

[60°/-60°]_s ve [60°/-60°]₂ Oryantasyona Sahip Delikli ve Tabakalı Termoplastik Kompozit Plaklarda Uniform Sıcaklık Altında Meydana Gelen Isıl Gerilmelerin Analizi

F. ŞEN

Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Bölümü İZMİR

Özet: Bu çalışmada, açılı oryantasyona sahip simetrik ([60°/-60°]_s) ve antisimetrik ([60°/-60°]₂), çelik fiberlerle takviye edilmiş, tabakalı ve ortasında dairesel delik bulunan termoplastik kompozit plaklarda, uniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen ısıl gerilmeler hesaplanmıştır. Oryantasyon açısı olarak simetrik ve antisimetrik düzenleme seçilmiştir. Analizde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu amaçla, çözüm ANSYS programı kullanılarak yapılmıştır. Uniform ısıl yük olarak 30 °C'den 60 °C'ye kadar çeşitli değerler seçilmiştir. Isıl analizlerden elde edilen sonuçlar şekillerde gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, ısıl gerilmeler artan uniform ısıl yükler ile artmaktadır. Ayrıca, simetrik ve antisimetrik oryantasyonlar farklı ısıl gerilme dağılımlarının oluşmasına neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar metodu, Isıl gerilmeler, Termoplastik kompozitler

Thermal Stress Analysis on Thermoplastic Laminated Composites Having Orientations [60°/-60°]_s and [60°/-60°]₂ with Circular Hole under Uniform Temperature

Abstract: In this study, thermal stresses were calculated on angle-ply symmetric ([60°/-60°]_s) and antisymmetric ([60°/-60°]₂) steel fiber reinforced thermoplastic laminated composite plates with central circular hole under uniform temperature effect. The orientation angles were selected symmetric and antisymmetric. The finite element method was used for analysis. For this purpose, the solution was performed by using ANSYS program. Different uniform thermal loadings were selected from 30 °C to 60 °C, variously. Results, obtained from thermal analyses are showed in graphs. According to these results, thermal stresses increase related to rise of uniform thermal loads. Furthermore, symmetric and antisymmetric orientations cause different thermal stress distributions.

Key words: Finite element methods, Thermal stresses, Thermoplastic composites

Giriş

İki veya daha çok malzemenin makroskobik düzeyde birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzeme, kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Fiber takviyeli polimer (FTP) kompozitler ise özellikle ikinci dünya savaşından sonra yaygın mühendislik malzemeleri olarak birçok uygulamada yeni ve çekici malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu yapıdaki kompozitler hava araçları, uzay araçları, uydular, gemiler, denizaltılar, otomobiller, kimyasal işlem ekipmanları, sportif araçlar, alt yapı sistemleri, insan sağlığı açısından çok önemli olan tıbbi protezler ve mikroelektronik aletlerde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Alüminyum ve çelik gibi yaygın olarak kullanılan geleneksel metal ve metal alaşımları ile karşılaştırıldığında, kompozit malzemeler, hafiflik, uzun yorulmaya ömrü, iyi korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında istenen yönde daha iyi mukavemet özelliklerinin elde edilebilmesi, sahip oldukları ısıl genişleme özellikleri ve boyutlarını yüksek oranda koruyabilmeleri diğer bazı önemli özelliklerindedir. Polimerler, FTP kompozitlerde genel olarak matriks malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında FTP kompozitler elde edilirken, bu matriksler çelik, cam lifi ve karbon gibi malzemelerden elde edilen fiberler ile takviye edilmektedir [1].

Sayman ve ark. (2003), çelik fiberlerle takviye edilmiş termoplastik kompozit bir kırıta meydana gelen ısıl gerilmeleri elastik-plastik olarak ve lineer sıcaklık dağılımı etkisinde incelemişlerdir [2]. Gigliotti ve ark. (2005), 0/90 tabakalı kare kompozit plaklarda uniform sıcaklık etkisinde meydana gelen ısıl gerilmeleri incelemişlerdir [3]. Chung (2000), karbon fiber takviyeli polimer matriks kompozitlerin ısıl gerilme analizi üzerine çalışmıştır [4]. Akay ve Özden (1994), enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri termoplastik malzemelerin ısıl gerilmelerini deneysel olarak ölçmüşlerdir [5]. Şenel ve ark. (2004), tabakalı termoplastik kompozit plaklarda ısıl yüklemeler altında meydana gelen artık gerilmeleri analitik metotla bulmuşlardır [6]. Shabana ve Noda (2001), üretim aşamasında uygulanan sıcaklıklar nedeniyle meydana gelen artık gerilmeleri dikkate alarak ısıl elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır [7]. Apalak ve ark. (2003) epoksi türü bir yapıstırıcı ile birleştirilmiş ince metal levhalarda lazer nokta kaynağı nedeniyle oluşan ısıl gerilmeleri zamana bağlı olarak incelemişlerdir [8]. Bu çalışmada, simetrik ([60°/-60°]_s) ve antisimetrik ([60°/-60°]₂) oryantasyona sahip, çelik fiberlerle takviye edilmiş, ortasında dairesel delik bulunan, tabakalı termoplastik kompozit plaklarda, uniform dağılmış sıcaklık etkisiyle

meydana gelen ısı gerilmeler incelenmiştir. Çözümde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bundan dolayı analiz, sonlu elemanlarla çözümde etkin bir paket program olan ANSYS programı kullanılarak yapılmıştır. Uniform sıcaklık yükü olarak 30 °C'den 60 °C'ye kadar çeşitli değerler seçilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Kompozit Malzemenin Üretimi

Kompozit malzeme, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan termoplastik kompozit malzeme üretim düzeneği kullanılarak üretilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde, matris olarak yüksek yoğunluklu polietilen ve takviye malzemesi olarak çelik teller kullanılmıştır, bunun yanısıra fiber takviyeli termoplastik kompozit malzeme üretim yönteminin açıklandığı daha önceki bir çalışmada [9] yer alan işlem basamakları uygulanmak suretiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Buna göre, ilk olarak polietilen granüller, düzeneğe yer alan elektrikli ısıtma sistemi kullanılarak sıcaklığı 190 °C'ye yükseltilmiş kalıpların içine konulmaktadır. Granüller, bu sıcaklıkta ve 2,5 MPa basınç altında 5 dakika bekletilmektedir. Daha sonra, 15 MPa basınç altında ve 3 dakika içerisinde sıcaklık 30 °C'ye düşürülmekte ve bu işlem sonucunda 2 mm kalınlığında bir polietilen tabakacık üretilmektedir. Bu şekilde üretilen, her biri 2 mm kalınlığa sahip, 2 tane tabakacığın tek yönlü olarak çelik tellerle takviye edilmesi ve yukarıdaki işlemin uygulanması ile bir termoplastik kompozit tabaka üretilmektedir. Üretilen bu tabakadan çıkarılan deney numuneleri ve üzerlerine yapılandırılan strain gauge'ler kullanılmak suretiyle kompozit malzemenin mekanik ve ısı özellikleri deneysel olarak bulunmaktadır. Mekanik özelliklerin bulunması için yapılan çekme deneyleri, laboratuvarında mevcut olan Instron 1114 test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen, ısı gerilme analizi için gerekli olan mekanik ve ısı özellikler Çizelge 1'de gösterilmiştir.

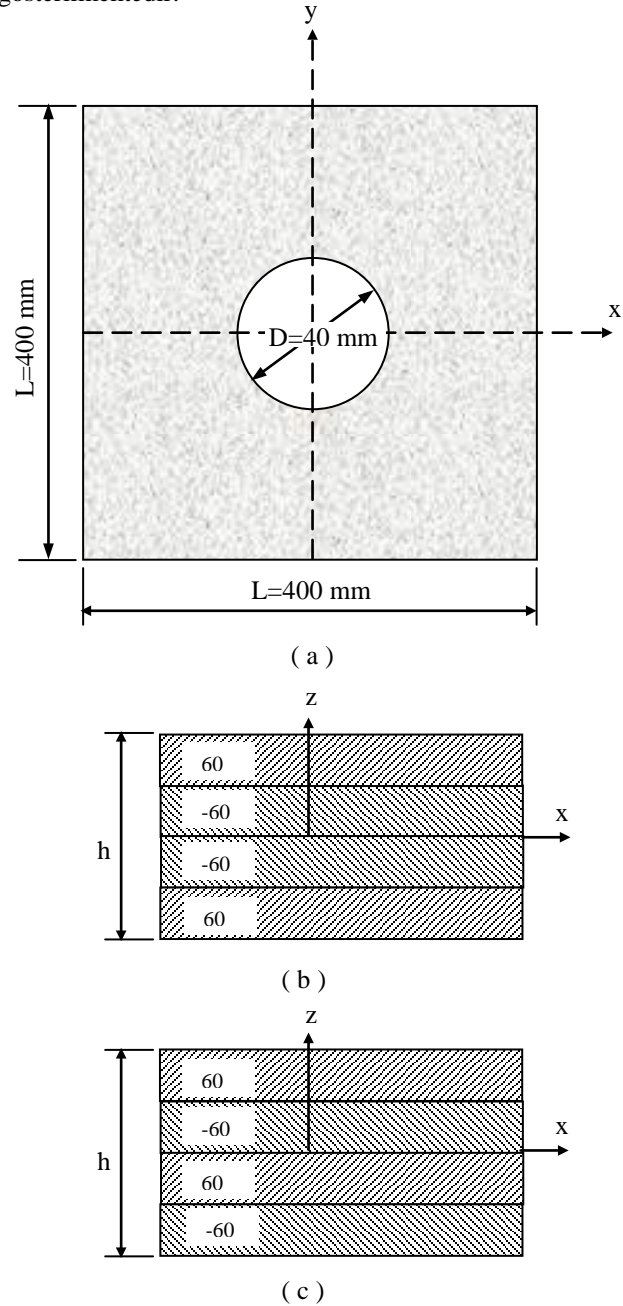
Çizelge 1. Termoplastik kompozit malzemenin mekanik ve ısı özellikleri

E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	G ₁₂ (MPa)	ν ₁₂	Isıl genişleme katsayısı (1/°C)	
				α ₁	α ₂
41000	1200	420	0.25	12,6.10 ⁻⁶	130.10 ⁻⁶

Problemin Tanımlanması ve Modelleme

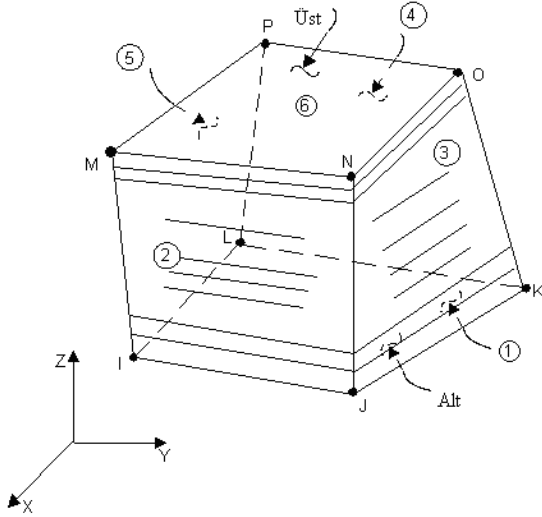
Problemin çözümünde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bu amaçla, bilgisayar ortamında yapılan modelleme işleminde, sonlu elemanlar çözümünde etkin bir paket program olan ANSYS paket programından yararlanılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, L; levha uzunluğu (400 mm), D; delik çapı (40 mm) ve h; toplam kalınlık (8 mm) olmak üzere, ortasında dairesel delik olan üç boyutlu modeller bu program kullanılarak oluşturulmuştur. Tabakalı kompozit plakların bilgisayar ortamında modellenmesi esnasında tabakalı kompozit malzeme oryantasyonu olarak, simetrik [60°/-60°]_s ve antisimetrik [60°/-60°]₂ oryantasyonlar seçilmiştir. Koordinat eksen takımı, termoplastik tabakalı kompozit levhanın orta noktasına yerleştirildiğinde, h (8 mm) toplam tabaka kalınlığını göstermek üzere, model z-

yönünde dört tabakadan meydana gelmektedir ve x-eksenine göre tabakaların dizilişi simetrik ve antisimetrik oryantasyonu meydana getirmektedir. Oryantasyon açılarındaki değişimin, ısı gerilmeler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla oluşturulan simetrik ve antisimetrik modeller sırasıyla Şekil 1-b ve c'de şematik olarak gösterilmektedir.



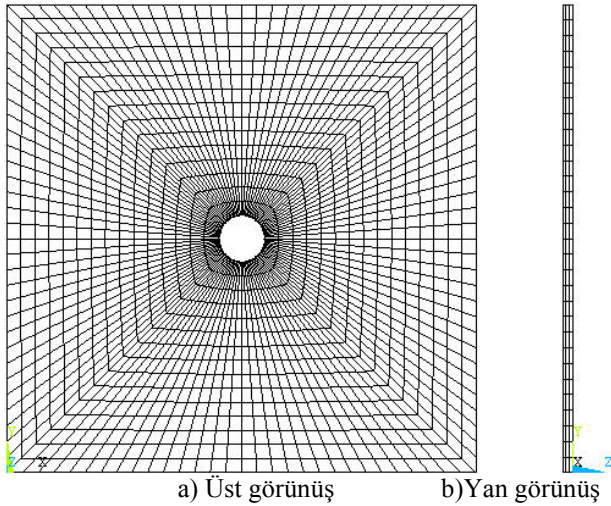
Şekil 1. a) Tabakalı kompozit plağın boyutları b) Simetrik oryantasyon, [60°/-60°]_s, c) Antisimetrik oryantasyon, [60°/-60°]₂

Oluşturulan modele uygun düzgün bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlara bölme işlemi için, 8-düğümlü yapısal elemanın, tabakalandırılmış katıların ve kabukların modeli için geliştirilmiş bir çeşidi olan SOLID46 eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipinin önemli bir özelliği, 250 farklı malzeme tabakasının elde edilebilmesini sağlamasıdır. Üç boyutlu çözümlerde kullanılan bu eleman tipinin, geometrisi, düğüm noktaları ve koordinat sistemi Şekil 2'de gösterilmiştir [10-11].



Şekil 2. SOLID46 eleman tipi

Bu sonlu elemanlara bölme işlemi sonucunda üç boyutlu model üzerinde 5400 eleman ve 7680 düğüm noktası meydana gelmiştir. Modelin sonlu elemanlara bölünmüş hali, Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Modelin sonlu elemanlar çözümü için oluşturulan ağ (mesh) yapısı

Analizlerde uniform sıcaklık miktarındaki artışın ısı gerilmeler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla her bir modele farklı uniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Sıcaklık aralığı 30 °C'den 60 °C'ye kadar 5 °C arttırılarak uygulanmıştır.

Matematiksel Formülasyon

İnce tabakalı kompozitlerde kullanılan klasik teoriye göre gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki (1) ve (2) eşitlikleri ile ifade edilmektedir [12].

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + [B] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} - [T^*] \Delta T \quad (1)$$

ve

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + [D] \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} - [T^{**}] \Delta T \quad (2)$$

Burada, N_x , N_y , N_{xy} ve M_x , M_y , M_{xy} sırasıyla birim uzunluk başına gelen bileşke kuvvetler ve momentlerdir. [A], [B] ve [D] tabaka rijitlik matrisleri, [T*] ve [T**] ise sırasıyla ısı kuvvet ve ısı moment bileşenleridir. Ara işlemler yapıldıktan sonra şekil değiştirmeler (3), (4) ve (5) eşitlikleri ile ifade edilir.

$$\varepsilon_x^o = \frac{R_2 U_2}{R_2^2} \frac{R_3 U_1}{R_1 R_3} \Delta T \quad (3)$$

$$\varepsilon_y^o = \frac{R_2 U_1}{R_2^2} \frac{R_1 U_2}{R_1 R_3} \Delta T \quad (4)$$

$$\gamma_{xy}^o = \frac{T_3 \Delta T + A_{16} \varepsilon_x^o + A_{26} \varepsilon_y^o}{A_{66}} \Delta T \quad (5)$$

Gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak her bir tabaka için gerilme-şekil değiştirme bileşenleri (6) ifadesi ile hesaplanabilir,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{zy}^o \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Diğer değişkenler olan poisson oranı ve dirençlilik ifadeleri (7) eşitliklerinde verildiği tarzda ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \nu_{21} &= \nu_{12} \frac{E_2}{E_1}, & Q_{11}^k &= \frac{E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k}, \\ Q_{12}^k &= \frac{\nu_{21}^k E_1^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k} = \frac{\nu_{12}^k E_2^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k}, & Q_{22}^k &= \frac{E_2^k}{1 - \nu_{12}^k \nu_{21}^k}, \\ Q_{66}^k &= G_{12}^k, & Q_{16}^k &= 0 \quad \text{ve} \quad Q_{26}^k = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

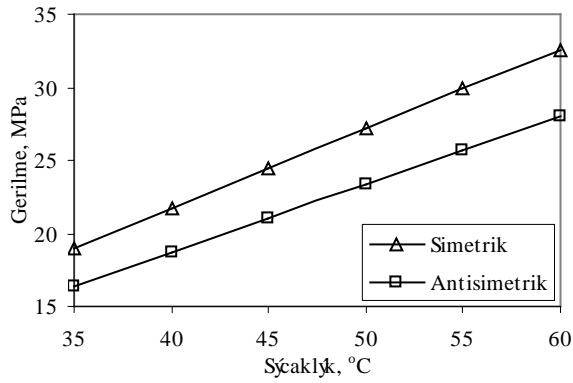
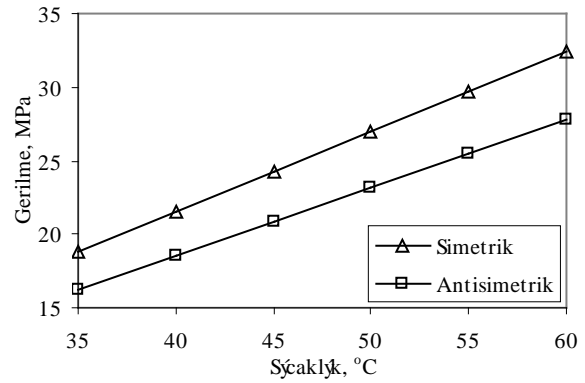
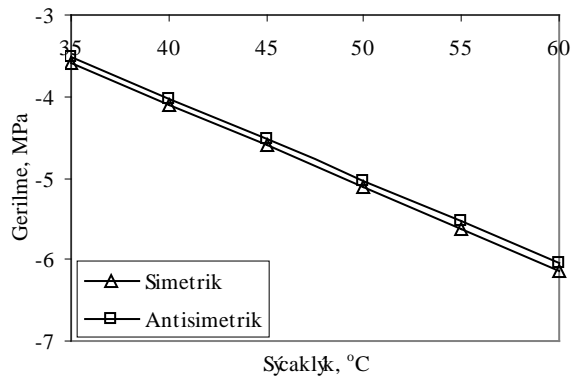
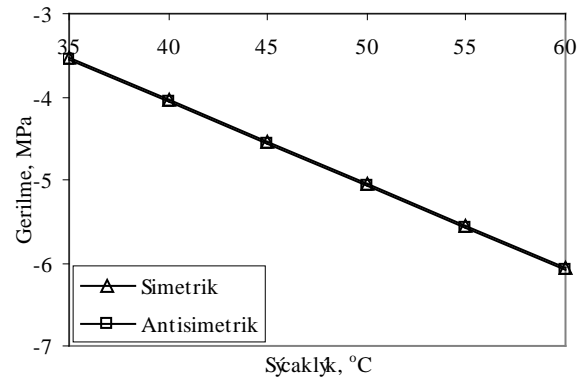
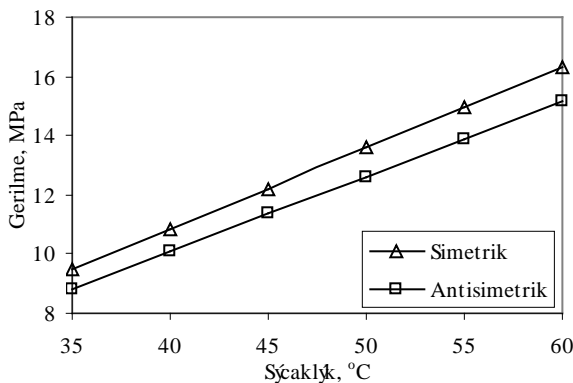
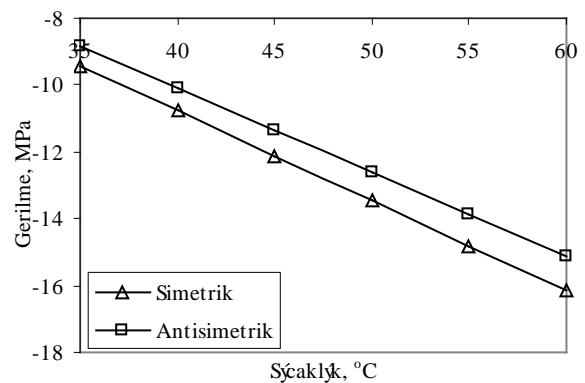
Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu kullanılarak, açılı oryantasyona sahip simetrik ([60°/-60°]_s) ve antisimetrik ([60°/-60°]₂), paslanmaz çelik fiberlerle takviye edilmiş, tabakalı ve ortasında dairesel delik bulunan termoplastik kompozit plaklarda, uniform sıcaklık etkisiyle meydana gelen ısı gerilmeler hesaplanmıştır. Üretilen malzemenin deneysel olarak mekanik özelliklerinin bulunmasının ardından, genel amaçlı sonlu elemanlar çözümü yapabilen bir paket program olan ANSYS'te, tabakalı ve ortasında dairesel delik bulunan kompozit plaka modellenmiş ve elde edilen bu mekanik özellikler sonlu elemanlarla çözümde kullanılmıştır. Elde edilen bulgular uygulanan

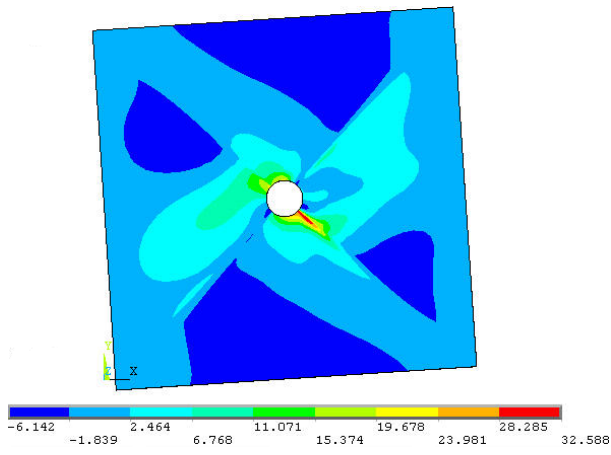
uniform sıcaklık yüklerine (30 °C'den 60 °C'ye kadar) bağlı olarak Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.

Simetrik ve antisimetrik oryantasyona sahip levhalarda meydana gelen normal ve kayma gerilmelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4-a ve Şekil 4-b'de sırasıyla x ve y yönlerindeki normal çeki gerilmelerini (σ_x ve σ_y), Şekil 4-c ve Şekil 4-d'de sırasıyla x ve y yönlerindeki normal bası gerilmelerini (σ_x ve σ_y), Şekil 4-e ve Şekil 4-f ise kayma gerilmelerinin

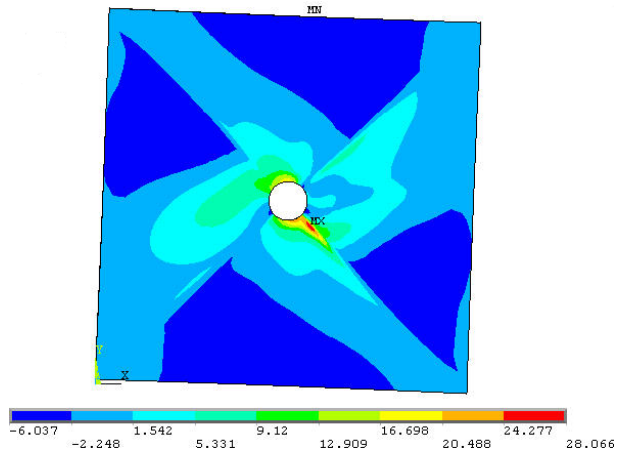
(τ_{xy}) sırasıyla çeki ve bası gerilmeleri olarak değişimlerini sıcaklığa bağlı olarak göstermektedir. Model üç boyutlu olarak oluşturulduğundan dolayı çözüm sonucunda τ_{xy} kayma gerilmeleri yanında τ_{xz} ve τ_{yz} kayma gerilmeleri de meydana gelmiştir. Fakat elde edilen bu değerler (τ_{xz} ve τ_{yz}), τ_{xy} kayma gerilmelerinin yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan ihmal edilmişlerdir. Şekil 4'ten görüldüğü üzere, uygulanan uniform sıcaklık değerindeki artışa bağlı olarak, normal ve kayma gerilmelerinin

a) σ_x çeki gerilmelerib) σ_y çeki gerilmeleric) σ_x bası gerilmelerid) σ_y bası gerilmelerie) τ_{xy} çeki gerilmelerif) τ_{xy} bası gerilmeleri

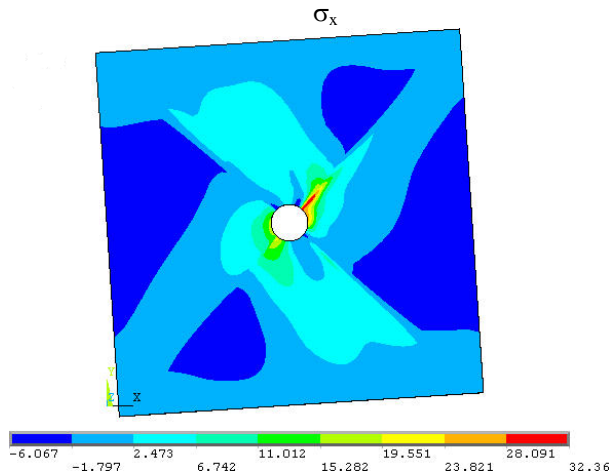
Şekil 4. Simetrik ve antisimetrik oryantasyona sahip delikli plaklarda meydana gelen normal ve kayma gerilmelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri



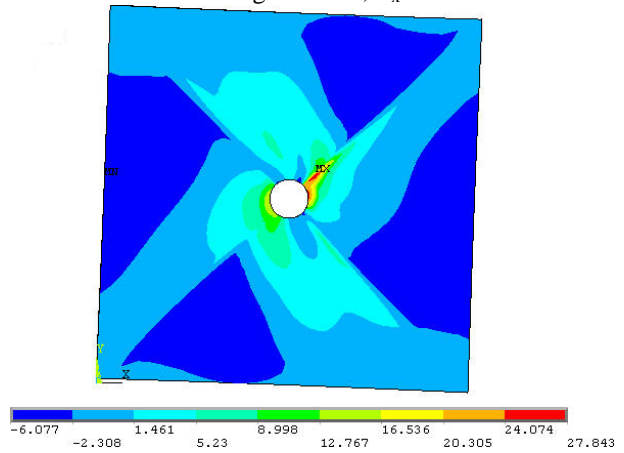
a) Simetrik levhada x-yönünde oluşan normal gerilmeler,



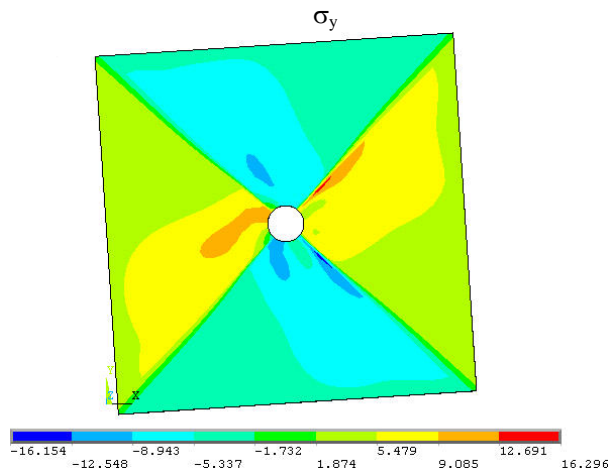
b) Antisimetrik levhada x-yönünde oluşan normal gerilmeler, σ_x



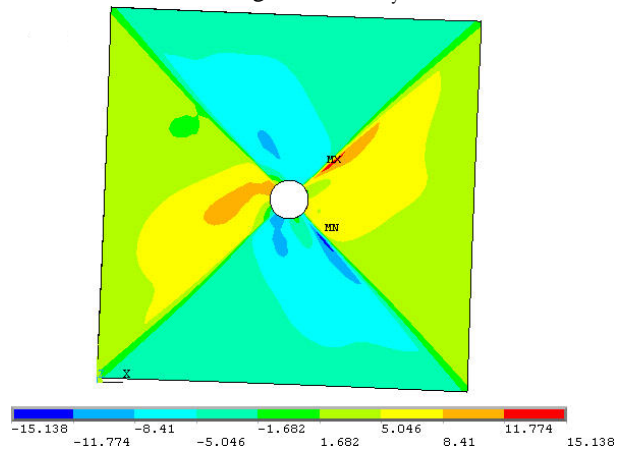
c) Simetrik levhada y-yönünde oluşan normal gerilmeler,



d) Antisimetrik levhada y-yönünde oluşan normal gerilmeler, σ_y



e) Simetrik levhada oluşan kayma gerilmeleri, τ_{xy}



f) Antisimetrik levhada oluşan kayma gerilmeleri, τ_{xy}

Şekil 5. Uygulanan 60 °C uniform sıcaklık etkisiyle simetrik ve antisimetrik oryantasyona sahip delikli plaklarda meydana gelen ısıl gerilme dağılımları

değerleri, mutlak değer olarak artış göstermektedir. Dolayısıyla mutlak değerce en büyük normal ve kayma gerilmeleri uygulanan en büyük uniform sıcaklık değeri olan 60 °C sıcaklık için, en küçük gerilme değerleri de en küçük uniform sıcaklık değeri olan 30 °C sıcaklıkta meydana gelmektedir. Oryantasyonun simetrik veya antisimetrik seçilmesi durumunda ısıl gerilmelerin değişimi incelenecek olursa, simetrik levhada meydana gelen ısıl gerilme değerleri, antisimetrik levhalarda

meydana gelen ısıl gerilme değerlerinden, mutlak değerce olmak üzere, daha büyüktür (Şekil 4). Sadece x-yönündeki normal bası gerilmelerinin değerleri simetrik levhada, antisimetrik levhadan mutlak değerce daha büyük hesaplanmıştır (Şekil 4-c). Fakat bu fark oldukça küçük olduğundan ihmal edilebilecek seviyededir. Sonlu elemanlarla analiz imkanı sağlayan hazır programların önemli avantajlarından birisi elde edilen sonuçların eş değerlere sahip eğriler veya renkler

(contours) ile gösterilebilmesidir. Bu durum model üzerinde meydana gelen gerilme dağılımlarının çok net bir şekilde görülmesini, dolayısıyla bası ve çeki gerilmelerinin olduğu bölgeleri ve gerilme yığılmalarının olduğu kritik bölgelerin saptanmasını kolaylaştırmaktadır. Çözümde kullanılan ANSYS programının da sağladığı bu avantaj kullanılarak, yapılan analize örnek olması bakımından, uygulanan 60 °C uniform sıcaklık etkisiyle, simetrik ve antisimetrik oryantasyona sahip plaklarda meydana gelen ısı gerilme dağılımları, eş gerilme eğrileri ve renk dağılımları yardımıyla Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5-a ve Şekil 5-b sırasıyla simetrik ve antisimetrik levhada x-yönünde meydana gelen normal gerilme (σ_x) dağılımlarını, Şekil 5-c ve Şekil 5-d sırasıyla simetrik ve antisimetrik levhada y-yönünde meydana gelen normal gerilme (σ_y) dağılımlarını, Şekil 5-e ve Şekil 5-f ise sırasıyla simetrik ve antisimetrik levhada meydana gelen kayma gerilmelerini (τ_{xy}) göstermektedir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi, simetrik ve antisimetrik oryantasyona sahip plaklarda, hem maksimum ve minimum ısı gerilme değerleri, hem de model üzerinde meydana gelen ısı gerilme dağılımları arasında oluşan farklar çok net olarak görülebilmektedir. Aynı zamanda model üzerinde, bası ve çeki gerilmelerinin dağılımlarını görmek mümkün olmaktadır.

Sonuçlar ve Öneriler

Birçok mühendislik probleminin çözümünde etkin bir matematiksel yöntem olan sonlu elemanlar metodu kullanılarak, simetrik ([60/-60]_s) ve antisimetrik ([60/-60]₂) oryantasyona sahip ortasında dairesel delik bulunan tabakalı termoplastik kompozit levhaların uniform sıcaklık yükü ile yüklenmeleri ile yapılan analizlerinin sonucunda başlıca şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Uygulanan uniform sıcaklık değeri arttıkça ısı gerilme değerleri de artmaktadır.
2. Tabakalı kompozit plakanın elde edilmesinde seçilen simetrik ve antisimetrik oryantasyonlar, kompozit plaka üzerinde farklı gerilme dağılımlarının oluşmasına neden olmaktadır.

Günümüzde kompozit malzemeler ile istenen birçok özellik sağlanabilmektedir. Fiber takviyeli polimer kompozitlerde (FRP) yukarıda bahsedildiği gibi birçok avantajlara sahiptir. Matris olarak termoplastik malzeme, fiber olarak paslanmaz çelik teller kullanarak elde ettiğimiz kompozit malzemenin Çizelge 1'de verilen özelliklerinden görüldüğü gibi fiber doğrultusunda daha yüksek elastisite modülü (E_1) sağlanırken, fibere dik doğrultudaki yönde ise daha düşük bir elastisite modülü (E_2) elde edilmiştir. Benzer durum ısı genleşme katsayıları (α_1 ve α_2) içinde geçerli olmaktadır. Dolayısıyla hangi yönde daha çok dayanım veya ısı iletkenlik özelliği isteniyorsa malzeme isteğe uygun elde edilebilmektedir. Bunun yanında herhangi bir kompozit malzemede tüm özelliklerin aynı anda eldesi mümkün değildir. Örneğin herhangi bir kompozit malzemede ısı yalıtımı özelliği olması istenirken, bir başka kompozit malzemede ısı iletkenliği sağlayan özellik olması istenebilmektedir. Bunun yanında eklenen her bir özelliğin üretilmek istenen kompozitin maliyetini arttıracığını bilmek gerekir. Bir kompozit malzemenin

üretilmesinden ve kullanılmasından önce, kompozit malzemeden istenen özellikler çok iyi belirlenmeli malzeme üretimi ve kullanımı ondan sonra yapılmalıdır. Oryantasyon açısı içinde aynı durum söz konusudur. Malzemeden istenen dayanıma uygun olarak simetrik veya antisimetrik oryantasyon açısı seçimine, tabaka sayısına ve tabaka sayısına bağlı olarak toplam malzeme kalınlığına (h) karar verilmelidir. Tabaka sayısı arttıkça istenen herhangi bir yönde mukavemet özellikleri artırılabilirken, malzeme ağırlığının artacağı göz ardı edilmemelidir.

Kaynaklar

- (1) L. Tong, A.P. Mouritz, and M. Bannister, 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, (2002) Elsevier, UK.
- (2) O. Sayman, M. Belevi, ve M. Duranay, Thermal stress analysis and residual stresses in a thermoplastic composite beam. J. of Reinforced Plastics and Com. **22** (2003) 67-81.
- (3) M. Gigliotti, F. Jacquemin, and A. Vautrin, On the maximum curvatures of 0/90 plates under thermal stress. Com. Struc. **68** (2005) 177-184.
- (4) D.D.L. Chung, Thermal analysis of carbon fiber polymer-matrix composites by electrical resistance measurement. Thermo. Acta. **364** (2000)121-132.
- (5) M. Akay, ve S. Özden, Measurement of residual stresses in injection molded thermoplastics. Poly. Test. **13** (1994) 323-354.
- (6) M. Şenel, H. Akbulut, and M. Toparlı, Residual stress analysis in symmetric thermoplastic laminated plates under thermal loads: analytic solution, J. of Thermo. Comp. Mat. **17** (2004) 481-507.
- (7) Y.M. Shabana, ve N. Noda, Thermo-elasto-plastic stresses in functionally graded materials subjected to thermal loading taking residual stresses of the fabrication process into consideration. Comp. Part B: Eng. **32** (2001) 111-121.
- (8) M.K. Apalak, K. Aldas, ve F Şen, Thermal non-linear stresses in an adhesively bonded and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction. J. of Mat. Proc. Tech. **142** (2003) 1-19.
- (9) N.B. Bektas, and O. Sayman, Elasto-plastic stress analysis in simply supported thermoplastic laminated plates under thermal loads. Comp. Sci. and Tech. **61** (2001) 1695-1701.
- (10) ANSYS®. Genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı. Yardım dosyaları.
- (11) S. Moaveni, Finite element analysis: Theory and application with ANSYS, (2003) 2nd edition. Pearson Education. Inc. New Jersey. USA.
- (12) R.M. Jones, Mechanics of Composite Materials, (1999) Taylor & Francis Inc., USA.