

# Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Yüksek Basınç Tankı Tasarımı

Bariş KALAYCIOĞLU ve M. Hüsni DİRİKOLU

Kırıkkale Üniversitesi, Müh. Fak. Makine Müh. Bl. Kampüs, 71450 Kırıkkale.  
Tel: +90 (318) 357-4242/1058-1053; Fax: +90 (318) 357-2459, dirikolu@kku.edu.tr, kalaycioglu@kku.edu.tr

**Özet-** Bu çalışmada ağ analizi ve klasik katman teorisi yardımıyla TSE tarafından Tip 3 olarak isimlendirilen [1] dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının patlama basıncına göre tasarımı yapılmıştır. Çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri esas alınmış olup, metal astar için hasar durumu plastik akmanın başladığı an ve kompozit kısmın hasar durumu ise fiber kopması olarak düşünülmüştür. Tasarımda ilk olarak ağ analizinden elde edilen kompozit katman kalınlıkları temel alınarak simetrik ve simetrik olmayan plaka düzenleri için helisel ve teğetsel kısımların birbiri arasındaki kalınlık değişiminin patlama basıncına ve teğetsel şekil değiştirmelere etkisi incelenmiştir. Daha sonra ağ analizi ile elde edilen patlama basıncı değeri simetrik ve simetrik olmayan plaka düzenleri için katman teorisi ile bulunan maksimum patlama basıncı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak metal astarın kompozit kısmın kalınlığı ile orantılı olarak kalınlık değişiminin yine patlama basıncına ve teğetsel şekil değiştirmelere etkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda 28 lt'lik basınç tankı seçilmiş, tankın metal astarı için 34CrMo4 çeliği ve kompozit kısmı için AS-3501 karbon fiberi ve epoksi reçinesi kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Basıncılı Kap, Kompozit, Ağ Analizi, Kompozit Levha Teorisi

**Abstract-** In this study, Type 3 metal lined and filament-wound composite pressure vessel is designed with respect to burst pressure by using netting analysis and classical lamination theory. Failure analysis was based on the Tsai-Wu failure criterion. Plastic yielding and fiber breakage failure mechanisms were assumed for the metal liner and for composite part, respectively. The pressure vessel is 28 liters in water volume; 34CrMo4 steel material for metal liner and AS-3501 carbon / epoxy for over wrap composite were selected. Results from netting analysis were accepted as basis for symmetric and anti-symmetric plates dimensions. The effect of helical and hoop winding thicknesses variations on burst pressure and hoop strain changes were investigated at first. Later, the burst pressure obtained from netting analysis was compared with the maximum burst pressure values calculated via symmetrical and non-symmetrical approaches. Lastly, metal lined and composite part thickness ratio variation effects on burst pressure and hoop strain changes were investigated.

## GİRİŞ

Yüksek basınçlar altındaki gazların depolanması ve hareketliliğinin sağlanması ihtiyacı, kompozit tankların kullanımını gündeme taşımaktadır. Bu amaçla geliştirilen tasarım yaklaşımları literatürde geniş şekilde yer almaktadır. Bu çalışmaları özetlemek gerekirse, Kam ve arkadaşları [2] kompozit basınç tanklarının dayanımını analitik ve deneysel olarak incelemiş ve basınç tankının hasara uğramasında ilk katman hasarının etken olduğunu varsaymıştır. Lifshitz ve Dayan [3] metal astarlı kompozit sargılı basınç tanklarının simetrik olmayan plaka düzeninde cidarlarında oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerini simetrik plaka düzeninde var sayarak hesaplamışlardır. Hesaplamalarında klasik katman teorisini ve Tsai-Wu hasar kriterini temel almışlardır. Fukunaga ve Uemura [4] roket motorlarında kullanılan helisel kompozit sargılı basınç tankının küresel kısımlarının optimum tasarımını membran teorisi ve ağ analizi yardımıyla gerçekleştirmiştir. Hasar kriteri olarak Tsai-Hill hasar kriterini kullanmıştır. Xia ve arkadaşları [5] çok katmanlı flaman sargılı kompozit boruların iç basınç altında cidarlarında oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri incelemiştir. Analizlerde etkileşimli rijitlik matrisi hesaba katılmıştır. Chang [6] kompozit basınç tanklarının ilk katman hasarına göre deneysel ve teorik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizlerde farklı kompozit malzeme özellikleri kullanmış ve simetrik plaka düzenini esas almıştır. Tank çeper kalınlığının, tank yarıçapıyla olan değişimini ve farklı katman sayılarının iç basınca etkisini incelemiştir. Balya [7] kombine yükler altındaki filaman sargı tüplerin tasarım ve analizini gerçekleştirmiştir. Filaman sargı tüplerin çeşitli kombine yükler altındaki davranışını incelemek için Sonlu Eleman Analiz (SEM) tekniğini kullanmıştır. Önder [8] tez çalışmasında, simetrik ve anti-simetrik tabakalı ince cidarlı E-Cam/Epoksi kompozitlerin maksimum patlama basıncındaki en uygun tabaka açılarını araştırmıştır. İçten basınca maruz helisel açıda sarımlı kompozit borularda en uygun sarım açısının 55° civarında olduğunu, tek açıda sarımlı kompozit borularda ise bu değer 90° olduğunu tespit etmiştir. Mark J. Warner ve diğer çalışma arkadaşları çalışmalarında [9] doğalgaz depolamak için çift hücreli plastik esaslı yüksek basınca dayanabilen kompozit malzemenen yapılmış bir tank tasarımı ve imalatı

gerçekleştirmiş ve tankın güvenlik ve dayanıklılık testlerini NGV2-2000 standardına uygun olarak yapmışlardır.

Yukarıda özetlenen çalışmaların 30 yılına yakın bir zaman periyodunda gerçekleştiği düşünüldüğünde, ticarileşen yüksek performansta çalışabilen Tip-3 tankının imal edilemediği görülmektedir. Bu çalışmada literatürden elde edilen tasarım eksiklikleri de gözönüne alınarak, bir Tip-3 tankının tasarımının ilk aşaması sunulmaktadır.

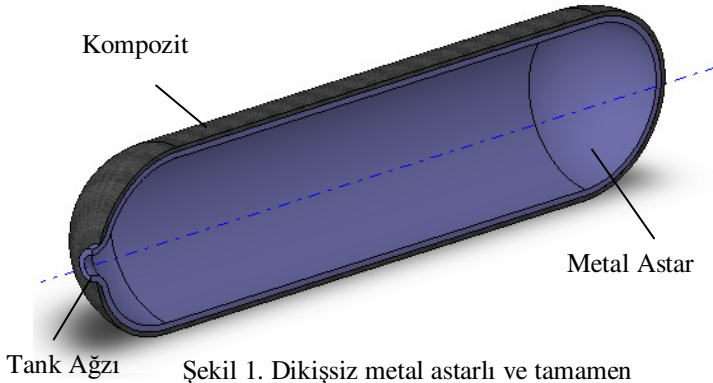
## KOMPOZİT TANKLARIN DİZAYNI

### a) Ön kabuller

Bu çalışmada, Şekil 1’de gösterilen ve 28 lt hacme sahip dikişsiz metal astarlı ve tamamen kompozit sargılı basınç tankının ön tasarımı yapılmıştır.

Ön tasarım, ağ analizi ve klasik katman teorisi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tip-3 basınç tankının metal astarı için 34CrMo4 çeliği kullanılmıştır. İyi korozyon dayanımı, yüksek süneklik, soğuk işleme ile iyi sertleştirilebilme ve mükemmel sıvama özelliklerinden ötürü bu çelik malzemesi tercih edilmiştir. Kompozit malzeme için AS-3501 Karbon elyafı ve Epoksi reçinesi kullanılmıştır.

Metal astarın iç çapı 214 mm ve toplam uzunluğu 721 mm alınmıştır.



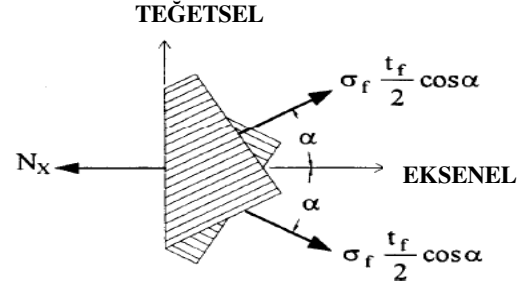
Şekil 1. Dikişsiz metal astarlı ve tamamen kompozit sargılı basınç tankı

### b) Ağ Analizi

Ağ analizi, flaman sargı yöntemiyle sarılmış yüksek basınca dayanıklı kompozit basınç tanklarındaki teğetsel ve eksenel yöndeki gerilmelerin hesaplanması için temel bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda eğilme, kayma ve burkulmadan dolayı oluşacak etkiler ihmal edilmekte ve yükün sadece elyaf doğrultusunda taşındığı varsayılmaktadır.

Tankın iç basıncı  $P$ , iç çapı  $R$ , helis sarım açısı  $\pm\alpha$ , fiber malzemesinin çekme gerilmesi  $\sigma_f$  ve kompozit sarım kalınlığı  $t_f$  dir.  $N_x$  birim uzunluktaki eksenel kuvvet ve  $N_H$  ise birim uzunluktaki teğetsel kuvvettir. Kompozit katmanın helisel sarımlı fiber malzemenin eksenel yöndeki yüklenme durumu Şekil 2’de, helisel sarımlı fiber malzemenin teğetsel yöndeki yüklenme durumu Şekil 3’te ve hem helisel hem de eksenel sarımlı fiber malzemenin

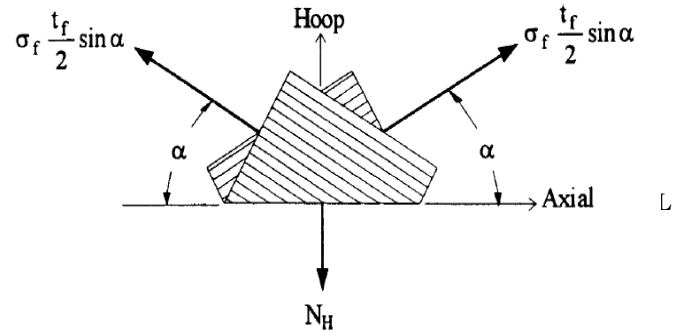
teğetsel yöndeki yüklenme durumu Şekil 4’te verilmiştir.[10]



Şekil 2. Helisel sarımlı fiber malzemenin eksenel yük durumu

Eksenel yöndeki kuvvet bağıntısı;

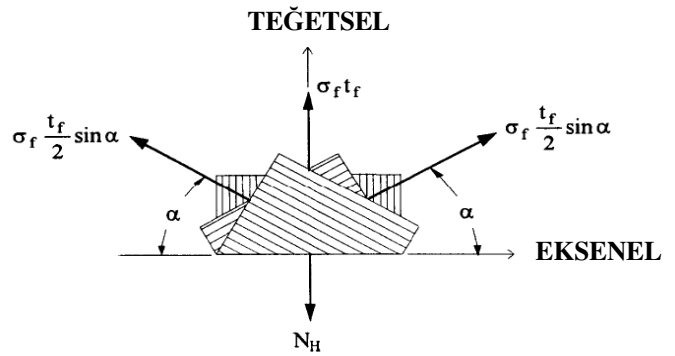
$$N_x = \frac{PR}{2} = \sigma_f t_f \cos^2 \alpha \quad (1)$$



Şekil 3. Helisel sarımlı fiber malzemenin teğetsel yük durumu

Teğetsel yöndeki kuvvet bağıntısı;

$$N_H = PR = \sigma_f t_f \sin^2 \alpha \quad (2)$$



Şekil 4. Hem helisel hem de eksenel sarımlı fiber malzemenin teğetsel kuvvet durumu

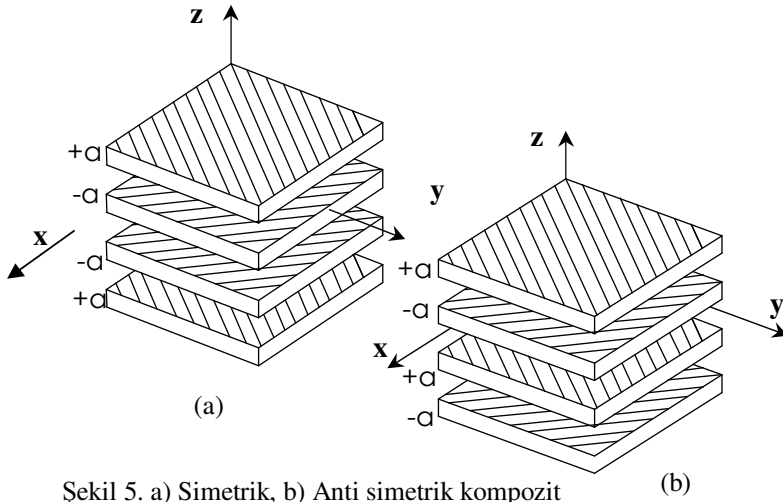
Teğetsel yöndeki kuvvet bağıntısı;

$$N_H = PR = \sigma_f t_f \sin^2 \alpha + \sigma_f t_f \quad (3)$$

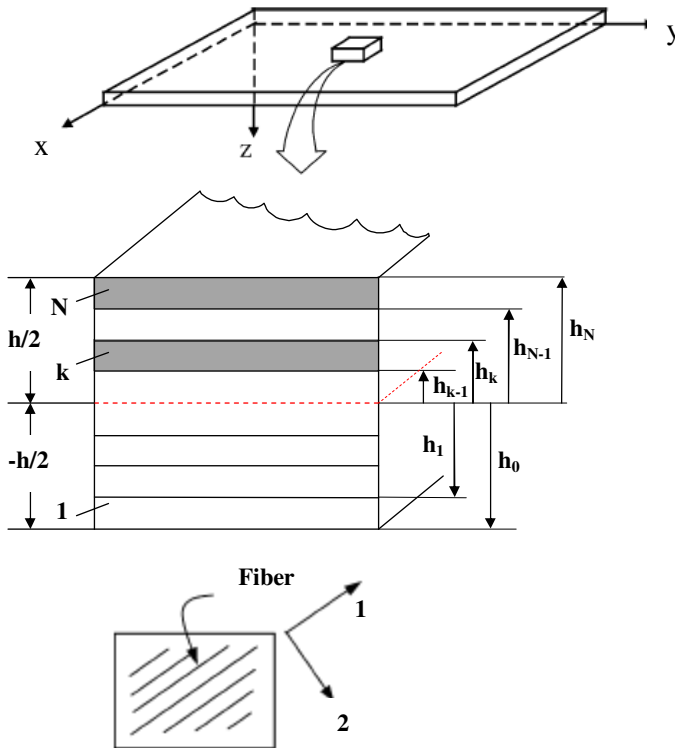
şeklinde elde edilebilir. Yukarıdaki ifadelerden anlaşılacağı üzere, ağ analizinde reçine malzemesinin mukavemet etkisi ihmal edilmektedir.

**c) Kompozit levha teorisi**

Kompozit levha teorisi ile levhanın her bir katmanında oluşacak gerilme ve şekil değiştirmeler hesaplanabilmektedir. Çok katmanlı kompozit levhalar farklı yönde fiber doğrultularına sahip ortotropik tek katmanlı kompozit plakaların şekil 5a ve b’de de görüldüğü gibi simetrik veya simetrik olmayan biçimlerde üst üste gelmesinden oluşurlar.



Şekil 5. a) Simetrik, b) Anti simetrik kompozit çok katmanlı levhalar.

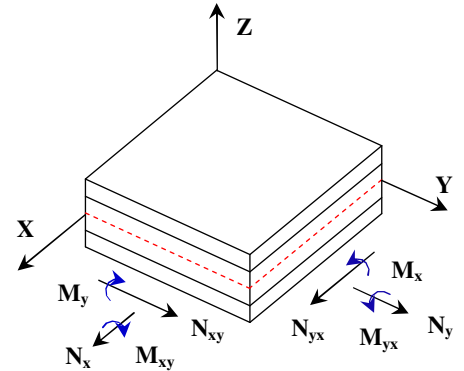


Şekil 6. Kompozit levha geometrisi [11]

Kompozit levhalarda gerilme-şekil değiştirme ilişkisini gösterebilmek için Kirchhoff hipotezi yardımıyla çok katmanlı levhanın bir katmanındaki şekil değiştirmelerin denklem (4)’te görüldüğü gibi ifade edilmesi gerekir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

(4) denkleminde,  $\epsilon_x^o$ ,  $\epsilon_y^o$ ,  $\gamma_{xy}^o$  terimleri referans düzlemin şekil değiştirmelerini,  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_{xy}$  terimleri ise referans düzlemin eğriliğini ifade etmektedir.



Şekil 7. Çok katmanlı levhada X ve Y yönlerindeki kuvvet ve momentler [12]

Şekil 7’de gösterilmiş çok katmanlı levhaya gelebilecek birim uzunlukdaki kuvvet ve momentler denklem (5 ve 6) da verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} z dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \quad (6)$$

Yukarıdaki kuvvet ve moment denklemleri  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ , ve  $D_{ij}$  rijitlik matrisleri yardımıyla ifade edilmek istenirse denklem (7 ve 8)’e ulaşılmış olur.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left( \frac{h_k^2 - h_{k-1}^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} D_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left( \frac{h_k^3 - h_{k-1}^3}{3} \right) \\ \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} A & B \\ B & D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^o \\ K \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Denklem (7)'de ki  $A_{ij}$  ifadesi orta düzlemin  $\{\epsilon^0\}$  şekil değiştirmesine neden olan  $[N]$  aksel kuvvetlerinin uzama rijitlik matrisini verir.  $D_{ij}$  ifadesi  $\{K\}$  eğriliğine neden olan  $[M]$  momentlerinin eğilme rijitlik matrisini verir.  $B_{ij}$  ifadesi ise  $\{K\}$  eğriliğine neden olan aksel kuvvetler ve orta düzlemin  $\{\epsilon^0\}$  şekil değiştirmesine neden olan  $[M]$  momentleri için etkileşim rijitlik matrisi olarak tanımlanabilir. 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 sıfıra eşit olur. Ancak katmanların simetrik olmaması durumunda  $B_{ij}$  etkileşim rijitlik matrisi sıfıra eşit olmaz [13].

Basınç tankının cidarı simetrik olacak şekilde tasarlanırsa,  $B_{ij}=0$  olur. Ayrıca tankın basınç yüklemesi sonucu cidarında meydana gelen yüklemeler sadece aksel yönlü çekme kuvvetleri olacağından, cidardaki birim uzunluktaki kuvvet ifadesi denklem (9)'da ki gibi olacaktır.

$$\{N\} = [A]\{\epsilon\} \quad (9)$$

Ancak bu çalışmada basınç tankının cidarı, metal astar, üzerine  $\pm\alpha$  helisel sarım ve onunda üzerine  $90^\circ$  teğetsel sarım olarak düşünülmektedir. Bu şekildeki tabaka düzeni anti simetrik bir sarım şeklidir ve plakanın gerilme analizi denklem (8) yardımıyla yapılır. Literatürdeki birçok çalışmada tankın cidarının anti simetrik olmasına karşın cidarda oluşan kuvvetler neticesinde moment ve etkileşim etkisinin olmayacağı varsayımı ile cidar simetrik olarak düşünülmüş ve gerilme analizi (9) denklemi yardımıyla yapılmıştır. Bu çalışmada ise basınç tankının cidarının hem simetrik hem de anti simetrik olarak gerilme analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### d) Kompozit Yapılarda Hasar Kriterleri

Kompozit basınç tanklarının gerilme analizlerinde hasar kriterlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ortotropik kompozit plakalara ait hasar kriterleri; (1) Maksimum gerilme hasar kriteri, (2) Maksimum şekil değiştirme hasar kriteri, (3) Tsai-Hill hasar kriteri ve (4) Tsai-Wu hasar kriteri [14] şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada Tsai-Hill ve Tsai-Wu hasar kriterleri dikkate alınarak gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tsai-Hill kriteri orijinal olarak homojen izotropik parçalara uygulanan ve Bauschinger etkisini hesaba katan Von Mises kriterine dayanır. Daha sonra anizotropik malzemelere adapte etmek için Hill tarafından değiştirilmiş ve kompozit malzemelere uygulanmıştır. Bu kriter denklem (10) 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 ( $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}, S_1, S_2, S_{12}$ ) bulunmaktadır.

$$\frac{\sigma_1^2}{S_1^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_2^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (10)$$

Tsai-Wu anizotropik malzemelerin hasar teorisini iyileştirilmiş ve basitleştirilmiş bir tensör polinomu yardımıyla ifade etti. Bu kriterin diğer kriterlere göre 3 önemli özelliği vardır. (1) koordinatların tekrardan tanımlanması veya döndürülmesi halinde kriterin değişmemesi, (2) Bilinen tensör dönüşüm kuralları yardımıyla kriterdeki terimlerin dönüştürülebilmesi, (3) direngenlik ve komplians matrislerdeki gibi simetrik özelliklerin kriterde yansıtılabilmesidir [15]. Kompozit bir plakada oluşacak gerilmeler sonucu plakanın hasara uğrayıp uğramayacağı (11) nolu Tsai-Wu denkleminden bulunabilir.

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}$  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 (12)'de ifade edilmiştir.

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

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

#### e) İlk Katman Hasar Teorisi Yardımıyla Gerilme-Şekil Değiştirme Hesabı

Düzlem gerilmelere bağlı olarak ilk hasara uğrayan katmanı tahmin etmek, kompozit levha teorisi yardımıyla bulunan kompozit katmanlardaki gerilmelerin uygun bir hasar kriterinde yorumlanmasıyla yapılabilir. Kompozit plakada ilk hasara neden olan yükler tüm kompozit levhayı hasara uğratan yükler anlamına gelmez. Kompozit levhanın hasara uğraması, kompozit levhadaki her bir katmanın farklı bir yük durumunda ardışık olarak hasara uğraması ile oluşur. İlk katman hasar teorisine göre maksimum yükün belirlenmesi, ilk hasarı meydana getiren yük ile rijitlik matrisleri değiştirilmiş plakaların hasara uğrayacağı yüklerin toplanması ile olur [13].

## ANALİZ GİRDİLERİ

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

Tablo 1. Malzeme özellikleri [13].

Malzeme Sabitleri	Çelik 34CrMo4		Karbon / Epoksi	
	Hasar öncesi	Hasar sonrası	Hasar öncesi	Hasar sonrası
$E_{11}$ (GPa)	210	0.1	138	138
$E_{22}$ (GPa)	210	0.1	9	0.05
$G_{12}$ (GPa)	75	0.1	6.9	0.02
$\nu_{12}$	0.3	0.5	0.3	0.3
$S_{1T}$ (MPa)	756	915	1448	1448
$S_{1C}$ (MPa)	756	915	1172	1172
$S_{2T}$ (MPa)	756	915	48.3	0
$S_{2C}$ (MPa)	756	915	248	0
$S_{I2}$ (MPa)	550	550	62.1	0

İç basınç yüklemesinin %40’ının metal astar ve %60’nun kompozit kısım tarafından taşınacağı varsayılmaktadır. Metal astarın hasarı elastik bağlamda ve Tsai-Wu kriteri kapsamında değerlendirilmiştir.

## ANALİZLER

### (A) Ağ analizi

Ağ analizinden önce mukavemet yaklaşımla çelik astar kısmın iç basınç yüklemesi  $0.4 \times 46 \text{ MPa} = 18.4 \text{ MPa}$  alınarak ve Tablo 1’deki 34CrMo4 çeliğinin mukavemet değerleriyle, astarın kalınlığı 2.25 mm bulunmuştur.

Ağ analizi yardımıyla basınç tankının kompozit kısmının kalınlığının tespiti yapılmıştır. Kalınlık hesabı hem helisel sarım hem de teğetsel sarım için ayrı ayrı yapılmış olup, klasik katman teorisine de bir ön çalışma zemini hazırlanmıştır.

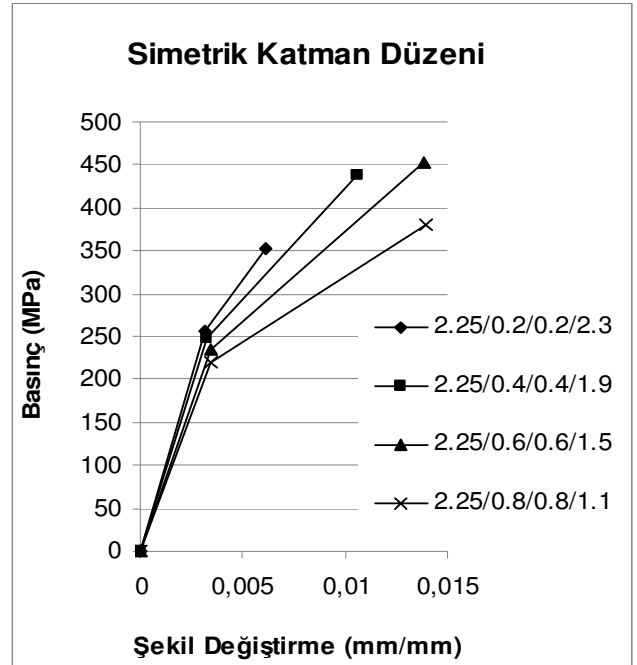
TSE tarafından Tip 3 basınç tanklarında iç gömlek olarak çelik ve kompozit kısım için karbon fiber / epoksi kullanılması durumunda patlama basıncı değeri 460MPa olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda belirlenen iç basıncın %60’nun kompozit kısım tarafından taşındığı kabul edilerek,  $d_{i \text{ astar}} = 214 \text{ mm}$ ,  $\alpha = \pm 20^\circ$  helis sarım ve teğetsel sarıma sahip AS-3501 Karbon / Epoksi kompozit malzemesi için ağ analizi yardımıyla kompozit kısmın helisel ve teğetsel sarım için kalınlık değerleri Tablo 2.’de verilmiştir.

Tablo 2. Ağ analizi ile kompozit kalınlığı.

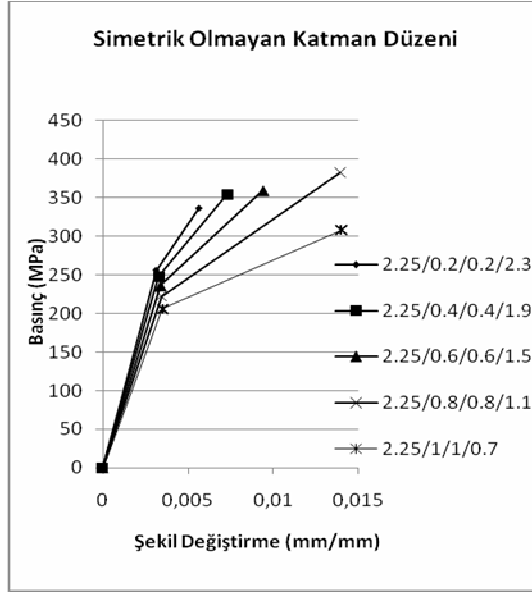
AS-3501 Karbon / Epoksi	t (mm)
Helisel	1.2
Teğetsel	1.5
Toplam	2.7

### (B) Simetrik ve simetrik olmayan katman düzenleri için Kompozit Levha teorisi analizi

Kompozit levha teorisi parametrik olarak Microsoft Excel’de programlanmıştır. Bu program kullanılarak, patlama basıncı ve teğetsel şekil değiştirmeler, simetrik ve simetrik olmayan levha durumları için kendi içerisinde toplam kompozit kalınlığı değişmeyecek şekilde helisel ve teğetsel kalınlıkların birbirleri arasında kalınlık değişimi yapılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalara ağ analizinde bulunan kalınlık değerleri temel teşkil etmiştir. Böylelikle ağ analizi ile Kompozit levha teorisi arasında da bir karşılaştırma imkânı sağlanmıştır. Hesaplanan patlama basıncı ve teğetsel şekil değiştirme değerleri simetrik durum için Şekil 9’da ve simetrik olmayan durum için Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 9. Simetrik katman düzeninde metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının basınç ve şekil değiştirmeleri.



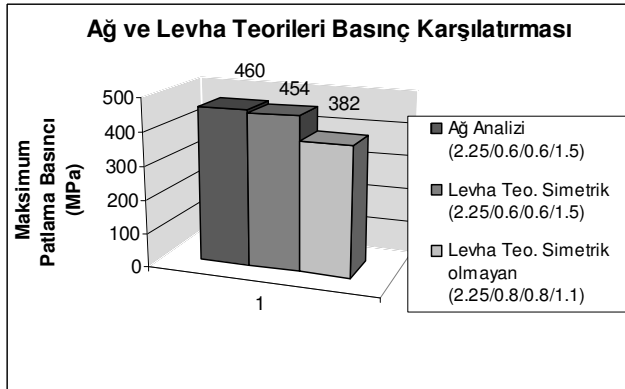
Şekil 10. Simetrik olmayan katman düzeninde metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının basınç ve şekil değiştirmeleri

Hesaplamalarda simetrik katman düzeninde maksimum patlama basıncı Şekil 9'da görüldüğü gibi 454MPa değerinde olup 2.25 mm metal astar 1.2 mm helisel sarım ve 1.5 mm teğetsel sarım [2.25/0.6/0.6/1.5] düzeninde elde edilmiştir.

Simetrik olmayan katman düzeninde maksimum patlama basıncı Şekil 10'da görüldüğü gibi 382MPa değerinde olup 2 mm metal astar 1.6 mm helisel sarım ve 1.1 mm teğetsel sarım [2.25/0.8/0.8/1.1] düzeninde elde edilmiştir.

## KARŞILAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

### (A) Ağ Analizi ve Kompozit Levha teorisiyle Patlama Basıncı Karşılaştırılması

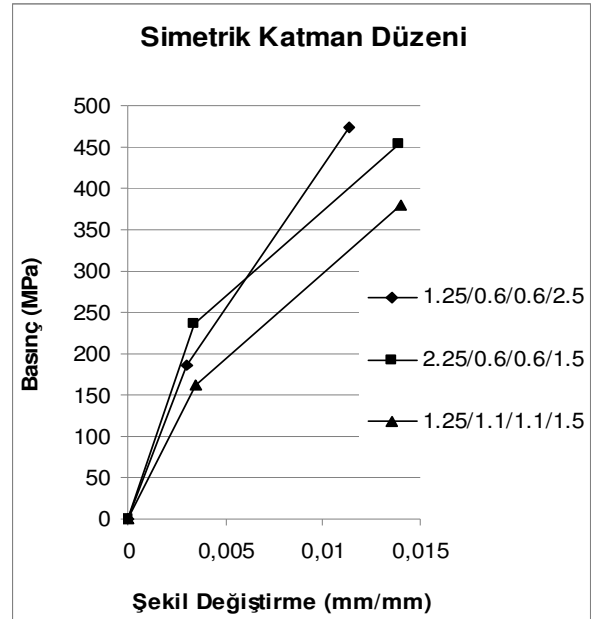


Şekil 11. Maksimum patlama basıncı karşılaştırması.

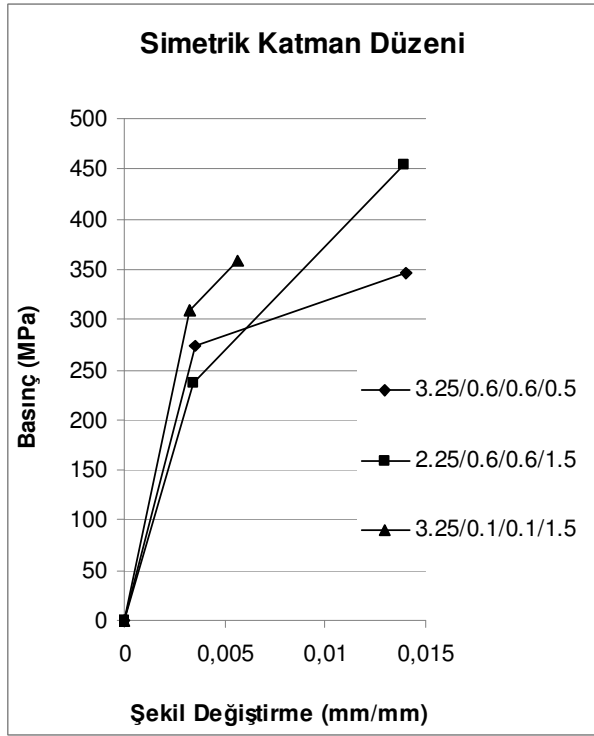
Ağ analizi ve katman teorisinin simetrik ve simetrik olmayan katman düzenleri için maksimum basınç değerleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Ağ analizi ile simetrik plaka düzenine sahip katman teorisi verileri birbirine oldukça yakın çıkmış ancak simetrik olmayan plaka düzenine ait patlama basıncı diğer değerlerden daha düşük çıkmıştır. Bu beklenen bir durum olup, simetrik olmayan plaka düzenine sahip katman teorisinin hesaplama temelinde burulma ve eğilme momentlerinin ihmal edilmemesi; diğerlerinde ise ihmal edilmesi durumundan kaynaklanmaktadır.

### (B) Simetrik ve simetrik olmayan düzende metal astar ve kompozit katman kalınlıkları arasındaki oranın patlama basıncına etkisinin karşılaştırılması

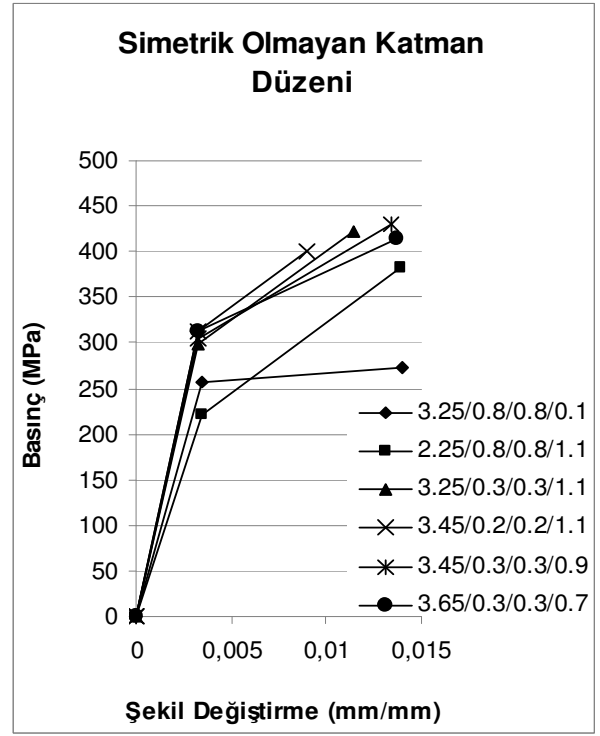
Toplam basınç tankı cidar kalınlığı değişmeyecek şekilde metal astar ile kompozit katman kalınlıkları arasında 1 mm'lik bir artırım ve azaltım yapılarak hem simetrik hem de simetrik olmayan durumlar için patlama basınçları karşılaştırılmıştır. Simetrik katman durumu için metal astarın kalınlığının 1 mm azaltılmasının patlama basıncına etkisi Şekil 12'de, metal astarın kalınlığının 1 mm artırılmasının patlama basıncına etkisi Şekil 13'te gösterilmiştir. Aynı şekilde simetrik olmayan katman durumu için metal astarın kalınlığının 1 mm azaltılmasının patlama basıncına etkisi Şekil 14'te, metal astarın kalınlığının 1 mm artırılmasının patlama basıncına etkisi Şekil 15'te gösterilmiştir.



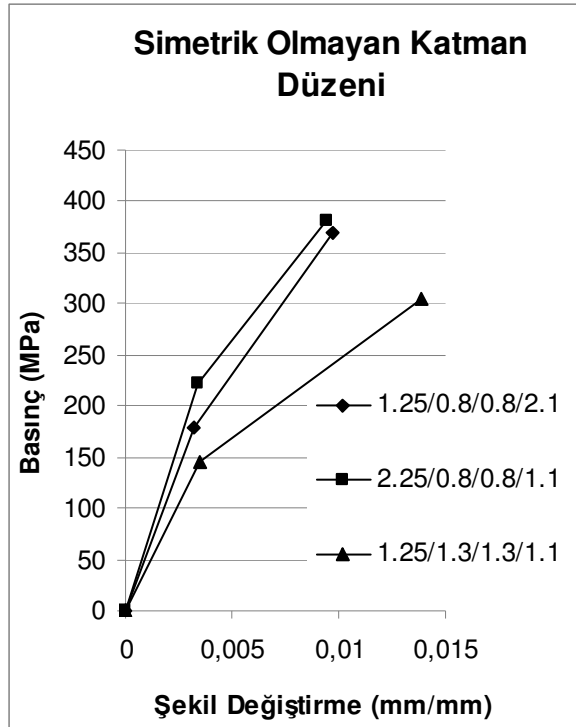
Şekil 12. Simetrik katman düzeninde metal astarın kalınlık azalışının patlama basıncına etkisi.



Şekil 13. Simetrik katman düzeninde metal astarın kalınlık artışının patlama basıncına etkisi



Şekil 15. Simetrik olmayan katman düzeninde metal astarın kalınlık artışının patlama basıncına etkisi



Şekil 14. Simetrik olmayan katman düzeninde metal astarın kalınlık azalışının patlama basıncına etkisi

Şekillerden de anlaşıldığı üzere simetrik katman düzeninde metal astarın kalınlığının artırılması ve kompozit kısmın kalınlığının aynı oranda düşürülmesi basınç tankının maksimum patlama basıncı değerini düşürmektedir. Benzer şekilde kompozit kısmın kalınlığının artırılması ve metal astarın kalınlığının azaltılması ise basınç tankının maksimum patlama basıncı değerini artırmaktadır. Simetrik olmayan katman düzeninde ise metal astarın kalınlığının artırılması ve kompozit kısmın kalınlığının aynı oranda düşürülmesi basınç tankının maksimum patlama basıncı değerini yükseltmekte, kompozit kısmın kalınlığının artırılması ve metal astarın kalınlığının azaltılması basınç tankının maksimum patlama basıncı değerini azaltmaktadır. Her iki durumda, 90°'lik sarım açısındaki katmanın kalınlığının artırılması, ±20°'lik katmanlara göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada ağ analizi ve kompozit levha teorileri kullanılarak çift cidarlı bir kompozit basınç tankının (TIP-3) ön tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hasar kriteri olarak Tsai Wu esas alınmıştır. Tasarımda ilk olarak ağ analizinden elde edilen kompozit katman kalınlıkları temel alınmış ve kompozit levha teorisiyle simetrik ve simetrik olmayan plaka düzenleri için helisel ve teğetsel kısımların birbiri arasındaki kalınlık değişiminin patlama basıncına ve

teğetsel şekil değiştirmelere etkisi incelenmiştir. Hesaplamalarda 28 lt'lik basınç tankı seçilmiş, tankın metal astarı için 34CrMo4 çeliği ve Kompozit kısmı için AS-3501 karbon fiberi ve Epoksi reçinesi kullanılmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki maddelerde verilmiştir:

(1) Ön tasarım, basınç tankının sadece silindirik kısmına yönelik olup, küresel kısımları içermemektedir.

(2) Ağ analizi yaklaşımında matris dikkate alınmamış ve sadece fiber kopmaları hasar olarak kabul edilmiştir.

(3) Kompozit tanklarda helisel ve teğetsel kısımların kalınlıkları arasındaki oransal değişim tankın verimliliğini etkilemektedir.

(4) Benzer şekilde metal astar ile kompozit kısım arasındaki kalınlık değişimi teğetsel katmanlar bağlamında iyi sonuçlar vermektedir.

Basınç tankının küresel kısımlarını da içerecek şekilde bir sonlu eleman sayısal analizinin yapılması ve çıkan sonuçların analitik sonuçlarla karşılaştırılması bir sonraki çalışmanın konusunu teşkil etmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] "Gaz tüpleri – Yüksek Basıncılı – Motorlu Taşıtlarda Yakıt Olarak Kullanılan Doğal Gazın Depolanması İçin" TS EN ISO 11439, ICS 23.060.30;43.060.40
- [2] T. Y. Kam, Y. W. Liu & E T. Lee, "First-ply failure strength of laminated composite pressure vessels" Composite Structures Vol. 38, No. 1-4, pp. 65-70
- [3] J. M. Lifshitz, H. Dayan, "Filament-wound pressure vessel with thick metal liner" Composite Structures, 32 (1995) 313–323
- [4] Hisao Fukunaga and Masuji Uemura, "Optimum Design of Helically Wound Composite Pressure Vessels" Composite Structures 1 (1983) 31-49
- [5] M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, "Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure", Composite Structures 53 (2001) 483-491
- [6] R.R. Chang, "Experimental and theoretical analyses of first-ply failure of laminated composite pressure vessels" Composite Structures 49 (2000) 237-243
- [7] B. Balya, "Design And Analysis Of Filament Wound Composite Tubes" ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Ankara 2004.
- [8] A. Önder, "First Failure Pressure of Composite Pressure Vessels", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İZMİR, Şubat 2007.

[9] Mark J. Warner, David J. Son, George A. Berkley ve Andrew C. Haaland, "Development and Certification of Two-cell Conformable CNG and Compressed Hydrogen Tanks", American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2001.

[10] Mil-Hdbk-17-3E, DOD Coordination Working Draft, 1998.

[11] Cho-Chung Liang, Hung-Wen Chen, Cheng-Huan Wang "Optimum Design Of Dome Contour For Filament-Wound Composite Pressure Vessels Based On A Shape Factor" Composite Structures, 58 (2002) 469–482

[12] L. P. Kollar, George S. Springer, "Mechanics of Composite Structures", Cambridge University Press 2003

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

[14] Mark E. Tuttle, "Structural Analysis of Polymeric Composite Materials", Marcel Dekker, Inc. 2004

[15] Jones RM. Mechanics of composite materials. McGRAW-Hill, Co.; 1975.