



Araştırma Makalesi / Research Article

Çekirdek Malzemesi Ergiyik Biriktirme Yöntemi ile Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi

Investigation of the Bending Strength of Honeycomb Sandwich Composites Produced by Fused Deposition Modeling

Cenk YANEN ^{1,*}, Eyüp ÇELİK ², Murat Yavuz SOLMAZ ³

¹ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23200, Elazığ, Türkiye

² ODTÜ MEMS Merkezi, NanoManyetik Bilimsel Cihazlar, 06530, Ankara, Türkiye

³ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23200, Elazığ, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihi

Alınış, 23 Haziran 2021

Revize, 09 Temmuz 2021

Kabul, 14 Temmuz 2021

Online Yayınlama, 01 Ekim 2021

Anahtar Kelimeler

Balpeteği, Ergiyik biriktirme yöntemi, Üç nokta eğilme, ABS, PLA

ARTICLE INFO

Article History

Received, 23 June 2021

Revised, 09 July 2021

Accepted, 14 July 2021

Available Online, 01 October 2021

Keywords

Honeycomb, Fused deposition modeling, Three-point bending test, ABS, PLA

ÖZ

Bu çalışmada, çekirdek yapı malzemesi olarak bitki bazlı ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen polilaktik asit (PLA) ve petrol bazlı üretilen Akrilonitril-butadien-stiren (ABS) seçilmiş ve yüzey kapakları polyester/cam fiber kompozitler kullanılmış ve sandviç levhalar üretilmiştir. Çekirdek yapı malzemesi üretiminde baskı işleminin hızlı ve kolay yapılabilmesi gibi avantajlarından dolayı ergiyik biriktirme yöntemi kullanılmıştır. Çekirdek malzemeleri 3B yazıcı kullanılarak üç farklı hücre boyutu ve üç farklı hücre yüksekliğinde imal edilmiştir. Numunelere 3 nokta eğilme testleri uygulanmış ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Üç nokta eğilme deneyleri sonrası hasar tipleri incelenmiş ve baskın hasar tiplerinin katmanlar arası kopma ve kayma hasarı olduğu görülmüştür. Bu durumun önüne geçilebilmesi 3 boyutlu yazıcı kullanılarak ergiyik biriktirme yöntemi ile üretilen PLA termoplastik kullanılarak üretilmiş numunelere ikinci aşamada sıcaklık ve basınç uygulanmıştır. PLA malzemeden üretilen numunelerin ABS malzemeden üretilen numunelere göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip oldukları görülmüştür.

ABSTRACT

In this study, polylactic acid (PLA) produced from plant-based and renewable resources and Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) produced petroleum-based were selected as core building materials and polyester/glass fiber composites were used for surface covers and sandwich composite sheets were produced. In the production of core building materials, fused deposition modeling has been used due to its advantages such as fast and easy printing. Core materials were fabricated

*Sorumlu Yazar

E-posta Adresleri: cyanen@firat.edu.tr (Cenk YANEN), emrecelik258@gmail.com (Eyüp ÇELİK),

mysolmaz@firat.edu.tr (Murat Yavuz SOLMAZ)

in three different cell sizes and three different cell heights using a 3D printer. Three-point bending tests were applied to the samples and load-displacement graphs were obtained. Obtained results are presented in graphics. After three-point bending tests, damage types were examined and it was seen that the dominant damage types were interlayer rupture and shear damage. In order to prevent this situation, temperature and pressure were applied to the samples produced using a 3D printer in the second stage. It was observed that the samples produced from PLA material had higher flexural strength than the samples produced from ABS material.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulurlar. Sahip oldukları yüksek mukavemet ve düşük kütle oranı gibi özellikleri sayesinde günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılan temel bileşenlerden birisidir [1–4]. Bu uygulamaların kullanıldığı alanların başında havacılık sektörü gelmektedir. Havacılıkta kullanılan malzemelerden beklenen yüksek dayanım ve hafiflik fiber takviyeli kompozit malzemeler ile sağlanmaktadır [5–8]. Bunun yanı sıra kompozit malzemeler, helikopterin rotor yapılarında [9], petrokimya endüstrisindeki borulama ve depolama tanklarında [10], denizcilik endüstrisinde [11–16] kullanılmaktadır. İnşaat endüstrisinde kompozitler, beton direklere [17] ve köprü tabliyelerine [18] takviye olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda savunma sanayinde kompozit malzemeler çok sık kullanılmaktadır [19, 20]. Sandviç kompozitler; aynı veya farklı malzemelerden oluşan iki yüzey kapağı ve bunlara göre nispeten daha kalın bir çekirdek yapının yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzeme olarak tanımlanabilir [21]. Yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip olan sandviç kompozitler üzerine yapılan pek çok çalışma vardır [22–26]. Günümüzde hem çekirdek hem de yüzey kapak malzemesi kombinasyonlarının değiştirilerek kullanıldığı pek çok çalışma vardır. Yüzey kapak malzemesi olarak karbon ve cam esaslı kompozit malzemeler, çekirdek malzemesi olarak ise Nomex, alüminyum, kompozit malzemeler ve plastik esaslı ürünler kullanılmaktadır [27–31].

Fiedler ve Öchsner tarafından yapılan bir çalışmada farklı hücre modelindeki sandviç yapıların eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Bu yapılara üç nokta eğilme testleri yapılarak, eğilme dayanımlarını ve numunelerde meydana gelen hasar tiplerini belirlemişlerdir. Sandviç yapılarda hücre malzemesi olarak; petek, alüminyum, köpük ve küre şeklinde boşluklu metal yapılar tercih etmişlerdir [32].

Galleti ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada bal peteği kompozit levhalar eğilmeye maruz bırakılarak, meydana gelen hasar tipleri ve eğilme mukavemetleri incelenmiştir. Numunelerde meydana gelen hasar oluşumunun alt ve üst tabakanın yüzey kapak malzemesinin mekanik dayanımının aşıldığı durumlarda oluştuğunu gözlemlemişlerdir [33].

Banghai ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bir çalışmada çekirdek yapının köpükten üretildiği sandviç kompozitlerin hasar tiplerini üç nokta eğilme testi ile analitik metotla incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda yüzey malzemesi hasarı, çekirdek kayma hasarı ve çökme gibi hasar tiplerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Teorik analizlerin sonuçlarını yorumlayabilmek için üç nokta eğilme testlerini de gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak analitik yöntem ile elde edilen hasar tipleri ve maksimum kritik hasar yükünün deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir [34].

Shi ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bir çalışmada bal peteği sandviç kompozitlerin çekirdek yapısına alüminyum takviyeler yapmış ve üç nokta eğilme deneyi ile bu takviyelerin eğilme mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak takviye yapılan numunelerin daha ağır olduğu özgül mukavemet, enerji emme ve hasar yük değerlerinin takviyesiz olanlara göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [35].

Kowalska ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bir çalışmada bal peteği sandviç yapıları numunelerin eğilme davranışlarını üç nokta ve dört nokta eğilme deneyi ile incelemişlerdir. Sonuç olarak bal peteği sandviç yapıların maruz bırakıldığı sehim miktarı arttıkça yük değerlerinin de arttığını belirtmişlerdir [36].

Sandviç kompozit yapılar ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, sandviç levhalarda çekirdek yapının mekanik özellikler üzerinde büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında çekirdek malzemesinin incelendiği birçok çalışmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmada da çekirdek yapı malzemesine yoğunlaşmış ve üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA ve ABS termoplastik malzemeden üretilen petek hücreler kullanılmıştır. Çalışmada 3 farklı hücre yüksekliği ve 3 farklı hücre boyutunda çekirdek hücreleri kullanılarak bal peteği sandviç kompozit levhalar üretilmiştir. Yüzey kapakları tabakalı kompozit kullanılarak üretilen sandviç kompozitlere üç nokta eğilme testi uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. Bal peteği hücre yapılarının üretiminde yapışmanın daha iyi sağlanabilmesi için PLA kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen malzemeler fırınlama işlemine tabi tutulmuş ve fırınlamanın etkileri de incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

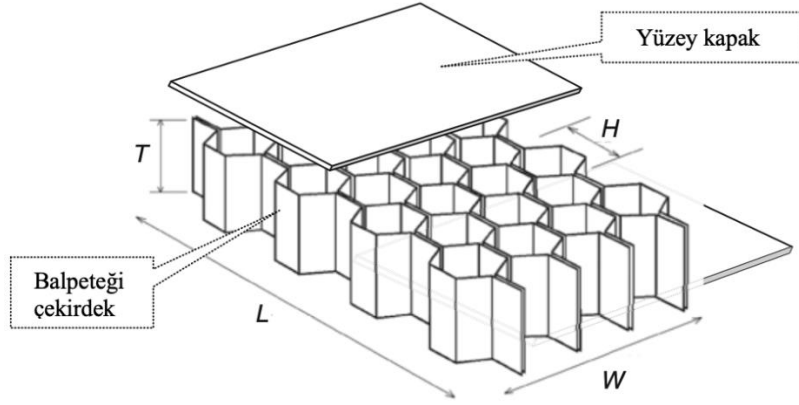
Çekirdek hücre boyutunun ve hücre yüksekliğinin, sandviç kompozit levhaların mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemek için; $H = 7$, $H = 14$ ve $H = 25$ mm olmak üzere üç farklı hücre boyutu ve $T = 25$, $T = 30$ ve $T = 40$ mm olmak üzere üç farklı yüksekliğe sahip bal peteği yapıları deney numuneleri üretilmiştir. Üç nokta eğilme deneylerinde mesnetler arası uzunluk numune yüksekliğine bağlı olarak değiştiğinden numunelerin mesnetler arası uzunluğu (1) numaralı denklem kullanılarak

belirlenmiş ve her bir hücre yüksekliğine uygun eğilme numuneleri üretilmiştir. 1 numaralı denklemde; D mandrel çapını, a ise deney numunesinin kalınlığını ifade etmektedir.

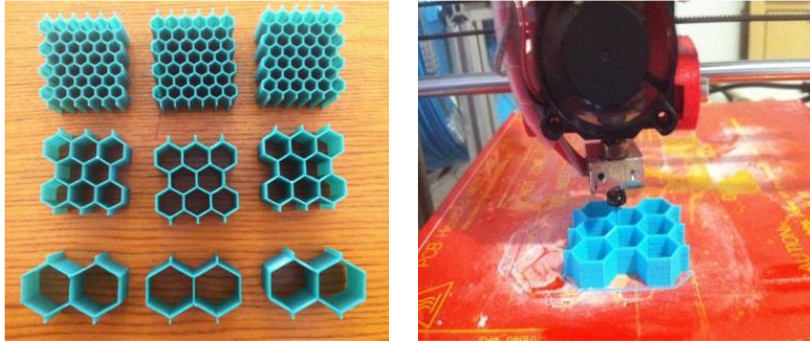
$$D + 3a \mp a/2 \quad (1)$$

Sandviç kompozitlerin imalatı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak çekirdek yapı ve yüzey kapak malzemesinin üretimi gerçekleştirilmektedir. Bunun ardından çekirdek yapı ile yüzey kapaklarının birleştirilmesi yapılmaktadır. Sandviç kompozit levha bileşenleri ve çekirdek geometrisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Çekirdek yapılarının üretiminde mekanik özellikleri Tablo 1’de verilen 1,75 mm çapında PLA ve ABS seçilmiş ve Şekil 2’de gösterildiği gibi ergiyik biriktirme yöntemi ile imal edilmiştir. Çalışmada yüzey kapak malzemesi üretimi için üretilen kompozitte fiber malzemesi olarak cam fiber kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise Erco polyester E-6 döküm tipi polyester reçine ve ona uyumlu olarak üretici firma tarafından tavsiye edilen Erco Mek Peroksit - Ece Perox sertleştirici, hızlandırıcı olarak ise Erco Kobalt Oktaat (%6) - Ece Dryer kullanılmıştır. Karışım oranı olarak önceki çalışmada olduğu gibi 35 gr reçineye karşılık 3 gr sertleştirici ve 3 gr hızlandırıcı seçilmiştir (35:3:3) [27, 38]. Matris malzemesi içerisine cam fiberler iki tabaka olarak rastgele yerleştirilmiş ve ortalama $t_f = 2,4$ mm kalınlığında kompozit yüzey kapakları üretilmiştir. Kompozit plakaların katılması esnasında petek hücreler plakaların üzerine yerleştirilerek sıvı haldeki matris yardımıyla birleşmesi sağlanmıştır. Bu işlem sayesinde matris malzemesi ile yüzey kapaklarının yük altında en ideal şekilde birleşmesi amaçlanmıştır. Katılma sürecinin tamamlanmasının ardından bal peteği hücrenin diğer yüzeyine de aynı işlemler uygulanmış ve yüzey kapakları ile kapatılmıştır. Oda sıcaklığında katılma sürecini tamamlanmasının ardından sandviç kompozit levhalar tel testere yardımı ile petek hücre boyutlarına uygun olarak kesilmiş ve deney numuneleri hazırlanmıştır. Katılma süreci tamamlanan ve tel testere yardımı ile temizlenen üç nokta eğilme deney numuneleri Şekil 3’de görülmektedir. Üretimi tamamlanan sandviç kompozit levhaların eğilme dayanımlarının ölçülebilmesi için üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Üç nokta eğilme testleri ASTM D790 standardına uygun olarak Shimadzu marka 100 kN kapasiteli universal çekme-basma test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde basma hızı 0,3 mm/dk olarak sabit tutulmuştur. Deney hatalarının önüne geçmek için tüm deneyler üçer kez tekrarlanmış ve ortalaması alınarak kullanılmıştır. Üç nokta eğilme deneyinde kullanılan numunelerin boyutları ve deneye ait yükleme koşulları Şekil 4’ de verilmiştir.

Fırınlama yapılacak bal peteği yapıları kompozit levhalar diğer deney numuneleri ile aynı şartlarda üretildikten sonra fırınlama işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlem 40 °C sıcaklıkta numunelerin üzerine 470 gr ağırlık koyularak 20 dakikada gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kompozit levhaların tüm yüzeye eşit dağılacak şekilde 60 x 240 mm ebatlarında bir levha kullanılarak uygulanmıştır.



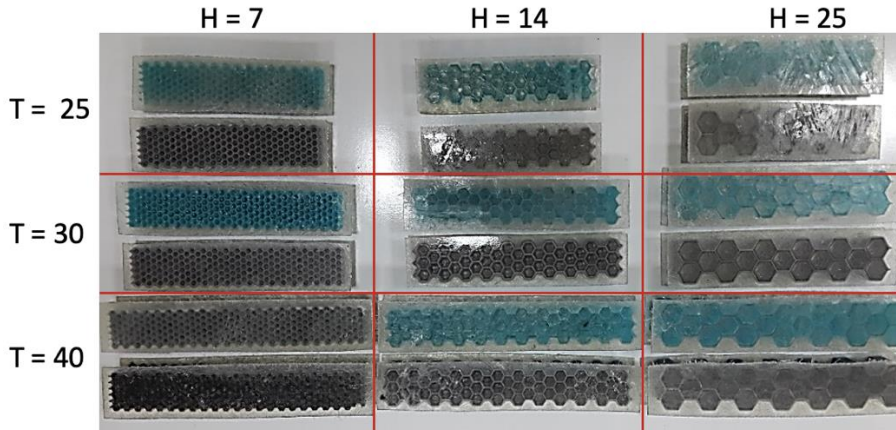
Şekil 1. Sandviç kompozit levha ölçüleri [37]



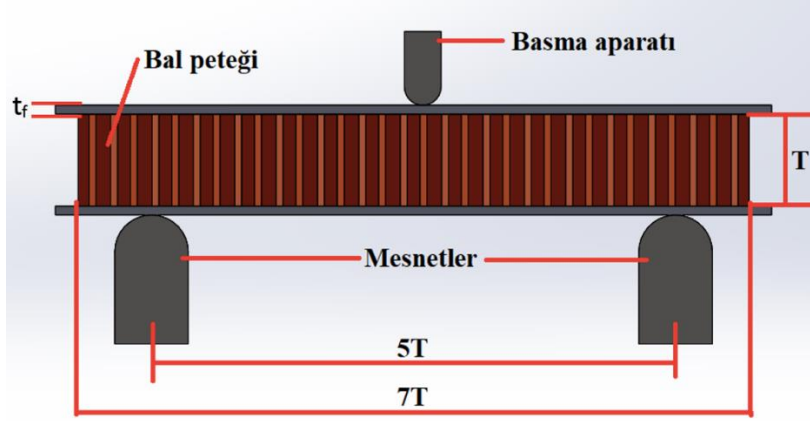
Şekil 2. Ergiyik biriktirme yöntemi ile çekirdek yapı malzemesinin üretilmesi [38]

Tablo 1. PLA ve ABS malzemelerinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	PLA	ABS
Çekme Mukavemeti (MPa)	65	41
Kopma Uzaması (%)	7,5	8,2
Eğilme Mukavemeti (Mpa)	97	63
Eğilme Modülü (MPa)	3600	2200



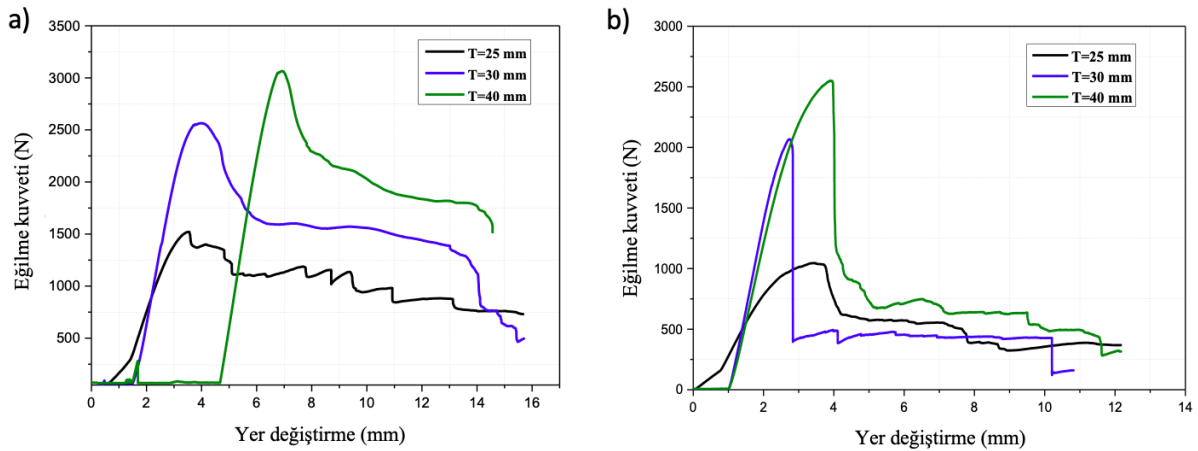
Şekil 3. Üç nokta eğilme deney numuneleri



Şekil 4. Üç nokta eğilme deneyi numune boyutları ve yükleme koşulları

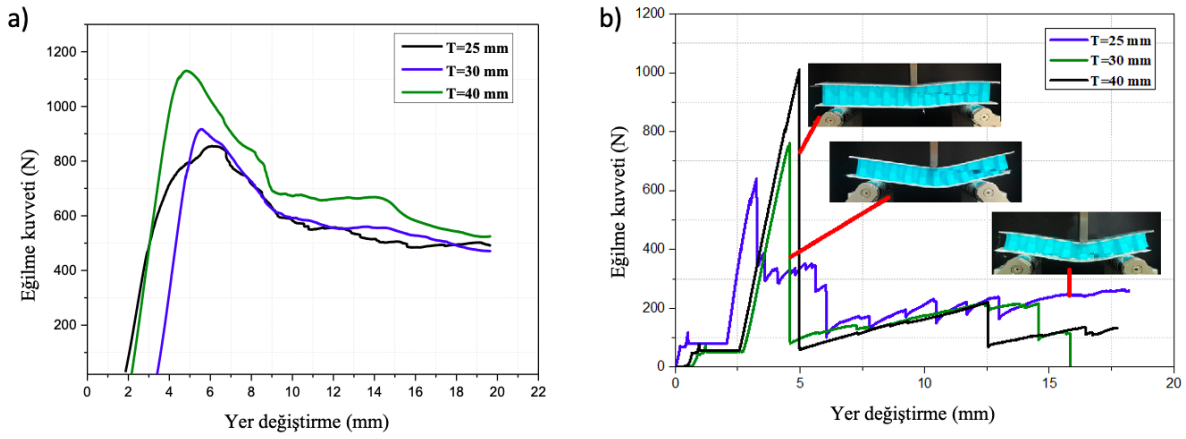
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

H = 7 mm hücre boyutuna sahip PLA ve ABS termoplastik petek yapıları kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 5’ de verilmiştir. PLA için en yüksek eğilme kuvveti T = 40 mm hücre yüksekliğine ve L = 200 mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 3064 N olarak elde edilirken en düşük eğilme kuvveti T = 25 mm hücre yüksekliğine ve L = 125 mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 1520 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5b’de ABS malzeme ile üretilen numuneler için verilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek eğilme kuvveti T = 40 mm hücre yüksekliğine ve L = 200 mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 2650 N olarak elde edildiği görülmüştür. En düşük eğilme kuvveti T = 25 mm hücre yüksekliğine ve L = 125 mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 1050 N olduğu tespit edilmiştir. Her iki malzemeden yapılan numunelerde hücre yüksekliğinin artmasının maksimum eğilme kuvvetini arttırdığı belirlenmiştir.



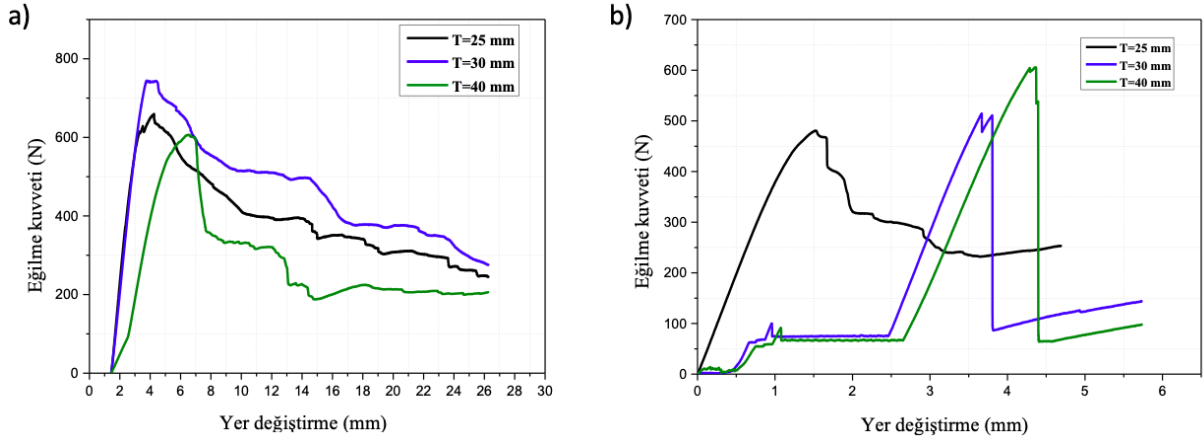
Şekil 5. H = 7 mm hücre boyutuna sahip a) PLA, b) ABS termoplastik petek yapıları kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonrası eğilme kuvveti-yer değiştirme grafiği

$H = 14$ mm hücre boyutuna sahip PLA ve ABS termoplastik petek yapıları kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. PLA malzemeden üretilen numuneler için en yüksek eğilme kuvveti $T = 40$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 200$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 1130 N olarak elde edilirken en düşük eğilme kuvveti $T = 25$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 125$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 855 N olarak elde edilmiştir. ABS malzemeden üretilen ve sonuçları Şekil 6b'de verilen numunelerde en yüksek eğilme kuvveti $T = 40$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 200$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 1032 N olarak elde edilirken en düşük eğilme kuvveti $T = 25$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 125$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 643 N olarak elde edilmiştir. Grafikte görülen dalgalanmaların sebebi Şekil 6b'de de görüleceği gibi petek yapıları kompozit levhada katmanların birbirinden ayrılmasıdır. Hücre boyutunun artması maksimum eğilme kuvvetini azaltmıştır.



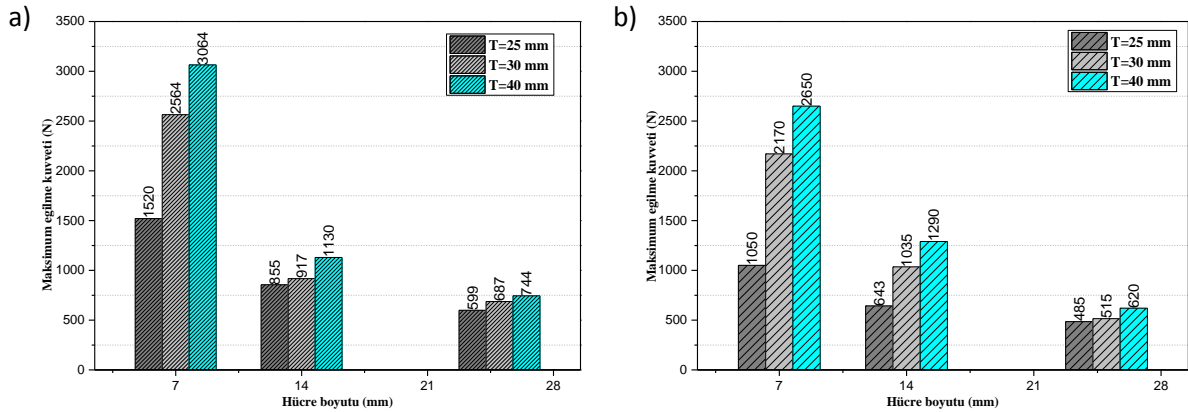
Şekil 6. $H = 14$ mm hücre boyutuna sahip a) PLA, b) ABS termoplastik petek yapıları kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonrası eğilme kuvveti-yer değiştirme grafiği

$H = 25$ mm hücre boyutuna sahip PLA ve ABS termoplastik petek yapıları kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7a'da verilen PLA malzemeden üretilmiş numuneler için en yüksek eğilme kuvveti $T = 40$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 200$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 744 N olarak elde edilirken en düşük eğilme kuvveti $T = 25$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 125$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 599 N olarak elde edilmiştir. Hücre boyutunun artması maksimum eğilme kuvvetini azaltırken hücre yüksekliğinin artması maksimum eğilme kuvvetini arttırmıştır. ABS malzemeden üretilen numuneler için ise en yüksek eğilme kuvveti $T = 40$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 200$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 620 N olarak elde edilirken en düşük eğilme kuvveti $T = 25$ mm hücre yüksekliğine ve $L = 125$ mm uzunluğa sahip petek yapıları kompozit levhada 485 N olarak elde edilmiştir. Artan hücre boyutuna bağlı olarak maksimum eğilme kuvveti azalmıştır.



Şekil 7. $H = 25$ mm hücre boyutuna sahip a) PLA, b) ABS termoplastik petek yapılı kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonrası eğilme kuvveti-yer değiştirme grafiği

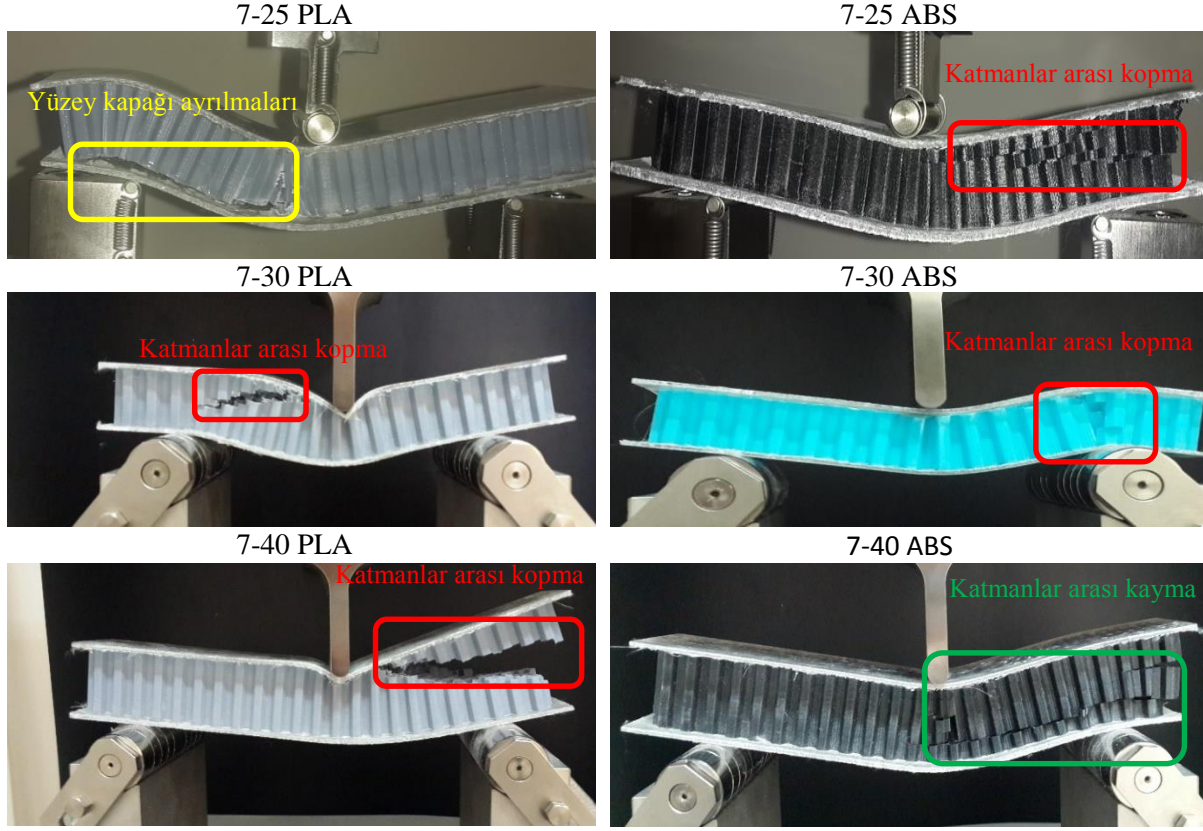
$T = 25$, $T = 30$ ve $T = 40$ mm hücre yüksekliğine sahip PLA ve ABS termoplastik petek yapılı kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum eğilme kuvvet değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Numunelere üç nokta eğilme deneyi yapılmasının ardından meydana gelen hasar tipleri, $H = 7$ mm hücre boyutuna ve $T = 25$, $T = 30$ ve $T = 40$ mm hücre yüksekliğine sahip PLA ve ABS termoplastik ile üretilmiş petek yapılı numuneler için Şekil 9’da verilmiştir. Her iki tip numune için meydana gelen hasar tipleri aynı olup katmanlar arası kopma, enine katmanlar arası ayrılma ve yüzey kapaklarının çekirdek yapıdan ayrılması şeklinde olmuştur.



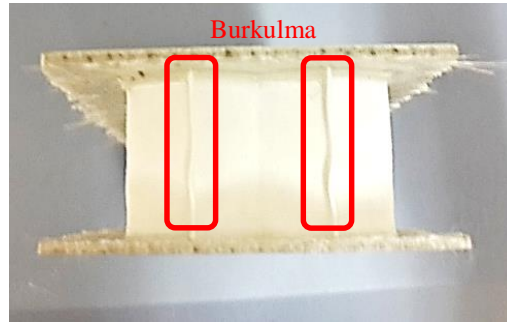
Şekil 8. $H = 7$, $H = 14$, $H = 25$ mm hücre boyutuna sahip a) PLA ve b) ABS termoplastik petek yapılı kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonrası maksimum eğilme kuvvetleri

Sandviç kompozit levhalara uygulanan üç nokta eğilme deneyleri sonrası hasar tipleri incelendiğinde düzleme dik doğrultuda herhangi bir hasar meydana gelmediği görülmüştür. Tüm deney numuneleri için genel hasar tipleri enine katmanlar arası meydana gelen hasarlardan oluşmaktadır. Bu durum ergiyik biriktirme yöntemi sırasında üst üste koyularak üretilen filamentlerin tam yapışma meydana gelmeden birleştiğini düşündürmüştür. Bu durumun önüne geçebilmek için PLA ve ABS kullanılarak üretilmiş numuneler ekstra ısıtma işlemine tabi tutularak katmanlar arası yapışmanın iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen numunelerin fırınlanma sonrası görseli Şekil 10’da

verilmiştir. Sıcaklık ve basınç uygulanması sonucu numunelerde burkulma meydana geldiği görülmüştür.

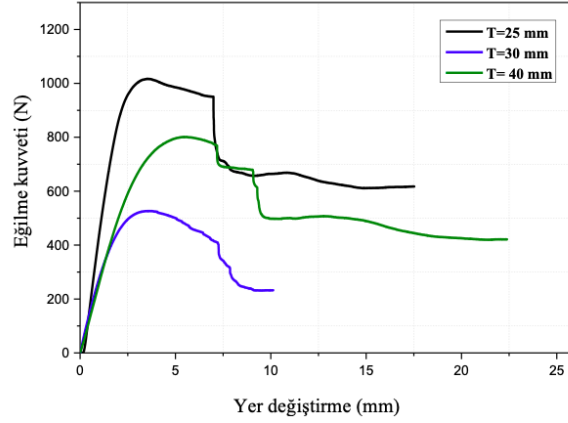


Şekil 9. PLA ve ABS termoplastik petek yapılı numunelerde üç nokta eğilme deneyi sonrası meydana gelen hasar tipleri



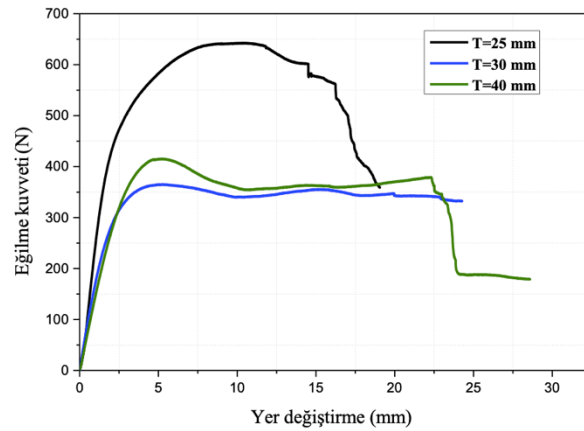
Şekil 10. Fırınlama işlemi sonrasında PLA termoplastik kullanılarak üretilen numune görseli

Fırınlama işlemine maruz bırakılmış H=14 mm hücre boyutuna sahip PLA termoplastik petek yapılı kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 11’de verilmiştir. En yüksek eğilme kuvveti T = 25 mm hücre yüksekliği ve L = 125 mm uzunluğa sahip PLA termoplastik petek yapılı kompozit levhada 1017 N olarak elde edilmiştir. Artan hücre yüksekliğine bağlı olarak eğilme kuvvet değeri azalmıştır. Daha önce elde edilen sonuçlardan farklı olarak artan hücre yüksekliği ile eğilme kuvvetinin azalmasının nedeni petek hücre duvarlarının ortam sıcaklığından dolayı çarpılması olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Fırınlama işlemine maruz bırakılmış $H = 14$ mm hücre boyutuna sahip PLA termoplastik petek yapılı kompozit levhaların eğilme kuvveti-yer değiştirme grafiği

Fırınlama işlemine maruz bırakılmış $H = 25$ mm hücre boyutuna PLA termoplastik petek yapılı kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 12'de verilmiştir. En yüksek eğilme kuvveti $T = 25$ mm hücre yüksekliğine sahip numunede 642 N olarak elde edilmiştir. Artan hücre yüksekliğine bağlı olarak artması beklenen maksimum eğilme kuvvetinin azalmasının nedeni fırınlama esnasında sıcaklıktan dolayı hücre duvarlarının çarpılması olduğu düşünülmektedir.



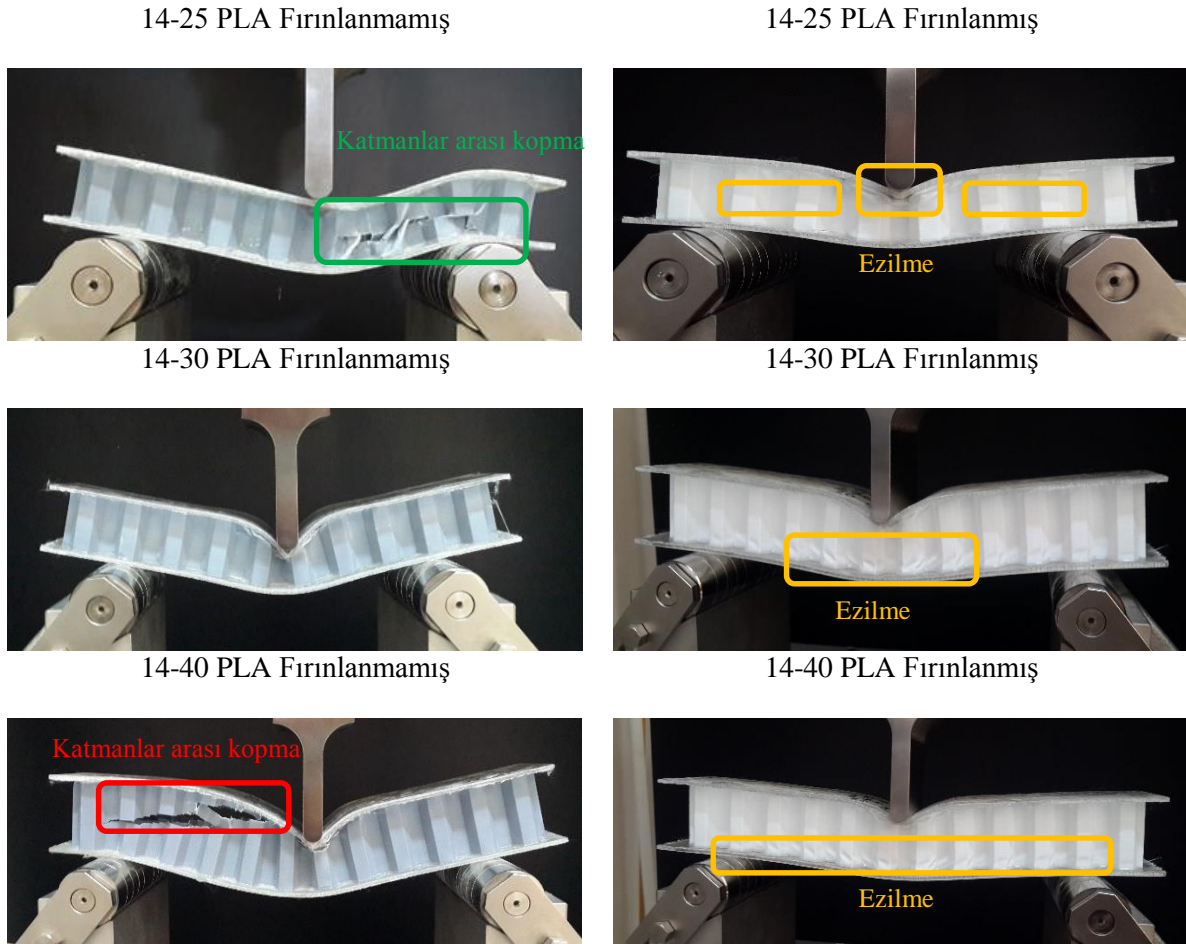
Şekil 12. Fırınlama işlemine maruz bırakılmış $H = 25$ mm hücre boyutuna sahip PLA termoplastik petek yapılı kompozit levhaların eğilme kuvveti-yer değiştirme grafiği

Fırınlama işlemine maruz bırakılmış $H = 14$ mm, $H = 25$ mm hücre boyutu ve $T = 25$ mm hücre yüksekliğine sahip ABS termoplastik petek yapılı kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 13'de verilmiştir. En yüksek eğilme kuvveti $H=14$ mm hücre boyutuna sahip numunede 632 N olarak elde edilmiştir. Eğilme kuvveti hücre boyutuna bağlı olarak azalmıştır. Fırınlama işlemini ABS termoplastik filament üzerinde net bir etkisi olmamıştır.

Sıcaklık ve basınca maruz bırakılmış PLA termoplastik bal peteği yapılı sandviç kompozit levhaların üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum eğilme kuvvetleri Tablo 2'de

verilmiştir. Fırınlama işlemi esnasında sıcaklıktan dolayı çarpılan hücre duvarlarının burkulması ile hücre yüksekliği arttıkça maksimum eğilme kuvvet değeri azalmıştır.

Sıcaklık ve basınca maruz bırakılmış $H = 14$ mm hücre boyutuna sahip PLA termoplastik bal peteği yapıları sandviç kompozit numunelerde üç nokta eğilme deneyleri sonucu meydana gelen hasar tiplerinin incelemesi Şekil 13’de verilmiştir.



Şekil 13. Fırınlanmamış ve fırınlanmış $H=14$ mm hücre boyutuna sahip PLA termoplastik petek yapıları numunelerde meydana gelen hasarların deneysel fotoğrafları

Şekil 13’de verilen üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar görüntüleri incelendiğinde fırınlanmamış numunelerde en çok karşılaşılan hasar tipinin katmanlar arası kayma ve kopma hasarları olduğu görülmektedir. Ergiyik biriktirme yöntemiyle üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen numunelerde imalat sırasında filament tabakaları arasında çeşitli nedenlerden ötürü tam birleşmenin gerçekleşmediği düşünülmektedir. Bu amaçla üretimin 2. aşamasında numunelerin yapışmasının artırılması için sıcaklık ve basınç uygulanmıştır. Verilen hasar fotoğrafları incelendiğinde fırınlanmış numunelerdeki baskın hasar tipinin ezilme hasarı olduğu görülmüştür. Numunelere sıcaklık ve basınç uygulanmasının ardından üretim sırasında filamentler arası yapışmanın tam gerçekleştirilememesinden

kaynaklanan hasarların önüne geçildiği tespit edilmiştir. Buna rağmen fırınlama işlemi sonrası yapılan üç nokta eğilme test sonuçları arasında bir ilişki kurulamamıştır.

Tablo 2. Sıcaklık ve basınca maruz bırakılmış PLA termoplastik petek yapılı numunelerin maksimum eğilme kuvveti

Numune kodu	Sıcaklık ve basınca maruz kalmış PLA (N)	PLA (N)
14-25	1017	855
14-30	526	917
14-40	801	1130
25-25	642	599
25-30	365	687
25-40	415	744

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı hücre boyutu ve üç farklı hücre yüksekliğine sahip PLA ve ABS termoplastik petek yapılı kompozit levhalar üretilerek üç nokta eğilme deneyi ile eğilme kuvvetleri ve oluşan hasar tipleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- En yüksek maksimum eğilme yükü $H = 7\text{mm}$ hücre boyutu ve $T = 40\text{ mm}$ hücre yüksekliğine sahip PLA termoplastik petek yapılı numunede deneysel olarak sırası ile 3064 N ve 6344 N olarak elde edilmiştir.
- En düşük maksimum eğilme kuvveti $H = 25\text{ mm}$ hücre boyutu ve $T = 25\text{ mm}$ hücre yüksekliğine sahip ABS termoplastik petek yapılı numunede deneysel olarak sırası ile 485 N ve 2306 N olarak elde edilmiştir.
- Hücre boyutu arttıkça eğilme yükü azalmıştır.
- Hücre yüksekliği arttıkça eğilme yükü buna bağlı olarak artmıştır.
- Yapılan üç nokta eğilme deneyleri sonucunda PLA termoplastik petek yapılı numunelerde katmanlar arası kopma gerçekleştiği görülmüştür.
- Yapılan üç nokta eğilme deneyleri sonucunda ABS termoplastik petek yapılı numunelerde katmanlar arası kayma gerçekleştiği belirlenmiştir.
- Fırınlama işleminin ardından üç nokta eğilme deneyleri uygulanan PLA termoplastik malzeme kullanılarak üretilmiş sandviç kompozit levhalarda katmanlar arası kopma ve kayma hasarının giderildiği görülmüştür. Bunun yanı sıra çekirdek malzemesi ile yüzey kapaklarının daha iyi birleştirilmesinin sağlandığı görülmüştür.
- Bitkisel bazlı üretilen PLA malzemesi ile üretilen numunelerin petrol bazlı üretilen ABS kullanılarak üretilen numunelerden daha yüksek eğilme kuvvetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yenilenebilir kaynaklardan üretilen PLA'nın ABS'ye iyi bir alternatif olduğu belirlenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını bildirmektedirler.

YAZARLARIN KATKILARI

Cenk YANEN: Yazma ve düzenleme, test, verilerin düzenlenmesi. Eyüp ÇELİK: Metodoloji, veri toplama, veri düzenleme, test ve kontrol. Murat Yavuz SOLMAZ: Gözetim ve liderlik sorumluluğu, analiz, inceleme ve sonuçların yorumlanması.

KAYNAKLAR

- [1] W. Nsengiyumva, S. Zhong, J. Lin, Q. Zhang, J. Zhong, and Y. Huang, “Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review,” *Compos. Struct.*, vol. 256, p. 112951, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112951>.
- [2] C. Garnier, M. L. Pastor, F. Eyma, and B. Lorrain, “The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 5, pp. 1328–1336, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.10.017>.
- [3] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, Apr. 2014, doi: 10.1177/0731684414530790.
- [4] F. J. Macedo, M. E. Benedet, A. V. Fantin, D. P. Willemann, F. A. A. da Silva, and A. Albertazzi, “Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 104, pp. 100–108, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.06.005>.
- [5] S. Laurenzi, A. Grilli, M. Pinna, F. De Nicola, G. Cattaneo, and M. Marchetti, “Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 57, pp. 47–55, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.039>.
- [6] J. Serra *et al.*, “Validation and modeling of aeronautical composite structures subjected to combined loadings: The VERTEX project. Part 2: Load envelopes for the assessment of panels with large notches,” *Compos. Struct.*, vol. 180, pp. 550–567, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.055>.
- [7] C. Meola, S. Boccardi, and G. maria Carlomagno, “Chapter 1 - Composite Materials in the Aeronautical Industry,” C. Meola, S. Boccardi, and G. maria B. T.-I. T. in the E. of A. C. M. Carlomagno, Eds. Woodhead Publishing, 2017, pp. 1–24.

- [8] A. Caggiano, F. Napolitano, L. Nele, and R. Teti, “Study on thrust force and torque sensor signals in drilling of Al/CFRP stacks for aeronautical applications,” *Procedia CIRP*, vol. 79, pp. 337–342, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.079>.
- [9] F. Ciampa, P. Mahmoodi, F. Pinto, and M. Meo, “Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, 2018, doi: [10.3390/s18020609](https://doi.org/10.3390/s18020609).
- [10] M. E. Ibrahim, “Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 64, pp. 36–48, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.010>.
- [11] C. M. Teller and C. M. Fortunko, “NDE Requirements for Thick Marine Composites BT - Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 10B,” D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds. Boston, MA: Springer US, 1991, pp. 1599–1606.
- [12] G. Kotsikos, A. G. Gibson, and J. Mawella, “Assessment of moisture absorption in marine GRP laminates with aid of nuclear magnetic resonance imaging,” *Plast. Rubber Compos.*, vol. 36, no. 9, pp. 413–418, Nov. 2007, doi: [10.1179/174328907X248203](https://doi.org/10.1179/174328907X248203).
- [13] S. Y. Kim, C. S. Shim, C. Sturtevant, D. (Dae-W.) Kim, and H. C. Song, “Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 723–736, 2014, doi: <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0208>.
- [14] M. E. Ibrahim, “7 - Nondestructive testing and structural health monitoring of marine composite structures,” in *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, J. Graham-Jones and J. B. T.-M. A. of A. F.-R. C. Summerscales, Eds. Woodhead Publishing, 2016, pp. 147–183.
- [15] L. S. Sutherland, “A review of impact testing on marine composite materials: Part I – Marine impacts on marine composites,” *Compos. Struct.*, vol. 188, pp. 197–208, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.073>.
- [16] T. Gobikannan *et al.*, “Flexural Properties and Failure Mechanisms of Infusible Thermoplastic- and Thermosetting based Composite Materials for Marine Applications,” *Compos. Struct.*, p. 114276, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114276>.
- [17] S.C. Her and W.-B. Chu, “3D Surface Profile Construction and Flaw Detection in a Composite Structure,” *Strength Mater.*, vol. 51, no. 1, pp. 130–137, 2019, doi: [10.1007/s11223-019-00058-9](https://doi.org/10.1007/s11223-019-00058-9).
- [18] H. Tuwair, J. Drury, and J. Volz, “Testing and evaluation of full scale fiber-reinforced polymer bridge deck panels incorporating a polyurethane foam core,” *Eng. Struct.*, vol. 184, pp. 205–216, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.104>.

- [19] C. Yanen and M. Y. Solmaz, "Ballistic tests of lightweight hybrid composites for body armor," *Mater. Test.*, vol. 61, no. 5, pp. 425–433, 2019, doi: doi:10.3139/120.111336.
- [20] R. Yadav, M. Naebe, X. Wang, and B. Kandasubramanian, "Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 116, pp. 115145–115174, 2016, doi: 10.1039/C6RA24016J.
- [21] N. J. Hoff, S. E. Mautner, and A. E. Rev, "Sandwich construction," 1944.
- [22] F. J. Plantema, "Sandwich construction: the bending and buckling of sandwich beams, plates, and shells," 1966.
- [23] D. Guedra-Degeorges, P. Thevenet, and S. Maison, "Damage Tolerance of Aeronautical Sandwich Structures BT - Mechanics of Sandwich Structures," 1998, pp. 29–36.
- [24] J. Jakobsen, E. Bozhevolnaya, and O. T. Thomsen, "New peel stopper concept for sandwich structures," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 15, pp. 3378–3385, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.03.033>.
- [25] L. A. Carlsson and G. A. Kardomateas, *Structural and failure mechanics of sandwich composites*, vol. 121. Springer Science & Business Media, 2011.
- [26] C. Wang, M. Chen, K. Yao, X. Zhu, and D. Fang, "Fire protection design for composite lattice sandwich structure," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 24, no. 6, pp. 919–927, 2017, doi: doi:10.1515/secm-2015-0525.
- [27] M. Y. Solmaz and E. Çelik, "3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 30, no. 1, pp. 277–286, 2018.
- [28] B. Kiyak and M. O. Kaman, "Hücre Boşlukları Köpük ile Doldurulmuş Kompozit Sandviç Levhaların Basma ve Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi Investigation of Compressive and Bending Strength of Foam Filled Composite Sandwich Plates," vol. 31, no. 1, pp. 47–52, 2019.
- [29] C. Chen, Y. Li, Y. Gu, M. Li, and Z. Zhang, "Effect of MWCNTs added by electrostatic flocking method on adhesion of carbon fiber prepreg/Nomex honeycomb sandwich composites," *Mater. Des.*, vol. 127, pp. 15–21, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.025>.
- [30] Y. Zhou, Y. Xu, H. Liu, Y. Guo, X. Yi, and Y. Jia, "Debonding identification of Nomex honeycomb sandwich structures based on the increased vibration amplitude of debonded skin," *Compos. Part B Eng.*, vol. 200, p. 108233, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108233>.
- [31] M. Jean-St-Laurent, M.-L. Dano, and M.-J. Potvin, "Compression after impact behavior of carbon/epoxy composite sandwich panels with Nomex honeycomb core subjected to low

- velocity impacts at extreme cold temperatures,” *Compos. Struct.*, vol. 261, p. 113516, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113516>.
- [32] T. Fiedler and A. Öchsner, “Experimental analysis of the flexural properties of sandwich panels with cellular core materials,” *Materwiss. Werksttech.*, vol. 39, no. 2, pp. 121–124, Feb. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/mawe.200700269>.
- [33] G. G. Galletti, C. Vinquist, and O. S. Es-Said, “Theoretical design and analysis of a honeycomb panel sandwich structure loaded in pure bending,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 5, pp. 555–562, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.04.004>.
- [34] J. Banghai, L. Zhibin, and L. Fangyun, “Failure mechanism of sandwich beams subjected to three-point bending,” *Compos. Struct.*, vol. 133, pp. 739–745, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.056>.
- [35] S. Shi, Z. Sun, X. Hu, and H. Chen, “Flexural strength and energy absorption of carbon-fiber–aluminum-honeycomb composite sandwich reinforced by aluminum grid,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 84, pp. 416–422, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.015>.
- [36] M. Chuda-Kowalska, Z. Pozorski, and A. Garstecki, “Experimental determination of shear rigidity of sandwich panels with soft core,” *10th Int. Conf. Mod. Build. Mater. Struct. Tech.*, no. November 2014, pp. 56–63, 2010.
- [37] M. O. Kaman, M. Y. Solmaz, and K. Turan, “Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels,” *J. Compos. Mater.*, vol. 44, no. 24, pp. 2819–2831, 2010, doi: [10.1177/0021998310371541](https://doi.org/10.1177/0021998310371541).
- [38] E. Çelik, “3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Mekanik Performanslarının Araştırılması,” M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Fırat University, 2019.