

Cam ve Karbon Elyaf ile Oluşturulan Karma Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Analitik ve Nümerik Araştırılması

Mehmet Çağrı Tüzemen¹

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir.

e-posta: cagrituzemen@nevsehir.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1746-2864>

Geliş Tarihi: 10.11. 2022 Kabul Tarihi: 21.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Karma kompozit;
Cam/karbon elyaf;
Mekanik özellikler;
Sonlu elemanlar
analizi; Klasik tabaka
teorisi

Kompozitlerin kullanım alanları arttıkça farklı tip elyafların birlikte kullanıldığı karma kompozitlerin de kullanım alanları genişlemektedir. Karma kompozitler, dayanım ve maliyet birlikte düşünüldüğünde ümit verici bir yaklaşım getirmektedir. Bu çalışmada çeşitli dizilimlerle oluşturulan cam/karbon elyaf karma kompozitlerin çekme ve moment yükü altında dayanımları analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca yalın cam elyaf ve yalın karbon elyaftan oluşan kompozitler de karşılaştırma açısından sonlu elemanlar analizine tabii tutulmuştur. Bu kompozitler üzerine gelen yüke karşılık dayanımları klasik tabaka teorisi kullanılarak analitik yaklaşım ile de çözümlenerek sonlu elemanlar analizleri doğrulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda kullanılan elyafın çekme dayanımına doğrudan etkisinin olduğu, katman diziliminin ise etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Moment yükü altında ise en yüksek çekme yüküne maruz kalan en alt katmanda karbon elyaf kullanımının cam elyafa göre dayanabileceği en yüksek moment yükünü yaklaşık olarak %33 arttırdığı görülmüştür. Aynı yük altında diğer katmanlarda kullanılan elyafın etkisinin ise çok sınırlı kaldığı sonucuna varılmıştır.

Analytical and Numerical Investigation of the Tensile Strength of Hybrid Composites Created with Glass and Carbon Fibers

Abstract

Keywords
Hybrid composite;
Glass/carbon fiber;
Mechanical properties;
Finite elements
analysis; Classical
laminar theory

As the usage areas of composites increase, the usage areas of hybrid composites in which different types of fibers are used together are also expanding. Hybrid composites offer a promising approach when strength and cost are considered together. In this study, the strengths of glass/carbon fiber composites formed with various stacking sequences under tensile and moment load were investigated analytically and numerically. In addition, composites consisting of pure glass fiber and pure carbon fiber were also subjected to finite element analysis for comparison. The finite element analysis was verified by using the classical lamination theory to solve the strengths of these composites against the load with an analytical approach. As a result of the analysis, it was concluded that the fiber used has a direct effect on the tensile strength, but the stacking sequence has no effect. Under the moment load, it was observed that the use of carbon fiber in the bottom layer, which is exposed to the highest tensile load, increases the highest moment load that it can withstand by approximately 33% compared to glass fiber. Under the moment load, it was observed that the use of carbon fiber in the bottom layer, which is exposed to the highest tensile load, increases the highest moment load that it can withstand by approximately 33% compared to glass fiber. It was concluded that the effect of the fiber used in the other layers under the same load was very limited.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Kompozit malzemeler birden fazla farklı kimyasal veya fiziksel özelliklere sahip malzemenin bir araya getirilerek daha üstün fiziksel ve/veya mekanik

özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için üretilen malzemelerdir. Bu malzemeler birbiri içerisinde çözünmeden ve atomik bağ oluşturmadan birleşmesiyle kompozit malzemeleri oluşur. Matris ve takviye elemanından oluşan kompozitlerde yükü

taşıyan malzeme takviye elemanıdır. Takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid vb. çeşitli elyaflar kullanılmaktadır (Atmaca vd 2021, Eskizeybek vd. 2018, Khakzad vd. 2019, Korkmaz vd. 2022). Bu elyafların mekanik özellikleri ve maliyetleri çeşitlilik gösterdiği için kullanım alanları da farklılaşabilmektedir (Tüzemen, 2022a). Karbon elyafların dayanımı ve elastisite modülü yüksektir ancak cam elyafa göre daha düşük kırılma uzamasına sahiptir (Wang *et al.* 2018). Bu nedenle çekme, eğilme veya darbe gibi çeşitli yükleme koşullarında farklı elyaflara ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu durumda karma kompozitler oldukça umut verici yapılar olarak öne çıkmaktadır.

Polimer matrisli karma kompozitler çeşitli elyafların aynı plaka içinde birlikte kullanılmasıyla oluşturulur. Karma kompozitler yalnızca tek bir elyaflın avantajlarını içermekle kalmaz, aynı zamanda iki malzemenin mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklerini de sağlayabilir (Wu *et al.* 2018). Karma kompozitler katmanlar arası, katman içi ve birbirine karışmış olacak şekilde tasarlanabilir (Zuo *et al.* 2021). Katmanlar arası karma kompozitlerde her bir katmanda yalnızca bir tür elyaf kullanılır. Polimer matrisli karma kompozitlerde elyaf malzemesi olarak cam (Selver, 2019), karbon (Özsoy, 2022), aramid (Karacor ve Özcanlı, 2022) ve doğal (Erkliğ vd. 2022) elyaflar kullanılabilir. Son yıllarda karma kompozit yapıların mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar artmıştır. Yapılan çalışmalar farklı katman sayıları için tasarıma bağlı olarak karma kompozitlerin kimi mekanik özelliklerinin yalın kompozitlerden daha iyi olabileceğini göstermiştir. Ali ve ark. yaptıkları çalışmada karma kompozit tasarımının yalın kompozitlere göre en yüksek darbe yükünü arttırdığı ancak emilen enerjiyi ve kritik yükü düşürdüğünü bildirmişlerdir (Ali vd. 2020). Pujar ve ark. cam elyaftan oluşan plakaların belirli katmanlarına toplam katmanın %20'si oranında karbon elyaf eklemiş ve yeni karma tasarımların çekme dayanımını yaklaşık olarak %12 ile %37 oranında arttırdığı sonucuna varmışlardır (Pujar *et al.* 2022). Wu vd. yaptıkları çalışmada karma tasarımlardan birinin basma dayanımının onu oluşturan cam ve karbon yalın numunelerden daha yüksek basma dayanımına sahip olduğunu

bildirmişlerdir (Wu vd. 2018). Wang vd. yaptıkları çalışmada tasarladıkları yapılar içerisinde bir karma yapının yalınlar dahil bütün yapılardan daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğunu göstermişlerdir. Ancak karma tasarımlar içinde eğme dayanımında onu oluşturan yalın kompozitleri geçecek bir karma kompozit tasarımı bulunmamaktadır (Wang *et al.* 2021). Sonuç olarak karma kompozit yapı tasarımında katman sayısına göre katmanların dizilimi oluşturulması oldukça önem arz etmektedir. Bu sayede karma kompozit yapı aynı katman sayısında kendisini oluşturan elyafların yalın hallerinden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olabilmektedir. Böylece yüksek mekanik özelliklere sahip daha düşük maliyetli kompozit malzeme üretimi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı yalın ve çeşitli elyaf dizilimleriyle oluşturulmuş katmanlar arası karma kompozitlerde katman dizilimlerinin mekanik özelliklere etkisinin araştırılmasıdır. Cam elyaf/epoksi ile karbon elyaf/epoksi'den oluşan yalın ve belirli bir sistematik içinde altı katmandan oluşturulan karma kompozit plakaların analitik ve nümerik olarak çekme ve moment yükü altındaki dayanımları araştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları analitik çözüm ile doğrulanmıştır. K-1 ile K-4 arasındaki kompozitlerde cam/karbon elyaf kullanım oranı 1/1 iken K-5 ile K-10 arasındaki ise 1/2 veya 2/1 oranındadır. Böylece karma kompozitlerdeki elyaf kullanım oranlarının etkisi de incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada tek yönlü cam elyaf/epoksi ve tek yönlü karbon elyaf/epoksi kullanılarak yalın ve karma kompozit plakalar oluşturulmuştur. Plakalar toplam kalınlık 1.5 mm olacak şekilde altı katman olarak tasarlanmıştır. Numunelerin uzunluğu 250 mm, genişliği ise 25 mm'dir. Oluşturulan tasarımların kodlama ve dizilişleri Şekil 1'de verilmiştir. K-1, K-2, K-3 ve K-4 karma plakalar kullanılan elyaf malzemeleri açısından simetrik değildir. Kullanılan elyafların x yönündeki kimi mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tasarımların tip, kodlama ve dizilişleri (Açık gri cam elyaf, koyu gri ise karbon elyaf katmanı temsil etmektedir).

Çizelge 1. Cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksinin x yönündeki kimi mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson's Oranı
Cam Elyaf/Epoksi	780	60	35	0.28
Karbon Elyaf/Epoksi	1632	80	123	0.27

2.1 Analitik Yöntem

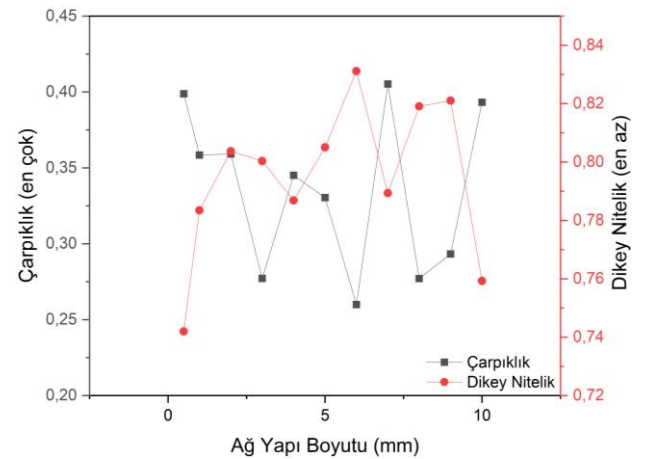
Analitik olarak yalın cam ve yalın karbon elyaftan oluşan plakaların çözümleri yapılmıştır. Böylece sonlu elemanlar analizlerindeki sonuçların doğrulanması yapılabilecektir. Bir uçtan çekme yüküne maruz kalan plakaların üzerinde oluşan gerilmeler bulunmuştur. Bunun için klasik tabaka teorisi kullanılmıştır. Klasik tabaka teorisindeki bileşke kuvvetler (N_x , N_y , N_{xy}) ve momentler (M_x , M_y , M_{xy}) ile orta yüzey şekil değiştirmeler (ϵ_x^0 , ϵ_y^0 , γ_{xy}^0) ve eğrilikler (K_x , K_y , K_{xy}) arasındaki ilişki Eş. 1'de verilmiştir.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.2 Nümerik Yöntem

Nümerik yöntemde sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi Ansys programı kullanılarak yapılmıştır. Plakalar spaceclaim programında kabuk eleman olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan plakaya Ansys Workbench programında ACP (Pre) modülü aktarılmış ve ortotropik malzeme tanımlaması

yapılmıştır. Model üzerinde üçgenler yönteminde "quadratic" "element order" kullanılarak ağ yapı oluşturulmuştur. Ağ yapı kalitesi çarpıklık ve dikey nitelik ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Kabul edilebilir en yüksek çarpıklık 0.95 iken kabul edilebilir en düşük dikey nitelik ise 0.15 olmalıdır (Tüzemen, 2022b). Çeşitli ağ yapı boyutlarına bağlı çarpıklık ve dikey nitelik sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ağ yapı boyutuna bağlı çarpıklık ve dikey nitelik. Buna göre gerek en düşük çarpıklık gerekse en yüksek dikey niteliğe sahip olan 6 mm ağ yapı boyutunun analizler için en uygun boyut olduğu sonucuna varılmıştır. Oluşturulan katmanlı yapı

yapısal statik modülüne aktarılmıştır. Bu modülde yapıya bir ucundan mesnetleme uygulanırken diğer ucundan çekme kuvveti ve moment verilerek iki ayrı yükleme durumu altında analizler yapılmıştır. Uygulanan yükleme ve sınır şartları Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Yapılan analizlerde Tsai-Wu hasar ölçütü uygulanmıştır. Bu analiz yaklaşımı yalın ve katmanlar arası karma kompozitlerde daha önce denenmiş ve deney sonuçlarıyla %99'un üstünde uyumluluk göstermiştir (Tüzemen, 2022a). Gerek analitik ile nümerik sonuçların birbirini doğrulaması, gerekse detayları verilen nümerik yaklaşımın literatürde deneysel sonuçlarla doğrulanmış olması göz önüne alındığında bu çalışmada deneysel çalışmaya ihtiyaç olmadığını göstermiştir.



Şekil 3. Model üzerinde uygulanan çekme kuvveti ve sınır şartları.



Şekil 4. Model üzerinde uygulanan moment ve sınır şartları.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Analitik Çözüm

Nümerik yöntemi doğrulayabilmek için yalın cam ve yalın karbon plakaların analitik çözümü gerçekleştirilmiştir. Çözümde Ansys kütüphanesinden alınan ve Eş. 2-6'da verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. İlk olarak yalın cam plakasının çözümü yapılmıştır.

$$E_1 = 35 \text{ GPa} \quad (2)$$

$$E_2 = 9 \text{ GPa} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = 0.28 \quad (4)$$

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \rightarrow \nu_{21} = 0,072 \quad (5)$$

$$G_{12} = 4.7 \text{ GPa} \quad (6)$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 35.72 \text{ GPa} \quad (7)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 9.19 \text{ GPa} \quad (8)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 2.57 \text{ GPa} \quad (9)$$

$$Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 2.57 \text{ GPa} \quad (10)$$

$$Q_{66} = G_{12} = 4.70 \text{ GPa} \quad (11)$$

Elyaf tek yönlü olup kuvvet doğrultusunda yönlendirilmiştir. Dolayısıyla aralarındaki açığı veren θ değeri sifıra eşit olur.

$$m = \cos \theta = 1, \quad n = \sin \theta = 0 \quad (12)$$

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \quad (13)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \quad (14)$$

$$\bar{Q}_{12} = Q_{12}(m^4 + n^4) + (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 \quad (15)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})nm^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \quad (16)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})nm^3 \quad (17)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \quad (18)$$

Rijitlik matrisi:

$$|\bar{Q}| = \begin{vmatrix} 35.72 & 2.57 & 0 \\ 2.57 & 9.19 & 0 \\ 0 & 0 & 4.70 \end{vmatrix} 10^3 (MPa) \quad (19)$$

Plakanın uzama rijitliği [A] Eş. 20 ile bulunur.

$$A_{mn} = \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{mn} (h_j - h_{j-1}) \quad (20)$$

Katman yüzeylerinin orta düzleme göre konumları Şekil 5'te gösterilmiştir. Plaka simetrik dizilişe sahip olduğu için dengeli plaka denir. Dolayısıyla, A_{16} ve A_{26} sıfıra eşit olur.

$$|A| = \begin{vmatrix} 53.6 & 3.86 & 0 \\ 3.86 & 13.78 & 0 \\ 0 & 0 & 7.05 \end{vmatrix} 10^3 (MPa) \quad (21)$$

Plakanın eğilme-uzama rijitliği [B] Eş. 22 ile bulunur.

$$B_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{mn} (h_j^2 - h_{j-1}^2) \quad (22)$$

Plaka simetrik olduğundan:

$$|B| = 0 \quad (23)$$

Plakanın eğilme rijitliği [D] ise Eş. 24 ile bulunur.

$$D_{mn} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{mn} (h_j^3 - h_{j-1}^3) \quad (24)$$

$$|D| = \begin{vmatrix} 10 & 0.72 & 0 \\ 0.72 & 2.58 & 0 \\ 0 & 0 & 1.32 \end{vmatrix} 10^3 (MPa) \quad (25)$$

P x eksenini doğrultusunda uygulanan, nümerik analizde Tsai-Wu hasar ölçütüne göre kritik yük olarak bulunan kuvvet ve w ise plakanın genişliği olmak üzere:

$$N_x = \frac{P}{w} = \frac{29250 \text{ N}}{25 \text{ mm}} = 1170 \text{ MPa} \quad (26)$$

Plaka üzerinde dış kuvvet olarak yalnızca x doğrultusunda bir kuvvet olduğundan diğer kuvvetler ve momentler sıfıra eşittir. Bu durumda klasik tabaka teorisine göre:

$$\begin{pmatrix} 1170 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 53.6 & 3.86 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.86 & 13.78 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0.72 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.72 & 2.58 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.32 \end{vmatrix} 10^3 \begin{pmatrix} \varepsilon_{x^0} \\ \varepsilon_{y^0} \\ \gamma_{xy^0} \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$1170 = (53.6\varepsilon_{x^0} + 3.86\varepsilon_{y^0})10^3 \quad (28)$$

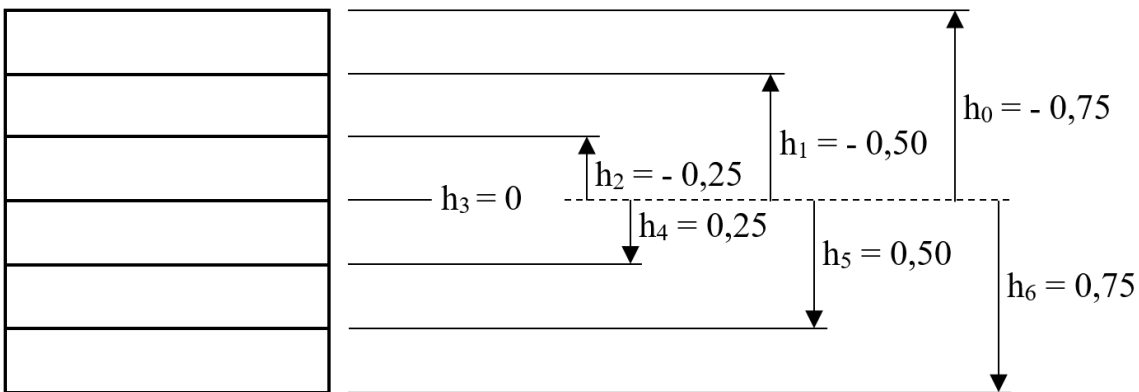
$$0 = (3.86\varepsilon_{x^0} + 13.78\varepsilon_{y^0})10^3 \quad (29)$$

$$0 = (7.05\gamma_{xy^0})10^3 \quad (30)$$

Eşitlikleri elde edilir. Eğer Eş. 28-30 birlikte çözümlerse:

$$\varepsilon_{x^0} = 22.286 \cdot 10^{-3} \quad (31)$$

$$\varepsilon_{y^0} = -6.240 \cdot 10^{-3} \quad (32)$$



Şekil 5. Katman yüzeylerinin orta düzleme göre konumları.

$$\gamma_{xy^0} = 0 \quad (33)$$

Plaka üzerinde herhangi bir eğilme momenti oluşmadığı için eğrilikler sıfıra eşit olur. Orta yüzey şekil değiştirmeler (ε_{x^0} , ε_{y^0} , γ_{xy^0}) ve rijitlik matrisi [\bar{Q}],

gerilme-gerinim ilişkisini veren Eş. 34'te yerine yazılırsa:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = |\bar{Q}| \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x^0} \\ \varepsilon_{y^0} \\ \gamma_{xy^0} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} 35.72 & 2.57 & 0 \\ 2.57 & 9.19 & 0 \\ 0 & 0 & 4.70 \end{vmatrix} 10^3 \begin{Bmatrix} 22.286 \\ -6.240 \\ 0 \end{Bmatrix} 10^{-3} \quad (35)$$

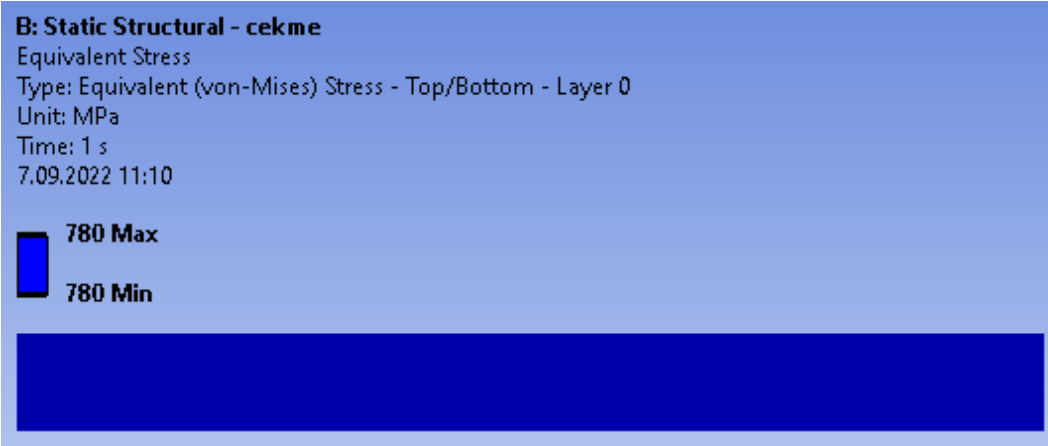
Eşitliği elde edilir. Bu eşitlik çözüldüğünde yalın cam elyaf/epoksiden oluşan Y-1 numunesi için x yönünde uygulanan 29.25 kN'luk bir kuvvete karşılık gelen gerilme şu şekilde bulunur:

$$\sigma_x = 780 \text{ MPa} \quad (36)$$

$$\sigma_y = 0 \quad (37)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (38)$$

Benzer şekilde Tsai-Wu ölçütüne göre kritik yük olan 61.20 kN eksenel kuvvetin uygulandığı analitik çözüm sonucunda yalın karbon elyaf/epoksi (Y-2) kompozit için x doğrultusundaki gerilme ise 1632 MPa çıkmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde Y-1 ve Y-2 için bulunan gerilmeler sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Nümerik olarak bulunan sonuçlar ile analitik çözüm sonuçları birebir aynı sonucu vermiştir. Dolayısıyla sonlu elemanlar analizinde uygulanan yaklaşımın, yükleme ve sınır şartlarının doğru bir şekilde kurulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizinde Y-1 numunesinde çekme yükü altında oluşan gerilme.



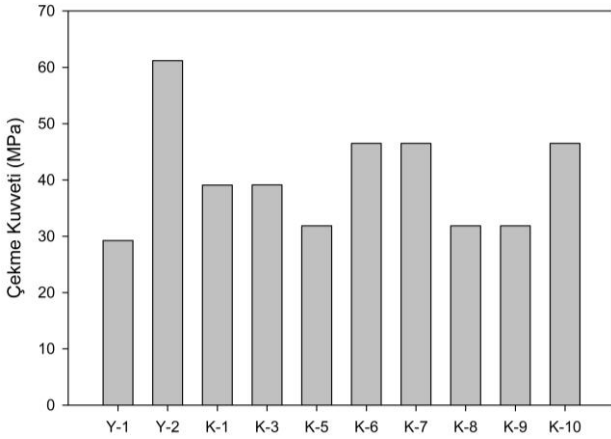
Şekil 7. Sonlu elemanlar analizinde Y-2 numunesinde çekme yükü altında oluşan gerilme.

3.2 Nümerik Çözüm

3.2.1 Çekme kuvveti

Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde Tsai-Wu hasar ölçütü kullanılmıştır. Bu ölçüte göre plakalarda hasar oluşturan çekme kuvvetleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Beklenildiği üzere plakada hasar oluşabilmesi için

gereken en yüksek kuvvet 61.2 kN ile yalın karbon elyaftan oluşan Y-2 modelinde bulunurken en düşük kuvvet ise 29.25 kN ile yalın cam elyaftan oluşan Y-1 modelinde bulunmuştur. Dört katman karbon elyaftan oluşan K-6, K-7 ve K-10 modellerinde hasar oluşturan kuvvet 46.5 kN olarak bulunmuştur. İki katman karbon elyaftan oluşan K-5, K-8 ve K-9 modellerinde ise bu kuvvet 31.86 kN çıkmıştır. Katmanları bir kat karbon bir kat cam elyaf olacak şekilde sıralanan K-3 modelinde Tsai-Wu ölçütüne göre hasar oluşturan kuvvet 39.13 kN olarak bulunmuştur. K-3 modelindeki gibi üç kat cam üç kat karbon elyaftan oluşan K-1 modelinde de aynı kuvvet hasara yol açmıştır. Elde edilen sonuçlara göre eksenel çekme yüküne maruz kalan karma kompozitlerde hasar oluşturacak kuvveti etkileyen tek etken onu oluşturan katmanlarda kullanılan elyaflardır. Karbon elyafın çekme dayanımının cam elyaftan yüksek olmasından dolayı karma yapı içerisinde daha fazla katmanda karbon elyaf kullanılırsa daha yüksek çekme kuvvetine dayanabileceği söylenebilir.



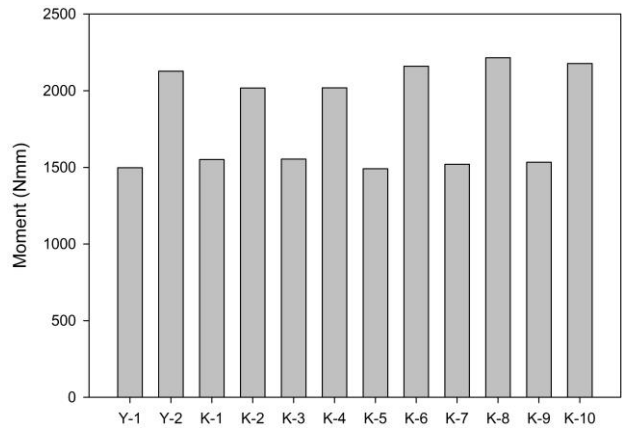
Şekil 8. Tsai-Wu ölçütüne göre plakaların dayanabileceği en yüksek çekme kuvvetleri.

Oluşturulan modellerden K-2 ve K-4 sırasıyla K-1 ve K-3 modellerinin ters dizilimine sahip olduğundan dolayı x ekseninde uygulanacak çekme yükü altında aynı sonuçları vereceğinden Şekil 8'de yer verilmemiştir.

3.2.1 Moment kuvveti

Karma kompozitlerin çekme yükü altındaki davranışları katmanların dizilişinden bağımsız oluşu farklı yükler altında incelenmesinin önemini ortaya

koymaktadır. Bu nedenle modellere moment uygulanarak Tsai-Wu ölçütüne göre ilk hasar oluşumuna neden olan moment değerleri bulunmuştur (Şekil 9). Buna göre en yüksek momente dayanabilecek model 2215 Nmm ile K-8 olmuştur. K-10 ve K-6 plakaları da sırasıyla 2178 Nmm ve 2160 Nmm moment ile yakın bir sonuç vermiştir. Yalın karbon elyaftan oluşan plaka ise 2128 Nmm momente dayabilmiştir. K-4 ve K-2 modellerinde ise sırasıyla 2019 Nmm ve 2018 Nmm momentleri altında ilk hasarlar oluşmuştur. Diğer modeller ise 1500 Nmm civarındaki moment yükleri altında hasara uğramışlardır.



Şekil 9. Tsai-Wu ölçütüne göre plakaların dayanabileceği en yüksek momentler.

Moment yükü altındaki plakaların davranışlarına genel olarak bakıldığında dayanabilecekleri momenti belirleyen en önemli etmenin en yüksek çekme yüküne maruz kalan en alt tabakanın malzemesinin olduğu görülmektedir. En alt tabakasında karbon elyaf olan modeller yaklaşık 2000-2200 Nmm momente dayanabilirken, cam elyaf olan modeller ise 1500 Nmm civarındaki yüklere dayanabilmiştir. En alt tabakasında karbon elyaf bulunan K-8 modeli, K-7 gibi diğer tabakalarda daha fazla karbon elyaf bulunan modelden daha fazla moment yüküne dayanabilmiştir. Bu sonuçlar böyle bir yüklemeye maruz kalacak bir kompozitte iç tabakalardan ziyade en yüksek çekme yüküne maruz kalacak en alt tabakanın malzemesinin önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle en alt tabakada daha yüksek mukavemete ve rijitliğe sahip karbon elyafın kullanılmasının dayanım açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir. Maliyet de

göz önüne alındığında moment yüküne maruz kalacak bir parçanın tasarımında K-8 modeli ön plana çıkmaktadır. Karma kompozit yapılar karşılaştırıldığında ise moment yükü için en uygun karma yapının hem en alt hem de en üst tabakada karbon elyafın kullanıldığı kompozitler olduğu görülmektedir. Sırasıyla üçer katman karbon/cam elyaf ile her bir katmanında sırasıyla karbon/cam kullanılan karma yapılar ise birbirlerine yakın sonuç vermişlerdir.

Modellerin çekme ve moment yükleri altındaki davranışları birlikte değerlendirilirse her ikisine de karşı en uygun yapının yalın karbon elyaftan oluşan Y-2 olduğu görülmektedir. Ancak bütün yapıyı karbon elyaftan üretmek maliyeti arttıracaktır. Özellikle çekme yükü altında biraz daha düşük mukavemet gösterse de K-6 ve K-10 tasarımlarının bu iki kuvvete ayrı ayrı iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Maliyet açısından bakıldığında ise her iki numunede de dört katman karbon elyaf ve iki katman cam elyaf kullanıldığı için bir fark bulunmamaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada farklı dizilimlerle oluşturulan karma kompozit yapıların çekme ve moment yükü altında mekanik özellikleri analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan analitik çözüm ile nümerik yaklaşım doğrulanmıştır. Katmanların dizilimlerinin kompozitin çekme yükü altındaki dayanımı etkilemediği, kullanılan elyafın ise dayanımı doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Moment yükü altındaki kompozitler için ise bu yük altında en fazla çekme kuvvetine maruz kalacak en alt katmanın karbon elyaf olmasının dayanımını arttırdığı görülmüştür. Diğer katmanlardaki karbon veya cam elyaf sayısının ve diziliminin çok küçük farklılıklar oluşturduğu, dolayısıyla maliyet de hesaba katıldığında cam elyafın kullanımının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada yapılan K-6, K-8 ve K10 karma tasarımlarının yalın kompozitlerden daha yüksek momente dayanabildiği görülmüştür. İleriki çalışmalarda karma kompozitlerin farklı yükler veya birleşik yükler altındaki davranışları incelenebilir. Ayrıca

çeşitli diziliş, katman sayısı, yönelim veya malzeme kullanımının etkisi de incelenebilir.

Teşekkür

Yazar, sonlu elemanlar analizinde sunduğu altyapı için Gazi Üniversitesine teşekkür eder.

5. Kaynaklar

- Ali, H.T., Akrami R., Fotouhi S., Pashmforoush F., Fragassa C., and Fotouhi M., 2020. Effect of the stacking sequence on the impact response of carbon-glass/epoxy hybrid composites. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, **18(1)**, 069–077.
- Atmaca, B.N., Oruç R., Aşçı G., Yiğit K., Yüzer S., Polat Y., and Ekici B., 2021. Mechanical performance of carbon - aramid fiber-reinforced laminated composites under impact and shear loading. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, **22**, 19–27.
- Erkliğ, A., Bozkurt Ö.Y., and AL-Tekreeti W.F., 2022. Influence of Nano-Silica on the Mechanical Properties of Jute/Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **37(2)**, 399–410.
- Eskizeybek, V., Ulus H., Kaybal H.B., Şahin Ö.S., and Avcı A., 2018. Static and dynamic mechanical responses of CaCO₃ nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, **140**, 223–231.
- Karacor, B., and Özcanlı M., 2022. Evaluation of Mechanical Properties of Intraply Hybrid Carbon/Aramid Composite Materials. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **27(2)**, 537–556.
- Khakzad, F., Tüzemen M.Ç., Salamci E., and Anıl Ö., 2019. The effects on the flexural strength and impact behavior of nanographene ratio of the glass fiber nanocomposite plates. *Polymer Engineering and Science*, **59(10)**, 2082–2091.
- Korkmaz, M., Karakuzu R., and Korkmaz M., 2022. Mechanical characterization and low-velocity impact behavior of flax woven fabric-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Materials*, **56(20)**, 3185-3195.

- Özsoy, M.İ., 2022. Investigation of the mechanical properties of carbon and basalt fiber laminated hybrid epoxy composites. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **28(4)**, 499–505.
- Selver, E., 2019. Acoustic Properties of Hybrid Glass/Flax and Glass/Jute Composites Consisting of Different Stacking Sequences. *Tekstil ve Mühendis*, **26(113)**, 42–51.
- Tüzemen, M.Ç., 2022a. Evaluation of tensile properties on glass/carbon fiber epoxy pure, interply, and locally nested intraply hybrid composites. *Polymer Composites*, **43(9)**, 6464-6475.
- Tüzemen, M.Ç., 2022b. Yalın, Katmanlar Arası ve Katman İçi Açılı Cam/Karbon Karma Kompozitlerin Çekme Yükü Altındaki Davranışları. 1, Çoğun, H. Y., Z. Karacagil, and S. Kızılyıldırım, Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 4 (Ankara: Bilgin Kültür Sanat Yayınları), 222-230.
- v Pujar, N., Nanjundaradhya N. v., and Sharma R.S., 2022. Experimental investigation of the tensile and modal properties of epoxy based symmetric interlayer glass/carbon hybrid composites. *Materials Research Express*, **9(2)**, 025304.
- Wang, B., He B., Wang Z., Qi S., Zhang D., Tian G., and Wu D., 2021. Enhanced Impact Properties of Hybrid Composites Reinforced by Carbon Fiber and Polyimide. *Fiber Polymers*, **13(16)**, 2599.
- Wang, Q., Wu W., and Li W., 2018. Compression Properties of Interlayer and Intralayer Carbon/Glass Hybrid Composites. *Polymers*, **10(4)**, 343.
- Wu, W., Wang Q., and Li W., 2018. Comparison of Tensile and Compressive Properties of Carbon/Glass Interlayer and Intralayer Hybrid Composites. *Materials*, **11(7)**, 1105.
- Zuo, P., Srinivasan D. v., and Vassilopoulos A.P., 2021. Review of hybrid composites fatigue. *Composite Structures*, **274**, 114358.