler birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sandviç kompozitlerin kullanım amaçlarına uygun karşılaşılabileceği düşük hızdaki darbelerden kaynaklanan darbe dayanımlarının tespit edilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığındaki bal peteği geometrileri kullanılarak 3 boyutlu yazıcıda polilaktik asit (PLA) filamentten üretilen çekirdeklerin alt ve üst yüzeyleri karbon fiber takviyeli kompozit plakalarla (CFRP) yapıştırıcı ile birleştirilen sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe performansları araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığı sırasıyla 6\_0,8mm, 9\_1,2mm ve 12\_1,6mm ölçülerindeki bal peteği geometrileri kullanılmıştır. Düşük hızda darbeye maruz bırakılan numunelerde eşit yüzey alanı elde etmek amacıyla hem hücre genişliği hem de hücre duvar kalınlıkları artırılarak bu ölçüler tercih edilmiştir. Her bir geometrideki ölçülerde üretilen bal peteği sandviç kompozit numunelere beş farklı enerji seviyelerinde (30J, 40J, 60J, 80J ve 100J) düşük hızda darbe testleri uygulanmış, 100J darbe enerjisinde sandviç kompozitler tamamen delinmiştir. 30J, 40J ve 60J darbe enerji seviyelerinde hücre genişliği en küçük ve hücre sayısı en fazla olan 6mm hücre genişliğindeki sandviç yapılar darbeye karşı daha iyi performans göstermiştir. Artan darbe enerjisiyle birlikte 80J ve 100J enerji seviyelerinde üç farklı hücre genişliğindeki sandviç yapılar darbeye karşı benzer performans gösterdiği tespit edilmiştir.

## Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer

### H I G H L I G H T S

- Low-velocity impact test samples production with additive manufacturing (AM) method in 3D printer
- Impact tests for polymer materials
- Effect of cell width and cell wall thickness on impact strength

### Article Info

Research Article

Received: 08.09.2022

Accepted: 12.01.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1172545

### Keywords:

Honeycomb,  
sandwich composite,  
low speed impact,  
3D printer

### ABSTRACT

Honeycomb sandwich composites are widely used in many industries. It is important to determine the impact strengths resulting from low-velocity impacts that sandwich composites may encounter in accordance with their intended use. In this study, the low-velocity impact performance of sandwich composites, which are combined with carbon fiber reinforced composite plates (CFRP) on the top and bottom surfaces of the cores produced from polylactic acid (PLA) filament in 3D printer, using honeycomb geometries with three different cell widths and cell wall thicknesses were investigated. Honeycomb geometries with three different cell widths and cell wall thicknesses of 6\_0.8mm, 9\_1.2mm and 12\_1.6mm, respectively, were used in the study. In order to obtain equal surface area in samples exposed to low-velocity impact, these measurements were preferred by increasing both cell width and cell wall thickness. Low-velocity impact tests at five different energy levels (30J, 40J, 60J, 80J and 100J) were applied to honeycomb sandwich composite samples produced in dimensions in each geometry, and the sandwich composites were full perforated at 100J impact energy. Sandwich structures with the smallest cell width and the highest number of cells with 6mm cell width showed better performance against impact at 30J, 40J and 60J impact energy levels. With increasing impact energy, sandwich structures with three different cell widths at 80J and 100J energy levels were found to have similar performance against impact.

## 1. Giriş (Introduction)

Sandviç kompozitler yüksek dayanım, rijitlik, termal ve ses yalıtımı, iyi darbe direnci, enerji absorbe kabiliyeti, hafiflik ve korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptir [1-3]. Bu yüzden sandviç kompozitler havacılık, otomotiv, savunma ve ambalaj sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [4-7]. Sandviç yapılar kullanılmaları göre darbeleri yüklerle maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden muhtemel olabilecek hasarların önceden bilinmesi önemlidir. Araştırmacılar sandviç yapıların darbe dayanımlarını belirlemek için Charpy [8, 9], Izod [10] ve düşük hızda darbe (drop weight) [11-13] gibi yöntemler kullanmışlardır. Bu yöntemler içerisinde sandviç kompozitler için en yaygın kullanılan yöntem düşük hızda darbe deneyidir. Çünkü Izod ve Charpy test metodlarında darbe sınırları belirli iken düşük hızda darbe deneyinde numuneye çarpma hızı ve darbe enerjisi değiştirilebilir ve numuneye saplanma, delinme, tekrarlı darbe testleri yapma imkânı vermektedir [14]. Düşük hızda darbe deneyi gerçek darbe koşullarına en yakın benzerlik göstermektedir [13]. Ayrıca düşük hızda darbe testlerinden malzemenin darbeye karşı gösterdiği performansı analiz edebilmek için Charpy ve Izod testlerinin aksine daha fazla veri elde edilmektedir [15]. Sandviç kompozitlerin düşük hızda darbeleri yüklerle karşı gösterdiği darbe cevabı ile enerji sönmülme kabiliyetleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedir [16-18]. Sandviç kompozitlerde hücre tipleri içinde poliüretan köpük düşük darbe enerji dayanımı gerektiren alanlarda hafifliğinden dolayı diğer malzemelere göre tercih edilebilir [19]. 3003 alüminyum alaşımındaki sandviç hücreleri 5J ve 10J enerji ile darbe testleri uygulanarak darbe tepkileri araştırılmıştır [20]. Z-pin ile desteklenmiş köpük sandviç kompozitlerin darbe dayanımları artmıştır, fakat esneklik ve süneklikleri azalmıştır. Ayrıca Z-pin yoğunluğu arttıkça sandviç kompozit darbeye karşı olumlu etki göstermiştir [21]. Bal peteği sandviç kompozitlerin alt ve üst yüzey malzemelerine göre darbe direnci araştırılmıştır. Alüminyum, cam fiber ve karbon fiber takviyeli kompozit plakalar alt ve üst yüzey olarak kullanılmıştır. Kullanılan bütün yüzey malzemeleri için sandviç kompozitlerin yüzey kalınlığı arttıkça darbe dayanımı artmıştır. Kalınlık arttıkça önemli oranda darbe dayanımı artışı yüzde olarak en fazla karbon fiber takviyeli kompozit plakalarda olmuştur [20]. Arslan vd.[22] fonksiyonel olarak kademelendirilmiş metal ve seramik örtülü bal peteği sandviç yapıların düşük hızda darbe yükleri altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Plakaların yüzeyleri metal zengin durumdan seramik zengin duruma geçtikçe yapının rijitliği artmış, en yüksek temas kuvveti artarken temas süresi azalmıştır. Akkuş vd.[23] bal peteği sandviç kompozitlerde çekirdek yüzey arasında saf epoksi ve %1 çok duvarlı karbon nanotüp (mwcnt) katkılı epoksi yapıştırıcı kullanmış karbon nanotüp katkılılar darbe temas kuvvetinde artış sağladığını tespit etmişlerdir. Farklı hücre yüksekliği ile ilgili yapılan çalışmada hücre yüksekliğinin artırılması absorbe edilen enerji ve hasar çapına etkisi olmayıp artan hücre yüksekliğiyle birlikte hasar derinliği artmıştır [20]. Hücre genişliği sabit tutulup hücre yüksekliği artırıldığında darbe kuvvetinde bir artış meydana gelmiştir. Hücre yüksekliği sabit tutulan sandviç kompozitlerde hücre genişliği artırıldığında darbe kuvvetinde azalma olmuştur [23]. Hücre genişliği sabit tutulup hücre duvar kalınlığının azalmasıyla bal peteğinde oluşan plastik deformasyon miktarı ve merkezi çökme değerleri artmış, dolayısıyla yapının darbe dayanımı azalmıştır [22]. Çok katlı sandviç yapılar üzerine de araştırmalar yapılmıştır. Kâğıt ve polyester reçine emdirilmiş kâğıttan dört farklı geometride iki katlı sandviç kompozit üzerinde üç farklı enerji seviyesinde darbe testlerinde ivme ölçer (accelerometer) cihazıyla ivmeleri tespit edilmiştir [24].

Son yıllarda eklemeli imalat yöntemi olarak adlandırılan 3D yazıcı teknolojisini kullanarak üretim ve prototipleme hız kazanmıştır. Eklemeli imalat yöntemi daha az maliyet, zaman, makine parkı ve iş

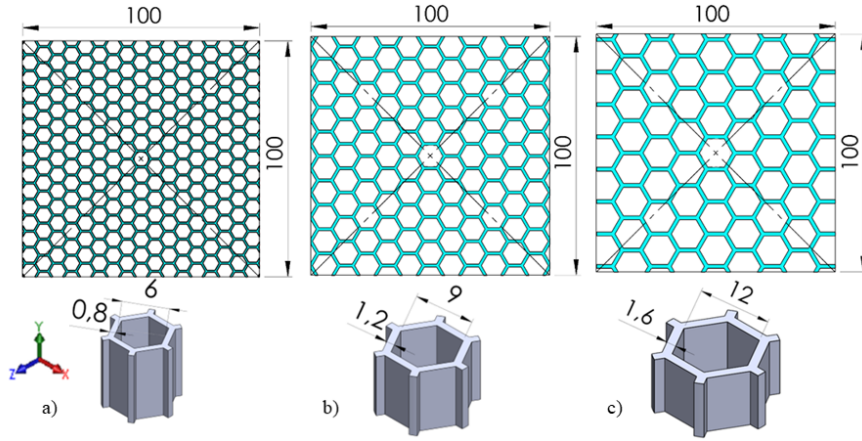
gücü gerektirdiğinden tercih edilmektedir [25]. Ayrıca eklemeli imalat ile kompleks parçaların üretimi kalıp, döküm, enjeksiyon, kesim gibi geleneksel üretim yöntemlerine gerek duyulmadan yapılabilirliği de büyük avantaj sağlamaktadır [26]. 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak PLA [27-29], akrilonitril bütadien stiren (ABS) [30, 31] ve sürekli elyaf takviyeli termoplastik (CFRTP) [32] filamentler kullanılarak üretilen sandviç kompozitlerin basma [28], eğme [32-34] ve darbe dayanımları [19, 35, 36] gibi mekanik özelliklerinin tespiti ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Sandviç kompozitlerin çekirdeklerini 3 boyutlu yazıcıda üreterek darbe dayanımlarını araştıran Usta vd.[19] auxetic (negatif poisson oranına sahip) ve auxetic olmayan prizmatik yapılarda küçük enerjili (10J) darbe testleri uygulamışlardır. Auxetic olmayan çekirdekler daha geniş temas yüzeyi ve hücrenin daha yüksek kalınlığı sayesinde daha fazla darbe direnci ve enerji emme kapasitesi sağladığını tespit etmişlerdir. Özen vd.[35] ABS filament kullanarak 3 boyutlu yazıcıda bal peteği ve girintili (reentrant) geometri çekirdekleri CFRP plakaları yapıştırarak kompozit sandviç yapı üretmişlerdir. Numunelere x-y eksen (in-plane) ve z eksen (out-of-plane) doğrultularında 20J, 40J ve 70J darbe enerjilerinde test uygulamışlar, x-y doğrultusunda girintili çekirdekli numunelerde en iyi darbe dayanımı elde etmişlerdir. Gülçimen vd.[36] ABS filamentten auxetic bal peteği geometrisinde ekstrüzyon ile ürettiği numunelerin deneysel ve nümerik darbe dayanımları üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Elde edilen deneysel ve nümerik bulguların birbiriyle uyumlu ve numunelerin z eksen doğrultusunda darbeye karşı daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, sandviç kompozit yapılara 30J, 40J, 60J, 80J ve 100J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi uygulanmıştır. 3 boyutlu yazıcı kullanılarak PLA filamentten üretilen 10mm kalınlıktaki bal peteği geometri yapılar çekirdek olarak kullanılmıştır. Yüzey malzemesi olarak kullanılan 1mm kalınlıktaki CFRP plakalar çekirdekle yapıştırılarak sandviç kompozitler üretilmiştir. Literatürde sadece hücre genişliği veya sadece hücre duvar kalınlığı değiştirilerek yapılan çalışmalar mevcuttur. Bizim çalışmamızda ise literatürden farklı olarak hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığı ikisi birlikte değiştirilerek birbirine yakın yüzey alanlarındaki üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin darbe performansları araştırılmıştır. Darbe testleri sonucunda temas kuvveti-çökme ve enerji-zaman grafikleri çıkartılmıştır. Hücre genişliği, hücre duvar kalınlığı ile hücre sayısının enerji absorbe etme kabiliyeti üzerindeki etkileri ve numunelerde meydana gelen hasar tipleri incelenmiştir.

## 2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmada üç farklı hücre genişliği ve hücre duvar kalınlığına sahip, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen darbe test numunelerinin darbe dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Darbe numunelerinin boyutları ASTM D7766 [37] standardına göre eni ve boyu 100x100 mm belirlenmiştir. Şekil 1'de bir bal peteği levhasından 100x100 mm'lik karenin köşegenlerinin kesişim noktası, bir peteğin iç teğet daire merkezi kabul edilerek numunelerin tasarımı yapılmıştır. Hücre genişliği 6mm'den 12mm'ye genişletildiğinde hücre sayısının azaldığı Şekil 1'de görülmektedir. Hücre genişlikleri 6mm, 9mm ve 12mm hücre duvar kalınlıkları sırasıyla 0,8mm, 1,2mm ve 1,6mm olan 3 farklı geometride SOLIDWORKS® 2018 Computer Aided Design (CAD) yazılımı kullanılarak darbe numunelerinin tasarımı yapılmıştır.

Hücre genişlikleri artırıldığında, eşit yüzey alanı elde etmek için hücre duvar kalınlıkları artırılmıştır. 3 boyutlu yazıcıda nozul çapı 0,4mm kullanıldığından hücre duvar kalınlıkları 0,4'ün katları şeklinde artırılmıştır. Tasarımı yapılan geometrilerin yüzey alanları SOLIDWORKS® 2018 programında ölçülmüştür. Tablo 1'de üç



**Şekil 1.** Üç farklı hücre genişliğinde bal peteği darbe numunelerinin boyutlarının Solidworks® 2018 programındaki görüntüleri a. Hücre genişliği 6mm b. Hücre genişliği 9mm c. Hücre genişliği 12mm (Images of the dimensions of honeycomb impact samples in three different cell widths in Solidworks® 2018 program a) Cell width 6mm b) Cell width 9mm c) Cell width 12mm)

farklı hücre genişliğine sahip darbe numunelerinin yüzey alanları ile yüzey alanlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** Eni ve boyu 100x100 mm ölçülerindeki darbe numunelerin yüzey alan tablosu  
(Surface area table of impact specimens with width and length 100x100 mm)

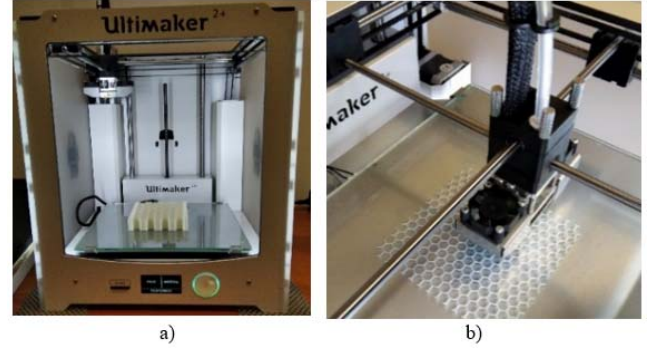
Hücre genişliği (mm)	Hücre duvar kalınlığı (mm)	Hücre yüzey alanı (mm <sup>2</sup> )
6	0,8	2172,7
9	1,2	2248,6
12	1,6	2197,2

Numuneler Şekil 2a ve Şekil 2b'de görülen Ultimaker 2+ [38] 3 boyutlu yazıcı ile üretimini yapabilmek için G-kodlarının oluşturulmasında Ultimaker Cura 4.10.0 [39] CAM yazılımı kullanılmıştır. Tasarımın yazıcı tablası üzerindeki konumu, açısı vb. ayarları yapıldıktan sonra Tablo 2'de belirtilen parametreler seçilerek tasarımın G-kodları oluşturulmuştur.

**Tablo 2.** Ultimaker Cura 4.10.0 CAM yazılımında seçilen parametreler  
(Parameters selected in Ultimaker Cura 4.10.0 CAM software)

Yazıcı	Ultimaker 2+
Malzeme	PLA
Filament çapı	2,85 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	0,8 / 1,2 / 1,6 mm
Üst/Alt kalınlığı	0
Dolgu yoğunluğu	%100
Dolgu deseni	Lines
Yazdırma hızı	60 mm/s
Boşta gezme hızı	150 mm/s
Nozul sıcaklığı	240°C
Tabla sıcaklığı	60°C

Şekil 3a'da yüzey, çekirdek ve yapıştırıcı kısımlardan oluşan sandviç kompozit yapı görülmektedir. Çekirdeklerin üretimine başlamadan önce yazıcının manuel olarak tabla kalibrasyonu yapılmıştır. 3 boyutlu yazıcıya 3dörtgen firmasından [40] tedarik edilen beyaz renkli Ultimaker marka [41] PLA filament takılarak, 20mm yüksekliğinde çekirdek kısımlar üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcının baskı tablası ve nozul sıcaklık değerleri ürün etiketlerinde belirtilen değerlerde yapılmıştır.

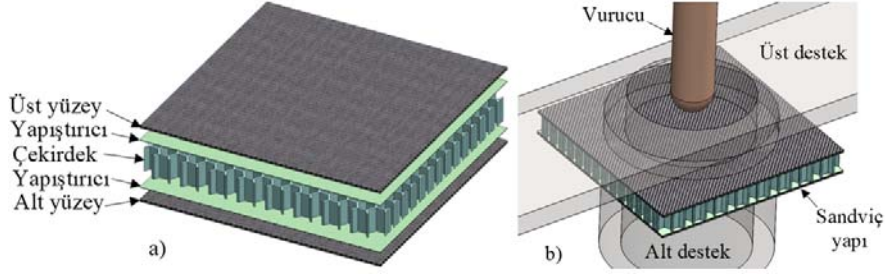


**Şekil 2.** a) Ultimaker 2+ 3 boyutlu yazıcının görüntüsü b) PLA numunenin yazdırma görüntüsü  
(a) Image of Ultimaker 2+ 3d printer b) Print image of PLA sample)

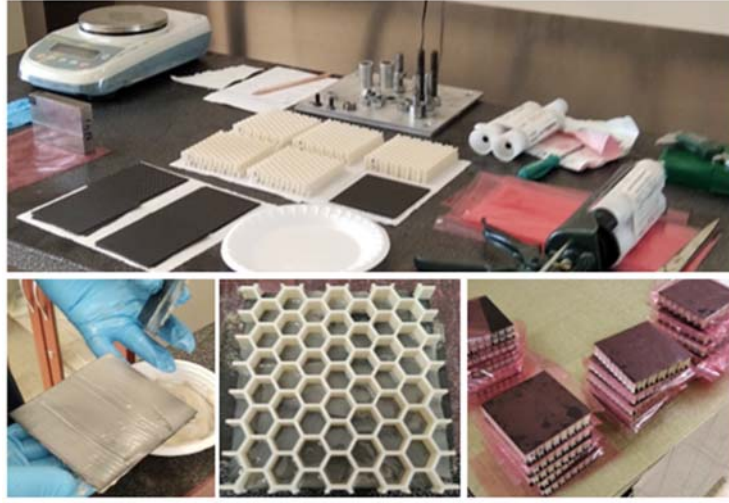
Sandviç kompozit numunelerde yüzey olarak hacimce %50 karbon fiber kumaş içeren 1mm kalınlığındaki CFRP plakalar kullanılmıştır. Kompozit firmasından tedarik edilen Eko tip CFRP plakalar dört katlı serim açısı 0°/90° olan karbon fiber kumaşlar epoksi reçine ile birlikte yüksek basınç altında presle kürlenerek üretilmiştir [42]. Plakalar yapıştırma öncesi 100x100 mm ölçülerinde CNC kesim tezgahında hassas olarak kesimleri yapılmıştır. Şekil 3b'de darbe testi sırasında sabit alt destek ile hareketli üst destek arasında sıkıştırılan numuneye kuvvet uygulayan vurucunun görüntüsü örnek olarak gösterilmiştir.

3 boyutlu yazıcıda üretilen çekirdekler ile CFRP plakaların yapıştırılmasında Şekil 4'de yapıştırma aşamaları görülen çift bileşenli epoksi esası Araldite® 2015 yapıştırıcı [43] kullanılmıştır. CFRP plakalara spatula yardımıyla yapıştırıcı sürülmüş ve malzemeler birbirinin üzerine koyulmak suretiyle yapıştırılmıştır. Birleştirilen sandviç yapılar yapıştırıcının kürlenmesi için 0,5 MPa basınçta 24 saat süreyle bekletilmiştir. Çekirdek yüksekliği 20mm 1'er mm alt ve üst yüzey kalınlığı ile birlikte darbe numuneleri toplam 22mm yüksekliğine sahiptir. KERN PLS 6200-2A (kapasite: 6.200g, hassasiyet: 0,01g) hassas teraziyle yapıştırma öncesi ve sonrası her bir numune için ayrı ayrı çekirdek ve CFRP plakaların kütle ölçümleri yapılmıştır. Yapıştırma ve kürlenme sonrasında numunelerin toplam kütlesi ölçülerek kullanılan yapıştırıcı miktarı bulunmuştur. SOLIDWORKS® 2018 programında çekirdekler için hacim değerleri kullanılarak sandviç yapıların yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 3'de gösterilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda PLA





**Şekil 3.** a) Sandviç kompozit yapının kısımları b) Darbe testinin şematik gösterimi  
(a) Parts of the sandwich composite structure b) Schematic representation of the impact test)



**Şekil 4.** Sandviç yapıların yapıştırma aşamalarının görüntüsü (Image of the stages of gluing sandwich structures)

**Tablo 3.** PLA Bal peteği Çekirdekli Sandviç Yapıların Kütle Değerleri  
(Mass Values of PLA Honeycomb Core Sandwich Structures)

Numune Adı	Çekirdek Kütle [g]	Yüzeylerin Kütle [g]	Yapıştırıcının Kütle [g]	Numunenin Toplam Kütle [g]	Numunenin Yoğunluğu [g/cm <sup>3</sup> ]
d6_30J	49,30	32,46	12,68	94,44	1,48
d6_40J	49,41	37,20	6,58	93,19	1,46
d6_60J	49,35	36,70	8,86	94,91	1,48
d6_80J	48,02	35,10	8,15	91,27	1,43
d6_100J	49,28	32,81	8,82	90,91	1,42
d9_30J	52,59	31,87	10,63	95,09	1,46
d9_40J	50,56	35,01	15,27	100,84	1,55
d9_60J	52,69	33,65	9,57	95,91	1,48
d9_80J	50,29	39,83	5,74	95,86	1,48
d9_100J	52,88	33,86	7,57	94,31	1,45
d12_30J	51,13	35,35	10,32	96,80	1,53
d12_40J	51,06	32,85	12,31	96,22	1,52
d12_60J	50,94	39,84	15,64	106,42	1,68
d12_80J	50,85	34,23	14,43	99,51	1,57
d12_100J	49,14	35,69	13,16	97,99	1,54

filamentten üretilen üç farklı hücre genişliğindeki çekirdeklerin kütlelerinin birbirine yakın olduğu tabloda görülmektedir. Üretilen numuneler hücre genişliği (d) ve test yapılacak enerji birimi Joule (J) değeri kodlaması yapılarak adlandırılmıştır.

Düşük hızda darbe testleri, belli bir yükseklikten serbest düşme ile numuneye dik ve merkezlenmiş bir kılavuzlu vurucunun numuneye etkisini ölçen cihazla gerçekleştirilir. Numune teste başlamadan önce pnömomatik sistemle çalışan iki destek arasında sabitlenir. Ağırlık

düşürme kulesinde vurucunun yüksekliği ile çarpma tertibatına ilave kütle eklenerek istenilen darbe enerji seviyesinde testler gerçekleştirilir. Gerinim ölçer (strain gauge) ve lazer yer değiştirme sensörlerinden alınan veriler sinyal kablolarıyla bilgisayara aktarılır, bu veriler yazılım kullanılarak temas kuvveti, emilen ve geri tepme enerjisi, çökme, çarpma hızı ve zaman değerleri excel programına aktarılarak grafikler elde edilir. Düşük hız darbe testleri Şekil 5a'da gösterilen Instron Ceast 9350 [44] test cihazıyla yapılmıştır. Testler Adıyaman Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında ASTM

D7766 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 5b’de numunenin düşük hızda darbe testinde cihazdaki konumu görülmektedir.



**Şekil 5.** a) Instron ceast 9350 darbe test cihazı görüntüsü b) Darbe numunesinin test sırasındaki görüntüsü  
(a) Image of Instron ceast 9350 impact tester b) Image of impact sample during testing

Darbe testlerinde kullanılan parametreler Tablo 4’de gösterilmektedir. Darbe test cihazında yarı küresel uçlu, çapı 20mm vurucu kullanılmıştır. İstenilen enerji düzeyinde darbe testi gerçekleştirmek için Eş. 1 kullanılarak hesap yapılır. Test cihazında vurucunun yüksekliği veya vurucunun kütlesi değiştirilerek istenilen enerji düzeyi belirlenir.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Burada, E darbe enerjisi (J); m vurucunun kütlesi (kg); g yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ); ve h vurucunun düşme yüksekliği (m)’dir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

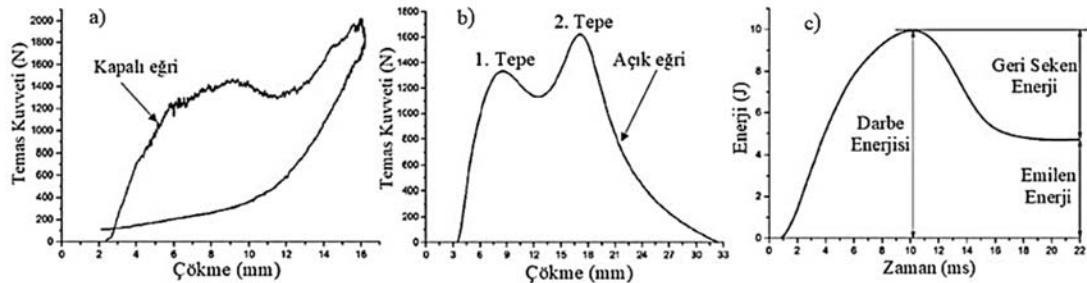
Darbe testleri sonucunda elde edilebilecek muhtemel eğriler [45] Şekil 6’de görülmektedir. Temas kuvveti-çökme eğrilerinin şekli numunenin darbe enerjisine karşı davranışı hakkında bilgi vermektedir. Eğer çökmeye bağlı temas kuvveti en yüksek noktaya ulaşıp sonra başlangıç noktasına doğru değeri ani düşerse Şekil 6a’da gösterildiği üzere kapalı bir şekil olur. Bu eğri vurucunun numuneye hasar verdiği fakat delmediğini ifade etmektedir. Şayet darbe enerjisine karşı birinci en yüksek temas kuvvetine (1. Tepe) ulaşıktan sonra yavaşlayarak değeri düşer, tekrar ikinci en yüksek temas kuvvetine (2. Tepe) ulaşıktan sonra çökme değeri artarak temas kuvveti azalarak düşerse Şekil 6b’de görülen açık eğri olarak adlandırdığımız şekil elde edilir. Burada, vurucu 1. tepedeki çökme değerinde deldiği, daha sonra temas kuvveti azalarak numunenin içerisinde ilerlediği ve 2. tepede tekrar rijit bir bölgeden geçerek deldiği ifade edilmektedir. Şekil 6c’de ise darbe testlerinden elde edilecek tipik bir enerji-zaman eğrisi görülmektedir. Burada belli bir yüksekliğe ve kütleyle sahip vurucunun, yer çekimi sayesinde numuneye uyguladığı darbe enerjisi ile vurucunun numune üzerindeki temas süresi gösterilmektedir. Vurucunun numuneye çarpmasıyla birlikte numunede hasar oluşur ve enerjinin bir kısmı numune tarafından emilir bu enerjiye emilen enerji denilir. Eğer numunenin rijitliği darbe enerjisinden daha büyük ise vurucu geri seker, bu enerji geri seken enerji olarak ifade edilir.

Şekil 7a ve Şekil 7b’de yukarıdan aşağıya doğru 6mm, 9mm ve 12mm hücre genişliğinde sıralanan numunelerin soldan sağa doğru 30J, 40J, 60J, 80J ve 100J darbe enerjilerinde yapılan test sonrası görüntüleri görülmektedir. Şekil 7a’da vurucunun numuneye ilk temas ettiği üst yüzeylerindeki hasarın darbe enerjisi miktarı arttıkça hasarında arttığı görülmektedir. 100J’de vurucu sandviç plakasının içerisinde geçerek alt yüzeyi deldiği Şekil 7b’de görülmektedir.

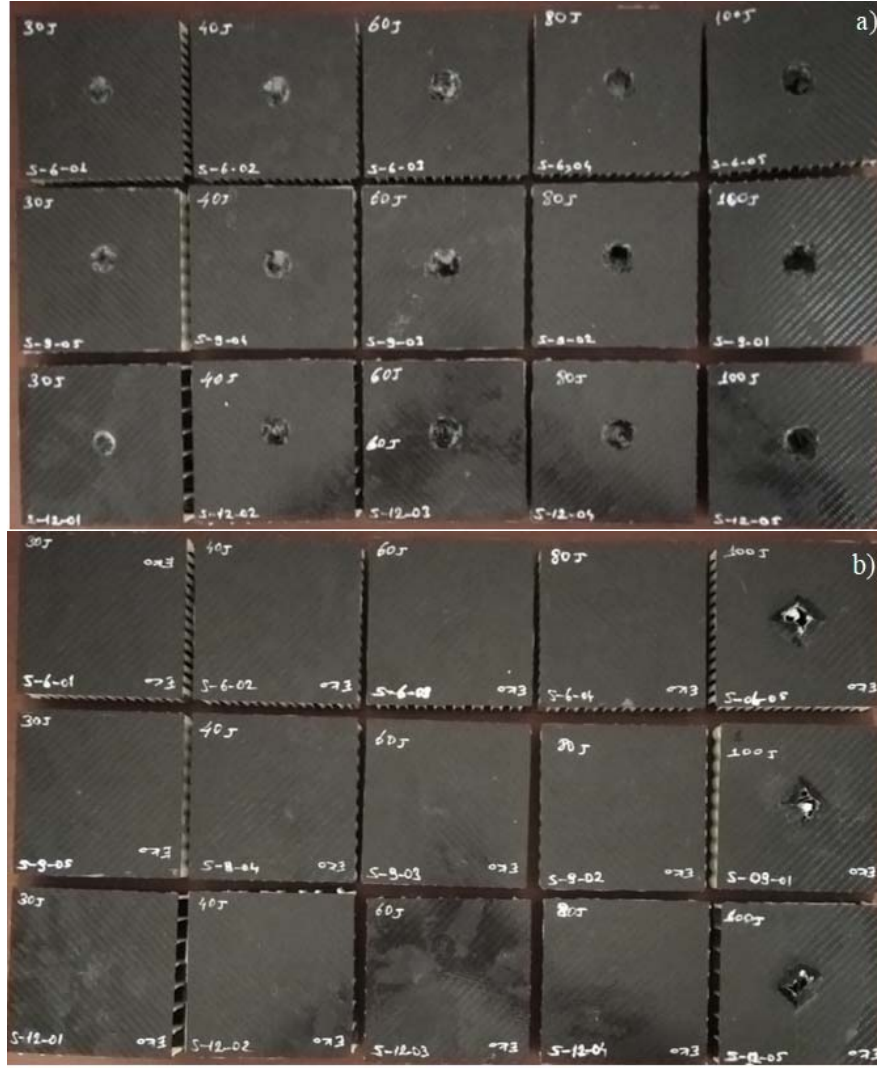
Şekil 8-Şekil 12 arasında beş farklı darbe enerjisindeki testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme ve enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Ayrıca bu şekillerde grafiklerin altında numunelerin ortadan ikiye kesilmiş görüntüleri ile vurucunun temas ettiği kısımların büyütüldüğü resimler mevcuttur. Bu görüntülerde kırmızı renkli elips

**Tablo 4.** Enerji değerlerine göre darbe testi için seçilen parametreler (Parameters Selected for Impact Test According to Energy Values)

Özellik	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Darbe enerjisi (J)	30	40	60	80	100
Vurucunun düşme yüksekliği (m)	0,556	0,742	0,583	0,526	0,658
Vurucunun kütlesi (kg)	5,5	5,5	10,5	15,5	15,5
Numune ölçüleri (mm)	100x100				
Vurucunun tipi ve çapı (mm)	Küresel, 20				
Alt ve üst destek delik çapı (mm)	40				



**Şekil 6.** Düşük hızda darbe testinden elde edilecek muhtemel grafikler a) Delinmemiş bir numunenin tipik temas kuvveti-çökme grafiği b) Delinmiş bir numunenin tipik temas kuvveti-çökme grafiği c) Tipik enerji-zaman grafiği  
(Possible graphs from low-velocity impact test a) Typical contact force-displacement graph of an unpunctured sample b) Typical contact force-displacement graph of a punctured specimen c) Typical energy-time graph)



**Şekil 7.** Hücre genişliği (yukarıdan aşağıya) 6mm, 9mm, 12mm olan sandviç kompozit numunelerin beş farklı (soldan sağa) 30J, 40J, 60J, 80J ve 100J darbe enerjisinde uygulanan darbe testi sonrası görüntüleri a) üst yüzey görüntüleri b) alt yüzey görüntüleri (Images of sandwich composite specimens with cell widths (from top to bottom) of 6mm, 9mm, 12mm after impact testing at five different (from left to right) impact energies of 30J, 40J, 60J, 80J and 100J a) top surface images b) bottom surface images)

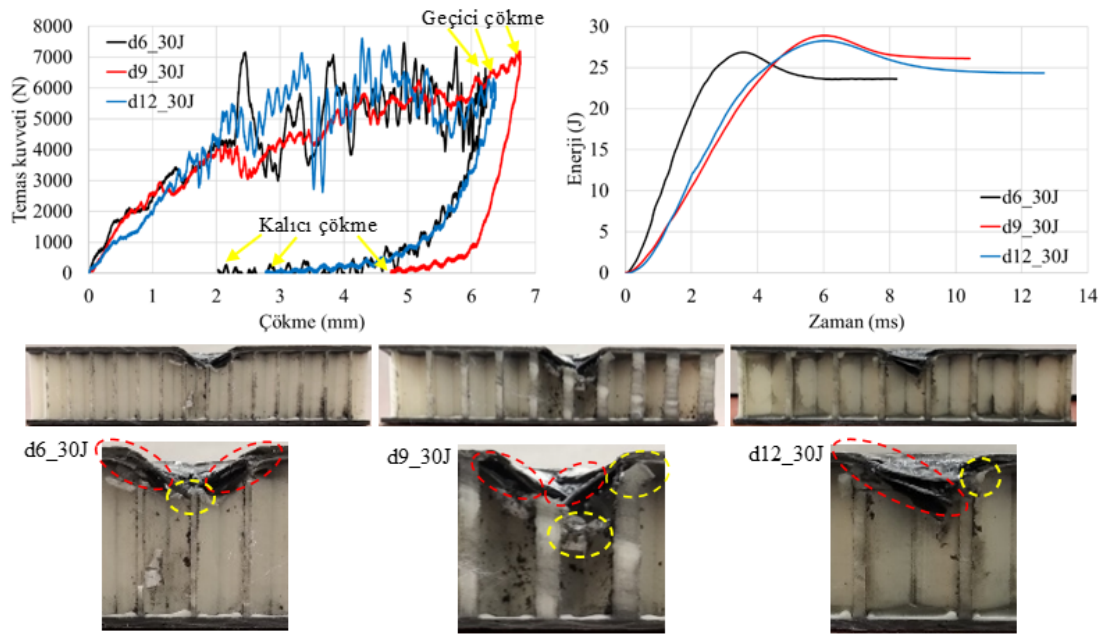
içerisine alınan kısımlar yüzeylerin, sarı renkli elips içerisine alınan kısımlar ise çekirdeklerin uğradığı hasarlar gösterilmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9'da temas kuvveti-çökme grafiklerinde darbenin etkisiyle önce numune içerisinde geçici çökme meydana gelmiş sonra kalıcı çökme görülmüştür. 30J ve 40J darbe enerjilerinde yüzeyde delaminasyon ve kırılma, çekirdekte hasar meydana gelmiştir. Ayrıca 30J ve 40J darbe enerji testlerinde enerjinin bir kısmı numunede emildiği kalan kısmı geri sekme enerjisi olarak ortaya çıktığı enerji-zaman grafiğinde görülmektedir.

Beklenildiği üzere darbe enerjisinin artması, darbe numunelerinin yüzey ve çekirdeklerinin kırılmalarına sebep olmaktadır [46]. 60J darbe enerjisinde vurucu, numunelerin üst yüzeyi delerek numune içerisinde sıkışmıştır. 30J ve 40J darbe enerjilerine göre numunenin çekirdeğinde daha derin hasar olduğu Şekil 10 temas kuvveti-çökme grafiğinde görülmektedir. 60J darbe enerjisinin büyük kısmının numune tarafından emildiği az bir miktar geri tepme enerjisinin olduğu enerji-zaman grafiğinde görülmektedir.

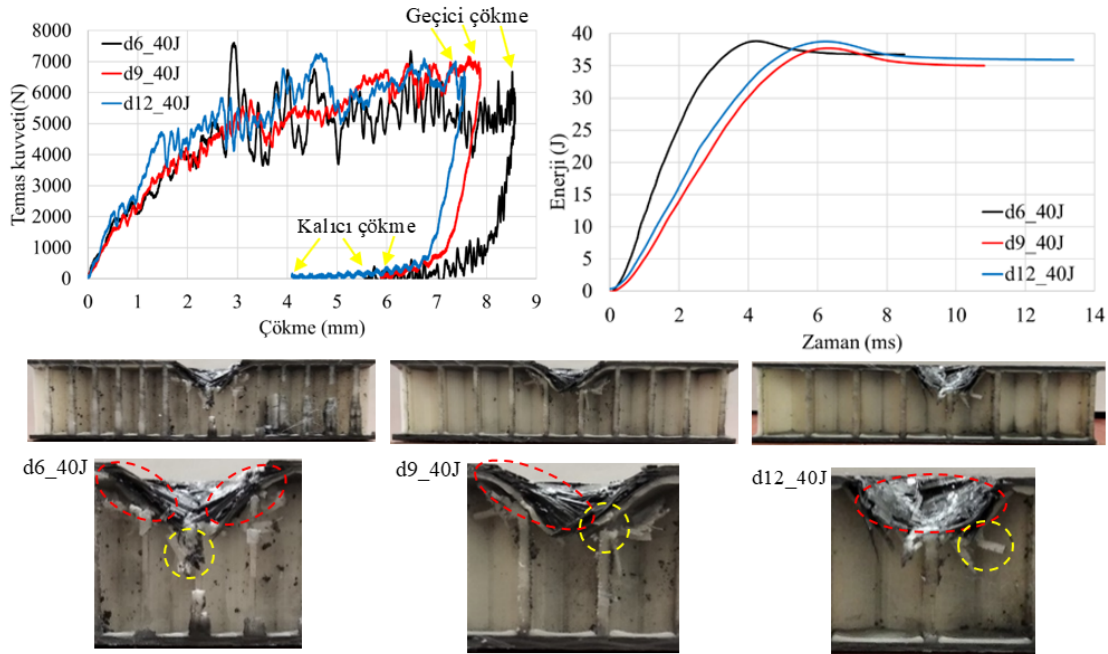
80J darbe enerjisinde vurucu, toplam yüksekliği 22mm olan numunenin üst yüzey ile çekirdeğin tamamıyla birlikte alt yüzeyde de

hasar oluşturduğu Şekil 11'de görülmektedir. 30J, 40J ve 60J darbe enerjilerine ait temas kuvveti-çökme grafiklerinde bir tepe noktası görülürken 80J darbe enerjisine ait Şekil 11 temas kuvveti-çökme grafiğinde vurucu alt yüzeye temas ettiğinden ikinci tepe noktası görülmüştür. Şekil 11 test sonrası numunelerin büyütülmüş resimlerinde alt yüzeylerde delaminasyon hasarının görülmesi bunu doğrulamaktadır. 80J darbe enerjisine ait enerji-zaman grafiğinde üç hücre genişliğinde de benzer davranış gösterdiği darbe enerjisinin tamamının emildiği görülmüştür. 100J darbe enerjisine ait Şekil 12 temas kuvveti-çökme grafiğinde, iki tepe noktası ile çökme miktarının 22mm'den büyük olduğu için numunenin tamamen delindiği görülmektedir. Test sonrası numunelere ait görüntülerde de vurucunun numuneleri 100J darbe enerjisinde deldiği üst, alt yüzey fiberleri ile çekirdeğin kırıldığı Şekil 12'de görülmektedir. Temas kuvveti-çökme grafiğinde üç farklı hücre genişliğine ait eğriler birbirine benzerlik göstermiştir. CFRP plaka ile PLA malzemeyi yapııştırarak ürettiğimiz üç farklı hücre genişliğindeki sandviç yapıların darbe dayanımlarının 80J ve 100J arasında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan testlerde numunelerde yapıştırmayla ilgili problem görülmemiş olup kullanılan yapıştırmacı ve yapıştırma prosesi CFRP plaka ve PLA malzeme için uygun olduğu görülmüştür.





**Şekil 8.** Üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin 30J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme, enerji-zaman grafikleri ile test sonrası hasar görüntüleri  
(Contact force-displacement, energy-time graphs and after the test damage images obtained from tests performed at 30J impact energy of sandwich composites of three different cell widths)

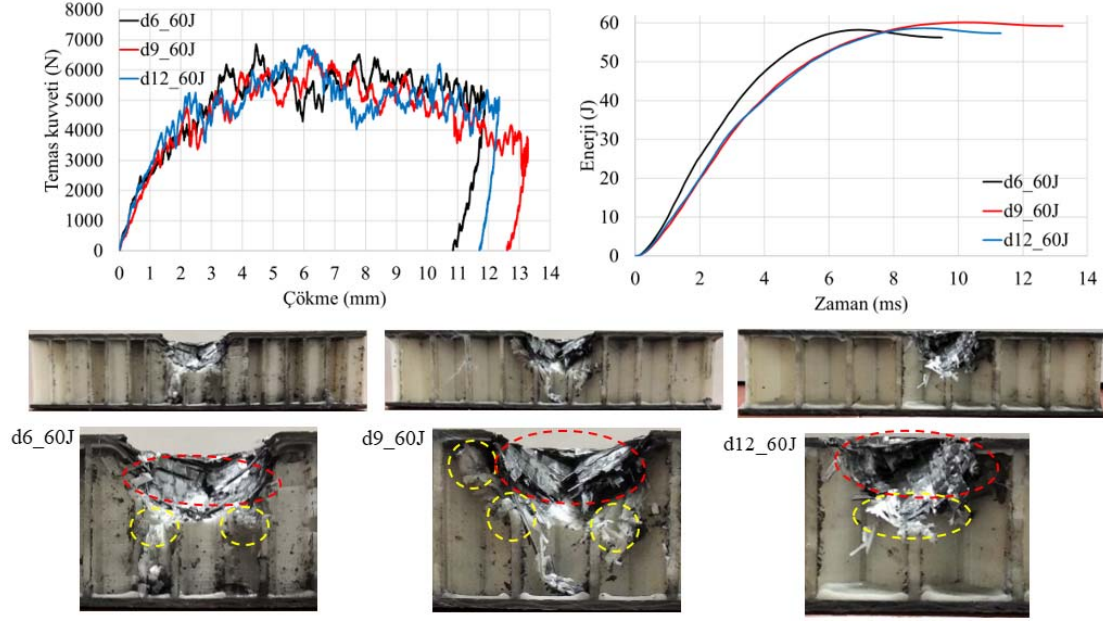


**Şekil 9.** Üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin 40J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme, enerji-zaman grafikleri ile test sonrası hasar görüntüleri  
(Contact force-displacement, energy-time graphs and after the test damage images obtained from tests performed at 40J impact energy of sandwich composites of three different cell widths)

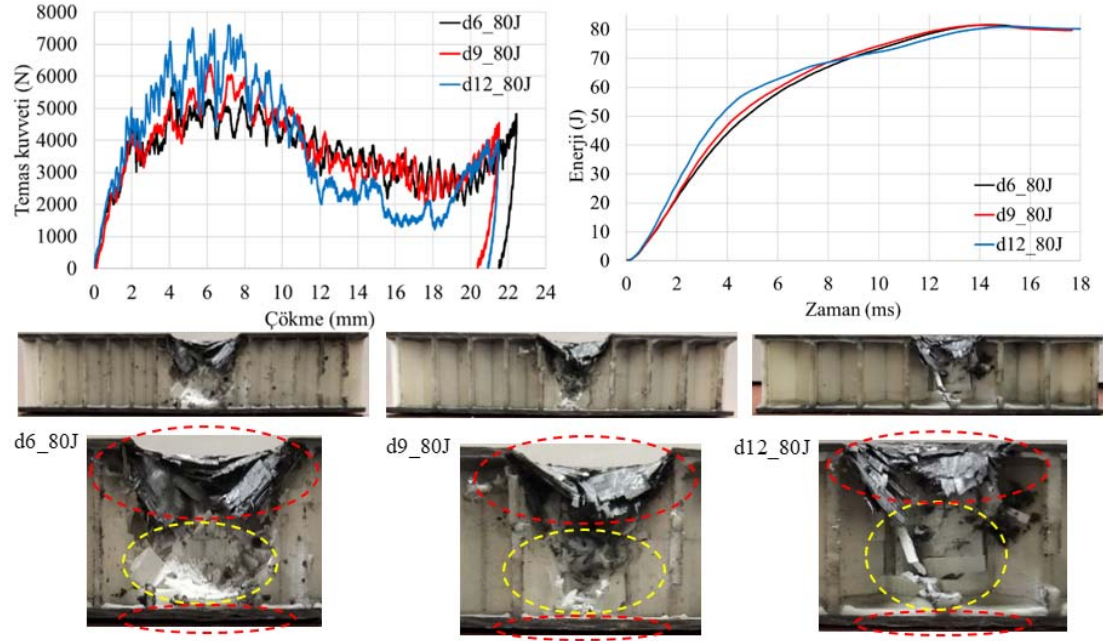
30J, 40J ve 60J darbe enerji seviyelerinde yapılan testlerden elde edilen Şekil 8-Şekil 10 arası grafiklerde 6mm hücre genişliğindeki numunelerde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Hücre genişliği küçük numunelerde hücre duvarlarının birbirine yakın olmasından dolayı yüzey ile çekirdek arasında yapıştırma sıklığı daha fazladır. Bu yüzden 6mm'lik numunelerin rijitliği artmıştır. Rijitliği artan numunelerin en yüksek temas kuvveti artarken temas süresi

azalmıştır [22]. Fakat artan darbe enerji seviyesiyle birlikte 80J ve 100J darbe enerjilerinde numunelerin benzer davranış gösterdiği Şekil 11 ve Şekil 12'de görülmektedir. Literatürde 3 boyutlu yazıcıdan farklı üretim yöntemleriyle yapılmış bal peteği sandviç kompozitlerin darbeye karşı davranışları incelenmiş, PLA filamentten ürettiğimiz sandviç kompozitlere göre farklı hasar türleri görülmüştür. Alüminyum çekirdek ve yüzeye sahip sandviç kompozitlerde farklı





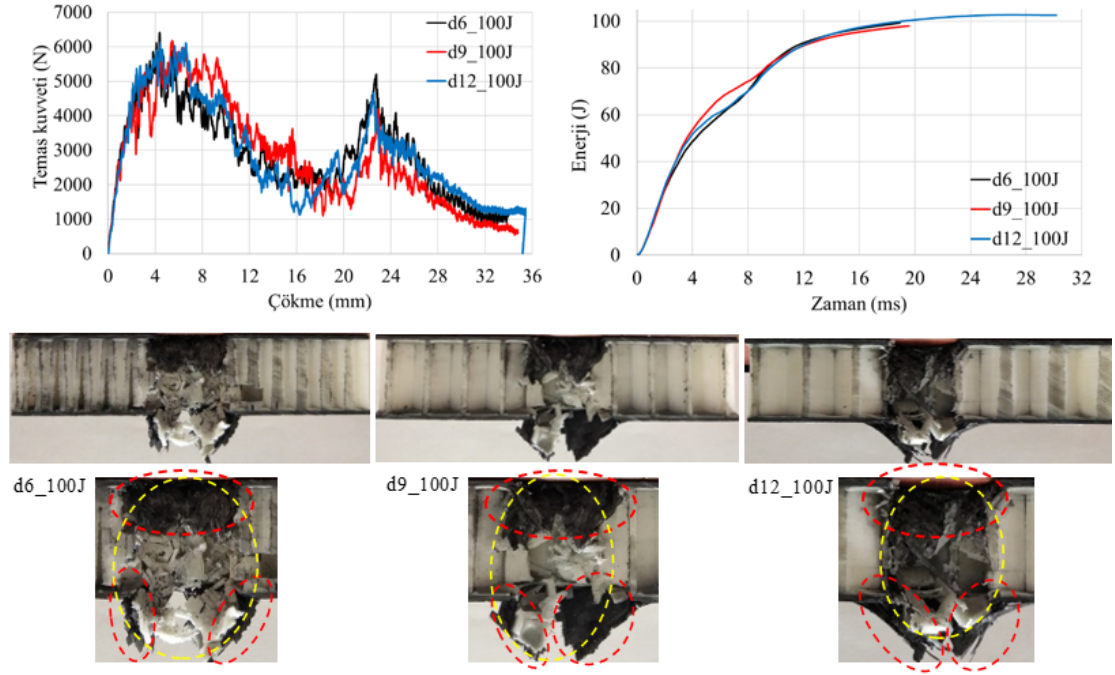
**Şekil 10.** Üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin 60J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme, enerji-zaman grafikleri ile test sonrası hasar görüntüleri  
(Contact force-displacement, energy-time graphs and after the test damage images obtained from tests performed at 60J impact energy of sandwich composites of three different cell widths)



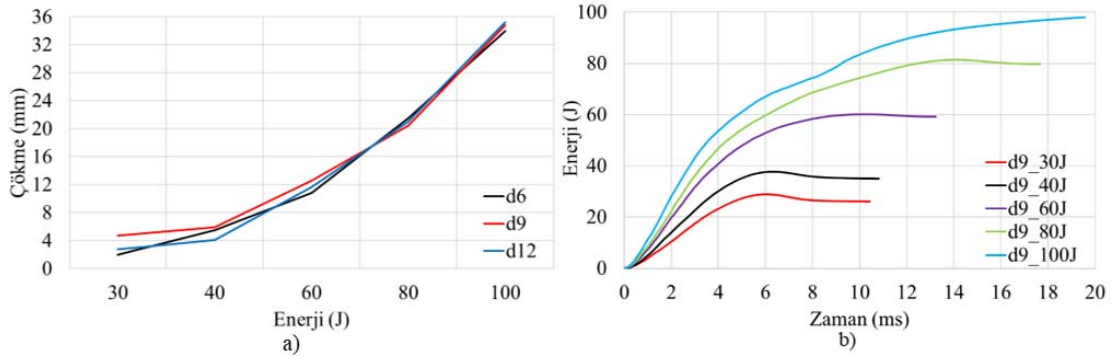
**Şekil 11.** Üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin 80J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme, enerji-zaman grafikleri ile test sonrası hasar görüntüleri  
(Contact force-displacement, energy-time graphs and after the test damage images obtained from tests performed at 80J impact energy of sandwich composites of three different cell widths)

büyükte yapılan darbe testlerinde yüzey ve çekirdek sünek davranarak hasar çapı vurucunun çapından daha büyük çapta çıkmıştır. Ayrıca sandviç yapıda buruşma (wrinkling) ve bombe (bulging) şekli, yüzeyde delinme, çekirdekte yırtılma, burkulma ve ezilme hasarları meydana gelmiştir [20, 23, 47, 48]. CFRP yüzeye ve polivinil klorür (PVC), balsa ve ayous çekirdeğe sahip sandviç

kompozitlerle yapılan darbe testlerinde yüzey ve çekirdeğin birbirinden ayrılması, yüzeyin delaminasyonu ve kırılması, çekirdekte ezilme ve katmanlar arası ayrılma hasarları meydana gelmiştir [49]. 6mm, 9mm ve 12mm hücre genişliğindeki sandviç kompozitlere uygulanan darbe enerjilerine bağlı, elde edilen çökme değerlerinin grafiği Şekil 13a'da gösterilmiştir. Bu grafikte üç hücre genişliğinde



**Şekil 12.** Üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen temas kuvveti-çökme, enerji-zaman grafikleri ile test sonrası hasar görüntüleri  
(Contact force-displacement, energy-time graphs and after the test damage images obtained from tests performed at 100J impact energy of sandwich composites of three different cell widths)



**Şekil 13.** a) Üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin beş farklı darbe enerjilerinde yapılan testlerden elde edilen çökme-enerji grafiği b) 9mm hücre genişliğindeki numuneye ait beş farklı darbe enerjisinde yapılan testlerden elde edilen enerji-zaman grafiği  
(a) Displacement-energy graph of sandwich composites of three different cell widths obtained from tests performed at five different impact energies b) Energy-time graph obtained from tests performed at five different impact energies with 9mm cell wide sample)

de darbe enerjisi arttıkça çökme yüksekliği de artmıştır [20-22]. Ayrıca üç hücre genişliği için eğriler birbirine benzerlik göstermiştir. Bunun sebebi üç hücre genişliğinden büyük olan 20mm çapındaki küresel uçlu vurucunun, numunelerde birbirine yakın hasarlar vermesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 13b'de 9mm hücre genişliğindeki numunenin farklı darbe enerjilerinden elde edilen enerji-zaman grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte darbe enerjisinin artmasıyla vurucunun temas süresinin de arttığı görülmektedir [35].

Beş farklı darbe enerjisinde uygulanan testlerden elde edilen emilen enerji, kalıcı çökme miktarı ve zaman (temas süresi) değerleri Tablo 5'de gösterilmiştir. 6mm hücre genişliğine sahip sandviç kompozitler beş farklı darbe enerjilerinde, vurucunun numuneler üzerindeki temas sürelerinin diğer hücre genişliklerinin temas sürelerinden az olduğu Tablo 5'de görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcıda PLA filament kullanılarak birbirine yakın yüzey alanlarına sahip üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığında bal peteği geometrili yapıların düşük hızda darbe dayanımları deneysel olarak incelenmiş, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 30J, 40J ve 60J darbe enerji seviyelerinde 6mm hücre genişliğine sahip numuneler diğer hücre genişliğine sahip numunelere göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. 6mm hücre genişliğinde 0,8mm hücre duvar kalınlığına sahiptir ve daha çok hücre sayısı mevcuttur. Dolayısıyla hücre duvarlarının birbirine yakın olması CFRP yüzeylerin hücre duvarlarındaki yapıştırma sayılarını artırmış, yüzeylerin daha rijit olmasını sağlamıştır.

**Tablo 5.** Darbe testlerinden elde edilen değerler (Values obtained from impact tests)

Darbe enerjisi (J)	Hücre genişliği ve Hücre duvar kalınlığı (mm)			
	Özellik	d6-0.8	d9-1.2	d12-1.6
30	Emilen enerji (J)	23,6	26,1	24,3
40		36,7	35,0	35,9
60		56,3	59,2	57,5
80		80	80	80
100		100	100	100
30	Çökme (mm)	2,0	4,7	2,8
40		5,5	5,9	4,1
60		10,8	12,6	11,7
80		21,5	20,4	21,0
100		34,0	34,8	35,2
30	Zaman (ms)	8,2	10,4	12,7
40		8,5	10,8	13,4
60		9,5	13,2	11,3
80		17,5	17,7	18,0
100		18,9	19,6	30,2

- 80J darbe enerjisinde vurucu üç farklı hücre genişliğindeki numunelerin üst yüzeylerini ve çekirdeklerini geçip alt yüzeylerine hasar vermesine rağmen üretilen numunelerin 80J darbe enerjisini absorbe edebilme kabiliyetine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Üretilen üç farklı hücre genişliğindeki sandviç kompozitlerin 100J darbe enerjisinde vurucu üst yüzeyleri, çekirdekleri ve alt yüzeyleri kırarak hasar vermiş, numunenin içinden geçerek tamamen delmiştir.
- CFRP plaka ile PLA malzemeyi yapıştırarak ürettiğimiz üç farklı hücre genişliğindeki sandviç yapıların darbe dayanımlarının 80J ila 100J arasında olduğu tespit edilmiştir.
- Darbeye karşı eşit yüzey alanına sahip farklı hücre genişliğindeki bal peteği çekirdekleri arasında en çok hücre sayısına sahip yapılar tercih edilmelidir. Çünkü bu yapılar belli bir darbe enerji seviyesine kadar üstünlük göstermektedir. Ayrıca pratikte farklı çaptaki darbeler, büyük hücre genişliğindeki yapılara göre küçük hücre genişliğindeki yapılara daha az hasar verecektir.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri tarafından Proje no: FDK-2020-2349 ile desteklenmiştir. Değerli katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

#### Kaynaklar (References)

- Zhang G., Wang B., Ma L., Wu L., Pan S., & Yang J., Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels. *Composite Structures*, 108, 304-310, 2014.
- Sharma S. C., Narasimha Murthy H. N., & Krishna M., Low-velocity impact response of polyurethane foam composite sandwich structures. *Journal of reinforced plastics and composites*, 23 (17), 1869-1882, 2004.
- Njuguna J., Michałowski S., Pieliowski K., Kayvantash K., & Walton A. C., Fabrication, characterization and low-velocity impact testing of hybrid sandwich composites with polyurethane/layered silicate foam cores. *Polymer Composites*, 32 (1), 6-13, 2011.
- Alfounh M., Ji J., & Luo Q., Optimal design of multi-cellular cores for sandwich panels under harmonic excitation. *Composite Structures*, 248, 112507, 2020.
- Hosur M. V., Mohammed A. A., Zainuddin S., & Jeelani S., Impact performance of nanophased foam core sandwich composites. *Materials Science and Engineering: A*, 498 (1-2), 100-109, 2008.
- Fatt M. S. H., & Park K. S., Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels-Part A: Deformation. *Composite Structures*, 52 (3-4), 335-351, 2001.
- Caprino G., & Teti R., Impact and post-impact behavior of foam core sandwich structures. *Composite Structures*, 29 (1), 47-55, 1994.
- Chen Q., Du S., Jiang Z., Liu Y., Du R., & Zhao G., Mechanical properties of foam sandwich with chopped-glass-fiber/carbon nanotube reinforced hierarchical structure interlayer. *Polymer Composites*, 41 (8), 3411-3420, 2020.
- Wang Z., Chen Q., Du R., Linghu T., Gao Y., & Zhao G., Influences of dispersion types and area densities of chopped fiber-based interfacial reinforcements on mechanical properties of sandwich structures. *Polymer Composites*, 40 (S1), E449-E455, 2019.
- Hao A., Zhao H., & Chen J. Y., Kenaf/polypropylene nonwoven composites: The influence of manufacturing conditions on mechanical, thermal, and acoustical performance. *Composites Part B: Engineering*, 54, 44-51, 2013.
- Zangana S., Epaarachchi J., Ferdous W., & Leng J., A novel hybridised composite sandwich core with Glass, Kevlar and Zylon fibres- Investigation under low-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 137, 103430, 2020.
- Al-Shamary A. K. J., Karakuzu R., & Özdemir O., Low-velocity impact response of sandwich composites with different foam core configurations. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 18 (6), 754-768, 2016.
- Ude A. U., Ariffin A. K., & Azhari C. H., An experimental investigation on the response of woven natural silk fiber/epoxy sandwich composite panels under low velocity impact. *Fibers and Polymers*, 14 (1), 127-132, 2013.
- Sayer M., Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2009.
- Go S. H., Kim H. G., Shin H. J., Lee M. S., Yoon H. G., & Kwak L. K., The impact fracture behaviors of CFRP/EVA composites by drop-weight impact test. *Carbon letters*, 21, 23-32, 2017.
- Taraghi I., & Fereidoon A., Non-destructive evaluation of damage modes in nanocomposite foam-core sandwich panel subjected to low-velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 103, 51-59, 2016.
- He Y., Tian G., Pan M., & Chen D., Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current. *Composites Part B: Engineering*, 59, 196-203, 2014.
- Wang S. X., Wu L. Z., & Ma L., Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates. *Materials & Design*, 31 (1), 118-125, 2010.
- Usta F., Türkmen H. S., & Scarpa F., Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. *Thin-Walled Structures*, 163, 107738, 2021.
- Topkaya T., & Solmaz M. Y., Investigation of low velocity impact behaviors of honeycomb sandwich composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32 (7), 3161-3167, 2018.
- Kaya G., & Selver E., Impact resistance of Z-pin-reinforced sandwich composites. *Journal of Composite Materials*, 53 (26-27), 3681-3699, 2019.
- Arslan K., Güneş R., Apalak M. K., & Reddy J. N., Fonksiyonel Kademelenendirilmiş Plakalar ile Desteklenmiş Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının İncelenmesi, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Trabzon-Türkiye, 113-122, 24-28 Ağustos, 2015.



23. Akkuş H., Düzçükoğlu H., & Şahin Ö. S., Alüminyum bal peteği yapılarında darbe mukavemeti tahmini için regresyon modeli oluşturulması. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 9 (3), 102-111, 2016.
24. Cormos R., Petrescu H., Hadar A., Adır G. M., & Gheorghiu H., Finite Element Analysis of the Multilayered Honeycomb. *Materiale Plastice*, 54 (1), 180, 2017.
25. Gardan J., Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *Additive Manufacturing Handbook*, Editör: Badiru A. B., Valencia V. V., Liu D., CRC Press, New York, A.B.D., 149-168, 2017.
26. Jiga G. G., Burtoiu M. G., Pascu N. E., & Dobrescu T. G., Behavior of Different PLA Sandwich Structures Loaded in Three Points Bending. In *Macromolecular Symposia*, 396 (1), 2000306, 2021.
27. Lu C., Qi M., Islam S., Chen P., Gao S., Xu Y., & Yang X., Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5 (1), 47-54, 2018.
28. Kaveloğlu S., & Temiz S., An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221122333, 2022.
29. Lascano D., Guillen-Pineda R., Quiles-Carrillo L., Ivorra-Martínez J., Balart R., Montanes N., & Boronat T., Manufacturing and characterization of highly environmentally friendly sandwich composites from polylactide cores and flax-poly lactide faces. *Polymers*, 13 (3), 342, 2021.
30. Ali M. H., & Batai S., Bending behavior of sandwich composite structures of 3D-printed materials. In *Advances in Materials and Manufacturing Engineering*, 281-287, Springer, Singapore, 2020.
31. Brischetto S., Ferro C. G., Torre R., & Maggiore P., 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. *Curved and Layered Structures*, 5 (1), 80-94, 2018.
32. Sugiyama K., Matsuzaki R., Ueda M., Todoroki A., & Hirano Y., 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 114-121, 2018.
33. Li T., & Wang L., Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, 175, 46-57, 2017.
34. Kaveloğlu S., Temiz Ş., Doğan O., & Kamer M. S., 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37 (2), 459-470, 2022.
35. Özen İ., Çava K., Gedikli H., Alver Ü., & Aslan M. Low-energy impact response of composite sandwich panels with thermoplastic honeycomb and reentrant cores. *Thin-Walled Structures*, 156, 106989, 2020.
36. Gülçimen Ç.B., Ensarioğlu C., Kucukakarsu V., Tekin I., Cakir M., 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.
37. ASTM-D7766/D7766M-16, Standard practice for damage resistance testing of sandwich constructions; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2016.
38. The Ultimaker 2+ specifications, <https://support.makerbot.com/s/article/1667337915868>. Güncellenme tarihi Kasım 22, 2022. Erişim tarihi Haziran 25, 2022.
39. Ultimaker Cura 4.10 software, <https://ultimaker.com/learn/an-improved-engineering-workflow-with-ultimaker-cura-4-10>. Güncellenme tarihi Haziran 29, 2021. Erişim tarihi Haziran 25, 2022.
40. 3 dörtgen company, <https://3dortgen.com/>. Yayın tarihi 2022, Erişim tarihi Aralık 14, 2022.
41. Ultimaker PLA technical data sheet <https://makerbot.my.salesforce.com/sfc/p/#j0000000HOnW/a/5b000004UirV/lt4XCk10KOSLlPMcyG06mKKbES33WnYiFrMsG8bFGhw>. Yayın tarihi Nisan 20, 2023. Erişim tarihi Aralık 14, 2022.
42. Kompozitnet company, <https://www.kompozit.net/karbon-fiber-plaka-pro-t-1mm-50cmx50cm>. Erişim tarihi Temmuz 5, 2022.
43. Araldite® 2015, Adhesive technical datasheet. <https://www.bag-distribution.com/Files/108113/153601310146458.pdf>. Yayın tarihi Nisan, 2007. Erişim tarihi Haziran 25, 2022.
44. Instron ceast 9350 drop tower impact system specifications, [https://www.plantautomation-technology.com/products/instron/ceast-9350-drop-tower-impact-system\\_](https://www.plantautomation-technology.com/products/instron/ceast-9350-drop-tower-impact-system_) Güncellenme tarihi 2023. Erişim tarihi Aralık 24, 2022.
45. Geren N., Acer D. C., Uzay C., & Bayramoğlu M. The effect of boron carbide additive on the low-velocity impact properties of low-density foam core composite sandwich structures. *Polymer Composites*, 42 (4), 2037-2049, 2021.
46. Esendemir Ü., & Caner A. Y., Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (1), 207-215, 2018.
47. Sun G., Huo X., Wang H., Hazell P. J., Li Q. On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 216, 108881, 2021.
48. Cho J. U., Choi H. K., Lee S., Cho C., & Han M. S. Experimental study of the impact characteristics of sandwich composites with aluminum honeycomb cores. *International Journal of Automotive Technology*, 14 (3), 415-421, 2013.
49. Dogan A. Low-velocity impact, bending, and compression response of carbon fiber/epoxy-based sandwich composites with different types of core materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23 (6), 1956-1971, 2021.