



**DİK KATLI TABAKALANMIŞ DAİRESEL DELİKLİ KOMPOZİT  
LEVHALARDA MEKANİK VE TERMAL BURKULMA ANALİZİ**

**(MECHANICAL AND THERMAL BUCKLING OF CROSS-PLY  
LAMINATED COMPOSITE PLATES WITH HOLES)**

**Sami KAYA\*, Ahmet YAPICI\***

**ÖZET/ABSTRACT**

Bu çalışmada  $(0/90^0)_{x2}$  çapraz (dik) katlı simetrik 4 tabakadan meydana gelmiş delikli kompozit kare levhaların mekanik ve termal burkulma davranışları incelenmiştir. Delik tipi daire olarak ele alınmıştır. Çözüm tekniği olarak sonlu elemanlar metodu, nümerik çözümlerin elde edilmesinde ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Önce tek yönde basmaya maruz izotropik deliksiz bir levhanın kritik burkulma yükleri bulunmuş, sonuçların Timoshenko'nun analitik sonuçlarıyla levha kalınlığına bağlı olarak %1.02-12.63 gibi bir yaklaşıklıkla uyum sağladığı görülmüştür. Daha sonra değişik malzemelerin  $h/b=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$  kalınlık oranlarında ve delik parametreleri  $d/b=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ; yükleme oranları  $N_2/N_1=0, 1$ ; mesnet şartları da basit mesnet ve ankastre mesnet olarak alınıp kritik burkulma yükleri ve kritik burkulma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Bulunan değerler grafikler halinde verilerek gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

*In this study mechanical and thermal buckling behaviours of the composite square plates consist of  $(0/90^0)_{x2}$  cross-ply and symmetric four laminates with circular holes are examined. Ansys finite element packed program is used for numeric solution. First critical buckling loads of an isotropic plate without hole subjected to unidirectional compression are found. It is seen that obtained results are appropriate to those of Timoshenko due to the plate thickness according to an approach of 1.02-12.63%. Then constraint conditions have been taken as simple and clamped so as to make solutions for the various materials, in the thickness ratios of  $h/b=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$  and hole parameter for circle holes  $d/b=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ; loading ratios  $N_2/N_1=0, 1$ . Mechanical buckling and thermal buckling behaviours of the plates made of various materials are examined and critical buckling load and critical temperatures are determined. Values have been given in the graphs and discussions are presented in the conclusion.*

**ANAHTAR KELİMELELER/KEY WORDS**

Kompozit levhalar, Tabakalı, Sonlu elemanlar, Termal burkulma  
*Composite plates, Laminate, Finite element, Thermal buckling*

## 1.GİRİŞ

Bir yapı veya makina elemanının seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken üç karakteristik nokta vardır. Bunlar mukavemet, rijitlik ve stablitedir. Çekme kuvvetine karşı oldukça dayanıklı olan ince levhalar, basınç nakledeken oldukça zayıftırlar. Yanal olarak takviye edilmemiş dar kirişler, uygulanan aksenal basma kuvvetleri altında yana doğru bükülerek kırılırlar. Bu ve benzeri problemler mühendislik dizaynlarında üzerinde titizlikle durulması gereken konulardır. Bundan başka, yüklü elemanların burkulması veya buruşması genellikle aniden oluşan olaylardır. Bu bakımdan birçok yapı elemanı stabilite bozukluğu nedeniyle çökme gibi büyük bir tehlike ile karşı karşıyadırlar (Popov, 1976). Burkulma olayı dış kuvvetler (mekanik) veya sıcaklıktan dolayı meydana gelen termal kuvvetlerin etkisiyle meydana gelebilir. Bunun için burkulma olayı incelenirken hem dış yüklerin etkisi hem de sıcaklığın etkisi göz önüne alınmalıdır.

Burkulma konusu üzerinde şimdiye kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Schlack (1964) dikdörtgen levhaların stabilitesini analitik metot ve deneysel çalışmalarla, Whitney ve Pogano (1970) analitik metotlarla levhaların burkulmasını, Ritchie ve Rhodes (1975) delikli levhaların üniform gerilme ve şekil değiştirmeler ile burkulma davranışlarını Rayleigh-Ritz metodunu kullanarak incelemiştir. Think vd (1983) değişik sınır şartlarındaki kompozit dikdörtgen levhaların eğilme ve basma gerilmeleri altında burkulma davranışlarını incelemiştir. Vanden Brink ve Kamat (1985) ortotropik, tabakalanmış ve ortasında dairesel delik bulunan kompozit dikdörtgen levhaların burkulmasını, Yettram ve Brawn (1986) iki yönlü yükleme altında dikdörtgen levhaların burkulmasını direkt matris metoduyla, Tung ve Surdenas (1987) analitik metotlarla ortotropik dikdörtgen levhaların iki yönlü yükleme altında burkulma davranışlarını incelemiştir. Lin ve Kuo (1989) ortasında dairesel delik bulunan tabakalanmış kompozit dikdörtgen levhaların statik yüklemeler altında burkulma analizini yapmışlardır. Noor ve Burton (1991) tabakalanmış açılı katlı kompozit levhaların termal gerilme altında burkulma ve serbest titreşimini ortaya koyan üç boyutlu elastisite çözümünü analitik olarak elde etmişlerdir. Mathew vd (1992) çapraz katlı kompozit levhalarda termal burkulmayı incelemiştir. Raju vd (1996) dairesel levhaların termal burkulma davranışlarını değişik sınır ve yükleme şartlarında teorik ve deneysel olarak inceleyip mukayese etmiştir.

Denizcilik, otomotiv, uzay ve havacılık sanayiinde metalik ve metalik olmayan levhalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle hafiflik istenen uygulamalarda (denizcilik, uzay ve uçak sanayii gibi) kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Kullanılan bu malzemeler genellikle levhalar şeklinde ( $h \ll l$ ) olmaktadır. Pratikte basma gerilmeleri sadece basınç kuvvetlerinden dolayı meydana gelmeyip ortam sıcaklığının değişmesinden dolayı da meydana gelmektedir. Bir deniz taşıtı, uçak veya uzay aracı değişken hava şartlarında çalışmakta ve bundan dolayı da ani sıcaklık değişimlerine maruz kalabilmektedir. Ani sıcaklık değişimleri bu araçların yapılmış olduğu malzemeleri ve bunların fiziki özelliklerini de etkileyecektir. Bundan başka çalışma şartlarında özellikle kompozit malzemelerden yapılmış elemanlarda çatlaklar, yarıklar gibi malzeme kusurları ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen çatlak ve yarıklar gibi kusurlar zamanla ilerleyerek malzemenin tahrip olup kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Meydana gelen çatlak ve yarıkların zamanla ilerlemesini önlemek için çatlak ilerleme bölgesine delikler açılarak çatlakın ilerlemesi durdurulabilmektedir. Böyle durumlarda malzemelere açılan deliklerin malzeme mukavemetini nasıl etkilediğinin bilinmesi önemlidir. Bundan dolayı delikli levhalarda dış yüklerin ve sıcaklığın malzemenin mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması gerekmektedir.

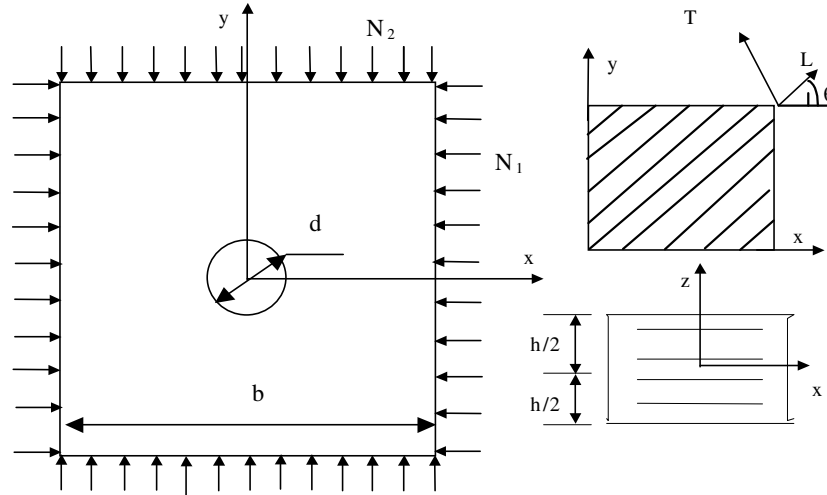
Bu çalışmada delikli izotropik ve kompozit levhalarda dış yüklerden dolayı meydana gelen kritik burkulma yükleri ile termal kuvvetlerden dolayı meydana gelen burkulma durumundaki kritik sıcaklıklar belirlenmiştir. Hesaplamalarda, sınır şartları olarak, tek yönde ve çift yönde basit ve ankastre mesnet kullanılmış; yükleme durumu da tek yönde ve çift yönde eşit yükleme olarak ele alınmıştır. Levha kalınlığı, malzeme ve malzeme üzerine açılan delikler, parametreler olarak ele alınmış ve çözümler yapılmıştır. Çözümlerde kullanılan modeller için analitik çözümlerin bulunmayışından dolayı yaklaşık bir çözüm metodu olan sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Nümerik çözümlerin elde edilmesinde günümüzde yaygın olarak kullanılan ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmaktadır.

Mekanik ve termal burkulma davranışının incelenmesinde üç değişik malzemeden yapılmış ( $M_1$ ,  $M_2$  ve  $M_3$ ) levhaların davranışları incelenmiş, kritik burkulma yükleri ve kritik sıcaklıklar tespit edilerek elde edilen değerler grafikler halinde verilerek izah edilmiştir.

## 2. DELİKLİ LEVHALARDA BURKULMA

### 2.1. Matematiksel Formülasyon

Tabakalanmış levhalar, kompozit ortotropik tabakaların simetrik ya da antisimetrik olarak uygun bir şekilde birleştirilmeleriyle elde edilirler. Şekil 1’de levhanın yükleme durumu kartezyen koordinatlarda gösterilmiştir. Sadece sıcaklığın etkisi olduğundan sınırlara dik yükler etki etmektedir.



Şekil 1. Kompozit levhanın dik koordinatlarda gösterilmesi ve yükleme şekli

Sıcaklık ve dış yüklerin etkisi altındaki ortotropik bir tabakada meydana gelen düzlemsel gerilmeler kartezyen koordinatlarda

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x - \alpha_x \Delta T \\ \epsilon_y - \alpha_y \Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy} \Delta T \end{Bmatrix}_k, \begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada  $\bar{Q}_{ij}$  indirgenmiş rijitlik matrisini;  $\alpha_x$ , x yönündeki termal genişleme katsayısını;  $\alpha_y$  y yönündeki termal genişleme katsayısını,  $\alpha_{xy}$ , xy düzlemindeki termal kayma katsayısını ve

$\Delta T$  de sıcaklık farkını göstermektedir. Birinci mertebe kayma deformasyon teorisine göre bir levhada meydana gelen yer değiştirmeler

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u^0(x, y) + z \psi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v^0(x, y) + z \psi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

olarak yazılabilir. Burada  $u^0$ ,  $v^0$  ve  $w$  orta yüzeyin herhangi bir noktasının yer değiştirmeleri,  $\psi_x$  ve  $\psi_y$  de orta düzlem normalinin  $x$  ve  $y$  eksenleri etrafındaki dönmeleridir (VanDen vd, 1985; Yettram ve Brawn, 1986; Lin ve Kuo, 1989).

Eđilmeden dolayı levha boyunca meydana gelen lineer şekil değiştirmeler ve kayma şekil değiştirmeleri sabit levha kalınlığı boyunca aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_{x0}}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad \text{yada} \quad \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial y} - \psi_y \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \psi_x \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Statik yüklemeler altında tabakalanmış levhaların toplam potansiyel enerjisi aşağıdaki gibi verilir

$$\Pi = U_b + U_s + V \quad (4)$$

Burada  $U_b$  eğilme-şekil deđiřtirme enerjisi,  $U_s$  kayma-şekil deđiřtirme enerjisi ve  $V$  de dış düzlemsel yüklerin meydana getirdiđi potansiyel enerjidir. Bunlar

$$\begin{aligned} U_b &= 1/2 \int_{-h/2}^{h/2} \int \int_R (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dx dy dz \\ U_s &= 1/2 \int_{-h/2}^{h/2} \int \int_R (\tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}) dx dy dz \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V &= 1/2 \int \int_R [N_1 (\partial w / \partial x)^2 + N_2 (\partial w / \partial y)^2 \\ &+ 2N_{12} (\partial w / \partial x) (\partial w / \partial y)] dx dy - \int_{\partial R} (N_n^b u_n^b + N_s^b u_s^b) ds \end{aligned}$$

Burada  $R$  dikdörtgen levhanın düzlemsel yüzeyi,  $N_n^b$  ve  $N_s^b$   $\partial R$  sınırına uygulanan düzlemsel yüklerdir.  $N_n^b$  ve  $N_s^b$  düzlemsel yükleri sınırda daima sıfır olduklarından burkulma problemi oluşturmazlar. Bundan dolayı ihmal edilirler (Lin ve Kuo, 1989).

Bir levhaya etki eden birim kuvvetler  $N_x$ ,  $N_y$  ve  $N_{xy}$ ; moment bileřenleri  $M_x$ ,  $M_y$  ve  $M_{xy}$ ; kesme kuvvetleri  $Q_x$  ve  $Q_y$  de aşağıdaki gibi verilir.

$$\begin{bmatrix} N_x & M_x \\ N_y & M_y \\ N_{xy} & M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} (1, z) dz, \quad \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} dz \quad (6)$$

## 2.2. Sonlu Eleman Denklemleri

Bu çalışmada nümerik çözümlerin elde edilmesinde ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Problemin çözümü için programın eleman kütüphanesinden maksada uygun elemanlar seçilerek eleman rijitlik matrisleri ve geometrik rijitlik matrisleri oluşturulmaktadır (ANSYS<sup>TM</sup>). Eleman rijitlik matrisleri ve geometrik rijitlik matrislerinin birleştirilmesi ve toplam potansiyel enerjinin minimizasyonu prensibinin uygulanması ile aşağıdaki lineer denklem sistemi elde edilmektedir (Whitney ve Pogano, 1970; VanDen vd, 1985).

$$[K^*] - \lambda_b [K_g^*] \{\Delta\} = 0 \quad (7)$$

Burada ,  $[K^*]$  eğilme ve kayma rijitlik matrislerinin toplamını gösterirken  $[K_g^*]$  geometrik rijitlik matrisini ifade etmektedirler

$$[K^*] = [K_b] + [K_s], \quad -\lambda_b [K_g^*] = [K_g] \quad (8)$$

Kritik burkulma yükü aşağıdaki karakteristik denklemle belirlenen en küçük özdeğer  $\lambda_b$ 'ye tekabül eder.

$$\text{Det} [K^*] - \lambda_b [K_g^*] \{\Delta\} = 0 \quad (9)$$

Eğer eleman rijitlik matrisleri ve geometrik rijitlik matrisleri oluşturulurken sadece dış kuvvetler dikkate alınır, lineer denklem sisteminden elde edilen  $\lambda_b$ 'ye  $N_c$  kritik burkulma yükü, eğer sadece sıcaklıklar dikkate alınır elde edilen  $\lambda_b$ 'ye  $T_c$  kritik burkulma sıcaklığı karşılık gelecektir. Eşitlik 9'un için Newton-Raphson metodu kullanılarak nümerik sonuçlar elde edildi.

## 3. NÜMERİK ÇÖZÜMLER

Malzeme olarak Çizelge 1'de verilen izotropik ve muhtelif kompozit malzemeler kullanıldı. Kompozit malzeme olarak  $(0/90^0)_{x2}$  çapraz katlı simetrik dört tabakadan meydana gelmiş malzemelerden yapılmış kare levhalar incelendi. Kalınlık  $h/b=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ ; delik parametreleri  $d/b=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ; yükleme oranları  $N_2/N_1=0, 1$ ; sınır şartları olarak basit ve ankastre mesnetler alınarak çözümler yapıldı. Çözümlerde kritik burkulma yükleri ve kritik burkulma sıcaklıkları tespit edildi. Bulunan değerler grafikler halinde verilerek gerekli değerlendirmeler sonuçlar bölümünde yapıldı.

Çizelge 1. Çözümlerde kullanılan malzemelerin mekanik ve termal özellikleri

	Malzeme	$E_x$ (MPa)	$E_y$ (MPa)	$G_{xy}$ (MPa)	$\nu_{xy}$	$\alpha_x$ ( $1/^\circ\text{C}$ )	$\alpha_y$ ( $1/^\circ\text{C}$ )
M <sub>1</sub>	Çelik	208000	208000	80000	0.3	$1.17 \cdot 10^{-5}$	$1.17 \cdot 10^{-5}$
M <sub>2</sub>	E- Cam epoksi	15000	6000	3000	0.3	$7.00 \cdot 10^{-6}$	$2.30 \cdot 10^{-5}$
M <sub>3</sub>	Boron epoksi	207000	19000	4800	0.21	$4.14 \cdot 10^{-6}$	$1.91 \cdot 10^{-5}$

$N_c$  : Levhalar için bulunan kritik burkulma yükleri

$N_c^*$ : Deliksiz levhanın çift yönlü basit mesnetlenmiş durumdaki kritik burkulma yükü

$T_c^*$ : Deliksiz levhanın çift yönlü basit mesnetlenmiş durumdaki kritik burkulma sıcaklığı

$T_c$  : Levhalar için bulunan kritik burkulma sıcaklıkları

ca : Çift yönlü ankastre mesnetlenmiş levha

ta : Tek yönlü ankastre mesnetlenmiş levha

cb : Çift yönlü basit mesnetlenmiş levha

tb : Tek yönlü basit mesnetlenmiş levha

b : Levha boyu

h : Levha kalınlığı

d : Delik çapı

#### 4. SONUÇLAR

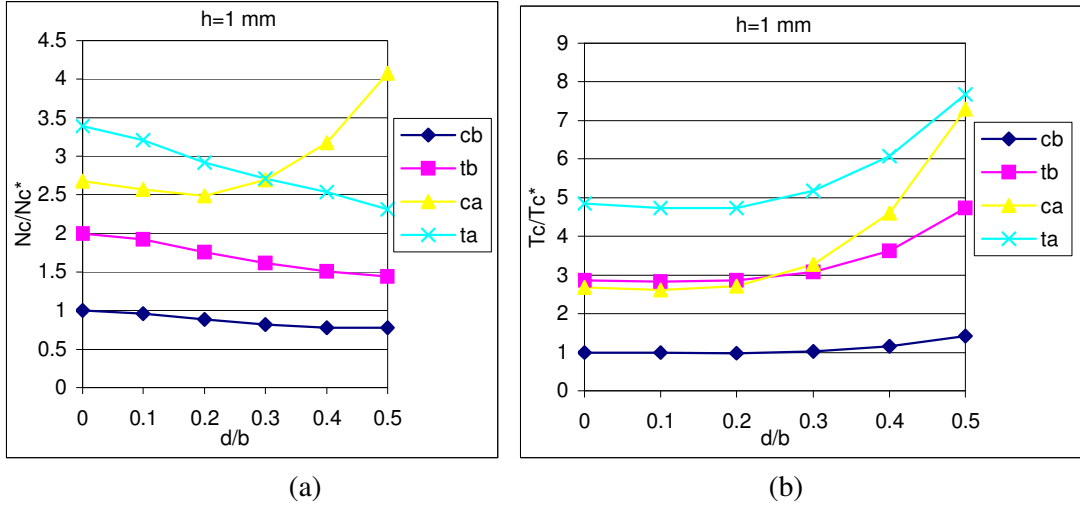
Şekil 2, 3 ve 4'te kritik burkulma yüklerinin ve kritik burkulma sıcaklıklarının delik çapına göre değişimleri görülmektedir. Mekanik burkulma yüklerinin sadece çift yönlü ankastre mesnet şartlarında delik çapının artışına bağlı olarak önce düştüğü daha sonra arttığı, diğer mesnet şartlarında ise delik çapının artışıyla kritik burkulma yüklerinin düştüğü görülmektedir. Kritik burkulma sıcaklıklarının ise bütün mesnet şartlarında delik çapının artışına bağlı olarak önce düştüğü daha sonra ise arttığı görülmektedir.

Yükleme şartlarının da burkulma yüklerini ve sıcaklıklarını etkilediği görülmektedir. Minimum yük çift yönlü yüklenme durumunda ortaya çıkmaktadır. Tek yönde basit mesnet durumdaki yük, çift yönde basit mesnet durumdaki kritik yükün yaklaşık iki katı; çift yönde ankastre mesnet durumdaki kritik yük, çift yönde basit mesnet durumdaki kritik yükün yaklaşık üç katı; tek yönde ankastre mesnet durumdaki kritik yük, çift yönde basit mesnet durumdaki kritik yükün yaklaşık üç ile beş katı daha fazladır. Tek yönlü yüklenme ile çift yönlü yüklemenin arasında ise iki katı fark olduğu görülmektedir.

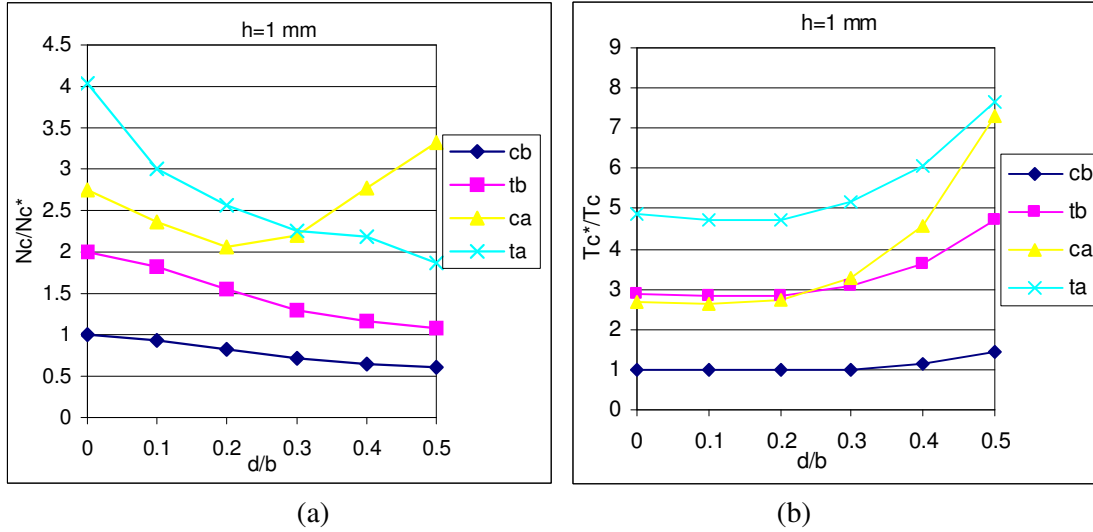
Minimum sıcaklık da çift yönlü yüklenme durumunda ortaya çıkmaktadır. Tek yönde basit mesnet durumdaki kritik sıcaklık, çift yönde basit mesnet durumdaki kritik sıcaklığın yaklaşık üç katı; çift yönde ankastre mesnet durumdaki kritik sıcaklık, çift yönde basit mesnet durumdaki kritik sıcaklığın yaklaşık üç katı; tek yönde ankastre mesnet durumdaki kritik sıcaklık, çift yönde basit yüklenme durumdaki kritik sıcaklığın yaklaşık beş-altı katıdır. Tek yönlü yüklenme ile çift yönlü yüklenme arasında ise üç katı fark olduğu görülmektedir.

Kritik yükler ve sıcaklıkları etkileyen faktörlerden biri de kalınlıktır. Şekil 5, 6 ve 7 incelendiği zaman  $h/b=0.05$  için bulunan yük,  $h/b=0.01$  için bulunan değer yaklaşık 125 katı;  $h/b=0.04$  için bulunan yük,  $h/b=0.01$  için bulunan değer yaklaşık 64 katı;  $h/b=0.03$  için bulunan yük,  $h/b=0.01$  için bulunan değer yaklaşık 27 katı olduğu görülmektedir. Buradan kritik burkulma yüklerinin kalınlığın 3. dereceden bir fonksiyonu olduğu söylenebilir.

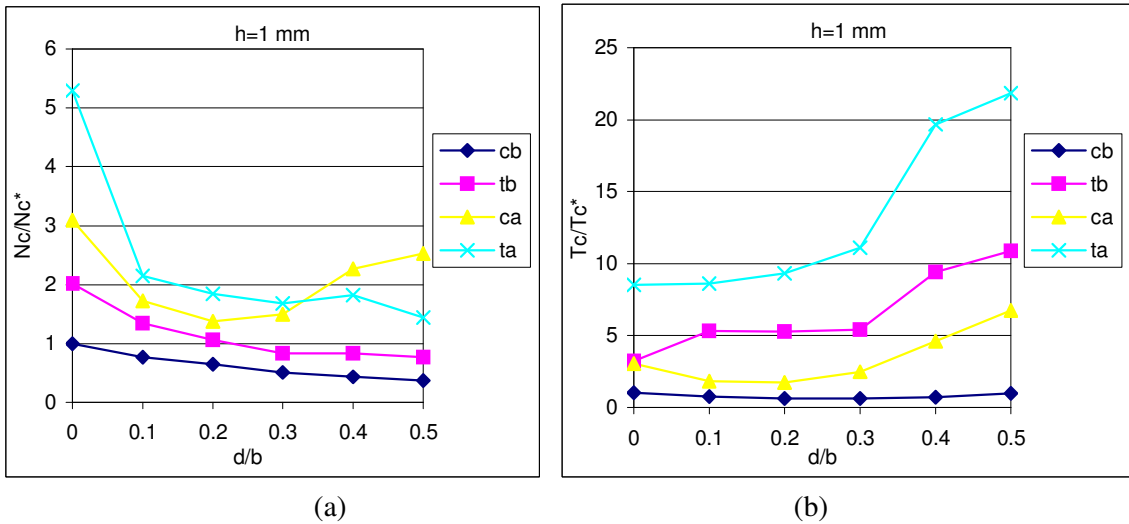
$h/b=0.05$  için bulunan kritik sıcaklık,  $h/b=0.01$  için bulunan değer yaklaşık 25 katı;  $h/b=0.04$  için bulunan kritik sıcaklık,  $h/b=0.01$  için bulunan değer yaklaşık 16 katı;  $h/b=0.03$  için bulunan yük,  $h/b=0.01$  için bulunan değer yaklaşık 9 katı olduğu görülmektedir. Buradan kritik burkulma yüklerinin kalınlığın 2. dereceden bir fonksiyonu olduğu söylenebilir.



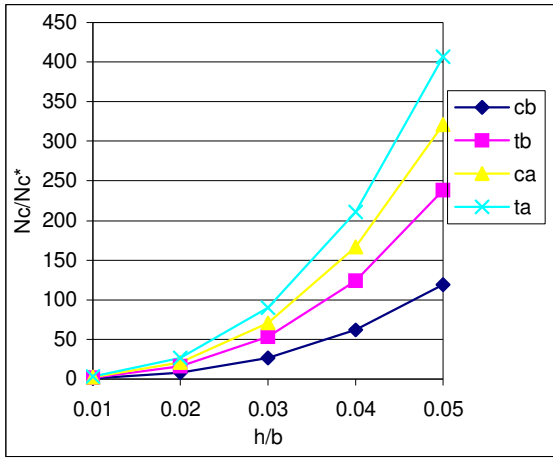
Şekil 2.  $M_1$  için (a) kritik burkulma yükünün delik çapına göre değişimi, (b) kritik burkulma sıcaklığının delik çapına göre değişimi



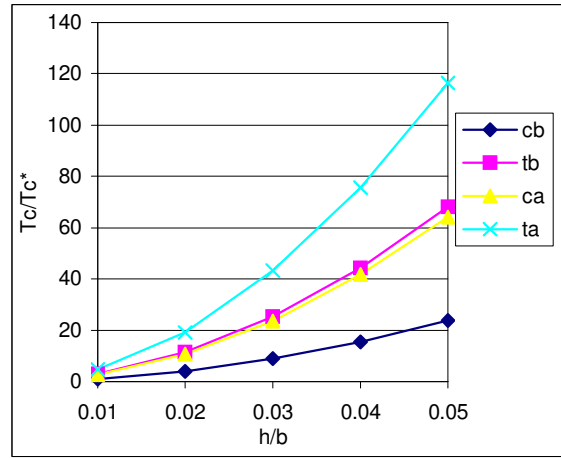
Şekil 3.  $M_2$  için (a) kritik burkulma yükünün delik çapına göre değişimi, (b) kritik burkulma sıcaklığının delik çapına göre değişimi



Şekil 4.  $M_3$  için (a) kritik burkulma yükünün delik çapına göre değişimi, (b) kritik burkulma sıcaklığının delik çapına göre değişimi

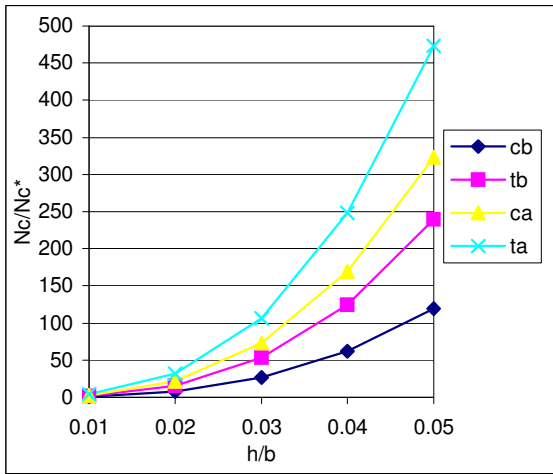


(a)

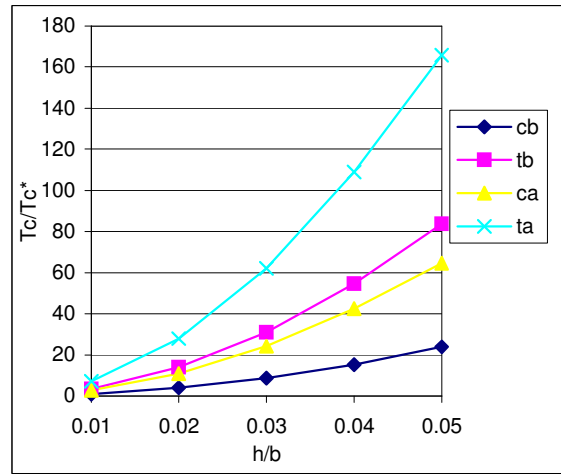


(b)

Şekil 5.  $M_1$  için (a) kritik burkulma yükünün  $h/b$  oranına göre değişimi, (b) kritik burkulma sıcaklığının  $h/b$  oranına göre değişimi

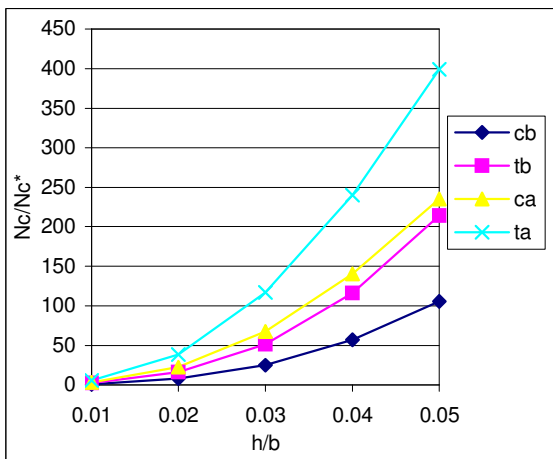


(a)

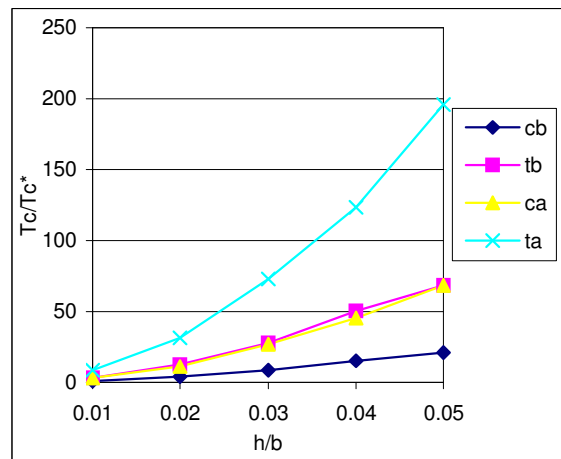


(b)

Şekil 6.  $M_2$  için (a) kritik burkulma yükünün  $h/b$  oranına göre değişimi, (b) kritik burkulma sıcaklığının  $h/b$  oranına göre değişimi



(a)



(b)

Şekil 7.  $M_3$  için (a) kritik burkulma yükünün  $h/b$  oranına göre değişimi, (b) kritik burkulma sıcaklığının  $h/b$  oranına göre değişimi



**KAYNAKLAR**

- ANSYS<sup>TM</sup> Swanson Analysis System Inc. "The General Purposed Finite Element Software Ver.5.4 Users Manual Vol. I, II, III, IV."
- Lin C. H., Kuo C. S. (1989): "Buckling of Laminated Plates with Holes", J. of Composite Material, Vol. 23, pp. 536-553.
- Mathew T. C., Singh G., Rao G. V. (1992): "Thermal Buckling of Cross-ply Composite Laminates", Computers and Structures, Vol. 42, No.2, pp. 281-287.
- Noor A. K., Burton W. S. (1991): "Predictor-Corrector Procedures for Thermal Buckling Analysis of Multilayered Composites Plates", J. of Computers and Structures, Vol.40, No. 5, pp. 1071-1084.
- Popov E. P. (1976): "Mukavemet (Katı cisimlerin Mekaniğine Giriş)", Çev. H. Demiray, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Raju K., Kanaka, Naidu N. Rajasekhara, Rao G. Venkateswara (1996): "Thermal Buckling of Circular Plates With Localized Axisymmetric Damages", Computers and Structures, Vol. 60, No. 6, pp. 1105-1109.
- Ritchie D., Rodes, J. (1975): "Buckling and Post-buckling Behaviour of Plate With Holes", Aeronaut Quarterly, Vol. 26, pp. 281-296.
- Schlack A. L. (1964): "Elastic Stability of Pierced Plates", Proc. of the Society of Exp. Stress Analysis, Vol. 21, pp. 167-172.
- Thing J., Wang S., Biggers S. B., Dickson J. N. (1983): "Buckling of Composite Plates with a FreeEdge in Edgewise Bending and Compression", Journal of AIAA, Vol. 22, pp. 394-398.
- Tung T. K., Surdenas J. (1987): "Bucling of Rectangular Orthotropic Plates under Biaxial Loading", J. of Composite Material, Vol. 21, pp. 124-128.
- VanDen Brink D. J., Kamat M. P. (1985): "Post-buckling Response of Isotropic and Laminated Composites Square Plates with Circular Holes", In. Proc. Int. Conf. Composite Material, San Diego, California, pp. 1393-1409.
- Whitney J. M., Pogano N. J. (1970): "Shear Deformation in Heterogenous Anizotropic Plates", J. of Aplied Mechanics, pp. 1031-1036.
- Yettram A., Brawn C. J. (1986): "The Elastic Stability of Square Perforated Plates under Biaxial Loadings", Computers and Structures, Vol. 22(4), pp. 589-594.