

FİBER TAKVİYE AÇISININ TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN KRİTİK BURKULMA YÜKÜNE ETKİSİ

Murat Yavuz SOLMAZ*, Mete Onur KAMAN*, Kadir TURAN* ve Aydın TURGUT*

*Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ.

ÖZET: Bu çalışmada, çapraz takviyeli cam fiber ve epoksi matriksten üretilmiş tabakalı kompozit levhaların burkulma analizleri, farklı fiber takviye açılarında simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimleri için deneysel ve sayısal olarak yapılmıştır. Öncelikle eksenel basınç yükü altında iki ucundan ankastre mesnetlenmiş ortasında dairesel delik bulunan levhaların deneysel kritik burkulma yükleri bulunmuştur. Daha sonra ANSYS paket programında levhaların sonlu eleman modelleri hazırlanarak sayısal burkulma yükleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak grafikler halinde sunulmuştur. Anti simetrik tabaka dizilimine göre simetrik tabaka dizimli kompozit levhaların burkulma yükleri daha düşük olarak bulunmuştur. Fiber takviye açısının levhaların yüklemeye ekseninden uzaklaşmasıyla da kritik burkulma yüklerinin düştüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kompozit malzemeler, sonlu elemanlar metodu, burkulma analizi.

EFFECT OF FIBER REINFORCEMENT ANGLE TO CRITICAL BUCKLING LOAD OF LAMINATED COMPOSITE PLATES

Abstract: In this study, buckling behaviors of laminated composite plates which are manufactured from woven glass fiber and epoxy matrices are analyzed for symmetric and anti symmetric laminate configurations in different fiber reinforcement angles numerically and experimentally. Firstly, laminated composite plates having circular hole subjected to axial compression load and supported clamped-clamped are founded experimental critical buckling loads. Then, finite element models of composite plates are prepared and their numerical critical buckling loads are calculated by using ANSYS finite element package program. Obtained consequent results are represented graphically. It is obtained that critical buckling loads of anti symmetrically bonded composite plates are bigger than symmetrically bonded. It is seen that critical buckling load decreases with becoming distant of fiber orientation angle from load axis.

Keywords: Laminated composite materials, finite element methods, buckling analysis.

1.Giriş

Çalışma şartlarına göre istenilen özellikte üretilebilmesi mümkün olan tabakalı kompozit levhaların kullanım alanı ve buna bağlı üretim teknolojisi günümüzde hızla gelişmektedir. İnce kesitleri nedeniyle aksel basınç yükü altında burkulma davranışının ve yük taşıma kapasitesinin incelenmesi fiber takviyeli kompozit levhaların önemli bir araştırma alanıdır.

Baba ve Baltacı [1], tabaka diziliminin, süreksizlik şeklinin, levha uzunluğu/kalınlığı oranının e-cam/epoksiden üretilmiş kompozit levhanın burkulma davranışına etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada [90/45/-45/0]_{as} ve [90/45/-45/0]_s olmak üzere iki farklı tabaka dizilimi ve ankastre/ankastre, basit mesnet/ankastre ve de basit mesnet/basit mesnet olmak üzere üç farklı tip sınır şartı kullanılmıştır. Levha ortasında dairesel ve yarı dairesel delik bulunan kompozit levhaların kritik burkulma yüklerini deneysel ve sonlu elemanlar metoduyla sayısal olarak bulmuşlardır. Dairesel delik etrafındaki bir süreksizliğin çapraz dokuma fiber takviyeli kompozit levhaların kritik burulma yüküne etkisi deneysel ve sayısal olarak Arman ve diğerleri [2] tarafından araştırılmıştır. Tabakalı kompozit levhalar için kritik süreksizlik çapının belirlenmesi üç boyutlu burkulma analiziyle yapılmıştır. Levhaların deneysel kritik burkulma yüklerini iki ucu ankastre mesnet kullanarak bulmuş ve daha sonra bu sonuçları sonlu eleman metoduyla yapılan sayısal analizden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Oldukça uyumlu elde edilen bu sonuçlara göre belirli bir süreksizlik çapından sonra kritik burkulma yükünde önemli azalma görmüşlerdir. Sanal [3] ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak basit mesnetli ve kayma yüklemesi altındaki enine desteklenmiş izotropik ve ortotropik dikdörtgen ince plakların, öz değer burkulma analizlerini yapmıştır. Plak analizlerini iki ayrı malzeme grubu; izotropik (yumuşak çelik), ortotropik (Bor-Al metal matrisli kompozit) kullanarak gerçekleştirmiştir. İzotropik ve ortotropik plakları, dikdörtgen ve aynı çeşit malzemelerden yapılmış takviye elemanlarıyla enine destekleyerek kritik burkulma gerilmelerini elde etmiş ve bu değerler desteklenmemiş plak analiz sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Altan ve diğerleri [4] statik düzlemsel yükler etkisindeki, basit mesnetli, tabakalı, dairesel delikli, ortotropik dikdörtgen plakların burkulma analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmışlardır. Örgülü cam fiber ve epoksi matrisli tabakalı kompozit panellerin aksel basınç yükü altındaki davranışları Pein ve Zahari [5] tarafından araştırılmıştır. Ortasında dairesel delik bulunan altı tabakalı kompozit panellerin yük taşıma kapasitelerini fiber takviye açısının ve delik çapının değişimine göre deneysel olarak bulmuşlardır. Öner ve diğerleri [6] tarafından kompozit malzemeden yapılmış burulmaya maruz ince cidarlı dikdörtgen kesitli tüplerin burulma burkulması incelenmiştir. Tüplerin cidarları simetrik çapraz takviyeli ve sekiz tabakalı olarak kabul edilmiştir. ANSYS paket programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle kritik burulma burkulma yükleri bulunmuştur. Çalışmada tüpün uzunluğu, takviye açısı ve kesit boyutlarının kritik burulma burkulma yükü üzerine etkileri araştırılmıştır. Mallela ve Upadhyay [7] ise basit mesnetli tabakalı desteklenmiş kompozit panellerin düzlem kayma yükleri altındaki kritik burkulma yüklerini ANSYS sonlu eleman programını kullanarak hesaplamışlardır. Farklı plaka ve destek kombinasyonları için panellerin burkulma modlarını bulmuş ve burkulma davranışını incelemişlerdir. Walker [8], simetrik dizilmiş tabakalı dikdörtgen plakların değişik takviye elemanlarınca desteklenmesi ile oluşan yapının optimum tasarımını ele almıştır. Farklı sınır şartlarının plakanın optimum fiber açısına olan etkisini sayısal olarak incelemiştir. Guo [9]

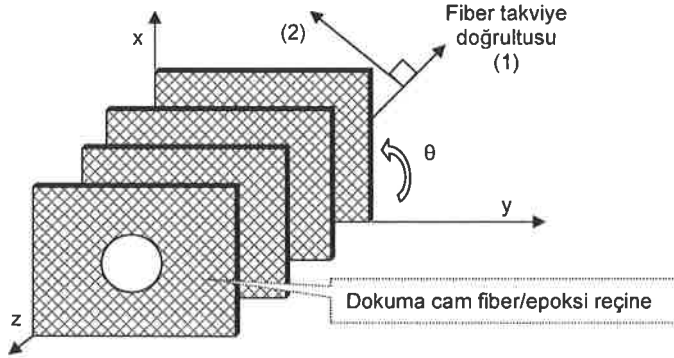
düzlem kayma yükü altında karbon/epoksi kompozit panellerdeki delik etrafında gerilme yığılması ve burkulma davranışını araştırmıştır. Analizde, çeşitli takviye tasarımları için sonlu eleman metodu ve tabaka teorisine dayalı analitik metot kullanılmıştır. Dört deney paneli üretilerek analiz sonuçları test edilmiştir. Çalışmanın sonunda analitik ve deneysel sonuçlar arasında oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ambur ve diğerleri [10] tarafından ortasında dairesel delik bulunan kompozit panellerin eksenel basınç yükü altında burkulma sonrası ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır. Tabaka hasar modları malzeme özellikleri indirgenerek modellenmiştir. Sonlu elemanlar metoduyla elde edilen sonuçlar deneysel hasar yükleriyle karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Jain ve Kumar [11] ortasında delik bulunan simetrik kare tabakaların burkulma sonrası davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemiştir. Çalışmada Mindlin tabaka teorisi ve Von Karman's kabülleri kullanılmıştır. Geliştirilen sonlu eleman denklemleri Newton-Raphson metodu kullanılarak çözülmüştür. İlk tabaka hasarları ve delik şeklinin burkulma yükü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ankastr ve basit mesnetlenmiş simetrik çapraz takviyeli tabakalarda delik şekli ve boyutunun burkulma davranışına etkisi sonlu elemanlar metodu kullanılarak Ghannadpour ve Mohammadi [12] tarafından araştırılmıştır. Delik boyutlarının küçülmesiyle burkulma yüklerinde artış gözlenmiştir.

Delik, çentik vb. geometrik süreksizliğe sahip yapıların burkulma analizi için çözümde kolaylık sağlayan sonlu elemanlar metodunun kullanımının önem kazandığını literatürdeki çalışmalar göstermektedir. Bu çalışmada, laboratuvar şartlarında üretilmiş, ortasında farklı çaplarda dairesel delik bulunan, dokuma örgülü cam fiberle takviyelendirilmiş ve epoksi matriksten oluşan tabakalı kompozit levhaların kritik burkulma yükleri deneysel olarak bulunmuştur. Dört tabakalı kompozit levhaların üç boyutlu katı modeli ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılarak hazırlanmış ve burkulma yükleri sayısal olarak da deneysel sonuçlarla uyumlu hesaplanmıştır. Fiber takviye açısının ve dairesel delik çapının değişiminin levhanın kritik burkulma yüküne etkisi grafiklerle gösterilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deneysel Numunelerinin Hazırlanması

Tabakalı kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak çapraz örgülü dokunmuş cam fiber, matriks malzemesi olarak ise epoksi kullanılmıştır. 100 birim epoksi içerisine 5 birim hızlandırıcı ve sertleştirici katılarak oluşturulan matriks, cam fiber tabakalarına elle yayma metoduyla emdirilerek kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra kalıp içerisindeki dört tabaka cam fiber takviyeli kompozit levhalar, laboratuvar şartlarında 100°C sıcaklıkta ve pres altında bir saat bekletilmiştir. En son aşamada oda sıcaklığında kalıptan çıkarılan levhalar istenilen çaplarda ortasından matkapla delinmiştir. Tabaka dizilimleri $[0/\theta]_2$ anti simetrik ve $[0/\theta]_s$ simetrik olmak üzere belirlenmiştir. θ ; fiber takviye doğrultusu ise 0° , 15° , 30° ve 45° olarak seçilmiştir (Şekil 1). Kompozit malzemelerin levha genişlikleri $W=40$ mm, ortalama levha kalınlıkları $t=1.5$ mm ve delik çapları ise $D=5$ ve 10 mm'dir. Sayısal çalışmada kullanılmak üzere dört tabakalı cam fiber/epoksi kompozitin mekanik özellikleri tespit edilmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.



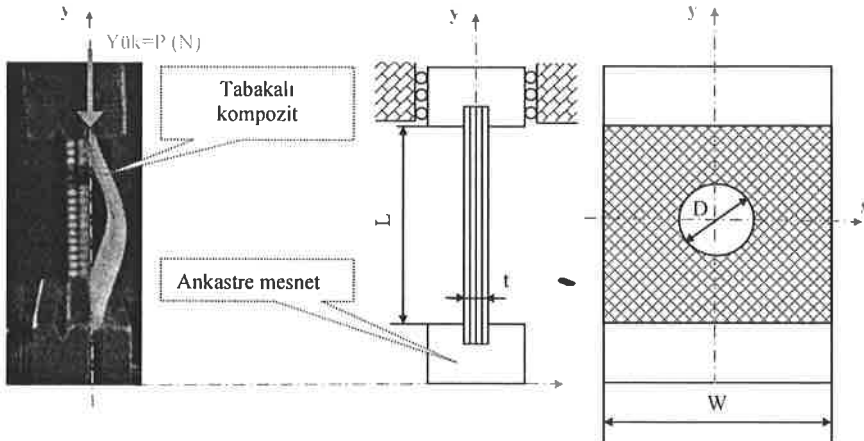
Şekil 1. Dört tabakalı dokuma cam fiber/epoksi reçineden oluşan kompozit levha ve takviye doğrultusu.

Tablo 1. Tabakalı kompozit levhanın mekanik özellikleri.

E_1	5500	MPa
E_2	5500	MPa
E_3	3000	MPa
$G_{12}=G_{23}=G_{13}$	900	MPa
$\nu_{12}=\nu_{23}$	0.25	
ν_{13}	0.20	

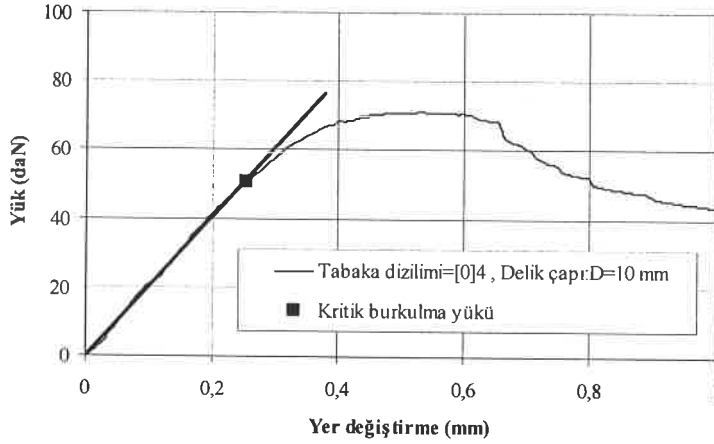
2.2. Deney Düzenegi

İki uçundan ankastre mesnetlenmiş tabakalı kompozit levhaların burkulma yükleri aksenal basınç yükü altında tespit edilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği üzere kompozit levhaların mesnetler arası mesafesi ise $L=40$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Tabakalı kompozit levhanın boyutları ve deneysel sınır şartları.

Deneylerde deliksiz, ortasında D=5 ve 10 mm delikli kompozit olmak üzere üç farklı geometriye sahip numune kullanılmıştır. Deneyler 10 kN kapasiteli UTEST üniversal çekme cihazında 0.5 mm/dak basma hızında gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında numuneler iki çene arasına ankastre mesnetlenmiştir. Cihazın alt çenesi sabit tutulurken üst çeneye ise levhanın eksenî doğrultusunda (y-ekseni) hareket verilerek basınç yükü uygulanmıştır (Şekil 2). Deney sonucunda levhaların yük-yer değiştirme grafikleri çizilerek grafikte doğrusallığın bozulduğu ilk yük noktası tespit edilmiştir. Bulunan bu yük değerleri plakaların kesit alanına bölünerek kritik burkulma gerilmeleri elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Deneysel kritik burkulma yükünün belirlenmesi.

3. SAYISAL ÇALIŞMA

2.1. Sonlu Eleman Modeli

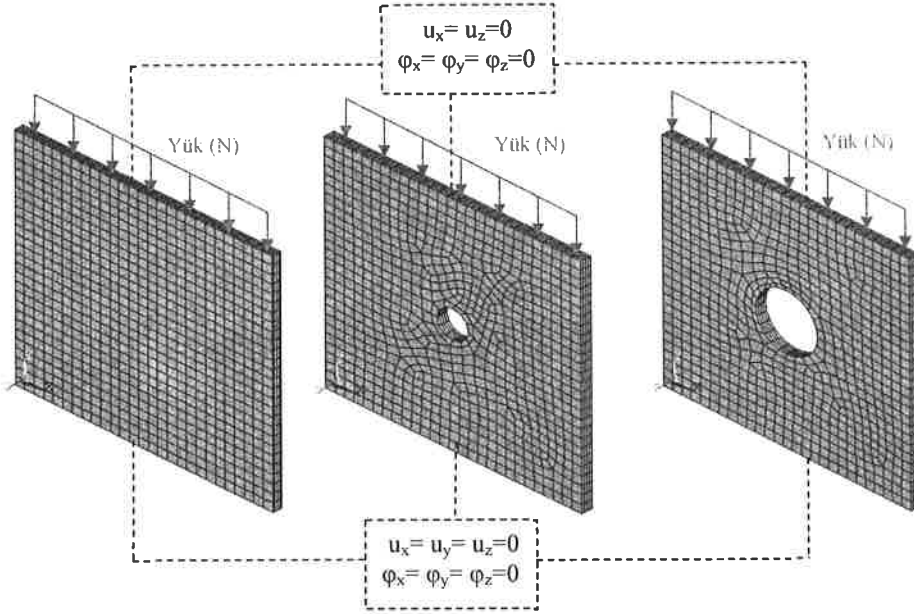
Laboratuvar şartlarında üretilmiş tabakalı kompozit plakların sayısal olarak bulunan kritik burkulma gerilmelerini bulabilmek için çözüm yöntemi olarak sonlu elemanlar metodunu esas alan ANSYS paket programı kullanılmıştır [13]. Farklı fiber takviye doğrultularında tabakalandırılmış levhaların sonlu eleman modellemesinde her bir düğümünde 6 serbestlik derecesine sahip lineer olmayan tabakalı malzeme özelliklerinin modellenmesine olanak sağlayan Solid 191 elemanı seçilmiştir. Sayısal çözüm için hazırlanan modellerin eleman ve düğüm sayıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tabakalı kompozit levhaların sonlu eleman modelleri için düğüm ve eleman sayıları.

Model	Düğüm sayısı	Eleman sayısı
Deliksiz kompozit levha	14616	2916
Ortasında 5 mm delik bulunan kompozit levha	14881	2956
Ortasında 10 mm delik bulunan kompozit levha	14148	2784

2.2. Sayısal Burkulma Analizi

Burkulma analizi gerçekleştirilecek olan plakalar üç boyutlu modellenerek x-y düzlemine yerleştirilmiş ve de z eksenini boyunca tabakalandırılmıştır. Tabakalı kompozit malzemenin Tablo 1'deki mekanik özellikleri ANSYS programına girilerek levhanın sonlu elemanlara bölünme işlemi yapılmıştır. Levhanın alt kenarını ankastre mesnetlemek amacıyla, kenar boyunca tüm düğümlerde yer değiştirmeler ve dönmelerin sıfır olduğu kabul edilmiştir ($u_x = u_y = u_z = 0$, $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$). Levhanın üst kenarında ise yükleme eksenini yönündeki yer değiştirmeler serbest bırakılmış ($u_y \neq 0$), diğer bütün yer değiştirmeler ve dönmeler ise sıfır olarak belirlenmiştir ($u_x = u_z = 0$, $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$). Levhanın üst kenarına kesit boyunca birim gerilme uygulanarak burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm için hazırlanan üç farklı geometriye ait sonlu eleman modeli ve sınır şartları Şekil 4'de gösterilmiştir.

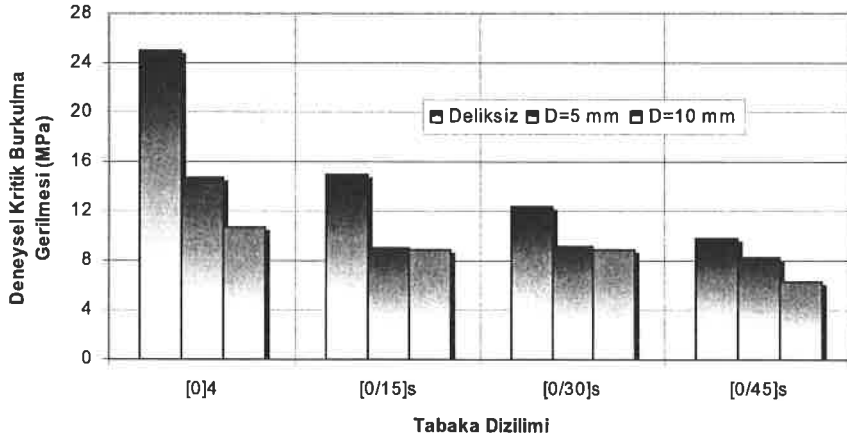


3. SONUÇLAR

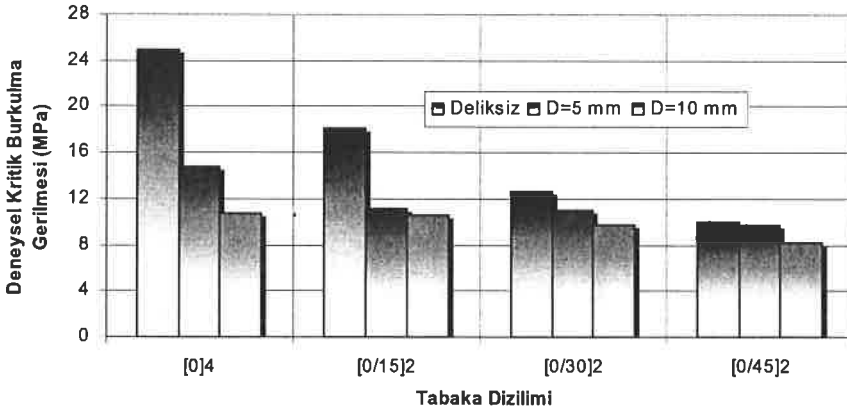
Tabakalı kompozit levhaların aksenal basınç yükü altında hesaplanan deneysel ve sayısal kritik burkulma gerilmeleri farklı fiber takviye açısı, simetrik/anti simetrik tabaka dizilimi ve kompozit levha delik çapları için grafikler halinde sunulmuştur.

Şekil 5'de simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhalarda farklı delik çapları için deneysel kritik burkulma gerilmesinin fiber takviye açısına göre değişimi gösterilmiştir. Fiber takviye açısının değişimi göz önüne alındığında, 0^0 aksenal basınç yükü doğrultusunu göstermek üzere, hem fiber takviye açısının hem de delik çapının artması kritik burkulma

gerilmelerinin azalmasına neden olmuştur. Fiber takviye açıları aynı olan numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde en yüksek kritik burkulma gerilmesinin deliksiz numunelerde elde edildiği, delikli numunelerde ise delik çapı arttıkça kritik burkulma gerilmesinin azaldığı görülmüştür. Simetrik dizilimli numuneler için en yüksek burkulma gerilmesi $[0]_4$ dizilimli deliksiz numunede 25 MPa olarak elde edilirken en düşük burkulma gerilmesi $[0/45]_s$ dizilimde 10 mm delikli numunede 6.36 MPa olarak bulunmuştur. Bu durum eksenel yük doğrultusunda bulunan fiberlerin ($\theta=0^\circ$) taşıyabileceği yük kapasitesinin fiber doğrultusunun yükleme ekseninden uzaklaşmasıyla birlikte azalacağı sonucunu olarak görülmektedir.



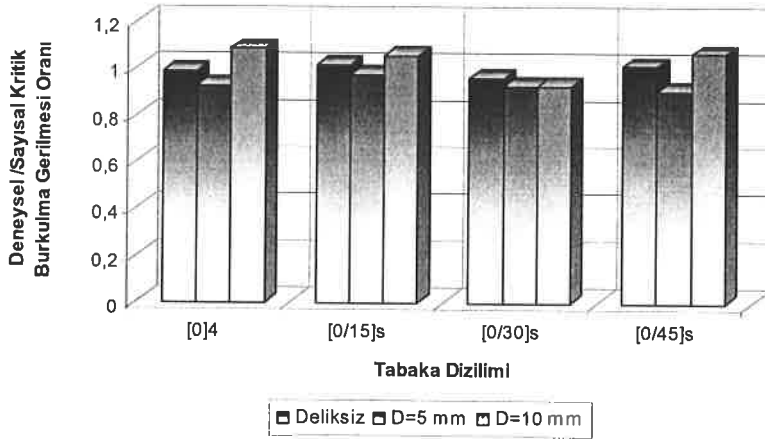
Şekil 5. Simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhada farklı delik çapları için kritik burkulma gerilmesinin fiber takviye açısına göre değişimi.



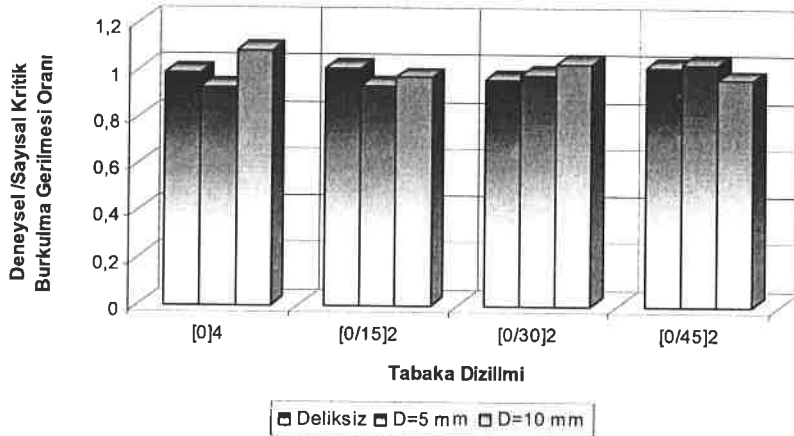
Şekil 6. Anti-simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhada farklı delik çapları için kritik burkulma gerilmesinin fiber takviye açısına göre değişimi.

Benzer durum Şekil 6'da gösterildiği üzere anti simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhalar için de geçerlidir. Anti simetrik tabaka diziliminde de fiber takviye açısının artmasına bağlı olarak levhaların kritik burkulma gerilmelerinde azalma elde edilmiştir. Bununla birlikte en büyük kritik burkulma gerilmelerinin deliksiz levhalarda olduğu görülmüştür.

levhaların kritik burkulma gerilmeleri ile delikli levhaların kritik burkulma gerilmeleri arasındaki fark $[0]_4$ tabaka dizilimde maksimum olup $D=10$ mm için değeri 14.29 MPa'dır (Şekil 6). Bu farkın fiber takviye açısının artmasıyla birlikte azaldığı görülmektedir. $[0/45]_2$ tabaka diziliminde ise en düşük değerine (1.73 MPa) ulaşır. Bu durum simetrik tabaka dizilimi için de geçerlidir. Fiber takviye doğrultusunun aksel yüklemeye doğrultusunda veya yakın doğrultularda olması halinde, levhanın taşıyacağı burkulma gerilmesi üzerinde geometrik süreksizliğin öneminin büyük olduğu söylenebilir. Bu durumda delik, çentik vb. geometrik süreksizliklerin boyutunun artışı, burkulma gerilmelerini azaltmaktadır.



Şekil 7. Simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhada farklı delik çaplarında deneysel kritik burkulma gerilmesinin sayısal kritik burkulma gerilmesine oranının fiber takviye açısına göre değişimi.



Şekil 8. Anti-simetrik tabaka dizilimine sahip kompozit levhada farklı delik çaplarında deneysel kritik burkulma gerilmesinin sayısal kritik burkulma gerilmesine oranının fiber takviye açısına göre değişimi.

Fiber takviye açısının eksenel basınç yükü doğrultusundan uzaklaşması durumunda ise geometrik süreksizliğin boyutu (delik çapı), burkulma gerilmesi üzerindeki önemini kaybetmektedir. $\theta=45^\circ$ olması durumunda kritik burkulma gerilmelerinin geometrik düzensizlik boyutundan ziyade fiber takviye açısından etkilendiği görülmektedir.

Simetrik ve anti simetrik tabaka diziliminin kritik burkulma gerilmesi üzerinde etkisi incelendiğinde ise anti simetrik tabaka dizilimli kompozit levhaların burkulma gerilmelerinin simetrik dizilime göre daha büyük olduğu görülmüştür. $D=5$ mm delik çapı için $[0/15]_s$ tabaka diziliminde kritik burkulma gerilmesi 9.08 MPa iken, $[0/15]_2$ tabaka diziliminde bu değer 11.17 MPa'dır. Benzer durum diğer tabaka dizilimleri için de geçerlidir. 0° fiber takviyelerinin kompozit levhanın sadece dış yüzeylerinde değil ($[0/15/15/0]$) aynı zamanda iç tabakalarında da kullanılması ($[0/15/0/15]$) kompozitin taşıyacağı yük kapasitesini arttırmıştır.

Şekil 7 ve 8'de simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi için elde edilen deneysel burkulma gerilmeleri sayısal kritik burkulma gerilmelerine oranlanması suretiyle normalize edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki yaklaşım oranlarının 1'e yakın olması sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir. Bununla beraber orantısız sonuçlar arasında en küçük değer $D=5$ mm delik çapı için $[0/15]_s$ simetrik tabaka diziliminde 0.905 olarak elde edilmiştir. Bu durumun, hazırlanan deney numunelerindeki ve deney şartlarındaki hatalardan kaynaklandığı söylenebilir. Bu hatalar genel olarak; matriks hazırlama sırasındaki malzemelerin karışım oranları ve ideal karışımı, kalıpların numuneden çıkarılması ve deneysel sınır şartlarının uygulanışı vb. faktörler şeklinde sıralanabilir.

4.TARTIŞMA

Bu çalışmada dört tabakalı cam fiber/epoksi kompozit levhaların eksenel basınç yükü altında burkulma analizi yapılmış ve fiber takviye açısının ve delik çapı değişiminin burkulma gerilmesine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Fiber takviye açısının artmasıyla hem simetrik hem de anti simetrik tabaka dizilimi için kritik burkulma yükü azalmaktadır.
- Delik çapının artmasıyla kritik burkulma yükü hem simetrik hem de anti simetrik tabaka dizilimi için azalmaktadır.
- Simetrik tabaka dizilimine göre anti simetrik tabaka dizilimli kompozit levhaların kritik burkulma yükleri daha yüksektir.
- Eksenel yük doğrultusunda takviyelendirilmiş kompozit levhalarda delik çapının büyüklüğü kritik burkulma yükü üzerinde etkilidir. Fiber takviye açısının artması ve de dolayısıyla yük doğrultusundan uzaklaşmasıyla, bu etki azalır.
- Deneysel ve sayısal kritik burkulma yükleri arasında oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılarak farklı tabaka dizilimi ve kalınlıkları, sınır şartları ve malzeme özellikleri ve de özellikle geometrik yapıları karmaşık durumlar için bu analizler kolayca yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Baba, B.O. and Baltacı, A., "Buckling Characteristics of Symmetrically and Antisymmetrically Laminated Composite Plates with Central Cutout" Applied Composite Materials 14 (4) 265–276, 2007.

- [2] Arman, Y., Zor, M. and Aksoy S., "Determination of Critical Delamination Diameter of Laminated Composite Plates Under Buckling Loads, Composites Science and Technology" 66 (15) 2945–2953, 2006.
- [3] Sanal, Ö., "Kayma Yükleme Altındaki Enine Desteklenmiş İzotropik ve Ortotropik Dikdörtgen İnce Plakların Ansys Sonlu Elemanlar Programı ile Burkulma Analizi" Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi-2006.
- [4] Altan, M.F., Kartal, M.E. ve Dönmez, S., "Dairesel Delikli Ortotropik Plaklarda Burkulma Yükünün İncelenmesi" Teknoloji 8 (1) 25-31, 2005.
- [5] Pein, C.W. and Zahari, R., "Experimental Investigation of The Damage Behavior of Wovenfabric Glass/Epoxy Laminated Plates with Circular Cut-Outs Subjected to Compressive Force" International Journal of Engineering and Technology 4 (2) 260-265, 2007.
- [6] Öner, G.A., Temiz, Ş., Akbulut, H. ve Özel, A., "İnce Cidarlı, Çapraz Takviyeli, Tabakalı Kompozit Tüplerde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Burulmalı Burkulma Analizi" Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi 9 (1) 35-44, 2007.
- [7] Mallela, U.K. and Upadhyay, A., "Buckling of Laminated Composite Stiffened Panels Subjected to in-Plane Shear: A Parametric Study" Thin-Walled Structures 44 (3) 354–361, 2006.
- [8] Walker, M., "The Effect of Stiffeners on The Optimal Ply Orientation and Buckling Load of Rectangular Laminated Plates" Computers and Structures 80 (27-30) 2229–2239, 2002.
- [9] Guo, S.J., "Stress Concentration and Buckling Behavior of Shear Loaded Composite Panels with Reinforced Cutouts" Composite Structures 80 (1) 1–9, 2007.
- [10] Ambur, D.R., Jaunky, N., Hilburger, M. and Davila, C.G., "Progressive Failure Analyses of Compression-Loaded Composite Curved Panels with and without Cutouts" Composite Structures 65 (2) 143–155, 2004.
- [11] Jain, P. and Kumar, A., "Postbuckling Response of Square Laminates with a Central Circular/Elliptical Cutout" Composite Structures 65 (2) 179–185, 2004.
- [12] Ghannadpour, S.A.M., Najafi, A. and Mohammadi, B., "On The Buckling Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates Due to Circular/Elliptical Cutouts" Composite Structures 75 (1-4) 3–6, 2006.
- [13] ANSYS 11.0 Academic Teaching Introductory Help Menu, 2007.