

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Karbon Fiber Kompozit Sandviç Levhaların Yanal Mukavemet Davranışlarının Araştırılması**Burak KIYAK¹, Mete Onur KAMAN²**¹ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ.² Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ.

e-posta: mkaman@firat.edu.tr

Geliş Tarihi: 26.10.2017 ; Kabul Tarihi: 05.07.2018

Özet**Anahtar kelimeler**Karbon fiber; kompozit;
yanal basma testi;
sandviç levha.

Bu çalışmada, çekirdek yapısı ve yüzey kapakları karbon fiber kompozit malzemeden oluşan sandviç levhaların imalatı gerçekleştirilmiştir. Sandviç levhaların çekirdek yapıları kare kesitli olup üretim, herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmadan yapılmıştır. Üretimi tamamlanan numunelerin yanal yüzeylerine, universal çekme-basma test cihazı yardımıyla basma testi uygulanarak kuvvet-yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Farklı çekirdek yüksekliğine ve yoğunluğuna sahip olan numunelerin yanal basma dayanımları hesaplanmış ve hasar davranışları incelenmiştir. Sayısal çalışmada yanal kritik burkulma yükleri ANSYS programında hesaplanarak sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Investigation of Edgewise Strength Behavior of Carbon Fiber Composite Sandwich Plates**Abstract****Keywords**Carbon fiber;
composite; edgewise
compression test;
sandwich plate

In this study, manufacturing of sandwich plates which are made of entirely carbon fiber composite reinforced epoxy resin material was carried out. Core structure of sandwich plates are square cross-section and core structure was fabricated without any adhesively materials. The force-displacement values were saved by applying an edgewise compression test with the help of universal tensile test machine. Then, edgewise compressive strengths of specimens having different cores height and density were calculated and presented as graphical. In the numerical study, edgewise critical buckling loads were calculated in the ANSYS program and the results were compared with experimental data.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Sandviç paneller temelde yüksek mukavemete sahip olan iki ince yüzey kapak ile düşük yoğunlukta ve yüzey kapaklara nispeten daha kalın olan çekirdek yapının birleştirilmesiyle elde edilen yapılardır. Yüzeyler, çekme ve basma gerilmelerine dirençli olacak şekilde tasarlanır ve genellikle alüminyum ve fiber takviyeli polimerlerden oluşurlar. Çekirdek yapı, basma ve kayma gerilmelerine dirençli olacak şekilde tasarlanır ve genellikle ahşap,

köpük, metal ve polimer malzemelerden oluşur (Bhuiyan *et al.* 2009). Lei vd.(2016), yanal basma yükü altındaki köpük dolgululu ve tamamen cam fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilmiş olan sandviç kompozitlerin burkulma ve ezilme dayanımlarını deneysel, teorik ve sayısal olarak incelemiştir. Hou vd. (2014) kirigami tekniğini kullanarak, çekirdek yapısı kevlar takviyeli kompozit malzemeye sahip olan sandviç levha üretmişlerdir. Ürettikleri sandviç levhalara aksenal ve yanal basma testleri uygulayarak dayanımlarını incelemiştir.

Joosten vd. (2010), yanal basma testi uyguladıkları sandviç levhanın enerji absorbe etme özelliğini araştırmışlardır. Fiedler ve Öchsner (2008), farklı hücre tipindeki sandviç yapıların eğilme davranışlarını inceleyerek bu yapıların eğilme dayanımlarını ve hasar tiplerini belirlemişlerdir. Hücre malzemesi olarak; petek, alüminyum, köpük ve küre şeklinde boşluklu metal yapılar kullanmışlardır. Othman ve Barton (2008), statik ve dinamik çarpma yükü etkisindeki petek yapılı kompozit levhalarda hasar başlangıcı ve ilerlemesini araştırmışlardır. Üç nokta eğme deneyi yaparak sandviç levhaların yük taşıma, enerji sönümlenme karakteristikleri ve hasar mekanizmalarını tespit etmişlerdir. Etkili hasar mekanizmalarını; yük temas yüzeyi etrafında basınç hasarı, hücre ezilmesi ve yüzey örtüsü çekme hasarı olarak belirlemişlerdir. Russell vd. (2008), karbon fiber/epoksi kompozit çekirdekli sandviç levhalar üretmişlerdir. Çekirdek üretimi için öncelikle çeşitli fiber yapısına sahip karbon fiber kompozitlere kanallar açmışlar ve daha sonra bu kanallar vasıtasıyla montajını yaptıkları karbon fiber kompozitleri bir yapıştırıcı ile bağlayarak çekirdek üretimini gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri numunelerin basma ve kayma özelliklerini; yoğunluk, hücre yüksekliğinin genişliğine oranı ve hücre yoğunluğunun etkilerine bağlı olarak belirlemişlerdir. Yang vd. (2013), çalışmalarında hibrit karbon fiber kompozit malzemeden üretilmiş piramit kafes çekirdekli sandviç panellerin titreşim sönümlenme özelliklerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca sıcak kalıp presleme yöntemi ile ürettikleri viskoelastik katmana sahip olan ve olamayan sandviç panellerin titreşim sönümlenme özellikleri hakkında bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında hem deneysel hem de sayısal sonuç olarak viskoelastik katmana sahip olan sandviç panellerin titreşim sönümlenme özelliğinde bir artış gözlemlenmiştir. Xiong vd. (2013), karbon fiber kompozit çekirdekli, yumurta kolisine ve piramit şekline benzer iki farklı çekirdek yapısına sahip sandviç yapı üretmişlerdir. Daha

sonra iki farklı çekirdek yapısına sahip bu numunelere, yüzey levhalarındaki büzülme ve kırılma, çekirdek kısmındaki kırılma ve bağlar arası kopma dikkate alınarak üç nokta eğme deneyini uygulamışlardır ve maksimum yer değiştirmeyi deneysel ve analitik olarak bulmuşlardır. Abbadi vd. (2014), yapay kusurlu petek yapılı sandviçler ile kusursuz petek yapılı sandviçlerin yorulma davranışlarını inceleyerek bir karşılaştırma yapmışlardır. Kusurun varlığının, malzemenin statik davranışı üzerinde bir etkisi olmadığı ancak delik tipi arızaya karşı sandviç panel ömrünün çok hassas olduğu sonuçlarına varmışlardır. Xu vd. (2015), çalışmalarında otomatik kesme ve kalıp pres işlemlerine dayalı olarak ürettikleri kademeli kıvrımlı kafes çekirdek yapısına sahip sandviç kirişlerin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca geometrik parametrelerin kafes çekirdekli sandviç kirişlerin eğilme davranışları üzerine etkisini araştırmak için üniform ve kademeli, kıvrımlı kafes çekirdekli sandviç panelleri üreterek test etmişlerdir.

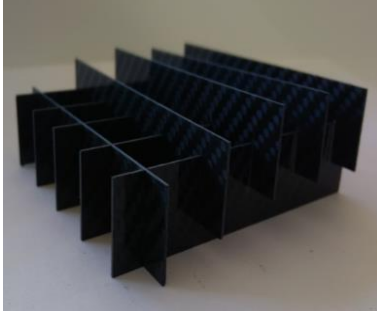
Bu çalışmada, yüzey kapakları ve çekirdek yapısı karbon fiber kompozit malzemeden oluşan sandviç kompozitler üretilmiştir. Çekirdek hücre yapısı olarak kare ve üretim yöntemi olarak iç içe sıkı geçme tekniği kullanılarak, çekirdek yapı herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmadan üretilmiştir. 16 hücreli ve 10 mm çekirdek yüksekliği ile 64 hücreli ve 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip numuneler üretilerek, yüzey kapaklarına paralel yönde yanal basma testleri uygulanmış ve numunelerin yanal basma dayanımları incelenmiştir. Ayrıca yanal basma deneyinden elde edilen sonuçlar, sayısal çalışmalarla desteklenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere sandviç kompozit numunelerin imalatı; çekirdek yapının üretimi ve çekirdek yapı ile yüzey kapakların birleştirilmesi adımlarından oluşmaktadır. Üretilen sandviç levhaların çekirdek ve yüzey kapak malzemeleri örgülü karbon fiber/epoksi kompozit malzemedir.



a)

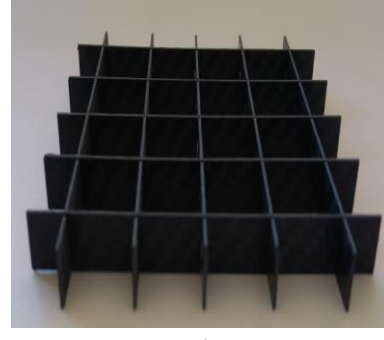


b)

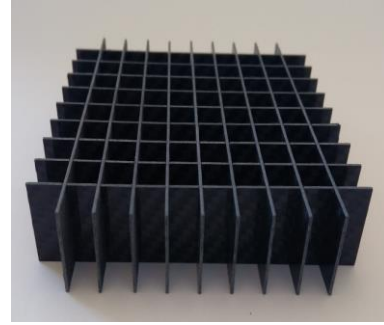
Şekil 1. a) Şerit kompozit malzemeye kanal açma işlemi
b) çekirdek yapı üretimi.

Çekirdek yapı üretimi için öncelikle şerit kompozitlere çekirdek hücre yapısına uygun aralıklarla kanallar açılmıştır (Şekil 1a). Kompozit levhalar 1 mm, açılan kanallar ise 0.9 mm kalınlığındadır. Bu nedenle açılan kanallar yardımıyla şerit kompozitler, herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmadan iç içe geçirilerek çekirdek yapı üretilmiştir (Şekil 1b). Deney numuneleri yanal basma dayanımı etkisini araştırmak amacıyla; $h=10$ mm çekirdek yüksekliğinde 16 hücreli ve $h=20$ mm çekirdek yüksekliğinde 64 hücreli olmak üzere iki farklı tipte üretilmiştir (Şekil 2). Her iki çekirdek yapısına ait numunenin yüzey kapağı 100 mm x 100 mm ölçüsündedir. Yüzey kapağı ve çekirdeği meydana getiren karbon fiber takviyeli kompozit levhalar çapraz örgü dokuma karbon ve epoksi matristen üretilmiş olup, *Fibermak Kompozit Sanayi Ltd. Şti.*, İzmir, firmasından hazır olarak temin edilmiştir.

Sandviç levha üretiminde son adım olarak çekirdek yapı ile yüzey kapakların birleştirme işlemi yapılmıştır. Bu işlem için öncelikle 4 birim *MGS LR160* epoksi reçine ile 1 birim *MGS LH160* sertleştirici malzeme karıştırılarak yapıştırıcı malzeme uygulamaya hazır hale getirilmiş ve ardından bir fırça yardımıyla yüzey kapaklara uygulanmıştır (Şekil 3).



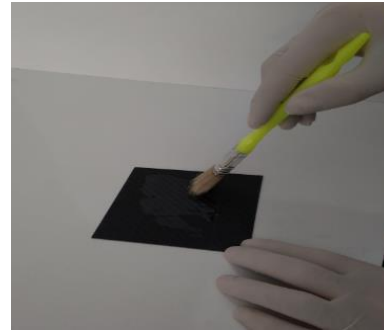
a)



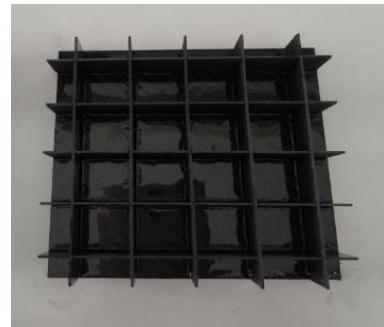
b)

Şekil 2. a) 16 hücreli çekirdek ($h=10$ mm) b) 64 hücreli çekirdek ($h=20$ mm).

Bu işlem sonrasında çekirdek yapı iki yüzey kapak arasına yerleştirilmiştir. Tüm numuneler 20 N'luk ağırlık altında, oda sıcaklığında 24 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır.



a)



b)

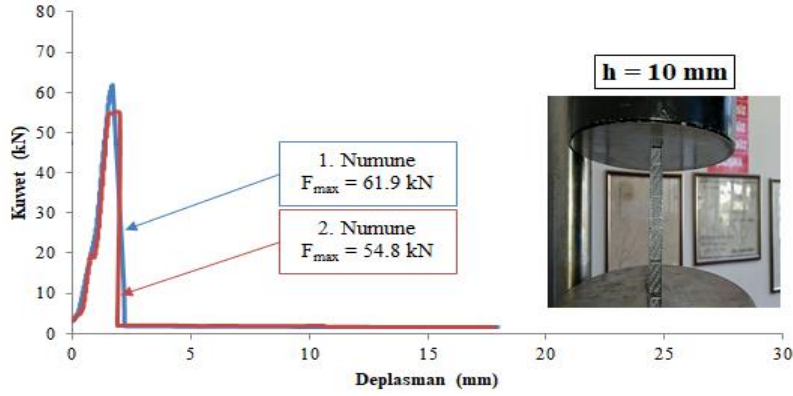
Şekil 3. Yüzey kapağa yapıştırıcı malzeme uygulanması.

2. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

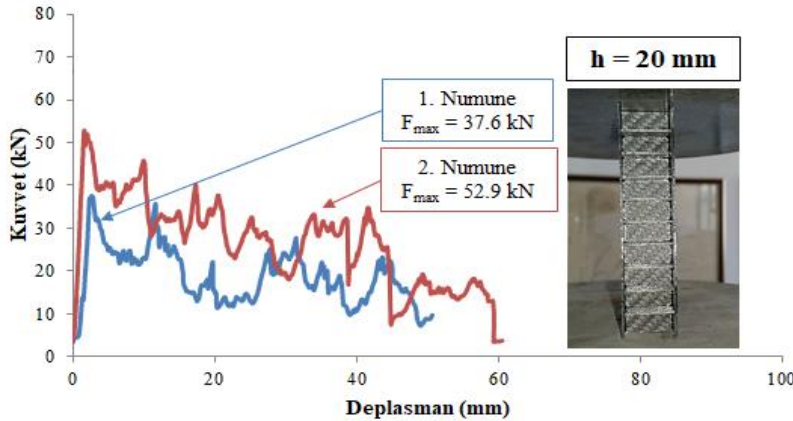
Deneysel çalışmalar, 300 kN kapasiteli *Mohr Federhaff Losenhausen* universal çekme-basma test cihazında, 0.5 mm/dk'lık bir basma hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için aynı tip numuneden 3'er adet üretilip test edilmiştir. Ancak kuvvet deplasman grafikleri üzerinde yakın değerlere sahip olan mantıklı sonuçlar gösterilmiştir. Karbon fiber takviyeli kompozit levhalar lineer elastik malzeme davranışına sahip olduğu için maksimum hasar yüküne kadar yük-deplasman davranışı doğrusal elde edilmiştir. Şekil 4'te 16 hücreli numunenin yanal basma testinden elde edilen kuvvet deplasman grafiği verilmiştir. Bu tip numuneye ait maksimum yanal basma dayanımı 61.9 kN, minimum basma dayanımı 54.8 kN ve ortalama basma dayanımı 58.4 kN olarak hesaplanmıştır. Şekil 5'te ise 64 hücreli numunenin

yanal basma testinden elde edilen kuvvet deplasman grafiği verilmiştir. Bu tip numuneye ait maksimum yanal basma dayanımı 52.9 kN, minimum basma dayanımı 37.6 kN ve ortalama basma dayanımı 45.3 kN olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1'de yanal basma testinden elde edilen, numunelerin maksimum basma dayanımı hemen öncesi ve sonrasına ait görüntüler verilmiştir. 16 hücreli numune için maksimum hasar yükü öncesinde levha ortasında, yüzey kapağının çekirdek yapıdan lokal bölgelerde ayrıldığı görülmüştür. Bu numuneye ait maksimum basma dayanımından hemen sonraki görüntü incelenirse yüzey kapaklar çekirdek yapıdan tamamen ayrılarak numune deforme olmuştur. Bu durum, numuneye ait Şekil 4'teki kuvvet-deplasman grafiğine kuvvette ani düşüş olarak yansımıştır. Bu düşüşte hücre yoğunluğunun düşük olması da etkilidir.

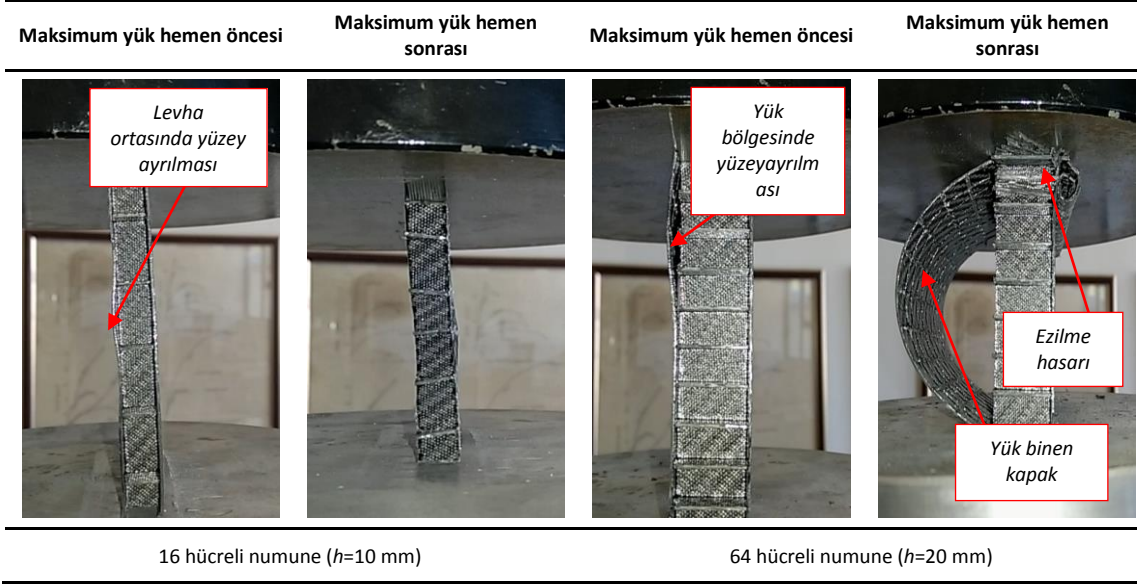


Şekil 416 hücreli numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği.



Şekil 564 hücreli numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği.

Çizelge1 Yanal basma yükü altındaki numunelerde meydana gelen hasarlar.



64 hücreli numuneye ait hasar görüntüleri incelendiğinde ise maksimum yük öncesi numunede meydana gelen hasar tipi yükün uygulandığı noktada ve yakınında başlayan yüzey ayrılması olup 16 hücreli numuneden farklıdır. Dolayısıyla bu tip numunede maksimum yük sonrasında yüzey kapaklarından biri çekirdek yapıdan ayrılırken, diğer yüzey kapak çekirdek yapı ile birlikte ezilerek deforme olmuştur. Dolayısıyla 16 hücreli numunede görülen basma yükündeki ani düşüş bu tip numunede görülmemiştir. Yükün büyük bir kısmı ayrılan tek kapağa binmesi nedeniyle de 10 mm yüksekliğe sahip numuneye göre maksimum hasar yüklerinde nispeten bir azalma elde edilmiştir.

Çizelge 2 Sandviç levhaların sonlu eleman modelleri için eleman ve düğüm sayıları.

Model	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 16 hücreli sandviç levha	2132	6011
20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 64 hücreli sandviç levha	8240	22783

3. Sayısal Çalışma ve Sonuçlar

DeneySEL olarak yanAL basma dayanımı hesaplanmış olan numunelerin sayısal kritik burkulma yüklerinin bulabilmek için ANSYS 13.0 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır (ANSYS, 13.0). DeneySEL numunelerin

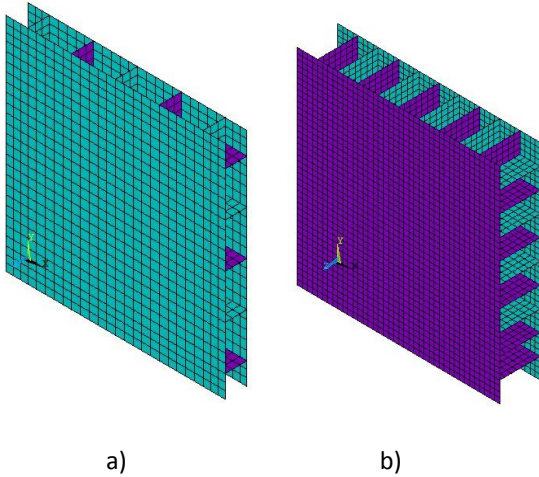
sayısal modelleri hazırlanarak bu modeller için, ince ve orta kalınlıktaki kabuk yapıların analizleri için uygun olan *Shell281* elemanı kullanılmıştır. Bu eleman her düğümde altı serbestlik derecesi bulunan sekiz düğümüne sahiptir. Sayısal çözüm için hazırlanan modellerin eleman ve düğüm sayıları Çizelge 2’de verilmiştir. Analizlerde kullanılan mekanik özellikler, *ASTM D3039* çekme, *ASTM D3410* basma ve *ASTM D7078* kayma test standartlarına göre yapılan deneylerle belirlenmiş ve bu değerler Çizelge 3’te verilmiştir (Kıyak 2017).

Çizelge 3 Çapraz fiber takviyeli / epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri.

Fibere paralel doğrultudaki Elastisite modülü (E_1)	51200 MPa
Fibere dik doğrultudaki Elastisite modülü (E_2)	50800 MPa
Fibere paralel doğrultudaki çekme mukavemeti (X_T)	562 MPa
Fibere dik doğrultudaki çekme mukavemeti (Y_T)	560 MPa
Fibere paralel doğrultudaki basma mukavemeti (X_C)	242 MPa
Fibere dik doğrultudaki basma mukavemeti (Y_C)	233 MPa
Kayma modülü (G_{12})	878 MPa
Poisson oranı (ν_{12})	0.25

Burkulma analizi için Çizelge 3’te verilen kompozit malzeme özellikleri ANSYS programına girilerek modellenen sandviç kompozitler xy düzlemine yerleştirilmiş (Şekil 6) ve sonlu elemanlara bölünmüştür. Sayısal modellerin alt kenarı için yer değiştirme tüm yönlerde sıfır kabul edilirken, üst kenarı için $-x$ ve $-z$ yönlerinde sıfır kabul edilerek $-$

yyönünde yükleme yapılmıştır. Deneyler esnasında yüzey kapağı ile çekirdek arasında yapıştırma hasarı meydana gelmiştir. Modelleme yapılırken deney sırasında, maksimum hasar yükü hemen öncesi oluşan yüzey kapağı ayrılma hasarları sınır şartlarında dikkate alınmıştır. Çünkü oluşturulan modellerde yüzey kapakları ile çekirdek arasında mükemmel birleşim yapılarak model oluşturulmuştur. İstenmeyen bu deneysel hasarların modele eklenmemesi, sayısal sonuçlarda farklılık oluşmasına neden olacaktır. Bu nedenle de; 10 mm yükseklikteki modelde yükün uygulandığı düzlemde bulunan çekirdek ve yüzey kapaklarındaki düğümlerin tamamında yer değiştirmeler sabitlenirken, 20 mm yükseklikteki numunelerde ise yük taşıyan yüzey kapağındaki düğümler sabitlenmiştir.



Şekil 1 Sandviç levhaların sonlu eleman modelleri a) 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 16 hücreli, b) 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 64 hücreli sandviç levha.

Çizelge 4'te her bir numuneye ait deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen kritik yük ve bu iki sonuç arasındaki % değişim değerleri verilmiştir. Deneysel sonuçlarda incelenen numuneler için ortalama değerler alınmıştır. 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 16 hücreli sandviç levhada sayısal kritik burkulma yükü 50 kN olarak elde edilmiş olup, deneysel sonuçlara yaklaşım oranı %14.31'dir. 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 64 hücreli sandviç levha için bu oran ise %13.59 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4 Numunelere ait basma deneyi ve burkulma analizi sonuçları.

Numune	Deneysel sonuç (kN)	Sayısal sonuç (kN)	% Fark
10 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 16 hücreli sandviç levha	58.35	50.00	14.31
20 mm çekirdek yüksekliğine sahip olan 64 hücreli sandviç levha	45.25	39.10	13.59

4. Tartışma

Bu çalışmada, çekirdek ve yüzey kapağı karbon fiber kompozit malzemedan üretilmiş olan kare kesitli hücre yapısına sahip sandviç levhaların yanal basma davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Karbon fiber çekirdekli ve yüzey kapaklı sandviç kompozitlerin üretimleri sıkı geçme yöntemi ile hızlı ve pratik olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olup, oldukça rijit yapılar elde edilmiştir. Sandviç yapıların oldukça zayıf olduğu yanal yüklemeler de bile lineer hasar yükleri 100 cm² yüzey alanına sahip numunelerde ortama 50 kN gibi yüksek değerlerin üzerine çıkabilmektedir. Dolayısıyla bu tip numuneler özellikle hafiflik ve yüksek rijitlik gerektiren havacılık, savunma vb. sektörlerde kullanım alanı bulabilir.
- Çekirdek yapı üretilirken yapıştırıcı kullanılmaması hem maliyet hem de zaman açısından önemli tasarruf sağlayacaktır. Ancak maliyet açısından çekirdek yapıda kullanılacak kompozit levhaların önemi büyüktür. Diğer taraftan unutulmamalıdır ki güncel sandviç yapılarda alüminyum ve kağıt kullanımı fazla olmasına rağmen bu tür bir yapı alüminyuma göre daha hafif, kağıt yapıya göre ise daha mukavemetlidir.
- Kullanılan kompozit levhaların lineer elastik davranışı nedeniyle yanal basma davranışı maksimum hasar yüküne kadar lineer olarak devam etmiştir. Hasar yükünden sonra ise basma yükünde ani bir azalma elde edilmiştir. 10 mm çekirdek yüksekliğine sahip, nispeten hücre yoğunluğu düşük numunelerde bu yük düşüşü sıfıra yakın değerlerde iken, 20 mm çekirdek yüksekliğindeki yüksek yoğunluklu

numunelerde bu düşüş daha azdır. Hücre yoğunluğunun artırılması levha ağırlığını ve maliyeti artıracaktır. Ancak hasar sonrası yük taşıma kapasitesini kısmen koruyacağı da görülmektedir. Tasarımcılar bu noktada ideal hücre yoğunluğunu yanal dayanım için dikkate almaları gerekir.

- Hücre yüksekliğinin fazla artışı basma dayanımında olduğu gibi yanal dayanımı da azaltmaktadır. Ancak bu azalma, hücre yoğunluğunun artırılması sonucu elde edilen mukavemet artışı sayesinde engellenebilmiştir.
- Maksimum hasar yükü öncesi her iki hücre tipinde de, sandviç levhalarda yüzey kapağı ile çekirdek arasında lokal yapışma hasarları meydana gelmiştir. Lokal ayrılmaların olduğu nokta, hasar davranışını da etkilemektedir. Yapıştırıcının seçimi ve ideal bir şekilde uygulamasının önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır.
- Maksimum hasar yükü sonrası sandviç yapıda oluşan hasarlar lineer elastik malzeme özelliği nedeniyle ani ve gevrek kırılmalar şeklinde gerçekleşmiş olup, yanal yükleme sonucu sandviç yapı üzerinde tamir edilmesi zor hasarların oluşmasına sebep olmuştur.
- Sayısal çalışmada deneysel sınır şartlarına uygun olarak yapılan modeller kullanılarak lineer burkulma analizi gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla uyumlu değerler elde edilmiştir. Oluşan kısmi farklar maksimum hasarın hemen öncesinde oluşan lokal ayrılma hasarlarının da modellenmesi ile giderilebilecektir.

Teşekkür

5. Kaynaklar

- Abbadı, A., Tixier, C., Gilgert, J. and Azari Z., 2014. Experimental study on the fatigue behavior of honeycomb sandwich panels with artificial defects. *Composite Structures*, **120**, 394–405.
- ANSYS 13.0, (Academic Teaching Introductory) Command References and Gui.

- Bhuiyan, M., Hosur, M. and Jeelani, S., 2009. Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial ($\pm 45^\circ$) braided face sheets. *Composites Part B: Engineering*, **40**(6), 561–571.
- Fiedler, T. and Ochsner, A., 2008. Experimental analysis of the flexural properties of sandwich panels with cellular core materials. *Material Wissenschaft und Werkstofftechnik*, **39**(2), 121–124.
- Hou, Y., Neville, R., Scarpa, F., Remillat, C., Gu, B. and Ruzzene M., 2014. Graded conventional-auxetic kirigami sandwich structures: flatwise compression and edgewise loading. *Composites: Part B*, **59**, 33–42.
- Joosten, M.W., Dutton, S., Kelly, D. and Thomson, R., 2010. Experimental evaluation of the crush energy absorption of triggered composite sandwich panels under quasi-static edgewise compressive loading. *Composites: Part A*, **41**, 1099–1106.
- Kıyak., B. Karbon fiber kompozit çekirdekli sandviç levhaların imalatı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- Lei, H., Yao, K., Wen, W., Zhou H. and Fang D., 2016. Experimental and numerical investigation on the crushing behavior of sandwich composite under edgewise compression loading. *Composites: Part B*, **94**, 34–44.
- Othman, A.R. and Barton, D.C., 2008. Failure initiation and propagation characteristics of honeycomb sandwich composites. *Composite Structures*, **85**(2), 126–138.
- Russell, B. P., Deshpande, V.S. and Wadley, H.N.G., 2008. Quasistatic deformation and failure modes of composite square honeycombs. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, **3**(7), 1315–1340.
- Xiong, J., Ma, L., Stocchi, A., Yang, J., Wu, L. and Pan S., 2013. Bending response of carbon fiber composite sandwich beams with three dimensional honeycomb cores. *Composite Structures*, **108**(1), 234–242.
- Xu, G., Yang, F., Zeng, T., Cheng, S. and Wang, Z., 2015. Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams. *Composite Structures*, **138**, 342–351.
- Yang, J., Xiong, J., Ma, L., Wang, B., Zhang, G. and Wu L., 2013. Vibration and damping characteristics of hybrid carbon fiber composite pyramidal

truss sandwich panels with viscoelastic layers.
Composite Structures, **106**, 570–580.