

Hücre Boşlukları Köpük ile Doldurulmuş Kompozit Sandviç Levhaların Basma ve Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi

Burak KIYAK¹, Mete Onur KAMAN^{2*}

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ bkiyak@firat.edu.tr, ² mkaman@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/03/2018;

Kabul/Accepted: 01/12/2018)

Özet: Bu çalışmada, çekirdek yapısı ve yüzey kapakları karbon fiber kompozit malzemeden oluşan sandviç levhalar üretilmiş ve çekirdek hücreleri poliüretan köpük ile doldurulmuştur. Sandviç kompozitlerin hücreleri kare kesitli olup çekirdek yapı üretimi, herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmadan yapılmıştır. Üretimi tamamlanan numunelere, basma ve üç nokta eğme testi uygulanarak kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Sonuçta numunelerin basma ve eğilme dayanımları hesaplanmış ve hasar davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, çekirdek yapı hücre boşluklarının köpükle doldurulması, sandviç levhaların basma ve eğilme dayanımlarını önemli oranda etkilememiş, kısmi olarak azalmasına neden olmuştur.

Anahtar kelimeler: Fiber takviyeli kompozitler, sandviç levha, basma testi, eğilme.

Investigation of Compressive and Bending Strength of Foam Filled Composite Sandwich Plates

Abstract: In this study, sandwich plates consisting of core structure and surface plate made of carbon fiber composite material were produced and the core cells were filled with polyurethane foam. The cells of the sandwich composites have square cross-sections and the core structure production is made without using any adhesive material. Force-displacement graphs were obtained by applying compression and three-point bending test to the finished samples. As a result, the compressive and bending strengths of the specimens were calculated and the damage behavior was investigated. The results are presented in graphical form. According to the results obtained from the experimental studies, the foam filling of the core structure cell cavities did not significantly affect the compressive and bending strengths of the sandwich specimens. However, it caused a partial decline.

Key words: Fiber reinforced composites, sandwich plate, compression test, bending.

1. Giriş

Sandviç levhalar; iki ince plaka ve nispeten daha kalın bir çekirdek yapının bir ara yüzey yapıştırıcısı ile birleştirilmesiyle elde edilen ve yüksek mukavemet/yoğunluk oranına sahip olan tabakalı bir kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler günümüzde uzay, deniz ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Çekirdek yapısı alüminyum, yüzey kapakları ise kompozit malzemelerden yapılan sandviç yapılar uçaklarda kanat bölgesinde tercih edilir. Özellikle havacılık sektöründe, malzemelerden beklenen hafiflik ve yüksek dayanım, fiber takviyeli kompozit malzemeler ile sağlanır. Bu üstün özellikleri ile sandviç yapılar bu konu üzerine çalışmaların yoğunlaşmasını sağlamıştır [1-3].

Fiedler ve Ochsner [4], 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. Çekirdek bölgesinin tamamen kompozit malzemelerden üretilmesi ise yeni bir yaklaşımdır. Lim ve Kang [5], basma yükü altında tetrahedral ve kagome kafes şeklinde çekirdek yapılarına sahip olan sandviç levhaların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu iki tip çekirdek yapıdan kagome kafes çekirdek yapısına sahip olan sandviç plakanın daha üstün enerji absorbe etme özelliğine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Xiong ve diğ. [6], 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. Gao ve diğ [7], geliştirdikleri güçlendirilmiş piramidal kafes çekirdek yapıları sandviç yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Xu ve diğ. [8], çalışmalarında

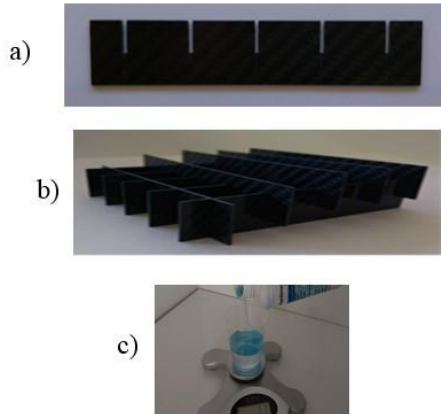
* Sorumlu yazar: mkaman@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-9088-9154, ² 0000-0003-0178-6079

otomatik kesme ve kalıp pres işlemlerine dayalı olarak ürettikleri kademeli kıvrımlı kafes çekirdek yapısına sahip sandviç kirişlerin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Sun ve diğ. [9], ızgara takviyeli petek ara tabakalı kompozit sandviç yapıların mekanik özelliklerini araştırmak için basma testleri yapmışlardır. Bu tipteki bir sandviç yapının özgül rijitliği ve enerji absorbe etme yeteneğinde bir artış gözlemlemişlerdir. Sun ve diğ. [10], üç farklı geometriye sahip kademeli oluklu çekirdek yapısına sahip olan sandviç paneller modelleyerek eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Geometrik parametrenin sandviç yapı eğilme dayanımını ve hasar oluşum türünü nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Wang ve diğ. [11], X-tip kafes çekirdek olarak adlandırdıkları yeni bir çekirdek yapı geliştirmişlerdir. Bu tip çekirdek yapısına sahip sandviç levhaların mekanik özelliklerini ve hasar oluşum türlerini, deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Yu ve diğ. [12], çelik oluklu sandviç yapıların oluk yapısına paralel ve dik olacak doğrultularda eğilme dayanımlarını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Böylece kritik yükü belirlemiş, numunelerde meydana gelen hasar oluşum türlerini ve yapıştırıcı malzemenin hasar oluşumu üzerine etkisini incelemişlerdir.

Sandviç kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar dikkate alındığında, çalışmaların birçoğu sandviç levha çekirdek yapısına yoğunlaşmıştır. Bunun sonucu olarak çekirdek yapının, sandviç levhanın mekanik özellikleri üzerinde büyük etkiye sahip olduğu söylenebilir. Dolayısıyla bu çalışmada da sandviç levha çekirdek yapısı üzerine yoğunlaşmıştır. Geleneksel sandviç malzemelerden farklı olarak çekirdek yapısında karbon fiber kompozit, hücre yapısı olarak kare kesit ve üretim yöntemi olarak ise yapıştırıcı bağlantılar yerine sıkı geçme tekniği kullanılmıştır. Ayrıca hücre boşlukları poliüretan köpük ile doldurularak köpüğün, basma ve eğilme dayanımını nasıl etkilediği incelenmiştir. Basma ve eğilme deneyinden elde edilen sonuçlar grafik şeklinde sunularak, deneysel çalışmalar sonucunda numunelerde meydana gelen hasar oluşum türleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

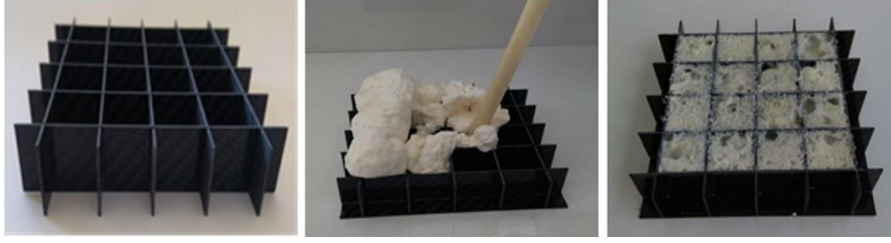
Çekirdek hücre boşluklarının köpük ile doldurulmasının, sandviç yapılarda mekanik özellikler üzerine etkisini incelemek amacıyla basma testi için 100 mm x 100 mm yüzey ölçülerinde, üç nokta eğme testi için 100 mm x 180 mm yüzey ölçülerinde ve 20 mm çekirdek yüksekliğine sahip numuneler üretilmiştir. Üretim tamamen karbon fiber kompozit malzeme kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 1. (a) Kanal açılmış karbon fiber kompozit (b) sıkı geçme ile çekirdek yapı üretimi (c) yapıştırıcı malzemenin hazırlanması [12].

Sandviç kompozitlerin imalatı; çekirdek yapı üretimi ve çekirdek yapı ile yüzey kapaklarının birleştirilmesi adımlarından oluşmaktadır. Çekirdek yapı, yapıyı oluşturan şerit kompozitlere açılan kanallar yardımıyla (Şekil 1.a), herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanılmadan üretilmiştir (Şekil 1b). Üretimi tamamlanan çekirdek yapılar epoksi reçine kullanılarak yüzey kapaklarıyla birleştirilmiştir. Bu işlem için, yapıştırıcı malzeme olarak *MGS LR160* epoksi reçine ve *MGS LH160* sertleştirici kullanılmıştır.

Öncelikli olarak 4 birim epoksi reçine ile 1 birim sertleştirici karıştırılarak yapıştırıcı malzeme uygulamaya hazır hale getirilmiş (Şekil 1.c) ve bir fırça yardımıyla yüzey kapaklara uygulanmıştır. Çekirdek yapı, yapıştırıcı uygulanmış yüzey kapakları arasına yerleştirilerek uygun bir basınç altında 24 saat süre için oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Köpüklü tip numunelerde ise bu işlem, hücre boşluklarına köpük doldurma işleminden (Şekil 2) sonra yapılmıştır.

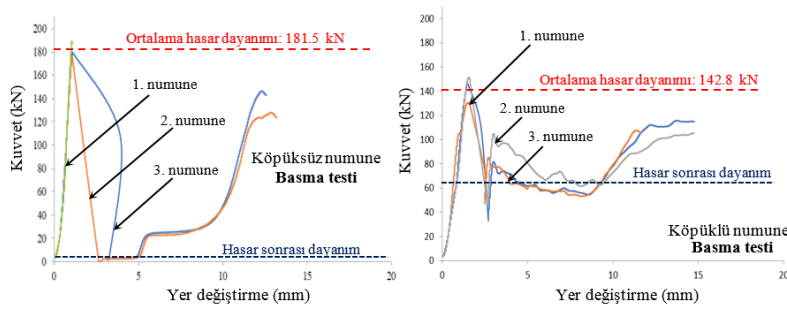


Şekil 2. Hücre boşluklarının poliüretan köpükle doldurulması [12].

3. Sonuçlar ve Tartışma

Üretimi tamamlanan sandviç kompozitlerin mekanik özellikleri, basma ve üç nokta eğme testleriyle belirlenmiştir. Bu işlem için 300 kN kapasiteli universal çekme-basma test cihazı kullanılmış ve deneysel çalışmalar 0.5 mm/dk'lık bir basma hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, daha kesin sonuçlar elde etmek amacıyla her tip numune için üçer kez tekrarlanmıştır. Şekil 3a'da köpüksüz tip numunelerin basma testinden elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Köpüksüz tip numunelerin basma testinden elde edilen maksimum basma dayanımı 189.2 kN, minimum basma dayanımı 176.1 kN ve ortalama basma dayanımı ise 181.5 kN olarak belirlenmiştir [12-13]. Maksimum basma dayanımına sahip olan numuneye, 189.2 kN'a kadar kuvvet uygulanmış ancak numunede herhangi bir deformasyon meydana gelmediği için deney bu noktada sonlandırılmıştır.

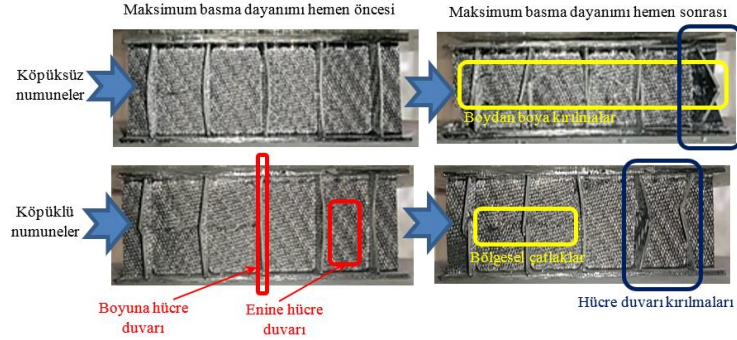
Şekil 3b'de ise köpüklü tip numunelerin basma testinden elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiği verilmiştir. Köpüklü tip numunelerde ise maksimum basma dayanımı 151.4 kN, minimum basma dayanımı 130.6 kN ve ortalama basma dayanımı 142.8 kN olarak belirlenmiştir. Her iki numune tipine ait grafik incelendiğinde, köpüksüz tip numunelerde kritik yük sonrasında kuvvet, ani bir şekilde sıfır noktasına kadar düşmüştür. Köpüklü tip numunelerde de kritik yük sonrası benzer şekilde ani düşüş görülmekle birlikte kuvvet belli bir noktada (~ 60-80 kN arasında) kalmıştır. Bu durumda, kritik yük sonrasında çekirdek yapıda meydana gelen ani kırılma sonucunda numune üzerine gelen darbenin, hücre boşluklarında bulunan köpük tarafından sönümlendiği söylenebilir. Daha sonra ise yükün artmasına bağlı olarak hücre ezilmeleri başlamış ve 10 mm yer değiştirme değerinden sonra yük tekrar artmaya başlamıştır (Şekil 3). Şekil 4'te basma testinden elde edilen maksimum basma dayanımı hemen öncesi çekirdek hücre duvarlarında meydana gelen burkulmalar ve maksimum basma dayanımı hemen sonrası, deforme olmuş numuneler görülmektedir. Numunelerde meydana gelen hasar oluşum türleri; köpüksüz tip numunelerde enine ve boyuna hücre duvarlarında boydan boya ezilme ve kırılma şeklinde, köpüklü tip numunelerde ise enine hücre duvarlarında kısmi çatlaklar ve boyuna hücre duvarlarında kırılma şeklinde olmuştur.



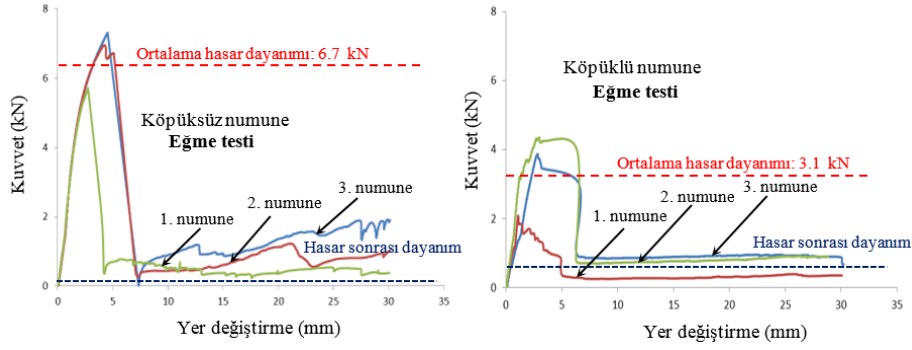
Şekil 3. Basma deneyine ait kuvvet- yer değiştirme grafikleri.

Köpük kullanımının basma dayanımını kompozit yapılarda kısmi olarak [14], özellikle alüminyum çekirdek yapısında [15, 16] artırdığı bilinmektedir. Ancak kullanılan üretim yönteminde çekirdek oluşumunda yapıyı oluşturan köpük kullanılmadığı için, köpük kuruması esnasında ortaya çıkan genişleme basıncı hücre duvarlarına etki ederek, lokal eksen kaymalarına devamında ise erken burkulmaların meydana gelmesine sebep olmuştur. Ayrıca köpük dolgununun minimum hava boşluğu olacak şekilde yapılması önemlidir. Düşük köpük yoğunluğu sandviç dayanımını düşürmektedir [17]. Basma testi tamamlanan köpüklü ve köpüksüz tip çekirdek yapıya sahip olan numunelere üç nokta eğme deneyi uygulanarak eğilme dayanımları tespit edilmiştir. Bu işlem için 100 mm x 180 mm yüzey ölçülerine sahip olan numuneler, aralarında 140 mm mesafe bulunan iki sabit mesnet üzerine, uç

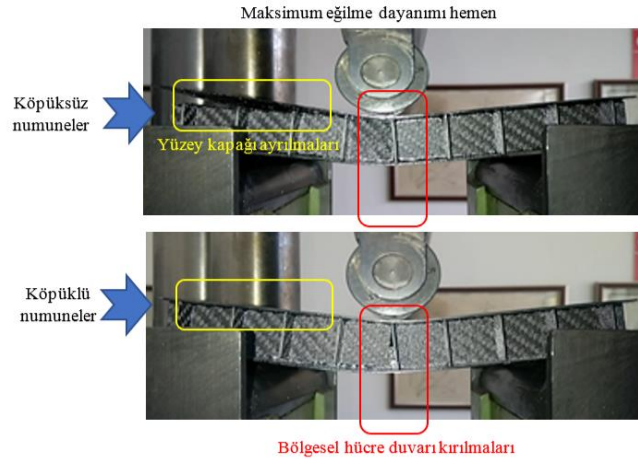
noktalardan 20 mm bırakılarak konumlandırılmış ve orta noktasında kuvvet uygulanmıştır. Şekil 5'te köpüklü ve köpüksüz tip numunelere ait üç nokta eğme testinden elde edilen kuvvet-sehim grafikleri verilmiştir. Üç nokta eğme testinden elde edilen ortalama eğilme dayanımları köpüksüz tip numuneler için 6.7 kN iken köpüklü tip numunelerde bu değer 3.1 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Basma yükü altındaki numunelerde meydana gelen hasar tipleri.



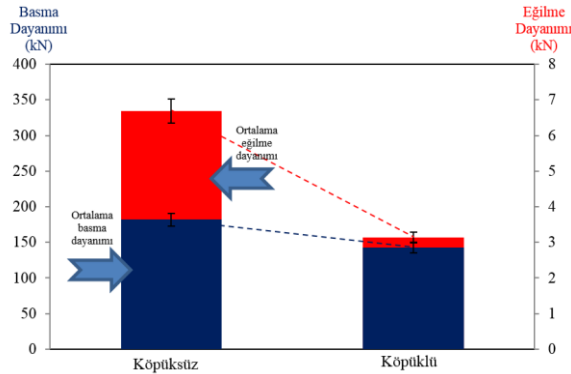
Şekil 5. Üç nokta eğme deneyine ait kuvvet yer değiştirme grafikleri.



Şekil 6. Eğme yükü altındaki numunelerde meydana gelen hasar tipleri.

Verilen grafikler incelenirse, köpüksüz tip numunelerde kuvvet belirli bir noktaya kadar lineer bir şekilde artarken daha sonrasında ise lineerlikten sapmıştır. Lineerlikten saptığı noktada ara yüzey bağlantısını sağlayan yapıştırıcı malzeme hasara uğramış ve yüzey kapak çekirdek yapıdan ayrılmıştır. Bu noktadan sonra yük bir miktar daha artmış ve ikinci hasar olarak çekirdek yapı enine hücre duvarları kırılarak numune deforme

olmuştur. Bu durum ise kuvvet-sehim grafiğinde yükün ani düşmesine sebep olmuştur. Köpüklü tip numunelerde ise kritik yük belirli bir sehim miktarı boyunca yaklaşık olarak sabit kalmış ve yükte ani düşme sonucunda kuvvet sıfır noktasına düşmeden bir kuvvet noktasında sabit kalmıştır. Şekil 6’da ise numunelerin üç nokta eğme testinden elde edilen maksimum basma dayanımı hemen sonrasında ait görüntüler verilmiştir. Her iki tip numune için meydana gelen hasar türleri aynı olup enine hücre duvarlarında kırılma ve yüzey kapakların çekirdek yapıdan ayrılması şeklinde olmuştur. Şekil 7’de numunelerin basma ve eğme testlerinden elde edilmiş olan maksimum ortalama basma ve eğilme dayanımlarına ait değerler gösterilmektedir. Verilen grafik incelenirse hücre boşluklarının köpükle doldurulması numunelerin basma dayanımını %21.3 oranında azaltırken eğilme dayanımının %53.7 oranında bir azalmaya sebep olmuştur. Ancak köpüklü ve köpüksüz numuneler için eğilme dayanımının (sırasıyla: 181.5 kN, 142.8 kN) basma dayanımı (sırasıyla: 142.8 kN, 3.1 kN) yanında oldukça küçük olduğu da unutulmamalıdır.



Şekil 7. Köpüklü ve köpüksüz tip numunelere ait maksimum ortalama basma ve eğilme dayanımları.

Bu çalışmada tamamen karbon fiber/epoksi malzemeden oluşan sandviç levhaların üretimi yapılmıştır. Sandviç levhaların çekirdek yapıları herhangi bir yapıstırıcı malzeme kullanılmadan, sıkı geçme yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla çekirdek hücre boşlukları köpüklü ve köpüksüz olmak üzere iki farklı şekilde üretilen sandviç numunelerin eğilme ve basma dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

- Çekirdek yapı malzemesi olarak alüminyum gibi geleneksel malzemeler yerine karbon fiber kompozit kullanımı sandviç levha dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Üretilen sandviç levhalarda kullanılan kompozit malzemeler nedeniyle 100 mmx100 mm boyutunda yüzey kapağı boyutlarına sahip numuneler için ortalama 181.5 kN değerinde oldukça yüksek basma dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca üretim yöntemi olarak sıkı geçme tekniğinin kullanılması yapıstırıcı malzeme kullanımını ve üretim zamanını büyük oranda azaltmıştır.
- Hücre boşluklarının köpükle doldurulması numunelerin basma ve eğilme dayanımlarını azaltıcı yönde bir etkiye sahip olmuştur. Bu duruma, köpüğün kururken genişmesi ve buna bağlı olarak çekirdek hücre duvarlarına yaptığı iç basınç nedeniyle yapıstırıcı kullanılmaması sonucu hücre duvarlarında kısmi düzlem kaymalarının dolayısıyla da erken burkulmaların sebep olduğu söylenebilir. Ayrıca köpük dolgusunun hücre içerisine ideal yerleştirilmesi de önemlidir.
- Köpük kullanımı, çekirdek bölgesinde yapıstırıcının kullanılmadığı sandviç levha yoğunluğunu kısmen artırmıştır Aynı zamanda basma dayanımlarını %21.3 oranında ve eğilme dayanımlarını ise %53.7 oranında azaltmıştır. Böylece numunelerin mukavemet/yoğunluk oranının azalmasına sebep olmuştur. Bu oranlar incelendiğinde köpük kullanımının eğilme dayanımı açısından bu tip yapılarda önemli bir parametre olduğu görülebilir.
- Sandviç levhalar karbon fiber-epoksi kompozit malzemelerden meydana geldiği için, oluşturulan sandviç levhalar da oldukça rijit olup, gerilme-şekil değiştirme davranışları lineer elastiktir. Dolayısıyla da deneylerde hasarlar ani olarak gerçekleşmiştir. Bu durum ise köpüklü tip numunelerin enerji sönümleme özelliklerini artırmıştır. Köpüklü tip numunelerde hem basma hem de eğilme hasarı sonunda yük sıfırlanmamış, belirli bir yük değerinde ezilme gerçekleşene kadar sabit kalmıştır. İlk hasar yükü sonrası numunelerin mekanik davranışı, köpüksüz numunelere göre daha başarılıdır.
- Levhalarda meydana gelen hasarlar incelendiğinde ise, basma hasarı sonrasında köpüksüz numunelerde bütün yüzeylerde boydan boya gerçekleşen tam kırılmalar meydana gelmiş, dolayısıyla da yukarıda

belirtildiği gibi yük taşıma kabiliyetleri son bulmuştur. Ancak köpüklü numunelerde kısmi, bölgesel çatlaklar oluşmuştur. Eğilmedeki ilk hasarlar ise özellikle yüzey kapaklarında ayrılma ve arkasından yük uygulama noktasındaki bölgesel burkulmaya bağlı kırılma ve devamında gerçekleşen ezilmelerdir. Daha iyi bir eğilme dayanımı sağlamak amacıyla ideal özgül dayanıma sahip olan numuneler ile sandviç levhalarda yüzey kapakları ile çekirdek arasında daha güçlü bir ara yüzey bağlantısı kullanılmalıdır.

- Üretimi gerçekleştirilen bu tip sandviç yapılarda yüksek basma ve eğilme mukavemeti yanında, üretim kolaylığı ve yapıştırıcı kullanılmaması nedeniyle zaman ve maliyet faydaları elde edilmiştir. Ancak köpük kullanımı basma dayanımında kısmi olarak ilk hasar yüklerini azaltmıştır. Buna karşın basma hasarı sonrası yük taşıma kabiliyetlerinin devam etmesi tasarımcıların dikkat etmesi gereken önemli bir parametredir.

Teşekkür

Bu çalışmayı MF 16.57 kodlu FÜBAB projesi kapsamında destekleyen Fırat Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Kaman MO, Solmaz MY, Turan K. Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels. *J Compos Mater* 2010; 44: 2819-2831.
- [2] Solmaz MY, Kaman MO. The effect on the critic buckling load of foam filling on the honeycomb sandwich structures. *e-Journal of New World Sciences Academy* 2010; 5(1): 25-34.
- [3] Solmaz MY, Kaman MO, Turan K, Turgut A. Petek yapılı kompozit levhaların eğilme davranışlarının incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2010; 22: 1-11.
- [4] Fiedler T, Ochsner A. Experimental analysis of the flexural properties of sandwich panels with cellular core materials. *Materialwiss Werkstofftech* 2008; 39: 121-124.
- [5] Lim J, Kang K. Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and kagome truss cores fabricated from wires. *Int J Solids Struct* 2006; 43: 5228-5246.
- [6] Xiong J, Ma L, Stocchi A, Yang J, Wu L, Pan S. Bending response of carbon fiber composite sandwich beams with three dimensional honeycomb cores. *Compos Struct* 2013; 108: 234-242.
- [7] Gao L, Sun Y, Cong L, Chen P. Mechanical behaviours of composite sandwich panel with strengthened pyramidal truss cores. *Compos Struct* 2013; 105: 149-152.
- [8] Xu G, Yang F, Zeng T, Cheng S, Wang Z. Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams. *Compos Struct* 2015; 138: 342-351.
- [9] Sun Z, Shi Z, Guo X, Hu X, Chen H. On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core. *Composites Part B* 2016; 94: 245-252.
- [10] Sun Y, Guo L, Wang T, Zhong S, Pan H. Bending behavior of composite sandwich structures with graded corrugated truss cores. *Compos Struct* 2018; 185: 446-454.
- [11] Wang B, Hu J, Li Y, Yao Y, Wang S, Ma L. Mechanical properties and failure behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced x-type lattice truss core. *Compos Struct* 2018; 185: 619-633.
- [12] Kıyak B, Karbon fiber kompozit çekirdekli sandviç levhaların imalatı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2017.
- [13] Kıyak B, Kaman MO. Manufacturing of sandwich plate with carbon fiber core and effect on mechanical properties of core height. 8th Int. Advanced Technologies Symposium-(IATS'17), 2017; Fırat University, Elazığ, Turkey.
- [14] 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. *Compos Struct* 2014; 108: 304-310.
- [15] Solmaz MY, Şanlıtürk İH, Özben T. Petek yapılı sandviç yapılarda köpük dolgunun kritik burkulma yüküne etkisinin sayısal olarak tespiti. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 2010; Balıkesir.
- [16] Hussein RD, Ruan D, Lu G, Guillow S, Yoon JW. Crushing response of square aluminum tubes filled with polyurethane foam and aluminum honeycomb. *Thin Walled Struct* 2017; 110: 140-154.
- [17] Kadir NA, Aminanda Y, Ibrahim MS, Mokhtar H. Experimental study on energy absorption of foam filled kraft paper honeycomb subjected to quasi-static uniform compression loading. *AEROTECH VI-Innovation in Aerospace Engineering and Technology*, IOP Publishing IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2016;152, 1- 12.