



XVII. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ
5-9 Eylül 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ

KOMPOZİT MALZEMELERE AÇILAN DAİRESEL, KARE, ÜÇGEN ve ELİPTİK KESİTLERİN BURKULMAYA ETKİSİNİN SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI

Ahmet ERKLİĞ* , Eyüp YETER†
Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep

ÖZET

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polyester matrisinden oluşan kompozit plakalarda açılan dairesel, üçgen, eliptik ve kare kesitlerin burkulmaya etkisi sonlu eleman yöntemiyle araştırılmıştır. Nümerik analizler sırasında ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılmıştır. Çalışmalar sırasında, 8 katman $[\theta]_8$ ve 0° , 15° , 30° , 45° ve 60° olmak üzere 5 farklı fiber yönlenme açısı kullanılmıştır. Ayrıca 100, 150, 200, 250 ve 300 mm olmak üzere 5 farklı plaka boyutu ve 0° , 15° , 30° , 45° olmak üzere 4 farklı kesit yerleşim açısı kullanılarak, plaka boyunun, fiber yönlenme açısının, farklı geometrik kesitlerin ve geometrik kesit açılarının kritik burkulma yüküne etkileri araştırılmıştır. Tüm kesit tipleri için fiber yönlenme açısı arttıkça kritik burkulma kuvvetinin azaldığı görülmüştür. En kritik burkulma yükü 45° fiber yönlenme açısı kullanıldığı zaman ortaya çıktığı ve 45° 'den sonra kritik burkulma yükünün artmaya başladığı görülmektedir. Fiber yönlenme açısı 0° iken eliptik kesitin avantajlı, fiber yönlenme açısı 45° iken ise dairesel kesit avantajlı olduğu görülmektedir.

1. GİRİŞ

Birbirine karışmayan iki veya daha fazla malzemenin birleşimiyle oluşan malzemelere **kompozit malzeme** denir [1]. Bu yeni malzemenin özelliği, kendini oluşturan malzemelerin özelliklerinden çok daha üstündür. Başka bir ifadeyle, kompozit malzeme farklı iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerini kullanarak, daha üstün yeni bir malzeme oluşturmaktır. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yüksek özgül mukavemet ve yüksek elastik modülü gibi özellikleriyle pek çok avantajlar sunarlar. Üstün teknik özelliklere sahip olan kompozit malzemeler havacılık sanayi (uçak, helikopter gövde ve çeşitli organları), otomotiv sanayi, denizcilik sanayi vb. gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir. Elektrik kablolarının döşenmesi için, mekanik sistemlere ulaşmak için, kapı ve pencere açmak için veya malzemenin ağırlığını azaltmak için kompozit malzemelerde dairesel, üçgen, eliptik, kare ve benzeri kesitler açılmaktadır. Bu kesitler doğal olarak kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden kompozit malzemelere açılan çeşitli kesitlerin, yapının mekanik özelliklerine etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve araştırılmaya devam edilmektedir.

Çeşitli yükler altında çalışan sistemler aşırı gerilim yoğunluğundan dolayı yani sisteme uygulanan gerilimin malzemenin mukavemet değerinden fazla olmasından dolayı hasar oluşabilmektedir. Bazen ise sistem yükleri mukavemet değerinin çok altında olmasına rağmen ani denge

* Yr. Doç. Dr., Makina Müh. Böl., E-posta: erklig@gantep.edu.tr

† Araştırma görevlisi, Makina Müh. Böl., E-posta: eyeter@gantep.edu.tr

bozukluklarına uğrayıp, hasar oluşabilmektedir. Bu hasara neden olan yük, burkulma yükü olarak adlandırılmaktadır. Matematiksel bir karasızlık olarak da adlandırabileceğimiz burkulma, yüksek yükler altındaki bir yapı elamanının ani şekilde hasar görmesidir. Basınç yükü altında çalışan malzemelerin burkulma yüklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Plakaların burkulma konusu hakkındaki ilk orijinal plak diferansiyel denklemi, Lagrange ve Navier tarafından bulunmuştur. Bulunan orijinal plak diferansiyel denklemine, plak kenarlarından yapılan yükleme ifadelerini Saint Venant eklemiştir. Elastik plak yüzeyinin şekil değiştirme enerjisi üzerine Rayleigh çalışmış, Bryan ise enerji denklemini ilk türeten olmuştur [2]. Timoshenko elastik plak yüzeyinin şekil değiştirme enerjisinde ve genel plak diferansiyel denklemlerinde çift Fourier serisini kullanarak ilk kritik burkulma gerilme ifadesini elde etmiştir [3]. Destek elemanlı plakların kritik burkulma katsayısına olan etkisini Cox ve Riddell tespit etmiş, bunlar hakkındaki ilk yaklaşık çözümü ise Seide gerçekleştirmiştir [4-5].

Farklı kesitler açılmış kompozit malzemelerdeki burkulma etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Avcı ve ark.[6] dairesel kesitler, Britt [7], Ghannadpour ve ark. [8], ve Kömur ve ark. [9] eliptik kesitlerin burkulma yüküne etkisini araştırmışlardır. Akbulut and Sayman [10] kare kesitin kritik burkulma yüküne etkisini araştırmışlardır. Akbulut ve Ural [11] köşesine dairesel çentik açılan kompozit malzemelerde, bu çentiklerin kritik burkulma yüküne etkisini araştırmışlardır. Baltacı ve ark. [12] tabakalı kompozit malzemelere açılan dairesel kesitlerin kritik burkulma yüküne etkisini araştırmışlardır. Yazıcı [13] polimer matris kompozitlere açılan kare kesitlerin burkulma yüküne etkisi araştırmıştır.

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli ve polyester matrisinden oluşan kompozit plakalarda açılan dairesel, üçgen, eliptik ve kare kesitlerin burkulmaya etkisi sonlu eleman yöntemiyle araştırılacaktır. Nümerik analizler sırasında ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılacaktır. Çalışmalar sırasında, 8 katman $[\theta]_8$ ve 0° , 15° , 30° , 45° ve 60° olmak üzere 5 farklı fiber yönlenme açısı kullanılmıştır. Ayrıca 100, 150, 200, 250 ve 300 mm olmak üzere 5 farklı plaka boyutu ve 0° , 15° , 30° , 45° olmak üzere 4 farklı kesit yerleşim açısı kullanılarak, plaka boyunun, fiber yönlenme açısının, farklı geometrik kesitlerin ve geometrik kesit açılarının kritik burkulma yüküne etkileri araştırılacaktır.

2. MALZEME ve YÖNTEM

2.1 Malzeme Özellikleri

Modellemeler ve analizlerde cam elyaf takviyeli polyester matrisinden oluşan kompozit tabakalar kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan modeller 1.6 mm kalınlık ve 8 tabakadan $[\theta]_8$ oluşmaktadır ve tabakalarda 0° , 15° , 30° , 45° ve 60° fiber yönlenme açıları kullanılmıştır. Cam elyaf- polyester kompozit malzemenin malzeme özellikleri tablo 1'de verilmiştir. [9]

Tablo 1: Malzeme Özellikleri [9]

$E_1 = E_2$ (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	$X_t = Y_t$ (MPa)	$X_c = Y_c$ (MPa)	S (MPa)	V_f (%)
31,610	3,220	0.206	344	359	82	76

2.2 Burkulma Yüklerinin Teorik Hesabı

Orta düzlem simetrisi durumuna göre burkulma liner olmayan bir etkidir. Aşağıda düzlem gerinim denklemleri verilmektedir. [14]

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 ; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 ; \varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Plaka için burkulma karakteristiğini hesaplayan eşitlik ortografik malzeme için aşağıda verilmiştir.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (2)$$

Yanal sapma ile düzlem yükleri arasındaki bağlantı 2 numaralı eşitlikte açık bir şekilde görülmektedir. Fakat gerçek analizler sırasında yanal yüklerden dolayı aşırı gerilimler meydana gelir ve burkulma yüküne ulaşmadan malzeme hasara uğrar. Sadece eksenel yüklerin etkisine baktığımız zaman eşitlik denklem 3'e dönüşür.

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

Kompozit tabakanın burkulma modunu, izotropik malzemenin burkulması gibi düşünecek olursak ve aynı sınır koşullarını uygulayacak olursak ve aşağıda verilen Navier çözümünü kullanacak olursak 5 numaralı eşitliği elde ederiz. [14]

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4)$$

$$P_{kr} = N_{xkr} = -\frac{\pi^2 a^2}{m^2} [D_1 \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2D_3 \left(\frac{m}{a}\right)^2 \left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_2 \left(\frac{n}{b}\right)^4] \quad (5)$$

Burada;

$$D_1 = D_{11}, \quad D_2 = D_{22}, \quad D_3 = D_{12} + 2D_{66}, \quad (6)$$

6 numaralı denklemdeki bilgileri kullanarak aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$P_{kr} = \pi^2 [D_{11} \left(\frac{m}{a}\right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_{22} \left(\frac{n}{b}\right)^4 \left(\frac{a}{m}\right)^2] \quad (7)$$

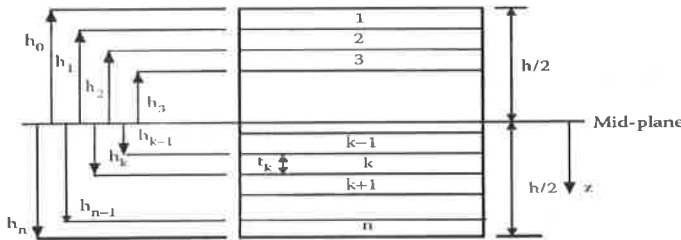
Denklem 7'ye göre yine bazı bilgiler açıkça görülmektedir: Denklem homojen bir denklemdir. Önemli olan bu denklemin en küçük değerini hesaplamaktır. Fakat m ve n'nin bu denklemin en küçük değerinde ne olacağı açık değildir. Kullanılan sınır koşuluna (1kenarı sabitlenmiş ve diğer kenarı basit mesnetli) göre n=2'dir. Fakat m rijitlik matrisinin D₁₁, D₁₂, D₂₂ ve D₆₆ ve plakanın boy genişlik oranına (a/b) göre değişmekte birlikte ve verilen plakanın özelliklerine göre kolayca hesaplanabilmektedir.

n=1 için 7 numaralı denklem aşağıdaki denkleme dönüşür.

$$P_{kr} = \pi^2 [D_{11} \left(\frac{m}{a}\right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{2}{b}\right)^2 + D_{22} \left(\frac{2}{b}\right)^4 \left(\frac{a}{m}\right)^2] \quad (8)$$

Burada D₁₁, D₁₂, D₂₂ ve D₆₆ Eğilme rijitlik matrisinin bileşenleridir ve 9 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), \quad i, j = 1, 2, 6; \quad (9)$$



Şekil 1: Katmandaki tabakaların yerleşim koordinatları

h değerleri 1 numaralı şekilde verilmiştir ve formüllerini aşağıdadır;

$$h = \sum_{k=1}^n t_k ; h_0 = -\frac{h}{2} (\text{üst yüzey}) ; h_1 = -\frac{h}{2} + t_1 (\text{üst yüzey}) ; h_2 = -\frac{h}{2} + t_2 ; \dots \quad (10)$$

$$h_{k-1} = -\frac{h}{2} + \sum_{t=1}^{k-1} t (\text{üst yüzey}) ; h_k = -\frac{h}{2} + \sum_{t=1}^k t (\text{alt yüzey}) ; k = 2, 3, \dots, n-2, n-1 \quad (11)$$

Her katman için indirgenmiş rijitlik matrisini [Q] hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} ; Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} ; Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} ; Q_{66} = G_{12} \quad (12)$$

Dönüştürülmüş rijitlik matrisini \bar{Q} hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılır.

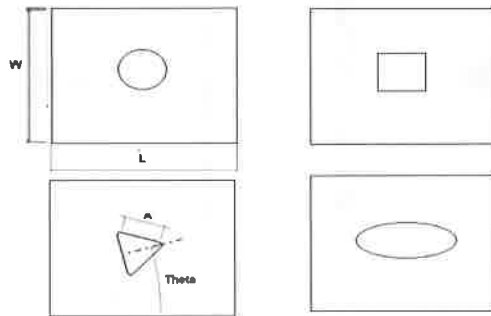
$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}(\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66}(\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \end{aligned} \quad (13)$$

Burada ; [Q] rijitlik matrisi ve θ katman açısıdır.

2.3 Sonlu Eleman Analizleri

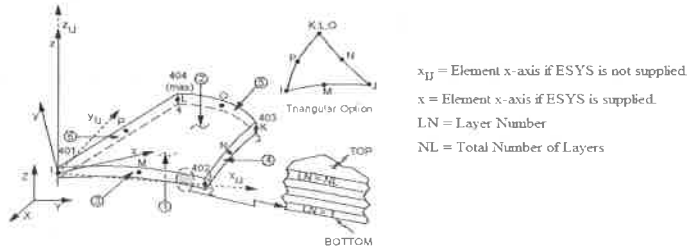
Burkulma analizleri sonlu eleman analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde kompozit plakaya açılan dairesel, üçgen, eliptik ve kare kesitlerin burkulma üzerine etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik analizler sırasında ANSYS paket programı kullanılmıştır. Çalışmalar sırasında kesitin büyüklüğü, açısı, kullanılan plakanın boyutu ve fiber yönlenme açısının kritik burkulma yüküne etkisi araştırılmıştır.

Analizler sırasında daire, kare, üçgen ve eliptik olmak üzere 4 farklı kesit kullanılmıştır (şekil2). Analizler sırasında plaka boyutları olan W (boy) ve L (uzunluk) değerleri eşit olmak üzere toplamda 5 farklı plaka boyutu kullanılmıştır. Plakaların kalınlığı 1.6 mm alınmış ve her bir katman kalınlığı 0.2 alınarak 8 katman kullanılmıştır. Analizler sırasında tüm kesit tipleri için üç farklı alan kullanılmış, alanlar kesit çeşitlerinde sabit tutulmuştur. Üçgen kesit için kenar uzunlukları sırasıyla, 20, 30, ve 40 mm alınmış ve diğer kesitlerde de üçgen kesit tipinde oluşan alanları oluşturacak kenar veya yarıçap değeri kullanılarak eşit alanlar oluşturulmuştur. Ayrıca 0°, 15°, 30°, 45° ve 60° olmak üzere 5 farklı fiber yönlenme açısı ve 0°, 15°, 30°, 45° olmak üzere 4 farklı kesit yerleşim açısı kullanılmıştır. Toplam 1200 sonlu eleman analizi gerçekleştirilmifitir.



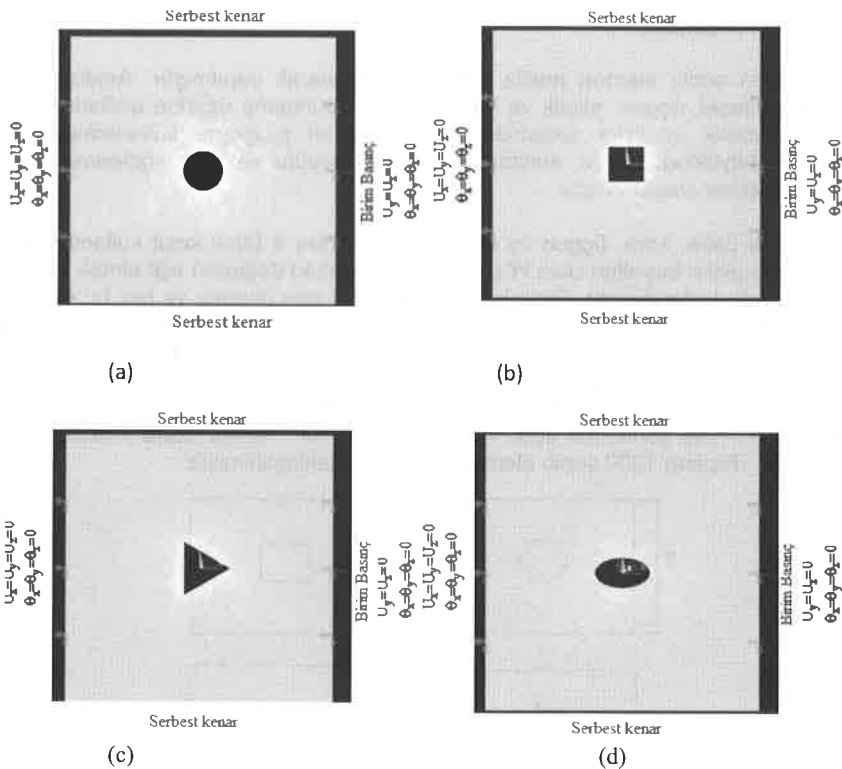
Şekil 2: Analizlerde kullanılan modeller

Analizler sırasında SHELL91 [15] olarak adlandırılan ve ANSYS paket programında bulunan eleman tipi kullanılmıştır. SHELL91 eleman tipi özellikleri şekil 3'de görülmektedir.

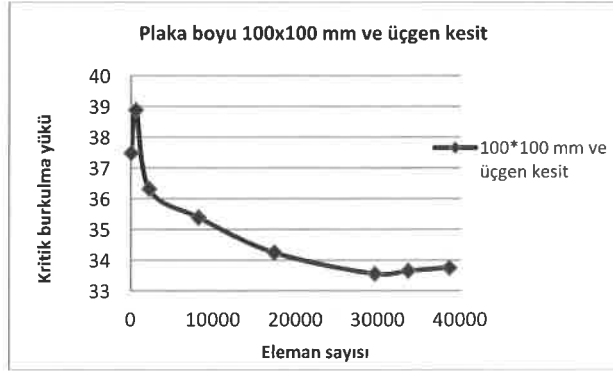


şekil 3: SHELL91 eleman özellikleri [15]

Analizler sırasında kullanılan ađ yapısı örnekleri şekil 4'de verilmiştir. şekil 4'de de aıķķa görüldüğü zere, plakanın iki kenarı serbest bırakılmış ve diğer iki kenar ise yk uygulanan kenarın x yönü hariĉ diğer yönlerden tutulmuştur. Her analiz iĉin farklı ađ yapısı kullanılmış fakat toplam da ađ yapısının etkisi engellemek iĉin, kritik burkulma yükünün eleman sayısına göre değişimine bakılarak, uygun ađ yapısı elde edilmiştir. ĉgen kesit iĉin kritik burkulma yükünün eleman sayısına göre değişimi şekil 5'de verilmektedir.



şekil 4: Ađ yapısı ve sınır koşulları (a) dairesel kesit, (b) kare kesit, (c) ĉgen kesit, (d) eliptik kesit



Şekil 5: Kritik burkulma yükünün eleman sayısına göre değişimi

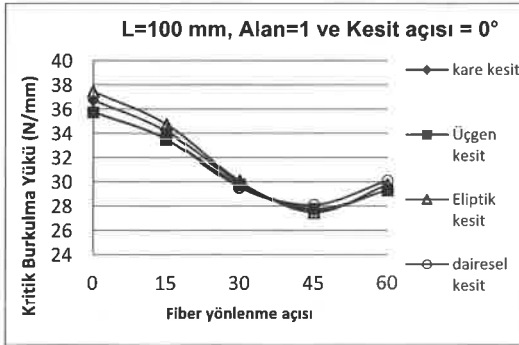
3. SONUÇLAR VE İRDELEMELER

Bu çalışmada nümerik analizlerden önce, bölüm 2.2'de verilen 8 numaralı formül kullanılarak, kesit açılmamış 0° fiber yönlenme açısına ve 1.6 mm kalınlık ve 8 katmandan oluşan 100x100 mm kompozit plakanın kritik burkulma yükü hesaplanmış ve nümerik analizle de hesaplanarak kıyaslanmıştır. Sonuçlar tablo 3'de verilmiştir. Görüldüğü üzere sonuçlar arasında iyi bir uyuma görülmektedir.

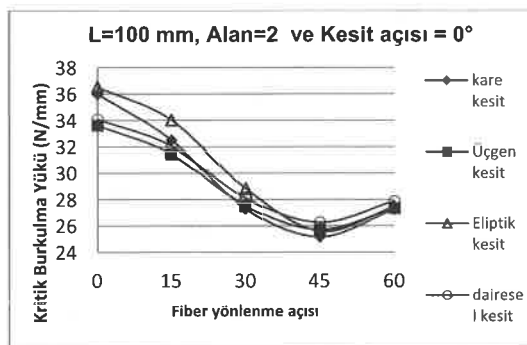
Tablo 3: Teorik ve Sonlu Eleman yöntemi (ANSYS) sonuçları

	P_{kr} Teorik (N/mm)	P_{cr} SEA (N/mm)
0° fiber yönlenme açısı kesit açılmamış 100x100 mm kompozit tabaka	42,94	43,45

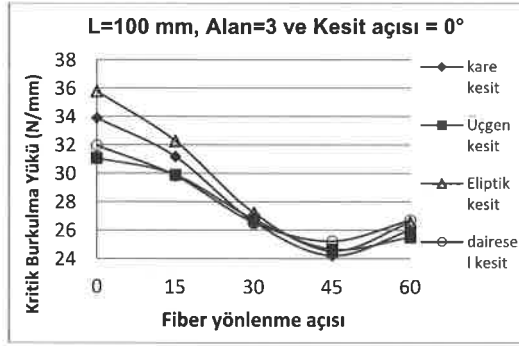
Kesit açıları yapılan nümerik analizler sonucuna göre kare, üçgen, eliptik ve daire kesitlerdeki kritik burkulma yükünün fiber yönlenme açısına göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen grafiklerde plaka boyu 100 mm alınmış ve şekilde görüldüğü üzere kritik burkulma yükü fiber yönlenme açısı 0° iken maksimum değerde olup açı arttıkça burkulma yükü azalmaktadır. Minimum burkulma yükü 45° yönlenme açısında görülmekte ve tüm kesit tipleri için 45° 'den sonra artmaya başlamaktadır. 0° yönlenme açısından 45° yönlenme açısına kadar en avantajlı kesit tipi eliptik olurken 45° ve sonrası için en uygun kesit dairesel kesit olmaktadır.



(a)



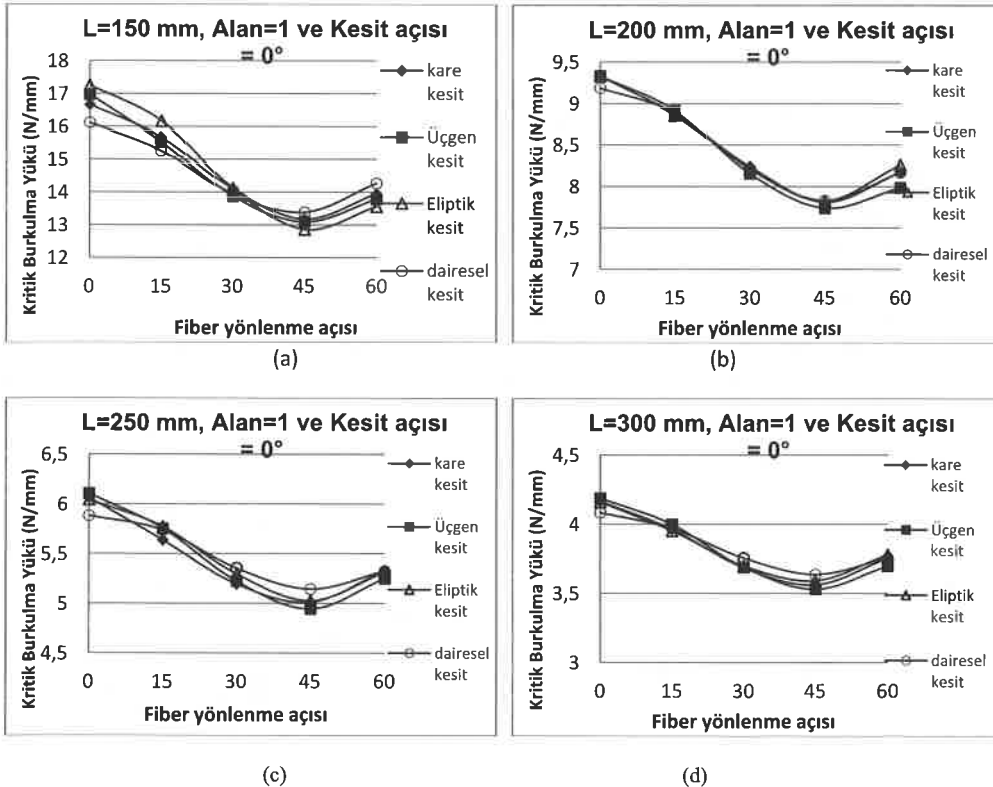
(b)



(c)

Şekil 6: 100 mm plaka boyundaki kompozit levhada fiber yönlenme açısının kritik burkulma yüküne etkisi (a) 1 numaralı alan, (b) 2 numaralı alan, (c) 3 numaralı alan

Şekil 7'de 150, 200, 250 ve 300 mm plaka boyu için kritik burkulma yükündeki değişimler verilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü üzere kritik burkulma yükü bütün plaka boylarında 45° fiber yönlenme açısının da minimum olmaktadır. Kritik burkulma yükü plaka boylarına göre sayısal değeri değişmesine rağmen genel davranış aynı olmaktadır.

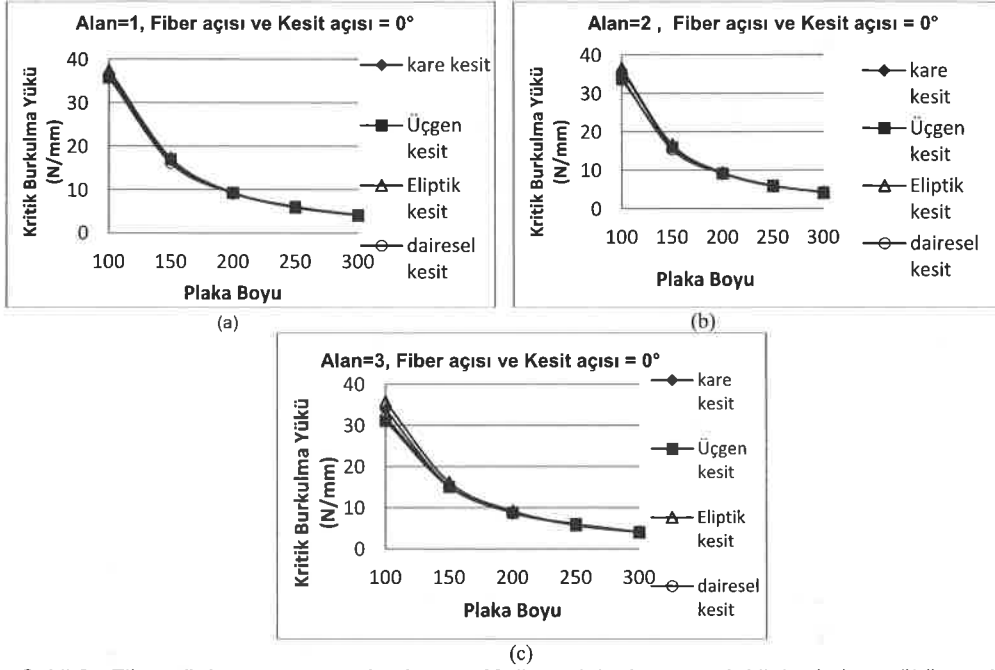


(c)

(d)

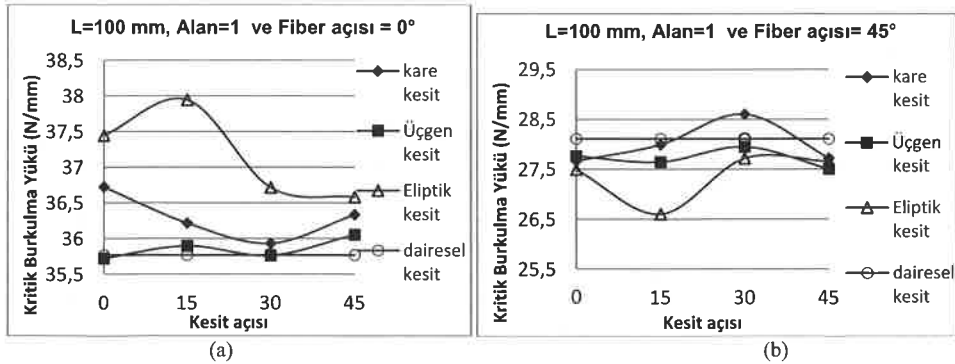
Şekil 7: Fiber yönlenme açısının kritik burkulma yüküne etkisi Plaka boyu (a) 150 mm (b) 200 mm, (c) 250 mm, (d) 300 mm

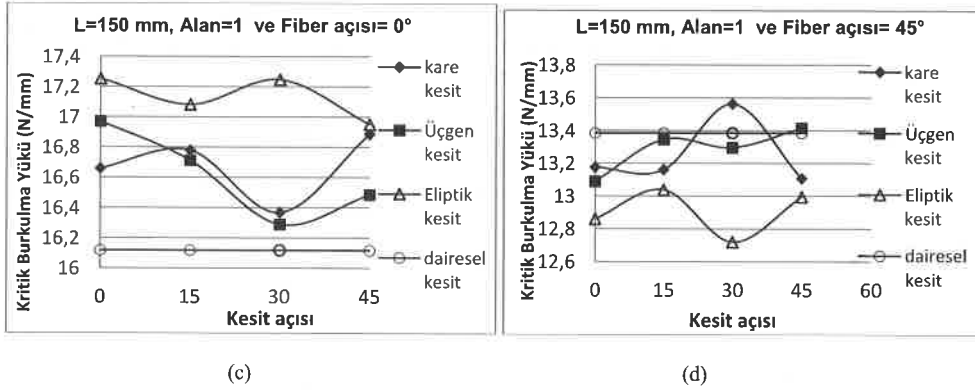
Kritik burkulma yükünün plaka boyutuna göre değişimi şekil 8'de verilmektedir. Şekil 8'e göre plaka boyunun artmasıyla plakanın burkulma olmadan taşıyabileceği yük azalmaktadır. Bir başka ifadeyle, plaka boyutunun artmasıyla birlikte kritik burkulma yükü azalmaktadır.



Şekil 8: Fiber yönelme açısı ve kesit açısı 0° iken plaka boyunun kritik burkulma yüküne etkisi (a) 1 numaralı kesit alanı (b) 2 numaralı kesit alanı, (c) 3 numaralı kesit alanı

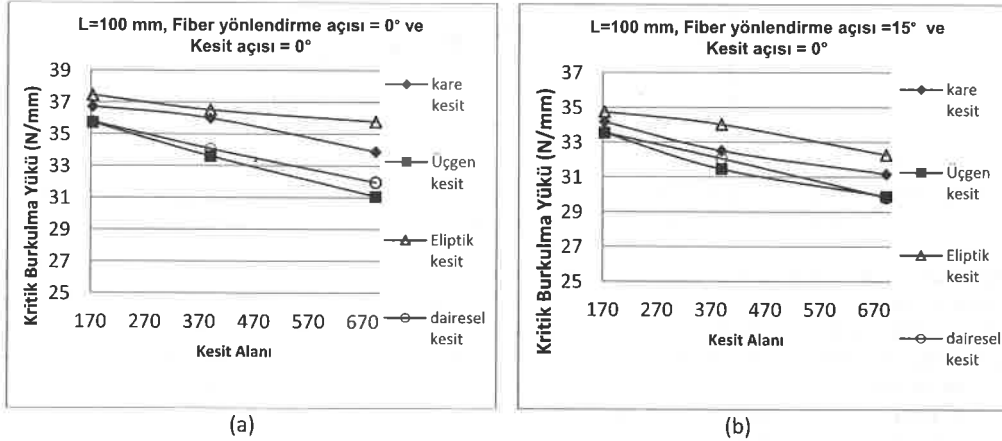
Şekil 9'de kesit yönlendirme açısının kritik burkulma yüküne etkisi görülmektedir. Şekil 7' de görüldüğü üzere, 0° fiber yönelme açısında eliptik kesit, 45° yönlendirme açısında ise dairesel kesit avantaj sağlamaktadır. Kesit yönlendirme açısının etkisine bakarken bu avantajı ve dezavantajı göz ardı etmemek gerekir. Bu yüzden kesit yönlendirme açısının etkisine bakarken 0° ve 45° fiber açılarındaki değişim verilmiştir. Şekil 9(a)'da tüm kesit açılarındaki, açılara göre değişiklik göstermesine rağmen eliptik kesitin avantajlı olduğu, şekil 9(b)'de ise hemen hemen tüm kesit açılarındaki (30° hariç) dairesel kesitin avantajlı olduğu görülmektedir. Farklı bir plaka boyutundaki kritik burkulma yükünün kesit açısına göre değişimini görmek amacıyla 150 mm plaka boyu için şekil 9(c) ve 9(d)'de kritik burkulma yükünün kesitlere göre değişimi verilmektedir. Bu iki grafikte de benzer değişim görülmektedir.





Şekil 9: Kesit yönlendirme açısının kritik burkulma yüküne etkisi (a) Fiber yönlenme açısı= 0°, L=100 mm (b) Fiber yönlenme açısı= 45°, L=100 mm , (c) Fiber yönlenme açısı= 0°, L=150 mm, (d) Fiber yönlenme açısı= 45°, L=150 mm

Kritik burkulma yükünün kesit alanına göre değişimi şekil 10'da görülmektedir. Şekle göre tüm kesit tipleri için, kesit büyüklüğünün artmasıyla birlikte, kritik burkulma yükü azalmaktadır.



Şekil 10: Kesit alanının artışının kritik burkulma yüküne etkisi (a) Fiber yönlenme açısı= 0°, L=100 mm (b) Fiber yönlenme açısı= 15°, L=100 mm

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polyester matrisinden oluşan kompozit plakalarda açılan dairesel, üçgen, eliptik ve kare kesitlerin burkulmaya etkisi sonlu eleman yöntemiyle araştırılmıştır. Sonlu eleman modelini doğrulamak için yapılan kesit açılmamış kompozit plaka sonucu teorik formül ile kıyaslanmış ve sonuçlar arasında uyuşma olduğu görülmüştür. Analizler sırasında farklı boyutlara sahip plakalar (100, 150, 200, 250 ve 300 mm), farklı tip kesitler (kare, üçgen, eliptik ve dairesel) , 0°, 15°,30°, 45° fiber yönlenme açıları ve 0°, 15°,30° ve 45° kesit açısı kullanılmıştır. Analizler sırasında tüm kesit tipleri için üç farklı alan kullanılmış, alanlar kesit çeşitlerinde sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Fiber yönlenme açısı ve kesit açısı kritik burkulma yüküne etkisi bakımından önemli parametrelerdir.
- Fiber yönlenme açısı arttıkça kritik burkulma kuvveti azalmaktadır. En kritik burkulma yükü 45° fiber yönlenme açısı kullanıldığı zaman ortaya çıkmıştır. 45°'den sonra kritik burkulma yükü artmaktadır. Bu yüzden tabakalı kompozitlerde plaka basınca maruz kalıyorsa, 45° yönlenme açısı kullanılmaktan kaçınılmalıdır.
- 0° yönlenme açısından 45° yönlenme açısına kadar en avantajlı kesit tipi eliptik olurken, 45° ve sonrası için en uygun kesit dairesel kesit olmaktadır.
- Kritik burkulma yükünün kesit açısına göre değişimine göre, fiber yönlenme açısı 0° iken eliptik kesitin avantajlı, fiber yönlenme açısı 45° iken ise dairesel kesit avantajlı olduğu görülmektedir.
- Kesit büyüklüğü arttıkça kritik burkulma yükü azalmaktadır.
- Plaka boyunun artması ile kritik yükte belirgin bir düşüş olmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Kaw A. K. (2006), *Mechanics of Composite Materials*, (2nd Ed.), London: Taylor & Francis, Inc.
- [2] Bryan, G. H., *On the Stability of a Plane Plate under Thrusts in its own Plane, with Applications to the Buckling of the Sides of a Ship*, Proc. London Math. Soc., 22 : 54,1891
- [3] Timoshenko, S. P., *Einige stabilitätsprobleme der elastizitätstheorie*, Z. Math. Physik, 58, s. 337-385 1910.
- [4] Cox, H. L., and Riddell, J. R., "Buckling of a Longitudinally Stiffened Flat Panel", *Aeronautical Quarterly*, 1 : 225 (1949).
- [5] Seide, P., "The effect of longitudinal stiffeners located on one side of a plate", N.A.C.A., Tech. Note No. 2873, (1953).
- [6] Avci, A., Kaya, S. and Daghan, B. (2005). Thermal Buckling of Rectangular Laminated Plates with a Hole, *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 24(3): 259–272.
- [7] Britt, V. O. (1994). Shear and Compression Buckling Analysis for Anisotropic Panels with Elliptical Cutouts, *AIAA Journal*, 32(11): 2293–2299.
- [8] Ghannadpour, S. A. M., Najafi, A. and Mohammadi, B. (2006). On the Buckling Behavior of Cross-ply Laminated Composite Plates due to Circular/Elliptical Cutouts, *Composite Structures*, 75: 3–6.
- [9] Komur M. A, Sen F., Ataş A., Arslan N.(2010).Buckling analysis of laminated composite plates with an elliptical/circular cutout using FEM, *Advances in Engineering Software*, 41 (2010) 161–164
- [10] Akbulut, H. and Sayman, O. (2001). An Investigation on Buckling of Laminated Plates with Central Square Hole, *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 20(13): 1112–1124.
- [11] Akbulut H. and Ural T. (2007), An Investigation on Buckling of Composite Laminated Plates with Corner Circular Notches, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20(4):371-387
- [12] Baltacı A., Sarikanat M. and Yıldız H. (2006), Buckling Analysis of Laminated Composite Circular Plates with Holes *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25: 733
- [13] Yazıcı, M. (2009). Influence of Cut-Out Variables on Buckling Behavior of Composite Plates *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2009 Vol. 28, No. 19 2325-2339
- [14] Vinson J.R. and Sierakowski R. L.(2004), *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, 2nd Ed.), London: Kluwer Academic Publishers
- [15] ANSYS Procedures. Engineering analysis system verification manual, vol. 1. Houston, PA, USA: Swanson Analysis System Inc.; 1993.