

Ortasında delik bulunan eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışı

Mehmet Emin DENİZ

Batman Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Batman

Makale Gönderme Tarihi: 19.08.2016

Makale Kabul Tarihi: 11.10.2016

Öz

Bu çalışmada, $[\pm 60^\circ]_2$ ve $[\pm 75^\circ]_2$ oryantasyon açılarına sahip E-cam/epoksi esaslı eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışı deneysel olarak araştırıldı. Malzeme olarak $\pm 60^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ elyaf açısında filament sarma yöntemi ile 100-mm çapında üretilmiş kompozit borulardan veya kabuklardan $L=50$, 65 ve 80-mm gibi 3 farklı uzunlukta test numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu test numunelerin bir kısmı deliksiz bir kısmı da 5, 10 ve 15-mm çaplarında ortalarında dairesel delik açılmış ve sonrasında test cihazında burkulma yüküne maruz bırakılmışlardır. Numunelerin burkulma testleri için özel bir aparat tasarlandı ve imal edildi. Daha sonra bu aparat kullanılarak burkulma testleri yapıldı.

Çalışmanın amacı, eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışına elyaf oryantasyon açısı, delik çapının genişliğe oranı ($D/B=0; 0,17; 0,33; 0,5$) ve numune boyunun kalınlığa oranı ($L/t=25; 32,5; 40$) etkilerini araştırmaktır. Çalışmada tüm test parametreleri için kritik burkulma yükleri elde edildi. Her bir parametre için testler 4'er kez tekrarlandı. Yapılan testlerin sonuç verileri kullanılarak grafik eğrileri oluşturuldu. Daha sonra bu grafik eğrileri birbirleri ile karşılaştırıldı. Ayrıca test sonrası burkulma hasarına uğramış $\pm 75^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin resimleri verilerek hasar değişimleri yorumlandı.

Sonuç olarak test numunesinin L/t ve D/B oranları ile elyaf oryantasyon açısının kompozit plakların burkulma davranışı üzerine önemli etkisinin olduğu görüldü. Ayrıca bu parametrelerin hasar biçimleri üzerine de etkilerinin olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: *Burkulma yükü; Eğrisel yüzeyli kompozit; Burkulma davranışı; Elyaf açısı*

Giriş

Kompozit malzemeler, basınçlı kaplar, boru hatları, roket motor gövdesi ve uçak kanadı gibi pek çok alanda artan şekilde kullanılmaktadır. Çoğu kompozit yapılar ya düz plaklar ya da eğrisel yüzeyli plaklar olarak üretilir. Düz plaklar ve kiriş yapılar üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen eğrisel yüzeyli kompozit yapılar üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bundan dolayı bu çalışmada, eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma yükü altında davranışı incelenmiştir. Hilburger ve ark. tarafından ortasından dairesel delikli quasi-izotropik eğrisel panellerin bası yükü altındaki burkulma davranışı araştırılmıştır (Hilburger vd., 2001). Yazarlar hem deneysel hem de numerik olarak elde ettikleri sonuçları mukayese etmişlerdir. Cam/karbon hibrit kompozit tabakaların burkulma dayanımında delaminasyonun etkisi Julius ve ark. tarafından çalışılmıştır (Julius vd., 2014). Dört farklı delaminasyon durumuna sahip simetrik ve anti-simetrik tabaka konfigürasyonu için kritik burkulma yükleri elde edilmiştir. Sonuç olarak yazarlar delaminasyonun kritik burkulma yükleri üzerinde önemli etkisinin olduğunu göstermişlerdir. Bası yükü altında dairesel delikli örgülü cam elyaf-epoksi kompozit plakların yük-deplasman davranışı Hakim ve ark. tarafından araştırılmıştır (Hakim vd., 2010). Lakshminarayana ve ark. tabakalı quasi-izotropik grafit-epoksi kompozit plakların burkulma davranışına hem dairesel hem de eliptik deliklerin etkisini numerik olarak araştırmışlardır (Lakshminarayana vd., 2012). Dairesel ve eliptik deliklerin değişik metal-polyester tabakalı kompozit plakların davranışına etkisini Al-Jameel ve Albazzaz tarafından analiz edilmiştir (Al-Jameel ve Albazzaz, 2014). Elde edilen sonuçlar çok tabakalı plaklar için malzeme tipi ve delik boyutunun oldukça önemli olduğunu göstermiştir. Benzer bir çalışma Kömür ve ark. tarafından da yapılmıştır (Kömür vd., 2010). Yazarlar bir sonlu elemanlar programı kullanarak tabakalı örgülü cam-polyester

kompozit plakların burkulma analizinde eliptik ya da dairesel deliğin etkisini incelemişlerdir. Altan ve Kartal sonlu elemanlar metodunu kullanarak ortasında dikdörtgen şeklinde delik bulunan tabakalı beton plakların burkulma davranışlarını araştırmışlardır (Altan ve Kartal, 2009). Üç farklı örgü sıklığına sahip cam-epoksi tabakalı kompozit plakların burkulma davranışında delik tipi ve yerinin etkisi Tercan ve Aktaş tarafından analiz edilmiştir (Tercan ve Aktaş, 2009). Yazarlar hem örgü sıklığının hem de delik alanının burkulma yüklerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Arun örgülü cam-epoksi tabakalı kompozit plağın burkulma analizi üzerine çalışmıştır (Arun, 2009). Yazar çalışmasında delik şekli, uzunluk/kalınlık ve plak oryantasyonunun burkulma yüküne etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel dairesel, kare ve dikdörtgen şeklindeki delikler açılmış tabakalı kompozitler kullanılarak yapılmıştır.

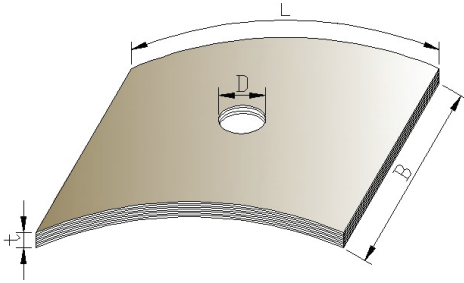
Yukarıda verilen literatür çalışmalarından görülebileceği gibi kompozit kabukların veya eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışı üzerine çok az çalışma yapılmıştır. Bu yüzden bu çalışmada, eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışları numune delik çapının genişliğe oranı (D/B), numune boyunun kalınlığa oranı (L/t) ve elyaf oryantasyonu dikkate alınarak incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Malzeme

Bu çalışmada, $[\pm 60^\circ]_2$ ve $[\pm 75^\circ]_2$ oryantasyon açılarına sahip cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit plakların davranışı araştırıldı. Bunun için kompozit borular filament sarım yöntemi kullanılarak İzoreel firmasında üretildi. 600 Teks ve 17 μm çapına sahip E-cam elyaf takviye elemanı olarak kullanıldı. Matris malzemesi olarak ta CY-225 kodlu Epoksi reçine kullanıldı. Sertleştirici olarak ise Ciba Geigy Anhidride HY-225 kullanıldı. Boruların sarım işleminden sonra kürlenmesi için ilk önce

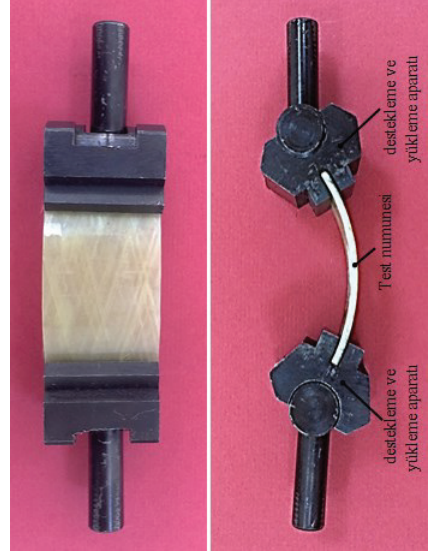
bir fırında 160°C' de 2 saat boyunca bekletildi. Daha sonra kompozit borular burkulma testlerinde kullanılmak üzere üç farklı boyda ($L=50, 65, 80$ -mm) numuneler kesilerek hazırlandı. Deney numuneleri deliksiz ve numunelerin merkezinde 5, 10 ve 15-mm çapında delikler olacak şekilde hazırlandı. Numunelerin ortasına açılmış delikler için bir delme cihazı kullanıldı. Cihazın delik delme hızı 350 rpm (Revolutionsper Minute) olarak seçildi. Her üç delik çapı içinde aynı hız değeri kullanıldı. Şekil 1'de delik açılmış bir numunenin şematik gösterimi verilmiştir. Bu numunede D ; delik çapı, B ; genişlik, t ; kalınlık ve L ; eğrisel yüzeyin boyunu göstermektedir.



Şekil 1. Delikli numunenin şematik gösterimi

Test Düzenegi

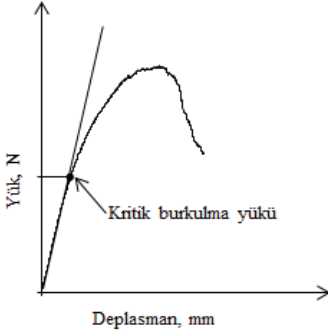
Tüm burkulma testleri, 100 kN'luk yük hücresine sahip SHIMADZU marka bir çekme-basma test cihazı kullanılarak yapıldı. Numunelerin uçları Şekil 2'de görülen özel bir test aparatı kullanılarak cihazın çenelerine bağlantısı yapılmıştır. Aparat öyle tasarlandı ki numunenin uçları sadece burkulma yönünde hareket etmektedir. Aparatın bir ucu cihazın çenesine diğer ucu ise test numunesinin kısa kenarına bağlandı. Numunenin uzun kenarları ise serbest bırakılmıştır. Numunelerin bir kısmı deliksiz olarak teste maruz bırakıldı. Diğerlerinin ise önce merkezlerine 5, 10 ve 15-mm gibi üç farklı çapta delikler açıldı ve sonrasında burkulma testlerine maruz bırakıldı. Hem deliksiz hem de delikli tüm numuneler aynı boyutlarda hazırlandı.



Şekil 2. Test aparatı ve test numunesi

Tüm numuneler, burkulma hasarı oluşuncaya kadar cihaz çene hızı 1 mm/dk olan bir hızda aksel bası yüküne maruz bırakıldı. Her bir numune için kritik burkulma yükü yük-deplasman eğrisinden elde edildi (Şekil 3). Tüm parametrelerde ortalama değeri elde etmek için testler 4'er kez tekrarlandı. Dolayısıyla iki farklı elyaf oryantasyonu için ve ortasında delikli ve deliksiz olmak üzere toplam 96 tane başarılı test numunesi kullanıldı.

Testler esnasında yük ve deplasman verileri bir veri toplama cihazı kullanılarak oluşturuldu. Delikli ve deliksiz kompozit numuneler için kritik burkulma yükleri Şekil 3'te verilen eğriden de anlaşılacağı gibi lineer kısmın hemen bittiği noktanın gösterdiği yük değerleri alındı.



Şekil 3. Yük-deplasman eğrisi üzerinden kritik burkulma yükünün bulunması

Malzeme Özellikleri

Kompozit plakanın mekanik özellikleri için numuneler ASTM D 3039-76 (çeki özellikleri), ASTM D3410 (bası özellikleri) ve ASTM D7078 (Kayma özellikleri) standartlarına göre hazırlanmıştır. Deneyler esnasında cihaz çene hızı 1 mm/dk olarak alınmıştır. Her bir test konfigürasyonu için 4 tane numune kullanıldı. Yani ortalama değer en az dört başarılı testin sonucu alınarak hesaplandı. Mekanik testler sonucunda elde edilen E-Cam/epoksi kompozit plaka için mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. E-Cam/epoksi plakanın mekanik özellikleri

MEKANİK ÖZELLİKLER	DEĞER
E_1	37.4 GPa
E_2	16.1 GPa
G_{12}	7.5 GPa
ν_{12}	0.26
X_T	960 MPa
Y_T	52 MPa
X_C	870 MPa
Y_C	102 MPa
S	92 MPa

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, $\pm 60^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ gibi iki farklı elyafyoryantasyon açısına sahip eğrisel yüzeyli

kompozit plakların burkulma davranışına delik çapının genişliğe oranı ($D/B=0, 0,17, 0,33, 0,5$) ve numune boyunun kalınlığa oranı ($L/t=25, 32,5, 40$) etkileri araştırılmıştır. Çalışmada tüm test parametreleri için kritik burkulma yükleri elde edildi.

Testler, oda sıcaklığında 100 kN yük kapasiteli SHIMADZU AG-X marka çekme-basma test cihazı kullanılarak eğrisel yüzeyli E-cam/epoksi esaslı kompozit numuneler üzerine gerçekleştirilmiştir. Tüm test durumları için ortalama kritik yüklerin belirlenmesi için her bir test 4 kez tekrarlanmıştır. Elde edilen test verileri kullanılarak D/B ve L/t oranları için grafikler elde edilmiştir. Bu grafikler yorumlanarak eğrisel yüzeyli kompozitlerin burkulma davranışları incelenmiştir.

Numune Delik Çapının Genişliğe (D/B)Oranı:

Kritik burkulma yükünün D/B oranına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4-a deliksiz numunelerin verilerini temsil etmektedir. Şekilden görüldüğü gibi deliksiz numunenin her iki elyaf sarım açısında kritik burkulma yükü numune boyu arttıkça düşmektedir. $\pm 60^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin kritik burkulma yükü $\pm 75^\circ$ elyaf sarım açısına sahip olan numuneden daha düşük olduğu görülmüştür. Numune boyu arttıkça her iki elyaf açısına sahip numunelerin kritik burkulma yükleri birbirine daha yakın olmaktadır. Çünkü test süresince yüklemenin belli bir adımından sonra yük elyaflara yanal yönden gelmeye başlamaktadır. Tabakalı kompozit plaklar yanal yönden gelen yüke karşı zayıftırlar. Burada yük taşıma görevini matris malzemesi üstlenmektedir. Bundan dolayı her iki oryantasyon açısındaki numuneler yükleme altında benzer davranışlar göstermektedir.

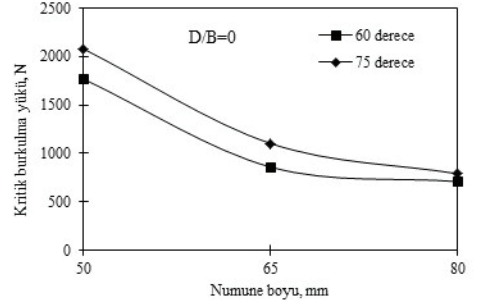
5-mm çapında delik açılmış numuneye ait kritik burkulma yükü Şekil 4-b'de verilmiştir. Burada görüleceği gibi kritik burkulma yükü numune boyunun artması ile azalmaktadır. Elyaf sarım açısının $\pm 60^\circ$ den $\pm 75^\circ$ 'ye artması kritik burkulma yükünü arttırmaktadır. Numune boyu arttığında her iki elyaf açısına sahip kritik

burkulma yükü arasında fark azalmaktadır. Ancak 65 ve 80-mm numune boyutunda her iki deney numunesinin kritik burkulma yükleri arasındaki fark hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür.

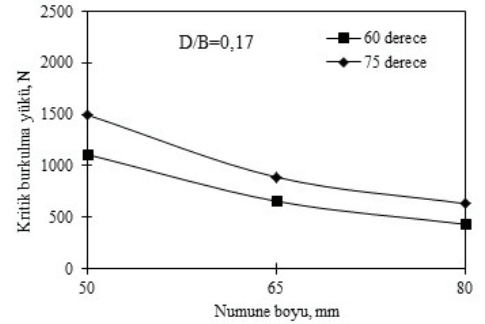
Şekil 4-c'den görüldüğü gibi 10-mm delikli numunenin her iki elyaf sarım açısında kritik burkulma yükü numune boyu arttıkça düşmektedir. Her iki elyaf açısına sahip numunelerin kritik burkulma yükleri arasındaki fark en fazla 50-mm boyuna sahip numunede gözlenirken en düşük ise 65-mm boyuna sahip numunede tespit edilmiştir. Numune boyunun 65-mm'den 80-mm'ye çıkarılması ile iki numunenin kritik burkulma yükü arasındaki fark yeniden artmıştır. Şekil 4-d ise 15-mm çapında delik açılmış numuneye ait kritik burkulma yükleri verilmiştir. Bu grafikten de görülebileceği gibi kritik burkulma yükü numune boyu arttıkça düşmektedir. Her iki elyaf açısına sahip numunelerin kritik burkulma yükü arasındaki farkın en az olduğu numune boyu 65-mm'dir.

Tüm şekillerde aynı numune boyu ve elyaf sarım açısında delik çapının numune genişliğine oranı (D/B) arttıkça kritik burkulma yükü azaldığı görülmektedir. Aynı şartlarda, en büyük kritik burkulma yükü 50-mm boyundaki numunelerde elde edilirken en düşük kritik burkulma yükü ise 80-mm boyundaki numunelerden elde edilmiştir.

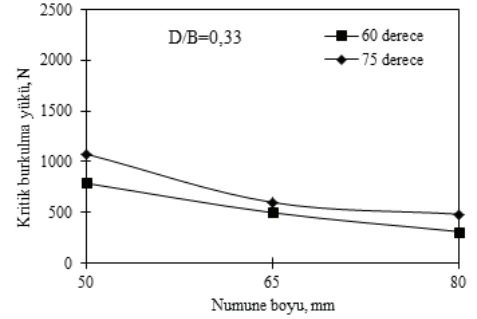
Oryantasyon açısı $\pm 60^\circ$ olan numunelerin boyu arttıkça $D/B=0; 0,17; 0,33; 0,5$ oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %60; %61; %61; %59 değişimler elde edilmiştir. Oryantasyon açısı $\pm 75^\circ$ olan numunelerin boyu arttıkça $D/B=0; 0,17; 0,33; 0,5$ oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %62; %58; %55; %43 düşme gerçekleşmiştir.



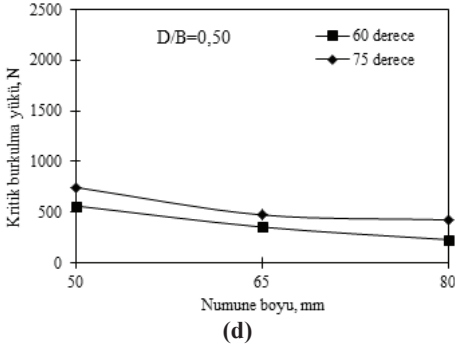
(a)



(b)



(c)



Şekil 4. Dört farklı D/B oranı için kritik burkulma yükleri (a) D/B=0, (b) D/B=0,17 (c) D/B=0,33 (d) D/B=0,5

Numune Boyunun Kalınlığa (L/t) Oranı:

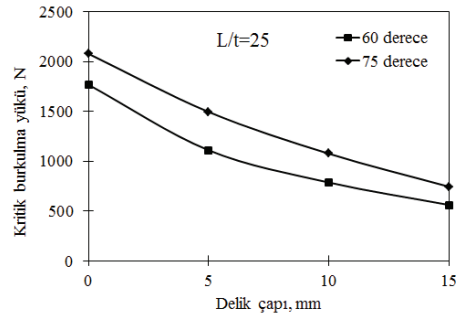
Farklı numune boyunun kalınlığa oranında (L/t), kritik burkulma yüklerinin delik çapına bağlı olarak değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5-a'dan görüldüğü gibi L/t=25 olduğu durumda her iki elyaf sarım açısında kritik burkulma yükü delik çapı arttıkça azalmaktadır. $\pm 60^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin kritik burkulma yükü $\pm 75^\circ$ elyaf sarım açısına sahip olan numuneden daha düşük olduğu görülmüştür. $\pm 60^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin en büyük ve en küçük kritik burkulma yükü deliksiz numunede 1768,3 N ve 15-mm delik çapında ise 562 N olarak tespit edilmiştir. Delik çapı arttıkça her iki elyaf açısına sahip numunenin sahip olduğu kritik burkulma yükü arasındaki fark azalmaktadır.

L/t=32,5 olduğu durumda da her iki elyaf sarım açısında kritik burkulma yükü delik çapı arttıkça azalmaktadır (Şekil 5-b). Delik çapı arttıkça her iki elyaf açısına sahip numunelerin sahip olduğu kritik burkulma yükleri arasındaki fark azalmakla birlikte, kritik burkulma yükleri arasındaki farkın en düşük olduğu delik çapı 10-mm olmaktadır. $\pm 60^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin kritik burkulma yükü $\pm 75^\circ$ elyaf sarım açısına sahip olan numuneden daha düşük olduğu görülmüştür. $\pm 60^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin en büyük ve en küçük kritik burkulma yükü deliksiz numunede 859,25 N ve

15-mm delik çapında ise 353,25 N olarak tespit edilmiştir. $\pm 75^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin en büyük ve en küçük kritik burkulma yükü deliksiz numunede 1103 N ve 15-mm delik çapında ise 473,5 N olarak tespit edilmiştir.

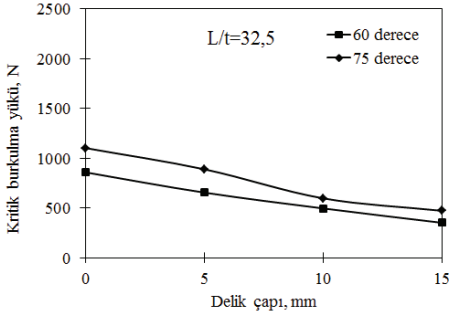
Şekil 5-c'den görüldüğü gibi L/t=40 olduğu durumda da kritik burkulma yükü delik çapının artmasıyla azalmıştır. Delik çapı arttıkça her iki elyaf açısına sahip numunenin sahip olduğu kritik burkulma yükü arasındaki fark artmaktadır. Kritik burkulma yükü arasındaki farkın en düşük olduğu numune deliksiz numunelerdir. $\pm 60^\circ$ elyaf sarım açısına sahip numunenin kritik burkulma yükü $\pm 75^\circ$ elyaf sarım açısına sahip olan numuneden daha düşük olduğu görülmüştür.

Oryantasyon açısı $\pm 60^\circ$ olan numunelerin delik çapı arttıkça L/t=25; 32,5; 40 oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %68; %59; %68 gibi değişimler gözlenmiştir. Oryantasyon açısı $\pm 75^\circ$ olan numunelerin delik çapı arttıkça L/t=25; 32,5; 40 oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %64; %57; %46 düşme gerçekleşmiştir.

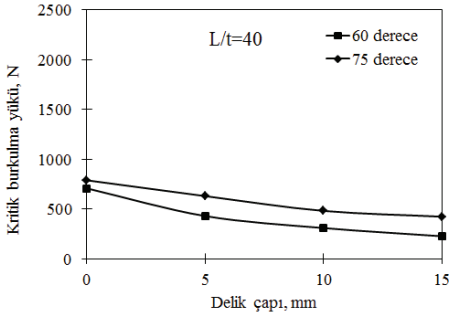


(a)

Ortasında delik bulunan eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışı



(b)

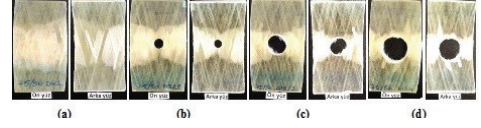


(c)

Şekil 5. Üç farklı L/t oranı için kritik burkulma yükleri (a) L/t = 25, (b) L/t = 32,5 (c) L/t = 40

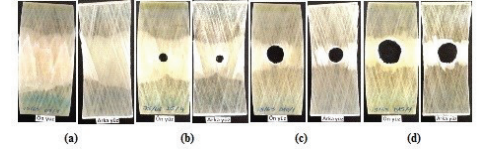
Testlerde numuneler burkulma hasarı oluşuncaya kadar yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu hasarlı numunelerin ($\pm 75^\circ$ elyaf açılı) bir kısmının fotoğrafları Şekil 6-8'de verilmiştir. L=50 mm olan hasarlı numuneler Şekil 6'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi deliksiz numuneler uygulanan bası yükü altında daha iyi direnç gösterdiklerinden dolayı daha büyük hasar alanı oluşmuştur. Delik çapı arttıkça malzeme direnci düştüğünden hasar alanı da düşmektedir. Çünkü numunelerde delik çapı arttıkça bası yükü altında numuneler daha çok esnek davranış göstermektedir. Böylece hasar delik çevresinden başlayarak elyaf yönünde

ilerleyerek numune kenarına ulaşmıştır. Hasar modeli ise kelebek şeklinde oluşmuştur.



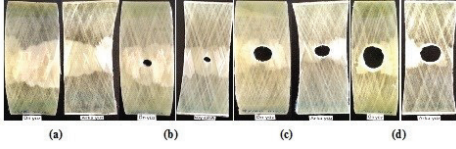
Şekil 6. Burkulma yüküne maruz bırakılmış kompozit numunelerin hasarlı görüntüleri (a) deliksiz, (b) 5-mm delik çaplı, (c) 10-mm delik çaplı ve (d) 15-mm delik çaplı

Şekil 7'de L=65 mm boyuna sahip numunelerin hasar görüntüleri verilmiştir. Burada da L=50 mm boyundaki numunelerin hasar görüntülerine benzer bir hasar biçimi oluşmuştur. Fakat hasar alanının büyüklüğü daha düşük olmuştur.



Şekil 7. Burkulma yüküne maruz bırakılmış kompozit numunelerin hasarlı görüntüleri (a) deliksiz, (b) 5-mm delik çaplı, (c) 10-mm delik çaplı ve (d) 15-mm delik çaplı

Numunelerin en uzun boyu olan L=80 mm için hasar görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi en düşük hasar alanları oluşmuştur. Çünkü numune boyu arttıkça malzeme direnci azalmaktadır. Dolayısıyla numune üzerine gelen bası yükünün bir miktarını esneyerek üzerinden atmaktadır. Yani numune içindeki elyaflar yüklemeye belli bir süre sonra yanıl yönden yüklemeye maruz kalırlar. Bundan dolayı numune esneyerek daha düşük yük değerinde daha geç bir test süresinde burkulma hasarına uğrar. Sonuç olarak numuneler daha az hasara uğrayarak burkulmaya çalışmıştır. Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi burada da numune delik çapı arttıkça daha az hasar alanı oluşmaktadır.



Şekil 8. Burkulma yüküne maruz bırakılmış kompozit numunelerin hasarlı görüntüleri (a) deliksiz, (b) 5-mm delik çaplı, (c) 10-mm delik çaplı ve (d) 15-mm delik çaplı

Sonuçlar

Bu çalışmada, eğrisel yüzeyli kompozit plakların kritik burkulma yüküne elyaf oryantasyon açısı, numune boyunun kalınlığa oranı ve delik çapının genişliğe oranı etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde verilebilir:

- Elyaf oryantasyon açısının değişimi ile kritik burkulma yükü de değişmektedir.
- Numune üzerine açılmış deliklerin çapı arttıkça numune rijitliği düştüğünden dolayı kritik burkulma yükü de azalmaktadır.
- Eğrisel yüzeyli numunelerin boyu arttıkça malzeme rijitliği düştüğünden dolayı kritik burkulma yükü düşmektedir.
- Numune boyu ve delik çapı arttıkça daha küçük hasar alanları oluşmaktadır.
- Oryantasyon açısı $\pm 60^\circ$ olan numunelerin delik çapı arttıkça $L/t=25; 32,5; 40$ oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %68; %59; %68 değişim gerçekleşmiştir.
- Oryantasyon açısı $\pm 75^\circ$ olan numunelerin delik çapı arttıkça $L/t=25; 32,5; 40$ oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %64; %57; %46 düşme gerçekleşmiştir.
- Oryantasyon açısı $\pm 60^\circ$ olan numunelerin boyu arttıkça $D/B=0; 0,17; 0,33; 0,5$ oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %60; %61; %61; %59 değişim gerçekleşmiştir.

- Oryantasyon açısı $\pm 75^\circ$ olan numunelerin boyu arttıkça $D/B=0; 0,17; 0,33; 0,5$ oranları için malzemenin kritik burkulma yükünde sırasıyla %62; %58; %55; %43 düşme gerçekleşmiştir.

Kaynaklar

- Al-Jameel, S. S. ve Albazzaz, R. K. (2014). Buckling analysis of Composite Plate with Central Elliptical Cut-out, *Al-Rafidain Engineering*, 22, 1, 14-25.
- Altan, M. F. ve Kartal, M. E. (2009). Investigation of buckling behavior of laminated reinforced concrete plates with central rectangular hole using finite element method, *Materials and Design*, 30, 2243-2249.
- Arun, K. R. (2009). Buckling analysis of woven glass epoxy laminated composite plate, Master of Thesis, National Institute of Technology Rourkela, Orissa, India.
- Hakim S. Sultan Aljibori, H. S. S., Chong, W.P., Mahlia, T.M.I., Chong, W.T., Edi, P., Anjum, I. ve Zahari, R. (2010). Load-displacement behavior of glass fiber/epoxy composite plates with circular cut-outs subjected to compressive load, *Materials and Design*, 31, 466-474.
- Hilburger, M W., Britt, V. O. ve Nemeth, M. P. (2001). Buckling behavior of compression-loaded quasi-isotropic curved panels with a circular cutout, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 1495-1522.
- Julias. A. A., Mohmeed, S. A. ve Murali V. (2014). Effect of delamination on buckling strength of unidirectional glass-carbon hybrid laminates, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 21, 23-29.
- Komur, M. A., Şen, F., Ataş, A. ve Arslan, N. (2010). Buckling analysis of laminated composite plates with an elliptical/circular cutout using FEM, *Advances in Engineering Software*, 41, 161-164.
- Lakshminarayana, A., Kumar, R. V. ve Rao, G. K. M. (2012). Buckling analysis of quasi-isotropic symmetrically laminated rectangular composite plates with an elliptical/circular cutout subjected to linearly varying in-plane loading using fem, *International Journal of Mechanics*, 6, 1, 1-8.
- Tercan, M. ve Aktaş, M. (2009). Buckling behavior of 1 x 1 rib knitting laminated plates with cutouts, *Composite Structures*, 89, 245-252.

Buckling behavior of curved composite plates with a central circular hole

Extended abstract

In this study, buckling behavior of E-glass/epoxy composite plate with curved surface having $[\pm 60^\circ]_2$ and $[\pm 75^\circ]_2$ orientation angles was investigated experimentally. As test material, 100-mm diameter composite pipes were fabricated using filament winding process at $\pm 60^\circ$ and $\pm 75^\circ$ stacking sequences in Izoreel Firm. The composite specimens were trimmed using a diamond saw after pulling the pipe out of the mandrel. Test specimen lengths were 50, 65 and 80-mm. Some of specimens were coded as "un-holed" the other specimens were holed using drilling machine with velocity of 350 rpm (Revolutions per Minute) at three different central hole sizes such as 5, 10 and 15-mm. The buckling tests were carried out using Universal Shimadzu AG-X testing machine having 100 kN loading capacity at room temperature. In the tests, the cross-head speed of testing machine was chosen as 1 mm/min. The tests were performed using a specially designed and manufactured apparatus which was given in Figure 2.

The aim of this study is to investigate the effect of the fiber orientation, hole diameter/width ratio ($D/B=0; 0,17; 0,33; 0,5$) and specimen length/thickness ratio ($L/t=25; 32,5; 40$) on curved composite plates. Each test parameter was repeated 4 times and average values were calculated. Critical buckling loads were obtained for all of test data.

Figures were created by test data for better understanding of buckling behavior of E-glass/epoxy composite plates. Then these figure curves were compared. As an example images of damaged specimens with $\pm 75^\circ$ orientation are given in Figure 6-8. These damage cases are evaluated.

As a result, it is seen that the fiber orientation, D/B and L/t ratios of test specimens have significant effects on the critical buckling loads of curved composite plates. Also, a similar effect was seen on the damage images.

Critical buckling loads increase with changing fiber orientation (from $\pm 60^\circ$ to $\pm 75^\circ$). The buckling loads decrease by increasing hole diameter with holed specimens with comparing un-holed specimens. So in serves, hole diameter in the buckled composite

plates should be taken into consideration. The critical buckling loads of the composites decrease by increasing specimen lengths due to reduction stiffness. Therefore, decrease in buckling resistance was led to buckling at lower loads. A similar trend was obtained in the buckling damage areas.

Keywords: Buckling load, Curved composite, Buckling behavior, Fiber orientation.