

ELİPTİK DELİKLİ TERMOPLASTİK TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARDA PLASTİK GERİLME ANALİZİ

Gurbet ÖRÇEN*, **Mustafa GÜR**** ve **M. Yavuz SOLMAZ****

*Makina Mühendisliği Bölümü, Müh. Mim. Fak. Dicle Üniv. Diyarbakır

**Makina Müh. Bölümü, Müh. Fak., Fırat Üniv. 23119 Elazığ

gurbetorcen@dicle.edu.tr, mgur@firat.edu.tr, mysolmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22.07.2008 ; Kabul/Accepted: 05.11.2009)

ÖZET

Bu çalışmada, ortasında eliptik delik bulunan termoplastik (Polyvinyl Chloride) tabakalı kompozit levhalarda plastik bölgelerin yayılışı ve gerilme analizi yapılmıştır. Dokuma şeklinde çelik fiber takviyeli kompozit levhalar $[\theta^0/-\theta^0]_2$ simetrik olarak birleştirilmiş dört ortotropik tabakadan meydana gelmiştir. Levhalara düşey doğrultuda üniform yükleme yapılmıştır. Yükleme, seçilen her takviye açısı için levhanın akma noktasından başlayarak 0.0001 MPa'lık artışlarla 25, 50, 75 ve 100 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. Yükleme adımlarına ve farklı takviye açılarına göre, kompozit plakta meydana gelen plastik gerilmelerin değerleri sonlu elemanlar metoduyla elde edilmiştir. Kompozit plakta plastik bölgeler alt ve üst yüzeylerde meydana gelmiş, ara yüzeylerde oluşmamıştır. Ara tabakalardaki gerilme bileşenlerinin alt ve üst yüzeylerdeki değerlerden daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. İterasyon sayısına bağlı olarak plastik gerilme bileşenlerinde artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kompozit malzemeler, termoplastikler, plastik gerilme analizi, sonlu elemanlar metodu.

THE PLASTIC STRESS ANALYSIS AT THE LAMINATED THERMOPLASTIC COMPOSITE PLATES WITH ELLIPTIC HOLE

ABSTRACT

In this paper, it is carried out the spread of plastic zones and the stress analysis at the composite plates with laminated thermoplastic (Polyvinyl Chloride) subsisting an elliptic hole in the middle part. The composite plates with steel fiber reinforcement of woven-shaped consist of four orthotropic layers bonded symmetrically in the form of $[\theta^0/-\theta^0]_2$. The plates are subjected to uniformly distributed vertical loads. Loading is realized by iterations number of 25, 50, 75 and 100 by increments 0.0001 MPa by starting from the yielding point of plate for the chosen each reinforcement angle. According to the load steps and the different reinforcement angles, the values of the plastic stresses occurring in the composite plates are obtained by Finite Element Method. The obtained results present that the plastic zones in the plate appear in the lower and upper surfaces but not in the intermediate surfaces. It is also observed that the stress components at the intermediate layers are less than that of the lower and upper surfaces and the plastic stress components increase depending on the iteration number.

Keywords: Laminated composite materials, thermoplastics, plastic stress analysis, finite element method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tabakalı kompozit malzemeler geniş kullanım alanları bulmuştur. Bu nedenle bu tür malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti ve gerilme analizlerinin yapılması konularına yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Bu konuda değişik araştırmacılar tarafından çok sayıda araştırma yapılmıştır. Karakuzu tarafından

iki eksenli üniform yüklemeye veya kesme etkisindeki dairesel delikli ortotrop kompozit levhalarda, dairesel delik kenarındaki gerilme dağılımı incelenmiştir [1]. Sayman ve arkadaşları tarafından yarı dairesel çentik bulunan çelik/alüminyum kompozitinden yapılmış levhaların üniform yayılı yükler altında elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Meydana gelen iç gerilmelerle, çentik civarındaki

gerilme yığılmaları azaltılarak levha mukavemetinin artırılması yoluna gidilmiştir.

İncelemeler değişik yük ve yarıçaplar için yapılmış olup, meydana gelen plastik bölgelerin yayılışı ve iç gerilmelerin değişimi incelenmiştir[2]. Gür ve arkadaşları tarafından, kompozit malzemeden imal edilmiş, ortasında dikdörtgen delik bulunan, üniform yayılı çekme yüklerine maruz düzlem levhada, delik etrafındaki iç gerilmelerin dağılımı ve plastik bölgelerin yayılışı, farklı fiber takviye açıları için incelenmiştir[3]. Hwang ve Sung tarafından, ortasında bir delik bulunan yaprak şeklindeki düzlem kompozit plaklarda çekme yükü etkisinde delik etrafında meydana gelen gerilme yığılma katsayıları bulunmuştur[4]. Zienkiewicz, Von – Mises ve Coulomb akma kriterlerini kullanarak farklı mühendislik problemlerinde plastik bölgelerin yayılışını incelemiştir[5]. Arslan ve arkadaşları, ortasında kare delik bulunan çelik fiber takviyeli termoplastik kompozit levhalarda elastik-plastik gerilme analizini yapmışlardır. Plastik bölgelerin dağılımı ve artık gerilmeler değişik yük ve takviye açılarına göre incelenmiştir[6]. Sayman ve arkadaşı, ortasında delik bulunan alüminyum metal matrix kompozit tabakalı plakada elastik-plastik gerilme analizini incelemiştir. Simetrik ve antisimetrik dizilime sahip tabakalar, basit ve ankastre mesnet durumu için düşey doğrultuda yüklenerek, plastik bölge dağılımı ve artık gerilme bileşenleri elde edilmiştir[7]. Sayman ve arkadaşları tarafından, ortasında dairesel delik bulunan alüminyum metal matrix kompozit tabakalı plakalarda elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Farklı takviye açılarında simetrik ve antisimetrik dizilime sahip levhalarda plastik bölge dağılımını ve artık gerilme bileşenlerini incelemiştir[8].

Bu çalışmada ise, dört farklı dizilime sahip tabakalı kompozit levhalarda oryantasyon açısı ve iterasyon sayısındaki değişimin plastik gerilme dağılımında nasıl bir rol oynadığı tespit edilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

2. PLASTİK GERİLME ANALİZİ (PLASTIC STRESS ANALYSIS)

Bu çalışmada kullanılan plaka, çelik fiber ile takviyelendirilmiş termoplastik (PVC) matriksli tabakalı kompozit malzemedir. Bu malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 1 de verilmiştir. Malzemede yük etkisiyle meydana gelen plastik bölge için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı Ramber- Osgood tarafından;

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon_p^n \quad (1)$$

ifadesi ile verilmiştir[10]. 1 eşitliğinden faydalanıp toplam şekil değiştirme için,

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p \quad (2)$$

şeklinde elde edilir.

Tablo 1. Fiber takviyeli termoplastik kompozit tabakanın akma noktaları ve ölçülmüş mekanik özellikleri [6]. (Yield points of fiber reinforced thermoplastic composite lamination and measured mechanical properties [6].)

E_1	9550 (MPa)	
E_2	9550 (MPa)	
G_{12}	670 (MPa)	
ν_{12}	0.32	
Eksenel akma değeri	X	18.5 (MPa)
Enine akma değeri	Y	18.5 (MPa)
Kesme akma değeri	S	8.26 (MPa)
Sertleşme parametresi	K	99.5 (MPa)
Gerilme sertleşmesi üssü	n	0.676
Fiber hacim oranı	V_f	0.07
Matriks hacim oranı	V_m	0.93

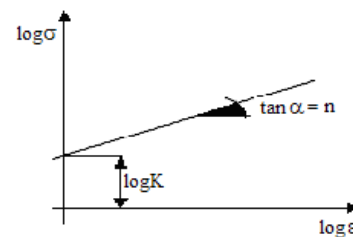
Bu eşitliklerdeki sembollerden; K şekil değiştirme sertleşmesi parametresini, n şekil değiştirme sertleşmesi üssünü, σ_0 başlangıç akma gerilmesini, ε_p plastik şekil değiştirme oranını, ε toplam şekil değiştirme oranını, ε_e elastik şekil değiştirme oranını, E elastisite modülünü belirtmektedir. K ve n değerleri tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen sonuçların logaritmaları alınarak çizilen grafikten tespit edilebilir (Şekil 1).

$$\sigma = K \varepsilon_p^n \text{ ifadesinin logaritması alınarak,}$$

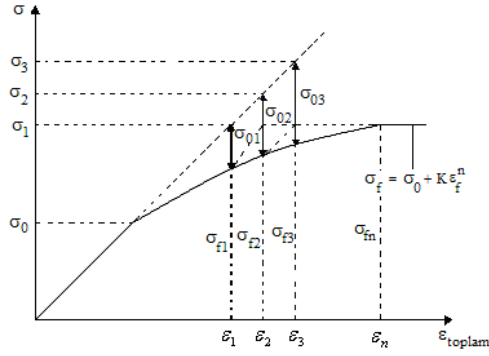
$$\log \sigma = \log k + n \log \varepsilon_p \quad (3)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitliğin $y=ax+b$ şeklinde bir doğru denkleminde eşdeğer olduğu görülmektedir. Buradan K ve n değerleri rahatlıkla tespit edilebilir. Çekme numunesi elastik bölgenin üstünde bir değere kadar ($\varepsilon_{toplam} = \varepsilon_1$) yüklenir (Şekil 2).

σ_x gerilmesi lineer olarak hesaplanır. σ_{f1} gerilmesi aşağıdaki eşitlikteki gibi verilmektedir. Burada σ_{01} başlangıç gerilmesidir.



Şekil 1. Gerilme-Şekil değiştirme logaritmik grafiği[11] (Logarithmic Graphics of Stress-Strain)



Şekil 2. Linear olmayan malzemeler için gerilme-şekil değiştirme diyagramı [2, 3]. (Stress-Strain Diagram for nonlinear materials)

$$\sigma_{01} = \sigma_x - \sigma_{f1} = \sigma_1 - \sigma_{f1} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \sigma_x + \sigma_{01}$$

veya genel olarak,

$$\sigma_n = \sigma_1 + \sigma_{0(n-1)} \quad (5)$$

şeklinde yazılır[2, 3].

Bu çalışmada, anizotropik malzemeler için uygulanan Tsai-Hill akma kriterine göre elde edilen gerilme değerlerinden eşdeğer gerilmeler elde edilir. Eşdeğer gerilme düzlemsel gerilme hali için,

$$\sigma_e = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \frac{x^2}{y^2} + (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2) \frac{x^2}{S^2} = x^2 \quad (6)$$

şeklinde verilir[10].

Burada σ_1, σ_2 ve $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ malzemenin asal doğrultulardaki gerilme bileşenleridir. Başlangıç gerilmesi bir boyutlu durumda plastik bölge için

$$\sigma_0 = \sigma - \sigma_f \quad (7)$$

olur. Burada $\sigma_f(\sigma - \varepsilon)$ diyagramından elde edilir. Başlangıç gerilmesi;

$$\{\sigma_0\} = \{\sigma_{0x} \sigma_{0y} \tau_{0xy}\}^T \quad (8)$$

yazılabilir.

Burada $\{\sigma_0\}$ başlangıç gerilmesi bileşenleri elastik olarak hesaplanan gerilmeyle orantılıdır. Denklem 6'ya göre ilgili eşdeğer gerilme değeri bir boyutlu durumda $\{\sigma_0\}$ 'a eşittir.

$$\sigma_0 = \sigma_e \quad (9)$$

Başlangıç gerilmesine bağlı olarak kuvvet vektörü;

$$\{F\}_{\sigma_0} = \int_V [B]^T \{\sigma_0\} dV \quad (10)$$

eşitliğinden hesaplanır[9]

Burada;

$$\{F\}_i = \{F\}_i + \{F\}_{\sigma_0} \quad (11)$$

$$\{\delta\}_i = [K]^{-1} \{F\}_i \quad (12)$$

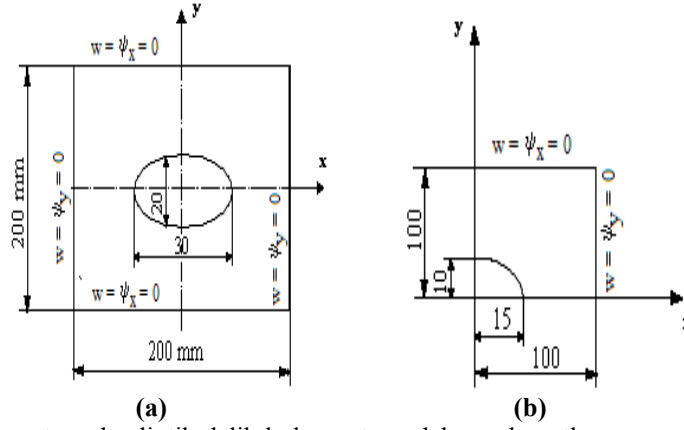
eşitliklerinden her bir iterasyon adımı için F_i ve δ_i 'ler hesaplanarak, hedeflenen iterasyon sayısına kadar çözüme devam edilip, toplam şekil değiştirmeler hesaplanır[11].

3. TERMOPLASTİK KOMPOZİT PLAKA VE SINIR ŞARTLARI (THERMOPLASTIC COMPOSITE PLATE AND BORDER CONDITIONS)

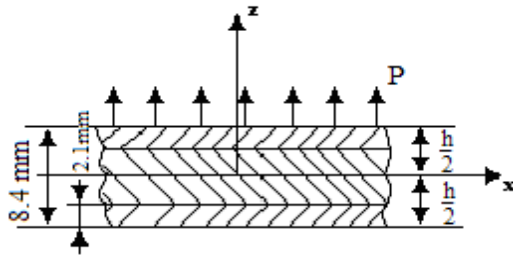
Bu çalışmada düşey yayılı yük etkisinde çalışan kare şeklinde ortasında eliptik delik bulunan tabakalı kompozit plaka kullanılmıştır[10]. Bu plakanın boyutları ve sınır şartları Şekil 3a' da gösterilmiştir. Sayısal çözüm için plakanın $\frac{1}{4}$ ' ü alınmıştır (Şekil 3b). Matris malzemesi termoplastik (PVC (poliyvinilil chloride)), fiber malzemesi olarak da paslanmaz çelik seçilmiştir. Takviye malzemesi dokuma şeklindedir. Plakayı oluşturan her bir tabaka 2.1 mm kalınlığında olup, farklı takviye açılarına sahiptir. Bu tabakalardan 4'er tanesi bir araya getirilerek tabakalı kompozit plakalar elde edilmiştir (Şekil 4). İnce tabakaların birleştirilmesiyle oluşan tabakalı kompozit plakalar gelişmiş bir yapı örneğidir. Bu yeni yapıyı oluşturan her bir plaka, uygulanan yükü asal doğrultularda taşıdığı için plakanın yük taşıma kapasitesi artmaktadır. Plakada akma meydana getirecek düşey yükler uygulanarak, değişik takviye açıları için plastik bölge dağılımı ve plastik gerilme değerleri elde edilmiştir.

Tabakaların simetrik dizilimi Şekil 5'de görüldüğü gibidir.

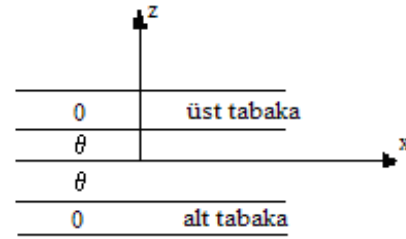
Bu çalışmada tabakalardaki her bir plakanın oryantasyon açıları; $[0^0]_4$, $[30^0/-30^0]_2$, $[45^0/-45^0]_2$ ve $[60^0/-60^0]_2$ olarak seçilmiştir. Çözümde 9 düğümlü izoparametrik sonlu eleman kullanılmıştır. Plakanın $\frac{1}{4}$ 'lük kısmı için 13 eleman ve 69 düğümlü bir mesh oluşturulmuştur(Şekil 6).



Şekil 3.(a) Kare şeklinde ortasında eliptik delik bulunan tam plakanın boyutları ve sınır şartları (b) Plakanın ¼'lük kısmı ve sınır şartları. (Figure 3.(a) Dimensions of square shaped whole plate with an elliptical hole and border conditions) (b)Parts of ¼ of composite lamination and border conditions)



Şekil 4. Kompozit plakanın kalınlığı ve yükün uygulandığı (Composite plate's thickness and application of the load)



Şekil 5. Kompozit tabakaların simetrik dizilimi (simetrik $[0^\circ/\theta^\circ]_2$) (Symmetrical stacking sequence of composite plate (symmetric $[0^\circ/\theta^\circ]_2$))

4. SAYISAL SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

$[0^\circ]_4$, $[30^\circ/-30^\circ]_2$, $[45^\circ/-45^\circ]_2$ ve $[60^\circ/-60^\circ]_2$ takviye açılarında sahip simetrik dizilimli, ortasında eliptik delik bulunan kare plakanın basit mesnetli hali için düşey yayılı yük etkisinde plastik gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Yüklemeler ilk akmayı başlatan yük değerinden (Tablo 2) itibaren 0.0001'lik artışlar yapılarak 25, 50, 75 ve 100 iterasyon için gerçekleştirilmiştir.

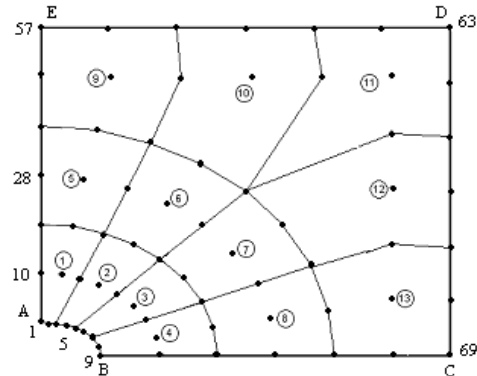
Tablo 2. Akmayı başlatan yük değerleri (Load values, initiating yielding)

Simetrik Tabaka dizilimi	$[0^\circ]_4$	$[30^\circ/-30^\circ]_2$	$[45^\circ/-45^\circ]_2$	$[60^\circ/-60^\circ]_2$
Akmayı başlatan yük değerleri (MPa)	0.0495	0.0679	0.0251	0.0777

4.1. Plastik Bölgelerin İncelenmesi (Investigations of plastic zone)

Kompozit plakanın akma gerilmesi 18.5 MPa'dır. Bu gerilme değerinin üzerinde meydana gelen noktaların birleştirilmesi sonucu elde edilen plastik bölgeler, artan yüklemeye bağlı olarak her bir takviye açısında, 25 ve 100 iterasyonda oluşan plastik bölgelerin dağılımları Şekil 7,8,9,10 ve 11 de görülmektedir.

$[45^\circ/-45^\circ]_2$ ve $[60^\circ/-60^\circ]_2$ dizilimleri için meydana gelen plastik bölgelerin artan yükleme ve iterasyon

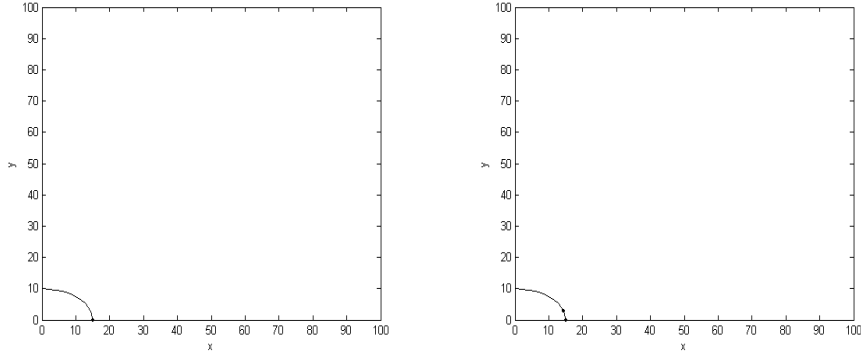


Şekil 6. Plakanın sonlu eleman ağı (Finite element mesh of the plate)

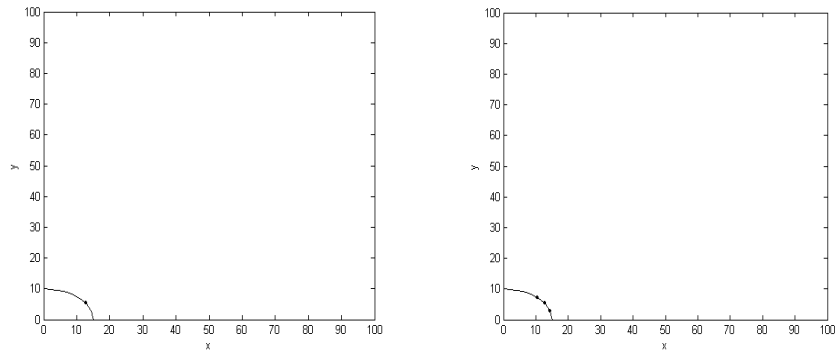
sayısına bağlı olarak dağılımları Şekil 9 ve 10'da görülmektedir.

Şekillerden de görüldüğü gibi $[0^\circ]_4$ dizilimine sahip tabakada plastik bölgenin çok erken başladığı ve bunu sırasıyla $[30^\circ/-30^\circ]_2$, $[45^\circ/-45^\circ]_2$ ve $[60^\circ/60^\circ]_2$ dizilimine sahip tabakalar izlemektedir.

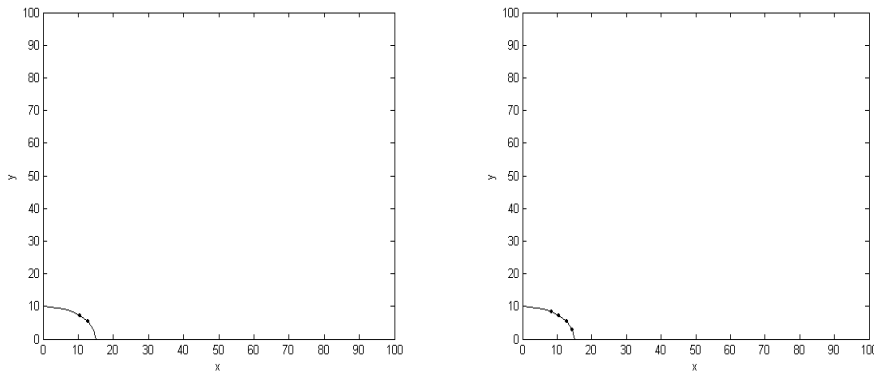
$[0^\circ]_4$ dizilimine sahip bu tabakalarda plastik bölge dağılımı, diğer dizilime sahip oryantasyon açılarında göre, eliptik deliğin x eksenine yönündeki uç kısmının tam bitişinde (B noktasında) başlayıp yukarıya doğru dağılım göstermektedir. Ara tabakalarda ise plastik gerilmeler oluşmamıştır.

a) $[0^0]_4$, 25 iterasyonb) $[0^0]_4$, 100 iterasyon

Şekil 7. Basit mesnetli $[0^0]_4$ dizilimine sahip simetrik olarak istiflenmiş kompozit tabakadaki plastik bölge dağılımı(üst tabaka) (Plastic zone distribution in the simply supported composite consisting of the layers bonded symmetrically in the form of $[0^0]_4$ (upper lamination))

a) $[30^0/-30^0]_2$, 25 iterasyonb) $[30^0/-30^0]_2$, 100 iterasyon

Şekil 8. Basit mesnetli $[30^0/-30^0]_2$ simetrik dizilimli kompozit tabakadaki plastik bölge dağılımı (üst tabaka) (Plastic zone distribution in the simply supported composite consisting of the layers bonded symmetrically in the form of $[30^0/30^0]_2$ (upper lamination))

a) $[45^0/-45^0]_2$, 25 iterasyonb) $[45^0/-45^0]_2$, 100 iterasyon

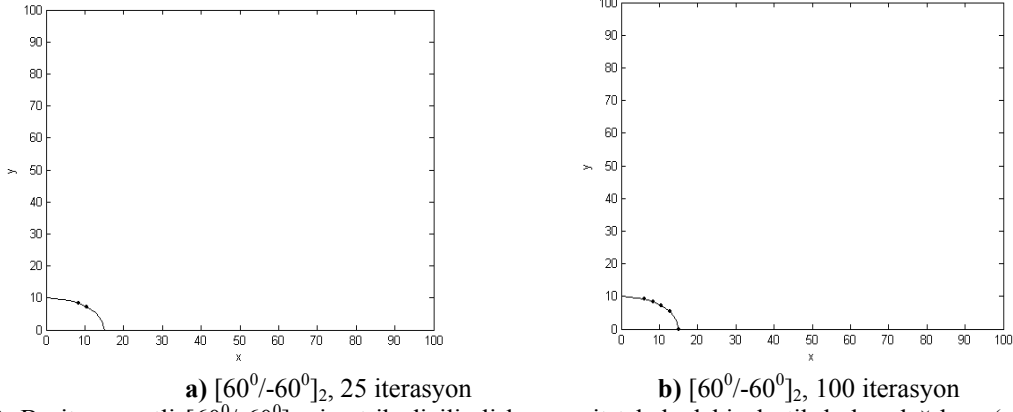
Şekil 9. Basit mesnetli $[45^0/-45^0]_2$ simetrik dizilimli kompozit tabakadaki plastik bölge dağılımı(üst tabaka) (Plastic zone distribution in the simply supported composite consisting of the layers bonded symmetrically in the form of $[45^0/45^0]_2$ (upper lamination.))

4.2. Oryantasyon Açısı ve İterasyon Sayısına Göre Elde Edilen Plastik Gerilme Bileşenlerinin Değişimi (The change of plastic stress components obtained according to orientation angle and iteration number)

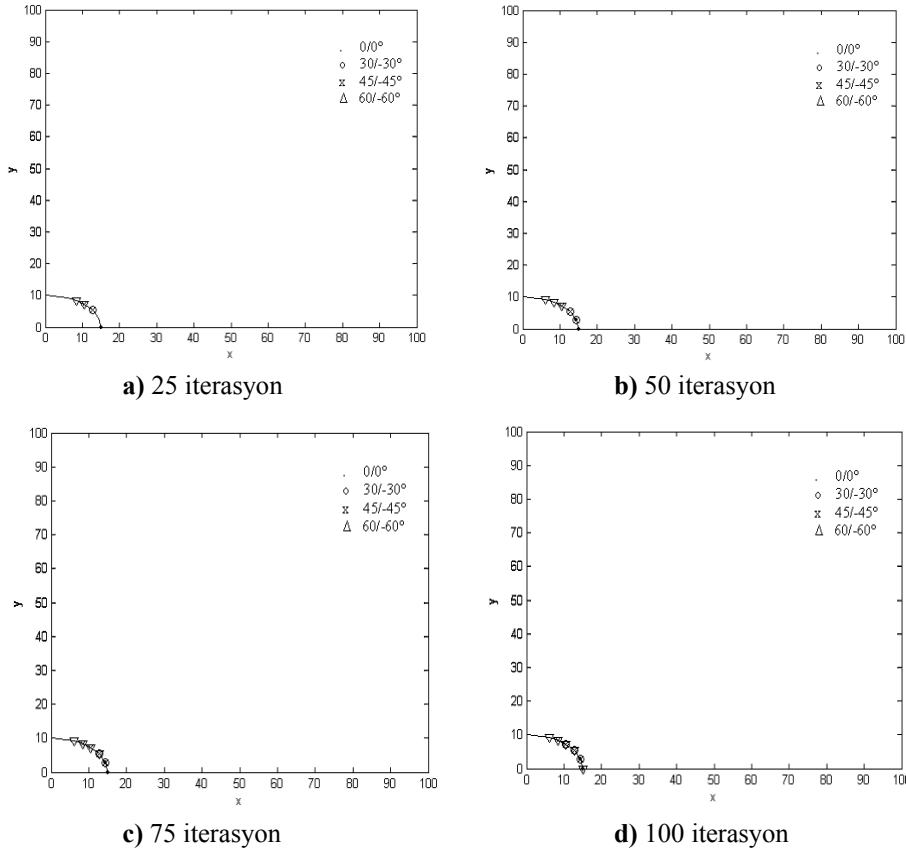
Oryantasyon açısı ve 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlardaki plastik gerilme bileşenlerinin değişimi Şekil 12, 13, 14 ve 15 de gösterilmiştir.

Şekillerde görülen değerlerden, 25 ve 100 iterasyon için maksimum plastik gerilme bileşenlerinin değerleri arasındaki karşılaştırmalar aşağıda sıralanmıştır.

Şekil 12' de 25 iterasyonda σ_x değeri 17.095 MPa, σ_y değeri 20.626 MPa ve τ_{xy} değeri -1.558 MPa iken 100 iterasyonda bu gerilme değerleri sırasıyla 19.603 MPa, 20.902 MPa ve -1.710 MPa 'dır.



Şekil 10. Basit mesnetli $[60^0/-60^0]_2$ simetrik dizilimli kompozit tabakadaki plastik bölge dağılımı (üst tabaka) (Plastic zone distribution in the simply supported composite consisting of the layers bonded symmetrically in the form of $[60^0/60^0]_2$ (upper lamination.))



Şekil 11. Tüm takviye açıları için 25, 50, 75 ve 100 iterasyonda plastik bölge dağılımları (Plastic zone distributions in the 25, 50, 75 and 100 iterations for the whole reinforced angle.)

Şekil 13' de, 25 iterasyonda σ_x değeri 13.029 MPa, σ_y değeri 18.238 MPa ve τ_{xy} değeri -6.747 MPa iken 100 iterasyonda bu gerilme değerleri sırasıyla 14.373 MPa, 19.746 MPa ve -7.479 MPa 'dır.

Şekil 14'de, 25 iterasyonda σ_x değeri 13.916 MPa, σ_y değeri 17.419 MPa ve τ_{xy} değeri -9.353 MPa iken 100 iterasyonda bu gerilme değerleri sırasıyla 14.880 MPa, 18.767 MPa ve 2.201 MPa 'dır.

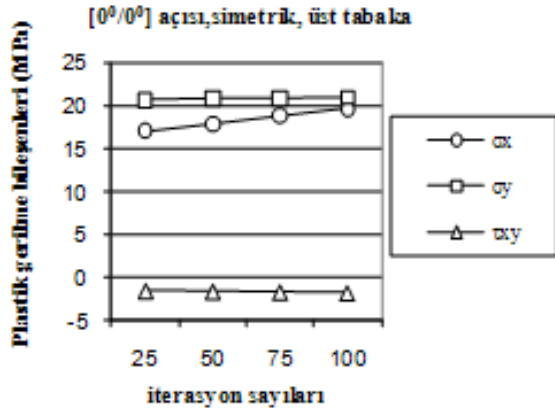
Şekil 15'te 25 iterasyonda σ_x değeri 16.738 MPa, σ_y değeri 18.424 MPa ve τ_{xy} değeri -7.750 MPa iken, 100

iterasyonda bu gerilme değerleri sırasıyla 17.618 MPa, 19.899 MPa ve -8.488 MPa 'dır.

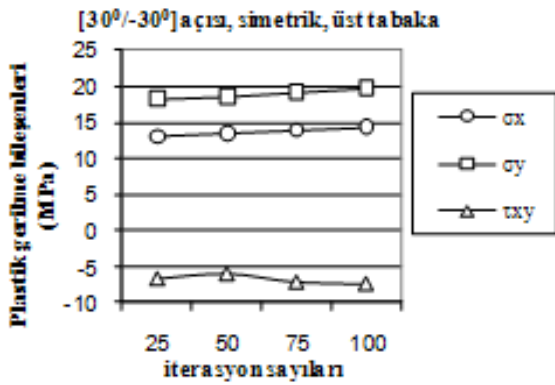
Farklı oryantasyonlar için elde edilen gerilme değerlerinin, iterasyon sayısına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSIONS AND EVALUATION)

Bu çalışmada, simetrik $[0^0]_4$, $[30^0/-30^0]_2$, $[45^0/-45^0]_2$ ve $[60^0/-60^0]_2$ dizilimli, ortasında eliptik delik bulunan



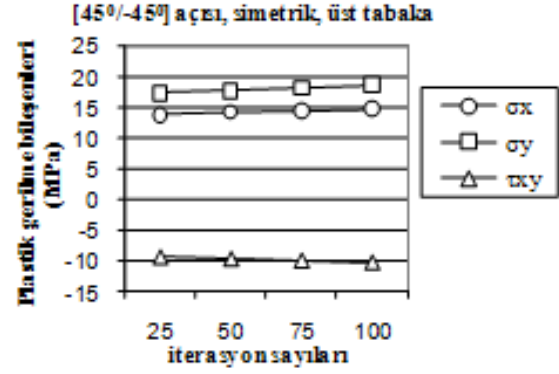
Şekil 12. Plastik gerilme bileşenlerinin değişimi (üst tabaka) (Change diagram of plastic stress components (upper lamination))



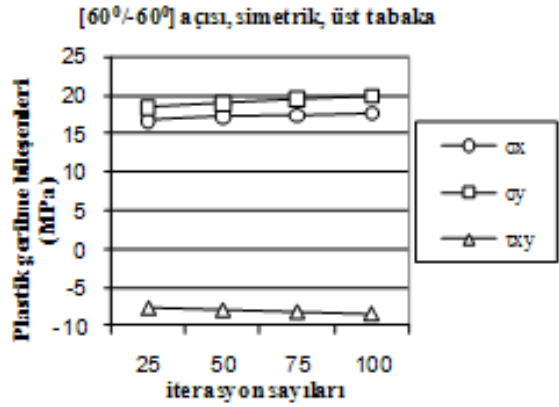
Şekil 13. Plastik gerilme bileşenlerinin değişimi (üst tabaka) (Change diagram of plastic stress components (upper lamination))

kare plakanın üniform statik yük altında 25, 50, 75 ve 100 iterasyonlarda ortaya çıkan plastik gerilme bileşenleri ve plastik bölge dağılımları elde edilmiştir ve sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Düşey yük etkisinde $[0^0]_4$, $[30^0/-30^0]_2$, $[45^0/-45^0]_2$ ve $[60^0/-60^0]_2$ şeklindeki simetrik dizimli plakalarda, farklı akma değerleri elde edilmiştir. En yüksek akma değerleri sırasıyla $[60^0/-60^0]_2$, $[30^0/-30^0]_2$, $[0^0]_4$, $[45^0/-45^0]_2$ dizilimlerinde meydana gelmiştir. Maksimum plastik gerilme bileşenleri üst ve alt yüzeylerde eliptik delik etrafında meydana gelmiştir. Plastik bölgeler alt ve üst yüzeylerde oluşmuş, ara yüzeylerde oluşmamıştır. Plastik bölge dağılımının, $1/4$ eliptik deliğin x eksenini üzerindeki uç kısmından başlayıp, deliğin çevresi boyunca ilerlediği görülmüştür. Simetrik olarak dizilmiş tabakalarda, dört farklı açı diziliminde de gerilme değerlerinin (1.-8., 2.-7., 3.-6., 4.-5. tabakalarda) mutlak değerce aynı olduğu görülmüştür. 100 iterasyonda plastik gerilme bileşenlerinden σ_x değeri $[0^0]_4$ diziliminde maksimum, $[30^0/30^0]_2$ diziliminde minimum seviyededir. σ_y değeri $[0^0]_4$ diziliminde maksimum, $[45^0/-45^0]_2$ diziliminde minimum seviyededir. τ_{xy} değeri ise $[45^0/-45^0]_2$ diziliminde maksimum, $[0^0]_4$ diziliminde minimum seviyededir. Bütün dizilimlerde tabakalardaki τ_{yz} ve τ_{xz} değerlerinin eşit büyüklükte



Şekil 14. Plastik gerilme bileşenlerinin değişimi (üst tabaka) (Change diagram of plastic stress components (upper lamination))



Şekil 15. Plastik gerilme bileşenlerinin değişimi (üst tabaka) (Change diagram of plastic stress components (upper lamination))

olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak iterasyon sayısına bağlı olarak plastik bölge dağılımlarında ve dolayısıyla gerilme bileşenlerinde artışların olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karakuzu, R. ve Sayman, O., "Elasto-plastic Finite Element Analysis of Orthotropic Rotating Discs With Holes", Computers&Structures, 51, 695-703, 1991.
2. Sayman, O., Karakuzu, R., Orhan, A., "Yarı Dairesel Çentikli Kompozit Levhaların Elasto-Plastik Zorlamalar Altında Mukavemetinin Artırılması", 5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, 16-18 Eylül 1992, ODTÜ, Ankara
3. Gür, M., Kaman, M., O., "Ortasında Dikdörtgen Delik Bulunan Düzlem Kompozit Levhada Elasto-Plastik Gerilme Analizi", F.Ü. Fen ve Müh.Bilimleri Dergisi, 13, 2, 225-236, 2001, Elazığ.
4. W.C. Hwang and C. T. Sun, Computer and Structures, 31, 1, 55-62, 1989.
5. O. C. Zienkiewicz, S.Valliapan and I. P. King, Int. Journal for Numerical Methods in Eng., 1, 75-100, 1969.
6. Arslan, N., Çelik, M., Arslan, N., "Prediction of the Elastic-Plastic Behavior of Thermoplastic

- Composite Laminated Plates ($[0^\circ / \theta^\circ]_2$) With Square Hole”, *Composite Structures*, 55, 37-49, 2002.
7. Sayman, O., Aksoy, S., “Elastic-Plastic Stress Analysis of Simply Supported and Clamped Aluminum Metal-Matrix Laminated Plates With a Hole”, *Composite Structures*, 53, 355-64, 2001.
 8. Sayman, O., Akbulut, H., Meriç, C., “Elasto-Plastic Stress Analysis of Aluminum Metal – Matrix Composite Laminated Plates Under In-Plane Loading”, *Computers&Structures*, 75, 55-63, 2000.
 9. Stasa, L.F., “Applied F.E.Analysis for Engineer”, Printed in USA, 1985.
 10. Gibson, FR.”Principles of Composite Material Mechanics”, Newyork, McGraw-Hill, 1994.
 11. Örçen, G. “Çelik Takviyeli Termoplastik Kompozit Levhalarda Elastik ve Elasto-Plastik Gerilme Analizi”, Yüksek Lis. Tezi, Elazığ, 2005.