



Simetrik ve Simetrik Olmayan Katman Düzenlerine Sahip Kompozit Sargılı Boruların Tasarımı ve Testleri

Design and Testing of Composite Winding Pipes having Symmetrical and Non-Symmetrical Layer Layouts

Barış Kalaycıoğlu¹, Hakan Arslan¹, M. Burakhan Akgün²

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE

² Makine Kimya Endüstrisi Kurumu, Mühimmat Fabrikası, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 08/03/2020

Kabul / Accepted: 18/04/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 19/04/2020

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2020

Özet

Bu çalışmada, iki farklı katman düzeninde sarılmış 65 mm dış çapa, 1,7 mm cidar kalınlığına sahip ve 650 mm boyundaki Cam Elyaf / Epoksi kompozit silindirik boruların patlama basıncı değerleri analitik ve sayısal yöntemler yardımıyla elde edilmiştir. Daha sonra kompozit borular elyaf sarım yöntemi yardımıyla 4 eksenli CNC filaman kompozit sarım tezgahında, [90°, ±55°, 90°] simetrik ve [±55°, 90°, 90°] simetrik olmayan katman düzenlerinde üretilmiş ve hidrostatik basınç testine tabi tutulmuştur. Boruların teorik analizleri Laminasyon Teorisi (Klasik Katman Teorisi) yardımıyla yapılmış, hasar kriteri olarak Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Sayısal analizler ANSYS Sonlu Eleman Programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Programda kompozit boruların modellenmesinde kompozit katmanın elyaf sarım açılarını doğru şekilde tanımlayabilmek için eleman koordinat sisteminin bu açılara uygun şekilde yönlendirilmesi sağlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen analitik, sayısal ve deneysel patlama basıncı değerleri kıyaslanmış, ayrıca analitik ve sayısal analizler sonucu kompozit boruların katmanlarında oluşan elyaf yönü ve elyaf yönüne dik doğrultudaki birim şekil değiştirme ve gerilme değerlerinin karşılaştırılması da yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, farklı sarım açıları için analitik, sayısal ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Kompozit Boru, Elyaf Sarım Metodu, Yüksek Basınç, Laminasyon Teorisi”

Abstract

In this study, the values of bursting pressure of the glass fibre/epoxy composite cylindrical pipes wrapped in two different layers configuration with 65 mm outside diameter, 1.7 mm wall thickness and 650 mm length was obtained with the help of both analytical and numerical methods. Then, composite pipes were manufactured by the aid of the four-axis CNC composite winding machine with the help of the Filament Winding Method in [90°, ± 55°, 90°] symmetrical and [± 55°, 90°, 90°] non-symmetrical layers configuration. The theoretical analyses of pipes were made according to the Lamination Theory, and Tsai Wu failure criteria were used as a fracture criterion. Numerical analysis was performed by using ANSYS software. The coordinate element system was located in accordance with the fibre winding angles of the layers to define them correctly in the modelling of composite pipes. The analytical, numerical and experimental burst pressure values were compared to the strains and stresses which took place on the layers of composite pipes in the fibre direction and the perpendicular direction to that direction obtained by the analysis. According to the results obtained, it was observed that the analytical, numerical and experimental results were compatible with each other for different winding angles.

KeyWords

“Composite Pipe, Filament Winding Method, High Pressure, Lamination Theory”

1. Giriş

Yüksek basınç altındaki gazların saklanması ve taşınmasında, ayrıca gaz transferi için kullanılan boru hatlarında kompozit malzemelerin kullanılmasına son yıllarda büyük önem verilmektedir. Bu anlamda kompozit borular çelik boru hatlarına göre kara veya deniz uygulamalarında korozyon direnci, bakım maliyetlerini azaltması, boru ömrünü uzatması sebebiyle önemli bir alternatif haline gelmiştir (Lees J. M., 2006). Genellikle inşaat mühendisliği yapıları için bir yapının servis ömrü olarak 50 yıl düşünülür. Kompozit borularının da 50 yıl boyunca hizmette kalması uluslararası kural ve düzenlemelere uygun uzun vadeli bir tasarım kistası olarak düşünülmektedir (Rafiee R. ve Mazhari B., 2016). Buna ek olarak, yüksek mukavemet ile yüksek iç basınç kapasitesine sahip uzun ömürlü kompozit boruların düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle inşaat ve nakliye maliyetlerinde önemli derecede azalma görülmektedir (Cz'el G. ve Czig'any T., 2008).

Yüksek basınçlara maruz roket borularının, tankların ve silah sistemlerine ait namluların yüksek basınçtan dolayı yüksek dayanıma sahip olması kadar, taşınabilirliği açısından da hafif olması istenmektedir. Bu durum yüksek basınç altındaki tank ve namluların tasarımında da kompozit malzemelerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Kompozit malzemeler düşük özgül ağırlığına karşılık, yüksek mukavemet ve korozyona dayanıklılığı, iyi şekillenebilme özelliği ve yorulmaya karşı iyi dayanımı nedeniyle günümüzde metallere nazaran daha fazla tercih edilmektedir.

Bu üstünlüklerinden dolayı, kompozit basınç tanklarının tasarım ve analizleri birçok çalışmaya da konu olmaktadır. Bu çalışmalarını özetlemek gerekirse;

Sayman (2005) hidrotermal yüklemeler altındaki ince veya kalın çok tabakalı kompozit silindirler için genel bir gerilme analizi metodu geliştirmiştir. Tabakalar $[0^\circ/90^\circ]$, $[30^\circ/-30^\circ]$, $[45^\circ/-45^\circ]$ ve $[60^\circ/-60^\circ]$ elyaf açıları için simetrik veya antisimetrik olarak yönlendirilmişlerdir. Analizler, borunun uçlarının açık/kapalı olduğu sınır şartı ile düzlem gerilme durumu dikkate alınarak yapılmıştır. Cherevatsky ve arkadaşları (2004) tarafından çift fazlı (gaz/sıvı) akışkan depolamak için kullanılacak ince cidarlı metal tankın etrafına helisel sarım yöntemiyle yeni bir kompozit tank tasarımı önerilmiş ve tasarımda kullanılan ince cidarlı metal sarğı, döküm yoluyla üretilmiştir. Djehiche ve arkadaşları (1999) ise Helisel sarım yöntemi ile üretilen basınçlı kompozit tank çeşidinden biri olan katı yakıtlı roket motoruna etkiyen gerilmeleri ve tankın patlama basıncını, doğrusal olmayan SEM kullanarak incelemiştir. Malzeme performansı ve geometrik düzgünsüzlüğün haznenin yüklenme kapasitesine olan etkisini de araştırmışlardır. Walter ve arkadaşları (2002) uzay araçlarında Helyum depolamak için Titanyum iç gömleğin etrafına kompozit malzemedeki helisel sarım yöntemiyle çift cidarlı basınçlı tank tasarımı; başka bir çalışmada ise Tam ve arkadaşları (1996) uzay araçlarında Xenon depolamak için konik çift cidarlı Titanyum basınçlı tank tasarımı ve imalatını yapmışlardır. Tankın analizi için lineer olmayan malzeme ve büyük şekil değiştirme modelleme yaklaşımları kullanılmıştır. Parnas ve Katırcı (2002) tarafından kalın cidarlı elyaf takviyeli kompozit basınç tanklarının değişik yüklenme durumları için klasik katman teorisi kullanılarak düzlem gerinim durumunda tasarım analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı yüklemelerde kompozit basınç tankının sarım açısına yönelik optimizasyon çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Tamer Ali Sebaey (2019) cam elyaf kompozit boruyu dört farklı $([\pm 45^\circ/\pm 45^\circ/\pm 45^\circ], [\pm 55^\circ/\pm 55^\circ/\pm 55^\circ], [\pm 63^\circ/\pm 63^\circ/\pm 63^\circ], [\pm 63^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ])$ sarım açısı için tasarlamış ve boruları filaman sarım yöntemi ile üretmiştir. Borular ayrı ayrı olmak üzere hem iç basınç yüklemesi altında hem de düşük hız darbe yüklemesi ile test edilmiştir. İç basınç yüklemesi altında test edilen borularda $[\pm 55^\circ/\pm 55^\circ/\pm 55^\circ]$ sarım oryantasyonunda en iyi performansa ulaşılmış olup, düşük hız darbe yüklemesi altında ise en iyi performans $[\pm 63^\circ/\pm 55^\circ/\pm 45^\circ]$ sarım oryantasyonunda görülmüştür.

Kompozit boru gövdesi genellikle iç astar, kompozit katman ve dış yüzey olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Astar, metalik veya polimer esaslı olarak iç akışkana karşı bir bariyer görevi görür. İç basınç altındaki kompozit borular, uçları kapalı boru durumunda hem çevresel hem de aksel gerilmelere maruz kalmaktadır. Uçları açık uzun borular için iç basınçtan kaynaklanan aksel gerilmeler "sıfır" olarak alınır (DNVGL-RP-F119, 2015). Bununla birlikte, montaj şartları, ağırlık, dış basınç vb. gibi diğer etmenlerden dolayı borularda gerilmeler olabilir. Kompozit boruların tasarımında gerilme ve hasar analizi dış kaplama dikkate alınmaksızın yapılmaktadır. (Wr'obel G. ve arkadaşları, 2017).

2. Teorik Çalışmalar

Kompozit sargılı boruların tasarımına yönelik analitik çalışmalar Laminasyon Teorisi (Klasik Katman Teorisi) temelinde gerçekleştirilmiştir. Kompozit katmanlarda oluşacak birim şekil değiştirme ve gerilmeler Excel kullanılarak geliştirilen bir programı yardımıyla elde edilmiştir. Kompozit yapının hasar analizinde Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır.

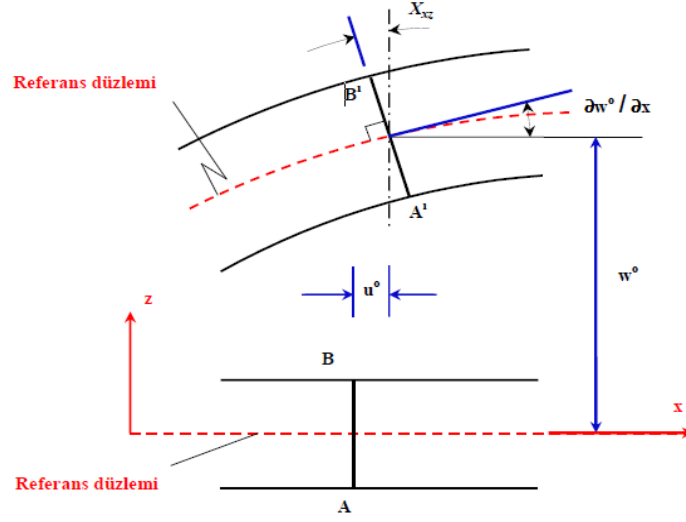
2.1. Laminasyon Teorisi

Çok tabakalı kompozit plaka iki veya daha fazla tabakanın birleşmesinden meydana gelen birleşik bir yapıdır. Çok tabakalı kompozit plakalar tipik olarak yük taşıyan elyaflar yönünde olağanüstü özelliklere sahiptirler. Fakat elyaflara dik yöndeki özellikleri oldukça yetersizdir.

Kompozit plakalar çeşitli kuvvetler neticesinde çekmeye, eğilmeye, burulmaya ve burkulmaya maruz kalabilirler. Tek katmanlı kompozit bir plakaya gelebilecek yükler karşısında plakada oluşabilecek gerilme ve şekil değiştirmeler, ortotropik malzemelerde düzlem gerilme durumu için bulunan denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir. Ancak çok katmanlı kompozit plakalarda oluşacak gerilme ve şekil değiştirmelerin hesabı tek katmanlı kompozit plakalara göre oldukça karmaşıktır. Katman teorisi çok katmanlı plakalardaki her bir katmanda oluşacak gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplamaktadır.

2.2. Kirchhoff Hipotezi

Yük altındaki bir plakada şekil değiştirmeler plakanın kalınlığı boyunca malzeme özelliği nedeniyle sürekliliğini korur ve doğrusal davranış gösterir. Bir başka deyişle, plaka orta düzlemine dik bir doğru üzerinde bulunan noktalar şekil değiştirmeden sonra da şekil değiştirmiş şeklin orta düzlemine dik kalırlar. Bu nedenle plaka düzlemindeki kuvvetlerin etkisi altındaki plaka orta düzleminde, başka bir deyişle tarafsız düzlemde, deformasyon olmadığı kabul edilir. Bu durum Şekil 1’de gösterilmiştir.



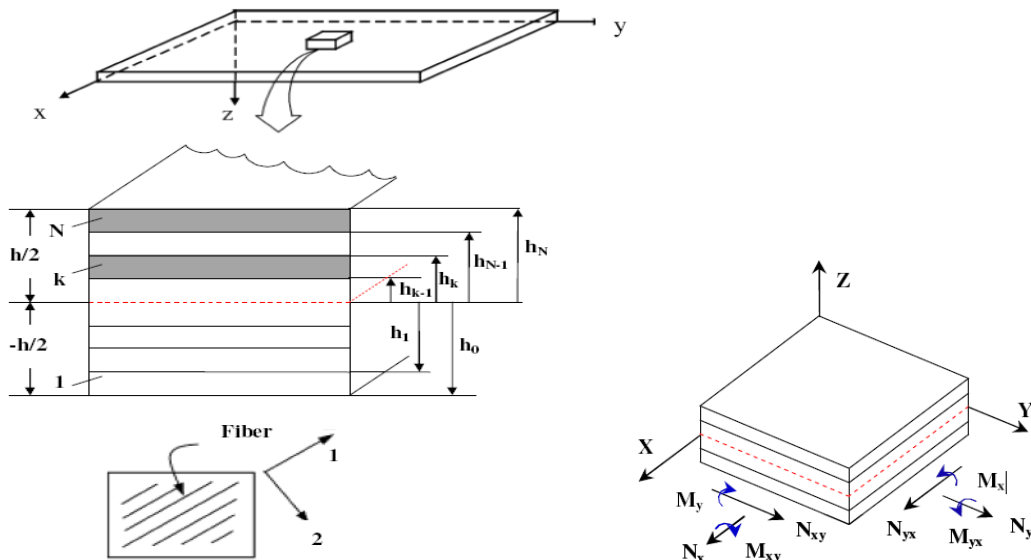
Şekil 1. Kirchhoff teorisine göre bir düzlem kenarının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri (Ronald F. Gibson,1994)

Kirchhoff Hipotezi yardımıyla çok tabakalı bir plakanın bir katmanındaki şekil değiştirmeleri, plakanın orta düzleminin eğriliği ve doğrudan şekil değiştirme terimleriyle (1) denkleminde görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Yukarıdaki (1) nolu denkleminde, ε_x^o , ε_y^o , γ_{xy}^o referans düzlemin şekil değiştirmelerini, K_x , K_y , K_{xy} ise referans düzlemi için moment eğrilerini ifade etmektedir.

$$K_x = -\frac{\partial^2 w^o}{\partial x^2}, \quad K_y = -\frac{\partial^2 w^o}{\partial y^2}, \quad K_{xy} = -2\frac{\partial^2 w^o}{\partial x \partial y} \quad (2)$$



Şekil 2. N tabakalı kompozit plakanın geometrisi ve kompozit plakada x ve y yönlerindeki kuvvet ve momentler (Mark E. Tuttle, 2004)

Şekil 2’de görüldüğü üzere kompozit plakanın x ve y yönündeki kuvvet ve moment denklemleri (3) ve (4) denklemlerinde verilmektedir. Çözümleme sonucunda elde edilen rijitlik matrisleri (5), (6) ve (7) nolu denklemler ile ifade edilmekte ve nihai kuvvet, moment ve yer değiştirme ilişkisi denklem (8) de verilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz \right) + \sum_{k=1}^N \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right) \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz \right) + \sum_{k=1}^N \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right) \quad (4)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \cdot (h_k - h_{k-1}) \quad (5)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \cdot \left(\frac{h_k^2 - h_{k-1}^2}{2} \right) \quad (6)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \cdot \left(\frac{h_k^3 - h_{k-1}^3}{3} \right) \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} AB \\ BD \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Denklem (5) ’teki A_{ij} ifadesi orta düzlemin $\{\varepsilon^0\}$ şekil değiştirmesine neden olan $[N]$ aksel kuvvetlerinin uzama rijitlik matrisini verir. Denklem (6) ’daki B_{ij} ifadesi ise $\{K\}$ eğrilğine neden olan aksel kuvvetler ve orta düzlemin $\{\varepsilon^0\}$ şekil değiştirmesine neden olan $[M]$ momentleri için Etkileşim Rijitlik Matrisi olarak tanımlanabilir. (7) nolu denklemdeki D_{ij} ifadesi $\{K\}$ eğrilğine neden olan $[M]$ momentlerinin Eğilme Rijitlik Matrisi’ ni verir. Bir kompozit plakada B_{ij} etkileşim rijitlik matrisi sıfır değilse, düzlem kuvvetler altındaki o plaka hem eğiliyor hem de buruluyor demektir. Kompozit plakanın katmanlarının simetrik olması durumunda B_{ij} etkileşim rijitlik matrisi “0” a eşit olur. Ancak, katmanların simetrik olmaması durumunda B_{ij} etkileşim rijitlik matrisi sıfıra eşit olmaz (Jones R.M, 1075).

2.3. Kompozit Yapılarda Hasar Kriterleri

Kompozit basınç tanklarının gerilme analizlerinde hasar kriterlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ortotropik kompozit plakalara ait hasar kriterleri; Maksimum gerilme hasar kriteri, Maksimum şekil değiştirme hasar kriteri, Tsai-Hill hasar kriteri ve Tsai-Wu hasar kriteri şeklinde sıralanabilir (Ever J. Barbero, 1998). Tsai-Hill kriteri, orijinal olarak homojen izotropik parçalara uygulanan ve Bauschinger etkisini hesaba katan Von Mises kriterine dayanır. Daha sonra anizotropik malzemelere uyarlamak için Hill tarafından değiştirilmiş ve kompozit malzemelere uygulanmıştır. Bu kriter, denklem (9) ile ifade edilmektedir. Bu denklemde, 1 yönü fiber doğrultusunu ve 2 yönü fibere dik doğrultuyu gösteren kompozit plakada fiber yönüne dik, fiber yönünde ve kayma doğrultularında bulunan gerilme değerleri ve mukavemet değerleri ($\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}, S_T, S_L, S_{LT}$) bulunmaktadır.

$$\frac{\sigma_1^2}{S_L^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{S_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LT}^2} = 1 \quad (9)$$

Tsai-Wu anizotropik malzemelerin hasar teorisini iyileştirilmiş ve basitleştirilmiş bir tensör polinomu yardımıyla ifade etmiştir. Bu kriterin diğer kriterlere göre 3 önemli özelliği vardır;

- Koordinatların tekrardan tanımlanması veya döndürülmesi halinde kriterin değişmemesi,
- Bilinen tensör dönüşüm kuralları yardımıyla kriterdeki terimlerin dönüştürülebilmesi,
- Direngenlik ve komplians matrislerdeki gibi simetrik özelliklerin kriterde yansıtılabilmesidir (Jones R.M, 1075).

Kompozit bir plakada oluşacak gerilmeler sonucu plakanın hasara uğrayıp uğramayacağı (10) nolu Tsai-Wu denkleminde bulunabilir.

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{12}\sigma_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (10)$$

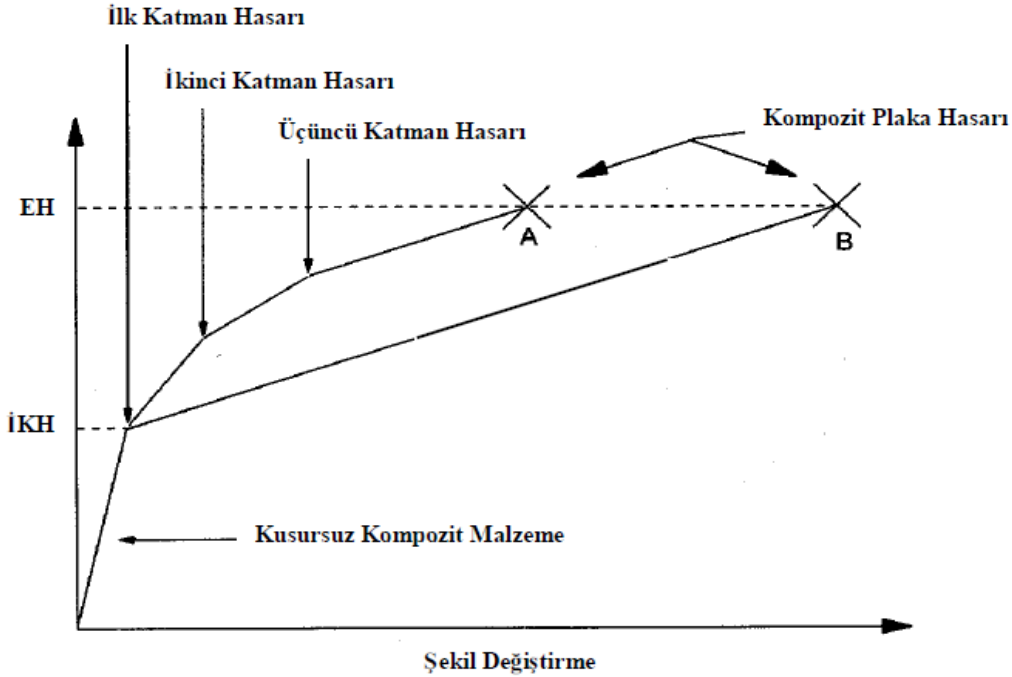
Yukarıdaki denklemde σ_1 , σ_2 , σ_{12} terimleri kompozit plakada oluşan fiber yönüne dik, fiber yönünde ve kayma doğrultularındaki gerilme değerlerini göstermektedir. Dayanım parametreleri olan F_{11} , F_{22} , F_1 , F_2 ve F_{12} terimleri kompozit malzemenin fiber yönüne dik, fiber yönünde ve kayma doğrultularındaki basma ve çekmedeki mukavemet değerleri ile denklem (2.11)' de ifade edilmiştir. Bu çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri dikkate alınarak gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

$$F_{11} = \frac{1}{S_1^T + S_1^C}, \quad F_{22} = \frac{1}{S_2^T + S_2^C}, \quad F_1 = \frac{1}{S_1^T} - \frac{1}{S_1^C} \quad (11)$$

$$F_2 = \frac{1}{S_2^T} - \frac{1}{S_2^C}, \quad F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}$$

2.4. Kompozit Plakalarda İlk Katman Hasarı ve Elyaf Hasarı

Kompozit plakada meydana gelecek ilk hasar durumu (ilk katman hasarı) kompozit plakanın tümünün hasara uğradığı anlamına gelmez. Kompozit plakanın tamamen hasara uğraması için elyaflarının da hasara uğraması gerekir. Kompozit plakada ilk katman hasarından sonra oluşan ve elyaflar da meydana gelen hasara elyaf hasarı (EH) denilir. Bu hasar çeşidi bir kısım kaynaklarda son katman hasarı olarak da isimlendirilmektedir. Elyaf hasar yükünün tespiti için ilk katman hasarının oluşması gerekir. İlk katman hasarının belirlenmesinden sonra elyaf hasar yükü iki temel yaklaşım ile bulunabilir. İlk yaklaşımda her bir katmandaki hasar ayrı ayrı tespit edildikten sonra son noktada elyaf hasarına ulaşılır. Bu yaklaşım katman katman elyaf hasarı olarak isimlendirilir. İkinci yaklaşımda ise ilk katman hasarının tespitinden sonra diğer katmanların hasarına bakılmaksızın direk elyaf hasarına gidilir. Bu yaklaşım ise iki adımda elyaf hasarı olarak isimlendirilir. Bu iki yaklaşımın vermiş olduğu sonuçlar Şekil 3.' te gösterildiği gibi birbirine çok yakındır (Ever J. Barbero, 1998).



Şekil 3. Katman katman ve iki adım yaklaşımları ile elyaf hasar yükünün tespiti (Ever J. Barbero, 1998).

Elyaf hasar teorisine göre kompozit plakayı hasara uğratan maksimum yükün belirlenmesi, Tablo 1' de ki hasar öncesi malzeme özelliklerine sahip kompozit yapıda ilk hasarı meydana getiren yük ile hasar sonrası malzeme özelliklerine sahip kompozit yapıda elyafları hasara uğratan yükün toplanması ile elde edilir (Jones R.M, 1075).

Tablo 1'de basınç tankında kullanılan malzemelerin hasar öncesi ve sonrasında kullanılacak mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Kompozit malzeme özellikleri (Robert M. Jones, 1998).

Malzeme Özellikleri	Cam Elyaf / Epoksi	
	Hasar Öncesi	Hasar Sonrası
<i>Yoğunluk (gr/cm³)</i>	2.076	2.076
<i>E₁₁ (GPa)</i>	54	54
<i>E₂₂ (GPa)</i>	18	0.05
<i>G₁₂ (GPa)</i>	9	0.02
<i>ν_{12}</i>	0,25	0,25
<i>S_{1T} (MPa)</i>	1035	1035
<i>S_{1C} (MPa)</i>	1035	1035
<i>S_{2T} (MPa)</i>	28	-
<i>S_{2C} (MPa)</i>	138	-
<i>S₁₂ (MPa)</i>	41	-
<i>Elyaf Hacim Oranı V_f (%)</i>	60	60

3. Deneysel Çalışmalar

Kompozit sargılı boru iki farklı elyaf oryantasyonu dikkate alınarak $[90^\circ, \pm 55^\circ, 90^\circ]$ simetrik ve $[\pm 55^\circ, 90^\circ, 90^\circ]$ simetrik olmayan katman düzenlerinde sürekli elyaf sarım tekniği yardımıyla üretilmiştir.

3.1. Kompozit Sargılı Borunun Üretimi

Yüksek basınca dayanıklı kompozit sargılı borular, 300 mm ve 700 mm çaplar arasında ve maksimum 1000 mm boyunda sarım yapabilen ve aynı anda 10 adet kompozit boru sarabilen 4 eksen CNC filaman sargı makinesi yardımı ile hiçbir yüzeysel işlemi yapılmadan üretilmiştir. İlk olarak sarım öncesinde cam elyaf makaraları, makaralardan çıkan elyaf iplikleri ve reçine, farklı yollardan Şekil 4’ te görülen CNC elyaf sarım makinesine bağlanarak sistem sarıma hazır hale getirilir.



Şekil 4. Kompozit sargılı boru imalatı

Ön hazırlıklar sonrasında Şekil 4’te görüldüğü gibi; elyaf makaralarından çıkan elyafların epoksi havuzuna batırılıp, uygun gerginlikte ve elyaf sarım açısına bağlı olacak şekilde, mandrel ve elyaf tutucunun sırasıyla dairesel ve doğrusal hızlarında kalıba sarılması ile gerçekleştirilir. Elyaf sarımının yapılması işlemi Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. İstenilen açılarda elyaf sarımının yapılması

Sarımı yapılan kompozit borular kür işlemi için yaklaşık 120 °C sıcaklıkta fırınlanmaktadır. Kür işleminden sonra kompozit sargılı borular kalıptan çıkartılarak üretim tamamlanmış olur. Şekil 6' da üretimi tamamlanmış kompozit sargılı boru görülmektedir.



Şekil 6. Üretimi tamamlanmış kompozit sargılı boru

3.2. Kompozit Sargılı Boruların Hidrolik Basınç Patlatma Deneyi

3.2.1. Deney ekipmanları

Hidrostatik basınç patlatma deneyi Şekil 7' de gösterilen ve Tablo 2' de teknik özellikleri verilmiş 1000 Bar kapasiteli, PLC kontrollü, servo hidrolik motorlu patlatma test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Hidrolik Patlatma Basınç Test Cihazı Teknik Özellikleri

Maksimum Patlatma Basıncı	100 MPa
Test Numunesi Sayısı	1 Basınç Hortumu Çıkışı
Güç Kaynađı	Servo Hidrolik Motor
Test Akışkanı	Hidrolik Yağ
Kontrol Ünitesi	PLC Kontrol
Motor Gücü	5,5 kW
Test Kabini Boyutları	2250 x1200 x 850mm



Şekil 7. PLC kontrollü, servo motorlu hidrolik test cihazı



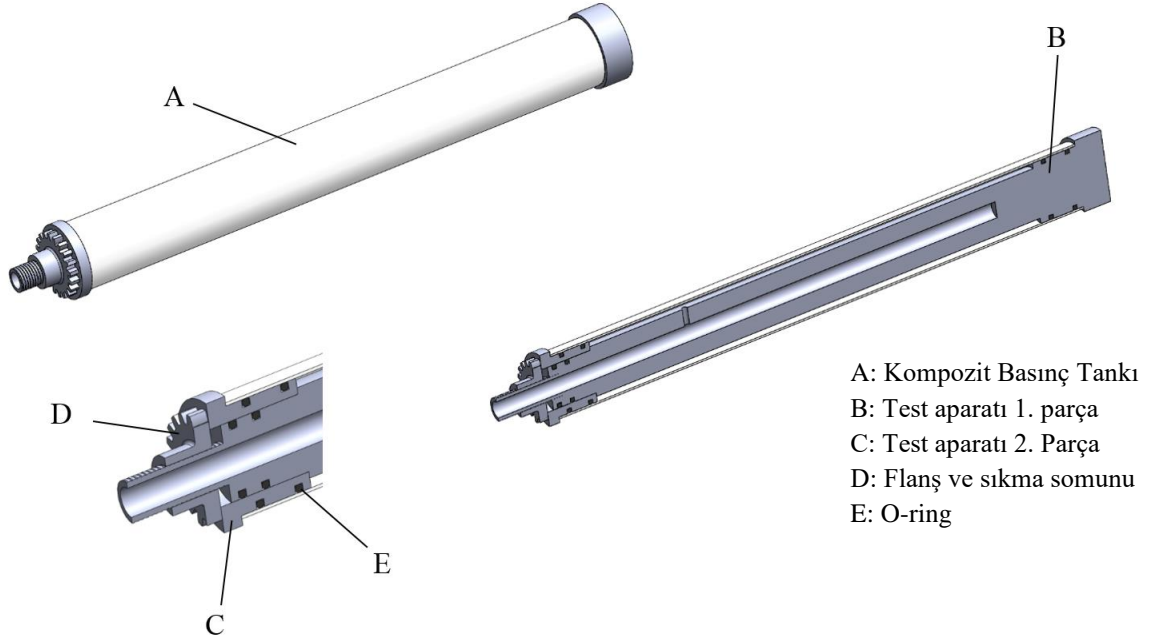
Şekil 8. Ekipmanları bağlanmış kompozit sargılı boru

Şekil 8 ve Şekil 9’ da Cam elyaf /epoksi malzemeden filaman sarım metodu yardımıyla üretilen, yüzeyine herhangi bir işlem yapılmamış, deney ekipmanları ile uç kısımlarından sabitlenmiş ve bir ucuna yağ hortumu ile montajı yapılmış kompozit sargılı boru gösterilmiştir.



Şekil 9. Kompozit sargılı boru

Hidrostatik patlama deneyi öncesinde üretimi tamamlanmış kompozit sargılı boruların Şekil 10 ’da ayrıntılı modeli verilen deney aparatları ile montajları yapılmıştır. Montaj işleminde 1. test aparatı borunun bir ucundan boruya montajlanmış daha sonra 2. test aparatı borunun diğer ucundan 1. test aparatı ile boru cidarı arasında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra sıkma somunu yardımıyla montajlanmış parçalar birbirine sıkı şekilde sabitlenmiştir. Bu arada kompozit boru cidarı ile test aparatları arasında sızdırmazlığın sağlanması için daha önceden test aparatlarına açılmış yuvalara yağ tutma bileziği (oil-ring) konulmuştur. Son olarak hidrolik yağ boru içerisine gönderecek yağ hortumu Şekil 8’de gösterildiği gibi 1. test aparatının uç kısmına montajlanmıştır. Montaj işlemlerinin ardından test numunesi Şekil 7’de gösterilmiş hidrostatik test kabininin içerisine yerleştirilmiştir ve PLC kontrollü hidrostatik test cihazı yardımıyla patlatma testine maruz bırakılmıştır. Şekil 11’ de patlatma testi sonrasında hasara uğramış bir kompozit boru gösterilmiştir.



Şekil 10. Test aparatları bağlanmış kompozit basınçlı silindirin görünüşü

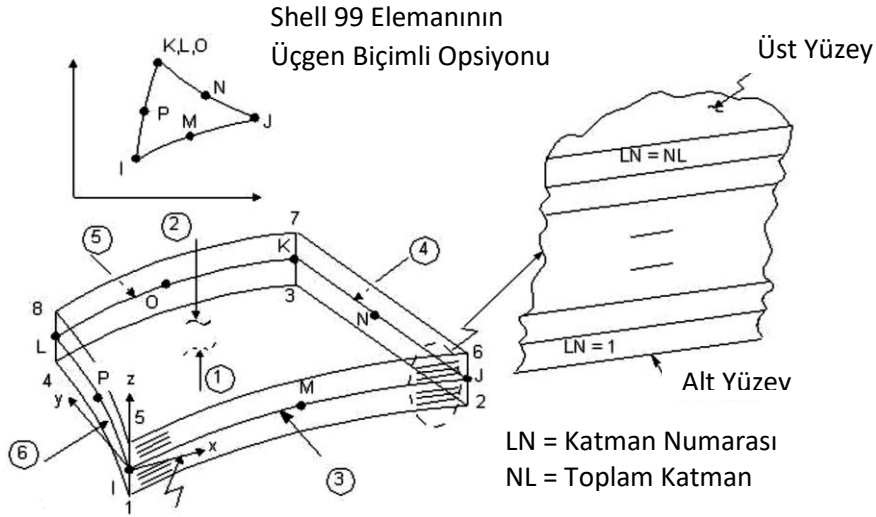


Şekil 11. Patlatma deneyi sonrasında hasara uğramış kompozit boru

4. Sayısal Çalışmalar

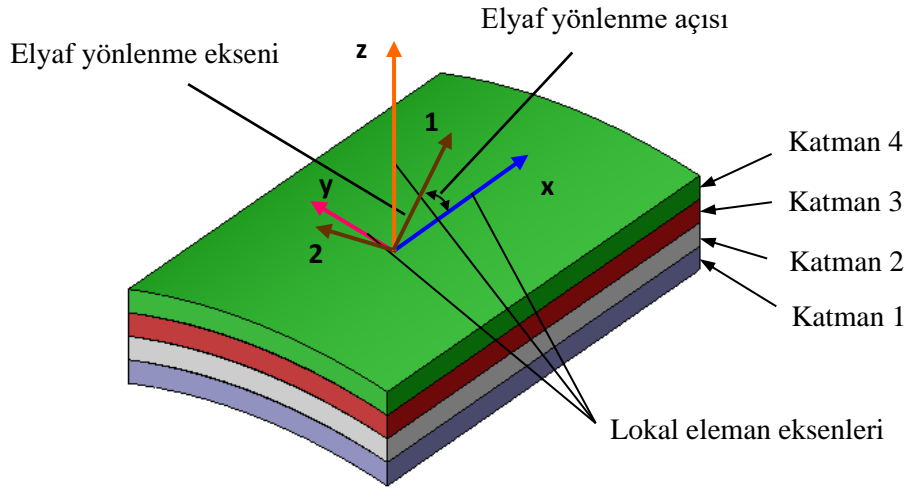
Bu bölümde kompozit sargılı borunun farklı katman düzenlerindeki maksimum patlama basıncı değerleri ANSYS sonlu eleman programı yardımıyla bulunmuştur. Kompozit malzeme olarak Cam elyaf / epoksi malzemesi kullanılmış olup, malzeme modeli ortotropik malzeme modeli seçilmiş ve tablo 1 de verilen malzeme özellikleri programa girilmiştir. Analizinde kompozit borular $[90^\circ, \pm 55^\circ, 90^\circ]$ simetrik ve $[\pm 55^\circ, 90^\circ, 90^\circ]$ simetrik olmayan katman düzenlerinde modellenmiştir.

Kompozit boruların sonlu eleman modeli doğrusal Shell 99 elemanı kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 12 'de gösterilmiştir. Bahsi geçen eleman, kompozit katman düzenini tarif etmek için gerekli elyaf yönlerinin ve Laminasyon Teorisindeki A, B ve D rijitlik matrislerinin girilmesine olanak sağlamaktadır. Shell 99 elemanı katmanlı yapısal kabuk modellerinin uygulamalarında özellikle ince katmanlar (Lamina) için tasarlanmıştır. Shell 99 elemanı sekiz düğüm noktasına (K, J, I, L dört köşe ve O, N, M, P dört orta), kompozit katman kalınlığı boyunca bir elemana ve düğüm başına altı serbestlik derecesine sahiptir. Ayrıca Shell 99 elemanı katmanlı kompozit yapılarda her bir katmanda oluşan gerilme ve birim şekil değiştirmelerin elde edilmesine olanak sağlayan bir elemandır. Modelde 22.480 adet mesh elemanı kullanılmıştır.



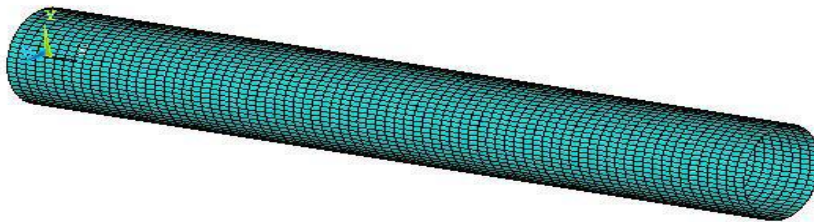
Şekil 12. Kompozit tankın SHELL99 sonlu eleman tipi (ANSYS 2012 User Manual)

Kompozit borunun cidar yapısı, Şekil 13' te gösterildiği gibi $[90^\circ, \pm 55^\circ, 90^\circ]$ simetrik ve $[\pm 55^\circ, 90^\circ, 90^\circ]$ simetrik olmayan katman düzenlerinde modellenmiştir. Kompozit plakada 1 yönü elyaf doğrultusunu, 2 yönü ise elyaf doğrultusuna dik yönü göstermektedir.

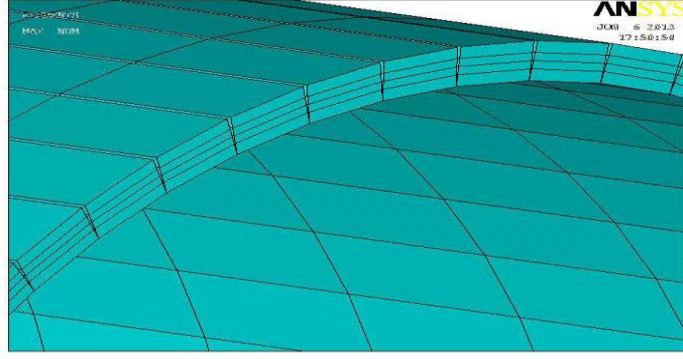


Şekil 13. Tank cidarının katman düzeni ve elyaf yönlendirme açıları.

Farklı katman düzenlerinde oluşturulan sonlu eleman modeli yardımıyla simetrik ve simetrik olmayan katman yapısının patlama basıncına etkisi de incelenebilmiştir. Şekil 14' te kompozit borunun genel mesh durumu ve Şekil 15' te kompozit sargılı borunun katmanları gösterilmiştir.



Şekil 14. Kompozit borunun mesh modeli

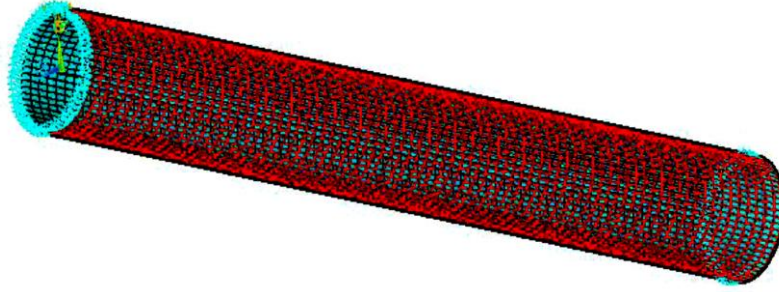


Şekil 15. Kompozit Sargılı Borunun Katmanları

Bununla birlikte kompozit sargılı borunun sınır şartları ve yüklemeleri Şekil 16’ da gösterilmiştir. Modelde borunun bir ucu aksel yönde sabitlenmiş, tüm yüzeyi ve her iki kenarının çevresel genişlemesine izin verilmiştir. Boru iç yüzeyine hidrostatik iç basınç uygulanmış ve statik analiz yardımıyla çözüm gerçekleştirilmiştir. Kompozit borunun boyutları da Tablo 3’ te verilmiştir.

Tablo 3. Kompozit sargılı borunun boyutları

Kompozit Borunun Boyu (mm)	650
Kompozit Borunun Çapı (mm)	65
Kompozit Borunun Et kalınlığı (mm)	1,7



Şekil 16. Kompozit sargılı borunun sınır şartları gösterimi

5. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, kompozit sargılı borunun analitik, sayısal ve deneysel metotlar yardımıyla yapılan analiz sonuçları ve karşılaştırmaları sunulmuştur.

5.1. Kompozit Sargılı Borunun Analitik Çözümleri

Kompozit sargılı borunun patlama basıncına göre tasarımı öncelikle Laminasyon Teorisi yardımıyla, iki adım yaklaşımı olan ilk katman hasarı ve elyaf hasarı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Hesapların kolay yapılabilmesi için formüller Excel programına aktarılmış ve her bir katmandaki elyaf yönü ve elyaf yönüne dik yönlerdeki birim şekil değiştirme ve gerilme değerleri Excel ara yüzünde geliştirilen bir program yardımıyla elde edilmiştir. Şekil 17’ de analitik çözüm için oluşturulan bilgisayar programına ait ara yüz gösterilmiştir. Programda simetrik katman düzenindeki (90; ±50; 90) kompozit borunun Tsai-Wu kriterine göre ilk katman hasarının 58 Bar basınç değerinde 2. ve 3. katmanlarda meydana geldiği görülmektedir. Benzer olarak yapılan analitik patlama basınç analizi sonucu simetrik olmayan katman düzenindeki (±50; 90; 90) kompozit borunun ilk katman hasarının 55 Bar basınç değerinde 2. ve 3. katmanlarda meydana geldiği görülmüştür.

Tsai-Wu ← (Kompozit Hasar Kriteri) → Tsai-Wu		1. Kompozit Plaka				2. Kompozit Plaka				
4. Plaka Elyaf Açısı / Kalınlık		E-glass / epoxy				E-glass / epoxy				
-0,09	90 derece 0,42 mm	-0,07	GPa		MPa		GPa		MPa	
	3. Plaka Elyaf Açısı / Kalınlık		E_{11}	54	S_L	1035	E_{11}	54	S_L	1035
	2. Plaka Elyaf Açısı / Kalınlık	1,00	E_{22}	18	S_T	28	E_{22}	18	S_T	28
0,86	-55 derece 0,42 mm		ν_{12}	0,25	S_{LT}	41	ν_{12}	0,25	S_{LT}	41
	1. Plaka Elyaf Açısı / Kalınlık		ν_{21}	0,08	$S_{L(-)}$	1035	ν_{21}	0,08	$S_{L(-)}$	1035
	4. Kompozit Plaka		G_{12}	9	$S_{T(-)}$	138	G_{12}	9	$S_{T(-)}$	138
1,00	55 derece 0,42 mm	0,86	3. Kompozit Plaka				4. Kompozit Plaka			
			E-glass / epoxy				E-glass / epoxy			
			GPa		MPa		GPa		MPa	
-0,07	90 derece 0,42 mm	-0,09	E_{11}	54	S_L	1035	E_{11}	54	S_L	1035
			E_{22}	18	S_T	28	E_{22}	18	S_T	28
Alt		Üst	ν_{12}	0,25	S_{LT}	41	ν_{12}	0,25	S_{LT}	41
			ν_{21}	0,08	$S_{L(-)}$	1035	ν_{21}	0,08	$S_{L(-)}$	1035
			G_{12}	9	$S_{T(-)}$	138	G_{12}	9	$S_{T(-)}$	138
	$h_0 = -0,85$		$P_{iç}$	=	58 Bar		$R_{iç}$	=	32 mm	
	$h_1 = -0,42$		N_x	=	0,00 MPa-m		N_y	=	0,19 MPa-m	
	$h_2 = 0,00$		N_{xy}	=	0,00		M_x	=	0,00	
	$h_3 = 0,42$		M_y	=	0,00		N_{xy}	=	0,00	
	$h_4 = 0,85$									

Şekil 17. Excel kullanılarak geliştirilen programa ait ara yüz

5.2. Kompozit Sargılı Borunun Sayısal Analizleri

Kompozit sargılı borunun sayısal analizleri ANSYS sonlu elemanlar programında yapılmış olup, modelin eleman koordinat sistemi (EKS) borunun silindirik koordinat sistemine göre yönlendirilmiştir. Bu işlem sayesinde elyaf doğrultuları boru üzerinde doğru olarak tanımlanabilmiştir.

Şekil 18 ve Şekil 19' da sonlu eleman modeli verilen simetrik katman düzenindeki (90; ±50; 90) kompozit sargılı boruda ilk katman hasarına yol açan 58 Bar basıncın birinci katmanın alt yüzeyinde neden olduğu elyaf yönü (1) ve elyaf yönüne dik yöndeki (2) gerilme değerleri gösterilmiştir. Kompozit boruda elyaf yönünde ve elyaf yönüne dik yönde oluşan gerilme değerleri sırasıyla 139,20 MPa ve -5,24 MPa olduğu görülmektedir.

```

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SI (AVG)
BOTTOM
LAYER=1
RSYS=0
CMX =,51153
SMN =139,208
SMK =139,208

```

ANSYS

R17.1

APR 14 2020

01:09:10

ELOT NO. 1

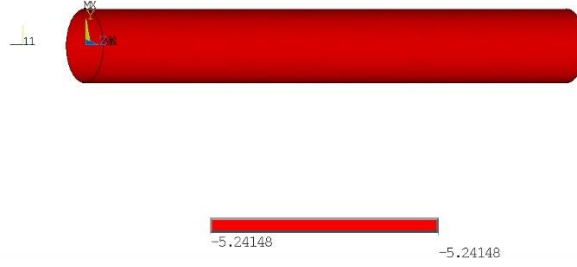


Şekil 18. Birinci katman, alt yüzey, elyaf doğrultusundaki (1) gerilme değeri

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SX (AVG)
 BOTTOM
 LAYR=1
 RSY=0
 DMX =.51153
 SMN =-5.24148
 SMX =-5.24148

ANSYS
 R17.1

APR 14 2020
 01:06:41
 PLOT NO. 1



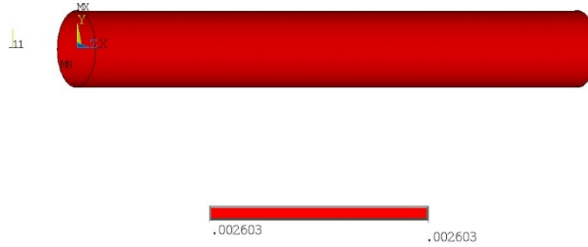
Şekil 19. Birinci katman, alt yüzey, elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki gerilme değeri

Şekil 20 ve Şekil 21' de sonlu eleman modeli verilen simetrik katman düzenindeki kompozit sargılı boruya ait ilk katman hasarına yol açan 58 Bar basıncın birinci katmanın alt yüzeyinde neden olduğu elyaf yönünde (1 yönü) ve elyaf yönüne dik yönlerdeki (2 yönü) birim şekil değiştirme değerleri gösterilmiştir. Kompozit boruda elyaf yönünde ve elyaf yönüne dik yönde oluşan birim şekil değiştirme değerleri sırasıyla 0,0026 mm/mm ve -0,00096 mm/mm olduğu görülmektedir.

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 EFEL1 (AVG)
 BOTTOM
 LAYR=1
 RSY=0
 DMX =.51153
 SMN =.002603
 SMX =.002603

ANSYS
 R17.1

APR 14 2020
 01:18:25
 PLOT NO. 1

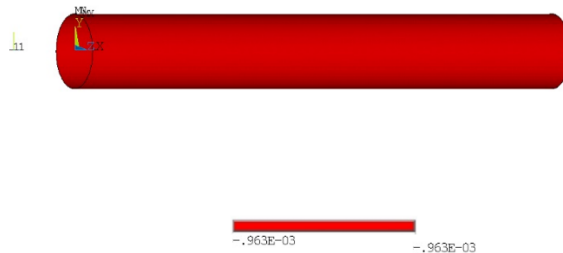


Şekil 20. Birinci katman, alt yüzey, elyaf doğrultusundaki (1) birim şekil değiştirme değeri

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 EFELX (AVG)
 BOTTOM
 LAYR=1
 RSY=0
 DMX =.51153
 SMN =-.963E-03
 SMX =-.963E-03

ANSYS
 R17.1

APR 14 2020
 01:20:35
 PLOT NO. 1



Şekil 21. Birinci katman, alt yüzey, elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki birim şekil değiştirme değeri

5.3. Kompozit Sargılı Borunun Analiz Sonuçları

5.3.1. Gerilme ve birim şekil değiştirmeler

Bu bölümde simetrik ve simetrik olmayan katman düzenlerindeki kompozit boruların Laminasyon Teorisine göre hesaplanmış ilk katman hasarına neden olan sırasıyla 58 Bar ve 55 Bar lık iç basınç değerleri altında boru cidarında meydana gelen elyaf yönünde ve elyaf yönüne dik yönlerdeki birim şekil değiştirme ve gerilme değerlerinin analitik ve sayısal analiz sonuçları Tablo 4 ve Tablo 5'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 4. Birinci katmana ait elyaf yönü (1) ve elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki analitik ve sayısal birim şekil değiştirmeler

mm/mm	Elyaf Açılı (90; ±50; 90) / 58 Bar				Elyaf Açılı (±50; 90; 90) / 55 Bar			
	1. Katman Alt Yüzeyi		1. Katman Üst Yüzeyi		1. Katman Alt Yüzeyi		1. Katman Üst Yüzeyi	
	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal
□ ₁	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012
□ ₂	-0,0010	-0,00096	-0,0010	-0,00096	0,0004	0,0001	0,0004	0,0001
□ ₁₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0033	0,0031	0,0032	0,0030

Tablo 5. İkinci katmana ait elyaf yönü (1) ve elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki analitik ve sayısal birim şekil değiştirmeler

mm/mm	Elyaf Açılı (90; ±50; 90) / 58 Bar				Elyaf Açılı (±50; 90; 90) / 55 Bar			
	2. Katman Alt Yüzey		2. Katman Üst Yüzey		2. Katman Alt Yüzey		2. Katman Üst Yüzey	
	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal
□ ₁	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0013	0,0014	0,0013
□ ₂	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
□ ₁₂	0,0034	0,0033	0,0034	0,0033	-0,0031	-0,0030	-0,0031	-0,0030

Tablo 4, 5, 6 ve 7' de sunulduğu üzere kompozit katmanlardaki 1 ve 2 yönlerindeki hem analitik hem de sayısal birim şekil değiştirmeler ve gerilmelerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 6. Birinci ve ikinci katmanlara ait elyaf yönü (1) ve elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki analitik ve sayısal gerilmeler

MPa	Elyaf Açılı (90; ±50; 90) / 58 Bar				Elyaf Açılı (±50; 90; 90) / 55 Bar			
	1. Katman Alt Yüzey		1. Katman Üst Yüzey		1. Katman Alt Yüzey		1. Katman Üst Yüzey	
	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal
□ ₁	139,76	139,20	139,76	139,20	68,67	69,12	70,63	67,36
□ ₂	-5,24	-5,24	-5,24	-5,24	12,45	8,16	11,93	8,36
□ ₁₂	0,00	0,00	0,00	0,00	29,72	28,90	29,47	28,42

MPa	Elyaf Açılı (90; ±50; 90) / 58 Bar				Elyaf Açılı (±50; 90; 90) / 55 Bar			
	2. Katman Alt Yüzey		2. Katman Üst Yüzey		2. Katman Alt Yüzey		2. Katman Üst Yüzey	
	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal
□ ₁	80,38	80,09	80,38	80,09	82,33	69,56	80,38	69,56
□ ₂	10,80	10,75	10,80	10,75	8,76	8,27	9,29	8,27
□ ₁₂	30,28	30,11	30,28	30,11	-27,95	-27,65	-28,20	-27,65

Tablo 7. Üçüncü ve dördüncü katmanlara ait analitik ve sayısal elyaf yönü (1) ve elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki gerilmeler

MPa	Elyaf Açılı (90; ±50; 90) / 58 Bar				Elyaf Açılı (±50; 90; 90) / 55 Bar			
	3. Katman Alt Yüzey		3. Katman Üst Yüzey		3. Katman Alt Yüzey		3. Katman Üst Yüzey	
	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal
□ ₁	80,38	80,09	80,38	80,09	132,78	127,09	132,78	127,09
□ ₂	10,80	10,75	10,80	10,75	-4,86	-4,47	-4,86	-4,47
□ ₁₂	30,28	30,11	30,28	30,11	0,00	-0,11	-1,48	-0,23

MPa	Elyaf Açılı (90; ±50; 90) / 58 Bar				Elyaf Açılı (±50; 90; 90) / 55 Bar			
	4. Katman Alt Yüzey		4. Katman Üst Yüzey		4. Katman Alt Yüzey		4. Katman Üst Yüzey	
	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal	Analitik	Sayısal
□ ₁	139,76	139,20	139,76	139,20	132,78	127,60	132,78	127,60
□ ₂	-5,24	-5,24	-5,24	-5,24	-4,86	-2,42	-4,86	-2,42
□ ₁₂	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,48	-0,36	-2,97	-0,36

5.3.2. Patlama basıncı değerleri

Tasarımı ve üretimleri yapılan kompozit sargılı boruların bu çalışmada minimum 200 Bar lık patlama basıncına sahip olmaları istenmiş ve borulara ait tasarım parametreleri minimum patlama basıncı değerinin 50 Bar üzerinde olacak şekilde 250 Bar basınç değerine göre belirlenmiştir. Bu sayede güvenilirliği ön plana çıkartan nihai tasarım sayesinde boruların teorik patlama basıncı değerlerinin belirlenmiş minimum patlama basıncı değerinin üzerinde kalması hedeflenmiştir.

Tablo 8. [90; ±50; 90] simetrik katman düzenindeki kompozit sargılı boruların analitik, sayısal ve deneysel patlama basıncı değerleri

	Analitik Metot	Sayısal Metot	Deneysel Metot Ortalama
Cidar Kalınlığı (mm)	1,7	1,7	1,7
Patlama Basıncı (Bar)	241	240	246,42

Tablo 9. [±50; 90; 90] simetrik olmayan katman düzenindeki kompozit sargılı boruların analitik, sayısal ve deneysel patlama basıncı değerleri

	Analitik Metot	Sayısal Metot	Deneysel Metot Ortalama
Cidar Kalınlığı (mm)	1,7	1,7	1,7
Patlama Basıncı (Bar)	234	239	242,42

Elyaf sarım yöntemiyle, Cam elyaf / epoksi kompozit malzemeden iki farklı katman düzeninde üretilmiş kompozit sargılı boruların analitik, sayısal ve deneysel patlama basıncı değerleri Tablo 8 ve 9' da verilmiştir. Elde edilen basınç değerleri incelendiğinde patlama basıncı değerlerinin birbirine yakın olduğu ve amaçlanan minimum 200 Bar lık patlama basıncı değerinin üzerinde çıktığı, dolayısı ile tasarımın yeterli emniyeti sağladığı görülmektedir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada öncelikle [90°, ±55°, 90°] simetrik ve [±55°, 90°, 90°] simetrik olmayan iki farklı katman düzenindeki, 65 mm dış çapa, 1.7 mm cidar kalınlığına sahip, 650 mm boyundaki, Cam elyaf / epoksi kompozit boruların patlama basıncı değerleri hem analitik hem de sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla filaman kompozit sarım yöntemi ile üretilen Cam elyaf/ epoksi kompozit boruların hidrostatik patlama testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ve testler sonucunda kompozit boruların patlama basınç değerleri ile elyaf doğrultusunda ve elyaf doğrultusuna dik yönlerde oluşan gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda [90°, ±55°, 90°] simetrik ve [±55°, 90°, 90°] simetrik olmayan katman düzenine sahip aynı kalınlıktaki kompozit sargılı borularda deneysel olarak ortalama patlama basınçları sırasıyla 246,42 Bar ve 242,42 Bar olarak elde edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde kompozit borulardaki simetrik ve simetrik olmayan kompozit katman düzenlerinin patlama basıncına önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

[90°, ±55°, 90°] simetrik ve [±55°, 90°, 90°] simetrik olmayan katman düzenine sahip kompozit sargılı borularda analitik ve sayısal analizler sonucu elde edilen patlama basıncı değerlerinin hem kendi arasında hem de deneysel patlama basıncı değerleri ile yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

[90°, ±55°, 90°] simetrik ve [±55°, 90°, 90°] simetrik olmayan katman düzenine sahip kompozit sargılı boruların geliştirilen Excel programı yardımıyla patlama basıncına göre yapılan analizlerinden, her bir kompozit katmana ait elyaf yönü (1) ve elyaf yönüne dik (2) doğrultudaki birim şekil değiştirme ve gerilme değerlerinin sayısal analizlerden elde edilen değerlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

Sayısal analiz ve deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen kompozit borulara ait patlama basıncı değerlerinin birbirine yakınsaması, boruların sayısal modelinde uygulanan sınır şartlarının, gerçek şartlarda hidrostatik patlama basıncı deneyine maruz kompozit boruyu doğru şekilde tarif ettiği düşünölmektedir.

Bir sonraki çalışmada; kompozit boruların düşük hızlarda ağırlık düşürme testine tabi tutularak darbeye karşı dayanımlarının ölçülmesi, daha sonra bir sonlu eleman programında ağırlık düşürme testine uygun olarak kompozit boruların darbe analizlerinin gerçekleştirilmesi ve çıkan sonuçların test sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

Referanslar

Cherevatsky S., Cherevatsky A., Dayan H. Stepanov A., New Design of Composite/Metal Gas Storage Vessels and Propellant Tanks, AIAA 2004- 3508.

Cz'el G., T. Czig'any, A Study of Water Absorption and Mechanical Properties of Glass Fiber/Polyester Composite Pipes: Effects of Specimen Geometry and Preparation, Journal of Composite Materials 42 (2008) 2815–27.

Djehiche B., Eddahbi M., Sun X. K., Du S.Y. ve Wang G. D., Bursting Problem of Filament Wound Composite Pressure Vessels, The International Journal of Pressure Vessels and Piping, Cilt: 76, No:1, Sayfa: 55-59 (5) 1999.

DNVGL-RP-F119, Recommended Practice for Thermoplastic Composite Pipes, Technical Report, DNV GL, 2015.

Ever J. Barbero, Introduction to Composite Materials Design, Taylor & Francis, Inc. 1998.

Jones R.M., Mechanics of Composite Materials. McGRAW-Hill, Co.; 1975.

Lees J. M., Behaviour of GFRP Adhesive Pipe Joints Subjected to Pressure and Axial Loadings, Composites: Part A 37 (2006) 1171–9.

Mark E. Tuttle, "Structural Analysis of Polymeric Composite Materials", MarcelDekker, Inc. 2004

Parnas L., Katirci N., Design of Fiber-Reinforced Composite Pressure Vessels Under Various Loading Conditions, Composite Structures, 58, 1, Sayfa: 83-95, 2002.

Rafiee R., Mazhari B., Simulation of Thelong-Termhydrostatic Tests on Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes, Composite Structures 136 (2016) 56–63.

Robert M. Jones, Mechanics of Composite Materials, Taylor and Francis, Inc. 1998

Ronald F. Gibson, "Principles of Composite Material Mechanics" McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

Sayman O., Analysis of Multi-Layered Composite Cylinders Under Hygrothermal Loading, Composites: Part A, 36, 923-33, 2005.

Tam W. H., Griffin P. S., Jackson A. C., Design and Manufacture of a Composite Over Wrapped Pressurant Tank Assembly, AIAA 2002-4349.

Tam W. H., Ian A. Ballinger, J. Kuo, W. D. Lay, S. F. Mc Cleskey, Morales P., Taylor Z. R., Epstein S. J., Design and Manufacture of a Composite Over wrapped Xenon Conical Pressure Vessel, AIAA 96-2752.

Tamer A. S., Design of Oil and Gas Composite Pipes for Energy Production, Energy Procedia, Volume 162, April 2019, Pages 146_155.

Wr'obel G., Szymiczek M., Kaczmarczyk J., Influence of the Structure and Number of Reinforcement Layers on The Stress State in The Shells of Tanks and Pressure Pipes, Mechanics of Composite Materials 53 (2017) 165–78.