

3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi

Serdar KAVELOĞLU*¹ ORCID 0000-0003-0157-7314

Şemsettin TEMİZ² ORCID 0000-0002-6737-3720

Oğuz DOĞAN³ ORCID 0000-0003-4203-8237

Muhammed Safa KAMER³ ORCID 0000-0003-3852-1031

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Kahramanmaraş

²İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 15.02.2022

Kabul tarihi: 30.06.2022

Atıf şekli/ How to cite: KAVELOĞLU, S., TEMİZ, Ş., DOĞAN, O., KAMER, M.S., (2022). 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(2), 459-470.

Öz

Bal peteği yapılar günümüzde birçok konstrüksiyon içerisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle bal peteği yapılarından üretilmiş ürünlerin mekanik özelliklerinin araştırılması güncel bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada bal peteği çekirdek yapısına sahip, ABS ve PLA malzemeleri kullanılarak üç boyutlu yazıcı ile üretilen sandviç yapıların eğme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde sandviç yapı içerisindeki, bal peteği çekirdek yapısının hücre çapı değişiminin, eğme mukavemeti üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı hücre çapı için deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir deneyin üç kez tekrar edilmesi ile toplamda on sekiz adet üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Ayrıca deneylerin güvenilirliğinin artırılması amacıyla özel olarak konumlandırma ekipmanı tasarlanmış ve üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda kuvvet – sehim eğrileri elde edilmiştir. PLA malzemedен üretilen numunelerin ABS numunelere göre daha mukavim olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca her iki malzeme için de 9 mm hücre çapına sahip numunelerin en yüksek dayanıma sahip olduğu, 12 mm hücre çapına sahip numunelerin ise en düşük dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat yöntemi, 3B Yazıcı, Eğme testi, Bal peteği yapılar, Farklı hücre çapı, ABS, PLA

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Serdar KAVELOĞLU, skaveloglu@ksu.edu.tr

Investigation of Bending Strength of Honeycomb Sandwich Structures with Different Cell Diameters Produced by 3D Printer

Abstract

Honeycomb structures are frequently used in many constructions today. For this reason, the investigation of the mechanical properties of products produced from honeycomb structures is a current issue. In this study, the bending strengths of sandwich structures with honeycomb core produced with a three-dimensional printer using ABS and PLA materials were experimentally investigated. In the experiments, the effect of the cell diameter change of the honeycomb core on the bending strength was investigated experimentally in the sandwich structures. For this purpose, experiments were carried out for three different cell diameters. A total of eighteen three-point bending tests were applied, with each experiment repeated three times. In addition, positioning equipment has been specially designed and produced to increase the reliability of the experiments. As a result of the experiments carried out, force-elongation curves were obtained. It has been determined that the samples produced from PLA material are more durable than ABS samples. In addition, it was determined that the samples with a cell diameter of 9 mm had the highest strength, while the samples with a cell diameter of 12 mm had the lowest strength for both materials.

Keywords: Additive manufacturing method, 3D printer, Flexural test, Honeycomb structures, Different cell diameters, ABS, PLA

1. GİRİŞ

Bal peteği çekirdekli sandviç plakalar hava, kara ve deniz araçlarında üreticiler için ağırlıktan tasarruf etmesi, dolayısıyla düşük yakıt tüketimi, yüklere maruz kaldıklarında üstün mekanik davranışları, yangın durumunda duman ve zehirli gaz seviyesinin izin verilen seviyenin altında olması, iç gürültü seviyesini azaltması bakımından vazgeçilmez bir yapıdır. Ayrıca bal peteği çekirdekli sandviç yapılar inşa sektöründe kapılarda, kaymaz hafif zemin panellerinde, ambalaj sektöründe hassas cihaz ve iyi korunması gereken elektronik cihazların taşınmasında kullanımı artan bir şekilde kullanılmaktadır.

Bal peteği sandviç kompozit yapılar, hafiflik, darbe dayanımı ile basma dayanımının yüksek olması, üretilen malzemeye bağlı olarak kimyasallara ve suya karşı dayanıklı olması sebebiyle vidalama, delme, ekleme, tamirat gibi birçok kullanım avantajına sahiptir. Bu avantajlarından faydalanılmak üzere otomotiv, hafif ticari araç, yatçılık, hızlı tren, rüzgâr enerjisi, güneş panelleri, beyaz eşya, prefabrik ev, inşaat,

ambalaj, çanta ve bavul sektörlerinde bal peteği sandviç panelleri kullanılmaktadır [1].

Farklı malzemelerden üretilmiş sandviç yapıların mekanik özellikleri literatürde birçok araştırmaya konu olmaktadır. He ve arkadaşları [2] deneysel, sayısal ve teorik yöntemleri birleştirerek, farklı yapısal konfigürasyonlara sahip bal peteği çekirdekli sandviç panellerin eğme mukavemeti üzerindeki darbe kaynaklı hasarın etkilerini araştırmışlardır. Petek çekirdeği, hücre duvarı kalınlığının artırılması veya yan uzunluğunun azaltılması, petek yapılarının darbe dayanımı performansı üzerinde önemli etkilere sahipken, çekirdek yüksekliğinin artırılması pik yük üzerinde çok az etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Najafî ve arkadaşları [3] dört farklı çekirdek geometrisine sahip sandviç yapılarının eğme dayanımlarını deneysel ve nümerik olarak araştırmıştır. Yük-sehim davranışı, enerji emilimi, numunelerin rijitliği ve yük taşıma kapasitesi değerlendirilmiştir. Çekirdek topolojisinin hücresel tasarımı, hata modu ve sandviç kirişlerin enerji absorpsiyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Aslan ve arkadaşları [4] karbon, cam elyaf, alüminyum, polietilen

terafitalat (PET) sert köpük, alüminyum bal peteği ve polietilen (PP) bal peteği çekirdek malzemelerinden oluşan, sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre çekirdek malzemelerin, yüzey malzemelerine göre mekanik özelliklere daha fazla etki ettiği belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda ise biyomimetik entegre petek plakalarda işleme deliklerinin bası [5] ve eğme mukavemeti [6] üzerine olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Tunca ve arkadaşları [7] dışı karbon fiber içi PLA malzemesinden tasarlanan sandviç kompozit plakaların ANSYS ortamında sonlu elemanlar analizini gerçekleştirerek önerilen yeni malzemenin havacılık yapılarında kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Son yıllarda eklemeli imalat yöntemi endüstride giderek daha yaygın kullanım alanları bulmaya başlamış ve birçok araştırmacının da ilgi odağı olmuştur. Eklemeli imalat yönteminde hazırlanan CAD geometrileri, üç boyutlu yazıcılarda katmanlar halinde üretilmektedir. Bu da üretimde karmaşık yapıların kolay bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Ancak üretim adetleri eklemeli imalatta oldukça düşük sayılarda olmaktadır. Yine de literatür incelendiğinde eklemeli üretimde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi üzerine birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Öztürk [8] 3 boyutlu yazıcı ile üretilen dört farklı kompozit sandviç yapının statik ve dinamik yük altında davranışlarını incelemiştir. Sandviç yapılar Bal peteği, Girintili, Yıldız ve Üçgen olarak tasarlanmıştır. Basma, üç nokta eğme ve çarpışma testleri yapılan modellerden Girintili sandviç yapı en iyi mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Kamer ve arkadaşları [9,10] çok farklı üretim parametreleri altında 3D yazıcıda üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Yapılan testlerde filament renginin çekme numunelerinin mekanik özelliklerine kayda değer etkisinin olmadığı, kullanılan dolgu desenleri arasında Concentric dolgu deseninin en iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Yine bir başka çalışmada ise eğme test numunelerinin mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan üç nokta eğme testlerinde PLA

malzemenin eğme dayanımının ABS malzemenin üstün olduğu, dolgu deseninin eğme dayanımını önemli oranda değiştirdiği tespit edilmiştir [11]. Bal peteği sandviç yapıların üretiminde son yıllarda eklemeli imalat yöntemi de kullanılmaya yaygın olarak başlanmıştır. Buna paralel olarak üç boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilen bal peteği sandviç yapıların mekanik özellikleri üzerine literatürde birçok yeni çalışmanın olduğu görülmüştür. Pirouzfâr ve arkadaşları [12] eklemeli imalat ile üretilen petek çekirdekli ve E-cam/epoksi yüzeyli sandviç yapıların eğme özelliklerine geometrik parametrelerin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bal peteği yapılar için 1-1,5-2 mm olmak üzere üç hücre duvar kalınlığı ile bal peteğini yatay ve dikey olarak ele almışlardır. Deneyler sonucunda 1,5 mm et kalınlığına sahip yatay bal peteği çekirdekten oluşan yapının maksimum normalize edilmiş enerji absorpsiyonuna sahip olduğunu göstermişler. Ayrıca gerçekleştirilen deneyler sonlu elemanlar yöntemi ile tekrarlanarak deneylerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Cheng ve arkadaşları [13] 3D printer ile yazdırılmış hafif petek kompozitlerin hata ve geri kazanım mekanizmalarını deneysel olarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sayesinde, 3D baskılı kompozit yapıların gelişmiş mekanik performansını ve ısı uyarısı altında yeniden aynı şekle gelme yetenekleri gösterilmiştir. Ghanbari-Ghazijahani ve arkadaşları [14] üç nokta eğme testi altında 3D baskılı kompozit kirişlerin tasarımını, imalatını ve yapısal testlerini incelemişlerdir. Farklı malzeme bileşimlerine ve baskı yoğunluklarına sahip kirişler tasarlanmış, basılmış ve test edilmiştir. Tüm numunelerde dolgu yoğunluğunun eğme kapasitesini etkilediği tespit edilmiştir. Kirişlerin üst ve alt kısımlarında PLA+ bulunan numunelerin yük taşıma kapasitesi, ahşap flanşlı eşdeğer kirişlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Zeng ve arkadaşları [15] eklemeli imalat yöntemiyle PLA filamentle sürekli karbon fiberi birlikte kullanarak bal peteği sandviç yapıların basma yükü altında davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan testlerden sürekli karbon fiber takviyeli bal peteği kompozitlerin hafif akıllı sistemler ve enerji emici cihazlarda kullanılabileceğini göstermişlerdir. Dou ve arkadaşları [16] sürekli karbon fiber takviyeli PLA

bal peteği yapılar ile sadece PLA filamentten üretilen bal peteği yapıların darbe dayanımlarını incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre sürekli karbon fiber takviyeli bal peteği yapıların darbe kuvveti ve absorbe edilen enerji miktarı, sadece PLA'lı yapılara göre yaklaşık 3-4 katı olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilen farklı hücre çaplarında ve farklı malzemelerden üretilmiş bal peteği çekirdek yapısına sahip eğme numunelerinin üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki birçok çalışmadan farklı olarak, üretilen sandviç numunelerin çekirdek ve yüzey kısımları yapıştırıcı kullanılmadan tek seferde aynı malzemeden üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Deneylerde hem malzeme etkisi hem de çekirdek hücre çapının eğme dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Her bir deney üç kez tekrar edilmekle birlikte toplamda on sekiz adet üç nokta

eğme testi gerçekleştirilmiştir. Testlerde konumlandırma hatasının en aza indirilmesi için özel olarak bu testlere özgün kullanılacak konumlandırma aparatı tasarlanmış, üretilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda kuvvet – sehim eğrileri elde edilerek yorumlanmıştır.

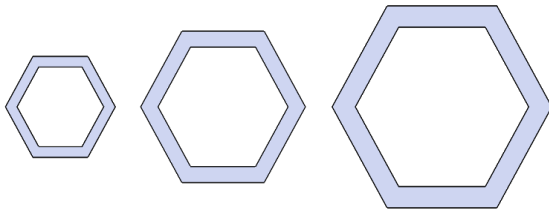
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi ile Bal Peteği Yapılarının Üretimi

Bu çalışmada üç boyutlu yazıcı ile farklı malzemelerden üretilen farklı hücre çaplarına sahip bal peteği yapılarının eğme dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Üretilen test numuneleri farklı çaplarda ancak kıyaslama yapılabilmesi için yaklaşık olarak birbirine eşit yüzey alanına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Çizelge 1. Üretilen test numunelerinin hücre çapı ve duvar kalınlığı değerleri

Hücre çapı D (mm)	Hücre duvar kalınlığı t (mm)	Hücre yüzey alanı (mm ²)
6	0,8	3331,33
9	1,2	3410,18
12	1,6	3221,11

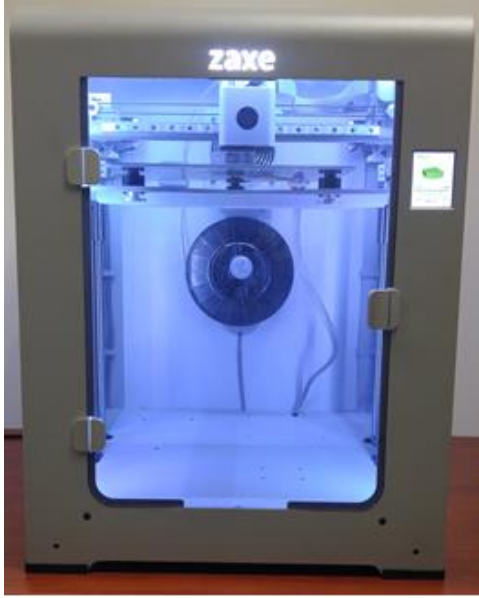


Şekil 1. Farklı hücre çapı ve duvar kalınlıkları için tek bir bal peteği yapısının değişimi

Bu çalışmada kullanılan deney numunelerindeki her bir hücrenin çapı duvar kalınlığı ve buna bağlı olarak elde edilen yüzey alanları Çizelge'1 de gösterilmektedir. Çizelge 1 incelendiğinde 6–9 ve 12 mm hücre çapları için ölçüleri 75 x 200 mm eni ve boyundaki eğme numunelerinin hücre yüzey alanları oldukça birbirine yakın elde edilmiştir. Bu nedenle gerçekleştirilen deneylerde farklı yüzey alanı etkisi en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 1'de eğme test numunelerinin içyapısını oluşturan bal peteği yapılarının birim altıgenlerin boyutsal değişimleri görülmektedir. 6 mm hücre çapına sahip altıgen yapının duvar kalınlığı da çapına oranla küçük iken 12 mm hücre çapına sahip yapının duvar kalınlığının arttığı görülmektedir. Bu nedenle 6 mm hücre çapına sahip deney numunelerinde çok sayıda hücre bulunurken, hücre çapı büyüdükçe eğme test numunesi içerisindeki hücre sayısı da azalmaktadır.

Eğme numuneleri 1,75 mm çaplı filamentlerden üretilmiştir. Bu çalışmada filament türü olarak üç boyutlu yazıcılarda en çok kullanılan PLA ve ABS malzemeleri tercih edilmiştir. PLA numunelerde mavi renkli Filament Dünyası marka, ABS numunelerde ise siyah renkli Esun marka filamentler kullanılmıştır.



Şekil 2. Test numunelerinin üretiminde kullanılan Zaxe Z1 Plus üç boyutlu yazıcısı

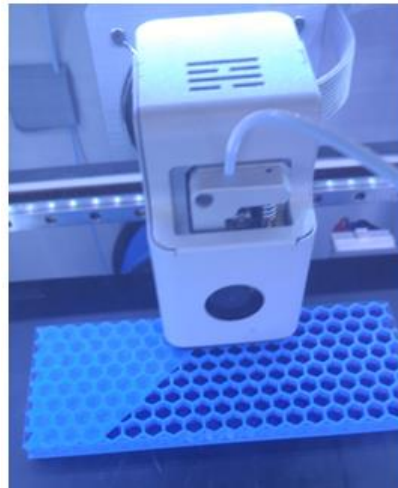
Eğme test numuneleri Zaxe Z1 Plus üç boyutlu yazıcısı kullanılarak üretilmiştir. Yazıcının baskı hacmi X, Y ve Z eksenlerinde sırasıyla 300 mm/300 mm/300 mm olup, 0,4 mm'lik bir nozul kullanılarak, üretim parametreleri, kullanılan malzeme ve parça boyutuna bağlı olarak 50 µm–400 µm arasında hassasiyete sahiptir. Bu çalışmada kullanılan üç boyutlu yazıcının görünümü Şekil 2'de görülmektedir.

Tasarlanan deney numuneleri STL dosya formatına çevrilerek, üç boyutlu yazıcı üretim parametrelerinin belirlenmesi ve G kodlarının oluşturulması için X Desktop CAM yazılımına aktarılmıştır. X Desktop CAM yazılımında belirlenen üretim parametreleri Çizelge 2'de gösterilmektedir. Buna göre her bir test numunesi lines dolgu deseninde ve %100 dolgu yoğunluğu ile üretilmiştir. Ayrıca, numunelerin aynı özelliklerde üretilebilmesi için her bir hücre çapına ait üç farklı G kodu kullanılmıştır. Her bir test numunesi üç boyutlu yazıcı tablasının merkezine konumlandırılmış ve üretilen G kodu her bir numunede ayrı ayrı çalıştırılarak numunelerin mümkün olduğunca eşit şartlarda üretilmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 2. X Desktop CAM yazılımında seçilen parametreler

Parametre	Değeri
Yazıcı	Zaxe Z1 Plus
Malzeme	PLA–ABS
Filament Çapı	1,75 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	120 mm/s

Eğme test numunelerinin boy, genişlik ve yükseklik uzunlukları ASTM C393-16 standardına uygun olarak üretilmiştir. Numuneler 6-9-12 mm hücre çapında sırasıyla 0,6-0,8-1,2 mm duvar kalınlıklarında, 10 mm hücre yüksekliğinde, 1'er mm alt ve üst plaka kalınlığında olmak üzere üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Numunelerin dış ölçüleri 75 mm x 200 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3'te eğme numunesinin belirlenen üretim parametreleri altında üç boyutlu yazıcı ile üretimi görülmektedir. Ayrıca, üç boyutlu yazıcı ile üretim aşamasındaki birçok üretim parametresi X Desktop CAM yazılımındaki varsayılan ayarlar kullanılarak üretilmiştir.



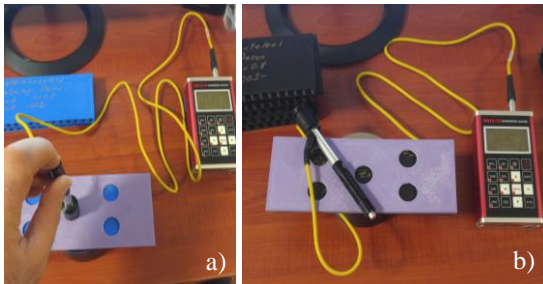
Şekil 3. Eğme numunesinin belirlenen parametreler altında üç boyutlu yazıcı ile üretilmesi

Üretilen eğme test numuneleri birbiri ile aynı özelliklerde olup olmadığının kontrolü ve porozite (boşluk yüzdesi) değerlerinin hesaplanabilmesi için KERN PLS 6200-2A (kapasite: 6.200 g, hassasiyet: 0,01 g) hassas teraziyile kütle ölçümleri yapılmıştır. Üç farklı hücre çapındaki bal peteği eğme numunelerinin hacimleri Solidworks tasarım programından elde edilmiştir. Bu hacim değerlerinden teorik kütleleri hesaplanarak Eşitlik 1'e göre porozite yüzdeleri bulunmuştur.

$$P(\%) = \frac{TK - \ddot{O}K}{TK} \times 100 \quad (1)$$

Burada P porozite yüzdesi, TK teorik kütle ve $\ddot{O}K$ ölçülen kütle olarak tanımlanmaktadır.

Ayrıca PLA ve ABS numunelere eğme deneyi uygulanmadan önce taşınabilir kalem tipi MH210 yüzey sertlik cihazı ile ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılmadan önce üç boyutlu yazıcıda Şekil 4'de gösterilen eflatun renkli aparat üretilmiştir. Bu aparat, her numunenin mümkün olduğunca aynı noktalarından ölçüm yapılmasını sağlamıştır. Ölçümler, numunelerin alt yüzeyi (üretim esnasında tablaya temas eden yüzey) ile üst yüzeyindeki beş noktanın ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak, Çizelge 3'de Shore cinsinden sertlik değerleri çizelgesi düzenlenmiştir. Sandviç yapıdaki hücrelerin bal peteği şeklinde boşluklu olması, sertlik değerleri arasında farklılıklara sebep olmuştur. PLA numunelerinin yüzey sertlikleri, ABS numunelerinin yüzey sertliklerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Eğme numunelerinin yüzey sertliklerinin ölçümlerinin gösterimi a) PLA numunelerin ölçümü b) ABS numunelerin ölçümü

Çizelge 3. PLA ve ABS numunelerin Shore cinsinden yüzey sertlik değerleri

N.No	PLA		ABS	
	Üst yüzey	Alt yüzey	Üst yüzey	Alt yüzey
d6-t08_1	78,1	71,2	63,1	67,0
d6-t08_2	83,3	75,1	62,6	66,0
d6-t08_3	79,9	65,9	63,9	68,2
d9-t12_1	83,2	63,1	76,0	57,7
d9-t12_2	68,7	70,2	62,5	51,5
d9-t12_3	73,2	70,8	60,6	66,7
d12-t16_1	77,0	62,8	53,8	63,3
d12-t16_2	81,4	55,0	60,6	60,5
d12-t16_3	79,7	59,9	52,7	61,2
Ortalama	78,3	66,0	61,8	62,5

2.2. Bal Peteği Yapılarının Üç Nokta Eğme Deneyleri

3 nokta eğme testleri Şekil 5'te gösterilen 100 kN kapasiteli Zwick/Roell marka Z100 tip çekme cihazının basma tarafı ve üç nokta eğme test aparatıyla gerçekleştirilmiştir. Üretilen eğme numunelerinin 3 nokta eğme testlerinde ASTM C393-16 standardı [17] kullanılmıştır. Yapılan testlerde, test hızı 6 mm/dk olarak uygulanmıştır. Testlerin süresi 2 ila 3 dakika arasında gerçekleşmiştir.



Şekil 5. Zwick/Roell marka Z100 tip çekme cihazı

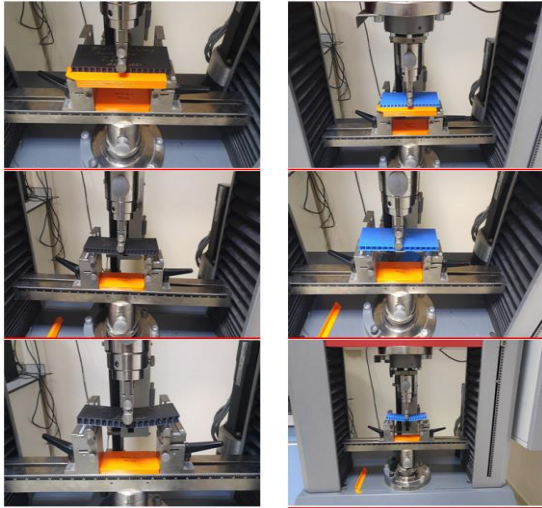
Üç nokta eğme testlerinde karşılaşılan en büyük problemlerden bir tanesi numunelerin eğme aparatı üzerine konumlandırılmasıdır. Yapılan testlerden

daha doğru ve güvenilir sonuçların alınabilmesi için numunenin eğme aparatı üzerinde her defasında aynı yerde konumlandırılması gerekmektedir.



Şekil 6. Eğme testleri için üretilen özel aparat

Bu problemin ortadan kaldırılabilmesi için Şekil 6’te gösterilen iki farklı parçadan oluşan master ekipmanları tasarlanmış ve üç boyutlu yazıcı ile üretilerek testlerde kullanılmıştır. Üretilen bu konum sabitleyici ekipmanlar sayesinde, üretilen tüm eğme numunelerine aynı nokta üzerinden kuvvet uygulanması suretiyle oluşabilecek konumlandırma hataları sıfırlanmıştır. Şekil 7’de ABS ve PLA malzemelerinden üretilmiş eğme numunelerinin, üç nokta eğme testinin yapılış sırasına göre farklı anlardaki durumları ve tasarlanan sabitleme ekipmanının kullanım aşamaları görülmektedir.



Şekil 7. ABS ve PLA numunelerin üç nokta eğme testi sırasında farklı anlardaki durumları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üç boyutlu yazıcıda aynı parametrelerde PLA ve ABS filamentler kullanılarak farklı hücre çaplarında üretilen numunelere eğme testi yapılmış ve maksimum eğme kuvvetleri karşılaştırılmıştır.

Bir malzemenin porozite yüzdesi malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede etkilidir [18]. Bu yüzden her bir hücre çapındaki numunelerin ölçülen kütle, teorik kütle ve hesaplanan porozite yüzdeleri Çizelge 4 ve 5’de gösterilmiştir. Bu çizelgelerde yoğunluğu $1,31 \text{ g/cm}^3$ olan PLA numunelerinin, yoğunluğu $1,10 \text{ g/cm}^3$ olan ABS numunelerinden daha büyük kütleyle sahip olduğu görülmüştür. Üç farklı hücre çapındaki numunelerin kendi aralarında kütlelerinin birbirine yakın olduğu, hücre çapına göre kütlelerinin büyükten küçüğe doğru d9-d6-d12 şeklinde sıralandığı tespit edilmiştir.

ABS numunelerin porozite yüzdelерinin PLA numunelerin porozite yüzdelерinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi numuneler arasında fark olmaması için ABS ve PLA numuneler aynı yazdırma hızında yazdırılmıştır. Oysaki ABS numunelerinin katlar arasında daha az boşluklu olması için yazdırma hızının daha düşük olması gerekirdi [19]. Bu yüzden ABS numunelerin PLA numunelere göre daha yüksek porozite oranları çıkmıştır.

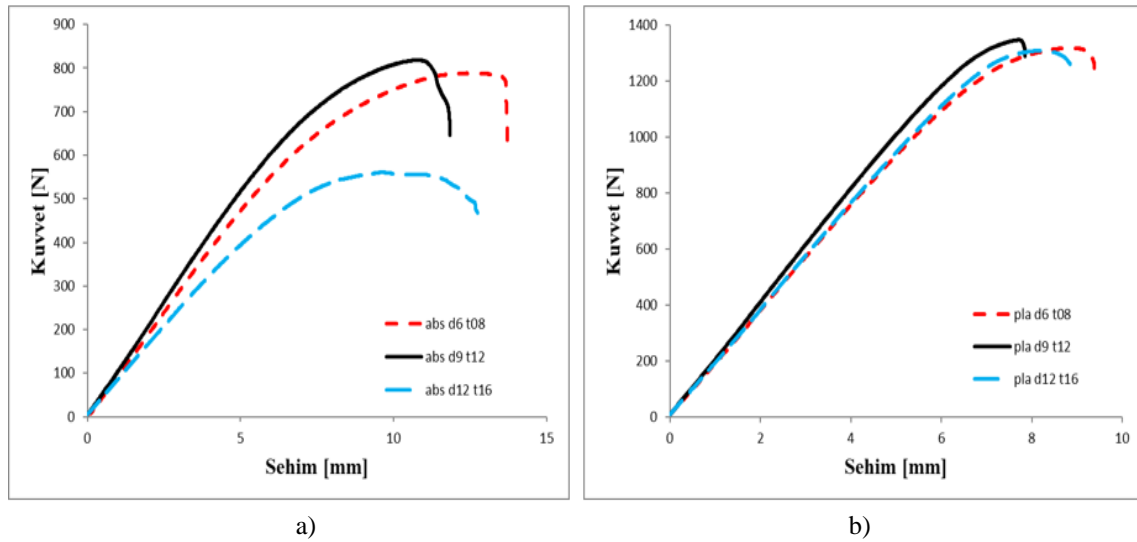
Çizelge 4. PLA numunelerin ölçülen ve hesaplanan kütle değerleri

	NK (g)	NH (g)	NY (g)	NTK (g)	P (%)
d6-t08_1	74,05	63,31	1,17	82,94	10,7
d6-t08_2	74,53	63,31	1,17	82,94	10,1
d6-t08_3	74,81	63,31	1,18	82,94	9,8
d9-t12_1	81,05	64,10	1,26	83,97	3,5
d9-t12_2	80,14	64,10	1,25	83,97	4,6
d9-t12_3	79,76	64,10	1,24	83,97	5,0
d12-t16_1	73,93	62,21	1,18	81,50	9,3
d12-t16_2	73,43	62,21	1,18	81,50	9,9
d12-t16_3	73,85	62,21	1,18	81,50	9,4

N.NO: Numune numarası, NK: Numune kütlesi, NH: Numune hacmi, NY: Numune yoğunluğu, NTK: Numune teorik kütlesi, P(%): Numunenin porozitesi

Çizelge 5. ABS numunelerin ölçülen ve hesaplanan kütle değerleri

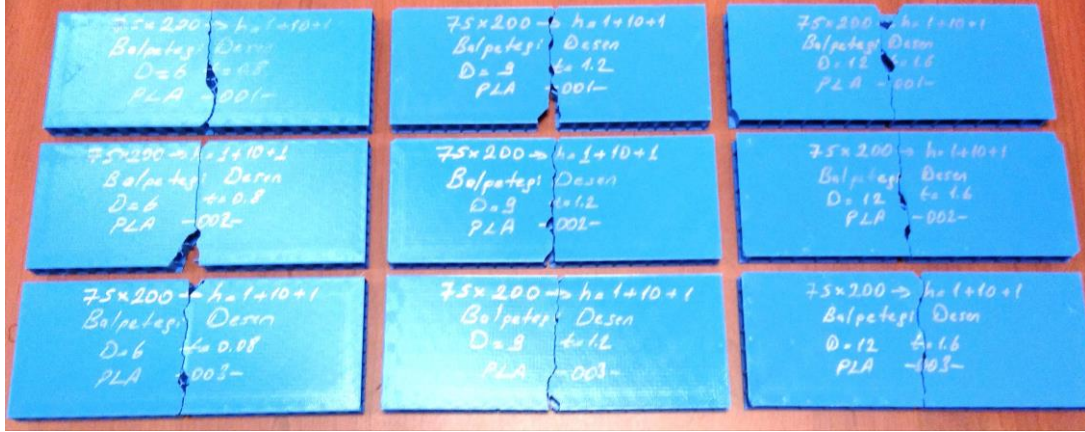
N.No	NK (g)	NH (g)	NY (g)	NTK (g)	P (%)
d6-t08_1	59,80	63,31	0,94	69,64	14,1
d6-t08_2	59,88	63,31	0,94	69,64	14,0
d6-t08_3	59,93	63,31	0,94	69,64	13,9
d9-t12_1	64,66	64,10	1,00	70,51	8,3
d9-t12_2	64,82	64,10	1,01	70,51	8,1
d9-t12_3	62,47	64,10	0,97	70,51	11,4
d12-t16_1	57,23	62,21	0,92	68,43	16,4
d12-t16_2	57,03	62,21	0,91	68,43	16,7
d12-t16_3	57,19	62,21	0,91	68,43	16,4



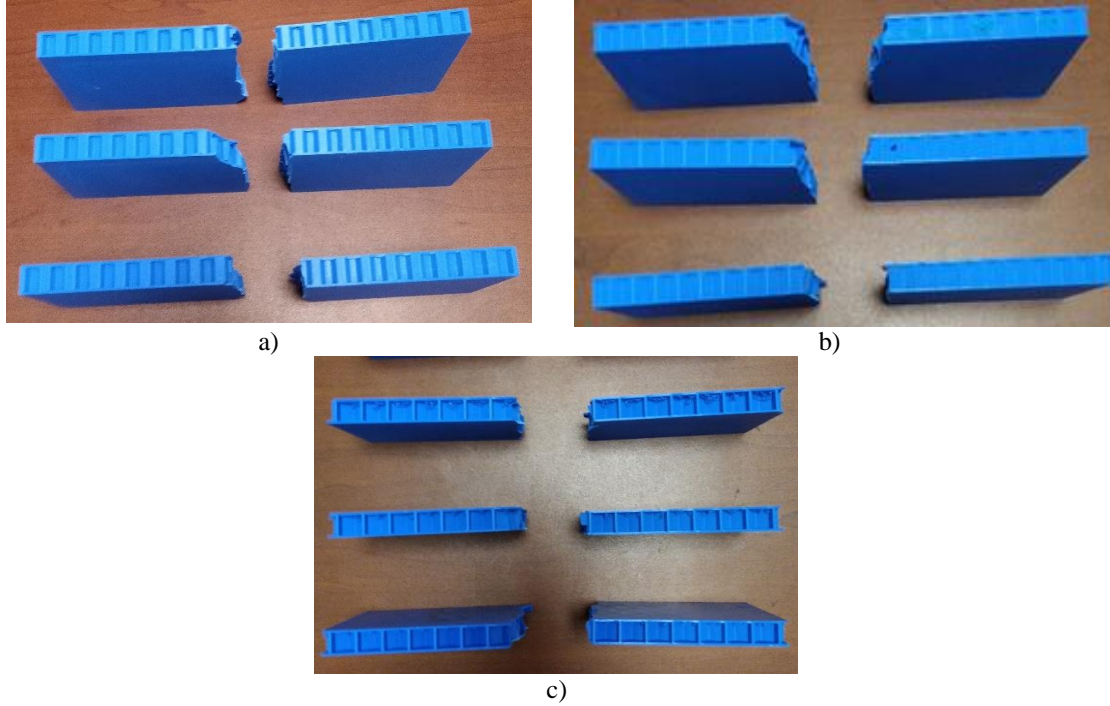
Şekil 8. a) ABS ve b) PLA numunelerin eğme testi sonrası kuvvet – sehim grafiği

PLA ve ABS malzemelerden üretilen numunelerin üç nokta eğme testleri sonucunda elde edilen ortalama kuvvet-sehim grafikleri Şekil 8 a) ve 8 b)'de gösterilmektedir. Her iki malzemeden üretilen numunelerde hücre çapı 9 mm olduğu durumda en yüksek dayanımın olduğu görülmektedir. En düşük kuvvet değerlerinin ise 12 mm hücre çapına sahip numunelerde olduğu görülmektedir. Ayrıca hücre çapı değişiminin ABS malzemesinden üretilen numunelerde PLA malzemesinden üretilen numunelere göre çok daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca ABS

malzemelerin PLA malzemelerine göre yaklaşık %50 daha fazla esnediği ve daha sünek davrandığı görülmektedir. Bununla birlikte PLA malzemesinden üretilen eğme numunelerinin ABS'den üretilen numunelere göre yaklaşık olarak %50 daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir. Şekil 9 ve 10'da PLA numunelere ait eğme testi sonrası görüntülerde görüldüğü üzere eğme testi yapılan üç farklı hücre çapındaki PLA numuneler gevrek davranış göstermiştir. Numunelerin tamamı kırılarak iki parçaya ayrılmıştır.



Şekil 9. PLA numunelerin eğme testi sonrası üst görünüşleri



Şekil 10. PLA numunelerin eğme testi sonrası ön görünüşleri a) 6x0.8 mm b) 9x1.2 mm c) 12x1.6 mm

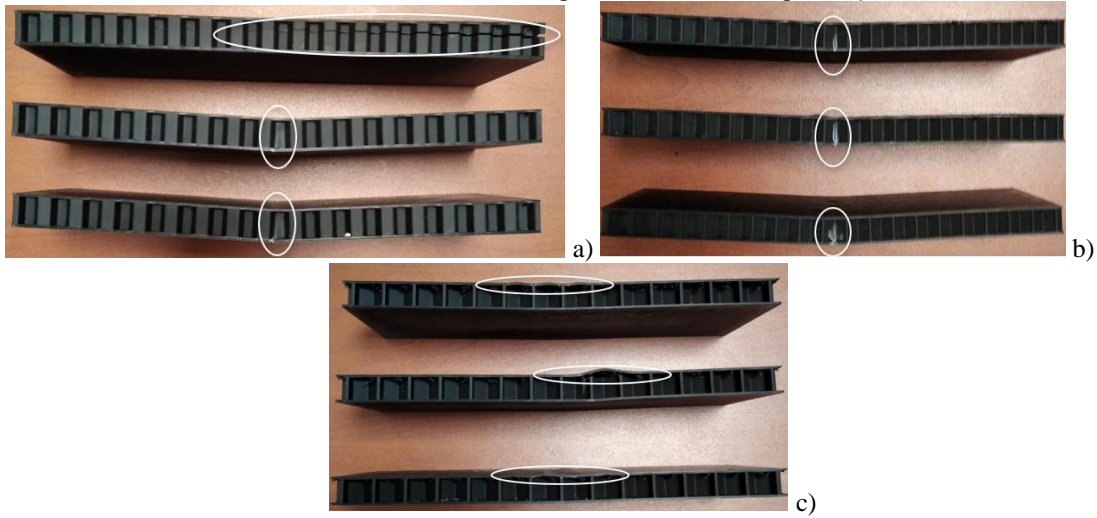
Şekil 11, 12 ve 13'de ABS numunelere ait farklı görünüşlerdeki eğme testi sonrası görüntüler gösterilmektedir. ABS numunelerde PLA numunelerdeki gibi kırılma gerçekleşmediği görülmekte olup, Şekil 11'de işaretli bölgelerde numunelerin hücre çapı büyüdükçe üst yüzey ile çekirdek arasında delaminasyonlar gerçekleşmiştir. Şekil 12'a'da 1 numaralı numune eğme yüküne

maruz kaldığında çekirdekte delaminasyon oluşmuştur. Şekil 12 ve 13'de numunelere üstten uygulanan kuvvetin hizasında alt yüzey ve çekirdekte çatlaklar oluşmuştur. Çekme gerilmesine maruz kalan alt yüzeydeki bölgede numunelerin hücre çapı büyüdükçe birim alandaki hücre sayısı azaldığından dolayı hasarın azaldığı tespit edilmiştir.

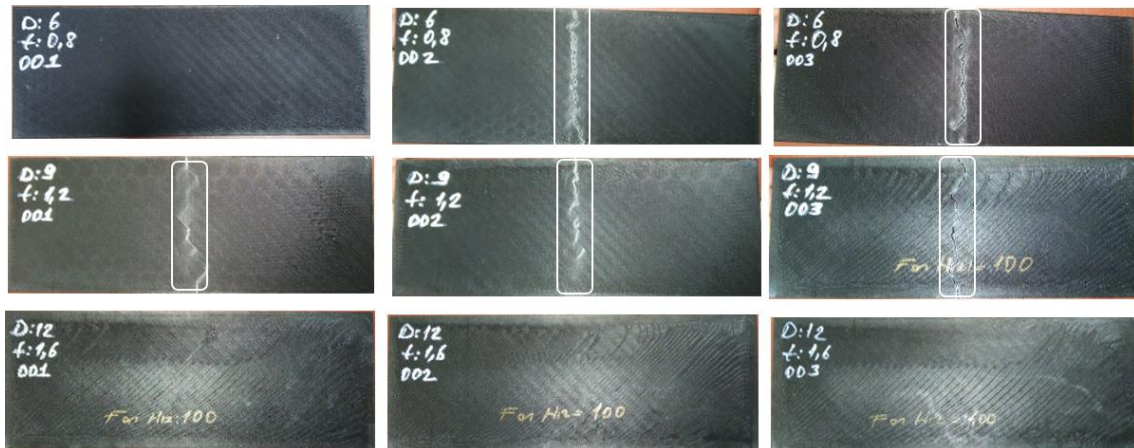
3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi



Şekil 11. ABS numunelerin eğme testi sonrası üst görüşleri



Şekil 12. ABS numunelerin eğme testi sonrası numune sırasına göre ön görüşleri a) 6x0.8 mm b) 9x1.2mm c) 12x1.6mm



Şekil 13. ABS numunelerin eğme testi sonrası alt görüşleri a) 6x0.8mm b) 9x1.2mm c) 12x1.6mm

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile ABS ve PLA malzemelerinde üretilen çekirdek kısımları farklı bal peteği hücre boyutlarına sahip sandviç eğme deney numunelerin, üç nokta eğme testleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aynı yüzey alanına ve farklı geometrik özelliklere sahip bal peteği yapılarının eğme dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Her iki filamentten farklı hücre çaplarında üretilen numunelerin kuvvet–sehim grafiklerinde elastik bölgelerin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.
- Hücre çapı 9 mm olan numunelerde, en yüksek eğme mukavemet değeri görülmüştür. Hücre çaplarının farklı porozite yüzdelere sahip olması kütle farkına sebep olmuş, numunelerin kütle değerlerinin mukavemet değerlerinde etkili olduğu görülmüştür.
- PLA filament numunelerinden elde edilen eğme mukavemet değeri ABS filament numunelerinden elde edilen eğme mukavemet değerinden yaklaşık %50 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ABS numunelerde PLA numunelere göre daha fazla sehim gerçekleşmiştir. Dolayısıyla ABS malzemedan üretilen numunelerin daha sünek yapıda olduğunu göstermektedir.
- PLA numunelerin ABS numunelerine göre yüzey sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Deney esnasında PLA malzemedan üretilen üç farklı hücre çapındaki numunelerin hepsinin orta bölgeden kırıldığı, ABS numunelerinde ise kırılmanın olmadığı görülmüştür. Bu durumun literatüre uygun olarak, yüzey sertliği yüksek malzemelerin eğme yüküne karşı daha rijit ve kırılğan davranışı ile açıklanabilir [20].

- Numuneler geleneksel üretimin dışında çekirdek ve yüzey yapıştırıcı kullanmadan eklemeli imalat yöntemiyle birlikte üretilmiştir. Eğme yüküne maruz kalan bu numunelerde, yüzey ve çekirdeğin birbirinden ayrılmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın ardından, farklı hücre çapına sahip sandviç yapıların basma, darbe dayanımları da incelenecektir. Ayrıca, gerçekleştirilen deneylerin nümerik olarak bir sonlu elemanlar programı yardımıyla doğrulanması da hedeflenmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma; İnönü Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-2349 nolu proje ile desteklenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. HexaPan Honeycomb Uygulamalar. <https://www.hexapan.com/tr/uygulamalar> (Erişim Tarihi:10.03.2021).
2. He, W., Lu, S., Wang, S., Sun, G., Hu, Z., 2019. Residual Flexural Properties of CFRP Sandwich Structures with Aluminum Honeycomb Cores after Low-Velocity Impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, 161–162, 105026.
3. Najafi, M., Ahmadi, H., Liaghat G.H., 2022. Investigation on the Flexural Properties of Sandwich Beams with Auxetic Core. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44–61.
4. Aslan, M., Güler, O., Alver, Ü., 2018. The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6), 1062–1068.
5. Chen, J., He, C., Gu, C., Liu, J., Mi, C., Gui, S., 2014. Compressive and Flexural Properties of Biomimetic Integrated Honeycomb Plates. *Materials and Design*, 64, 214–220.
6. Zhou, M., Xie, J., Chen, J., Liu, C., Tuo, W., 2015. The Influence of Processing Holes on the

- Flexural Properties of Biomimetic Integrated Honeycomb Plates. *Materials and Design*, 86, 404–410.
7. Tunca, E., Kafalı, H., 2021. Compression and Three-Point Bending Analyzes of Aerospace Sandwich Composites Produced with Polymeric Core Materials using ANSYS. *European Journal of Science and Technology*, 31(1), 553 – 561.
 8. Öztürk B., 2020. 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Yük Altında Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, 62.
 9. Kamer, M.S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., 2021. Investigation of the Mechanical Properties of Tensile Test Samples Produced in Different Colors and Different Infill Patterns with A 3D Printer. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 829-848.
 10. Kamer, M.S., Temiz, Ş., 2021. Investigation of the Mechanical Properties of Tensile Test Samples Produced With A 3d Printer Using Different Bed and Nozzle Temperatures with ABS and PLA Filaments. *KSU J Eng Sci*, 24(4), 341–358.
 11. Kamer, M.S., Dogan, O., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., 2021. Investigation of the Mechanical Properties of Flexural Test Samples Produced Using Different Printing Parameters with a 3D Printer. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 36(3), 835–846.
 12. Pirouzfard, S., Zeinedini, A., 2021. Effect of Geometrical Parameters on the Flexural Properties of Sandwich Structures with 3D-Printed Honeycomb Core and E-Glass/Epoxy Face-Sheets. *Structures*, 33, 2724–2738.
 13. Cheng, Y., Li, J., Qian, X., Rudykh, S., 2021. 3D Printed Recoverable Honeycomb Composites Reinforced by Continuous Carbon Fibers. *Composite Structures*, 268, 113974.
 14. Ghanbari-Ghazijahani, T., Kasebahadi, M., Hassanli, R., Classen, M., 2022. 3D Printed Honeycomb Cellular Beams Made of Composite Materials (Plastic and Timber). *Construction and Building Materials*, 315, 125541.
 15. Zeng, C., Liu, L., Bian, W., Leng, J., Liu, Y., 2021. Compression Behavior and Energy Absorption of 3D Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Honeycomb Structures with Shape Memory Effects. *Additive Manufacturing*, 38, 101842.
 16. Dou, H., Ye, W., Zhang, D., Cheng, Y., Huang, K., Yang, F., Rudykh S., 2021. Research on Drop-weight Impact of Continuous Carbon Fiber Reinforced 3D Printed Honeycomb Structure, *Materials Today Communications*, 29, 102869.
 17. ASTM-C393/C393M-16, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2016.
 18. Uşun, A., Gümrük, R. 2021. The Mechanical Performance of the 3D Printed Composites Produced with Continuous Carbon Fiber Reinforced Filaments Obtained via Melt Impregnation, *Additive Manufacturing*, 46, 102112.
 19. ABS ve PLA Filament Karşılaştırması. <https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/filament-karsilastir/abs-vs-pla-filament-karsilastirmasi/> (Erişim Tarihi: 15.11.2021).
 20. Arola, A.M., Kaijalainen, A., Kesti, V., Troive, L., Larkiola, J., Porter, D., 2021. The Effect of Mechanical Behavior on Bendability of Ultrahigh-Strength Steel. *Materials Today Communications*, 26, 101943.