

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**DİKİŞSİZ METAL ASTARLI VE KOMPOZİT
SARGILI BASINÇ TANKI TASARIMI**

Barış KALAYCIOĞLU

HAZİRAN 2010

Makine Anabilim Dalında Barış KALAYCIOĞLU tarafından hazırlanan DİKİŞSİZ METAL ASTARLI VE KOMPOZİT SARGILI BASINÇ TANKI TASARIMI adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin Doktora Tezi olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Veli ÇELİK _____

Üye (Danışman) : Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU _____

Üye : Doç. Dr. Necip CAMUŞCU _____

Üye : Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ _____

Üye : Doç. Dr. Sadettin ORHAN _____

22 / 06 / 2010

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

DİKİŞSİZ METAL ASTARLI VE KOMPOZİT SARGILI BASINÇ TANKI TASARIMI

KALAYCIOĞLU, Barış

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Haziran 2010, 77 sayfa

Bu çalışmada ülkemizde hali hazırda üretilmeyen ve *ISO 11439:2000* tarafından *Tip III* olarak isimlendirilen dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan basınç tankının endüstriyel ihtiyaca yönelik olarak 3 Litrelik sıvı hacminde, *6061-T6 Alüminyum* malzemeden üretilmiş metal astar ve *Kevlar®-49/Epoksi (Vf=%60)* kompozit sargı için *500 Bar* ve üzeri bir iç basınca dayanabilmesi sağlanmıştır. İlgili standarda göre servis çalışma basıncı *en az 220 Bar*'dır. Tank tasarımında ağ analizi ve katman teorisi yardımıyla tankın ön tasarım parametreleri belirlenmiş ve bu veriler ışığında geometrideki karmaşıklıkları da hesaba katabilen *Ansys®* Sonlu Eleman Programında kompozit basınç tankı sayısal olarak modellenmiştir. Modellemede kompozit katmanın elyaf sarım açılarını doğru şekilde tanımlayabilmek için eleman koordinat sisteminin uygun şekilde yönlendirilmesi sağlanmıştır. Basınç tankının hasar analizinde *elyaf hasar dayanımı dikkate alınmış* ve *Tsai Wu hasar Kriteri*'nden yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, *ISO 14439:2000* standardının şartlarının sağlanması için, basınç tankının 4.5 mm cidar kalınlığında metal astar ile 0.9 mm helisel ve 1.8 mm teğetsel olmak üzere toplam 2.6 mm kompozit cidar kalınlığında ve $[90^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, 90^\circ]$ elyaf açısı düzenine sahip olması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınç Tankı, Yüksek Basınç, Kompozit

ABSTRACT

DESIGN OF A METAL LINED AND FULLY WRAPPED COMPOSITE PRESSURE VESSEL

KALAYCIOĞLU, Barış

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. M. Hüsnü DİRİKOLU

June 2010, 77 pages

In this study, a metal-lined and fully-wrapped composite pressure vessel, which could not be manufactured in Turkey at present and named as *Type III* composite pressure vessel by ISO 11439:2000 was designed. The pressure vessel in question was designed to have 3 liters water volume. The material of the metal liner is assumed as 6061 T6 Aluminum. To withstand an internal burst pressure of 500 or more Bars, the metal liner is filament wound by Kevlar® 49-Epoxy ($V_f=60\%$) composite. According to the related standards, the required service pressure should be at least 220 Bars. This vessel design, with the help of the netting analysis and lamination theory, pre-parameters of the vessel was determined and in the light of the obtained data, the vessel was modeled numerically with Ansys® Finite Element Program which can also account for complexities in geometry and material modeling. In order to define the fiber winding angle accurately, convenient orientation of the elements coordinates was provided. In the failure analysis of the pressure vessel *both the last ply* and *Tsai Wu failure criteria* was used. In the light of the analysis, it is determined that in order to meet the standards of ISO 11439:2000, the pressure vessel should have a metal liner with 4.5 mm wall thickness; and a total composite wall thickness of 2.6 mm consisting of 0.9 mm helical and 1.8 mm tangential windings, and winding angles of $[90^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, 90^\circ]$.

Key Words: Pressure Vessel, High Pressure, Composite

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması esnasında bilgi ve tecrubesini esirgemeyen, sabırla tezin her aşamasında büyük emek harcamıő olan tez yöneticisi, hocam sayın Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU Bey'e, değerli destek ve yardımlarını sakınmayan saygı değer hocam Mühendislik Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK Bey'e, Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Ali ERİŞEN Bey'e, bölümümdeki değerli hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca en içten ilgi, alaka ve yardımlarını esirgemeyen, en zor günlerimde her zaman yanımda olan eőime ve oğluma, hayatımın her anında maddi ve manevi her türlü desteği vermekten kaçınmayan babam, annem ve kardeőime, őükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Alüminyum Astarlı Kompozit Basınç Tankı	1
1.2. Kompozit Malzemeler	2
1.2.1. Elyaf Malzemesi.....	3
1.2.2. Matris Malzemesi.....	4
1.2.2.1. Termoset Matrisler	4
1.2.2.2. Termoplastik Matrisler.....	5
1.3. Flaman Sargı Metodu.....	6
1.3.1. Sarım İşlemi	7
1.3.2. Malafalar	9
1.3.3. Sarım Kontrol Parametreleri	9
1.4. Kompozit Basınç Tankları ile ilgili Çalışmalar	10
1.5. Tezin Amaç ve Kapsamı	16
2. TEORİK ÇALIŞMALAR	18
2.1. Giriş	18
2.2. Metal Astarın Tasarımı	18

2.2.1. Metal Astarın Boyut ve Malzeme Özellikleri	19
2.2.2. İç Basınca Maruz İnce Cidarlı Basınç Kaplarında Düzlem Gerilme Durumu	21
2.2.3. Sonlu Eleman Analizi	22
2.2.3.1. Bilgisayar Modelinin Oluşturulması.....	22
2.3. Kompozit Kısımın Analitik Tasarımı	24
2.3.1. Ağ Analizi	24
2.3.2. Klasik Katman Teorisi	28
2.3.2.1. Simetrik Katman Düzeni.....	30
2.3.2.2. Antisimetrik Katman Durumu	30
2.3.2.3. Simetrik Olmayan Katman Durumu	31
2.3.2.4. Çok Katmanlı Plakanın Tek Katmanındaki Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi	31
2.3.2.5. Kirchhoff Hipotezi	32
2.3.2.6. Çok Katmanlı Kompozit Plakalarda Kuvvet Moment Etkisi.....	33
2.3.3. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri	38
2.3.3.1. Maksimum Gerilme Kriteri.....	40
2.3.3.2. Maksimum Gerinim Kriteri	40
2.3.3.3. Tsai-Hill Kriteri.....	40
2.3.3.4. Tsai-Wu Kriteri	41
2.3.4. Kompozitlerde Hasar Tespiti	42
2.3.4.1. İlk Katman Hasarı	42
2.3.4.2. Elyaf Hasarı.....	42
2.4. Kompozit Tankın Sonlu Eleman Analizi.....	46
2.4.1. Kompozit Basınç Tankının Modellenmesi.....	47

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
3.1. Metal Astarın Hidrolik Basınç Patlatma Deneyi	51
3.1.1. Alüminyum Astarın Üretimi	51
3.1.2. Deney Ekipmanları.....	54
4. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	55
4.1. Metal Astar Kısmına Ait Tasarım Sonuçları	51
4.2. :Metal Astarlı Kompozit Basınç Tankının Tasarım Sonuçları	57
4.2.1. Ağ Analizi ile Ön Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi.....	58
4.2.2. Analitik Analizlerin İrdelenmesi.....	59
4.2.2.1. Maksimum Patlama Basıncına Göre Optimum Helisel Sarım Açısının Belirlenmesi.....	59
4.2.3. Sayısal Analizlerin İrdelenmesi	62
4.2.3.1. Teğetsel Sarımın Patlama Basıncına Etkisi	64
4.2.3.2. İlave Bir Helisel Katmanın Patlama Basıncına Etkisi	66
4.2.3.3. Element Koordinat Sistemi Oryantasyonunun Gerilme Hesaplamalarına Etkisi.....	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
1.6. Alüminyum Astarlı Kompozit Basınç Tankı: 1) Dikişsiz metal astar, 2) Yüksek mukavemetli kompozit tabaka, 3) Pürüzsüz ve korozyona dayanıklı iç yüzey kaplaması ve 4) Hassas işlenmiş dış.....	2
1.7. Elyaf takviyeli kompozit tipleri ⁽²⁾	3
1.8. Bazı matris malzemelerinin çekme dayanımları (MPa) ⁽⁵⁾	5
1.9. Bazı termoset matris malzemelerinin fırınlama sonrası % çekme değerleri (MPa) ⁽⁵⁾	5
1.10. Bazı matris malzemelerinin maksimum kullanılabilme sıcaklıkları (C°) ⁽⁵⁾	6
1.11. Elyaf Sarım Açısı.....	7
1.12. Kutupsal sarım	7
1.13. Flaman sarım makinesi ile helisel sarım.....	8
1.14. Teğetsel sarım	8
2.1. 6061-T6 alüminyum tanka ait çekme numunesi.....	20
2.2. 6061-T6 alüminyumunun gerilme-şekil değiştirme eğrisi	20
2.3. Basınç tank yüzeyinde gerilme durumu	21
2.4. SOLID45 SEM elemanı.....	22
2.5. Alüminyum astarın SEM SOLID45 ağı	23
2.6. Modelin sınır şartları ve yüklemeleri.....	23
2.7. Helisel sarımlı elyaf malzemenin aksenal yük durumu	25
2.8. Helisel sarımlı elyaf malzemenin teğetsel yük durumu.....	26
2.9. Hem helisel hem de aksenal sarımlı elyaf malzemenin teğetsel kuvvet durumu ..	27
2.10. Çok katmanlı kompozit plakada referans düzlemi (orta tabaka)	29

2.11. Simetrik çok katmanlı plaka	30
2.12. Antisimetrik çok katmanlı plaka.....	30
2.13. Simetrik olmayan çok katmanlı plaka	31
2.14. Kirchhoff teorisine göre bir düzlem kenarının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri ⁽³⁴⁾	32
2.15. Kompozit plakada x ve y yönlerindeki kuvvet ve momentler ⁽³⁵⁾	34
2.16. N tabakalı kompozit plakanın geometrisi ⁽³⁶⁾	35
2.17. Plakaya gelen aksenal ve kesme kuvvetleri neticesinde plakada oluşan maksimum gerilme ve maksimum gerinim eğrileri.....	39
2.18. Katman katman ve iki adım yaklaşımları ile elyaf hasar yükünün tespiti ⁽³⁹⁾	43
2.19. Kompozit plakanın hasar ilerleme algoritması	44
2.20. Kompozit tankın SEM SHELL99 ağı.....	47
2.21. Tank cidarının katman düzeni ve elyaf yönlenme açıları.....	48
2.22. Tank Elemanlarının EKS'leri yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş mesh durumu.....	49
2.23. Kompozit tankın sınır şartları	49
3.1. Alüminyum astarın geometrisi.....	51
3.2. Derin çekme presinde kalıp içindeki kalın sac.....	52
3.3. Kalın sacın derin çekme presinde çekilmiş hali.....	52
3.4. Sıvama yöntemiyle ağız büzme işlemi.....	53
3.5. Üretimi tamamlanmış alüminyum astar	53
3.6. PLC kontrollü, servo motorlu hidrolik test cihazı.....	54
3.7. Ekipmanları takılmış alüminyum astar	54
4.1. Basınç tankında sayısal analiz sonucunda oluşan Von Mises gerilmeleri.....	56
4.2. Metal astarın patlatma deneyi sonucu hasara uğramış hali	56

4.3. Katman teorisi için hazırlana programın EXCEL ara yüzü.....	57
4.4. $\pm 30^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri	60
4.5. $\pm 25^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri	60
4.6. $\pm 20^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri	60
4.7. $\pm 15^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri	61
4.8. $\pm 10^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri	61
4.9. Farklı helis açılı basınç tankının maksimum patlama basıncı değerleri	61
4.10. Kompozit katmanda elyaf yönünde oluşan gerilmeler	62
4.11. Kompozit katmanda kritik geçiş kesiti	63
4.12. SOKD I'in patlama basıncı grafiği	65
4.13. ÇTKD I'in patlama basıncı grafiği	65
4.14. Teğetsel sarımın patlama basıncına etkisi	66
4.15. SOKD II'in patlama basıncına grafiği	67
4.16. ÇTKD II'nin patlama basıncı grafiği.....	67
4.17. İlave helis katmanının patlama basıncına etkisi	68
4.18. Düzensiz ağ yapısında modelde oluşan gerilmeler.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	<u>Sayfa</u>
2.24. 6061-T6 Alüminyumun alaşım içeriği.....	19
2.25. 6061-T6 Alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri.....	19
2.26. Elyaf hacimsel parçalanma sabiti	28
2.27. Basınç tankının hasar durumuna göre malzeme özellikleri ⁽¹¹⁾	46
2.28. Basınç tankının boyutları.....	50
4.19. Metal astarın farklı metotlara göre patlama basıncı değerleri	55
4.20. Analizi yapılan kompozit tabakanın katman düzenleri	64
4.21. ÇTKD II ile SOKD I için elyaf yönü gerilmelerinin karşılaştırılması	69

SİMGELER DİZİNİ

α	Helis açısı
r	İç yarıçap (mm)
t	Cidar kalınlığı (mm)
p	İç basınç (MPa)
σ_1	Teğetsel gerilme (MPa)
σ_2	Eksenel gerilme (MPa)
σ_f	Elyaf malzemenin çekme gerilmesi (MPa)
t_f	Kompozit sarım kalınlığı (mm)
E_{11}	Plakanın elyaf doğrultusundaki elastisite modülü (GPa)
E_{22}	Plakanın elyafa dik doğrultusundaki elastisite modülü (GPa)
ν_{12}	Plakanın 1-2 düzlemindeki poisson oranı
G_{12}	Plakanın 1-2 düzlemindeki kayma modülü
σ_{11}	Plakada elyaf doğrultusunda oluşan gerilme (MPa)
σ_{22}	Plakada elyaf doğrultusuna dik doğrultuda oluşan gerilme (MPa)
τ_{12}	Plakada oluşan kayma gerilmesi (MPa)
N_x	Birim uzunluktaki eksenel kuvvet (N)
N_H	Birim uzunluktaki teğetsel kuvvet (N)
V_f	Hacimsel parçalanma sabiti
ϵ_x	x yönündeki şekil değiştirme
ϵ_y	y yönündeki şekil değiştirme

ϵ_z	z yönündeki şekil değiştirme
u	x yönündeki yer değiştirme
v	y yönündeki yer değiştirme
w	z yönündeki yer değiştirme
u^0	x yönündeki orta tabaka yer değiştirme (mm)
v^0	y yönündeki orta tabaka yer değiştirme (mm)
w^0	z yönündeki orta tabaka yer değiştirme (mm)
γ_{xy}	Kayma gerinimi
K_x	x düzlemi orta tabaka eğriliği
K_y	y düzlemi orta tabaka eğriliği
K_{xy}	xy düzlemi orta tabaka eğriliği
N	Kompozit plakaya gelen birim uzunluktaki normal kuvveti (N)
M	Kompozit plakaya gelen birim uzunluktaki normal momenti (Nm)
A_{ij}	Eksenel kuvvetler için uzama rijitlik matrisi.
B_{ij}	Hem eksenel hem de moment kuvvetleri için çarpılma (coupling) rijitlik matrisi.
D_{ij}	Moment kuvvetleri için eğilme rijitlik matrisi
$S_L^{(-)}$	Plakanın elyaf doğrultusundaki basma dayanımı (MPa)
$S_L^{(+)}$	Plakanın elyaf doğrultusundaki çekme dayanımı (MPa)
$S_T^{(-)}$	Plakanın elyafa dik doğrultusundaki basma dayanımı (MPa)
$S_T^{(+)}$	Plakanın elyafa dik doğrultusundaki çekme dayanımı (MPa)
S_{LT}	Plakanın kayamdaki dayanımı (MPa)
e_L	Plakanın elyaf doğrultusundaki şekil değiştirme sınırı

e_T Plakanın elyafa dik doğrultusundaki şekil değiştirme sınırı

f_d Deneyimsel azaltma faktörü

KISALTMALAR

PI	Polyamit
PEEK	Polyether Ether Ketone
PPS	Polyphenylene Sulfine
TS	Türk Standardı
ISO	Uluslararası Standartlar Kuruluşu
MISO	Multilinear Isotropic
İKH	İlk Katman Hasarı
SKH	Son Katman Hasarı
EH	Elyaf Hasarı
EKS	Element Koordinat Sistemi
SEM	Sonlu Eleman Modeli
SOKD	Simetrik Olmayan Katman Düzeni
ÇTKD	Çift Teğetsel Katman Düzeni

1. GİRİŞ

Yüksek basınç altındaki gazların saklanması ve taşınması son yıllarda büyük önem arz etmektedir. Tankların yüksek basınçtan dolayı yüksek dayanıma sahip olması kadar taşınabilme kolaylığı açısından da hafif olması istenmektedir. Bu durum yüksek basınç altındaki tankların tasarımında kompozit malzemelerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Kompozit malzemeler düşük özgül ağırlığa karşılık yüksek mukavemet ve korozyona dayanıklılığı, iyi şekillene bilme özelliği ve yorulmaya karşı iyi dayanımı nedeniyle günümüzde metallere nazaran daha fazla tercih edilmektedir.

Doğalgaz'ın sıkıştırılmış olarak otomobillerde kullanılabilmesi için gerekli donanımlar içerisinde ülkemizde üretilmeyen tek ürün ISO 11439:2000 tarafından Tip III olarak isimlendirilen dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankıdır (1). Ülkemizde sıkıştırılmış doğal gazın kullanıldığı göreceli olarak birçok araçta, ithal edilen tanklar kullanılmaktadır. Bu çalışmada sıkıştırılmış doğal gazın depolanması konusundaki dar boğazı aşmak üzere “Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Basınç Tankı” imalata hazır hale getirilecek şekilde tasarımının yapılması amaçlanmıştır.

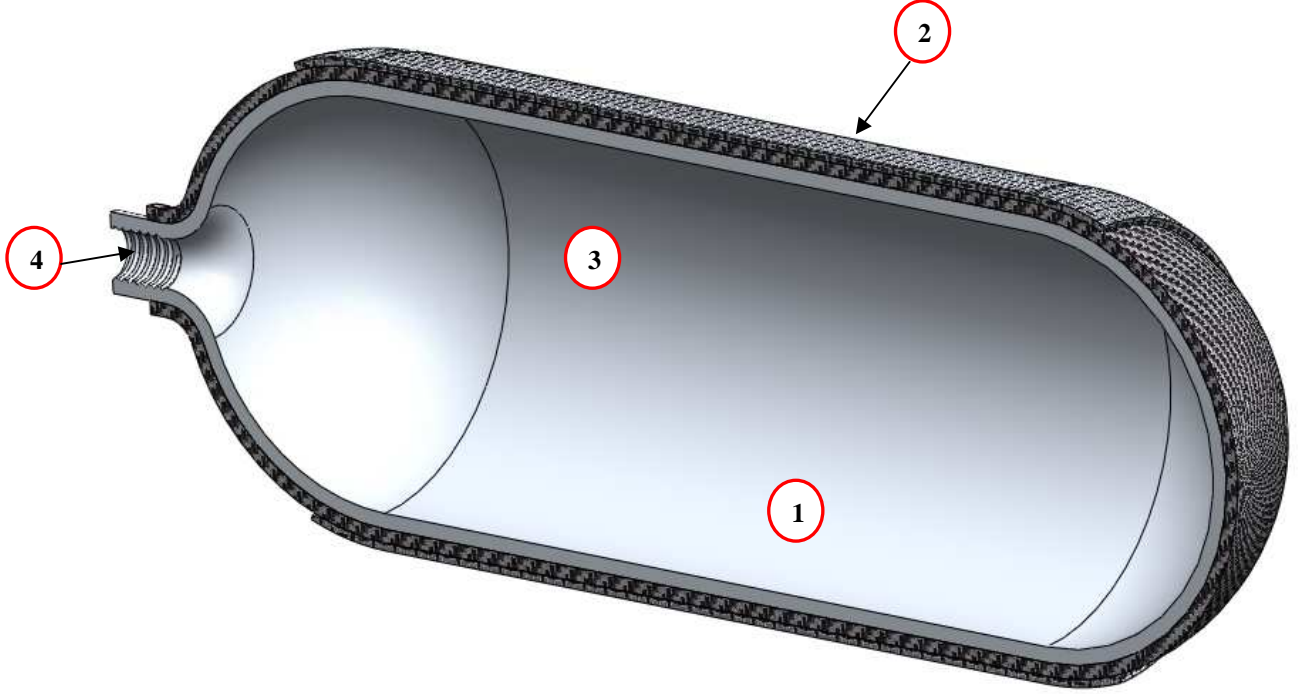
Tankın tasarımında uygun metal ve kompozit malzemelerin seçimi öncelikle yapılacaktır. Sonra ağ analizi ve katman teorisi yardımıyla tankın ön tasarım parametreleri belirlenecek ve bu veriler ışığında Ansys® Sonlu Eleman Programında kompozit basınç tankı sayısal olarak modellenenecektir.

Tasarımı düşünülen basınç tankının bilimsel çalışmaları doğrulayacak nitelikte olmasına yönelik olarak ~3 litrelik hacimde ve 500 Bar ve üzeri bir iç basınca dayanabilmesi hedeflenmektedir. ISO 11439:2000 standardına göre servis çalışma basıncı 220 Bar'dan düşük olmamalıdır.

1.1. Alüminyum Astarlı Kompozit Basınç Tankı

Tezin konusunu teşkil eden Tip III basınç tankı Şekil 1.1.'de de görüldüğü gibi iç kısımda dikişsiz olarak üretilmiş metal astar üzerine tamamen kompozit sarılarak

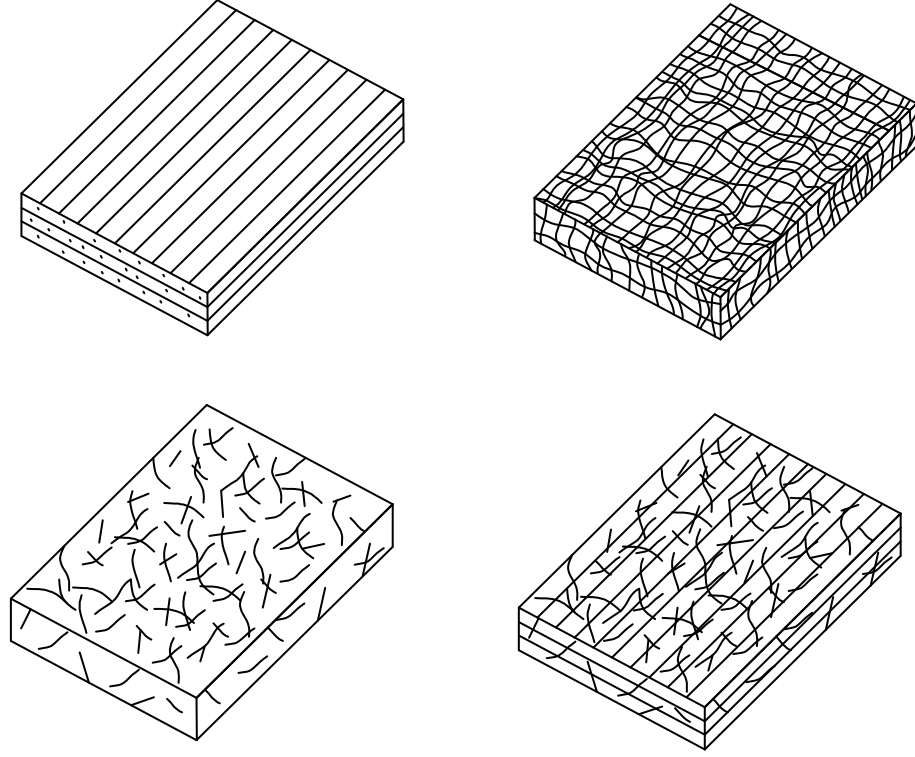
üretilmektedir. Tankın iç yüzeyi pürüzsüz ve korozyona dayanıklı olarak kaplanmakta, ağız kısmına hassas işlenmiş diş açılmaktadır.



Şekil 1.1. Alüminyum Astarlı Kompozit Basınç Tankı: 1) Dikişsiz metal astar, 2) Yüksek mukavemetli kompozit tabaka, 3) Pürüzsüz ve korozyona dayanıklı iç yüzey kaplaması ve 4) Hassas işlenmiş diş.

1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler takviye ve matris malzeme olarak da bilinen iki veya daha fazla malzemenin makroskopik yapıda birleştirilmesinden meydana gelir ve birleşen malzemelerin özelliklerinden farklı bir özelliğe sahiptir. Kompozitlerde takviye malzemesi olarak en bilinen malzeme elyaftır. Elyaf malzemesine göre kompozit malzemeler sürekli, kesikli, örgülü ve hibrit şeklinde sınıflandırılır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Elyaf takviyeli kompozit tipleri (2).

1.2.1. Elyaf Malzemesi

Elyaf malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini belirleyen bileşenidir. Elyaf malzemesinin tipi, elyafın matris malzemesiyle hacimsel oranı, sarım açısı ve kompozit malzemenin elyafa göre yapılış şekli kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini direk etkiler (2). Endüstride karbon elyaf, cam elyaf ve kevlar® elyafı en çok bilinen elyaflardır.

Cam elyafı diğer elyaflar arasında en ucuz olan buna mukabil sanayide en sık kullanılan elyaftır. Dayanımı ve rijitliği (katılığı) iyi olmakla birlikte darbelere karşı direnci çok iyi değildir.

Karbon elyafı dayanımı ve katılığı diğer elyaflar içerisinde en yüksek olan elyaftır. Yorulma yüklerine karşı dayanımı oldukça yüksek fakat darbeli yüklere karşı dayanımı azdır. Isıl genişleme katsayısı düşüktür. Karbon elyafı diğer elyaflar arasında en pahalı elyaftır.

Aramid olarak da bilinen Kevlar49® elyafı yüksek dayanıma ve düşük yoğunluğa

sahiptir. Darbe yüklerine ve sıcaklığa karşı dayanımı yüksek olmakla beraber düşük ısıl genleşme katsayısına sahiptir. Ayrıca Kevlar49® elyafının maliyeti Karbon elyafına göre oldukça uygundur (3).

1.2.2. Matris Malzemesi

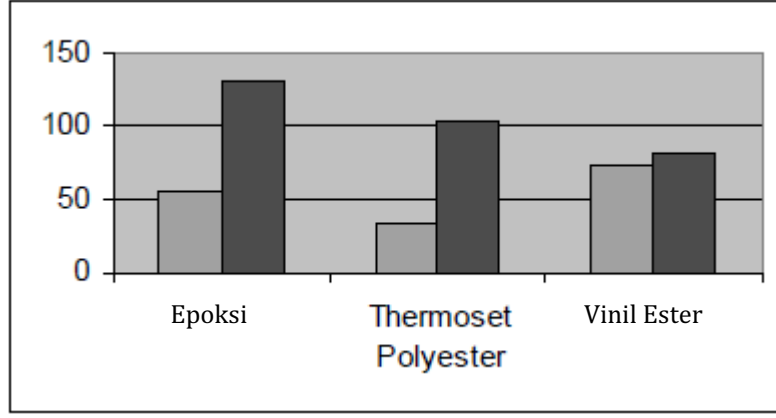
Matris malzemesi plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerinde önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir diğer amacı da elyaf malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü elyaflar arasında homojen olarak dağıtmaktır. Sanayide matris malzemesi olarak polimerler, metaller ve seramikler kullanılmaktadır.

Bunların içinde polimerler modern kompozitlerde sorunsuz olarak en çok kullanılan matris malzemeleridir. Polimerler yapı ve davranışlarına göre kendi içinde Termosetler ve Termoplastik olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar (4).

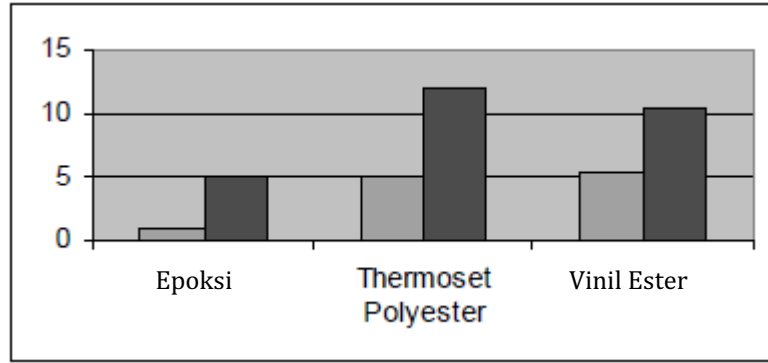
1.2.2.1. Termoset Matrisler

Termoset matrisler kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyetlerinden dolayı en çok tercih edilen matris türüdür. Termoset matrisler düşük viskoziteye sahiptirler. Bu durum elyaflar ile kusursuz birleşme ve yüksek hızlarda işlem yapabilmeyi sağlar. En iyi bilinen termoset matrisler polyeester, vinil ester, epoksi ve fenoliklidir.

Termosetler içerisinde epoksiler yüksek mekanik özellikleri ve korozyona dayanımlarından dolayı en çok tercih edilen matris malzemesidir (Şekil 1.3). Epoksiler fırınlama sonrası diğer matrislerden daha az çekerler ve ısı ve sudan daha az etkilenirler. Epoksilerin fırınlama sonrası çekme paylarının düşük olması Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Bazı matris malzemelerinin çekme dayanımları (MPa) (5).

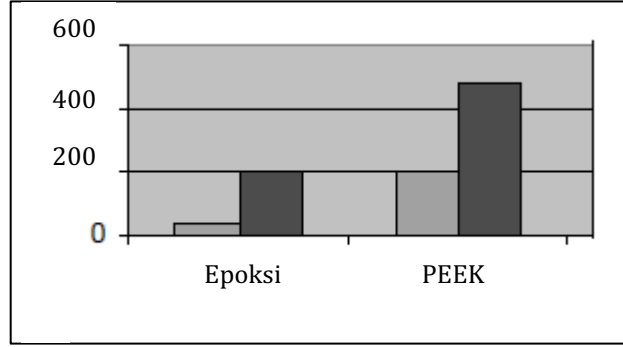


Şekil 1.4. Bazı termoset matris malzemelerinin fırınlama sonrası % çekme değerleri (MPa) (5).

1.2.2.2. Termoplastik Matrisler

Termoplastik matrisler yüksek çekme dayanımına ve yüksek uzama kabiliyetine sahiptir. En iyi bilinen termoplastik matrisler polyamid (PI), polyether ether ketone (PEEK) ve polyphenylene sulfine (PPS) dir. Termoplastik kompozit malzemelerin uygulanması esnasında matris malzemesinde herhangi bir kimyasal değişim olmaz. Ancak matris malzemesi uygulama esnasında ısıtılarak sert halden yumuşak hale getirilir ve bu sayede kolay bir uygulama gerçekleştirilir. İşlem bittikten sonra matris malzemesi eski sert halini alır. Termoplastikler işlem sırasında yüksek viskositeye sahiptirler. Bu durum onların işlemlerini zorlaştırır. Termoplastik matrislerin diğer matrislere göre üstün olan önemli bir özelliği ısıl kabiliyetleridir. Bu matrisler içinde polyether ether ketone (PEEK) nin yumuşama sıcaklığı 350 C°

kadar çıkmakta ve 450 C°'ye kadar kullanılabilirliğini kaybetmemektedir. Bu yüzden sıcaklığın etkili olduğu yapılarda Şekil 1.5'te gösterildiği üzere termoplastik matrisli kompozit malzemeler termoset matrisli kompozit malzemelere üstünlük sağlamaktadır.

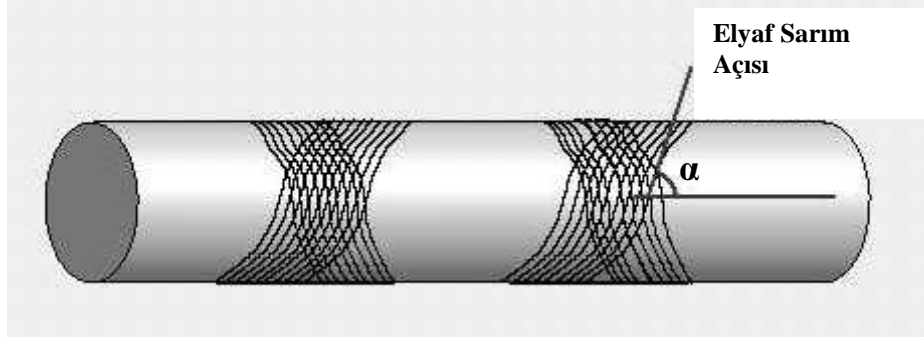


Şekil 1.5. Bazı matris malzemelerinin maksimum kullanılabilir sıcaklıkları (C°) (5)

1.3. Flaman Sargı Metodu

Filaman sarım tekniği kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan ve bilinen en verimli yöntemlerden biridir. Günümüzde filaman sarım tekniği depolama tankları, uçak, helikopter, yel değirmeni palleri, roket namlu boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pinomatik-hidrolik silindri ler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (6).

Tasarımları özel olarak yapılmış sargı makineleriyle kafa ve malafa dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan desenlerin bütün malafayı kaplaması halinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açısı malafa eksenine dik doğrultu arasındaki açı olup 4 ve üzeri eksene sahip CNC Flaman Sarım tezgâhlarında 15° ile 90° ve arasındaki açılarda sarım gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Elyaf Sarım Açısı.

Genellikle elyaflar arasındaki matris malzemesi termoset matris malzemesi seçilir. Yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda, matris malzemesi sarım esnasında uygulanır. Alternatif yöntem olan kuru sarımda ise, önceden matrise emdirilmiş, “prepreg” elyaf/matris sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanır. Üretim işlemi malafanın çıkarılmasıyla tamamlanır. Gerekli durumlarda parça üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilir (6).

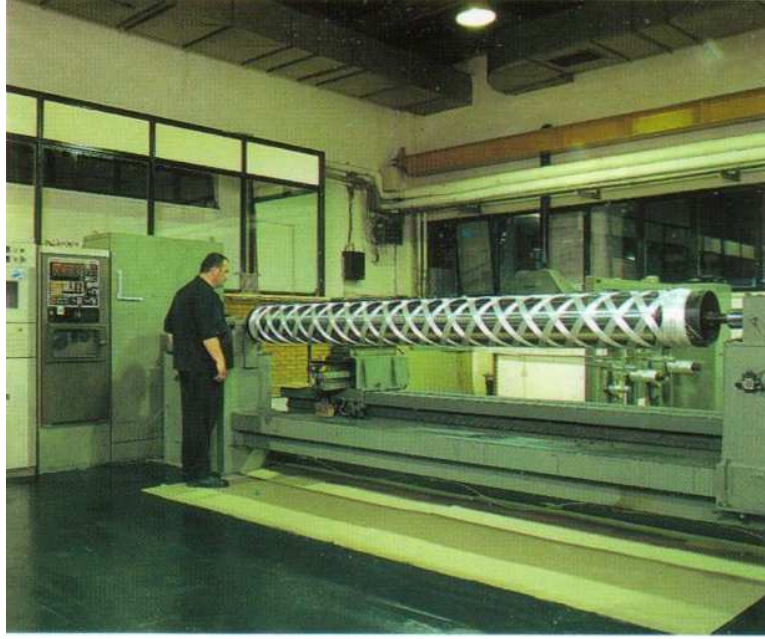
1.3.1. Sarım İşlemi

Sarım işlemi, kutupsal, helisel ve teğetsel olmak üzere üç temel gruba ayrılır. Her yöntem değişik bir sargı ortaya çıkarır. Flaman sarım tezgâhlarında temel yaklaşım malafa dönerken elyaf besleme kafası ileri geri hareket eder. Malafa dönüş hızı ile kafa hızı ayarlanarak istenilen sarım açısı elde edilir. Elyaf bantları birbirine bitişik olarak sarılır ve bir katman artı ve eksi iki ayrı kattan meydana gelir. Kutupsal sarım helis sarıma göre düşük açılı bir sarım şeklidir. Bu sarımda malafa 1 devir yapmadan elyaf besleme kafası bir uçtan bir uca geçişini tamamlamış olur.(Şekil 1.7.)



Şekil 1.7. Kutupsal sarım.

Helisel sarımda ise elyaf besleme kafası bir uçtan bir uca geçene kadar malafa birden fazla dönüş yapmalıdır.(Şekil 1.8)



Şekil 1.8. CNC Flaman sarım makinesi ile helisel sarım.

Teğetsel sarım veya çevresel sarımda, sarım açısı 90° ye çok yakın olduğundan malafanın her devri sonunda araba bir bant genişliği kadar ilerler. Araba hareketini tamamladığında malafa yüzeyi elyafla kaplanarak tek kat meydana gelir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Teğetsel sarım.

Sarım parametreleri basit makinelerde deneme yanılma yöntemi ile ayarlanır. Bilgisayar destekli makinelerde ise parametreler hesaplanarak bilgisayara girilir.

1.3.2. Malafalar

Açık uçlu silindirik konik şekilli yapılar için kullanılan, çoğunlukla çelik ve alüminyum alaşımlarından üretilen malafaların tasarımları basittir. Uçların kapalı olması gereken hallerde, örneğin basınçlı kaplarda, malafa tasarımı ve uygun malzemenin seçimi çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Yapılan tasarım parçanın malafadan çıkarılması sırasında meydana gelebilecek hasarları ve kalıntı gerilmeleri asgariye indirebilecek şekilde olmalıdır. Malafa kendi ağırlığından ve sarım gerilmelerinden etkilenerek deforme olmamalıdır. Ayrıca malafanın yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen fırınlama sırasında yeterli dayanıma sahip olması ve fırınlama işleminden sonra kolayca çıkarılabilmesi çok önemlidir. Genel olarak malafalar iki ana grupta incelenebilir. Bunlar; metal alaşımlarından yapılan ve çıkartıldıktan sonra defalarca kullanılabilen malafalar, diğer grup ise, köpük, mum gibi malzemelerden yapılan, tahrip edilerek çıkarılıp atılan, her bir kullanım için yeniden üretilmesi gerekli olan malafalardır (7).

1.3.3. Sarım Kontrol Parametreleri

Sarım işleminin esası bobin şeklindeki elyafın malafa üzerine istenen özellikleri verecek şekilde sarılmasıdır. Başarılı bir sarım için, elyaf gerilimi, matris malzemesi yüzdesi, bant genişliği ve katman kalınlığının dikkatli kontrolü gerekir. Ayrıca en uygun değerli mekanik özelliklerin, mamulün uniformluğunun sağlanması ve elyaf hasarının önlenmesi için gereken özen gösterilmelidir. Aşınma ve hasarı önlemek için kuru elyaf demeti matris içine girinceye kadar gerilme asgari düzeyde tutulmalıdır. Matris banyosundan sonra gerilme değeri sarım düzeyine çıkarılır.

Hassas bir sarım için, düzgün bir sarımın yanında bant özelliklerinin iyi kontrolü yani bant kesitinin uniform ve istenen boyutlarda olması gerekir. Uniform bir bant ile sadece mukavemet artmaz ayrıca sabit bir kalınlıkta sağlanabilir. Birim kat kalınlığı, belirli bir bant yoğunluğu (uç sayısı/genişlik) ve elyaf yüzdesi ile hesaplanır. Katman kalınlığı, genellikle üretici firmalarca hazırlanmış grafiklerden belirlenir. Bant yoğunluğu ve elyaf/matris oranının dışında, boşluk miktarı ve malafa üzerindeki

sıkışmada ortalama katman kalınlığını etkiler. Sarım hızı, tezgah ve malzeme tipine göre büyük ölçüde değişmektedir. 100 m/dak kadar sarım hızı olumlu sonuç vermektedir. Hassas sarım için daha düşük hızlar (15~30 m/dak) kullanılmaktadır (8).

1.4. Kompozit Basınç Tankları ile ilgili Çalışmalar

Literatür araştırmalarında kompozit basınç tanklarının tasarım ve analizlerine yönelik birçok akademik çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalar hem deneysel hem de teorik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Araştırmaların çoğunda kompozit basınç tanklarının iyileştirilmesine yönelik deneysel ve teorik çalışmalara yer verilmiştir. Yük durumuna göre üretim parametrelerinin belirlenmesi ve malzeme özelliklerinin tank parametrelerine etkisi çalışmalarda yer almaktadır. Yine bu çalışmaların çoğunda sarım açılarının basınç tankının dayanımına etkisi incelenmiş ve bu konu ile ilgili yenilik çalışmaları yapılmıştır.

Tez konusu ile ilgili ve tez konusuna yardımcı olacak diğer çalışmalara ait özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

Kam (9) kompozit basınç tanklarının dayanımını farklı katman düzenleri için analitik ve deneysel olarak incelemiş ve basınç tankının hasara uğramasında ilk katman hasarının etken olduğunu varsaymıştır. Teorik analizlerde ilk katman hasarına yönelik patlama basıncı sonuçları deneysel olarak elde edilen patlama basıncı sonuçlarının oldukça aşağısında kaldığı görülmüştür. Bundan dolayı ilk katman hasar teorisinin kompozit tankların tasarımı için uygun bir teori olduğu ortaya konulmuştur.

Lifshitz (10) metal astarlı kompozit sargılı basınç tankının iç basınçtan dolayı cidarında oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerini çeşitli katman düzenlerinde ve çeşitli kompozit malzemelerine göre hesaplamışlardır. Ayrıca teorik çalışmaları deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Analizlerde son katman hasar teorisinden faydalanmışlar ve Tsai Wu hasar kriterini kullanmışlardır. Analizler neticesinde

helis sarım açısının düşürülmesinin tankın patlama basıncına olumlu yönde etki yaptığını bulmuşlardır. Teorik çalışmalarla elde edilen maksimum patlama basıncı değerleri deneysel analizler neticesinde bulunan değerlerle uyumluluk göstermiştir. Kompozit basınç tankının teorik çalışmalarında tankın sadece silindirik kısmı dikkate alınmıştır.

Fukunaga (11) roket motorlarında kullanılan helisel kompozit sargılı basınç tankının küresel kısımlarının optimum tasarımını membran teorisi ve ağ analizi yardımıyla gerçekleştirmiştir. Hasar kriteri olarak kompozitle ait hasar kriterinden yararlanılmıştır. Farklı teorilerle elde edilen analiz neticeleri karşılaştırılmıştır.

Xia (12) çok katmanlı flaman sargılı kompozit boruların iç basınç altında farklı sarım düzenlerinde cidarlarında oluşan aksel ve teğetsel gerilmeler ile şekil değiştirmeleri incelemiştir. Uygulanan iç basınca karşı iki farklı helis açısı temelinde oluşturulan farklı cidar düzenlerindeki gerilme durumuna göre en iyi katman düzeninin belirlenmesi için karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca analizlerde aynı katman düzeninde ve yüklemde aksel ve teğetsel gerilmeler arasındaki değişimde incelenmiştir. Oldukça ince cidarlı boruların cidarı boyunca oluşan teğetsel ve aksel gerilme oranı sabittir.

Chang (13) kompozit basınç tanklarının ilk katman hasarına göre deneysel ve teorik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizlerde farklı kompozit malzeme özellikleri kullanmış ve simetrik plaka düzeni esas almıştır. Tank çeper kalınlığının, tank yarıçapıyla olan değişimini ve farklı katman sayılarının iç basınca etkisini incelemiştir. Maksimum rijitlik için simetrik katman düzeninde $[\theta/-\theta/\dots]_s$ optimum açı oryantasyonu araştırılmıştır. Kompozit basınç tankının ilk katman hasar yükü akustik emisyon AMS3 (AE) sistemi kullanılarak bulunmuştur. Deneysel sonuçların irdelenmesi sonucunda ilk katman hasar teorisinin kompozit tank tasarımında verimli sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Balya (14) çalışmasında kombine yükler altındaki filaman sargı tüplerin tasarım ve analiz yapmıştır. Filaman sargı tüplerin çeşitli kombine yükler altındaki davranışının incelenmesi için Sonlu Elemanlar Analiz (SEM) tekniği kullanılmıştır. Filaman sargı tüpler, SEM tekniği kullanılarak tabakalı ortotrop tüpler olarak modellenmiştir.

Tabakalı tüpler üzerinde değişik yüklemeler için çeşitli analizler yapılmış ve tasarım için gerekli veriler elde edilmiştir. Sarım açısı, ortotropluk seviyesi ve yükler arasındaki oran özellikle dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçların optimum sarım açısı, yükler arasındaki optimum oran, ortotropluk seviyesi vb. açılardan literatürde belirtilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, sonlu eleman modelinin değişkenleri, hata kaynakları ve modelleme sırasında yapılan varsayımlar da tartışılmıştır. Sonuç olarak kombine yükler altındaki filaman sargı tüplerin tasarımına yönelik, her bir katmanda oluşan aksel ve teğetsel gerilmeler, katman hasar durumları verilmiştir.

Önder (15) tez çalışmasında, simetrik ve anti-simetrik tabakalı ince cidarlı E-Cam/Epoksi kompozitlerin maksimum patlama basıncındaki en uygun tabaka açılarını araştırmıştır. Çalışmada filaman sarımlı kompozit borular üzerindeki sarım açılarının etkileri ele alınmıştır. Kompozit tüpte oluşan hasarı belirlemek için nümerik çözüm yöntemi Lekhnitskii teorisi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemle hasar basıncı aynı ısı etkisi ile değişik açı oryantasyonlarında hesaplanmıştır. Tsai-Wu hasar kriteri tabakalarda oluşan hasarın kontrolünde uygulanmaktadır. 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.

Velosa (16) yeni kuşak kompozit basınç tankı tasarımına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Tank termoplastik malzemeden yapılmış astar ve tamamı E cam/epoksi ile sarılmış kompozitten meydana gelmiştir. Abaqus 6.5.1 sonlu eleman programında maksimum patlama basıncı kapasitesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Hasar kriteri olarak Tsai Wu ve Von Mises'ten yararlanılmıştır. Uygulanan basınç altında kompozit katmanlarda oluşan hasar durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca teorik olarak tasarımı yapılan tankın deneysel olarak üretimi gerçekleştirilmiş ve patlama testine tabi tutulmuştur. Çalışma neticesinde SEM analizinin kompozit tank tasarımında olumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır. Katmanlarda oluşan gerilmelere bakıldığında teğetsel aksel gerilmelere göre, kayma gerilmelerinin kompozit basınç tankını hasar uğratan gerilmeler olmadığı anlaşılmıştır.

Antunes (17) çelik atsalı ve E cam elyaf / termoplastik matrisli kompozit gaz

tankının sonlu eleman analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizde katman düzenini modellerken çelik ve kompozit malzemeyi kabuk yapıda birlikte incelemişlerdir. Hasar kriteri olarak Tsai Wu ve Von Mises hasar kriterlerinden yararlanılmıştır. Uygulanan basınç altında çelik cidarında ve kompozit katmanlarda oluşan hasar durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca kompozit tankın prototipi üretilmiş ve tasarımı yapılan tankın maksimum patlama basıncı değeri ile prototip tankın patlama basıncı değerleri karşılaştırılmıştır.

Roy (18) kalın kompozit silindirler için basit ve verimli bir dizayn metodu sunmuşlardır. Gerilme analizi, genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirme durumundaki silindirleri göz önünde bulundurarak 3 boyutlu elastisiteye dayanmaktadır. İç ve dış basınç ve eksenel yüke maruz kalan, her iki ucu açık silindirler (borular) ve kapalı silindirler (basınçlı kaplar) için analiz yöntemi verilmiştir. Silindirlerin hasarı, 3 boyutlu bir kuadratik hasar kriteri kullanılarak önceden belirlenmiştir. Hem ince hem de kalın silindirler için, patlama basınçlarını hesaplamak amacıyla indirgenmiş bir model kullanılmıştır ve hesaplanan patlama basınçları, elde edilen deneysel sonuçlar ile çok iyi uyum göstermektedir. Optimum durumdaki çok tabakalı silindirlerde, 3 boyutlu kuadratik kriter en uygun tabaka sıralamasını çok kolay bir şekilde elde etmeye bir imkan tanımaktadır. Tabaka sıralamasının, özellikle kalın silindirlerde, çok kritik olduğu bulunmuştur. Buna ilave olarak, aynı zamanda içten basınca maruz çok tabakalı kapalı silindirlerin dizayn parametreleri ve verimli bir şekilde kullanılabileceği malzeme üzerine çalışılmıştır.

Sayman (19) hidrotermal yüklemeler altındaki ince veya kalın çok tabakalı kompozit silindirler için genel bir gerilme analizi metodu geliştirmiştir. Tabakalar $[0^\circ/90^\circ]_2$, $[30^\circ/-30^\circ]_2$, $[45^\circ/-45^\circ]_2$ ve $[60^\circ/-60^\circ]_2$ elyaf açıları için simetrik veya antisimetrik olarak yönlendirilmişlerdir. Analizler, borunun uçlarının açık kapalı olduğu sınır şartı ile düzlem gerilme durumu dikkate alınarak yapılmıştır. Termal yüklemeler için ise üniform ve parabolik sıcaklık dağılımları seçilmiştir. Bütün integrasyon sabitleri tabakaların normali yönündeki radyal gerilme ve şekil değiştirmelerden bulunmuştur. Hidrotermal özellikler ve diğer mekanik özellikler bir cam elyafi-epoksi kompozit tabaka üzerinde tespit edilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar paket programı vasıtası ile elde edilen sonlu eleman çözümleri, bazı analitik sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında uyum olduğu tespit edilmiştir.

Kamat (20) alüminyum astarlı carbon elyaf / epoksi matrisli kompozit sargılı basınç tankının sonlu eleman analizi Genoa Cobstran programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tankın uç kısımlarının küresel, eliptik ve geodezik geometrilerde olmasının tankın dayanıma etkisi incelenmiştir. Analizlerde tankın kritik bölgesinin geçiş bölgesi olduğu ve kompozit yapının ilk hasarlarının ardından bütünün hasara uğramasının bu bölgede olduğu saptanmıştır.

Akçay (21) Kaynak iç basınç ve uniform termal yükler altında çok katmanlı flaman sargılı kompozit boruların düzlem gerilme durumu için analitik olarak hasar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde farklı konfigürasyonlarda simetrik ve anti simetrik katman düzenlerinin basınç tankının dayanımına yönelik etkileri incelenmiştir. Kompozit malzeme olarak E cam / epoksi malzemesi kullanılmıştır. Analiz sonucunda basınç tankında artan sıcaklığın elyaf açısı oryantasyonuna göre patlama basıncı eğrileri elde edilmiştir. Kompozit basınç tankında sıcaklık arttırıldığında hasara neden olan patlama basıncının düştüğü olduğu görülmüştür.

Bakaiyan (22) literatürde kompozit basınç tankları için en iyi helis açısı olarak bilinen $\pm 55^\circ$ helis açısına sahip $[+55^\circ/-55^\circ/+55^\circ/-55^\circ]$ iç basınç ve termal yükler altında ki kompozit borularda analitik olarak hasar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Tsai Hill hasar kriteri kullanılarak yapılan analizlerde $\pm 55^\circ$ helis katmanına sırasıyla $\pm 30^\circ$ ve $\pm 35^\circ$ 'ye sahip yeni bir helis katmanının eklenmesi sonucunda $[+55^\circ/-55^\circ/+35^\circ/-35^\circ]$ önceki haline göre tankın gerilme durumu karşılaştırılmıştır. Ayrıca helisel ve teğetsel sarıma sahip kompozit basınç tankı $[+35^\circ/-35^\circ/+90^\circ/-90^\circ]$ için yukarıdaki analizler tekrarlanmış ve $[+55^\circ/-55^\circ/+55^\circ/-55^\circ]$ sarım düzenine sahip tanka ait analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlarda tank yarıçapının cidar kalınlığına göre değişimi karşılaştırılması yapılan düzenlerin performansını etkilediği görülmüştür.

Gemi (23) iç basınç altındaki kompozit sargılı basınç borularının yorulma hasar durumu incelenmiştir. Kompozit sargılı basınç tankı E cam elyaf / epoksi matristen üretilmiş olup $\pm 75^\circ$ helisel sarımlı 4 katmandan meydana gelmiştir. Yorulma testleri 0.42 Hz frekans da, boru dayanımının %30'u ile %70' arasında ki yüklerde ASTM D-2992 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Hasar ilerlemesi olarak örneğin sızıntı ve

son hasar olan parçalanma testler sonucunda gözlenmiş olup, dayanım ve ömür diyagramları elde edilmiştir.

Choi (24) Ansys sonlu eleman programında geliştirdiği yeni bir ara yüz programı ile çelik astarlı ve E Cam elyaf / epoksi reçineli teğetsel kompozit sargılı sıkıştırılmış doğal gaz depomla tankının tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Farklı basınçlarda tank cidarında oluşan aksel ve teğetsel gerilmeleri elde etmişlerdir. Ayrıca tasarladıkları tankın prototipini üreterek patlama deneyi gerçekleştirmişler ve çıkan sonuçları karşılaştırmışlardır.

Pavlovski (25) sıkıştırılmış doğal gaz tank imalatında karbon ve cam elyaf sarma yöntemine alternatif olarak cam elyafdan daha iyi mekanik özelliklere sahip ve karbon elyafdan daha ucuz olan Basalt elyaf sarma yöntemini kullanmışlardır. Basalt elyaf malzemesinin bulunabilirliği esas problemi teşkil etmiştir.

Diğer bir çalışmada, Cherevatsky (26) tarafından çift fazlı (gaz/sıvı) akışkan depolamak için kullanılacak ince cidarlı metal tankın etrafına helisel sarım yöntemiyle yeni bir kompozit tank tasarımı önerilmiştir. Bu tasarımda kullanılan ince cidarlı metal sargı, döküm yoluyla üretilmiştir.

Djehiche (27) 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 incelemişlerdir. Malzeme performansı ve geometrik düzensizliğün haznenin yükleme kapasitesine olan etkisini de araştırmışlardır.

Helis sarma yöntemi ile üretilen kompozit basınçlı tanklar uzay teknolojisinde basınçlı gaz depolamak için de kullanılmaktadır. Walter (28) uzay araçlarında Helyum depolamak için Titanyum iç gömleğin etrafına kompozit malzemedeki helisel sarım yöntemiyle çift cidarlı basınçlı tank tasarımı; başka bir çalışmada ise 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 (29).

Parnas (30) Kalın cidarlı elyaf takviyeli kompozit basınç tanklarının değişik yükleme durumları için klasik katman teorisi kullanılarak düzlem gerinim durumunda tasarım analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı yüklemelerde kompozit basınç tankının sarım açısına yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca ince cidar ve kalın cidarlı tank geometrisine ait teorik sonuçlar benzer olarak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Teorik sonuçlar neticesinde iç basınç yüklemesinde en iyi sarım açısı olarak 52.1° ve 54.2° açılar elde edilmiştir. Bulunan optimum sarım açısı aralığı ağ analizi ile elde edilmiş 54.74° sarım açısı ile uyum göstermiştir.

Literatür araştırmalarından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Kompozit basınç tanklarına yönelik birçok analitik ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve bazı çalışmalarda deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda çoğunlukla uçları açık silindirik boruların analizlerine yer verilmiştir. Yapılan analizler ilk katman hasarına yönelik olup hasar kriteri olarak Tsai Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Analizlerde optimum sarım açısı ve en iyi kompozit katman oryantasyonuna yönelik hesaplamalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında aşağıda sıralanan maddelere dikkat çekilmiştir.

Kompozit basınç tankının hasar analizleri elyaf hasar durumuna göre yapılmış olup hasar kriteri olarak Tsai Wu hasar kriterinden yararlanılmıştır. Çalışmanın en önemli özelliği silindirik borulardan farklı olarak, metal astarlı, uçları küresel ve tamamen kompozit sargılı bir basınç tankının sonlu eleman programında modellenmesidir. Yapılan analizlerde en iyi katman düzenine yönelik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

1.5. Tezin Amaç ve Kapsamı

Tez çalışmasında sıkıştırılmış doğal gazın depolanması için “Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Basınç Tankı” imalata hazır hale getirilecek şekilde tasarımının yapılması amaçlanmıştır.

Kompozit basınç tankının tasarımında yüksek basınçlara dayanıklılığının yanında hafif olmasına da dikkat edilecektir. Bu hedefin sağlanabilmesi için kompozit kısmın yüksek mukavemetli olması gerekmektedir. Günümüz endüstrisinde kompozit malzemelerde asıl yükü taşıyan elyaf yapı için karbon elyafı, kevlar® elyafı veya cam elyaf gibi malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemedeki elyafları bir arada tutan ve kompozitin geometrisini belirleyen matris malzemesidir. Matris malzemesi olarak kolay ve uygun maliyette temin edilebilen, diğer malzemelere oranla düşük büzülme hızı, düşük buharlaşma miktarı ve düşük viskozite özelliğine sahip olan termoset bir matris malzemesi kullanılacaktır. Kompozit kısmın sarılmasında Flaman sargı metodu göz önüne alınacaktır. Kompozitle sarım işlemi tankın metal astarının hem silindirik hem de küresel kısımlarını içine alacak ve böylelikle tankın tamamı kompozit malzemeyle sarılmış olacaktır. Bu tip kompozit tanka ISO 11439:2000 standardında TİP III denilmektedir.

Metal astar kısmı yekpare olacak şekilde derin çekme yöntemiyle imal edildiği varsayılacaktır. Astarın ağız kısmı sıvama yöntemiyle kapatılacak ve dolum ucu kısmına uygun bir çapta dış açıldığı aynı şekilde varsayılacaktır.

Ağ ve Katman teorileri yardımıyla tankın ön tasarım parametreleri belirlenecek ve bu veriler ışığında sayısal modelleme Ansys sonlu eleman programında gerçekleştirilecektir.

2. TEORİK ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Tez kapsamında ISO 11439:2000 tarafından *Tip III* olarak isimlendirilen dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının tasarımına yönelik teorik çalışmalar 2 ana başlık altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların birinci başlığında metal astarın tasarımı, hem analitik hem de sonlu eleman analizi yardımıyla yapılmıştır. Teorik çalışmaların ikinci başlığında kompozit tankın ağ analizi ve katman teorisi yardımıyla tankın ön tasarım parametrelerini belirlemek için analitik çözümleri elde edilmiştir. Bu aşamada elde edilen çözümler tankın silindirik kısmına yönelik olup küresel kısmı ihtiva etmemektedir. Daha sonra analitik çözümler yardımıyla bulunan ön tasarım parametreleri ile kompozit tankın tasarımı Ansys® sonlu eleman programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizinde tankın bütününlük analizi yapılmış ve tanktaki kritik bölgelerin iç basınç altındaki davranışları gözlemlenmiştir.

2.2. Metal Astarın Tasarımı

Kompozit tankın iç basınç yükünün %40'nı taşıyacak olan metal astarın malzemesi 6061-T6 Alüminyum alaşımı olarak seçilmiştir. Tankın patlama basıncına göre tasarımı yapılırken metal astarın bahsi geçen basıncı taşıyabilecek minimum cidar kalınlığının hesabı hem analitik hem de sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Analitik olarak yapılan hesaplamalarda iç basınç etkisi altında ince cidarlı basınç kaplarında düzlem gerilme teorisinden faydalanılmış ve dayanım kontrolü maksimum şekil değiştirme enerjisi kriteri (von Mises) yardımıyla yapılmıştır. Daha sonra sonlu eleman metodu kullanılarak doğrusal olmayan malzeme durumu için elastik plastik model tetikleme yardımıyla analiz gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlar Tartışma ve Sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.

2.2.1. Metal Astarın Boyut ve Malzeme Özellikleri

Analizini yapacağımız metal astar 295 mm uzunluğa ve 65 mm iç yarıçapa sahip olup, su dolu hacmi yaklaşık 3 litre ve net ağırlığı yaklaşık 1.5 kg dır. Metal astar Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 'de alaşım içeriği ve mekanik özellikleri verilmiş 6061-T6 Alüminyum malzemedan 400 C° derin çekildikten sonra ağız kısmına sıvama yöntemi uygulanarak elde edilebilecektir. 6061-T6 Alüminyum yüksek basınç uygulamalarında iyi korozyon dayanımı, yüksek süneklik ve soğuk işleme ile iyi sertleştirilme özellikleri nedeni ile tercih edilmiştir.

Çizelge 2.1. 6061-T6 Alüminyumun alaşım içeriği

6061-T6 Alüminyum		Erime Sıcaklığı: 652 °C			Yoğunluk: 2.70 gr/cm³				
Elementler									
% Ağırlık	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Alüminyum
Minimum	0.40	-	0.15	-	0.80	0.04	-	-	
Maksimum	0.8	0.70	0.40	0.15	1.20	0.35	0.25	0.15	Geri kalan

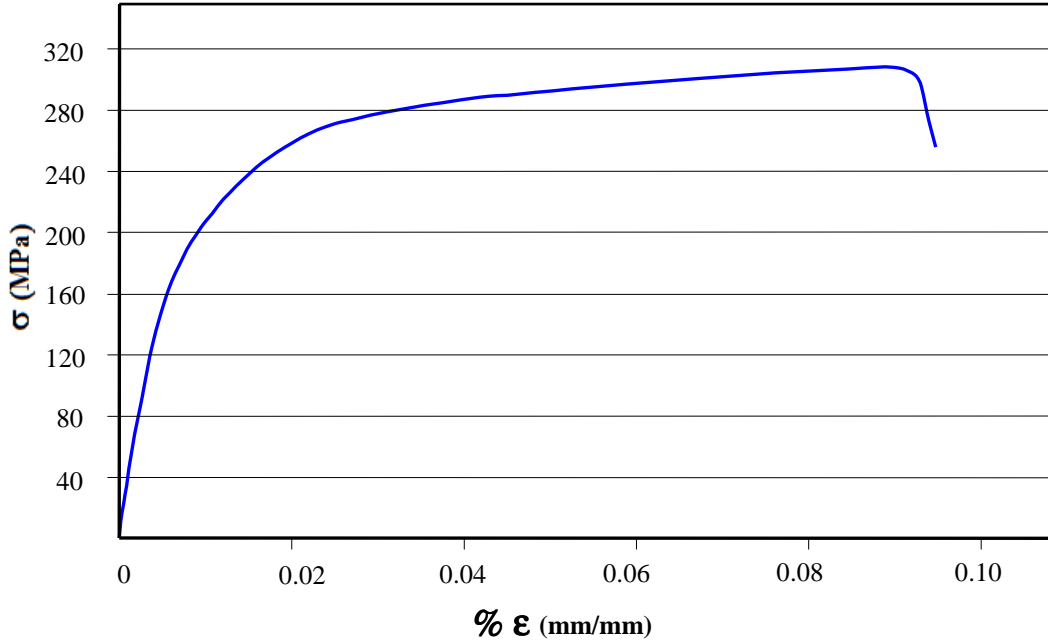
Çizelge 2.2. 6061-T6 Alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme Numunesi;		Kesit alanı: 52.5 mm²		Çekme uzunluğu: 50 mm		
Elastisite Modülü		Akma Muk.	Çekme Muk.	Kayma Muk.	Uzama	Sertlik
GPa		MPa	Muk. MPa	MPa	% mm/mm	HB
69.5		245	310	137	8.5	95



Şekil 2.1. 6061-T6 alüminyum tanka ait çekme numunesi

Derin çekme ve sıvama yöntemleriyle imal edilmiş ve daha sonra ısıl işlem uygulanmış 6061-T6 alüminyum metal astardan TS 138 EN 10002-1 standardına [31] uygun olarak tankın aksenal yönünde kesilerek hazırlanmış çekme numunesi Şekil 2,1’de gösterilmiştir. Numune Instron marka dinamik-statik çekme cihazında statik olarak çekilmiş ve Şekil 2.2.’de gerilme-şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



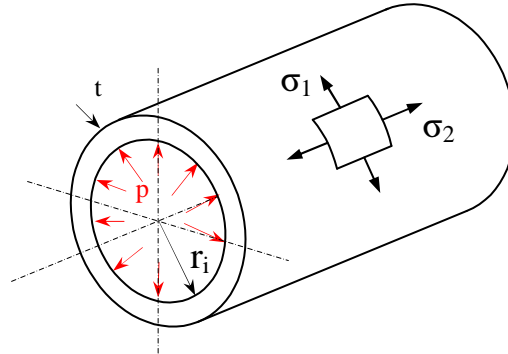
Şekil 2.2. 6061-T6 alüminyumunun gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Uygulanan derin çekme işleminden dolayı çekme numunesinin teğetsel yönde kesilerek hazırlanması teorik hesaplamalara esas teşkil eden dayanım değerlerini

daha hassas kılacağı bir gerçektir. Ancak bu durumda numunenin hazırlanması ve çekilmesi esnasında karşılaşılabilecek birtakım zorluklardan ötürü çekme numunesi aksel yönde kesilmiştir.

2.2.2. İç Basınca Maruz İnce Cidarlı Basınç Kaplarında Düzlem Gerilme Durumu

İnce cidarlı basınç kapları, düzlem gerilme analizinin önemli bir uygulama alanını teşkil eder. İç yarıçapı (r), cidar kalınlığı (t) ve p basınçlı bir akışkan taşıyan silindirik bir basınç kabını ele aldığımızda kabın ve içindeki akışkanın silindir eksenine göre simetrik olması nedeniyle kap yüzeyinde herhangi bir kayma gerilmesi meydana gelmez. Bu nedenle Şekil 2.3.'de görülen ve kabın yüzeyinde oluşan σ_1 teğetsel ve σ_2 aksel gerilmeleri asal gerilmelerdir. Bu asal gerilmeler p iç basınca, r yarıçapa ve t kabın cidar kalınlığına bağlı olacak şekilde aşağıdaki formüllerde ifade edilmiştir[32].



Şekil 2.3. Basınç tank yüzeyinde gerilme durumu

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (2.1)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (2.2)$$

Metal astarın hasar analizinde tespitinde aşağıda denklemleri verilen maksimum şekil değiştirme enerjisi kriterinden faydalanılmıştır[32].

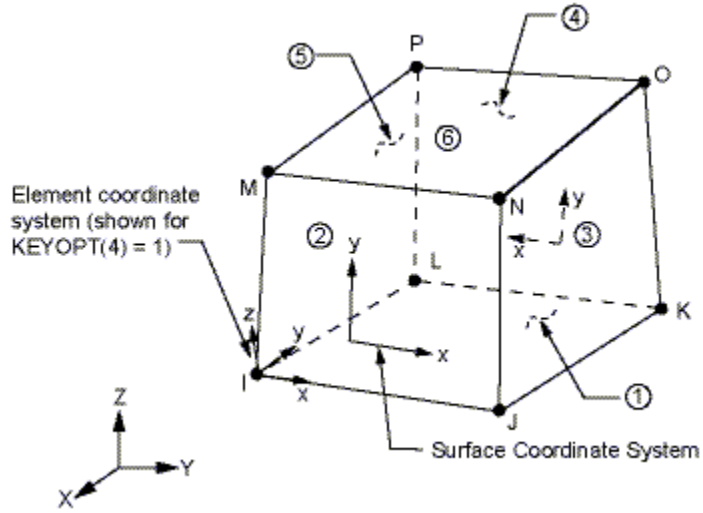
$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

2.2.3. Sonlu Eleman Analizi

Bu bölümde Ansys 12.0 sonlu eleman programı kullanılarak basınç tankının alüminyum astar kısmının patlama basıncına göre elastik-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Analizde metal astara uygulanan iç basınç, tüm tankın patlama basıncının %40'ı olacak şekilde seçilmiştir.

2.2.3.1 Bilgisayar Modelinin Oluşturulması

Metal astar modelinin oluşturulmasında ilk olarak geometrisi Şekil 2.4' de gösterilmiş olan 3 boyutlu 8 düğümlü termal ve yapı analizi özellikli Solid 45 eleman tipi seçilmiştir. Solid 45 elemanın her bir düğüm noktası x, y ve z yönlerinde olmak üzere 3 serbestlik derecesine sahiptir.

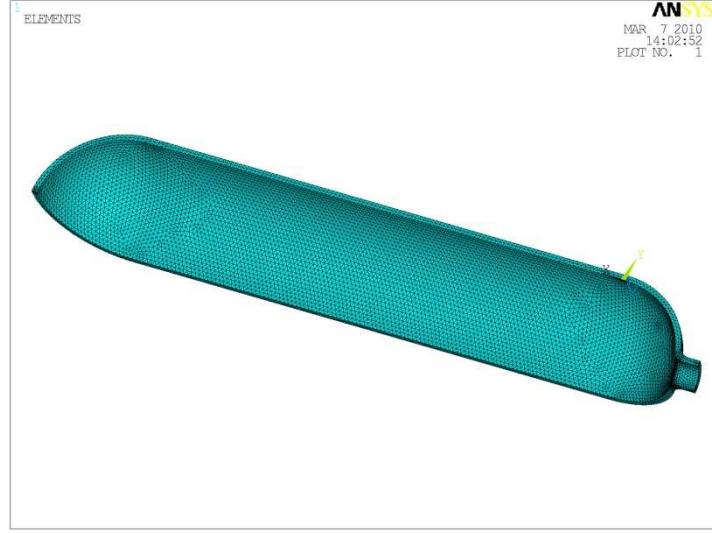


Şekil 2.4. SOLID45 SEM elemanı.

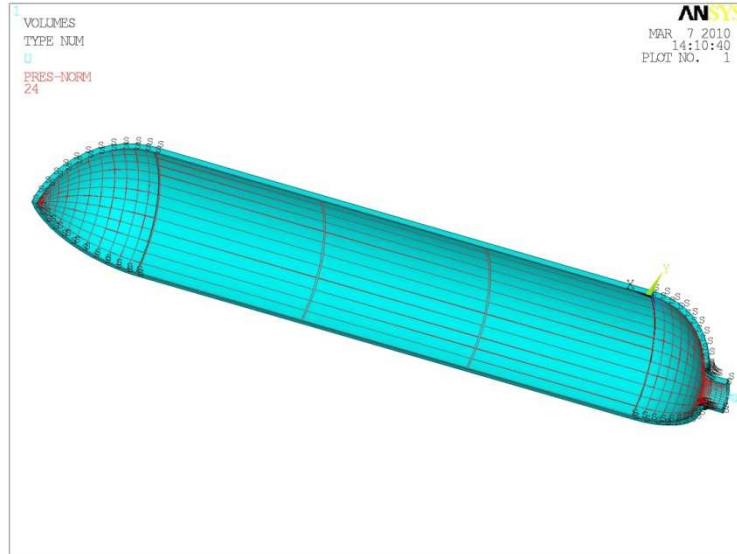
Sonra 6061-T6 Alüminyum malzemesinin malzeme özellikleri tanıtılmıştır. Bu işlem elastik plastik model tetikleme, nonlinear malzeme durumu için MISO (Multilinear

isotropic) seçeneğinin Şekil 2.2.'de 6061-T6 Alüminyum malzemesinin gerilme şekil değiştirme grafiğinden elde edilen veriler girilerek ve geometrik nonlineer durumu da hesaba katılarak yapılmıştır.

Daha sonra analizi yapılacak olan metal astarın çeyrek modeli 3 boyutlu tetrahedron element tipi ile ağ yapısı sağlanmıştır.(Şekil 2.5)



Şekil 2.5. Alüminyum astarın SEM SOLID45 ağı.



Şekil 2.6. Modelin sınır şartları ve yüklemeleri.

Sınır şartları ve yüklemelerin uygulanma biçimi Şekil 2.6.'da verilmiştir. Şekilde S harfiyle gösterilen yüzeyler çeyreğe bölünmüşlükten dolayı simetrisi ifade etmektedir. Alüminyum astarın ağız kısmının bir düğümünün tüm yönlerde hareketleri sınırlandırılmıştır. İç yüzeylerin tamamına 24MPa değerinde statik iç basınç yüklemesi yapılmıştır.

Analiz sonucunda uygulanan iç basınçtan dolayı modelde oluşan maksimum von Mises gerilme değeri 6061-T6 Alüminyum malzemesinin çekme mukavemeti değeri karşılaştırılır ve minimum cidar kalınlığı değeri bulunur.

2.3. Kompozit Kısımın Analitik Tasarımı

Araştırmanın bu bölümünde kompozit tankın patlama basıncına göre kompozit cidar kalınlığı hesabı hem ağ analizi, hem de katman teorisi yardımıyla yapılmıştır. Yapılan analitik çözümlerde tankın sadece silindirik kısmı dikkate alınmıştır. Ağ analizinde kompozit tankın patlama basıncının % 60'ının kompozit katman tarafından taşınacağı varsayılmıştır. Katman teorisi yardımıyla yapılan analizlerde basınç tankının hem metal astar hem de kompozit kısımları birlikte analizlere katılmış ve hibrit bir çözüm elde edilmiştir. Katman teorisinin hasar kriteri olarak Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır.

Basınç tankının kompozit malzemesi içi Kevlar®-49 elyafları ve epoksi matrisi seçilmiştir. Malzeme seçiminde öncelikle yüksek dayanım, bulunabilirlik ve maliyet parametreleri dikkate alınmıştır. Kompozit katmanın elyaf oryantasyonları $\pm\alpha$ helisel sarımı, 90° teğetsel sarımı ifade etmek suretiyle, 4 farklı sarım düzeninde seçilmiştir. Seçilen sarım düzenleri Bölüm 4.'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

2.3.1. Ağ Analizi

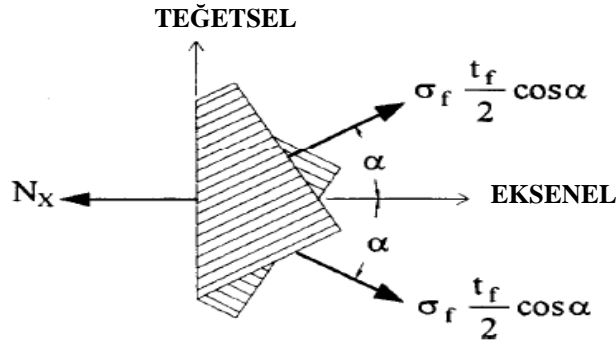
Kompozit basınç tanklarının tasarımında ki temel yaklaşımlardan biri de Ağ Analizidir.

Ağ analizi, flaman sargı yöntemiyle sarılmış yüksek basınca dayanıklı kompozit basınç tanklarındaki teğetsel ve aksenal yöndeki gerilmelerin hesaplanması için temel bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda eğilme, kayma ve burkulmadan dolayı oluşacak etkiler ihmal edilmektedir.

Helisel ve teğetsel yönde sarılmış kompozit malzemesinin aksenal ve teğetsel doğrultularda ki yük durumları ve kompozit malzeme kalınlık bağıntıları ağ analizi yardımıyla aşağıda gösterilmiştir[33].

Helisel sarım – Aksenal Yön

Tankımızın iç basıncı p , iç yarı çap r , helis sarım açısı $\pm\alpha$, elyaf malzemenin çekme gerilmesi σ_f , ve kompozit sarım kalınlığı t_f dir. N_x birim uzunluktaki aksenal kuvvet olacak şekilde helisel sarımlı elyaf malzemenin aksenal yöndeki yük durumu Şekil 2.7 'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Helisel sarımlı elyaf malzemenin aksenal yük durumu

Eksenal yöndeki kuvvet bağıntısı;

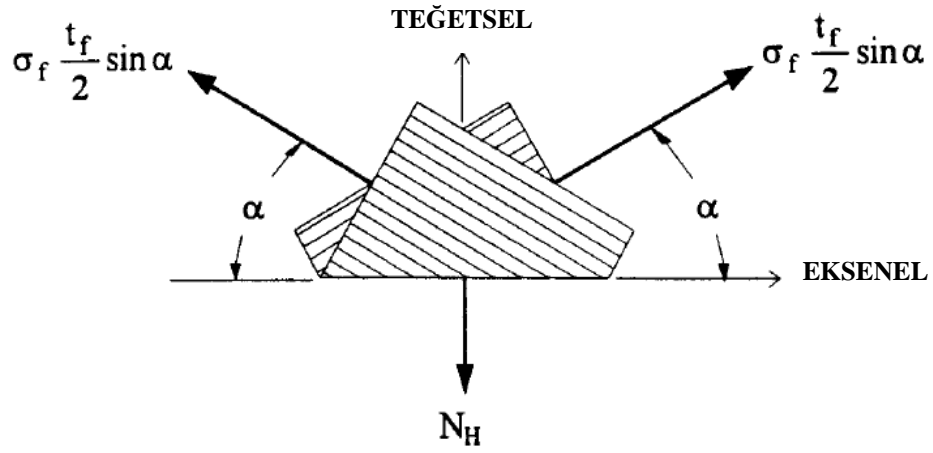
$$N_x = \frac{pr}{2} = \sigma_f t_f \cos^2 \alpha \quad (2.4)$$

Helisel yönde sarılmış kompozit malzeme kalınlığı;

$$t_f = \frac{pr}{2\sigma_f \cos^2 \alpha} \quad (2.5)$$

Helisel sarım – Teğetsel Yön

N_H birim uzunluktaki teğetsel yöndeki kuvvet olacak şekilde helisel sarımlı elyaf malzemenin teğetsel yöndeki yük durumu Şekil 2.8 'de verilmiştir.



Şekil 2.8 Helisel sarımlı elyaf malzemenin teğetsel yük durumu

Teğetsel yöndeki kuvvet bağıntısı;

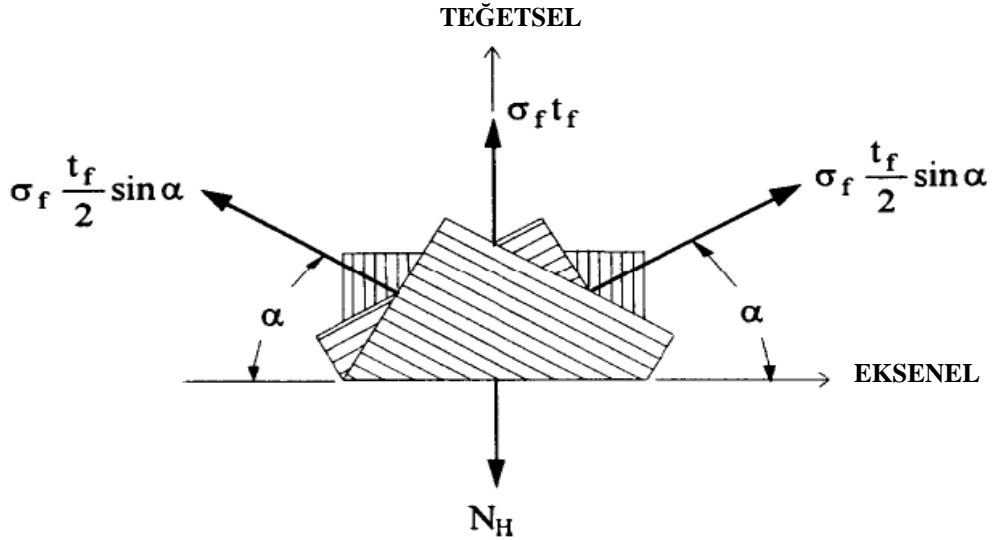
$$N_H = pr = \sigma_f t_f \sin^2 \alpha \quad (2.6)$$

Teğetsel yöndeki sarımlı kompozit malzeme kalınlığı;

$$t_f = \frac{pr}{\sigma_f \sin^2 \alpha} \quad (2.7)$$

Hem helisel hem teğetsel sarım – Teğetsel Yön

N_H birim uzunluktaki teğetsel yöndeki kuvvet olacak şekilde hem helisel hem de aksenal sarımlı elyaf malzemenin teğetsel yöndeki yük durumu Şekil 2.9 'de verilmiştir.



Şekil 2.9. Hem helisel hem de aksenal sarımlı elyaf malzemenin teğetsel kuvvet durumu

Helisel yönde sarılmış kompozit malzeme kalınlığı;

$$t_f = \frac{Pr}{2\sigma_f} (2 - \tan^2 \alpha) \quad (2.8)$$

Yukarıda formülleri verilmiş olan kompozit malzeme kalınlıkları hacimsel parçalanma sabiti (V_f)'ye bölünerek son halini alır. Hacimsel parçalanma sabiti her bir elyaf malzemesi için değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.3.'de değişik elyaf malzemeleri için verilmiş olan hacimsel parçalanma sabiti, geometrik farklılıklara, matrisin viskozitesine, iç basınca, elyaf gerginliğine, elyaf açısına... vb gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak bir nevi emniyetli kalınlığın bulunmasında yardımcı olur.

Kompozit malzemenin son kalınlığı;

$$t = \frac{t_f}{V_f} \quad (2.9)$$

olarak bulunur

Çizelge 2.3. Elyaf hacimsel parçalanma sabiti

Elyaf	Helis	Teğetsel
E-Cam	0.55–0.6	0.65–0.7
Kevler-49	0.55–0.6	0.65–0.7
Karbon AS-4	0.5–0.55	0.6–0.65

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan elyaf malzemesinin çekme mukavemeti değerleri teğetsel ve aksenal doğrultularda yön değişiminden kaynaklanan bir verimlilik düşüşü gösterirler. Dönüşüm verimliliği olarak da adlandırılan bu olay, standart çekme deneyinden elde edilen elyaf malzemenin çekme mukavemeti değerinin (σ_f)

%70–85'i teğetsel yöndeki elyaf mukavemetini, %55–60'ı helisel yöndeki elyaf mukavemetini verir[33].

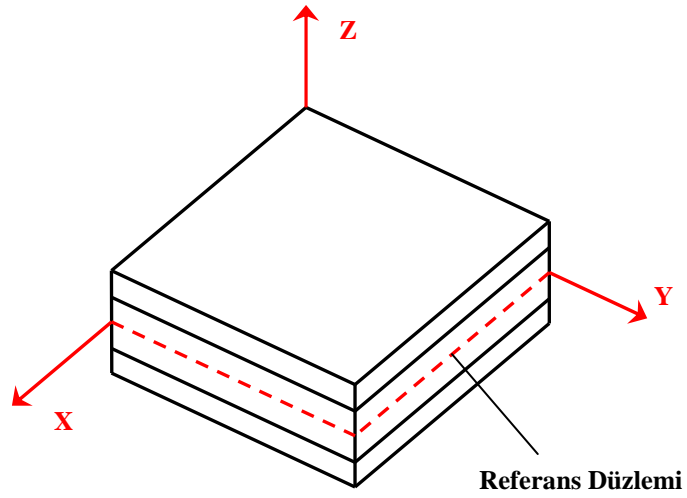
2.3.2. Klasik Katman Teorisi

Çok tabakalı kompozit plaka (laminat) iki veya daha fazla tabakanın (lamina) birleşmesinden meydana gelen birleşik bir yapıdır. Çok tabakalı kompozit plakalar tipik olarak yük taşıyan elyaflar yönünde olağan üstü 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

değişikliklerin hesabı tek katmanlı kompozit plakalara göre oldukça karmaşıktır. Katman teorisi çok katmanlı plakalarda ki her bir katmada oluşacak gerilme ve şekil değişiklikleri hesaplamaktadır. Çok katmanlı plakalar tek katmanlı plakalar tarafından oluşturulurken elyaf doğrultularına göre simetrik, antisimetrik veya simetrik olmayan şekillerde üst üste yerleştirilebilirler.

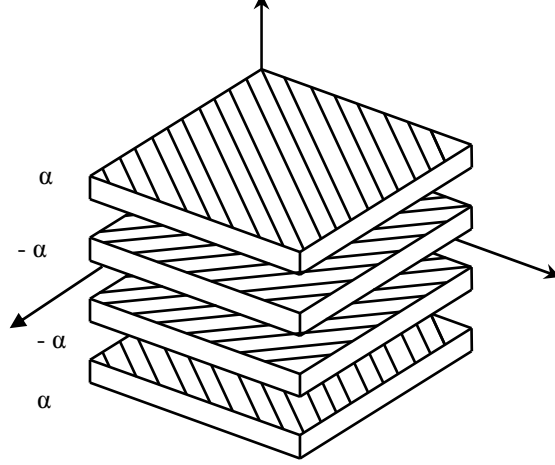
Klasik katman teorisindeki en önemli sınırlama her bir katmanın düzlemsel gerilme durumunda olması ve tabakalar arasında oluşacak süreksiz gerilmelerin ihmal edilmesidir. Bunlarla birlikte katman teorisinde referans düzleminin ayrıca bir önemi vardır. Şekil 2.10'da görülmekte olan referans düzlemi (orta tabaka), çok katmanlı kompozit plakalarda plaka kesitinin tam ortasından geçmektedir. Kompozit plaka referans düzlemine göre kalınlık bakımından simetrik değilse, referans düzlem nötr bir düzlem olmaktan çıkar ve bu durumda referans düzlemdeki şekil değişiklikleri saf eğilme durumunda sıfıra eşit olmaz. Bu da analiz sonuçlarını olumsuz olarak etkiler.



Şekil 2.10. Çok katmanlı kompozit plakada referans düzlemi (orta tabaka)

2.3.2.1. Simetrik Katman Düzeni

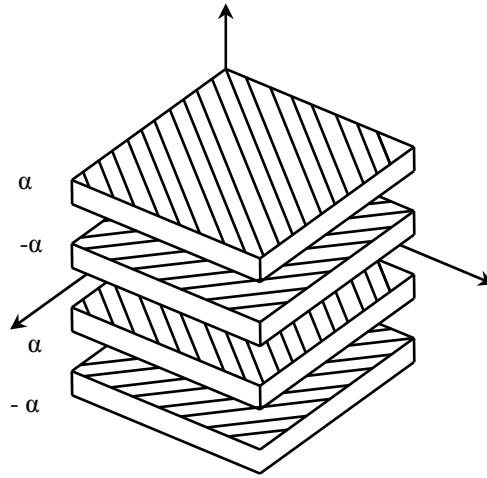
Çok katmanlı bir plakanın simetrik olarak adlandırılması o plakanın referans düzlemine göre alt ve üst kısımda kalan kalınlığın, elyaf yönlerinin ve özelliklerinin aynı olması demektir. Şekil 2.11’da $(\alpha, -\alpha, -\alpha, \alpha)$ açı oryantasyonuna sahip simetrik bir plaka görülmektedir.



Şekil 2.11. Simetrik çok katmanlı plaka

2.3.2.2. Antisimetrik Katman Durumu

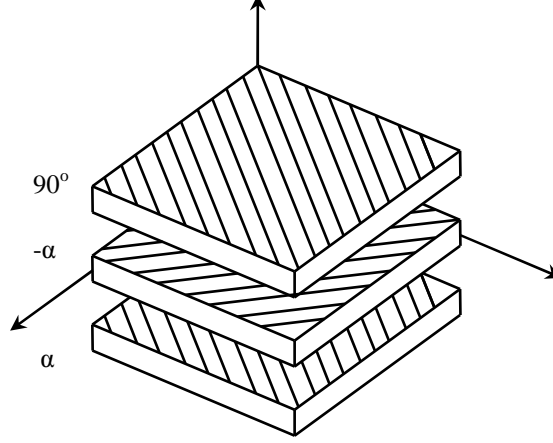
Çok katmanlı bir plakanın simetrik olmayan durumu Şekil 2.12.’de gösterilmiştir. Burada referans ekseninin altında ve üstünde kalan plakaların kalınlıkları eşit olmakla beraber açı oryantasyonları referans düzlemine göre simetrik olmayıp farklı şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Antisimetrik çok katmanlı plaka

2.3.2.3. Simetrik Olmayan Katman Durumu

Çok katmanlı bir plakanın simetrik olmayan durumu Şekil 2.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Simetrik olmayan çok katmanlı plaka

2.3.2.4. Çok Katmanlı Plakanın Tek Katmanındaki Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi

Plakaların kalınlık boyunca temel uzama ve eğilme rijitliklerini tanımlamak için öncelikle gerilme - şekil değiştirme ilişkisi bilinmelidir. Bu ilişki katman teorisinde referans düzlemi temel alınarak kurulmaktadır[2].

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.10)$$

Aşağıda referans düzlem şekil değiştirmeleri verilmiştir.

$$\varepsilon_x^o = \frac{\partial u^o}{\partial x}; \quad \varepsilon_y^o = \frac{\partial v^o}{\partial y} \quad \gamma_{xy}^o = \frac{\partial u^o}{\partial y} + \frac{\partial v^o}{\partial x} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki denklemlerde u ve v sırasıyla x ve y yönündeki yer değiştirmelerdir. “o” üst simgesi referans düzlemi ifade etmektedir.

Toplam yer değiştirmeler;

x yönünde; $u = u^0 - zX_{xz} \Rightarrow u = u^0 - z \frac{\partial w^0}{\partial x}$ (2.12.)

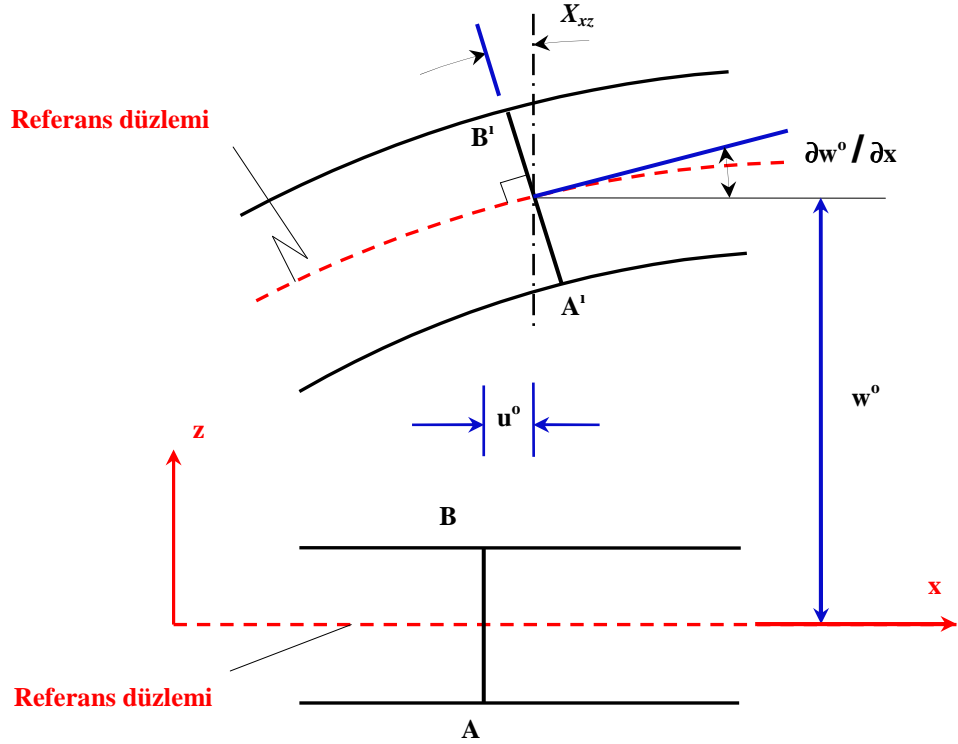
y yönünde; $v = v^0 - z \frac{\partial w^0}{\partial y}$ (2.13)

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} \quad \varepsilon_y^0 = \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u^0}{\partial y} + \frac{\partial v^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \quad (2.15)$$

2.3.2.5. Kirchhoff Hipotezi



Şekil 2.14. Kirchhoff teorisine göre bir düzlem kenarının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri[34]

Kirchhoff hipotezi yardımıyla çok tabakalı bir plağın bir katmanındaki şekil değiştirmeleri, plağın orta düzleminin eğriliği ve doğrudan şekil değiştirme terimleriyle (1.12) denkleminde görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemde, ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy}^0 referans düzlemin şekil değiştirmelerini, K_x , K_y , K_{xy} referans düzlemin moment eğrilerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} K_x &= -\frac{\partial^2 w^0}{\partial x^2} & K_y &= -\frac{\partial^2 w^0}{\partial y^2} \\ K_{xy} &= -2\frac{\partial^2 w^0}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.3.2.6. Çok Katmanlı Kompozit Plakalarda Kuvvet Moment Etkisi

Plakada etkiyen kuvvet ve moment sonucu kalınlık boyunca her bir tabakanın gerilmeleri integre edilirse,

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (2.18)$$

N ; Kompozit plakaya gelen x-y yönlerinde, birim uzunluktaki (plaka genişliği) normal kuvvetlerdir.

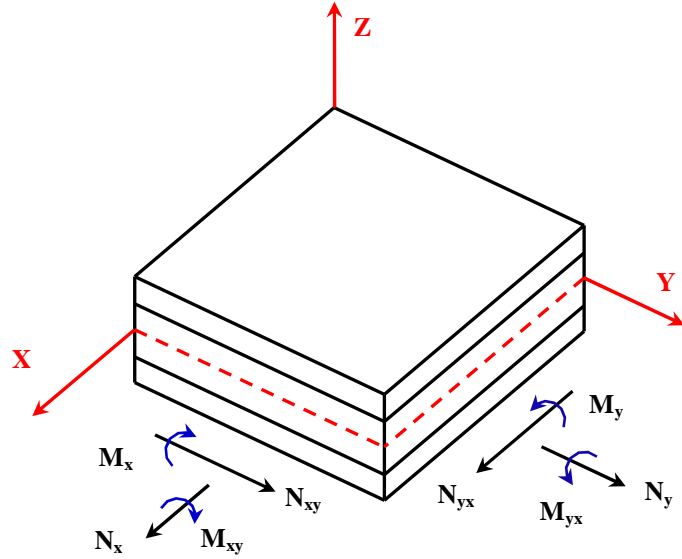
M ; Kompozit plakaya gelen x-y yönlerinde, birim uzunluktaki (plaka genişliği) momentlerdir[2].

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} dz \quad (2.19)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.20)$$

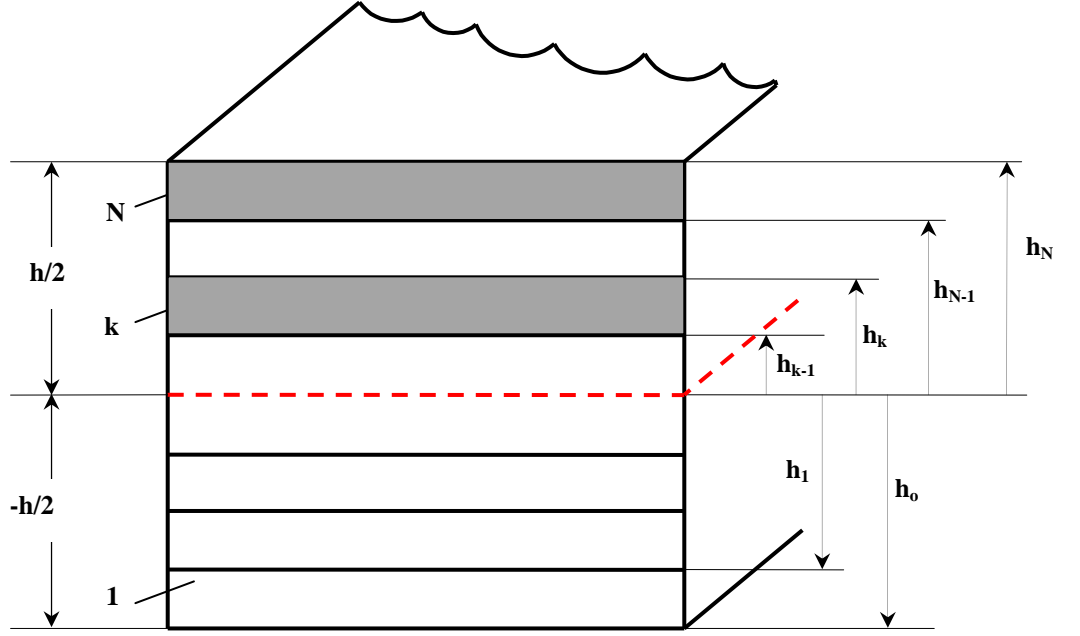
$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad (2.21)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.22)$$



Şekil 2.15. Kompozit plakada x ve y yönlerindeki kuvvet ve momentler[35]

Burada h_k ve h_{k-1} Şekil 2.16’da tanımlanmıştır. Kuvvet ve momentlerin z yönüyle ilişkisi yoktur. Fakat plaka referans yüzeyindeki x ve y yönlerinin birer fonksiyonlarıdır.



Şekil 2.16. N tabakalı kompozit plakanın geometrisi[36]

$$[\bar{Q}] = [R][T]^{-1}[Q][T][R]^{-1} \quad (2.23)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad (2.24)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.25)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

Kuvvet ve momentler eşitlikleri yer değiştirme ve moment eğriliği cinsinde aşağıdaki Şekilde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.27)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{Bmatrix} z dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \quad (2.28)$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} dz = h_k - h_{k-1}$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz = \frac{h_k^2 - h_{k-1}^2}{2} \quad (2.29)$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz = \frac{h_k^3 - h_{k-1}^3}{3}$$

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

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left(\frac{h_k^2 - h_{k-1}^2}{2} \right) \quad (2.30)$$

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

Tüm bu ifadeler matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

Kısa olarak

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ K \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

Şeklinde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ K \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

Yük uygulandığında yük deformasyondan daha önce hesaplanabilir. Bu durumda deformasyonların hesabı için deformasyon-kuvvet ilişkisi için denklem (2.32) ters çevrilir ve denklem (2.33) elde edilir.

Yukarıdaki ifadeler rijitlik matrisleri [A], [B] ve [D] olan plakalar için yazılmıştır. Bu rijitlik matrisleri eşitlik (2.30) de tanımlana fonksiyonlar olup her bir tabakanın geometrisine ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Bunlar plakaların ortalama elastik parametreleridir.

A_{ij} ; Eksenel kuvvetler için uzama rijitlik matrisi.

B_{ij} ; Hem eksenel hem de moment kuvvetleri için çift etkili (coupling) rijitlik matrisi.

D_{ij} Moment kuvvetleri için eğilme rijitlik matrisi[2].

2.3.3. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri

Bir yapı elemanı kendisinden beklenen işlevi yerine getiremediği zaman hasara uğradığı kabul edilir. Bir malzemenin hasara uğraması o malzemedeki mikro çatlakların büyüyerek çatlak haline gelmesi ve daha sonra malzemenin kırılması ile olur. Kompozit malzemelerdeki hasarlarda çeşitli tiplerde oluşur.

1. Elyaf kopması ; Çekme yükü altında
2. Elyaf burkulması ; Basma yükü altında
3. Matris kırılması ; Elyafa dik yönde gelen çekme veya basma yükü altında
4. Elyaf sıyrılması ; Elyafın matrislerden sıyrılması
5. Delaminasyon ; Katman ayrılması
6. Diğerleri.....

Kompozit plaklarda hasar analizi yapmak için öncelikle malzemenin oluşturduğu her bir tabakadaki elyaf yönünde ve elyafe dik yöndeki gerilmelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu gerilmelerde kompozit malzemeler için geliştirilmiş mukavemete yönelik teoriler yardımıyla bulunabilir. Bu hasar kriterlerinin bazıları aşağıdaki gibidir.

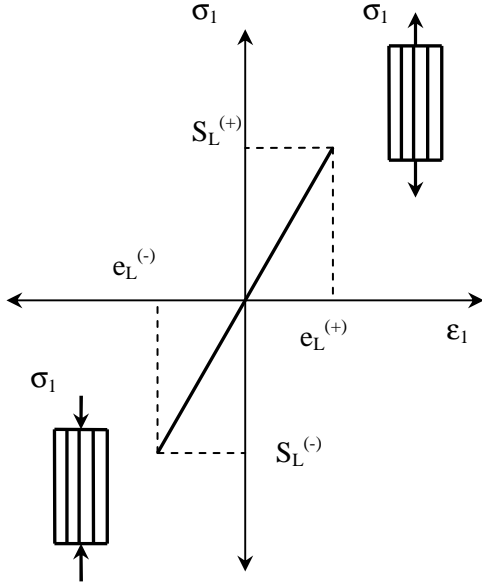
Maksimum gerilme kriteri

Maksimum Şekil değiştirme kriteri

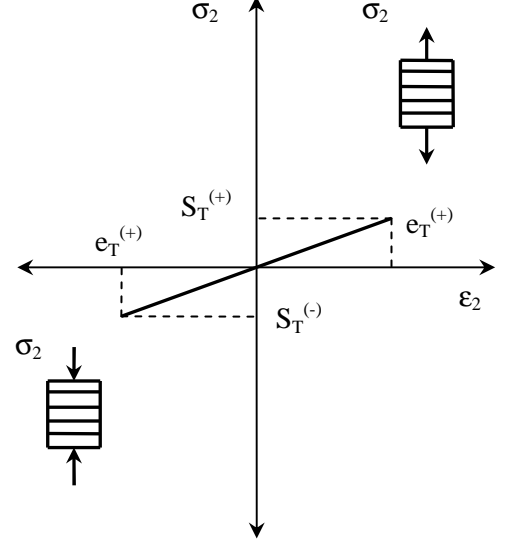
Tsai-Hill Kriteri

Tsai-Wu Kriteri

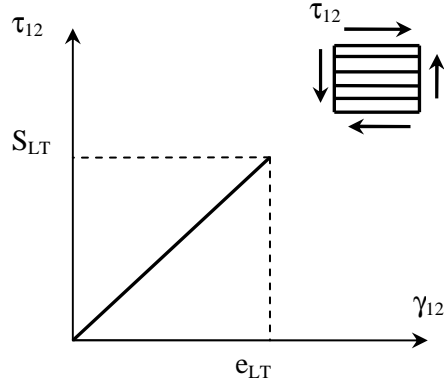
Elyaf yönünde uygulanan kuvvet



Elyafa dik yönde uygulanan kuvvet



Kesme kuvveti



Şekil 2.17. Plakaya gelen aksel ve kesme kuvvetleri neticesinde plakada oluşan maksimum gerilme ve maksimum gerinim eğrileri

Şekil 2.17'de $S_L^{(-)}$, $S_L^{(+)}$ sırasıyla elyaf doğrultusundaki basma ve çekmede ki mukavemet değerleridir. $S_T^{(-)}$, $S_T^{(+)}$ yine sırasıyla tek yönlü kompozit plakanın elyafa dik doğrultudaki basma ve çekmede ki mukavemet değerleridir. S_{LT} tek yönlü kompozit plakanın kayamdaki mukavemet değerleridir.

2.3.3.1. Maksimum Gerilme Kriteri

Bu kriterde ortotropik bir plakada elyaf yönlerinde oluşan gerilmelerin yine aynı elyaf yapısına ait dayanım değerleriyle karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

$$\begin{aligned} -S_L^{(-)} < \sigma_1 < S_L^{(+)} \\ -S_T^{(-)} < \sigma_2 < S_T^{(+)} \\ \tau_{12} < S_{LT} \end{aligned} \quad (2.34)$$

2.3.3.2. Maksimum Gerinim Kriteri

Bu kriterde ortotropik bir plakada elyaf yönlerinde oluşan şekil değiştirmelerin yine aynı elyaf yapısına ait maksimum şekil değiştirme değerleriyle karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

$$\begin{aligned} -e_L^{(-)} < \epsilon_1 < e_L^{(+)} \\ -e_T^{(-)} < \epsilon_2 < e_T^{(+)} \\ \gamma_{12} < e_{LT} \end{aligned} \quad (2.35)$$

2.3.3.3. Tsai-Hill Kriteri

Bu teorem orijinal olarak homojen izotropik parçalara uygulanmış Von Mises kriterine dayanır. Da ha sonra anizotropik malzemelere adapte etmek için Hill tarafından değiştirilmiş olup kompozit malzemelere uygulanmıştır. Von Mises kriterine maksimum şekil değiştirme (distorsiyon) enerjisi kriteri de denmektedir. Maksimum şekil değiştirme enerjisi kriterine göre düzlemsel gerilme halinde olan bir cisimdeki şekil değiştirme enerjisi, aynı malzemeden yapılmış numune çekme deneyine tabi tutulduğunda numunede akma başladığı anda numunedeki şekil değiştirme enerjisinden az ise cisimde akma olmaz.

Hill tarafından değiştirilmiş olan Tsai-Hill kriteri adını almış şekil değiştirme enerjisi kriteri tek tabakalı 1 yönü elyaf doğrultusunu gösteren kompozit plakada şu şekilde uygulanmaktadır. Elyaf yönüne dik, elyaf yönünde ve kayma doğrultularında bulunan gerilme değerleri (σ_{11} , σ_{22} , σ_{12}) aşağıdaki eşitlikte yazılır ve denklemin

sağlayıp sağlamadığına bakılır. Tsai Hill hasar kriteri Maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme kriterlerinden farklı olarak malzemenin birden çok yöndeki dayanım değerlerini formülünde barındırmaktadır. Ancak malzemenin basma ve çekmedeki dayanım değerlerini ayrı ayrı dikkate almamaktadır.

$$\frac{\sigma_1^2}{S_{T_1}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_{T_1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_{T_1}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{T,T}^2} = 1 \quad (2.36)$$

Yukarıdaki (2.36) denkleminde eşitliğin sol tarafı <1 şeklinde çıkarsa güvenli durum, =>1 şeklinde çıkarsa güvensiz durum söz konusudur[37].

2.3.3.4. Tsai-Wu Kriteri

Kompozit malzemelerin hasar durumu için en genel kriterlerden bir tanesi Tsai Wu hasar kriteridir. Tsai-Wu anizotropik malzemelerin hasar teorisini iyileştirilmiş ve basitleştirilmiş bir tensör polinomu yardımıyla ifade etmektedir. Bu kriterin diğer kriterlere göre bazı önemli özelliği vardır. Malzemenin basma ve çekmedeki dayanım değerlerini ayrı ayrı formülünde dikkate almaktadır. Koordinatların tekrardan tanımlanması veya döndürülmesi halinde kriterin değişmemesi, bilinen tensör dönüşüm kuralları yardımıyla kriterdeki terimlerin dönüştürülebilmesi, Direngelik ve komplians matrislerdeki gibi simetrik özelliklerin kriterde yansıtılabilmesidir[38]. Kompozit bir plakada oluşacak gerilmeler sonucu plakanın hasara uğrayıp uğramayacağı (2.37) nolu Tsai-Wu denkleminde bulunabilir.

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2.37)$$

Yukarıdaki denkleminde σ_1 , σ_2 , σ_{12} terimleri kompozit plakada oluşan elyaf yönüne dik, elyaf yönünde ve kayma doğrultularındaki gerilme değerlerini göstermektedir. Dayanım parametreleri olan F_{11} , F_{22} , F_1 , F_2 ve F_{12} terimleri kompozit malzemenin elyaf yönüne dik, elyaf yönünde ve kayma doğrultularındaki basma ve çekmedeki mukavemet değerleri ile denklem (2.38)'de ifade edilmiştir[38].

$$\begin{aligned}
F_{11} &= \frac{1}{S_1^T + S_1^C} & F_{22} &= \frac{1}{S_2^T + S_2^C} & F_{12} &= \frac{1}{S_1^T} - \frac{1}{S_1^C} \\
F_{21} &= \frac{1}{S_2^T} - \frac{1}{S_2^C} & F_{66} &= \frac{1}{S_{12}^2} & &
\end{aligned} \tag{2.38}$$

2.3.4. Kompozitlerde Hasar Tespiti

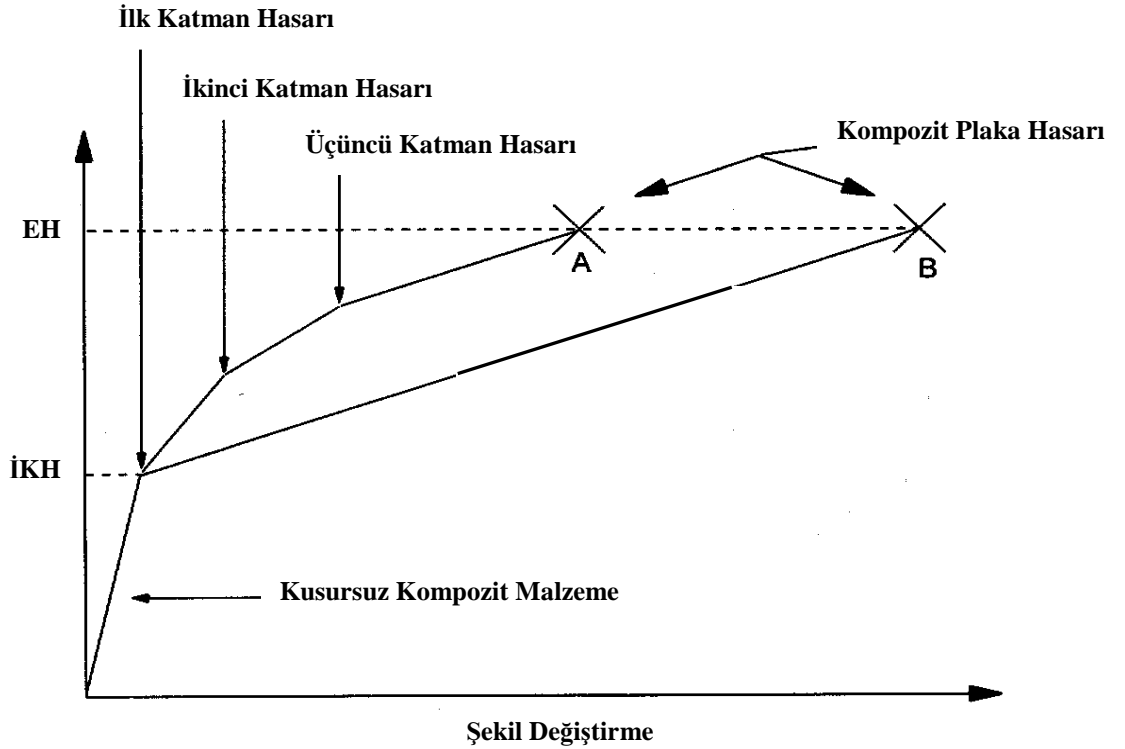
Kompozit plakanın hasar tespitinde veya hasara neden olacak hasar yükünün bulunmasında en önemli yaklaşım, klasik katman teorisi yardımıyla hasar kriterlerinden birini kullanarak sonuca gidilen yaklaşımdır. Bu yaklaşımda kompozit plakaya ait A, B ve D rijitlik matrisleri bulunur. Sonra kompozit plakanın her bir katmanının üst ve alt yüzeylerinde oluşan şekil değiştirmeler ve gerilmeler daha önce verilmiş olan gerilme-şekil değiştirme denklemleri yardımıyla hesaplanır. Bulunan gerilmeler transformasyon denklemleri yardımıyla asal yönlerdeki bileşenlerine yani elyaf yönünde ve elyaf yönüne dik doğrultudaki bileşenlerine dönüştürülür. Bu bileşenler uygun bir hasar kriterine konularak kompozit plakanın hangi katmanının uygulanan yüke dayanıp dayanmayacağı bulunur[39].

2.3.4.1. İlk Katman Hasarı

Bir kompozit plakaya uygulanan yükten dolayı oluşan ilk hasar kompozit plakanın ilk katman hasarı (İKH) olarak adlandırılırlar. İlk katman hasarının meydana geldiği plaka ve hasar yükü yukarıda da bahsedildiği üzere Şekil 2.39'da şematik olarak gösterilen yöntem yardımıyla bulunur. Polimer matrisli kompozit plakanın elyaf yönüne dik yöndeki dayanımı elyaf yönündeki dayanımından çok düşüktür. Bu durumdan dolayı ilk katman hasarı çoğu zaman matris hasarı olarak ortaya çıkar.

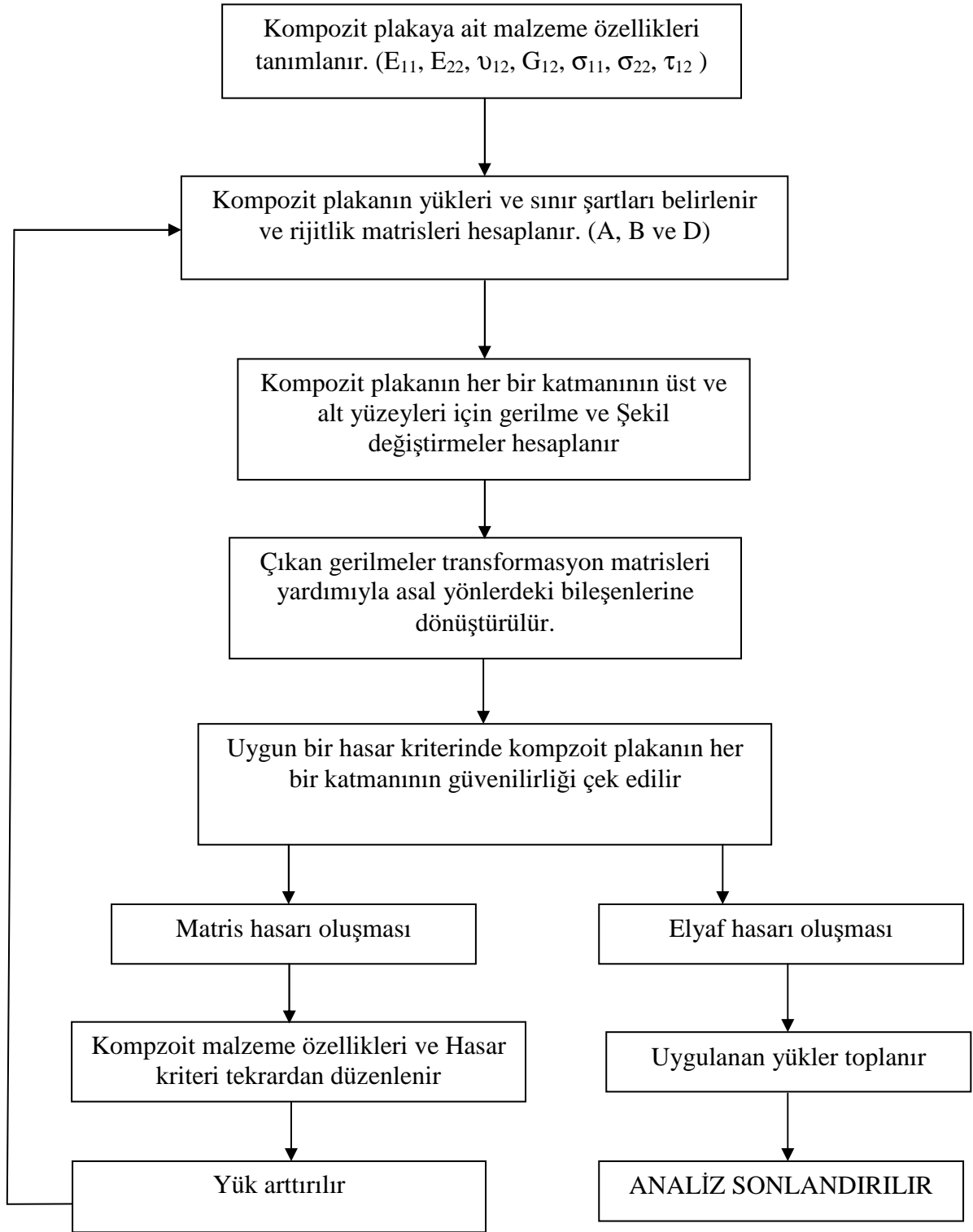
2.3.4.2. Elyaf Hasarı

Kompozit plakada meydana gelecek ilk hasar (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 elyaflarda 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 katmanları hasarına bakılmaksızın direk elyaf hasarına gidilir. Bu yaklaşım ise iki adımda elyaf hasarı olarak isimlendirilir. Bu iki yaklaşımın vermiş olduğu sonuçlar Şekil 2.18.'de gösterildiği gibi birbirine çok yakındır.



Şekil 2.18. Katman katman ve iki adım yaklaşımları ile elyaf hasar yükünün tespiti[39]

Bu çalışmada tabakalı kompozit levhaların hasar analizleri için hasar ilerleme modellemesi yapabilen bir program geliştirilmiştir. Aşağıda algoritması verilen programın hesaplama yöntemi şu şekildedir;



Şekil 2.19. Kompozit plakanın hasar ilerleme algoritması

İlk katman hasarı (İKH) meydana gelmiş bir kompozit plakada elyaf hasarına (EH) yol açacak yükün bulunması için hasara uğramış plakanın rijitlik matrisinin değiştirilmesi gerekir. İlk katman hasarı, matris malzemesinde olduğu için hasara uğrayan katmanın elyaf doğrultusundaki rijitlik modülü hariç tutulmak üzere diğer tüm özellikleri değiştirilir. Bu işlem deneysel azaltma faktörü olarak adlandırılan (f_d) bir sabit yardımıyla yapılır. Bu tez çalışmasında deneysel azaltma faktörü (f_d) 0.01 olarak seçilmiştir.

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_1^0 \\
 E_2 &= f_d E_2^0 \\
 G_{12} &= f_d G_{12}^0 \\
 G_{23} &= f_d G_{23}^0 \\
 \nu_{12} &= f_d \nu_{12}^0
 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Daha sonra yük artırılarak ilk katman hasar yükünün tespitinde yapılan işlemler tekrarlanıp yeniden bir analiz gerçekleştirilmiş olur. Böylelikle tüm katmanlarda matris hasarı meydana gelene kadar bu işlem tekrar eder. En son noktada tüm katmanların elyaf yönü hariç diğer tüm mekanik özellikleri değiştirilip yine bir yük artımı ile son bir analiz daha yapılır. Analiz sonucunda çıkan yük kompozit plakayı elyaf hasarına uğratan yük olup ilk katman hasarına neden olan yük ile toplanarak kompozit plakayı tümüyle hasara uğratan yüke ulaşılmış olunur. Burada dikkat edilecek bir husus da en son noktada kullanılan hasar kriterinin uygun şekilde düzenlenerek analizin yapılmasıdır.

Basınç tankının malzemesinin hasar durumuna göre mekanik özelliklerinin değişimi Çizelge 2.4.'de verilmiştir[39].

Çizelge 2.4. Basınç tankının hasar durumuna göre malzeme özellikleri(11)

Malzeme Özellikleri	Al 6061-T6		Kevlar®49 / Epoksi	
	Hasar öncesi	Hasar sonrası	Hasar öncesi	Hasar sonrası
E_{11} (GPa)	69.5	0.1	86,3	86,3
E_{22} (GPa)	69.5	0.1	4,9	0.05
G_{12} (GPa)	26.7	0.1	2	0.02
ν_{12}	0.3	0.5	0.34	0.34
S_{1T} (MPa)	240	278	1520	1520
S_{1C} (MPa)	240	278	333	333
S_{2T} (MPa)	240	278	29	0
S_{2C} (MPa)	240	278	157	0
S_{12} (MPa)	137	137	49	0

2.4. Kompozit Tankın Sonlu Eleman Analizi

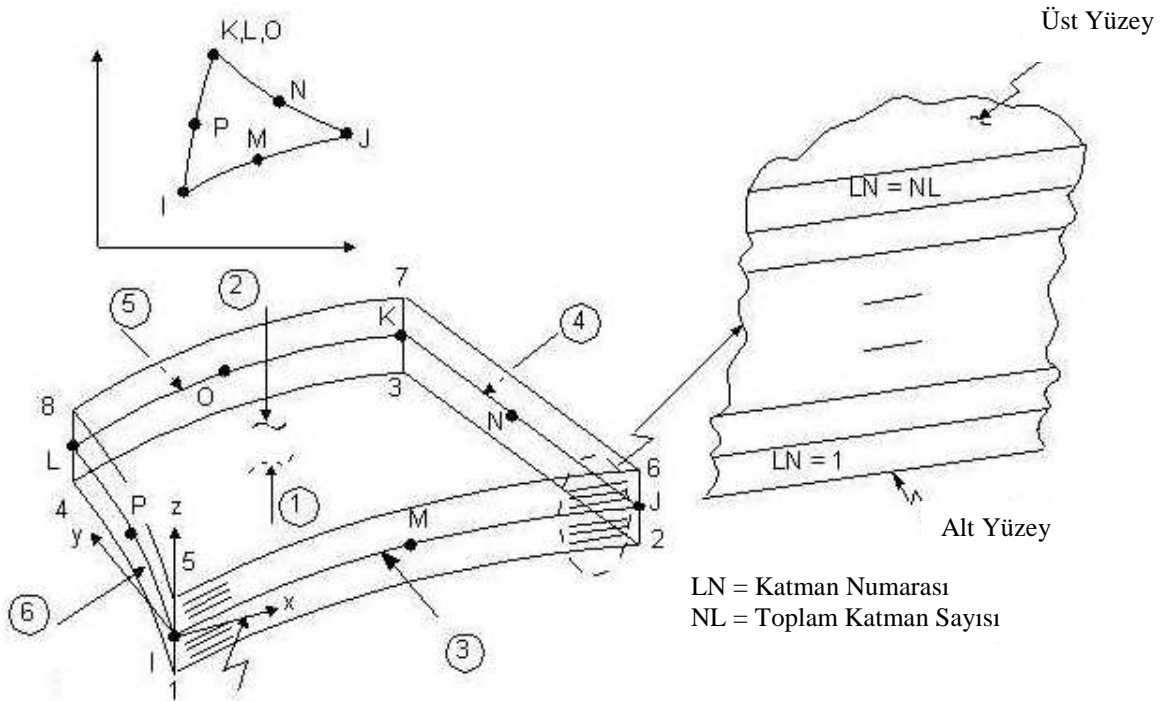
Bu bölümde kompozit basınç tankının farklı katman düzenlerinde ki maksimum patlama basıncı değerleri Ansys® sonlu eleman programı yardımıyla bulunmuştur. Modellemede hem metal astar hem de kompozit kısım birlikte düşünülmüş böylelikle hibrit bir yapının çözümü elde edilmiştir. Ayrıca analizde tankın hem silindirik hem de küresel kısımları birlikte modellenebilmiştir. Bu durum tankın kritik noktalarının analizine imkân sağlamıştır. Analizde Metal astar için 6061-T6 Alüminyum malzemesi ve kompozit malzeme için ise Kevlar-49- Epoksi malzemesi kullanılmıştır. Kompozit katmanın elyaf oryantasyonları analitik çözümlerden elde edilen ön parametreler yardımıyla hem çift 90° hem de simetrik olamayan katman düzenleri için; $[\pm 20^\circ, 90^\circ]$, $[\pm 15^\circ, \pm 20^\circ, 90^\circ]$, $[90^\circ, \pm 20^\circ, 90^\circ]$, $[90^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, 90^\circ]$ şeklinde belirlenmiştir.

Kompozitlerin sonlu eleman analizi yardımıyla modellenmesinde izotropik malzemelerden farklı olarak dört önemli husus göze çarpar. Bunlar uygun element tipinin belirlenmesi, eleman koordinat sisteminin uygun şekilde yönlendirilmesi,

kompozit plakanın katmanlarının tanıtılması ve malzeme için hasar kriterinin belirlenmesidir.

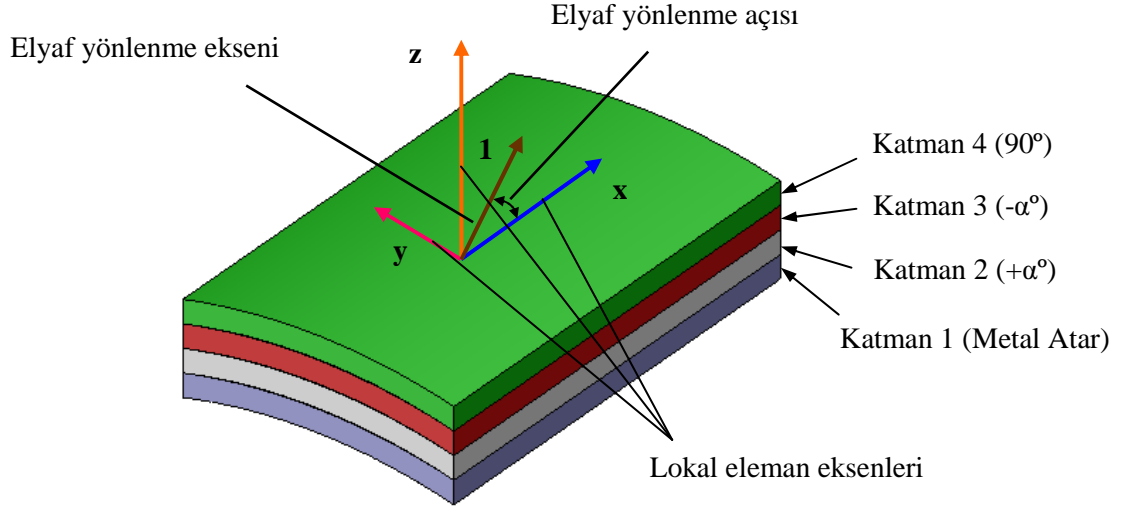
2.4.1. Kompozit Basınç Tankının Modellenmesi

Kompozit tankın modellenmesine ilk olarak eleman tipinin belirlenmesi ile başlanmış ve Shell 99 elemanı seçilmiştir. Shell 99, 8 düğümlü, lineer katmanlı, yapısal bir kabuk elemanıdır. Şekil 2.20.'de görüldüğü gibi bu 8 düğümün 4 adeti köşelerde 4 adeti ise orta noktadadır. Her bir düğüm 3 yönü öteleme ve 3 yönü de dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesine sahiptir. Shell 99 elemanında her bir katmanın alt, orta ve üst yüzeylerinde gerilme ve şekil değiştirmeler görülebilmektedir.



Şekil 2.20. Kompozit tankın SEM SHELL99 ağı

Eleman tipinin belirlenmesinde sonra basınç tankının cidar yapısı tanımlanmıştır. Şekil 2.21.'de de görüldüğü üzere cidar yapısı metal astar ve üzerinde kompozit katman olacak şekilde hibrit bir yapıda modellenmiştir.



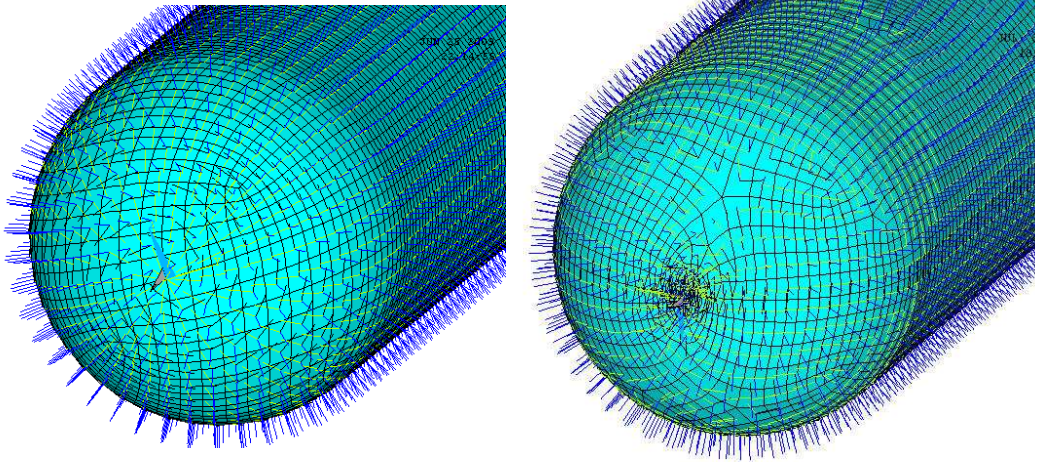
Şekil 2.21. Tank cidarının katman düzeni ve elyaf yönelme açıları.

Burada metal astar malzemesi ve kalınlığı değiştirilmeden kompozit kısmın cidar yapısı çeşitli konfigürasyonlarda düzenlenerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Metal astarın cidar kalınlığı 4.5 mm ve kompozit katmanın toplam katman kalınlığı 2.6 mm olup analizi gerçekleştirilmiş tüm katman düzenlerinde bu kalınlıklar değiştirilmemiştir. Böylelikle basınç tankının kompozit kısmının katman düzenlerindeki değişikliğin patlama basıncına etkisi incelenebilmiştir.

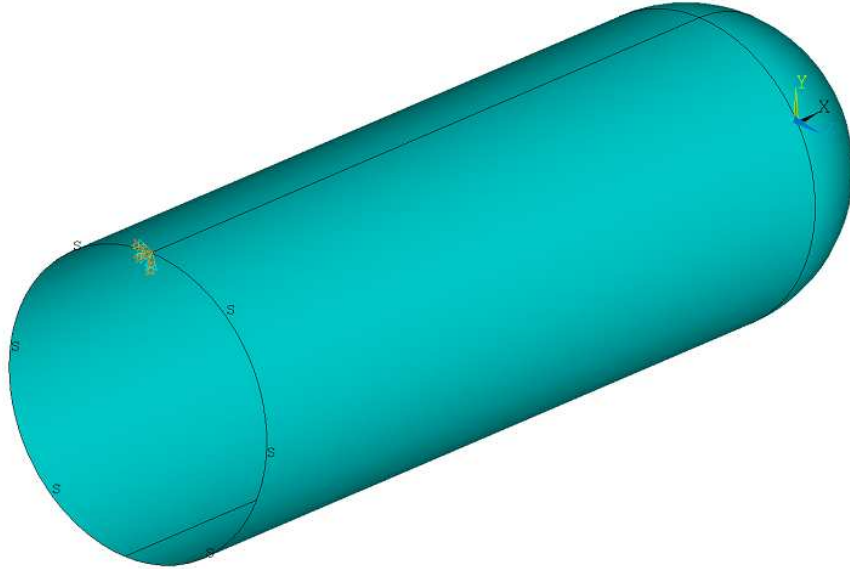
Sonraki aşamada kompozit tankın malzeme özellikleri ortotropik malzeme modelinde tanıtılmıştır. Metal astar için özellikleri Bölüm 2.2.1.'de verilmiş olan 6061-T6 Alüminyum malzemesi, kompozit kısım içinde özellikleri Çizelge 2.4.'te verilen Kevlar®-49 elyafları ve epoksi matris malzemesi kullanılmıştır.

Daha sonra kompozit tank modeli 3 boyutlu hexahedral element tipi ile mesh edilmiştir. Burada dikkate edilmesi gereken nokta element koordinat sisteminin (EKS) sırasıyla tankın silindirik ve küresel bölgelerinde yine silindirik ve küresel koordinat sistemine göre yönlendirilmiş olmasıdır. Şekil 2.22.'de tankın yönelmiş ve yönelmemiş element koordinat sistemleri ayrı ayrı görülmektedir. Mesh elemanlarının element koordinat sistemlerinin yönlendirilmesi sayesinde hem silindirik hem de küresel kısımlarda her bir katmanın elyaf doğrultusunun istenilen açıda yönelmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.22. Tank Elemanlarının EKS'leri yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş mesh durumu

Kompozit tankın sınır şartları ve yüklemeleri Şekil 2.23.'te gösterilmiştir. Ayrıca tankın boyutları da Çizelge 2.5.'de verilmiştir. Tam simetriden dolayı tank modelinin yarısı modellenmiş olup simetri düzlemi modelde S harfiyle gösterilmiştir. Ayrıca simetrik düzlemde bir düğümün tüm yönlerde hareketleri sınırlandırılmıştır. Tankın iç yüzeyine tankı hasara uğratabilecek iç basınç yüklemesi adım adım uygulanmıştır.



Şekil 2.23. Kompozit tankın sınır şartları

Çizelge 2.5. Basınç tankının boyutları

Tankın toplam boyu (mm)	295
Tank yarıçapı (mm)	65
Tankın metal astar cidar kalınlığı (mm)	4.5
Tankın kompozit kısmının cidar kalınlığı (mm)	2.6

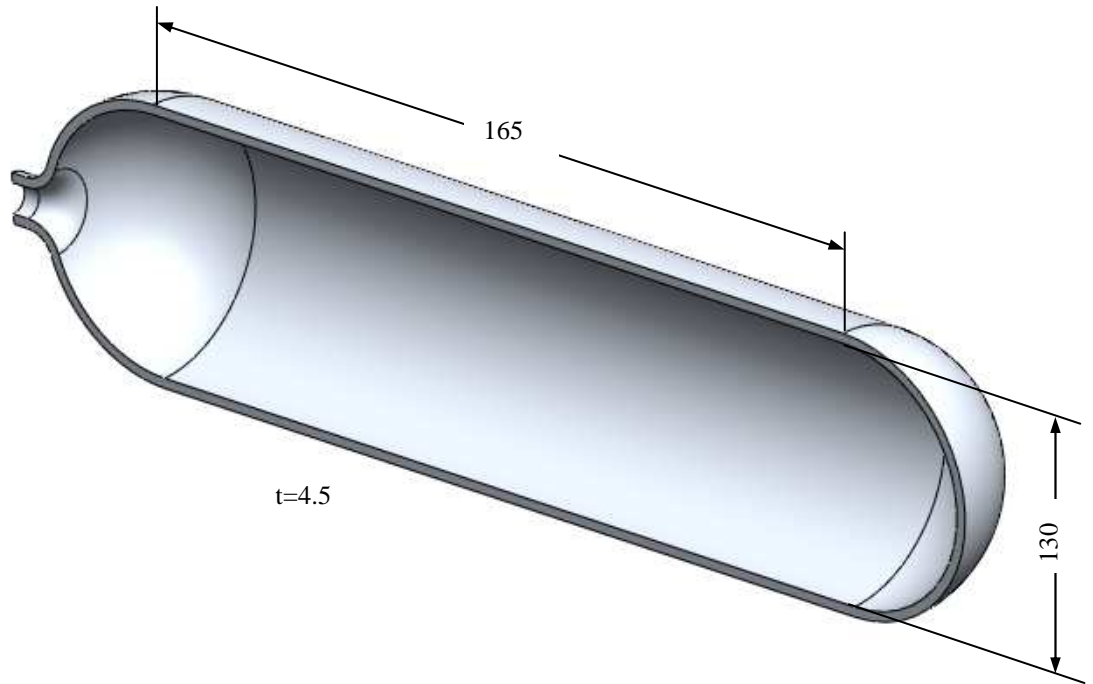
Program uygulanan herhangi bir iç basınç yüklemesi için çalıştırılır. Analiz sonlandığında iç basınçtan dolayı kompozit tankın hasar durumu metal astar için von Mises hasar kriteri, kompozit kısmın her bir katmanı için Tsai Wu hasar kriteri kullanılarak tankın hasara durumu incelenmiştir.

Bölüm 4.'de analizlere ait detaylar, sonuçlar ve analizlerin karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Metal Astarın Hidrolik Basınç Patlatma Deneyi

Tezin deneysel çalışma kısmında 6061-T6 alüminyum malzemeden üretilen metal astarın hidrostatik basınç patlama testi yapılmıştır. Şekil 3.1.'de geometrisi verilmiş olan metal astar derin çekme ve sıvama yöntemleri yardımıyla üretilmiştir.



Şekil 3.1. Alüminyum astarın geometrisi

3.1.1. Alüminyum Astarın Üretimi

Yüksek basınca dayanıklı metal basınç tankları dikişsiz olarak yekpare şekilde üretilmelidir. Tez çalışmasında yer alan alüminyum astarın imalat aşamaları şu şekildedir.

1. Aşama: 130mm çapa sahip 6m uzunluğunda yuvarlak 6061-T6 alüminyum profiller, şekil 3.2.'de görüldüğü gibi 50mm kalınlığında kesilerek kalın sac haline getirilir.



Şekil 3.2. Derin çekme presinde kalıp içindeki kalın sac

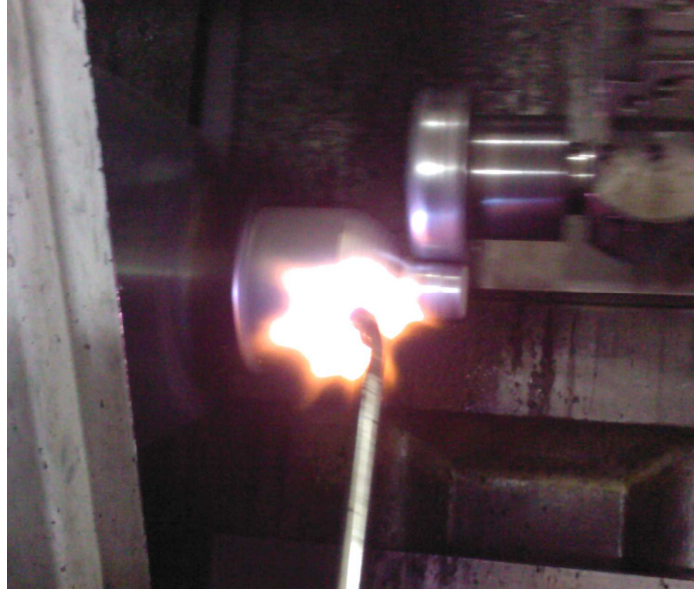
2. *Aşama:* Kesilen saclar 400-500 °C sıcaklığa ulaşana kadar tavlanırlar.

3. *Aşama:* Tavlama işlemli yapıldıktan sonra saclar şekil 3.3.'de de görüldüğü gibi 400tonluk derin çekme preslerinde çekilirler.



Şekil 3.3. Kalın sacın derin çekme presinde çekilmiş hali

4. *Aşama*: Bu aşamada derin çekme işlemi ile elde edilen yarı mamulün ağız kısımları ısıtılarak sıvama yöntemi ile Şekil 3.4.'de gösterildiği gibi büzülür.



Şekil 3.4. Sıvama yöntemiyle ağız büzme işlemi

5. *Aşama*: ağız kısımları büzülen tüpün ağız kısımlarının iç taraflarına diş açma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3.5.'de üretimi tamamlanmış bir alüminyum astar gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Üretimi tamamlanmış alüminyum astar

3.1.2. Deney Ekipmanları

Hidrolik basınç patlatma deneyi Şekil 3.6.'da görülmekte olan 1000 Bar kapasiteli, PLC kontrollü, servo motorlu hidrolik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Patlatılacak alüminyum astar bir ağzına takılmış tıpası ve diğer ağzına takılmış hidrolik hortumu ile birlikte Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. PLC kontrollü, servo motorlu hidrolik test cihazı



Şekil 3.7. Ekipmanları takılmış alüminyum astar

4. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde kompozit basınç tankının analitik, sayısal ve deneysel metotlar yardımıyla yapılan tasarım sonuçları sunulmuştur. İlk olarak metal astar kısma ait analiz sonuçları verilmiş daha sonra metal astarlı kompozit basınç tankına ait analiz sonuçları sunulmuştur.

4.1. Metal Astar Kısımına Ait Tasarım Sonuçları

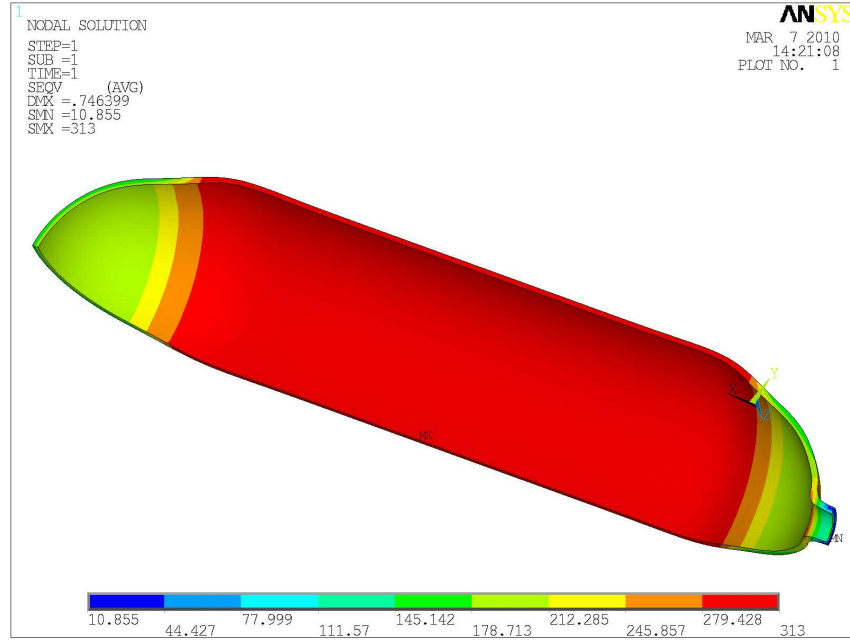
6061-T6 Alüminyumundan üretilen metal astar, kompozit tankın iç basınç yükünün yaklaşık %40'nı taşıyan kısmıdır. Tankın ISO 11439:2000 standardına göre 500Bar ve üzeri değerdeki patlama basıncına göre tasarımı yapılırken ön tasarım parametrelerinin hesaplanmasında maksimum patlama basıncı değeri standartta verilen değer 100 Bar üzerinde olacak şekilde 600Bar olarak alınmıştır. Bu sayede kritik bölgeleri dikkate alan nihai tasarımın standart ile belirlenmiş maksimum patlama basıncı değerinin üzerinde kalması hedeflenmiştir. metal astarın bahsi geçen basıncı taşıyabilecek minimum cidar kalınlığının hesabı von Mises hasar teorisine göre hem analitik hem de sayısal olarak gerçekleştirilmiş daha sonra deneysel olarak sonuçların doğruluğu irdelenmiştir. Analiz ve deney sonucunda bulunan değerler Çizelge 4.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Metal astarın farklı metotlara göre patlama basıncı değerleri

	Analitik Metot	Sayısal Metot	Deneysel Metot
Cidar kalınlığı (mm)	4.5	4.5	4.5
Patlama Basıncı (MPa)	27	24	22

Şekil 4.1.'de sayısal çözüm yardımıyla 24MPa değerindeki iç basınç sonucu 4.5mm cidar kalınlığına sahip metal astarda oluşan von Mises efektif gerilmeleri görülmektedir. Ayrıca analitik ve sayısal çözümlerdeki geometrik ve malzeme

özellikleri ile aynı olacak şekilde üretilmiş metal astarın hidrostatik patlatma deneyi sonucu hasar meydana gelmiş durumu Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Basınç tankında sayısal analiz sonucunda oluşan Von Mises gerilmeleri



Şekil 4.2. Metal astarın patlatma deneyi sonucu hasara uğramış hali

4.2. Metal Astarlı Kompozit Basınç Tankının Tasarım Sonuçları

6061-T6 Alüminyumundan üretilen metal astar üzerine kevlar®-49 elyafı, epoksi matrisli kompozit malzeme ile çift 90° ve simetrik olmayan katman düzenlerinde Çizelge 3.5.'de verilmiş konfigürasyonlarda tamamen sarılan basınç tankının hem analitik hem de sayısal olarak elyaf hasarına göre patlama basıncı değerleri verilmiştir. Ayrıca sayısal analizin, analitik analize göre sağladığı avantajlardan bahsedilmiş ve yine sayısal analizde element koordinat sisteminin yönlendirilmesinin gerekliliğine değinilmiştir.

Analitik çözümler katman teorisi temelinde EXCEL kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir. Şekil 4.3.'te oluşturulan programın EXCEL ara yüzü gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan kompozit kısma ait cidar kalınlıkları ön tasarım olarak yapılan ağ analizi yardımıyla bulunmuştur. Kompozit yapının hasar analizinde Tsai Wu hasar analizi kullanılmıştır.

Tsai Wu	6. Plak kalınlığı	Tsai Wu	Liner Mal. Özel			Piç = 335 Bar	
	90 derece		8 Alüm Plas	240		Riç = 65 mm	
0,9524	1,70 mm	0,95242	E ₁₁	0,1	240		
	5. Plak kalınlığı		E ₂₂	0,1	137	N _x = 1,09	
	-10 derece		v ₁₂	0,50000	240	N _y = 2,18	
0,4053	0,225 mm	0,37515	v ₂₁	0,5	240	N _{xy} = 0,00	
	4. Plak kalınlığı		G ₁₂	0,1	137	M _x = 0,00	
	10 derece					M _y = 0,00	
0,8507	0,225 mm	0,88683	Kompozit Mal. Özel			N _{xy} = 0,00	
	3. Plak kalınlığı		4 Kevler Frac	S _L	1520		
	-20 derece		E ₁₁	86,3	S _T	29	h ₀ = -3,55
0,3518	0,225 mm	0,29692	E ₂₂	0,05	S _{LT}	49	h ₁ = 0,95
	2. Plak kalınlığı		v ₁₂	0,34	S _{L(-)}	333	h ₂ = 1,18
	20 derece		v ₂₁	0,0002	S _{T(-)}	157	h ₃ = 1,40
0,9425	0,225 mm	1,01280	G ₁₂	0,02	S _{LT}	49	h ₄ = 1,63
	1. Plak kalınlığı						h ₅ = 1,85
	0 derece						h ₆ = 3,55
0,0002	4,5 mm	0,00015					

Şekil 4.3. Katman teorisi için hazırlana programın EXCEL ara yüzü

Ayrıca çift 90° ve simetrik olmayan katman düzenlerinde maksimum patlama basıncı değerine ulaşılmış basınç tanklarının deneysel olarak üretimi gerçekleştirilmiş ve hidrostatik patlama basıncı deneyine tabi tutulmuştur. Çıkan sonuçlar ve karşılaştırmalar çizelge ve şekillerde gösterilmiştir.

4.2.1. Ağ Analizi ile Ön Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Kompozit malzeme kalınlığı alüminyum astarda olduğu gibi patlama basıncına göre tayin edilmiştir. Kompozit kısım patlama basıncının %60 'nı taşıyacağı varsayılmıştır. Sarım açısı 20° olarak belirlenmiştir. Bu açı değeri, tamamı kompozit tanklar için geçerli bir açı olup 15° ile 30° arasında bir değerdir. Bu açı aralığı tankın küresel kısımlarının tam olarak sarılabilmesi için yapılan örnek sarımlar neticesinde bulunmuştur. Elyaf malzememiz Kevlar®-49 olup, matris malzemesi epoksi olarak seçilmiştir.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında elimizdeki tasarım parametreleri aşağıda verilmiş ve bu parametreler ışığında kompozit malzeme kalınlığı ağ analizinde yer alan kalınlık bağıntıları yardımıyla bulunmuştur.

$$p = 60 * 0,6 = 36MPa, \quad r_i = 65mm, \quad \alpha = 20^\circ$$

$$\sigma_f = 3,792GPa \quad (\text{Kevlar®-49'un çekme dayanımı})$$

$$\sigma_{fTeğ} = \%77 * \sigma_f = 3,792 * 0,77 = 2,919GPa$$

$$\sigma_{fHel} = \%75 * \sigma_{fTeğ} = 2,919 * 0,75 = 2,189GPa$$

$$V_{Hel} = 0,6, \quad V_{Teğ} = 0,65$$

Helisel yöndeki kompozit malzeme kalınlığı;

$$t_f = \frac{pr}{2\sigma_{fHelis} \cos^2 \alpha}; \quad t_{fHel} = 0.6mm$$

Teğetsel yöndeki kompozit malzeme kalınlığı;

$$t_f = \frac{Pr}{2\sigma_{fTeğ}} (2 - \tan^2 \alpha); \quad t_{fTeğ} = 0.76mm$$

$$t_{fToplam} = \frac{t_{fHel}}{V_{Hel}} + \frac{t_{fTeğ}}{V_{Teğ}} = \frac{0.6}{0.6} + \frac{0.76}{0.5}$$

$$t_{fHelisel} \cong 1mm$$

$$t_{fTeğTeğet} \cong 1.6mm$$

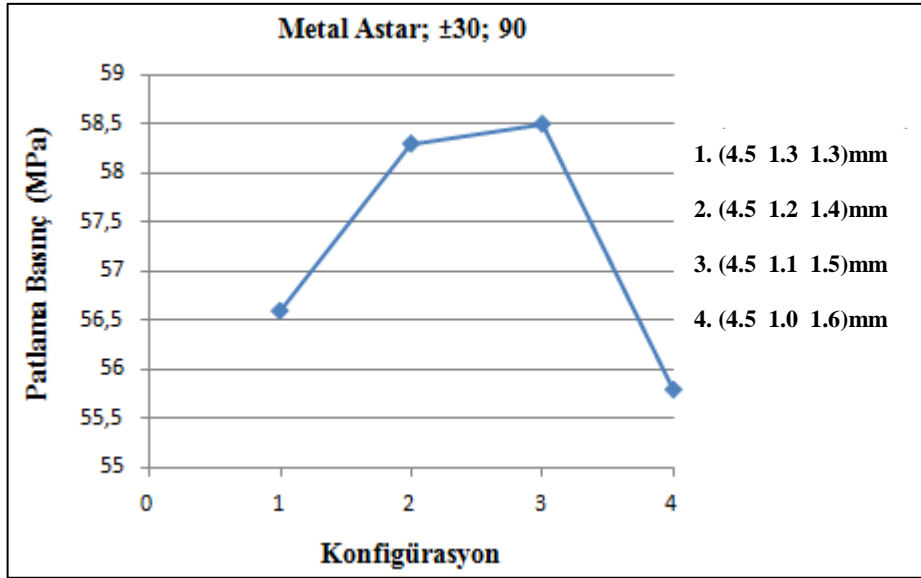
$$t_{fToplam} \cong 2.6mm$$

4.2.2. Analitik Analizlerin İrdelenmesi

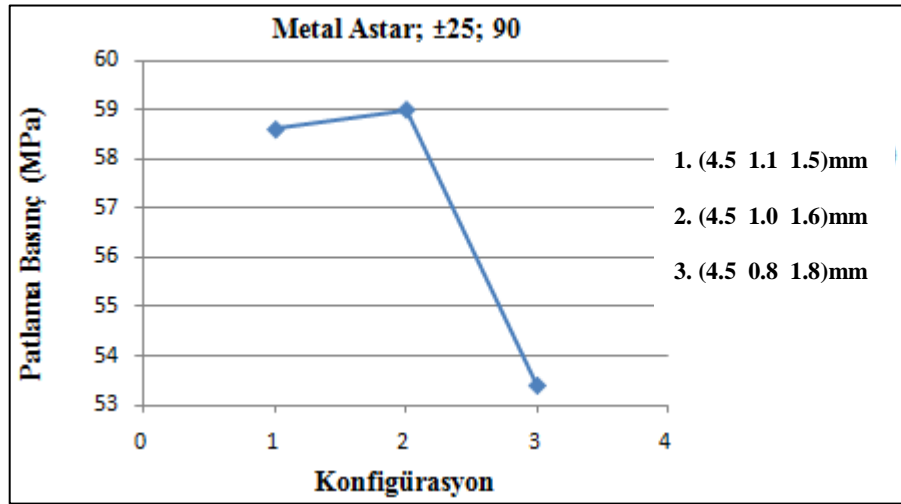
4.2.2.1. Maksimum Patlama Basıncına Göre Optimum Helisel Sarım Açısının Belirlenmesi

Çalışmanın bu safhasında metal astar için yapılan analizler ile birlikte ağ analizi neticesinde tankın metal ve kompozit kısmına ait hesaplanan ön tasarım parametrelerinin katman teorisini esas alan analitik yöntemle doğruluğu irdelenmiş ve optimum helis sarım açısı tespiti yapılmıştır. Analizler EXCEL kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla yapılmıştır. Analizde 4.5mm cidar kalınlığında Metal astar ve 2.6mm cidar kalınlığında kompozit katman beraber düşünülmüş ve hibrit bir çözüm elde edilmiştir. Analize simetrik olmayan sarım düzeninde helisel sarım açısının basınç tankının patlama basıncına etkisi incelenerek başlanmıştır. Helis açıları $\pm 30^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$ ve $\pm 10^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu incelemede toplam kompozit kısmın cidar kalınlığı değiştirilmeden helisel ve teğetsel cidar kalınlıklarının birbirlerine göre değişimi göz önünde tutulmuştur.

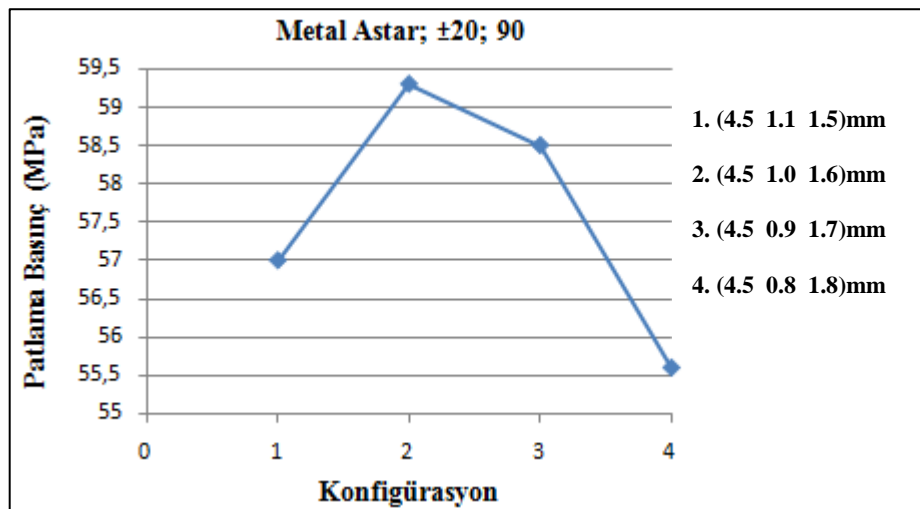
Burada örneğin (4.5 1.3 1.3) şeklinde verilen cidar kalınlıkları sırasıyla metal astar, $\pm \alpha$ helisel sarım, 90° teğetsel sarım katman kalınlıklarını göstermektedir.



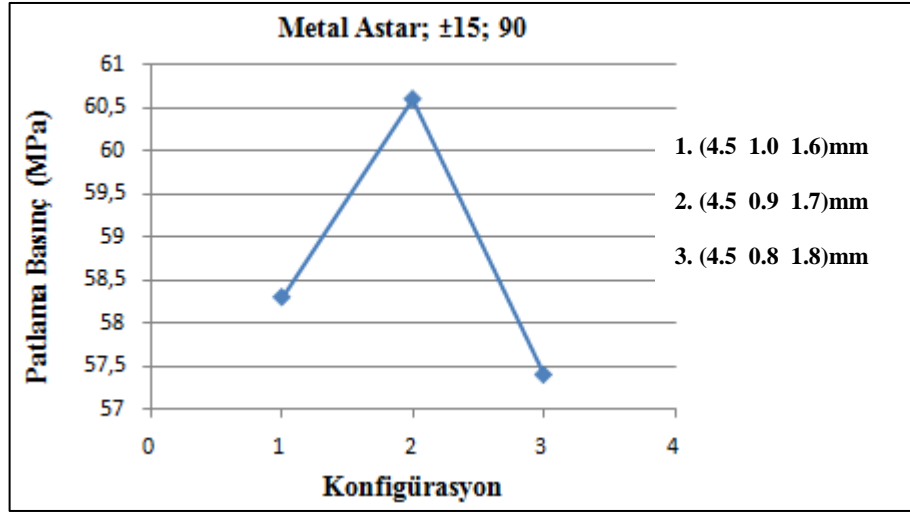
Şekil 4.4. $\pm 30^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri



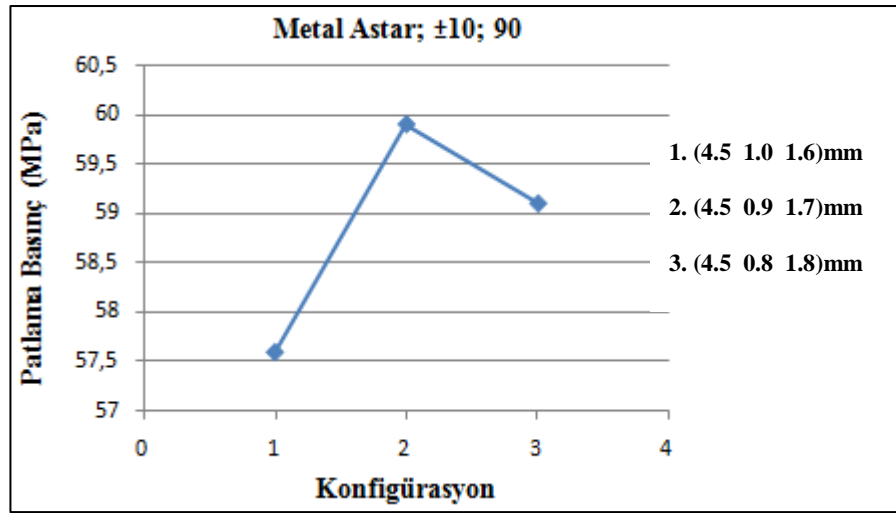
Şekil 4.5. $\pm 25^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri



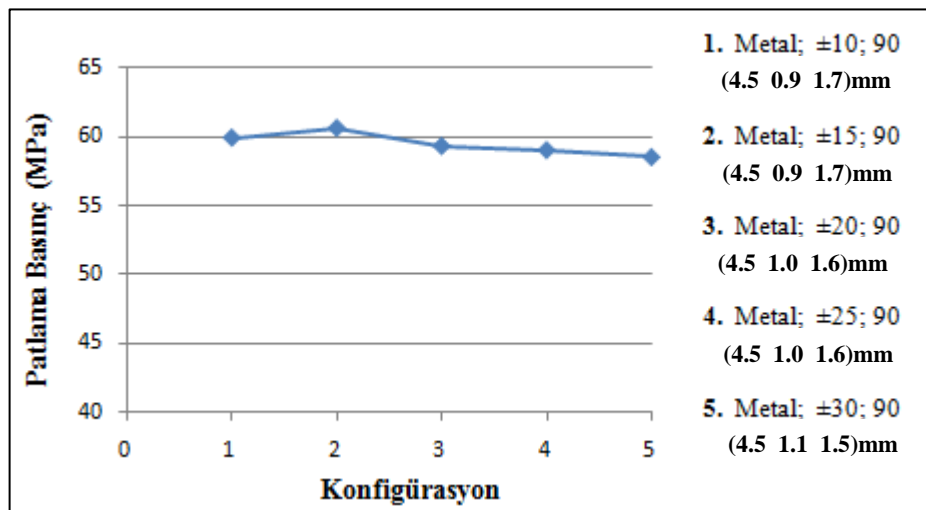
Şekil 4.6. $\pm 20^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri



Şekil 4.7. $\pm 15^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri



Şekil 4.8. $\pm 10^\circ$ helis açılı kompozit tankın maksimum patlama basıncı değeri



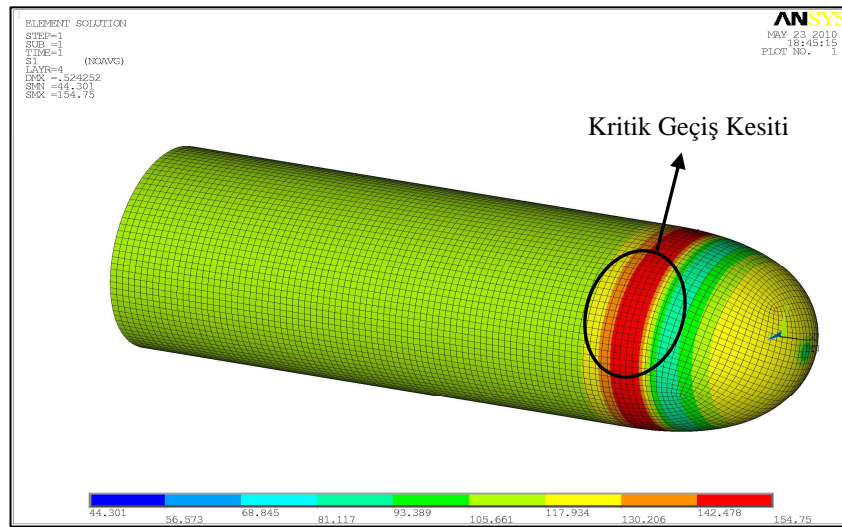
Şekil 4.9. Farklı helis açılı basınç tankının maksimum patlama basıncı değerleri

Şekil 4.4.-4.9.'da ki grafiklere bakıldığında kompozit basınç tankı için maksimum patlama basıncı değerine $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$ ve $\pm 20^\circ$ helis açıları ile ulaşılmaktadır. Sarım tekniği açısından 15° helis açısının altına düşemediğimiz düşünüldüğünde tasarıma $\pm 15^\circ$ ve $\pm 20^\circ$ helis açıları ile devam edilmiştir.

4.2.3. Sayısal Analizlerin İrdelenmesi

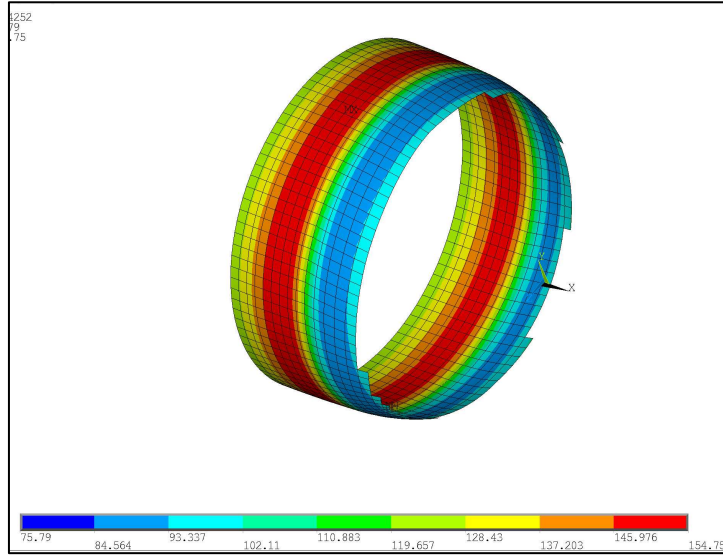
Analitik yöntemle yapılan analizlerde tankın sadece silindirik kısmı irdelenebilmektedir. Bu açıdan analitik yöntemden ön tasarım parametrelerinin elde edilmesinde faydalanılmıştır. Ancak sayısal yöntemle yapılan analizlerde kompozit tankın hem silindirik hem de küresel kısmı modellenbildiğinden daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde edildiğine inanılmaktadır. Bu yüzden kompozit tankın patlama basıncı hesaplamaları sayısal yöntemle yapılmıştır.

Şekil 4.10.'da sonlu eleman modeli verilen simetrik olmayan katman düzeninde [Metal astar, $\pm 20^\circ$, 90°] ve (4.5 0.9 1.7) cidar kalınlığında kompozit basınç tankına ait ilk katman hasarına yol açan ve 4 nolu kompozit katmanda oluşan elyaf yönündeki gerilmeler görülmektedir. Basınç tankında silindirik kesitte oluşan elyaf doğrultusundaki gerilme değeri 110MPa civarında olurken silindirik kısım ile küresel kısmın birleşim bölgesinde ki elyaf yönünde oluşan gerilme değeri 150MPa'a kadar çıkmaktadır. Bu durum kompozit basınç tankı için silindirik kısım ile küresel kısmın birleşim bölgesinin kritik geçiş kesiti olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.10. Kompozit katmanda elyaf yönünde oluşan gerilmeler

Kritik geçiş kesiti Şekil 4.11. da daha yakından gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kompozit katmanda kritik geçiş kesiti

Sayısal yöntemle kompozit tankın maksimum patlama basıncına göre tasarımı elyaf hasar dayanımına bir başka ifade ile son katman hasar teoremi dikkate alınacak Şekilde gerçekleştirilmiş olup hasar kriteri olarak Tsai Wu hasar kriteri kullanılmıştır.

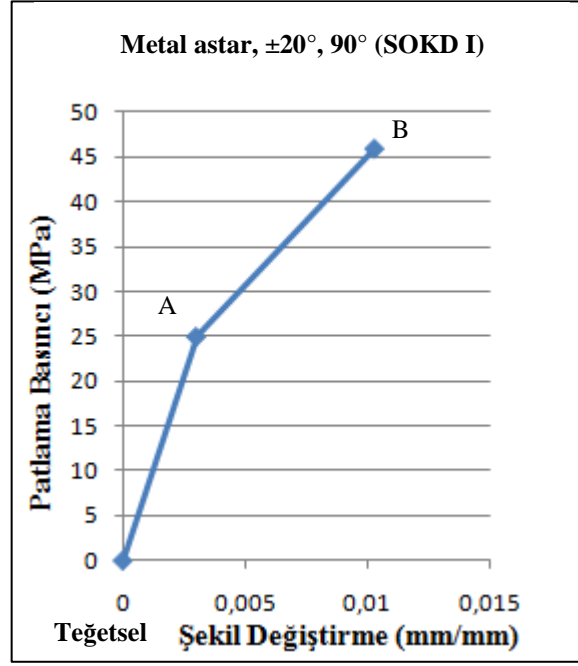
Endüstride kompozit basınç tanklarının katman düzeni klasik Şekliyle helisel sarım üzerine ($\pm\alpha$), teğetsel sarım 90° olarak karşımıza çıkar. Bu düzen izelge 4.2.'de SOKD I sütununda gösterilmiştir. Bu doğrultuda tasarım çalışmalarında kompozit basınç tankının patlama basıncına göre en iyi sarım düzenine yönelik analizlerde yapılmıştır. Bu analizler iki temel başlıkta gerçekleştirilmiştir. Birinci başlıkta klasik kompozit katman düzeninde ki teğetsel sarımın farklı bir durumuna yönelik yapılan analizlerdir. Bu durum Bölüm 4.2.3.1.'de ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Diğer başlıkta ise klasik kompozit katman düzeninde ki helisel sarımın farklı bir durumuna yönelik yapılan analizlerdir. Bu durum Bölüm 4.2.3.2.'de ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Çizelge 4.2.'de analizi yapılan katman düzenleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Analizi yapılan kompozit tabakanın katman düzenleri

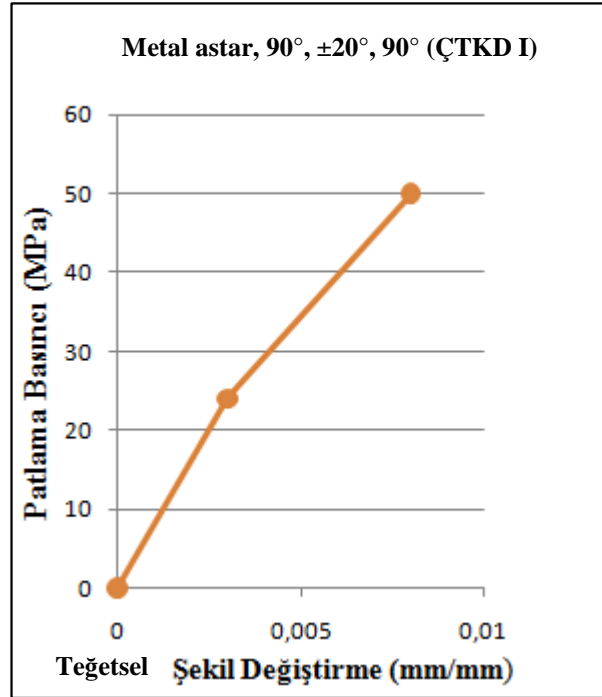
	Simetrik Olmayan Katman Düzeni (SOKD)				Çift Teğetsel Katman Düzeni (ÇTKD)			
	Metal astar ile [$\pm 20^\circ$, 90°] (SOKD I)		Metal astar ile [$\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, 90°] (SOKD II)		Metal astar ile [90° , $\pm 20^\circ$, 90°] (ÇTKD I)		Metal astar ile [90° , $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, 90°] (ÇTKD II)	
	Açı	Kalınlık (mm)	Açı	Kalınlık (mm)	Açı	Kalınlık (mm)	Açı	Kalınlık (mm)
1. Katman	+20	0.45	+20	0.225	90	0.85	90	0.85
2. Katman	-20	0.45	-20	0.225	+20	0.45	+20	0.225
3. Katman	90	1.7	+15	0.225	-20	0.45	-20	0.225
4. Katman			-15	0.225	90	0.85	+15	0.225
5. Katman			90	1.7			-15	0.225
6. Katman							90	0.85

4.2.3.1. Teğetsel Sarımın Patlama Basıncına Etkisi

Patlama basıncı açısından en iyi sarım düzenine yönelik yapılan çalışmaların ilk ayağında, teğetsel sarıma yönelik bir değişiklik gerçekleştirilmiştir. Yapılan değişiklikle, SOKD I olarak isimlendirilen, klasik katman düzeni olarak da bilinen simetrik olmayan kompozit katman düzeninin de ki [$\pm 20^\circ$, 90°] teğetsel sarımın (90°) toplam kalınlık değiştirilmeden kompozit katmanın başına ve sonuna yerleştirilerek yeni bir katman düzeni elde edilmiştir. ÇTKD I olarak isimlendirilen çift teğetsel (90°) katman düzeni [90° , $\pm 20^\circ$, 90°] ile SOKD I için yapılan sayısal patlama basıncı analizleri Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'de verilmiştir.



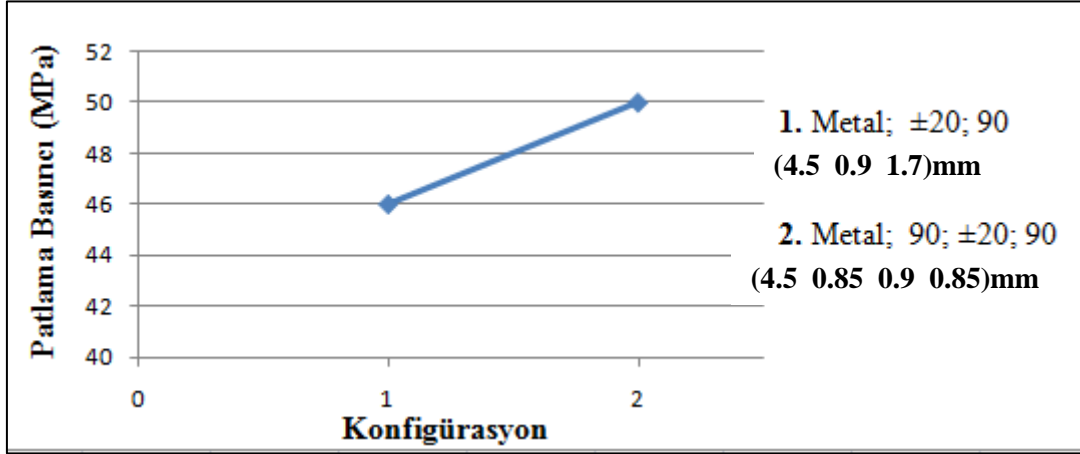
Şekil 4.12. SOKD I'in patlama basıncı grafiği



Şekil 4.13. ÇTKD I'in patlama basıncı grafiği

Şekil 4.12.'de ki SOKD I'in maksimum patlama basıncı grafiğinde A noktası ilk katman hasarının meydana geldiği basınç değeridir. İlk katman hasarı metal astarda

meydana gelmiştir. Grafikte B noktası elyaf hasarının meydana geldiği basınç değeri ile ilk katman hasarının meydana geldiği basınç değerinin toplanması ile bulunmuştur. Bu değer simetrik olmayan basınç tankına ait maksimum patlama basıncı değerini vermektedir.

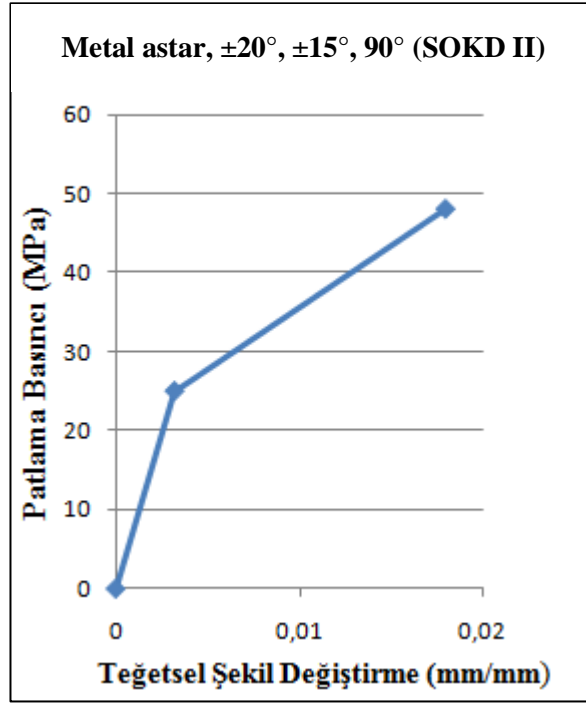


Şekil 4.14. Teğetsel sarımın patlama basıncına etkisi

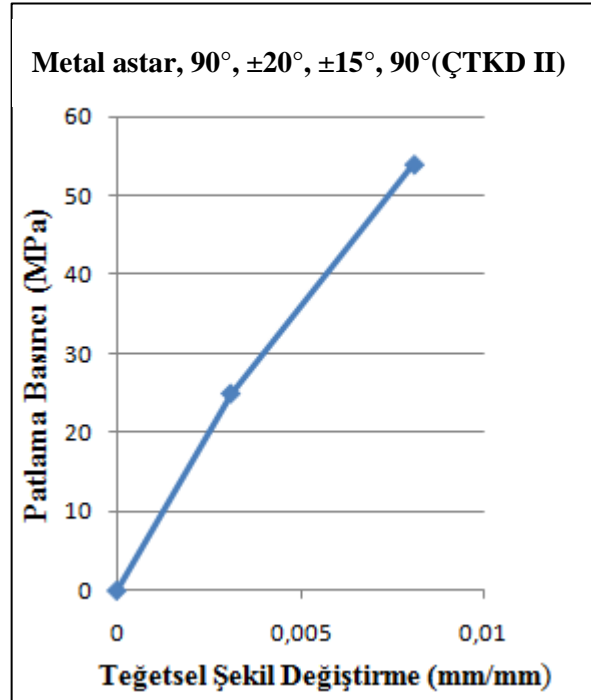
Şekil 4.14.'de görüldüğü gibi SOKD I'in maksimum patlama basıncı değeri 46MPa olarak elde edilmiş olup ÇTKD I'in patlama basıncı değeri 50MPa olarak bulunmuştur. Teğetsel sarımın bu şekilde çift 90° lik bir düzenlemesi maksimum patlama basıncında 40MPa lık bir artış sağlamıştır.

4.2.3.2. İlave Bir Helisel Katmanın Patlama Basıncına Etkisi

Aynı geometri ve malzeme durumu için daha yüksek patlama basıncına ulaşmak amacıyla en iyi katman düzenine yönelik yapılan çalışmalardan bir diğeri $\pm 20^\circ$ helisel katmana toplam katman kalınlığı değişmeyecek şekilde $\pm 15^\circ$ helisel katman ilave edilmesi durumudur. $\pm 15^\circ$ helis katmanı daha önce analizi yapılmış olan SOKD I'e ve ÇTKD I'e ilave ettiğimizde, elde edilen yeni katman düzenleri sırasıyla [$\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$, 90°] ve [90°, $\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$, 90°] şeklini almıştır. Bu katman düzenleri yine sırasıyla SOKD II ve ÇTKD II isimlerini alırlar. Yapılan değişiklikler ışığında elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. SOKD II'in patlama basıncına grafiği

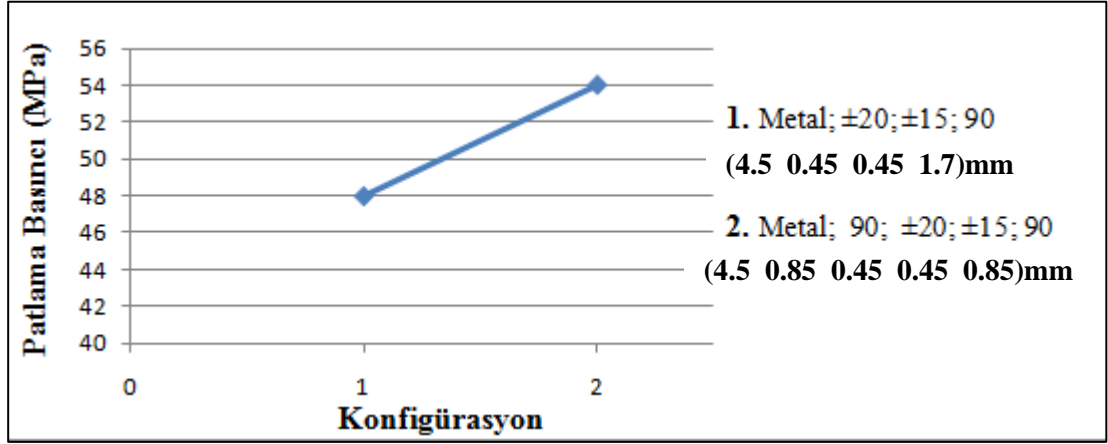


Şekil 4.16. ÇTKD II'nin patlama basıncı grafiği

Şekil 4.17. ve Şekil 4.14.'de bakıldığında ÇTKD I'in patlama basıncı değeri 50MPa'dır. Aynı katman düzenine ilave edilen $\pm 15^\circ$ helisel katmanlı kompozit sarımın yani ÇTKD II'nin patlama basıncı değeri 54MPa'dır. Burada 4MPa'lık bir

basınç artışı görülmektedir. Aynı şekilde SOKD I'in patlama basıncı değeri 46MPa, simetrik olmayan katma düzenine ilave edilen helis katmanlı kompozit katmanın yani SOKD II'nin patlama basıncı 48MPa dır. Buradaki artış 2MPa değerindedir.

Basınç artışlarından görülmektedir ki ilave helis katmanının patlama basıncını artırma yönünde olumlu bir etkisi olmaktadır.



Şekil 4.17. İlave helis katmanının patlama basıncına etkisi

Nihayetinde kompozit basınç tankının klasik katman düzeninde [$\pm 20^\circ$, 90°] toplam kalınlık değiştirilmeden hem teğetsel hem de helisel katmanlarda yukarıda bahsedilen değişiklikler yapıldığında oluşan yani katman düzeni [90° , $\pm 20^\circ$, $\pm 15^\circ$, 90°] için patlama basıncı artışı 8MPa değerindedir.

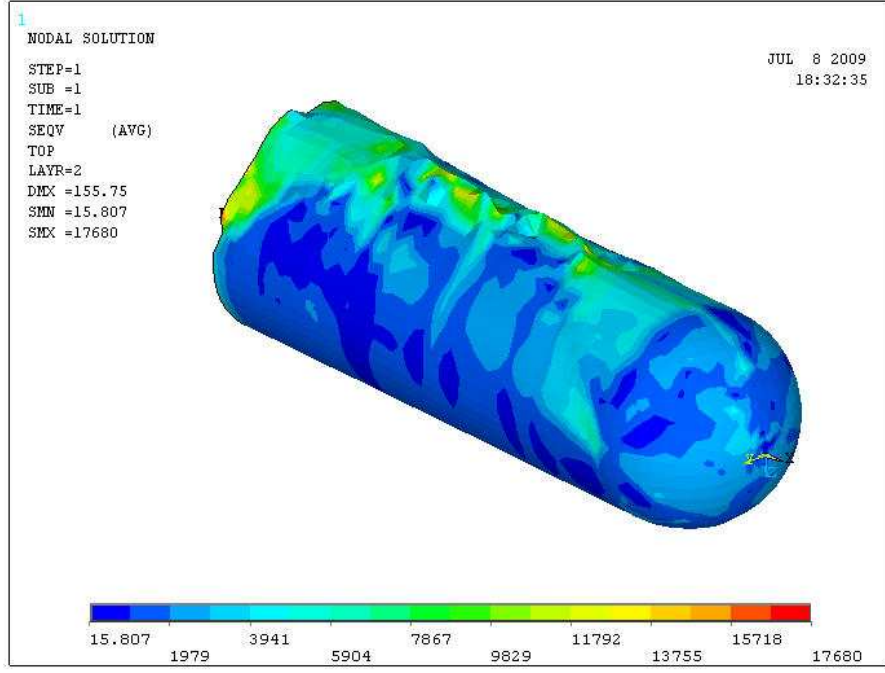
Ayrıca yeni katman düzeninde kritik geçiş bölgesindeki gerilme yoğunlaşması eski katman düzenine göre Çizelge 4.3.'de görüldüğü gibi önemli oranda azalmıştır.

Çizelge 4.3. ÇTKD II ile SOKD I için elyaf yönü gerilmelerinin karşılaştırılması

	Silindirik kısımda oluşan max. elyaf yönü gerilmesi (MPa)	Kritik geçiş bölgesinde oluşan max. elyaf yönü gerilmesi (MPa)	Gerilme oranı farkı
[90°, ±20°, ±15°, 90°]	1298	1423	% 10
[±20°, 90°]	1332	1938	%45

4.2.3.3. Element Koordinat Sistemi Yönlendirmesinin Gerilme Hesaplamalarına Etkisi

3 litre hacme sahip kompozit basınç tankının tasarım çalışmalarındaki ilk adım sonlu eleman modeline ait element koordinat sisteminin yönlendirilmesinin yapılmasıdır. Burada tankın silindirik kısmındaki elemanların element koordinat sistemi silindirik olarak yönlendirilmiş, küresel kısmındaki elemanların eleman koordinat sistemi küresel şekilde yönlendirilmiştir. Bu yönlendirme sayesinde kompozit katmandaki elyaf yönlerinin tank üzerinde doğru şekilde tanımlanması sağlanmıştır. Bölüm 2.'de Şekil 2.22 'de element koordinat sisteminin yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş durumu gösterilmiştir. Yönlendirmenin etkisini daha iyi görebilmek için simetrik olmayan katman düzeninde [Metal astar, ±20°, 90°] ve (4.5 0.8 1.8) cidar kalınlıklarında kompozit basınç tankına ait eleman koordinat sistemi yönlendirilmiş ve yönlendirilmemiş iki analiz gerçekleştirilmiştir. Eleman koordinat sistemi yönlendirilmiş şekliyle yapılan analizin 4. nolu kompozit katmana ait gerilme durumu Şekil 4.9.'da verilmiş ve maksimum gerilmenin 150MPa oluşu görülmüştü. Eleman koordinat sistemi yönlendirilmemiş şekliyle yapılan ikinci analiz Şekil 4.18.'de gösterilmiştir. Bu modelde oluşan gerilmelere bakıldığında oldukça yüksek gerilmelerin elde edildiği ayrıca tank yüzeyinin bozulduğu görülmektedir. Bu iki analizden de anlaşılacağı üzere kompozit yapılarda element koordinat sisteminin yönlendirilmesi doğru sonuçlara ulaşmak açısından çok büyük önem taşımaktadır.



Şekil 4.18. Düzensiz ağ yapısında modelde oluşan gerilmeler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında günümüz sanayisinde önemli bir yere sahip olan ve ülkemizde hali hazırda üretilmeyen ISO 11439:2000 tarafından Tip III olarak isimlendirilen, 3 Litre hacme sahip dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının imalata hazır hale getirilecek şekilde tasarımının yapılması amaçlanmıştır.

Yapılan tasarımın ilk aşamasında kompozit basınç tankının maksimum patlama basıncına göre dayanımını sağlamaya yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Kompozit basınç tankının tasarımına yönelik ön tasarım parametrelerinin belirlenmesinde ağ analizinden faydalanılmıştır. Ağ analizinden elde edilen sonuçların doğruluğunun irdelenmesi ve optimum helis sarım açısına karar verilmesi katman teorisi temelinde EXCEL kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla yapılmıştır. Kompozit tanka ait nihai tasarım sonlu eleman programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde optimum metal astar ve kompozit katman cidar kalınlığı ile en iyi kompozit katman düzenine ait tasarım parametreleri elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları aşağıda belirtildiği şekilde sıralayabiliriz.

Bu tez çalışmasında hem silindirik hem de küresel kısma sahip olan ve bu yüzden modellenmesinde zorlukları olan kompozit basınç tankının Ansys® sonlu eleman programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modellemede dikkat çeken en önemli nokta kompozit katmanın eleman koordinat sisteminin uygun şekilde yönlendirilmesinin yapılmış olmasıdır. Bu sayede kompozit katmanın elyaf açısı oryantasyonu istenilen şekilde modele uygulanabilmiştir.

Tankın sonlu eleman analizinde kompozit basınç tanklarında kompozit cidar için kritik bölge, metal kısmında olduğu gibi tankın silindirik kısmı değil, silindirik kısım ile küresel kısmın birleştiği bölgedir. Bu durumda ağ analizi ve katman teorisi ile yapılan analizler neticesinde elde edilen verilerin levha için uygun olduğu ve teorik olarak bir kompozit basınç tankı tasarımı için yeterli olmadığı görülmüştür.

Kompozit tanklarda dayanım açısından en iyi katman düzeninin $\pm 54.7^\circ$ olduğu analitik olarak ispat edilmiştir. Ancak imalat sonrası tank yüzeyinin açılı bir sarımdan dolayı pürüzlü bir görünüme sahip olacağı ve helisel katmanın sarımı aşamasında elyafların birbirinin üzerine her yerde paralel gelememesi durumunda katmanlar arasında açıklıkların olabileceği gibi dezavantajlarından dolayı 90° 'lik teğetsel sarımlı katman eklenmesi gerekli görülmüştür.

Kompozit tank tasarımında klasik kompozit katman düzeni olarak bildiğimiz ve bu çalışmada $[\pm 20^\circ, 90^\circ]$ olarak belirlenen katman düzenine ait maksimum patlama basıncı değeri 46MPa bulunmuştur. Ancak çalışmada en iyi katman düzeni olarak nitelendireceğimiz toplam kompozit katman cidar kalınlığı değiştirilmeden çift 90° ve mevcut helisel katmana ilave edilen ikinci bir helis katmanlı kompozit katman düzeni $[90^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, 90^\circ]$ ile yapılan analizler neticesinde bulunan maksimum patlama basıncı 54MPa olarak bulunmuştur. Bu iki katman düzeni arasındaki patlama basıncı artışı yaklaşık %17.5'dir.

Tez çalışmasında elde edilen en iyi katman düzeni $[90^\circ, \pm 20^\circ, \pm 15^\circ, 90^\circ]$ için gerilme yoğunlaşması klasik katman düzenine $[\pm 20^\circ, 90^\circ]$ göre önemli ölçüde azalmıştır.

Eğer 3lt'lik kompozit basınç tankı (Tip III) aynı maksimum patlama basıncına göre sadece alüminyumdan üretilmiş olsaydı (Tip I) %45 daha ağır olacaktı.

Yapılan tez çalışmasında kompozit basınç tankının analitik ve sayısal olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda gerçekleştirilen analizlerde toplam cidar kalınlığı değiştirilmeden farklı katman düzenlerinin patlama basıncına etkileri incelenmiştir. İleriki çalışmalarda metal astarlı kompozit basınç tankının elde edilen tasarım parametreleri yardımıyla üretilmesi ve patlama basıncı testlerinin yapılarak analitik ve sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- (1) ISO 11439:2000, Gas cylinders - High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles, International Organization for Standardization
- (2) R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- (3) N. L. Hancox, R. M. Mayer, Design Data For Reinforced Plastics, Chapman&Hall, London, 1994.
- (4) M. E. Tuttle, Structural Analysis of polymeric composite Materails, Marcel Dekker, 2003.
- (5) P. K. Mallick, Fiber –Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Marcel Dekker INC. , NY and Basel, 1988.
- (6) Misag, Flaman sargı tekniği ile kompozit malzeme kullanılarak yüksek basınca dayanıklı optimum boru tasarımı, Tübitak, Ankara, 2001.
- (7) B. Ö. Olgun, Kompozit Yama İle Tamir Edilmiş, Çatlaklı Filaman Sarım Borularda Kırılma Analizi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- (8) N. Tarakçioğlu, Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız Filaman Sarma Cam-Epoksi Borularda Sarım Açısının Malzeme Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1992.
- (9) 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, 1997.

- (10) J. M. Lifshitz, H. Dayan, Filament-wound pressure vessel with thick metal liner, *Composite Structures*, 32, 313–323, 1995.
- (11) H. Fukunaga and M. Uemura, Optimum Design of Helically Wound Composite Pressure Vessels, *Composite Structures*, 1, 31-49, 1983.
- (12) M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure, *Composite Structures* 53, 483-491, 2001.
- (13) R. R. Chang, Experimental and theoretical analyses of first-ply failure of laminated composite pressure vessels, *Composite Structures* 49, 237-243, 2000.
- (14) B. Balya, Design And Analysis Of Filament Wound Composite Tubes, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Ankara 2004.
- (15) A. Önder, First Failure Pressure of Composite Pressure Vessels, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İZMİR, Şubat 2007.
- (16) J. C. Velosa, J. P. Nunes, P. J. Antunes, J. F. Silva, A. T. Marques, Development of a New Generation of Filament Wound Composite Pressure Cylinders, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol.19, 1/2, 2007.
- (17) P. J. Antunes, G. R. Dias, J. P. Nunes and F. W. J. Van Hattum, Finite Element modeling of Thermoplastic Matrix Composite Gas Cylinders *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 21, 411, 2008.
- (18) A. K. Roy, and S. W. Tsai, Design of Thick Composite Cylinders, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 110, 255-62, 1988.
- (19) O. Sayman, Analysis of multi-layered composite cylinders under hygrothermal loading, *Composites: Part A*, 36, 923-33, 2005.

- (20) S. Kamat, X. Su, B.S. Forsyth, C. Keddy, C. Chamis, Flament Winding Simulation of a Composite Overwrapped Pressure Vessel, SAMPE Sempozyum, 2001.
- (21) I. H. Akçay, I. Kaynak, Analysis of Multilayered Composite Cylinders under Thermal Loading, J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 24, No. 11, 2005.
- (22) H. Bakaiyan, H. Hosseini, E. Ameri, Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Combined Internal Pressure and Thermo mechanical Loading with Thermal Variation, Composite Structures, 88, 532-541, 2008.
- (23) L. Gemia, N. Tarakçioğlu, A. Akdemir ve Ö. S. Şahin, Progressive Fatigue Failure Behavior Of Glass/Epoxy (± 75)₂ Filament-Wound Pipes Under Pure Internal Pressure, Materials & Design, Vol. 30, 4293-4298, 2009.
- (24) J. C. Choi, S. Y. Jung, ve C. Kim, Development Of An Automated Design System of a CNG Composite Vessel Using A Steel Liner Manufactured Using The DDI Process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 24, 781-788, 2004.
- (25) D. Pavlovski, B. Mislavsky ve A. Antonov, CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, Reinforced Plastics, Sayfa: 36-38, 2007.
- (26) S. Cherevatsky, A. Cherevatsky, H. Dayan ve A. Stepanov, New Design of Composite/Metal Gas Storage Vessels and Propellant Tanks, AIAA 2004-3508.
- (27) B. Djehiche, M. Eddahbi, X. K. Sun, S.Y. Du ve G. D. Wang, 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.

- (28) W. H. Tam, P. S. Griffin ve A. C. Jackson, Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Pressurant Tank Assembly, AIAA 2002-4349.
- (29) W. H. Tam, Ian A. Ballinger, J. Kuo, W. D. Lay, S. F. McCleskey, P. Morales, Z. R. Taylor ve S. J. Epstein, Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Xenon Conical Pressure Vessel, AIAA 96-2752.
- (30) L. Parnas ve N. Katirci, Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions, Composite Structures, 58, 1, Sayfa: 83-95, 2002.
- (31) TS 138 EN 10002-1, Metalik malzemeler, Çekme deneyi, Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, 2004.
- (32) R. C. Hibbeler, Mechanics of Materials, Prentice Hall, Inc., Singapore, 2005.
- (33) Mil-Hdbk-17-3E, DOD Coordination Working Draft, 1998.
- (34) M. E. Tuttle, Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Inc., New York, 2004.
- (35) L. P. Kollar, George S. Springer, Mechanics of Composite Structures, Cambridge University Press, 2003.
- (36) C. C. Liang, H. W. Chen ve C. H. Wang, Optimum Design Of Dome Contour For Filament-Wound Composite Pressure Vessels Based On A Shape Factor, Composite Structures, 58, 469–482, 2002.
- (37) R. M. Jones, Mechanics of composite materials, McGRAW-Hill, Co., 1975.
- (38) S.W. Tsai, Composite Design, Think Composites, USA, 1987.

- (39) E. J. Barbero, Introduction to Composite Materials Design, Failure and Strength Design, Taylor & Francis, USA, 1999.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Barış KALAYCIOĞLU

Doğum Tarihi : 18.08.1977

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lisans; Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği 1999
Yüksek Lisans; Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği 2004

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar

Key Yapı A.Ş. / Ankara (Tasarım Mühendisi) 2000-2001
Altes A.Ş. / Ankara- İstanbul (Tasarım Mühendisi) 2001-2002
Kırıkkale Üniversitesi / Kırıkkale (Arş. Gör.) 2002-

Yayımları (SCI)

1) M.H. Dirikolu and B. Kalaycioglu, Characterisation of The Mechanical And Thermal Properties of A Double Base Propellant, Materials Research Innovations, Vol 14, No 4, September 2010.

2) E. Ercan, A. Erdemir, Y. O. Zorba, A. U. Eldeniz, M. Dalli, B. Ince, B. Kalaycioglu, Effect of Different Cavity Disinfectants on Shear Bond Strength of Composite Resin to Dentin, The Journal of Adhesive Dentistry, 11, 2009.

3) Y. O. Zorba, A. Erdemir , E. Ercan, A. U. Eldeniz, B. Kalaycioglu and M. Ulker, The Effects of Three Different Desensitizing Agents on the Shear Bond Strength of Composite Resin Bonding Agents, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2010.

4) H. T. Cift, O. Cetik, B. Kalaycioglu, H. Dirikolu, K. Ozkan, F. Eksioglu, Biomechanical Comparison Of Plate-Screw And Screw Fixation İn Schatzker Type 4 Fractures, Revue de Chirurgie Orthopédique, 2010.

Yayınları (Diğer)

B. Kalaycıoğlu, M.H. Dirikolu ve V. Çelik, Çift Bazlı Katı Roket Yakıtının Ekstrüzyon İşlemiyle Şekillendirmesinin Sonlu Eleman Metoduyla Modellenmesi, Pamukkale University-Journal of Engineering Sciences, 13, No.1,31-37, 2007.

B. Kalaycıoğlu ve M.H.Dirikolu, Dikissiz metal astarlı ve kompozit sargılı yüksek basınç tankı tasarımı, Int. J. Eng.Research and Development, 1, No.2, 53-60, 2009.

E. Ercan, Y. O. Zorba, M. Dalli, B. Ince, Ç. T. Dülgergil B. Kalaycıoğlu, İki Farklı Dolgu Maddesinin V. Sınıf Kaviteilerin Kırılma Direncine Etkisi, Türkiye Klinikleri Diş Hekimliği Bilimleri Dergisi, 2008-9920.

Ercan E, Erdemir A, Zorba YO, Eldeniz AU, Kalaycıoğlu B, Dalli M. Farklı kavite dezenfektanlarının kompozit rezinin dentine bağlanma dayanımı üzerine etkisi, Restoratif Diş Hekimliği Derneği V. Bilimsel Kongresi ve XII. Diş Hastalıkları ve Tedavisi Ana 2008.

Erdemir A, Zorba YO, Ercan E, Eldeniz AU, Kalaycıoğlu B., Yeni Rezin Esaslı Kök Kanal Dolgu Patlarının Makaslama Kuvvetlerine Karşı Bağlanma Dirençlerinin Karşılaştırılması, Türk Endodonti Derneği 3. Bilimsel Sempozyumu, 15, Antalya, Türkiye, 23-27 Nisan 2008.

Zorba YO, Erdemir A, Ercan E, Eldeniz AU, Kalaycıoğlu B., Farklı Desensitizan Ajanların Kompozit Rezinin Makaslama Kuvvetlerine Karşı Bağlanma Dirençleri Üzerine Etkisi, Türk Endodonti Derneği 3. Bilimsel Sempozyumu, S88, Antalya, Türkiye, 23-27 Nisan 2008.

Araştırma Alanları

Mekanik Tasarım, Kompozit Malzemeler, Kırılma Mekanikliği, Sonlu Elemanlar,