



FARKLI PLAKA KALINLIĞINDA VE TAKVİYE AÇILARINDA KOMPOZİT PLAKADA OLUŞAN TERMAL VE MEKANİK YÜKLERİN ANALİZİ

Tamer ÖZBEN*

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Diyarbakır

ÖZET

Bu çalışmada amaç, farklı kalınlık ve takviye açıları için kevlar/epoxy kompozit plakanın sıcaklık farkından dolayı oluşan termal yük ve momentlerinin boy değişmelerine ve eğilmelerine olan etkisini araştırmaktır. Dört tabakadan oluşan ve $[0_2/45_4]_2$ dizilime sahip dikdörtgen kompozit plaka, dörtkenarı serbest (f-f-f-f) ve bir kenarı ankastre diğer kenarları serbest (c-f-f-f) olarak seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Plakanın alt kenarının sıcaklığı 20°C seçilirken, üst tabaka sıcaklığı 80° , 120° ve 140°C olarak dikkate alınmıştır. Plakanın sabit sıcaklık (ΔT_0) ve lineer olarak değişen sıcaklık (ΔT_n) durumları için, maruz kaldığı termal kuvvetler ve momentler hesaplanmıştır. Tabaka sayısı sabit tutulurken, artan plaka kalınlık boyunca meydana gelen termal boy değişimleri ve eğilmelerin değişimi gösterilmiştir. Farklı takviye açıları için ($\theta=0^{\circ}$, 15° , 30° , 45°) plakadaki termal uzama/kısalma ve eğilmeler, farklı sınır şartlarına göre değişimi grafiklerle gösterilmiş ve sonuçlar araştırılmıştır.

THERMAL AND MECHANICAL ANALYSIS OF COMPOSITE PLATE WITH DIFFERENT THICKNESS AND REINFORCEMENT ANGLES

ABSTRACT

In this study, different thicknesses and reinforced respect for the kevlar/epoxy composite plates due to the difference in the temperature thermal/mechanical loads and moments are calculated. Consisting of four layers, and $[0_2/45_4]_2$ have four ply rectangular composite plate, quadrilateral free (f-f-f-f) and a built-in edge to free the other side (c-f-f-f) were selected as the calculations. The upper layer temperatures of 80° , 120° and 140°C are taken into consideration with the selection of lower edge of plate temperature 20°C . They are exposed to thermal forces and moments are obtained at constant temperature plate (ΔT_0) and linear change in the temperature (ΔT_n) for status. Number plates are held constant, increasing the thermal strains and curvatures occur along the plate thickness change showed. Plate of the thermal strains and curvatures for different reinforcement angles ($\theta=0^{\circ}$, 15° , 30° , 45°) has been shown to change the graphics and the results were compared according to the different boundary conditions.

1.GİRİŞ

Muliana ve ark. [1] fiber ve matriks arasındaki termal iletkenliğin yüksek olması durumunda fiber eksenini boyunca sıcaklık etkisini incelemişler ve heterojen yapıli kompozit malzemelerde önemli etkisi olduklarını ileri sürmüşlerdir. Syed ve ark [2]. Eksene dik doğrultuda yüklenmiş dikdörtgen kompozit bir

* Yrd. Doç. Dr., Makine Müh. Böl., E-mail:tamoz@dicle.edu.tr

ÖZBEN

plakada, tabakalara arasındaki kesme kuvvetlerinin sıcaklık farklarından dolayı etkilenmeyeceğini ileri sürmüştür. Brischetto ve ark. çok katmanlı kompozit plakaların termal eğilmelerinin analizi için kalınlık etkisini dikkate alan yüksek mertebeden model çözümlerinin gerekliliğini ileri sürmüşlerdir [3]. Çallioğlu ve ark. [4] plaka tabakaları boyunca lineer olarak değişen sıcaklıklardan dolayı fiber takviyeli kompozit plakada meydana gelen termal gerilmeleri araştırmışlardır. Bektaş ve ark [5] aynı sıcaklıklarda, tüm dizilimlerde artık gerilme bileşenlerinin değerinin aynı kaldığını ileri sürmüşlerdir. Liu ve ark. [6] üretim süreci esnasında yapılan soğutmadan dolayı kompozit malzemelerde termal gerilmeler plastik akış yüzeylerini etkilemekte ve pekleşme oluşmakta ve dolayısıyla akma yüzeylerinin değişmesine neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Sayman [9] fiber takviyeli alüminyum kompozit bir kırılgan termal yük altında elastik-plastik davranışını araştırmıştır ve en büyük artık gerilme yoğunluğunu 0° takviye açısında elde etmiştir. Sobolev ve ark. [10] çok katmanlı rijit bir plakanın sıcaklık etkisiyle plakada oluşan gerilme ve uzamaları tanımlayan bir hesaplama prosedürü geliştirmişlerdir. Kalınlık oranı artışının iki boyutlu modelin hatalarında artışa sebep olduğunu, bu hata ankastre mesnetlide daha belirgin olduğunu ileri sürmüşlerdir. Huang [11] termal yükün, tabaklar arası gerilme dağılımını ve plakada meydana gelen doğal titreşim davranışlarını incelemişlerdir..

Bu çalışmada farklı sıcaklık uygulamalarında kullanılması muhtemel kompozit plakaların termal yük altındaki davranışı araştırılmıştır. Araştırmada kevlar/epoksi kompozit tabakalar kullanılmıştır. $[0_2/45_s]_2$ dizilimine sahip dikdörtgen plaka kalınlığının sıcaklık dağılımına etkisi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar farklı sınır şartlarında ele alınmış ve termal birim uzamalar grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Plaka deformasyonları $(\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0)$ ve eğrilikleri $(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy})$ sabit sıcaklık (ΔT_0) ve lineer olarak değişen sıcaklık (ΔT_h) değişimleri göz önüne alınarak teorik olarak hesaplanmıştır.

2. KOMPOZİT PLAKAYA TERMAL VE MEKANİK YÜKLERİN UYGULANMASI

Dış yükler ve sıcaklık farkından doğan gerilmelerin ince kompozit plakalarda önemli deformasyonlar yol açacağı bilinmektedir. Dış yük olarak düzlemsel kuvvet değerleri; N_x, N_y, N_{xy} , moment değerleri ise M_x, M_y, M_{xy} olarak kabul edilmektedir. Sıcaklık farkından dolayı malzemelerde dikkate alınması gereken boyutsal değişiklikler, malzemenin termal genleşme katsayısına da bağlıdır (Şekil 1). Termal ve mekanik dış yüklerin sebep olduğu kuvvetlerin ve momentlerin düzlemsel gerilme hali aşağıdaki gibi yazılır;

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N'_x \\ N'_y \\ N'_{xy} \\ M'_x \\ M'_y \\ M'_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

burada A_{ij} düzlemsel kuvvetlerin sebep olduğu deformasyonların $(\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0)$ hesaplanmasında kullanılan rijitlik matrisi, D_{ij} düzlemsel kuvvetlerden dolayı oluşan momentlerin yol açtığı plakadaki eğriliğin $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$ hesaplanmasında kullanılan eğilme rijitliği, B_{ij} birleşme rijitlik matrisi ise uzamaya sebep olan kuvvetlerin eğilmeye olan etkisini, aynı şekilde plakaya etkiyen momentin uzamaya olan etkisini temsil eder. Sıcaklık farkından dolayı plakada meydana gelen termal kuvvetler ve momentler aşağıdaki gibi yazılabilir;

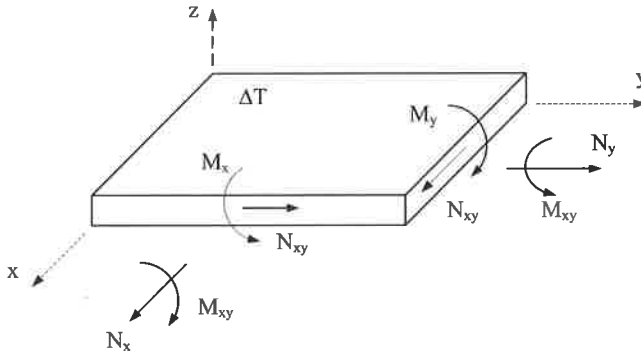
ÖZBEN

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{16} & \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{16} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{26} & \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{26} \\ \alpha_{16} & \alpha_{26} & \alpha_{66} & \beta_{61} & \beta_{62} & \beta_{66} \\ \beta_{11} & \beta_{21} & \beta_{61} & \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{16} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \beta_{62} & \delta_{12} & \delta_{22} & \delta_{26} \\ \beta_{16} & \beta_{26} & \beta_{66} & \delta_{16} & \delta_{26} & \delta_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N'_x \\ N'_y \\ N'_{xy} \\ M'_x \\ M'_y \\ M'_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

burada α_{ij} , β_{ij} ve δ_{ij} elastik gevşeklik matrisleridir, uzamalar ve/veya eğilmeler aşağıdaki genelleştirilmiş formüldeki gibi yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{0,f} \\ \varepsilon_y^{0,f} \\ \gamma_{xy}^{0,f} \\ \kappa_x^f \\ \kappa_y^f \\ \kappa_{xy}^f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{16} & \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{16} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{26} & \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{26} \\ \alpha_{16} & \alpha_{26} & \alpha_{66} & \beta_{61} & \beta_{62} & \beta_{66} \\ \beta_{11} & \beta_{21} & \beta_{61} & \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{16} \\ \beta_{12} & \beta_{22} & \beta_{62} & \delta_{12} & \delta_{22} & \delta_{26} \\ \beta_{16} & \beta_{26} & \beta_{66} & \delta_{16} & \delta_{26} & \delta_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N'_x \\ N'_y \\ N'_{xy} \\ M'_x \\ M'_y \\ M'_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Kompozit plaka boyutları 1x1 m boyutlarında ve % 60 fiber hacim oranında seçilmiş, malzeme diğer özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.



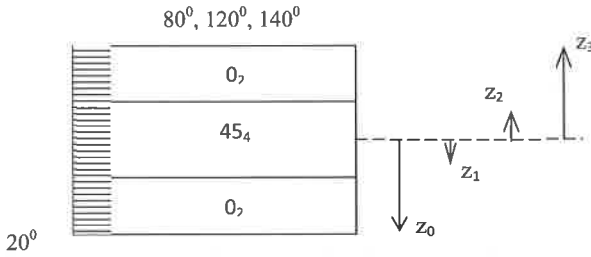
Şekil 1. Termal ve mekanik yüklerin kompozit plakaya uygulanması

ÖZBEN

Table 1. Kevlar/epoxy katmanının özellikleri [7]

| | | | |
|---|--------------------|-------------------|-----------------------|
| Eksenel yöndeki elastik modülü | (E ₁) | (MPa) | 85.000 |
| Eksenel dik yöndeki elastik modülü | (E ₂) | (MPa) | 5.600 |
| Kayma modülü | (G ₁₂) | (GPa) | 2.100 |
| Poission oranı | (ν ₁₂) | - | 0.34 |
| Eksenel yönde termal iletkenlik katsayısı (20 ⁰ C de) | (α ₁) | 1/ ⁰ C | -0.4x10 ⁻⁵ |
| Eksene dik yönde termal iletkenlik katsayısı (20 ⁰ C de) | (α ₂) | 1/ ⁰ C | 5.80x10 ⁻⁵ |

Sıcaklık dağılımının plaka kalınlığı boyunca sabit ve lineer olarak değişiminin gösterildiği Şekil 2 de alt yüzey sıcaklığı 20⁰ kabul edilirken, plakanın üst yüzeyinde ise farklı sıcaklıklar 80⁰, 120⁰ ve 140⁰ seçilmiştir.



Şekil 2. Kevlar/epoxy kompozitin tabakalı dizilimi.

Ortalama sabit sıcaklıkta (ΔT_0) plakada meydana gelen termal kuvvet ve momentler [8];

$$\begin{Bmatrix} N'_x \\ N'_y \\ N'_{xy} \end{Bmatrix} = \Delta T_0 \sum_{k=1}^K (z_k - z_{k-1}) [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_{xy} \end{Bmatrix} = \Delta T_0 \sum_{k=1}^K \left(\frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \right) [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (5)$$

Kalınlık boyunca lineer olarak değişen (ΔT_h) plakada meydana gelen termal kuvvet ve momentler;

ÖZBEN

$$\begin{Bmatrix} N'_x \\ N'_y \\ N'_{xy} \end{Bmatrix} = \Delta T_1 \sum_{k=1}^K \left(\frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix}_k \right) \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_{xy} \end{Bmatrix} = \Delta T_1 \sum_{k=1}^K \left(\frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix}_k \right) \quad (7)$$

plaka alt yüzey sıcaklığı 20° iken üst yüzey sıcaklığı 80°C olduğunda;

$$\Delta T_0 = \frac{20+80}{2} = 50^{\circ} \quad \Delta T_1 = \frac{80-20}{h} = 30.000^{\circ}\text{C}/m$$

üst yüzey sıcaklığı 140°C için

$$\Delta T_0 = \frac{20+140}{2} = 80^{\circ} \quad \Delta T_1 = \frac{140-20}{h} = 60.000^{\circ}\text{C}/m$$

üst yüzey sıcaklığı 220°C için

$$\Delta T_0 = \frac{20+220}{2} = 120^{\circ} \quad \Delta T_1 = \frac{220-20}{h} = 100.000^{\circ}\text{C}/m$$

burada $h=0,002$ m plaka kalınlığı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca farklı kalınlıklar için ($h=0,0025$ ve $0,0030$) lineer olarak değişen sıcaklık değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$h=0.0025 \text{ m}; \Delta T_1 = 30000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0025 \text{ m}; \Delta T_1 = 24000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0030 \text{ m}; \Delta T_1 = 20000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0020 \text{ m}; \Delta T_1 = 60000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0025 \text{ m}; \Delta T_1 = 48000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0030 \text{ m}; \Delta T_1 = 40000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0025 \text{ m}; \Delta T_1 = 100000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0025 \text{ m}; \Delta T_1 = 80000^{\circ}\text{C}/m$$

$$h=0.0030 \text{ m}; \Delta T_1 = 66666^{\circ}\text{C}/m$$

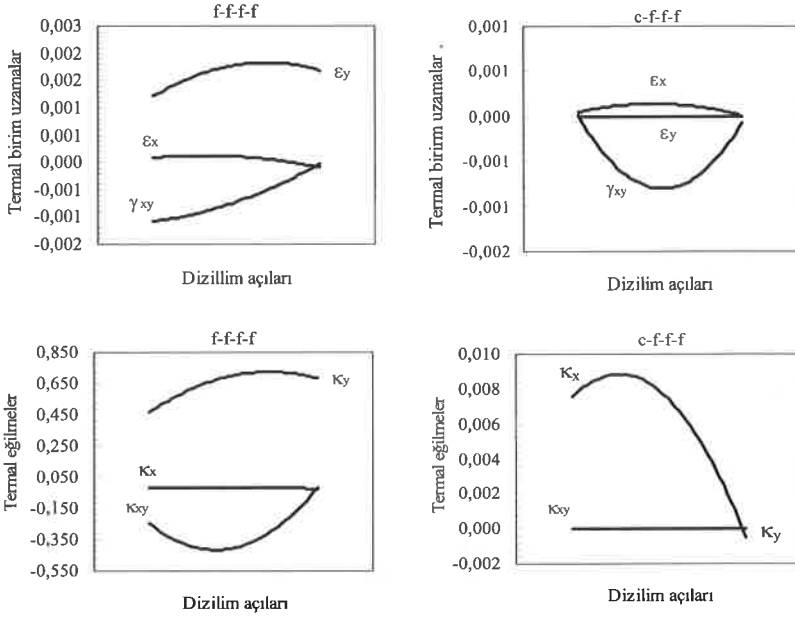
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 3 farklı mesnetler ve (0° - 45°) takviye açıları için $\Delta T_0=50^{\circ}$ ve $h=0.002$ m kalınlığındaki plakada oluşan termal uzamaları göstermektedir. Dizilim açıları dikkate alındığında bir kenarı ankastre diğer kenarları serbest olan plakanın (c-f-f-f) kayma birim uzamaları (γ_{xy}) tüm kenarları serbest olana plakaya göre (f-f-f-f) dizilim açılına göre hassasiyeti daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. (f-f-f-f) mesnet tipinde maksimum termal eğilme değişimi xy-referans düzlemindeki eğilmede (κ_{xy}) meydana

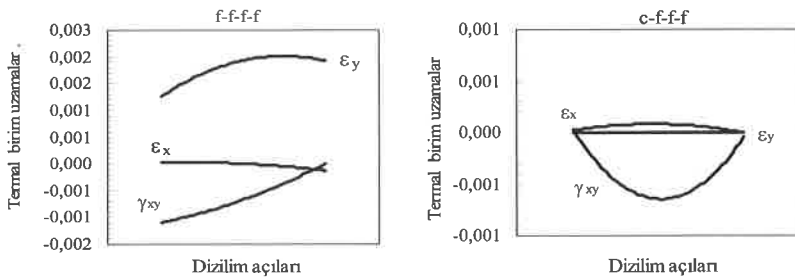
XVII. Ulusal Mekanik Kongresi

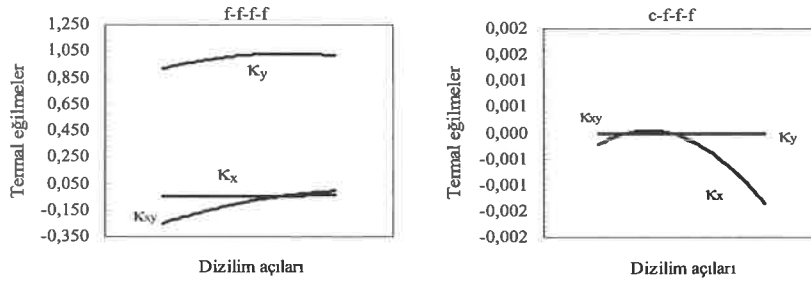
gelirken, (c-f-f) mesnet tipinde ise x-referans eksenindeki eğilmeye (κ_x) görülmüştür.

Şekil 4 de $h=0.003$ m kalınlığında; farklı mesnetler ve (0^0-45^0) takviye açıları için $\Delta T_0=50^0$ kalınlığındaki plakada oluşan termal uzamaları göstermektedir. Dizilim açıları dikkate alındığında plaka kalınlığının $h=0.003$ seçilmesiyle en önemli değişim (f-f-f) mesnet tipinde x-referans ekseninde (κ_x) ve xy-referans düzleminde (κ_{xy}) termal eğilme değişiminin azalması olmuştur.

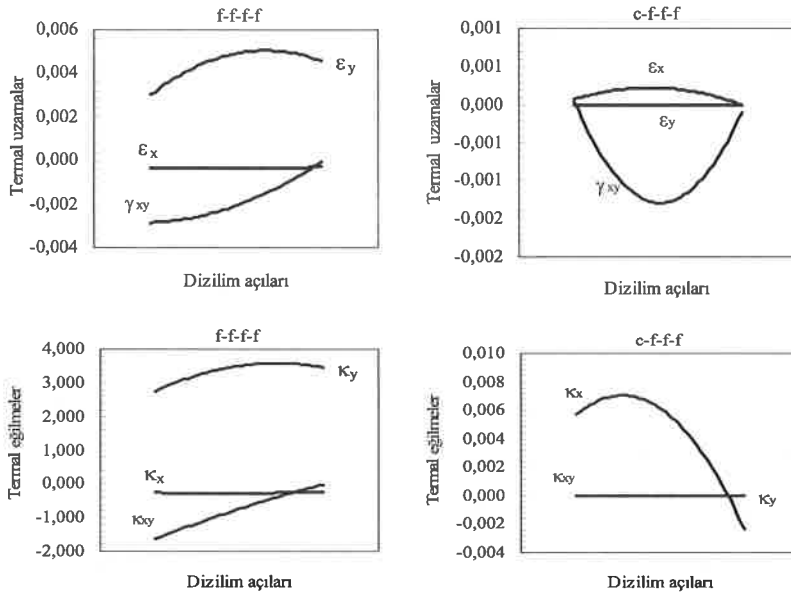


Şekil 3. Farklı mesnetler ve (0^0-45^0) takviye açıları için $\Delta T_0=50^0$ ve $h=0.002$ m kalınlığındaki plakada oluşan termal uzamalar.

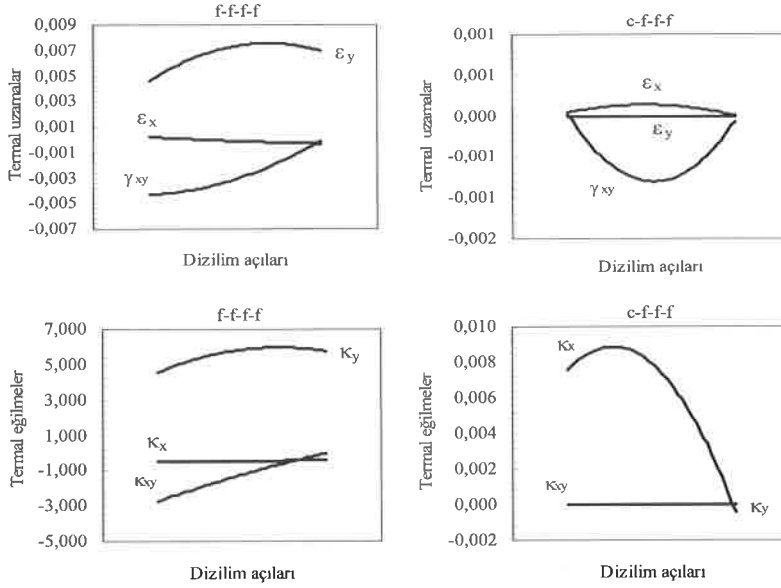




Şekil 4. Farklı mesnetler ve $(0^{\circ}-45^{\circ})$ takviye açıları için $\Delta T_0=50^{\circ}$ ve $h=0.003$ m kalınlığındaki plakada oluşan termal birim uzama ve eğilmeler.



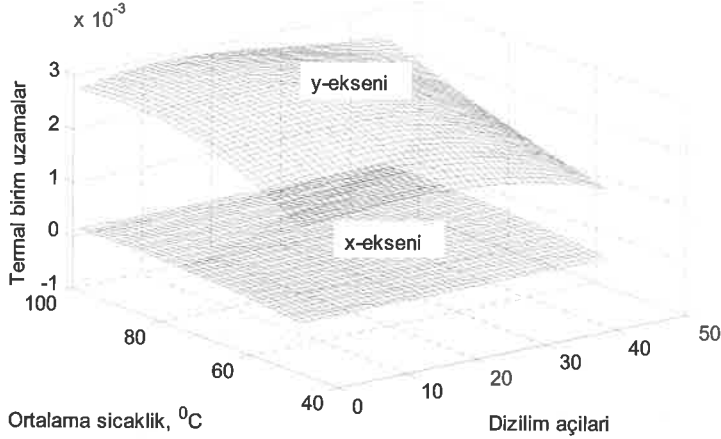
Şekil 5. Farklı mesnetler ve $(0^{\circ}-45^{\circ})$ takviye açıları için $\Delta T_0=80^{\circ}$ ve $h=0.002$ m kalınlığındaki plakada oluşan termal birim uzamalar.



Şekil 6. Farklı mesnetler ve (0^0-45^0) takviye açıları için $\Delta T_0=120^0$ ve $h=0.002$ m kalınlığındaki plakada oluşan termal birim uzama ve eğilmeler.

Şekil 5 ve 6 da farklı mesnet ve (0^0-45^0) takviye açıları için $h=0.002$ m kalınlığındaki plakada oluşan termal birim uzama ve eğilmelerin ortalama sıcaklık (ΔT_0) artışına göre karşılaştırılması yapılmıştır. Ortalama sıcaklığın artışı ile termal uzama ve eğilmelerin dizilim açılarına göre değişim grafiklerinde önemli bir fark oluşmamıştır. Ancak (f-f-f-f) mesnet tipinde termal eğilme uzamalarında ortalama sıcaklığın artışı ile önemli bir artış gözlemlenmiştir. $\Delta T_0=80^0$ de y-eksenine göre maksimum eğilme $\kappa_y=2.25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ olurken, $\Delta T_0=120^0$ de bu değer yaklaşık $6.00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ olmuştur.

Şekil 7 (f-f-f-f) mesnet tipine göre takviye elemanı fiberlerin y-eksenine göre dizildiği dikkate alındığında termal uzamalar takviye açısı artırıldığında azalmaktadır. Bu durumda maksimum termal uzama ortalama sıcaklık ($\Delta T_0 =120^0$) ve takviye açısı 0^0 olduğu durumda elde edilirken, minimum uzama ise ($\Delta T_0 =50^0$) ve takviye açısı 45^0 olduğu durumda elde edilmiştir.

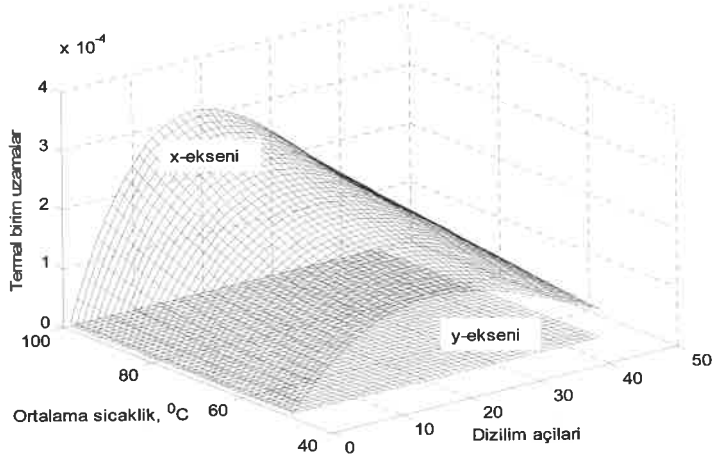


Şekil 7. f-f-f sınır şartlarında farklı ortalama sıcaklıkları ve oryantasyon açılarında $h=0.002$ m kalınlığındaki plakanın x ve y eksenindeki termal uzama (ϵ_x, ϵ_y) değişimi.

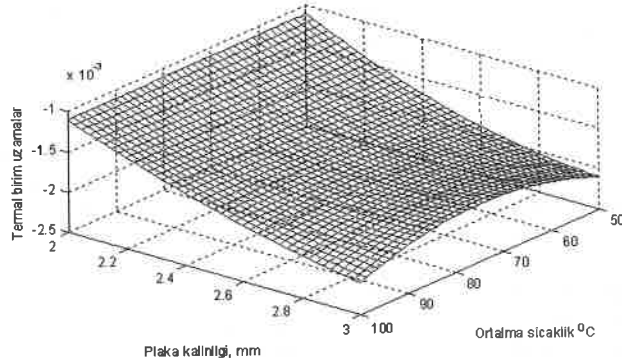
Şekil 8 de (c-f-f-f) mesnet tipi, farklı ortalama sıcaklıkları ve oryantasyon açılarında $h=0.002$ m kalınlığındaki plakanın (ϵ_x, ϵ_y) değişimi gösterilmiştir. y-ekseninden bir kenarı sabitlenmiş plakada termal birim uzamalarda değişim olmadığı görülmektedir. Serbest bırakılan x-ekseninde ise plakadaki termal uzamalar (20^0-25^0) takviye acılarında maksimuma ulaştıktan sonra diğer takviye açılarında uzamalar azalmaktadır.

Şekil 9. f-f-f sınır şartlarında farklı ortalama sıcaklıklarında (ΔT_0) ve plaka kalınlığında $\theta=45^0$ için plakanın kaymadaki termal uzamalarını (γ_{xy}) göstermektedir. Beklenildiği gibi plaka kalınlığı arttıkça termal uzamalarda azalma meydana gelmiştir. Ancak ortalama sıcaklık artışına göre, uzamalarda önemli bir değişim söz konusu olmamıştır.

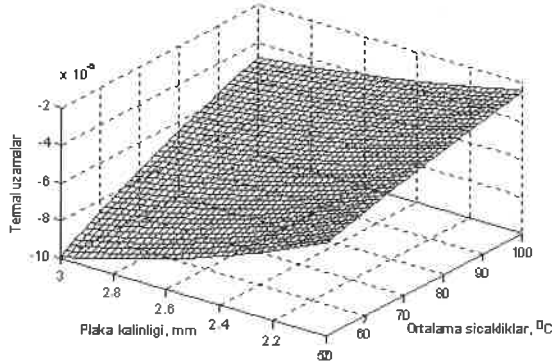
Şekil 10. c-f-f-f sınır şartlarında farklı ortalama sıcaklıklarda (ΔT_0) ve plaka kalınlığında (h) $\theta=45^0$ için plakanın termal uzamalarını (γ_{xy}) göstermektedir. Benzer şekilde, plaka kalınlığının azalmasıyla uzamalarda düşüş gözlenmiştir. Diğer mesnet tipinden farklı olarak sıcaklık artışına bağlı olarak uzamalarda hassasiyet daha fazla olmuştur.



Şekil 8. c-f-f sınır şartlarında farklı ortalama sıcaklıkları ve oryantasyon açılarında $h=0.002$ m kalınlığındaki plakanın x ve y eksenindeki termal uzama (ϵ_x, ϵ_y) değişimi.



Şekil 9. f-f-f sınır şartlarında farklı ortalama sıcaklıklarında (ΔT_0) ve plaka kalınlığında $\theta=45^\circ$ için plakanın kaymadaki termal uzama (γ_{xy}) değişimi.



Şekil 10. c-f-f sınır şartlarında farklı ortalama sıcaklıklarda (ΔT_0) ve plaka kalınlığında (h) $\theta=45^\circ$ için plakanın termal uzama (γ_{xy}) değişimi.

Kaynaklar

- [1] Muliana, A.H., Kim, J.S., "A two-scale homogenization framework for nonlinear effective thermal conductivity of laminated composites", *Acta Mechanica*, 212, 319–347, 2010.
- [2] Syeda, K.A., Sua, C.W., ve Chan, W.S., "Analysis of Fiber-Reinforced Composite Beams Under Temperature Environment", *Journal of Thermal Stresses*, 32, 311–321, 2009.
- [3] Brischetto, S., Carrera, E., "Thermal Stress Analysis by Refined Multilayered Composite Shell Theories", *Journal of Thermal Stresses*, 32, 165–186, 2009.
- [4] Çallıoğlu, H., Tarakçılara, A.R., Bektaş, N.B., "Elastic-plastic stress analysis of laminated composite beams under linear temperature distribution", *Journal of Thermal Stresses*, 27, 1075–1088, 2004.
- [5] Bektaş, N.B., "Thermal elastic-plastic stress analysis of steel woven reinforced aluminum metal-matrix composite laminated plates", *Journal of Thermal Stresses*, 27: 917–929, 2004.
- [6] Liu, H.T., Sun, L.Z., "Effects of thermal residual stresses on effective elastoplastic behavior of metal matrix composites", *International Journal of Solids and Structures*, 41, 2189–2203, 2004.
- [7] Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W., *Composite Materials Design and Applications*, CRC Pres, 2003.
- [8] Kollar, L.P., Springer, G.S., *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge University Pres, 2003.
- [9] Sayman, O. "Elastic-plastic thermal stress analysis in aluminum metal-matrix composite beam: analytic solution", *Journal of Thermal Stresses*, 25, 69- 82, 2002.
- [10] Soboleva, I.A., Popov, B.G., "Modelling of thermal strains of multilayer shell-type space structures", *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 74, 258-267, 2001.
- [11] Huang, Z.M., "Strength formulae of unidirectional composites including thermal residual stresses", *Materials Letters*, 43, 36–42, 2000.