

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT SARGILI BORULARDA PATLAMA BASINCININ İNCELENMESİ

Muhammet Burakhan AKGÜN

OCAK 2015

Makine Anabilim Dalında Muhammet Burakhan AKGÜN tarafından hazırlanan KOMPZİT SARGILI BORULARDA PATLAMA BASINCININ İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Ali ERİŞEN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin Yüksek Lisans tezi olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hakan ARSLAN
Danışman

Jüri Üyeleri

Üye : Yrd.Doç.Dr. Hakan ARSLAN _____

Üye : Yrd.Doç.Dr. Osman BİCAN _____

Üye : Doç.Dr. Sadettin ORHAN _____

16 / 03 / 2015

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

Prof. Dr. Mustafa Yiğitoğlu
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

KOMPOZİT SARGILI BORULARDA PATLAMA BASINCININ İNCELENMESİ

AKGÜN, Muhammet Burakhan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hakan ARSLAN

Ocak 2015, 75 sayfa

Bu çalışmada Cam Elyaf / Epoksi kompozit malzemeden 65mm dış çap ve 1.7mm cidar kalınlığına sahip 650mm boyundaki silindirik boruların patlama basıncına göre tasarımı, analitik ve sayısal yöntemler ile gerçekleştirilmiş ve daha sonra İplikli Sarım Yöntemiyle kompozit boruların üretimi yapılmıştır. Boruların teorik analizleri Katman Teorisi yardımıyla yapılmış, hasar kriteri olarak Tsai-Wu hasar kriterinden yararlanılmıştır. Sayısal analizler ANSYS Sonlu Eleman Programı kullanılarak gerçekleştirilmiş, programda kompozit boruların modellenmesinde kompozit katmanın elyaf sarım açılarını doğru şekilde tanımlayabilmek için eleman koordinat sisteminin bu açılara uygun şekilde yönlendirilmesi sağlanmıştır. Kompozit boruların elyaf sarım açıları $[90^\circ, \pm 55^\circ, 90^\circ]$ ve $[\pm 55^\circ, 90^\circ, 90^\circ]$ şeklinde iki farklı konfigürasyon da seçilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kompozit boruların patlama basıncına elyaf sarım açılarının etkileri incelenmiştir. Ayrıca analitik, sayısal ve deneysel patlama basıncı değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, farklı sarım açıları için bütün sayısal, analitik ve deneysel sonuçlar göreceli olarak birbirleri ile uyumlu çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Filament sargı, Yüksek basınç

ABSTRACT

ANALYSIS OF BURST PRESSURE OF COMPOSITE WINDING PIPES

AKGÜN, Muhammet Burakhan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Ph. Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hakan ARSLAN

January 2015, 75 pages

In this study, the glass fiber / epoxy composite material, 65 mm outside diameter and 1.7mm wall thickness with a 650 mm extent cylindrical pipes bursting pressure by the design of analytical and numerical methods is achieved with then Filament Winding Method composite pipes were produced. The analytical analysis of pipes made with Pipe Layer Theory, failure criteria as Tsai Wu failure criteria was used. Quantitative analysis was performed on ANSYS Finite Element Program, In the program for modeling in order to correctly identify composite fiber winding angles of the layers directing element of the coordinate system is provided in accordance. Fiber winding angles of the composite pipe $[90^\circ, \pm 55^\circ, 90^\circ]$ and $[\pm 55^\circ, 90^\circ, 90^\circ]$ has been selected in two different configurations. As a result of the analysis that fiber winding angles effects burst pressure of composite pipes were investigated. In addition, analytical, numerical and experimental burst pressure values were compared . According to the results obtained; all for different winding angles of analytical and experimental results is consistent with the relatively to each other.

Key Words : Composite, Filament Winding, High pressure

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkânlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan ARSLAN' a, bütün çalışmalar esnasında yanımda desteklerini esirgemeyen hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Barış KALAYCIOĞLU' na, deneysel çalışmalar süresince desteklerini esirgemeyen MAK-SAV yöneticisi Emrah ÖLMEZBAŐ' a teşekkür ederim.

Hayatta edindiğim başarıların zeminin hazırlayan sevgili anneme, babama ve değerli kardeşime, en zor günlerimde her zaman yanımda olan, sevgili eşim Zehra ve biricik kızım Reyvan'a da sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler	3
1.1.1. Elyaf Malzemesi	5
1.1.2. Matris Malzemesi	6
1.1.2.1. Termoset Matrisler	6
1.1.2.2. Termoplastik Matrisler	7
1.1.2.3. Plastik Metal Kompozitler	8
1.1.2.4. Plastik Cam Elyaflı Kompozitler	9
1.1.2.5. Plastik Köpük Kompozitler	9
1.1.2.6. Metal Matrisli Kompozitler	9
1.1.2.7. Seramik Kompozitler	10
1.1.2.8. Partikül Esaslı Kompozitler	10
1.1.2.9. Lamel Esaslı Kompozitler	10
1.1.2.10. Fiber Esaslı Kompozitler	10
1.1.2.11. Dolgu Kompozitler	11
1.1.2.12. Tabaka Yapılı Kompozitler	11
1.2. Kompozitlerde Kullanılan Malzemeler	12
1.2.1. Kuvvetlendirici Elyaf lar	12
1.2.1.1. Cam Elyaf lar	12
1.2.1.2. Aramid Elyaf lar	13
1.2.1.3. Karbon Elyaf lar	14

1.2.1.4. Diğer Plastik Elyaf lar	14
1.2.1.5. Boron Elyaf lar	14
1.2.1.6. Tahta	15
1.2.2. Matrisler	15
1.2.2.1. Plastik Reçine Matrisler	15
1.2.2.2. Polyesterler	16
1.2.2.3. Epoksiler	16
1.2.2.4. Termoplastik Reçine	17
1.2.2.5. Metal Matris	18
1.2.2.6. Seramik Matris	18
1.2.3. Çekirdek Malzeme	19
1.2.3.1. PVC Köpükler	19
1.2.3.2. Balsa	20
1.2.3.3. Tahta	20
1.2.3.4. Bal Peteği	21
1.3. Kompozit Malzemelerde İmalat Yöntemleri	21
1.4. Flaman Sargı Metodu	22
1.4.1. Sarım İşlemi	23
1.4.2. Malafalar	25
1.4.3. Sarım Kontrol Parametreleri	26
1.5. Kompozit Sargılı Borular İle İlgili Çalışmalar	27
1.6. Tezin Amaç Ve Kapsamı	31
2. TEORİK ÇALIŞMALARI	33
2.1. Giriş	33
2.2. Kompozit Sargılı Borunun Tasarımı	33
2.2.1. Kompozit Sargılı Borunun Boyut Ve Malzeme Özelliği	33
2.2.2. İç Basınca Maruz İnce Cidarlı Basınç Kaplarında Düzlem Gerilme Durumu	34
2.2.3. Klasik Katman Teorisi	38
2.2.3.1. Simetrik Katman Düzlemi	39
2.2.3.2. Aksi Simetrik Katman Durumu	40
2.2.3.3. Simetrik Olmayan Katman Durumu	41
2.2.3.4. Kirchhoff Hipotezi	42

2.3. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriteri	45
2.3.1. Maksimum Gerilme Kriteri	47
2.3.2. Maksimum Gerinim Kriteri	47
2.3.3. Tsai-Hill Kriteri	47
2.3.4. Tsai-Wu Kriteri	48
2.4. Kompozitlerde Hasar Tespiti	49
2.4.1. İlk Katman Hasarı	49
2.4.2. Elyaf Hasarı	50
2.4.3. Basınç Altındaki Silindirik Tek Açılı Kompozit Sargılı Boru.....	51
2.5. Kompozit Sargılı Borunun Analitik Çözümü	51
2.6. Kompozit Sargılı Borunun Sonlu Eleman Analizi	54
2.6.1. İçten Basınca Maruz Kompozit Borunun Modelleme Aşaması	54
2.6.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi	56
2.6.3. Sarım Açılarının Ve Kalınlıklarının Girilmesi	57
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	66
3.1. Kompozit Sargılı Boruların Üretimi	66
3.2. Kompozit Sargılı Boruların Hidrolik Basınç Patlama Deneyi.....	68
3.2.1. Deney Ekipmanları	68
4. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	71
4.1. Kompozit Sargılı Boruların Tasarım Sonuçları	71
5. SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kompozit Malzemenin Kesit Görünüşü	5
1.2. Bazı Matris Malzemenin Çekme Dayanımı	7
1.3. Bazı Termoset Matris Malzemenin Fırınlama Sonrası % Çekme Değerleri	7
1.4. Bazı Matris Malzemelerin Maksimum Kullanılabilme Sıcaklığı	8
1.5. Cam Elyaf Malzeme Görünüşü	13
1.6. Aramid Elyaf Malzeme Görünüşü	13
1.7. Karbon Elyaf Malzemesi Görünüşü	14
1.8. Boron Elyaf Malzeme Görünüşü	15
1.9. Polyester Malzeme Görünüşü	16
1.10. Epoksi Malzeme Görünüşü	17
1.11. Termoplastik Reçine Malzeme Görünüşü	17
1.12. Metal Matris Malzeme Görünüşü	18
1.13. Seramik Malzemesi Görünüşü	19
1.14. Çekirdek Malzeme Görünüşü	19
1.15. Tahta Malzeme Görünüşü	20
1.16. Bal Peteği Malzeme Görünüşü	21
1.17. Elyaf Sarım Açısı	23
1.18. Kutupsal Sarım	24
1.19. CNC Flaman Sarım Makinesi İle Helisel Sarım	24
1.20. CNC Flaman Sarım Makinesi İle Teğetsel Sarım	25
1.21. Malafa Görünüşü	26
2.1. Basınçlı Tank Yüzeyinde Gerilme Durumu	34
2.2. Kompozit Sarımlı Borunun Gerilmeler Sonucu Oluşan Açıkların Gösterimi	36
2.3. İzotropik Ve Ortotropik Malzemeler Gerilme Gerinim Diyagramı	37
2.4. Çok Katmanlı Kompozit Boruda Referans Düzlemi	39
2.5. Simetrik Çok Katmanlı Plaka	40

2.6.	Aksi Simetrik Çok Katmanlı Plaka	40
2.7.	Simetrik Olmayan Çok Katmanlı Plaka	41
2.8.	Kirchhoff Teorisine Göre Bir Düzlem Kenarının Deforme Olmuş Ve Deforme Olmamış Geometrileri	43
2.9.	N Tabakalı Kompozit Plakanın Geometrisi	44
2.10.	Kompozit Plakada x ve y yönlerindeki Kuvvet Ve Momentler	44
2.11.	Plakaya Gelen Eksenel Ve Kesme Kuvvetleri Neticesinde Plakada Oluşan Maksimum Gerilme Ve Gerinim Eğrileri	46
2.12.	Katman Ve İki Adım Yaklaşımları İle Elyaf Hasar Yükünün Tespiti	50
2.13.	90*55*-55*90 Açılı Kompozit Sargılı ,Boruların Katman Teorisi İçin Hazırlanan Programın Excel Ara Yüzü	52
2.14.	55*-55*90*90 Açılı Kompozit Sargılı ,Boruların Katman Teorisi İçin Hazırlanan Programın Excel Ara Yüzü	52
2.15.	Tek Açıda Sarım İçin Malzeme Değerleri	53
2.16.	Yapısal Analiz Seçimi Görünümü	55
2.17.	Element Tipi Malzeme Seçimi Görünümü	55
2.18.	Malzeme İlave Özelliklerinin Girilmesi Görünümü	56
2.19.	Malzeme Özelliklerinin Girildiği Tablo	57
2.20.	Kompozit Sargılı Boruların Sarım Açılarının Girildiği Tablo	57
2.21.	Kompozit Sargılı Boruların Sarım Açılarının Gösterilmesi	58
2.22.	Kompozit Sargılı Boruların Sarım Katmanlarının Gösterilmesi	58
2.23.	Kompozit Sargılı Boruların Mesh Durumu	59
2.24.	Kompozit Sargılı Boruların Katmanları	59
2.25.	Kompozit Sargılı Boruların Sınır Şartları	60
2.26.	Ansys Çözümünün Başlatılması İşlemi	61
2.27.	Gerilme-Şekil Değiştirme Sonuçlarını Göreceğimiz Tabakanın Seçimi ...	61
2.28.	Sonuçların Ekranaya Yansıtılması	62
2.29.	Plakanın 1 Yönlü Gerilmesi	62
2.30.	Plakanın 2 Yönlü Gerilmesi	63
2.31.	Plakanın 1 Yönlü Şekil Değiştirmesi	63
2.32.	Plakanın 2 Yönlü Şekil Değiştirmesi	64
2.33.	Plakanın Teğetsel Yönlü Gerilmesi Solid Görünümü	64
2.34.	Plakanın Eksenel Yönlü Gerilmesi Solid Görünümü	65

3.1.	Kompozit Sargılı Boruların İmalatı	66
3.2.	Kompozit Sargılı Boruların İstenilen Açıda Sarımı.....	67
3.3.	Üretimi Tamamlanmış Kompozit Sargılı Boru.....	68
3.4.	PLC Kontrollü ve Servo Motorlu Hidrolik Test Cihazı.....	68
3.5.	PLC Kontrollü Hidrolik Test Cihazına Bağlı Olan Kompozit Boru.....	69
3.6.	Ekipmanları Bağlanmış Kompozit Sargılı Boru	69
3.7.	Kompozit Sargılı Boru	70
3.8.	Basınca Maruz Kalmış Kompozit Sargılı Boruların Hasarı.....	70
4.1.	Kompozit Sargılı Borunun Sayısal Analizi	57
4.2.	Kompozit Sargılı Borunun Patlama Deneyi Sonucu Hasara Uğramış Hali	57
4.3.	Katman Teorisi Hazırlanmış Excel Tablosu	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Cam Elyaf Malzemelerin Mekanik Özelliği	34
2.2. Cam Elyaf Malzemelerin Hacimsel Parçalanma Sabiti	38
2.3. 1 Ve 2 Yönlü Şekil Değiştirme Ve Gerilmeler Tablosu	53
2.4. Kompozit Sargılı Boruların Boyutları.....	60
4.1. 90x55x-55x90 Açılı Kompozit Sargılı Boruların Patlama Basıncı Değerleri..	71
4.2. -55x55x90x90 Açılı Kompozit Sargılı Boruların Patlama Basıncı Değerleri..	71

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 (GPa)
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°	x yönündeki orta tabaka yer değiştirme (mm)
v°	y yönündeki orta tabaka yer değiştirme (mm)
w°	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 momenti (Nm)
SL(-)	Plakanın elyaf doğrultusundaki basma dayanımı (MPa)
SL(+)	Plakanın elyaf doğrultusundaki çekme dayanımı (MPa)
ST (-)	Plakanın elyafa dik doğrultusundaki basma dayanımı (MPa)
ST(+)	Plakanın elyafa dik doğrultusundaki çekme dayanımı (MPa)
SLT	Plakanın kaymadaki dayanımı (MPa)
e_L	Plakanın elyaf doğrultusundaki şekil değiştirme sınırı
e_T	Plakanın elyafa dik doğrultusundaki şekil değiştirme sınırı

KISALTMALAR DİZİNİ

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 basınçlı kompozit sargılı boruların saklanması ve taşınması son yıllarda büyük önem arz etmektedir. Kompozit sargılı boruların yüksek dayanıma sahip olmasına karşın taşınabilir hafiflikte olması istenilmektedir. Kompozitler, birden fazla malzemenin bir araya gelmesi ile elde edilen ve bileşenlerinden daha üstün ve yeni özelliklere sahip yapılardır. Kompozitlerin genelde sahip oldukları yüksek spesifik mukavemet, hafiflik, kimyasal ortamlara dayanım, dizayn esnekliği v.b. özelliklerden dolayı metal gibi geleneksel malzemelere karşı önemli üstünlükler sunarlar. Kompoziti oluşturan matris ve mukavemetlendirici bileşenlerinin çok çeşitli malzemelerden farklı form ve özellikte seçimi mümkündür. Genelde matris fazı süreklilik içerir ve yapı içinde değişik mimaride dağılmış mukavemetlendirici fazı çevreler. Matris fazı mukavemetlendirici bileşeni bir arada tutan bir bağlayıcı gibi etki gösterip yapının yapısal bütünlüğünü sağlayarak, uygulanan yükün mukavemetlendirici faza transferini sağlar. Matris fazı aynı zamanda mukavemetlendiriciyi çevresel etkilerden koruyup, çatlak oluşumunu başlatabilecek fiziksel hasarlara karşı korur. Cam elyaf takviyeli polimer (FRP) borular genel olarak iki tip matris malzemesinden üretilmektedir. Bunları epoksi ve poliester esaslı reçineler oluşmakta ve tipik olarak 150°C ye kadar sıcaklıklarda kullanılabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda ve özellikle polimer camsı geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklarda deformasyonlar, buharlaşmış sıvıların kompozit yapıda tahribatı söz konusu olabilmektedir. Boru içerisinde taşınan sıvının buhar fazına geçebileceği durumlarda, FRP sistemleri hasara duyarlı hale gelmekte, boru iç yüzeyine yakın bölgelerdeki elyaflar etkilenebilmektedir. İç basınç ve aksel yüklemelere maruz bırakılan borularda sızıntı hasarları sık olarak görülebilmektedir. Bu hasarlar, mikro çatlakların birleşmesi ile boru et kalınlığı boyunca çatlak ilerlemesi ile meydana gelebilmektedir. İlave olarak, boru yüzeyinden içeriye olabilecek sıvı penetrasyonu, katmanlar arası kırılma ve kalınlık boyunca elyaflara paralel olacak şekilde çatlak ilerlemesi ve dolayısı ile kompozitin uzun periyotta dayanımını etkileyebilmektedir. Polimer kompozit borularda en sık gözlemlenen mikro yapı kusurları; katmanlar arası ve katman içi boşluklar, uniform olmayan elyaf dağılımı ve fiberlerin sarım açısı (θ) dan sapması olarak tanımlanabilir. Kompozit

borularda hasar oluşumu ve performans bütün bu kusurlardan önemli derecede etkilenebilmektedir. İlave olarak, elyaf ve matris arasında oluşan ara yüzey ve katmanlar arası oluşan lamineler arası bölge hasar oluşumu ve kırılma başlangıcı üzerinde oldukça belirgin etkileri bulunmaktadır.[5]

Kompozitlerin nemli ıslak ortamlara karşı dayanımları genelde yüksektir. Suyun kompozit yapıya absorpsiyonu mekanik özellikleri etkileyen en önemli etken olarak değerlendirilir. Kompozit boruların mekanik performansları ve suyun bu tip borular üzerindeki etkileri hakkında çalışmalar vardır.

Kompozit malzemeler günümüzde kullanımı yaygınlaşan ve tercih sebepleri olan ağırlık farkı ve maliyetinin yüksekliğine karşın kısa süreli amorti etmesidir. Kullanım alanı olarak CNG tanklarını seçtiğimizde taşıma kapasitesi çelik olarak 12.000 m³ olarak verilmiştir. Kompozit malzeme olarak imal edilen taşıyıcı tank ise 45.000m³ kapasitededir. Ayrıca çelik imalatının maliyeti 125.000\$ iken, kompozit malzemeli tankın imal maliyeti 250.000\$ olarak hesaplanmıştır. Bunu göz önüne alarak her bir taşımada üç adet gidiş ve dönüş taşıma karı ve üç katı kapasite taşı yapma özelliğini elde etmiş bulunmaktadır. Üç yıllık periyotta oluşacak maliyet ve kar marjı kompozit imal ettiğimiz tankın bedelini çıkarmış olacaktır.

Kompozit yapıda su ya da su buharı, matris, fiber, fiber/matris yüzeyi veya mikro kırılma ve tabakaların ayrılmasının olduğu boşlukların içerisinde yer alabilir. Emilen su, polimer zincirleri arasında bir ayırıcı katman görevi yaparak kompozit mukavemeti, kopma gerinimini ve Young modülü değerlerini düşürür. Kompozitlerin mukavemetindeki düşüşle ilgili nemin ve çözeltinin etkisi çoğu zaman küçüktür. Bunun yanında eğer fiber özelliklerindeki bozunma önemli mertebede ise, kompozit modülündeki değişimler yüksek seviyelerde olabilmektedir. Mekanik özelliklerdeki kayıplar matrisin plastikleşmesi ve fiber/matris ara yüzeyindeki bozunmalardan kaynaklanabilir. Ayrıca, su moleküllerinin yapıya geçişi matrisi genişletmekte ve iç gerilimlerin oluşumuna ve esnekliğin kaybolmasına sebep olabilmektedir.[3]

1.1.Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede toplayarak veya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelerdir. Kompozit malzeme, birbirine göre üstün ve zayıf yönleri olan en az iki ayrı malzemenin, fiziksel olarak makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan değişik özelliklere sahip yeni bir malzeme olarak da tanımlanabilir.

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak fiber kullanılmaktadır. Fiber malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan matris kullanılmaktadır. Bu iki malzeme grubundan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte olabilecek ilerlemeleri önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Ayrıca fiber malzemeyi yük altında bir arada tutabilmek ve kompozit malzemeye gelen yükün liflere homojen olarak dağılmasına olanak sağlamaktadır. Kompozit malzeme kullanılarak üretilen parçalar tasarlanırken, parçanın hangi alanda kullanılacağı ve kullanıma yönelik özel ihtiyaçların neler olduğunun bilinmesi gerekir. Kompozit bir parça tasarlanırken maliyet, ham malzeme özellikleri, çevre koşullarının parçaya etkisi, imalat yöntemi, kalite kontrol metotları gibi bir dizi faktör birlikte değerlendirilmelidir.

Tasarımında en büyük zorluklardan birisi kompozit malzemelerin izotropik özellikler göstermemesidir. Bu yüzden tasarımcı, parçaya her yönden ne kadar yük geleceğini ve parçanın hangi noktasında ne kadar mukavemete ihtiyaç olduğunu iyi anlayıp, fiberin yerleşim açılarını ona göre hesaplamalıdır. Kompozit malzemelerin, parça bütünlüğü, hafifliği, yüksek çeki ve bası mukavemeti, darbeye dayanımı ve uzun kullanım ömrü gibi özellikleri geniş kullanım alanlarında avantajlar sağlamaktadır.[3]

Cam elyafı elastik bir malzemedir. Yük altında düzgün olarak kopma noktasına kadar uzayan cam elyafı, çekme yükünün kalkması sonucunda herhangi bir akma özelliği göstermeden başlangıç boyutuna döner. Metallerde ve organik liflerde

bulunmayan bu elastiklik ve yüksek mukavemet özellikleri; cam elyafına büyük miktarda enerjiyi, kayıtsız olarak depolama ve bırakma olanağı sağlamaktadır. Bu özellik, dinamik yorulma dayanımı, aşınmaya karşı korunması koşulu ile otomobil ve kamyon amortisör yayları ile mobilya yayları gibi ürünlerin cam elyafı takviyeli plastik malzemeden yapılabilmesini sağlamaktadır. Cam elyafı takviyeli plastiklerde, cam elyafı takviye miktarının artışı ile birlikte cam elyafının mukavemeti de artar.

Kompozit malzemelerin bu üstün özelliklerine rağmen, yük taşıma kabiliyetinde zamanla azalma görülmekle beraber ani kırılmaların önüne geçilmesi gereklidir. Zamana bağlı olarak mukavemetin azalması, çekme dayanımının başlangıç değerinin 2/3'üne çok kısa sürede düşmesi ve 1/2'sine 50 yıl gibi bir sürede düşmesi şeklinde görülmektedir.[3]

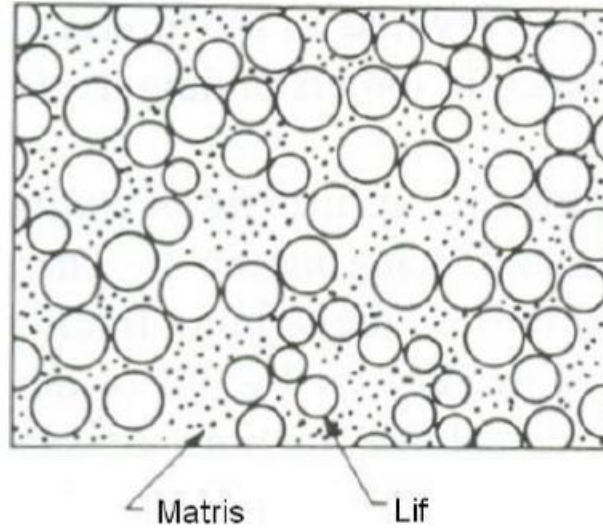
Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir takviye malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde de hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, takviye malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzemesi ise; plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin hasara uğramasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece takviye malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.[3]

Kompozitlerin çok hafif, korozyona dayanıklı ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları sebebiyle, kompozitlerle ilgili araştırmalar malzeme bilimi ve üretim yöntemleri yönünde olmuştur. Özellikle iki üretim yöntemi olan elyaf sarım ve profil çekme yöntemi, kompozit teknolojisinin yeni pazarlar ve kullanım alanları bulmasını sağlamıştır.

Kompozit malzeme kullanımındaki artış, ürün performansını göz ardı etmedeki artış ve evrensel pazardaki hafif malzeme rekabetinin artması sebeplerinden kaynaklanmaktadır. Tüm malzemelerin arasında, kompozit malzemeler, çok sık kullanılan çelik ve alüminyum gibi malzemelerin yerini alma potansiyeline

sahiptirler ve çoğu zaman daha iyi performans gösterirler. Kompozit malzemelerin, çeliğin yerini almasıyla %60-80, alüminyumun yerini almasında ise %20-50 ağırlıktan kazanım mümkün olacaktır. Bu ağırlık kazançları, enerjinin giderek artan bir sorun haline geldiği çağımızda önemli tasarruflar sağlamaktadır.[2]

Kompozit bir plakanın kesit görünüşüne baktığımızda liflerin ve matris malzemenin durumu Şekil 1.1' deki gibidir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemenin kesit görünüş [4]

Kompozit malzemeler elyaf ve matris malzeme olarak ikiye ayrılmaktadır.

1.1.1. 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 genleşme 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 ısı genleşme katsayısına sahiptir. Ayrıca Kevlar49 elyafının maliyeti Karbon elyafına göre oldukça uygundur [3].

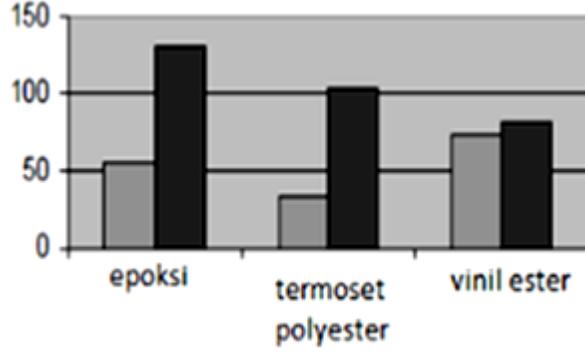
1.1.2. Matris Malzemesi

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].

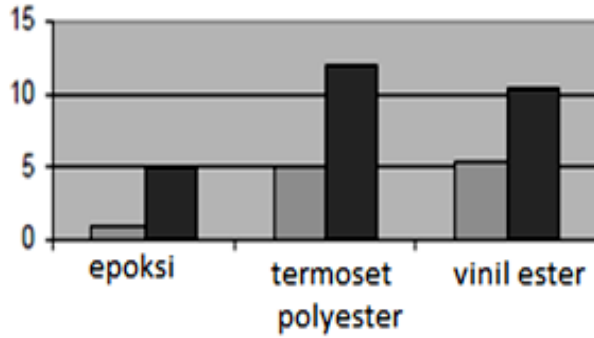
1.1.2.1. Termoset Matrisler

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 polyester, vinil ester, epoksi ve fenoliktir. Şekil 1.2' de görüldüğü gibi, termosetler içerisinde epoksiler yüksek mekanik özellikleri ve korozyona dayanımlarından dolayı en çok tercih edilen matris malzemesidir.

Epoksiler fırınlama sonrası diğer matrislerden daha az çekerler ve ısı ve sudan daha az etkilenirler. Epoksilerin fırınlama sonrası çekme paylarının düşük olması Şekil 1.3' te gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Bazı matris malzemelerinin çekme dayanımları (MPa) [9]

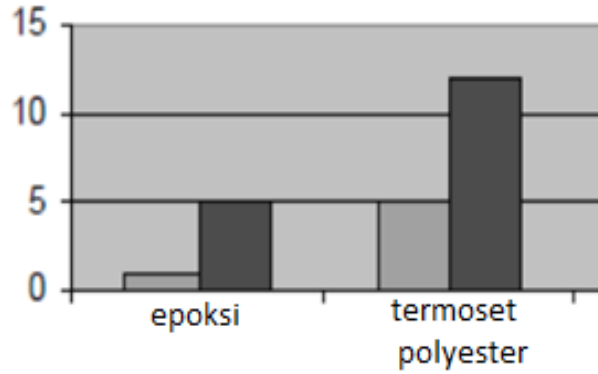


Şekil 1.3. Bazı termoset matris malzemelerinin fırınlama sonrası % çekme değerleri (MPa) [9]

1.1.2.2. 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 viskoziteye sahiptirler. Bu durum onların işlemlerini zorlaştırır. Termoplastik matrislerin diğer matrislere göre üstün olan önemli bir özelliği ısı 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 1.4'te gösterildiği üzere termoplastik matrisli kompozit malzemeler termoset matrisli kompozit malzemelere üstünlük sağlamaktadır.



Şekil 1.4. Bazı matris malzemelerinin maksimum kullanılabilir sıcaklıkları (C°) [9]

1.1.2.3. Plastik Metal Kompozitler

Metal-fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça mukavemetli ve hafif bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal-fiberlerin (bakır, bronz, alüminyum, çelik) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır.

1.1.2.4. Plastik Cam Elyafı Kompozitler

Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere nazaran tercih edilebilirler. Ancak cam elyafı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılma olmasından dolayı çok küçük dirençlidirler. Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçinelerin uygun bir şekilde seçilmesiyle, arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de daha önce belirtildiği gibi termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerin de düzgün uyumu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, poliesterlerdir.

1.1.2.5. Plastik Köpük Kompozitler

Kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta, köpük ise matris konumunda bulunmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde olabildiği gibi, büyük bir kısmı sentetik olarak imal edilebilen hafif maddelerdir. Köpük hücre yapısına göre sert, kırılma, yumuşak ya da elastik olabilmektedir.

1.1.2.6. Metal Matrisli Kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılma olmaktadır. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi, bu özelliklere daha ekonomik yoldan ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu metallerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi, gelişigüzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedirler.[4]

1.1.2.7. Seramik Kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşimlerinden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler.

1.1.2.8. Partikül Esaslı Kompozitler

Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler.

Partikül takviyeli kompozitleri fiber ve pul kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rastgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyidir.[4]

1.1.2.9. Lamel Esaslı Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk/çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde de olabilirler. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.[4]

1.1.2.10. Fiber Esaslı Kompozitler

Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten elli kat, rijitliği ise üç kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliklerinin fark

edilmesi ile fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzdeki düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına kadar kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır. Fiberler, yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler ya da elyaflar şeklinde olabilirler. Fiber-matris kompozitlerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörleri; fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber–matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi nadiren dikdörtgen, hegzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet v.s) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile de üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlenme göstermelerine karşılık, süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir.[5]

1.1.2.11. Dolgu Kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris, çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik ya da seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir.

1.1.2.12. Tabaka Yapılı Kompozitler

Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalı kompozitlerin üretimi mümkündür. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak malzemelerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek

tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmuştur.

1.2. Kompozitlerde Kullanılan Malzemeler

Kompozitlerde Kullanılan malzemeleri 3 ana grupta toplayabiliriz;

- 1-Kuvvetlendirici elyaflar,
- 2- Matris
- 3- Çekirdek (Core) malzemeleri olarak sınıflandırabiliriz.

1.2.1. Kuvvetlendirici elyaflar

Matrisin içerisinde mukavemet sağlanması istenen yerlerde kuvvetlendirici elyaflar kullanılır. Kuvvetlendirici elyafları şu şekilde sınıflandırabiliriz.

1.2.1.1. Cam elyafları

Kompozit panellerin yapımında şekil 1.5’de kullanılan elyaf cam elyafı idi. Günümüzde çeşitli mukavemet özelliklerine cam elyafları üretilmekte ve kullanılmaktadır. Cam elyafları oldukça iyi ıslanabilen ve kullanımı nispeten kolay elyaflardır.[15]



Şekil 1.5. Cam Elyafı

1.2.1.2. Aramid elyafları

Aramid, bir nylon olup, diğer nylon türevlere göre türevlere göre yüksek mukavemete ve modüle sahip ilk organik elyafıdır. Yapay elyaflar arasında lifleri ısıya en dayanıklı ve kuvvetli olarak sınıflandırılır. Düşük yoğunlukları ve naylon temelli hidrofob yapıları kullanılan plastik matrisin aramid elyaflarını oldukça problemli yapmaktadır. Aramidlerde, çok ileri reçine sistemlerinde bile, yapıdaki elyaf oranında %50'den iyisini elde etmek mümkün olamamaktadır. Ayrıca depolamada rutubet almaları bu ıslanmayı çok daha zor hale getirdiğinden yapısal bütünlük için bir tehlike oluşturur.[15]



Şekil 1.6. Aramid Elyaflar

1.2.1.3.Karbon elyafları

Şekil 1.7’de görülen karbon elyaflar cam ve aramid elyaflarından çok daha üstün özellikler taşırlar. Düşük uzama seviyeleri ve kırılmalıkları başlarda problem olmuşsa da günümüzdeki yüksek uzamalı karbon elyaflarının bulunmasıyla bu problemler ortadan kalkmıştır. Plastik matris içerisinde ıslanabilme özellikleri oldukça iyidir.[15]



Şekil 1.7. Karbon Elyafar

1.2.1.4.Diğer plastik elyaflar

Kompozit yapılarda, az miktarda olsa da amaca uygun olarak nylon ve polietilen elyaflar da kullanılmaktadır.

1.2.1.5.Boron elyaflar

Metal takviyeli metal (MTM) kompozitlerde Şekil 1.8’de görünen boron elyaflar kullanılır. Gaz türbini kanatları gibi yüksek ısıda üstün mukavemet gerektiren yerlerde alüminyum oksit matris içerisinde boron elyafları kullanılır.[16]



Şekil 1.8. Boron Elyaf lar

1.2.1.6.Tahta

Çok katlı laminasyonlarda (tabakalı) şeritler halinde kuvvetlendirici elyaf olarak tahta kullanılır.

1.2.2. Matris

İçine yerleştirilmiş kuvvetlendirici elyafları katılaştığında belli bir formda tutacak ve toplam mukavemette de bir görev üstlenecek üniform dolguya matris denir. Yapıları itibariyle matrisler plastik reçineler, metal ve seramik olarak ayrılabilir.

1.2.2.1. Plastik reçine matrisler

Plastik matrisler içindeki solvent buharlaşması, kimyasal polimerizasyon veya soğuyup katılarak sertleşen tiplerde olur.

1.2.2.2. Polyesterler

Reçine matrislerin Şekil 1.9'da görünen ve bilinen en eskilerinden ve en çok kullanılanıdır. Polyester polimerlerin bir katagorisi veya daha özel olarak ana bağları içinde ester fonksiyonel grupları içeren yoğunlaşma polimerleridir. Polyesterler doğada bulunmasına rağmen polyester genel olarak tüm polietilen tereftalat ve polikarbonat içeren sentetik polyesterlere ait geniş bir aileyi belirtir. Sertleşmesi ekzoterm kimyasal bir polimerizasyon sonucu olur. Polyesterin saf halde korozif elementlere ve suya mukavemeti çok iyi değildir. Ancak reaksiyonun ekzoterm özelliği ve hızının güç kontrol edilebilmesi vakum altında imalatta çok büyük zorluklar getirir.[17]



Şekil 1.9. Polyester malzemeler

1.2.2.3. Epoksiler

Epoksi reçineler Şekil 1.10'da görüldüğü üzere polyester ve vinil esterler gibi kimyasal polimerizasyon sonucu sertleşir. Ancak yapılarında açığa çıkan bir solvent yoktur. İmalatta çalışma süresi oda sıcaklığında 15 saat civarında olabilir. Epoksi reçineler karışımı yapılmış halde, soğuk ortamlarda (0 C° altında) iki aya kadar muhafaza edilebilir. Bu özellik prepreg (önceden reçineyle ıslatılmış kuvvetlendirici elyaflar) sistemlerinde kullanılmasına imkân tanımaktadır. Prepreg tipi sistemlerde

polimerizasyon yüksek ısı (75-180 C°) altında başlatılır ve sonuçlandırılır. Ultraviyole ile polimerize olan tip reçineler de vardır.[17]



Şekil 1.10. Epoksi malzemeler

1.2.2.4. Termoplastik reçineler

Isıtılıp sıvılaştırılan bu reçineler Şekil 1.11’de görüldüğü üzere soğuyunca katılaşır. Genelde enjeksiyon kalıplarında kullanılır.



Şekil 1.11. Termoplastik reçineler

1.2.2.5. Metal matrisler

Metal matrisler genelde Şekil 1.12’de görülen oldukça yüksek ısı altında çalışan ve olağan dışı mukavemet özellikleri beklenen parçalarda kullanılır. Bakır, alüminyum oksit bazı metal matrislerdir. Bu tip yapılarda genel mukavemetin yanı sıra termal gerilmeler de hesaba katılır.[17]



Şekil 1.12. Metal matris malzemeler

1.2.2.6. Seramik matrisler

Yüksek termal performans (HTP) arandığı durumlarda Şekil 1.13’de görünen seramik matrisler kullanılır. RFC (Sert Lifli Seramik) bu aileden bir ürün sistemidir.



Şekil 1.13. Seramik matris malzemeler

1.2.3. Çekirdek (Core) Malzemesi

Çekirdek, sandviç yapılarda elyaf/matris sisteminde oluşturulan Şekil 1.14’de iki deri (skin) arasına mukavemetini arttırmak üzere yerleştirilen bir malzemedir.



Şekil 1.14. Çekirdek malzeme görünümü

1.2.3.1. PVC köpükler

PVC köpükler çok kullanılan bir çekirdek malzemesidir. Rutubet/su abzorbsiyonu direnci iyidir. 40–300 kg/m³ yoğunluklarda bulunabilir.

Yapılarına göre;

- a) Cross linked: nispeten kırılğan,
- b) Linear: mukavemet özellikleri bozulmadan deformasyon kabul edebilen,
- c) Yüksek ısı dirençli tipleri vardır.

1.2.3.2. Balsa

Hafif balsa ağacı, elyafları deriye dik gelecek Şekilde(end grain) kesilerek çekirdek olarak kullanılır. Balsa ekirdekli sandviçler çok iyi bir rijitlik sağlarlar. Ancak, kırılmaları ani ve büyük boyutlu olur. Bunun yanı sıra, tabii kaynaklı malzemenin

standardizasyonu imkansız denecek kadar zordur. Nispeten yüksek yoğunluğu ise, PVC köpük gibi geniş bir seçim şansı vermez.

1.2.3.3. Tahta

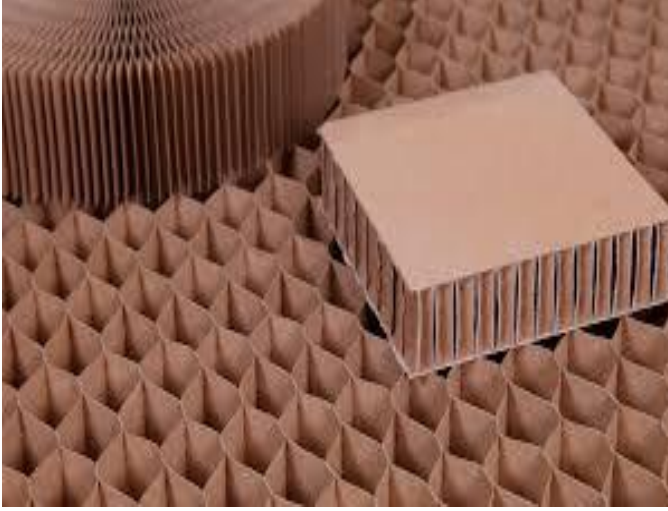
Balsa dışında Şekil 1.15' gibi tahta da, bilhassa iyi ezilme mukavemeti beklenen yerlerde çekirdek malzemesi olarak kullanılabilir. Genelde kontrplak veya lamine şeklindedir. Standardizasyonu balsadan daha iyi kontrol edilebilir. Ağırlığı önemli bir dezavantajdır.



Şekil 1.15. Tahta Malzemeler

1.2.3.4. Bal peteği (Honeycomb)

Bal peteği Şekil 1.16'da görüldüğü gibi metalik veya kompozit esaslı olabilir. Metalik bal peteği çok ince alüminyumdan, kompozit bal peteği ise kağıt veya nylon/aramid elyafları ve epoksi veya fenolik bir reçineden yapılırlar. Ateşe dayanıklı Nomex en popüler bal petek sistemlerinden biridir. Bal petek sistemleri dış derilere yapıştırılması oldukça zor ama üstün mukavemet/ağırlık oranları sağlayan çekirdek yapıları oluştururlar. Ayrıca, eğimli yüzeyleri bal peteği ile dönmek için özel bir teknik gerekmektedir.



Şekil 1.16. Bal Peteği Malzemeler

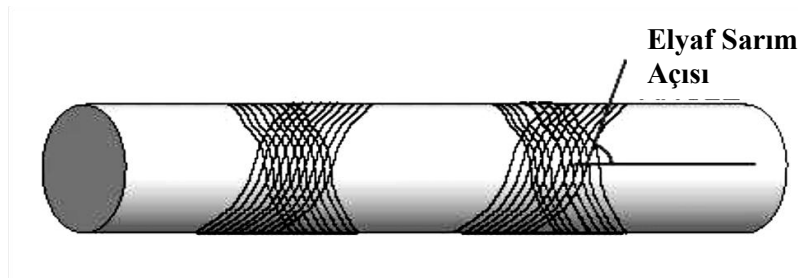
1.3. Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemleri

Cam elyaf takviyeli kompozitlerin oluşumunda kullanılan cam elyaf (cam lifi), tüm cam elyaf takviyeli kompozitlerin imalinde uygun çeşitlerde mevcuttur. Keçe halindeki cam elyafı, el yatırması metodu ile kompozit malzeme üretimi için ışık geçiren levha üretiminde kullanılır. Fitol halindeki cam elyafı ise, püskürtme metodu ile veya elyaf sarma metodunda kullanılan fitil dokuma üretimi için kullanılır. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeye, plastik özelliğini, çeşitli yöntemlerle cam elyafına emdirilen ana faz kazandırır. Burada kullanılan ana faz, poliesterdir. Polyester bir termoset plastiktir. Polyester kimyasal reaksiyona girerek, polimerizasyon yoluyla sert, çözülme ve ergimeyen bir madde haline dönüşür. Aldığı biçim, daha sonra ısıyla değiştirilemez. Polyesterlerin cam elyafı ile takviye edilmesi yoluyla, üstün plastik, kimyasal ve elektriksel özelliklerine, cam elyafının üstün mekanik dayanımı eklenir. Böylece, kolay şekil alabilmesinden ısıya dayanımına, ışık geçirgenliğinden kimyasal etkenlere dayanımına kadar birçok özelliğe sahip olan yepyeni bir malzeme, sanayinin çeşitli dallarına hizmet etmektedir. Bu, mekanik dayanımı çeliği bile aratmayan, üretimde olsun, kullanımda olsun, diğer malzemelere oranla birçok kolaylıklar sağlayan kullanışlı bir malzemedir.[15]

Cam elyaf takviyeli kompozit malzeme elde etmek için yapılan işleme, yani cam elyafın, polyester reçinesiyle birleştirilmesine kalıplama adı verilmektedir. Bu işlem değişik imalat yöntemleriyle yapılabilir. Elde edilecek ürünün özellikleri ve üretim miktarına göre çeşitli kalıplama metotlarından biri seçilebilir.

1.4. 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 paletleri, roket namlu boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pnömatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. 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. Şekil 1.17' de görüldüğü gibi, sarım açısı malafa eksenine ile malafaya dik doğrultu arasındaki açı olup 4 ve üzeri eksene sahip CNC Flaman Sarım tezgâhlarında 15° ile 90° ve arasındaki açılarda sarım gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 1.17. Elyaf Sarım Açısı.[8]

Genellikle elyaflar arasındaki matris malzemesi olarak termoset matris malzemesi seçilir ve yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda da, matris malzemesi sarım

esnasında uygulanır. Alternatif yöntem olan kuru sarımda ise, önceden matris 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.[8]

1.4.1. Sarım İşlemi

Sarım işlemi, kutupsal, helisel ve teğetsel olmak üzere üç temel gruba ayrılır. Her bir yöntem değişik bir sargı ortaya çıkarır. Flaman sarım tezgâhlarında temel yaklaşım, malafa dönerken elyaf besleme kafası ileri geri hareket etmesidir. 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. Şekil 1.18’ de görüldüğü gibi, bu sarımda malafa 1 devir yapmadan elyaf besleme kafası bir uçtan bir uca geçişini tamamlamış olur.



Şekil 1.18. Kutupsal sarım.

Helisel sarımda ise elyaf besleme kafası bir uçtan bir uca geçene kadar malafa birden fazla dönüş yapmalıdır.(Şekil 1.19)



Şekil 1.19. 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. Şekil 1.20 görüldüğü gibi, araba hareketini tamamladığında malafa yüzeyi elyafla kaplanarak tek kat meydana gelir.



Şekil 1.20. CNC Flaman sarım makinesi ile teğetsel sarım işlemi

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

1.4.2 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.



Şekil 1.21. Malafalar

1.4.3. 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, tezgâh ve malzeme tipine göre büyük ölçüde değişmektedir. 100 m/d kadar sarım hızı olumlu sonuç vermektedir. Hassas sarım için daha düşük hızlar (15~30 m/d) kullanılmaktadır.

1.5. Kompozit Sargılı Borular ile ilgili Çalışmalar

Literatür araştırmalarında kompozit sargılı boruların tasarım ve analizlerine yönelik birçok akademik çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalar hem deneysel hem de teorik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Araştırmaların çoğunda kompozit sarımlı boruların iyileştirilmesine yönelik deneysel ve teorik çalışmalara yer verilmiştir. Yük durumuna göre üretim parametrelerinin belirlenmesi yer almaktadır. Yine bu çalışmaların çoğunda sarım açılarının patlatma basıncına 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.

Lekhnitskii [1], Her iki ucu kapalı kompozit silindirelerin analizi, Lekhnitskii 'nin teorisine dayanmaktadır.

Mackerle [2], teorik ve pratik bakış açılarından, kompozit basınçlı kapların ve silindirelerin analizi için uygulanmış olan sonlu eleman metotlarını yeniden gözden geçirmiştir.

Soden ve arkadaşları [3], tek yönlü ve iki yönlü kuvvetler altında tel veya lif sarılmış kompozit tüplerin mukavemet ve deformasyonları üzerine sarımın tesirini araştırmışlardır.

Hwang ve arkadaşları [4], bir kompozit basınçlı kabın fiber mukavemeti üzerine büyüklüğünün etkisini, deneysel çalışmaları kullanarak ve analitik bir yaklaşımla incelemişlerdir.

Vasiliev ve arkadaşları [5], ticari uygulamalarda kullanılan geleneksel basınçlı kapların yerini alacak ve liflerin sürekli bir şekilde sarımı ile imalatı yapılan kompozit basınçlı kaplar üzerine çalışmışlardır.

Tabakov [6], mühendislik uygulamaları için herkes tarafından benimsenen algoritma tekniğinin yeni bir çözümü ispat etmiştir. Üç boyutlu gerilme şekil değiştirme analizine bağlı olarak kalın kompozit basınçlı kapların patlama basıncının değerlendirilmesi bir örnek olarak dikkate alınmıştır.

Liang ve arkadaşları [7], lif sarılmış kompozit basınçlı kapların araştırılması ile ilgili olarak, geometrik sınırlamalara maruz kubbe çevrelerinin optimum dizaynını, sarım şartlarını, Tsai-Wu hasar kriteri ve maksimize edilmiş şekil faktörünü kullanarak, incelemişlerdir.

Jacquemin ve Vautrin [8], ısı ve nem etkisi altında kalın kompozit silindirelerde iç basınç alanlarını hesaplamak için yeni bir yarı-analitik model geliştirmişlerdir. Kompozit borunun yüzeye yakın yerlerindeki gerilmeler üzerine tekrarlı ısı ve nem etkisini incelemişlerdir.

Parnas ve Katırcı [9], iç basınç, eksenel kuvvet, kütle kuvveti, ısı ve nem değişikliği etkisi altındaki fiber takviyeli basınçlı kapları tasarımını yapmak ve bunlara dair bilgiler vermek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir.

Kabir [10], üzeri metalik bir destek ile sarılmış, lifle kuvvetlendirilmiş, iç basınç altında tutulan basınçlı kapların davranışlarını nümerik olarak (sonlu elemanlar yöntemi ile) incelemiştir.

Roy ve Tsai [11], kalın kompozit silindirler için basit ve verimli bir tasarım metodu sunmuşlardır. Gerilme analizi, genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirme durumundaki silindirleri göz önünde bulundurarak, iç ve dış basınç ile eksenel yüke maruz kalan, her iki ucu açık silindirler (borular) ve kapalı silindirler (basınçlı kaplar) için analiz yöntemi verilmiştir. Silindirlerin hasarı, önce ikinci dereceden bir hasar kriteri kullanılarak belirlenmiştir. Hem ince hem de kalın silindirler için, patlama basınçlarını hesaplamak amacıyla indirgenmiş bir model kullanılarak hesaplanan patlama basınçları ile elde edilen deneysel sonuçların çok iyi bir uyum gösterdikleri görülmüştür. Tabaka sıralamasının, özellikle kalın silindirlerde, çok kritik olduğu bulunmuştur. Buna ilave olarak, aynı zamanda içten basınca maruz çok tabakalı kapalı silindirlerin tasarım parametreleri ve verimli bir şekilde kullanılabilceği malzeme üzerine çalışılmıştır.

Xia [12], çok katmanlı flaman sargılı kompozit boruların iç basınç altında farklı sarım düzenlerinde cidarlarında oluşan eksenel 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 eksenel ve teğetsel gerilmeler arasındaki değişimde incelenmiştir. Oldukça ince cidarlı boruların cidarı boyunca oluşan teğetsel ve eksenel gerilme oranı sabittir.

Sayman [13], hidrotermal yüklemeler altındaki ince veya kalın çok tabakalı kompozit silindirler için genel bir gerilme analizi metodu geliştirmiştir. Tabakalar $[0^\circ/90^\circ]_2$,

[30°/-30°]2, [45°/-45°]2 ve [60°/-60°]2 fiber açıları için simetrik veya anti-simetrik 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 normal yönündeki radyal gerilme ve şekil değiştirmelerden bulunmuştur. Hidrotermal özellikler ve diğer mekanik özellikler bir cam lifi-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.

Önder [14], tez çalışmasında, simetrik ve anti-simetrik tabakalı ince cidarlı ECam/Epoksi kompozitlerin maksimum patlama basıncındaki en uygun tabaka açılarını araştırmıştır. Çalışmada filaman sarımlı kompozit borular üzerindeki sarım açılarının etkileri ele alınmış ve 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 açılı sarımlı kompozit borularda ise bu değer 90° olduğunu tespit etmiştir.

Akçay [15], Kaynak iç basınç ve üniform 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 açı oryantasyonuna göre patlama basıncı eğrileri elde edilmiştir. Kompozit basınç tankında sıcaklık arttırıldığında hasara neden olan patlama basıncının düştüğü olduğu görülmüştür.

Bakaiyan [16], literatürde kompozit basınç tankları için en iyi helis açısı olarak bilinen ±55° helis açısına sahip [+55°/-55°/+55°/-55°] iç basınç ve termal yükler altında ki kompozit borularda analitik olarak hasar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Tsai Hill hasar kriteri kullanılarak yapılan analizlerde ±55° helis katmanına sırasıyla ±30° ve ±35°'ye sahip yeni bir helis katmanın eklenmesi sonucunda [+55°/-

55°/+35°/-35°] önceki haline göre tankın gerilme durumu karşılaştırılmıştır. Ayrıca helisel ve teğetsel sarıma sahip kompozit basınç tankı [+35°/-35°/+90°/-90°] için yukarıdaki analizler tekrarlanmış ve [+55°/-55°/+55°/-55°] sarım düzenine sahip tanka ait analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlarda tank yarıçapının cidar kalınlığına göre değişimi karşılaştırılması yapılan düzenlerin performansını etkilediği görülmüştür.

Gemia [17], 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 sızıntı ve son hasar olan parçalanma testler sonucunda gözlenmiş olup, dayanım ve ömür diyagramları elde edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda, kompozit sargılı borulara 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 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.

1.6. Tezin Amaç ve Kapsamı

Tez çalışmasında farklı açılarla aynı et kalınlığında sarılmış olan kompozit sargılı boruların patlama basınçlarının görülmesi amaçlanmıştır.

Kompozit sargılı boruların 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 malzeme, 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 2 farklı açıda 4 katmanlı sarım şeklinde yapılacaktır. Sarım işleminden sonra patlatma basıncı hidrolik basınç ünitesi ile patlama basıncı gözlemlenecektir.

Katman teorileri yardımıyla borunun ön tasarım parametreleri belirlenecek ve bu veriler ışığında sayısal modelleme ANSYS sonlu eleman programında gerçekleştirilecektir.

2. TEORİK ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Tez kapsamında kompozit sargılı boruların tasarımına yönelik teorik çalışmalar 2 ana başlık altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların birincisi; kompozit sargılı boruların tasarımı, analitik ve sayısal analiz yardımıyla yapılmıştır. Teorik çalışmaların ikincisi ise; kompozit sarımlı boruların sonlu eleman yardımıyla tasarım parametrelerini belirlemek için çözümleri elde edilmiştir. Bu aşamada elde edilen sonuçlar hangi açılarda nasıl bir tasarım elde edileceği görüntüsünü vermiştir. Daha sonra analitik çözümler yardımıyla bulunan ön tasarım parametreleri ile kompozit sargılı boruların tasarımı ANSYS sonlu eleman programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizinde boruların bütünüün analizi yapılmış ve borulardaki kritik bölgelerin iç basınç altındaki davranışları gözlenmiştir.

2.2. Kompozit Sargılı Borunun Tasarımı

Kompozit sargılı boru tasarımı seçilirken minimum cidar kalınlığı ve istenilen maksimum sarım açıları ile tasarımı hem analitik hem de sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sonlu eleman metodu kullanılarak doğrusal olmayan malzeme durumu için elastik plastik model tetiklemesi yardımıyla analiz gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlar Tartışma ve Sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.

2.2.1. Kompozit Sargılı Boruların Boyut ve Malzeme Özellikleri

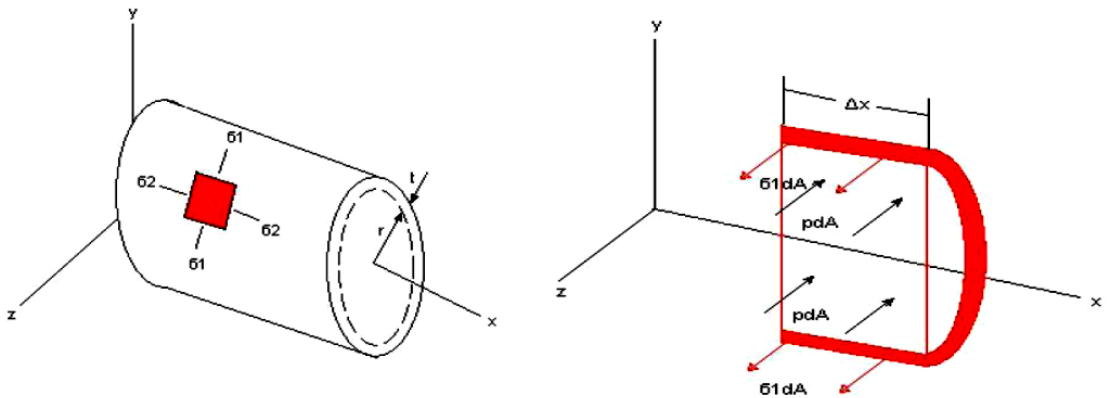
Analizini yapacağımız kompozit sargılı boruların 650 mm boyunda, 1,7 mm kalınlığında ve 75 mm dış çapa sahiptir. Kompozit boruda kullandığımız cam elyaf malzemenin mekanik özellikleri çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Cam elyaf malzemenin mekanik özellikleri [8]

Özellikler	Cam Tipi Alkali	Korozyon	Elektrik	Mukavemet
Özgül Ağırlık(gr/cm^3)	2,5	2,49	2,54	2,48
Elastik Modül(GPa)	0	69	72,4	85,5
Çekme Mukavemeti(MPa)	3033	3033	3448	4585
Isıl Genleşme Katsayısı	8,6	7,2	5	5,6
Yumuşatma Sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)	727	749	841	970

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 2.1.'de görülen ve kabın yüzeyinde oluşan s_1 teğetsel ve s_2 aksenal gerilmeleri asal gerilmelerdir. Bu asal gerilmeler p iç basınca, r yarıçapa ve t kabın cidar kalınlığına bağlı olacak şekilde aşağıdaki formüllerde ifade edilmiştir.[2]



Şekil 2.1. Basınç tank yüzeyinde gerilme durumu

σ_1 radyal gerilmeleri tayin etmek için, kabın içindeki akışkanla beraber, xy düzlemi ve aralarında Δx uzaklığı bulunan ve yz düzlemine paralel olan iki düzlemle sınırlanmış bir parçasını ayırırız(Şekil 2.1). Bu yolla elde edilen serbest cisim üzerine, z doğrultusunda tesir eden kuvvetler, cidar kesitlerine tesir eden $\sigma_1 \Delta A$ iç kuvveti ile akışkan yüzeyine tesir eden basınç kuvveti $p dA$ dan ibarettir. Burada p , barometre basıncına yani iç basıncın atmosferik basınçtan farkına eşittir. İç kuvvetlerin bileşkesi ile cidar en kesit alanı $2t.\Delta x$ in çarpımına ve basınç kuvvetinin bileşkesi $p dA$, p ile $2r.\Delta x$ in çarpımına eşittir. $\Sigma F_z=0$ denge denklemini yazarak aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow \sigma_1.(2t.\Delta x) - p.(2r.\Delta x) = 0 \quad (2.1)$$

Bu ifadeyi teğetsel gerilme için çözersek;

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (2.2)$$

Eksenel σ_2 gerilmesini tayin etmek için, x eksenine dik bir kesit geçireceğiz ve kabın solda kalan parçasının içindeki akışkanla birlikte, serbest cismini ele alacağız. Bu serbest cisim üzerine tesir eden kuvvetler, cidar kesitine tesir eden $\sigma_2 dA$ kuvveti ile akışkan kesitine tesir eden $p dA$ basınç kuvvetidir. Akışkan kesit alanının πr^2 olduğu ve cidar kesit alanının silindir çevresi $2\pi r$ ile cidar kalınlığı t ' nin çarpımıyla elde edilebileceği, bilindiğine göre, denge denklemini yazabiliriz.

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow \sigma_2 (2\pi r t) - p(\pi r^2) = 0 \quad (2.3)$$

Denklemin σ_2 için çözümünden aşağıdaki ifadeyi buluruz.

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (2.4)$$

Kompozit malzemeden yapılmış bir basınçlı tüp içinse;

1. Tek açıda sarılmış borular için lifler 90° sarım açısında en yüksek mukavemet değerine sahiptirler.
2. Helisel sarılmış borular için, bütün yük lifler tarafından taşınıyor kabul ederek;

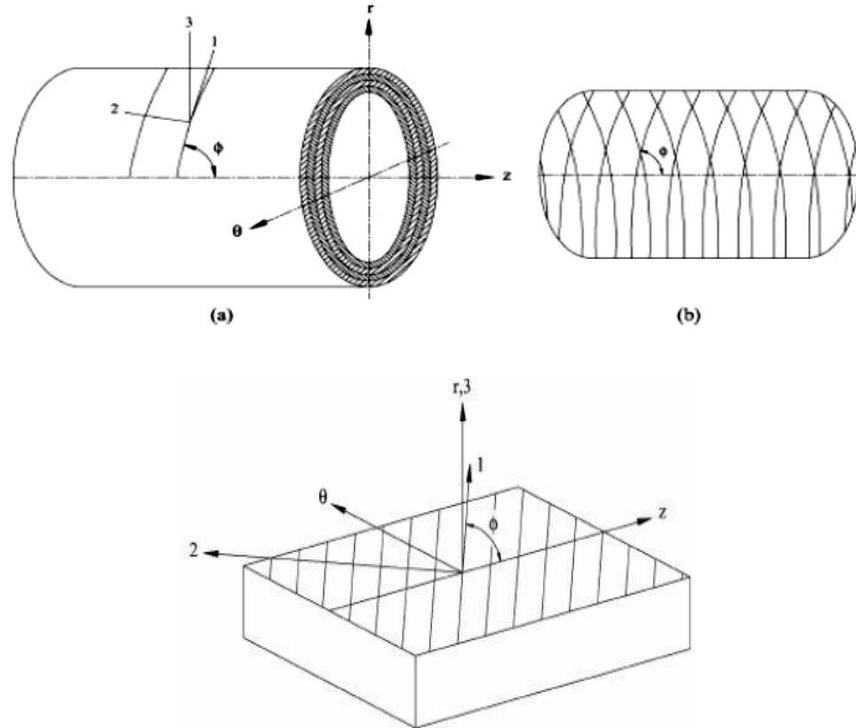
$$\sigma_1 = \sigma_f \cdot \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

$$\sigma_2 = \sigma_f \cdot \sin^2 \theta \quad (2.6)$$

Daha önce bulduğumuz aksenal gerilme ile teğetsel gerilme arasındaki bağıntıdan, denklemleri eşitleyerek liflerin hangi açıda sarıldığı durumda maksimum mukavemet değerinde olacaklarını bulmuş oluruz;

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_f \sin^2 \theta}{\sigma_f \cos^2 \theta} = \tan^2 \theta \quad (2.7)$$

Buradan; $\theta = 55^\circ$ olarak bulunur. Kompozit sarımlı borunun gerilmeler sonucu oluşan açıları Şekil 2.2' de gösterilmiştir.

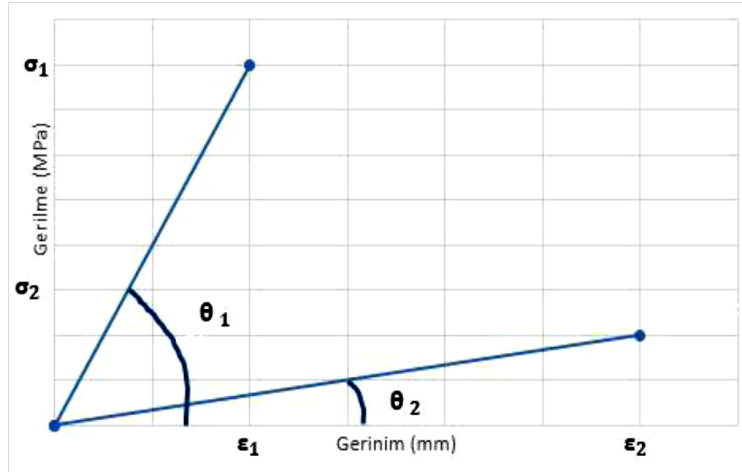


Şekil 2.2. Kompozit sarımlı borunun gerilmeler sonucu oluşan açıların gösterilmesi

İzotropik Malzeme: Isıl veya mekanik yüklemelere karşı her doğrultu ve yönde aynı tepkiyi veren malzemelerdir.

Ortotropik Malzeme: Isıl veya mekanik yüklemelere karşı her doğrultu ve yönde farklı özellik gösteren malzemelerdir.

İzotropik ve ortotropik malzemelerde gerilme gerinim diyagramı Şekil 2.3' te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. İzotropik ve ortotropik malzemelerde Gerilme - Gerinim diyagramı[10]

- σ_1 gerilmesi elyaf yönünde çekme sonucu oluşan gerilmedir.
- σ_2 gerilmesi elyafa dik(matris yönünde)oluşan gerilmedir.

Yukarıdaki bağıntılarda yer alan elyaf malzemesinin çekme mukavemeti değerleri teğetsel ve aksenal doğrultularda yön değişiminden kaynaklanan bir verimlilik düşüşünü gösterir. 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.

Çizelge 2.2. Elyaf hacimsel parçalanma sabiti

ELYAF	HELİS	TEĞET
E-CAM	0.55 - 0.60	0.65 - 0.70
KEVLER-49	0.55 - 0.60	0.65 - 0.70
KARBON AS-4	0.50 - 0.55	0.60 - 0.65

2.2.3. Klasik Katman Teorisi

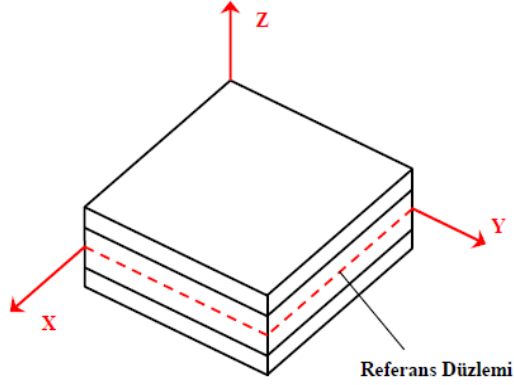
Çok tabakalı kompozit plaka iki veya daha fazla tabakanın birleşmesinden meydana gelen birleşik bir yapıdır. Çok tabakalı kompozit plakalar tipik olarak yük taşıyan elyaf lar yönünde olağanüstü özelliklere sahiptirler. Fakat elyaflara dik yöndeki özellikleri oldukça yetersizdir.

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

Çok katmanlı plakalar tek katmanlı plakalar tarafından oluşturulurken elyaf doğrultularına göre simetrik, anti-simetrik 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 2.4' de görülmekte olan referans düzlemi (orta tabaka), çok katmanlı kompozit plakalarda plaka kesitinin tam ortasından geçmektedir. Kompozit plaka

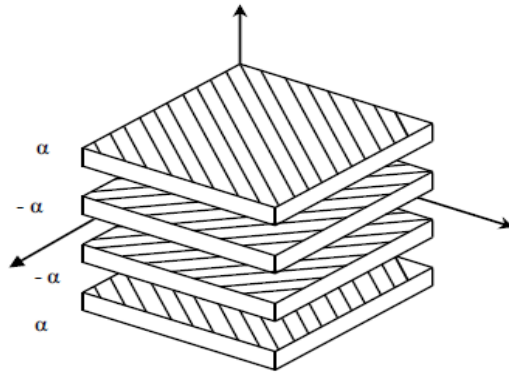
referans düzlemine göre kalınlık bakımından simetrik değilse, referans düzlem nötr bir düzlem olmaktan çıkar ve bu durumda referans düzlemdeki şekil değiştirmeler saf eğilme durumunda sıfıra eşit olmaz. Bu da analiz sonuçlarını olumsuz olarak etkiler.



Şekil 2.4. Çok katmanlı kompozit plakada referans düzlemi (orta tabaka)

2.2.3.1. Simetrik Katman Düzeni

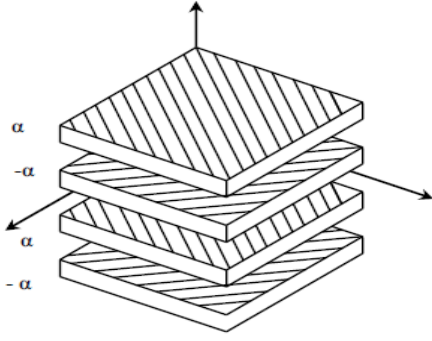
Çok katmanlı bir plakanın simetrik olarak adlandırılması o plakanın referans düzlemine göre alt ve üst kısımda kalan kalınlığın, elyaf yönlerinin ve özelliklerinin aynı olması demektir. Şekil 2.5’ te $(\alpha, -\alpha, -\alpha, \alpha)$ açı oryantasyonuna sahip simetrik bir plaka görülmektedir.



Şekil 2.5. Simetrik çok katmanlı plaka[12]

2.2.3.2. Aksi Simetrik Katman Durumu

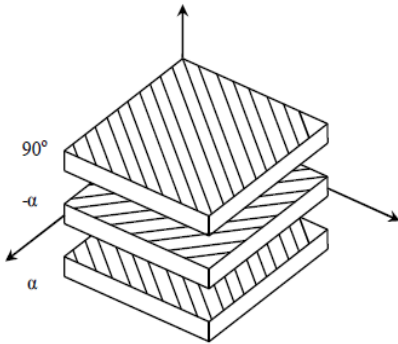
Çok katmanlı bir plakanın simetrik olmayan durumu Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Burada referans ekseninin altında ve üstünde kalan plakaların kalınlıkları eşit olmakla beraber açı oryantasyonları referans düzlemine göre simetrik olmayıp farklı şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Aksi simetrik çok katmanlı plaka[12]

2.2.3.3. Simetrik Olmayan Katman Durumu

Çok katmanlı bir plakanın simetrik olmayan plakanın referans düzlemine göre alt ve üst kısımda kalan kalınlığın, elyaf yönlerinin ve özelliklerinin farklı olması demektir. Çok katmanlı bir plakanın simetrik olmayan durumu Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Simetrik olmayan çok katmanlı plaka[12]

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

Plakaların kalınlık boyunca temel uzama ve eğilme rijitliklerini tanımlamak için öncelikle gerilme - şekil değişirme ilişkisi bilinmelidir. Bu ilişki Şekil 2.8’de katman teorisinde referans düzlemi temel alınarak kurulmaktadır[12].

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.8)$$

Aşağıda referans düzlem şekil değiştirmeleri verilmiştir.

$$\varepsilon_x^o = \frac{\partial u^o}{\partial x} \quad \varepsilon_y^o = \frac{\partial v^o}{\partial y} \quad \gamma_{xy}^o = \frac{\partial u^o}{\partial y} + \frac{\partial v^o}{\partial x} \quad (2.9)$$

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

Toplam yer değiştirmeler;

$$x \text{ yönünde; } u = u^o - zX_{xz} \Rightarrow u = u^o - z \frac{\partial w^o}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$y \text{ yönünde; } v = v^o - z \frac{\partial w^o}{\partial y} \quad (2.11)$$

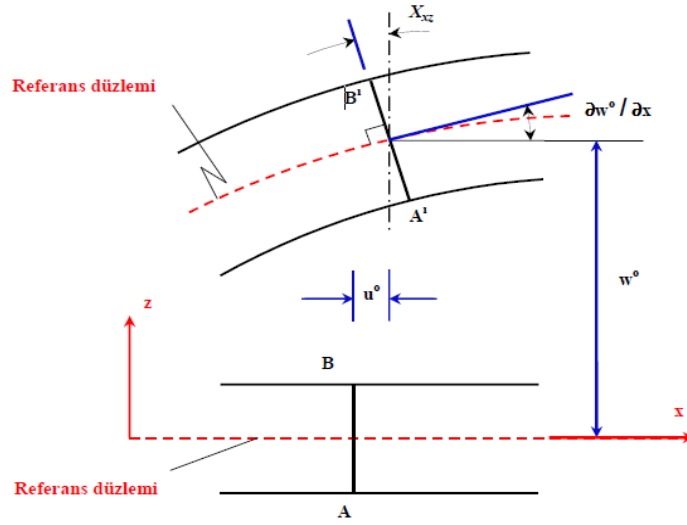
$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_x^o = \frac{\partial u^o}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^o}{\partial x^2} \quad \varepsilon_y^o = \frac{\partial v^o}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w^o}{\partial y^2} \quad (2.13)$$

$$\gamma_{xy}^o = \frac{\partial u^o}{\partial y} + \frac{\partial v^o}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^o}{\partial x \partial y} \quad (2.14)$$

2.2.3.5. Kirchhoff Hipotezi

Şekil değiştirmeler, plakanın kalınlığı boyunca malzeme özelliği nedeniyle sürekliliğini korur ve lineer davranış gösterir. Bir başka değişle plaka orta düzlemine dik bir doğru üzerinde bulunan noktalar şekil değiştirmeden sonra da şekil değiştirmiş şeklin orta düzlemine dik kalır. Bu nedenle plaka düzlemindeki kuvvetlerin etkisi altında plak orta düzleminde bir başka değişle tarafsız düzlemde deformasyon olmadığı kabul edilir.



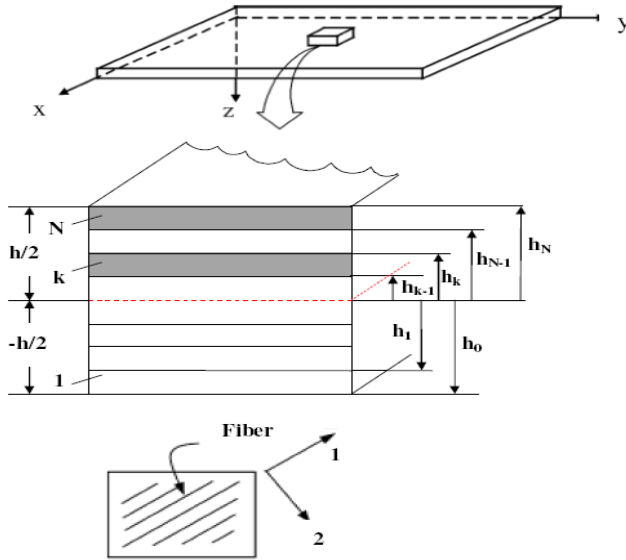
Şekil 2.8. Kirchhoff teorisine göre bir düzlem kenarının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri[34]

Kirchhoff hipotezi yardımıyla çok tabakalı bir plağın bir katmanındaki şekil değiştirmeleri, plağın orta düzleminin eğriliği ve doğrudan şekil değiştirme terimleriyle (2.11) denkleminde görüldüğü gibi ifade edilir.

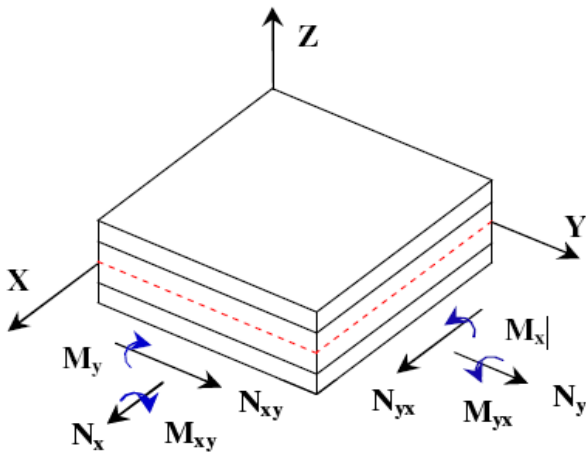
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

Yukarıdaki 2.15 denkleminde, ε_x^o , ε_y^o , γ_{xy}^o referans düzlemin şekil değiştirmelerini, K_x , K_y , K_{xy} referans düzlemin moment eğrilerini ifade etmektedir.

$$K_x = -\frac{\partial^2 w^o}{\partial x^2} \quad K_y = -\frac{\partial^2 w^o}{\partial y^2} \quad K_{xy} = -2\frac{\partial^2 w^o}{\partial x \partial y} \quad (2.16)$$



Şekil 2.9. N tabakalı kompozit plakanın geometrisi



Şekil 2.10. Kompozit plakada x ve y yönlerindeki kuvvet ve momentler

Şekil 2.10' da görüldüğü üzere kompozit plakanın x ve y yönündeki kuvvet ve moment denklemleri 2.17 ve 2.18' de görülmektedir. Çözümleme sonucunda elde ettiğimiz rijitlik matrisleri 2.19, 2.20 ve 2.21 denklemleri ile ifade edilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.17)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [\bar{Q}] \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \quad (2.18)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (2.19)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left(\frac{h_k^2 - h_{k-1}^2}{2} \right) \quad (2.20)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left(\frac{h_k^3 - h_{k-1}^3}{3} \right) \quad (2.21)$$

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} AB \\ BD \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

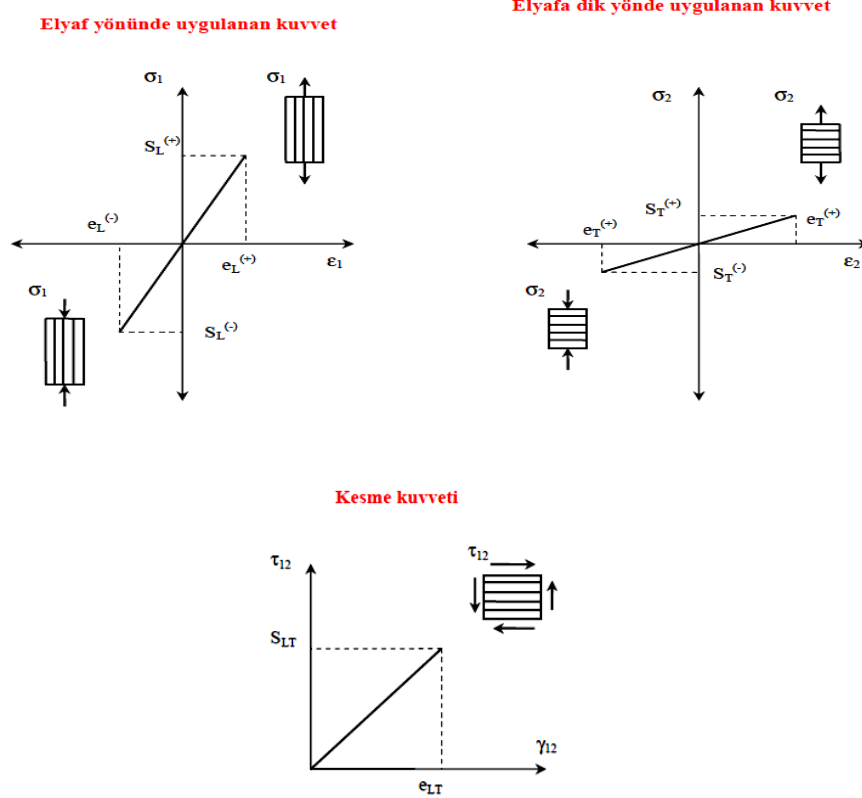
2.3. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri

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,

Kompozit plaklarda hasar analizi yapmak için öncelikle malzemenin oluşturduğu her bir tabakadaki elyaf yönünde ve elyafa 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 Değişirme Kriteri,
- Tsai-Hill Kriteri,
- Tsai-Wu Kriteri



Şekil 2.11. Plakaya gelen aksenal ve kesme kuvvetleri neticesinde plakada oluşan Maksimum Gerilme ve Maksimum gerinim eğrileri[3]

Şekil 2.11 'de $S_L^{(-)}$, $S_L^{(+)}$ sırasıyla elyaf doğrultusundaki basma ve çekmede ki mukavemet değerleridir. $S_L^{(-)}$, $S_L^{(+)}$ yine sırasıyla tek yönlü kompozit plakanın elyafa dik doğrultudaki basma ve çekmede ki mukavemet değerleridir. S_{LT} tek yönlü kompozit plakanın kayamdaki mukavemet değerleridir.

2.3.1. Maksimum Gerilme Kriteri

Bu kriterde ortotropik bir plakada elyaf yönlerinde oluşan gerilmelerin yine aynı elyaf yapısına ait dayanım değerleriyle 2.23' deki denklemle karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.[14]

$$\begin{aligned}
 & -S_L^{(-)} \langle \sigma_1 \rangle S_L^{(+)} \\
 & -S_T^{(-)} \langle \sigma_2 \rangle S_T^{(+)} \\
 & \tau_{12} \langle S_{LT} \rangle
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

2.3.2. Maksimum Gerinim Kriteri

Bu kriterde ortotropik bir plakada elyaf yönlerinde oluşan şekil değiştirmelerin yine aynı elyaf yapısına ait maksimum şekil değiştirme değerleri 2.24' deki denlemlerde karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.[14]

$$\begin{aligned}
 & -e_L^{(-)} \langle \varepsilon_1 \rangle -e_L^{(+)} \\
 & -e_T^{(-)} \langle \varepsilon_2 \rangle -e_T^{(+)} \\
 & \gamma_{12} \langle e_{LT} \rangle
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

2.3.3. Tsai-Hill Kriteri

Bu teorem orijinal olarak homojen izotropik parçalara uygulanmış Von-Mises kriterine dayanır. Daha sonra anizotropik malzemelere adapte etmek için Hill tarafından değiştirilmiş olup kompozit malzemelere uygulanmıştır. Von-Mises

kriterine maksimum şekil değiştirme 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 2.25' deki 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.[14]

$$\frac{\sigma_1^2}{S_L^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_L^2} + \frac{\sigma_2^2}{S_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LT}^2} = 1 \quad (2.25)$$

Yukarıdaki denkleminde eşitliğin sol tarafı <1 şeklinde çıkarsa güvenli durum, $=>1$ şeklinde çıkarsa güvensiz durum söz konusudur.

2.3.4. 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. Kompozit bir plakada oluşacak gerilmeler sonucu plakanın hasara uğrayıp uğramayacağı 2.26' daki Tsai-Wu denkleminde bulunabilir. [36]

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2.26)$$

Yukarıdaki denklemde 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 ise 2.27' deki denklem ile aşağıda ifade edilmiştir.[36]

$$F_{11} = \frac{1}{S_1^T + S_1^C} \quad F_{22} = \frac{1}{S_2^T + S_2^C} \quad F_1 = \frac{1}{S_1^T} - \frac{1}{S_1^C} \quad F_2 = \frac{1}{S_2^T} - \frac{1}{S_2^C} \quad F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2} \quad (2.27)$$

2.4. 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 dönüşüm 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.

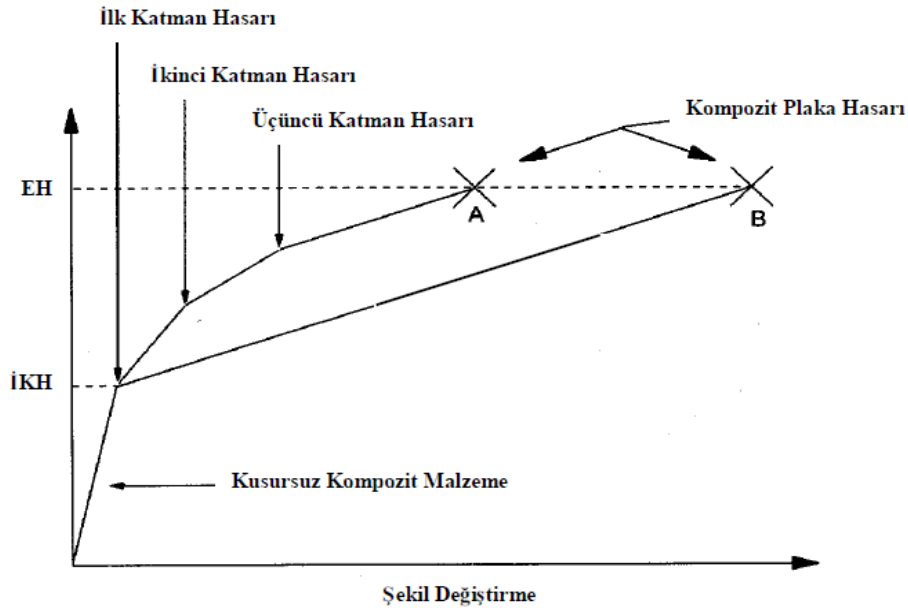
2.4.1. İlk Katman Hasarı

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 2.12 'de 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.

2.4.2. 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 direkt elyaf hasarına gidilir. Bu yaklaşım ise iki adımda elyaf hasarı olarak isimlendirilir. Bu iki yaklaşımın vermiş olduğu sonuçlar Şekil 2.12.'de gösterildiği gibi birbirine çok yakındır.



Şekil 2.12. Katman katman ve iki adım yaklaşımları ile elyaf hasar yükünün tespiti

2.4.3. Basınç Altındaki Bir Silindirik Boruda Tek Açılı Kompozit Sargılı Borunun Sarım Açısının Güvenliğine Etkisi

Basınç altındaki bir silindirik boruda tek açılı kompozit sargılı borunun sarım açısının güvenliğine etkisi aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir.

- Boru cidarında aksenal (x) ve teğetsel (y) doğrultularında oluşacak gerilmeler P , r ve t' 'ye bağlı olarak bulunur.
- Elyaf yönündeki (1) elyaf yönüne dik (2) ve kayma yönlerindeki gerilmeler θ elyaf sarım açısına bağlı olarak bulunur. Bulunan σ_1 , σ_2 ve τ_{12} gerilmeleri Tsai – Wu kriterinde yazılır.
- Açı değişimiyle güvenlik kontrolü yapılır. Burada yapılan kontrol Excel programında yapılmıştır. Kompozit malzeme olarak cam elyaf, epoksi kullanılmıştır.

2.5. Kompozit Sargılı Borunun Analitik Çözümü

Analitik çözümler katman teorisi temelinde EXCEL kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir. Şekil 2.13.'da ve Şekil 2.14'de oluşturulan programın EXCEL ara yüzü gösterilmiştir. Kompozit yapının hasar analizinde Tsai-Wu hasar analizi kullanılmıştır.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tsai-Wu			Tsai-Wu				
2	-0,02	4.Plaka Kalınlığı		-0,01	1. Katman			
3		90	derece		Kompozit Mal. Özel.			Mpa
4		0,42	mm		15	E Glass/Epoxy	S _L	1550
5		3.Plaka Kalınlığı			E ₁₁	48	S _T	40
6	-0,03	-55	derece	-0,01	E ₂₂	9	S _{LT}	41
7		0,42	mm		v ₁₂	0,26	S _{L(-)}	600
8		2.Plaka Kalınlığı			v ₂₁	0,04875	S _{T(-)}	90
9	-0,01	55	derece	-0,03	G ₁₂	4	S _{LT}	50
10		0,42	mm					
11		1.Plaka Kalınlığı			P _{iç}	=	54	Bar
12	0,99	90	derece	0,75	R _{iç}	=	32	mm
13		0,42	mm		N _x	=	0,04	
14					N _y	=	0,17	
15	Hesaplanan toplam basınç değeri				N _{xy}	=	0,00	Mpa-m
16			Basınç(Bar)		M _x	=	0,00	
17			Basınç(Bar)		M _y	=	0,00	
18		İlk katman hasarı			N _{xy}	=	0,00	
19		İkinci katman hasarı						
20		Üçüncü katman hasarı						
21		TOPLAM BASINÇ						

Şekil 2.13. 90x55x-55x90 Açılı Kompozit sargılı boruların Katman teorisi için hazırlanan programın EXCEL ara yüzü

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Tsai-Wu			Tsai-Wu				
2	-0,02	4.Plaka Kalınlığı		-0,01	1. Katman			
3		90	derece		Kompozit Mal. Özel.			Mpa
4		0,42	mm		15	E Glass/Epoxy	S _L	1550
5		3.Plaka Kalınlığı			E ₁₁	48	S _T	40
6	-0,03	90	derece	-0,01	E ₂₂	9	S _{LT}	41
7		0,42	mm		v ₁₂	0,26	S _{L(-)}	600
8		2.Plaka Kalınlığı			v ₂₁	0,04875	S _{T(-)}	90
9	-0,01	-55	derece	-0,03	G ₁₂	4	S _{LT}	50
10		0,42	mm					
11		1.Plaka Kalınlığı			P _{iç}	=	52	Bar
12	0,99	55	derece	0,75	R _{iç}	=	32	mm
13		0,42	mm		N _x	=	0,04	
14					N _y	=	0,17	
15	Hesaplanan toplam basınç değeri				N _{xy}	=	0,00	Mpa-m
16			Basınç(Bar)		M _x	=	0,00	
17			Basınç(Bar)		M _y	=	0,00	
18		İlk katman hasarı			N _{xy}	=	0,00	
19		İkinci katman hasarı						
20		Üçüncü katman hasarı						
21		TOPLAM BASINÇ						

Şekil 2.14. 55x-55x90x90 Açılı Kompozit sargılı boruların Katman teorisi için hazırlanan programın EXCEL ara yüzü

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	T300 Carb / Epok		Kevler 49 / Epoksi		AS 3501 Carb / Epok		AS Carbon Fiber		Graphite epoxy		Graphite epoxy	
2	1	2	3	4	5	6	11	12	13	14	15	16
3	123	123	86,3	86,3	138	138	38,6	38,6	181		54	54
4	8,3	0,08	4,9	0,05	9	0,05	8,27	0,05	10,3		18	3,6
5	0,27	0,27	0,34	0,34	0,3	0,3	0,26	0,3	0,28		0,25	0,05
6	0,0182195	0,0001756	0,0193048	0,000197	0,0195652	0,0001087	0,0557047	0,0003886	0,0159		0,0833	0,0166667
7	4,3	0,04	2	0,02	6,9	0,02	4,14	0,02	7,17		9	1,8
8												
9	1	2	3	4	5	6	11	12	13	14	15	16
10	1275	1275	1520	1520	1448	1448	1560	1560	1500		1034	1034
11	49	49	29	29	48,3	48,3	35,75	35,75	40		31	31
12	69	69	49	49	62,1	62,1	61,72	61,72	68		41	41
13	1275	1275	333	333	1172	1172	1760	1760	1500		1034	1034
14	216	216	157	157	248	248	178	178	246		138	138
15	69	69	49	49	62,1	62,1	61,72	61,72	68		41	41

Şekil 2.15. Tek Açıda Sarım için malzeme değerleri

Çizelge 2.3. 1 ve 2 yönlü şekil değiştirmeleri ve gerilmeler tablosu

	1.Yön	2.Yön
ϵ_x	-0,0014357	-0,00144
ϵ_y	0,00407	0,00407
γ_{xy}	-0,0011764	-0,00059
σ_1 (MPa)	144,984675	144,98467
σ_2 (MPa)	-5,8284709	-5,8284709
τ_{12} (MPa)	7,52883024	3,7644151

Çizelge 2.3' de görüldüğü üzere 1 ve 2 yönlü şekil değiştirme ve gerilmeler gösterilmiştir.

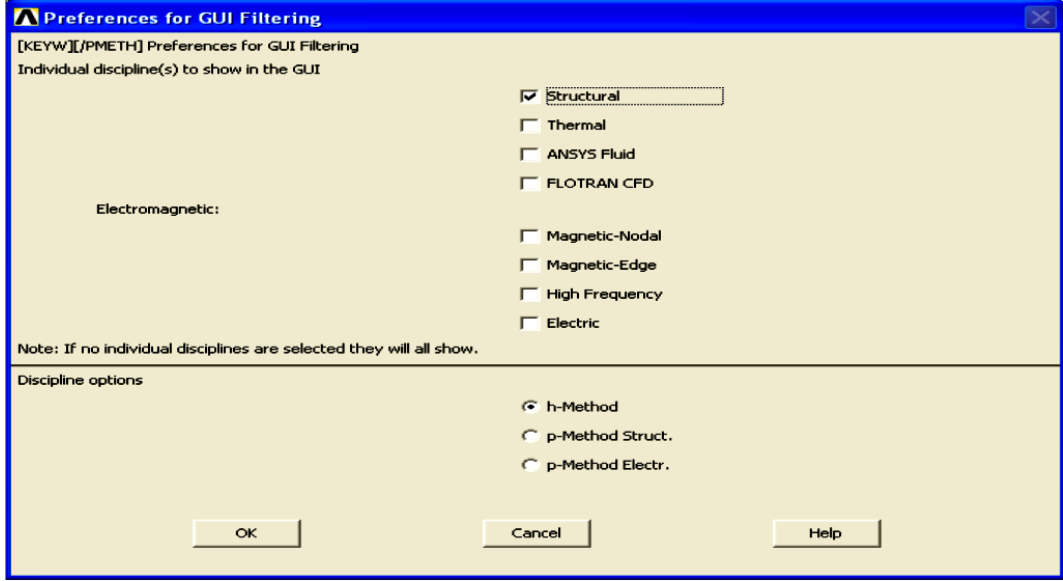
2.6. Kompozit Sargılı Borunun Sonlu Eleman Analizi

Bu bölümde kompozit sargılı borunun farklı katman düzenlerinde ki maksimum patlama basıncı değerleri ANSYS sonlu eleman programı yardımıyla bulunmuştur. 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 olan 4 katman düzeni için; $[\pm 55^\circ, 90^\circ]$, $[90^\circ, \pm 55^\circ]$ şeklinde belirlenmiştir.

Kompozitlerin sonlu eleman analizi yardımıyla modellenmesinde Ortotropik malzemelerden farklı olarak dört önemli husus göze çarpmaktadır. Bunlar; uygun element tipinin belirlenmesi, eleman koordinat sisteminin uygun şekilde yönlendirilmesi, kompozit plakanın katmanlarının tanıtılması ve malzeme için hasar kriterinin belirlenmesidir.

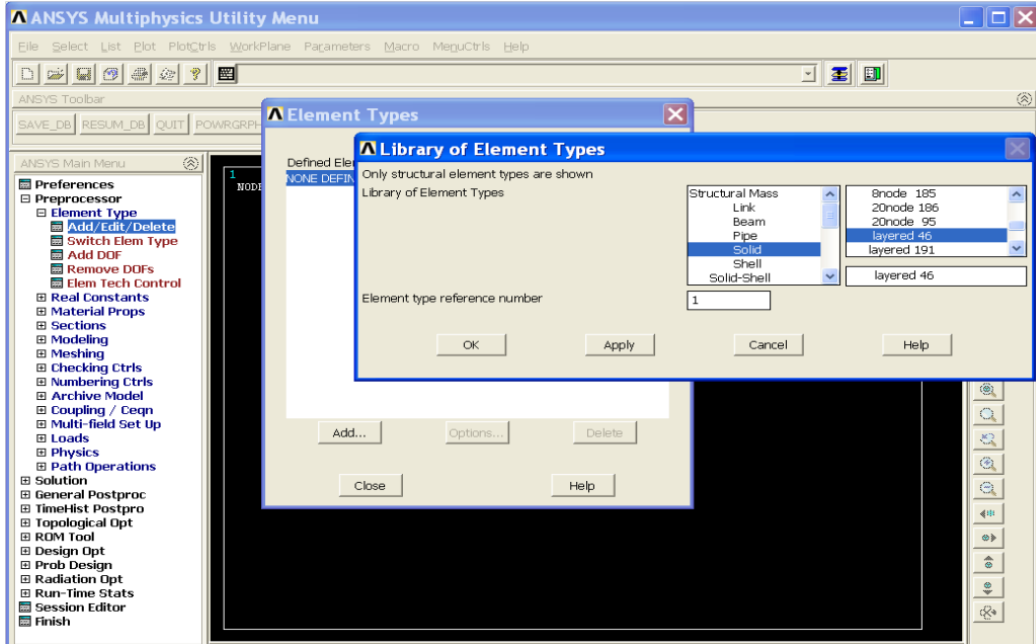
2.6.1. İçten Basınca Maruz Kompozit Borunun Modelleme Aşamaları

Analizde malzememiz cam elyaf ve epoksi olarak seçildi. Cam elyaf malzemesi orta kalınlıktaki kabuklu malzemeleri analiz etmek için en uygundur. Cam elyaf kompozit kabuk yapı modellemek için katmanlı uygulamalarda da kullanılabilir. Program açıldıktan sonra “Preferences” bölümünden Şekil 2.16’ da yapısal analiz yapılacağından “Structural” seçilir.



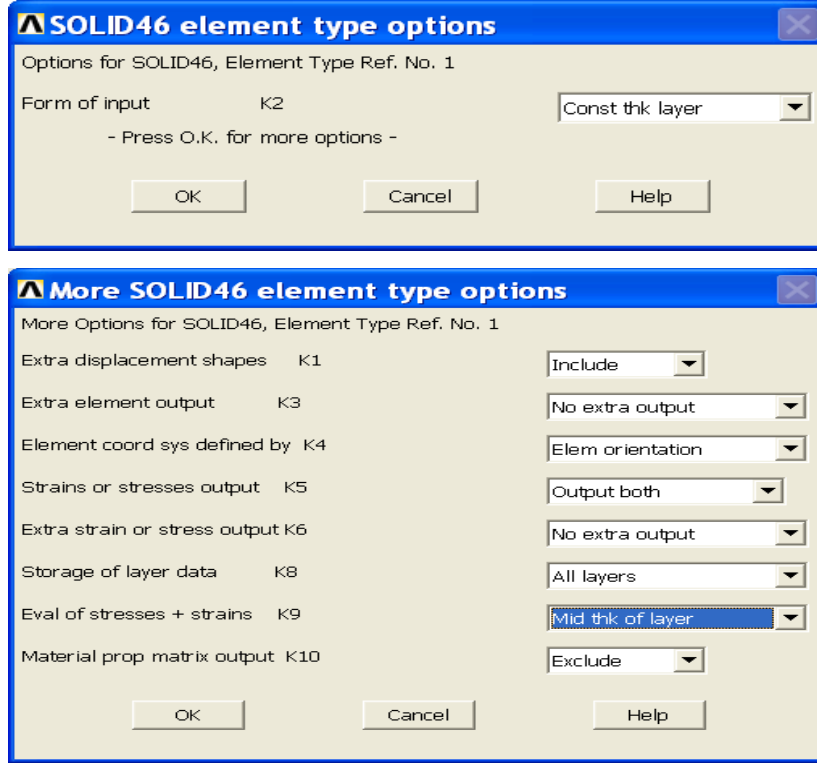
Şekil 2.16. Yapısal analiz seçimi yapılışı görünümü

Daha sonra Şekil 2.17’ de “Element Type” bölümünden malzeme “Solid / Layered 46” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.17. Element Type malzeme seçimi görünüşü

Malzeme için tanımlanması gereken ilave özellikleri Şekil 2.18’ de “Options” menüsünden girilir.

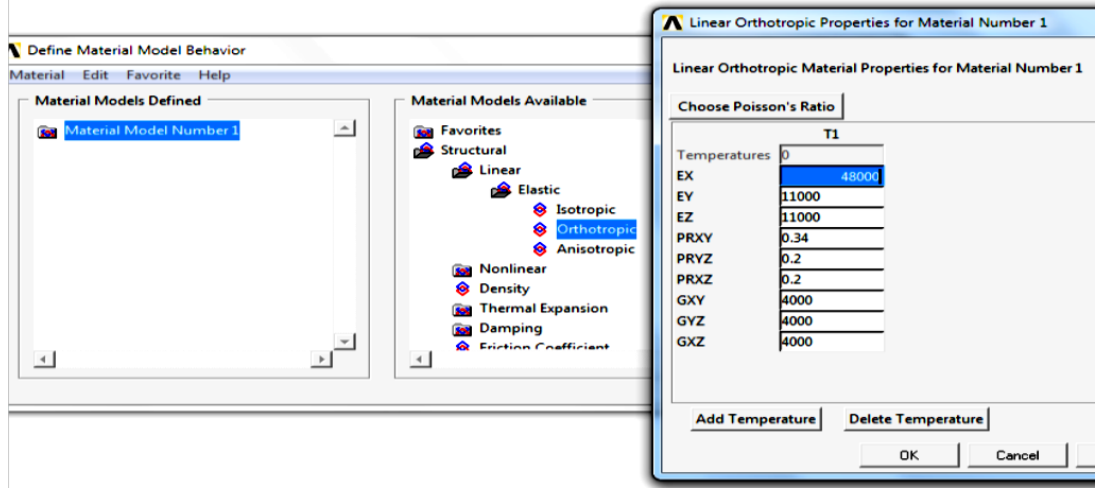


Şekil 2.18. Malzemenin ilave özelliklerinin girilmesi görünüşü

Bu işlemler yapıldıktan sonra malzeme özellikleri, katmanları, açıları, kalınlıkları aşağıda girilerek modellememiz yapılmış olacaktır.

2.6.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

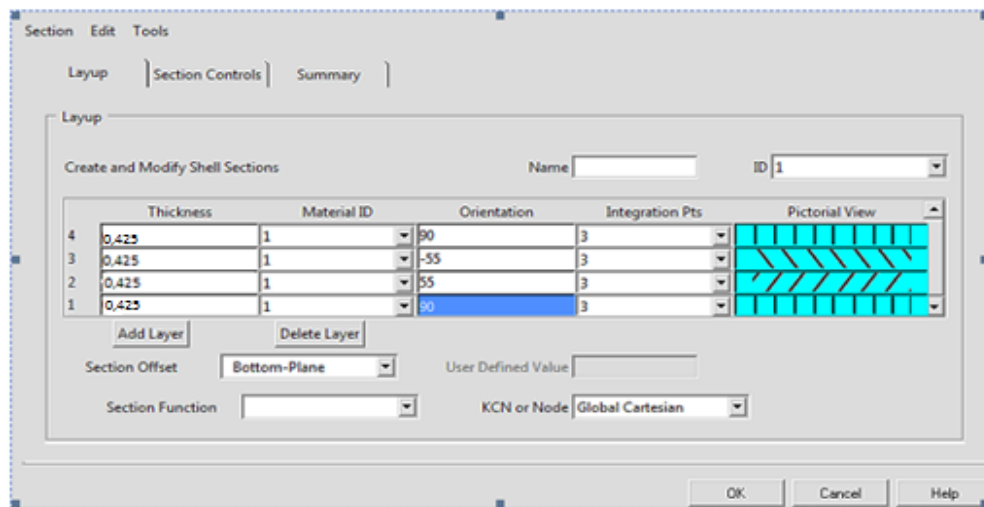
Malzemenin ortotropik olması malzemenin her yerinde aynı özelliği göstermediği E_x , E_y ve E_z değerlerinin farklı olduğunun ifadesidir. Şekil 2.19’ da görüldüğü gibi Ortotropik malzeme özellikleri girilir.



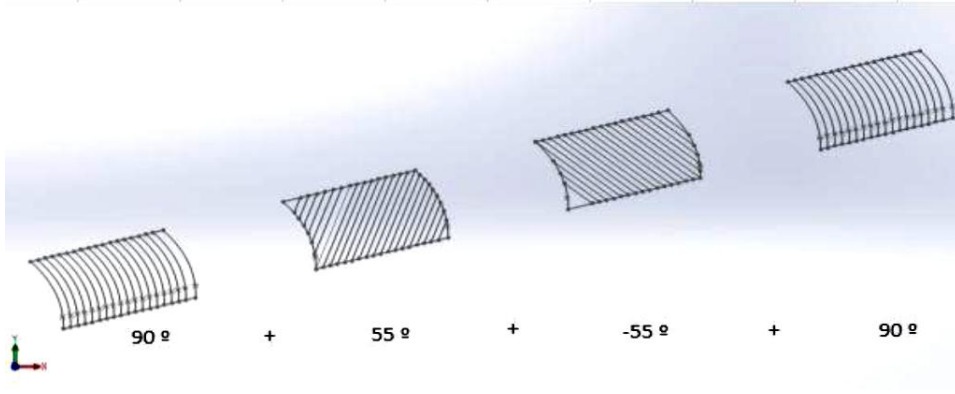
Şekil 2.19. Malzeme özelliğinin girildiği tablo

2.6.3. Sarım Açılarının ve Kalınlıklarının Girilmesi

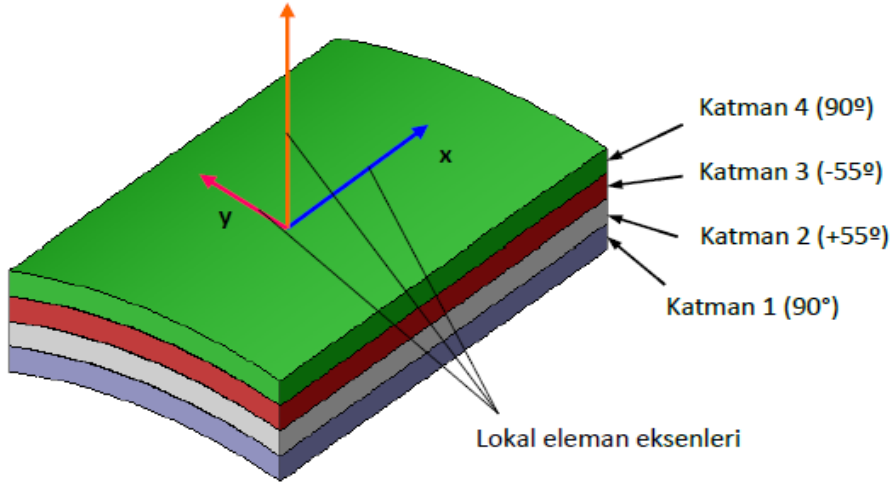
Kompozit malzemenin et kalınlıkları ve sarım açıları girilir. Malzemenin kalınlıkları Şekil 2.19' da görüldüğü gibi sırası ile 0.42 mm, 0.42 mm, 0.42 mm, 0.42 mm olarak toplam 1.7 mm olarak alınır. Şekil 2.20' de sarım açısı 90°, 55°, -55°, 90° olarak seçilir ve sarım katmanları da Şekil 2.21' de görülmektedir. Ayrıca bütün değerler Şekil 2.22' de sarım katmanları ve açıları ile birlikte verilmektedir.



Şekil 2.20. Kompozit malzemenin sarım açılarının girildiği tablo

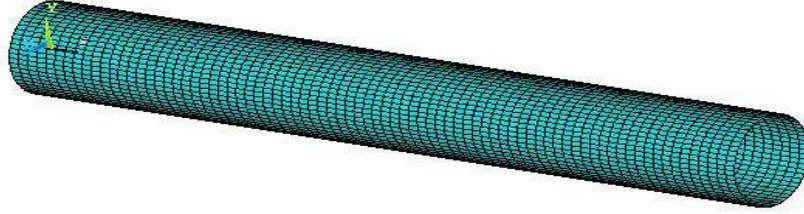


Şekil 2.21. Kompozit sargılı boruların sarım açılarının gösterimi

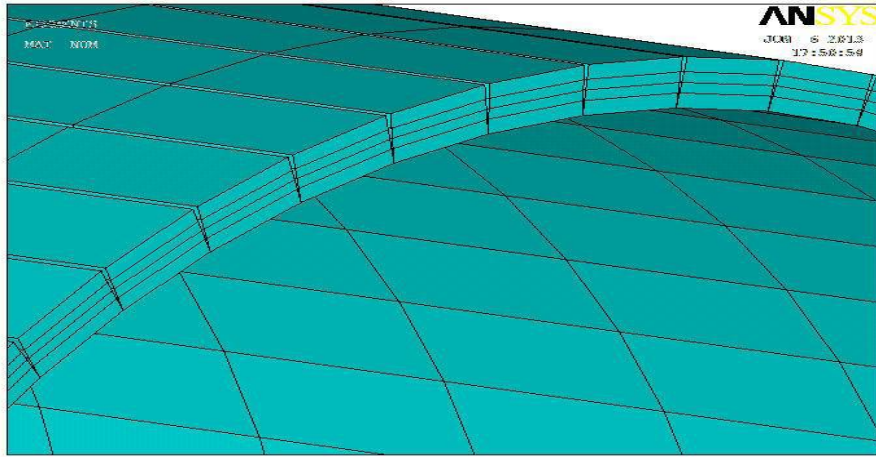


Şekil 2.22. Kompozit sargılı boruların sarım katmanları gösterimi

Tasarımı yapılan borunun ANSYS programında “Mesh” komutu ile sonlu eleman ayırma işlemi Şekil 2.23’ te görülmektedir. Kompozit sargılı borunun Şekil 2.24’ de katmanlara ayrılarak oluşturulan modeli görülmektedir.



Şekil 2.23. Kompozit borunun mesh durumu

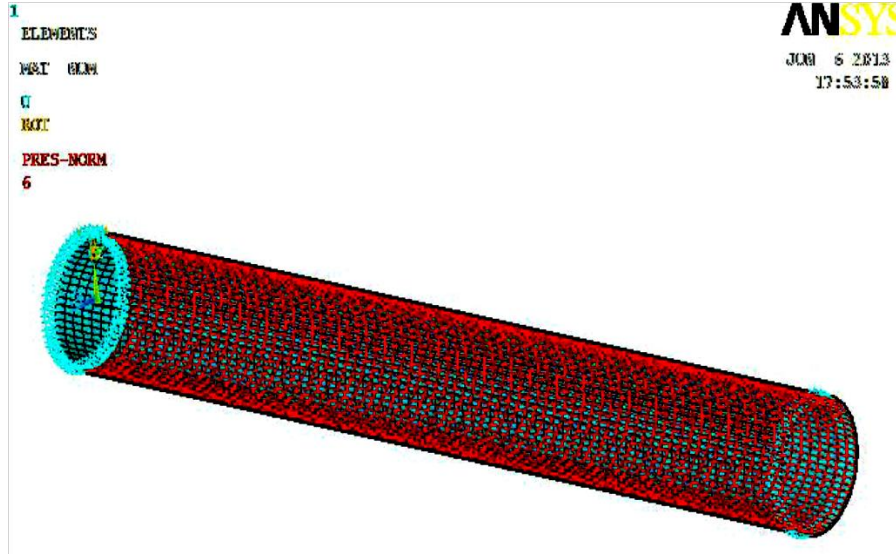


Şekil 2.24. Kompozit Sargılı Borunun Katmanları

Kompozit sarımlı boruların sınır şartları ve yüklemeleri Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Ayrıca borunun boyutları da Çizelge 2.5.'de verilmiştir. Ortotropikten dolayı tank modelinin tamamı çizilmiştir. Kompozit sargılı borunun iç yüzeyini hasara uğratacak iç basınç yüklemesi adım adım uygulanmıştır.

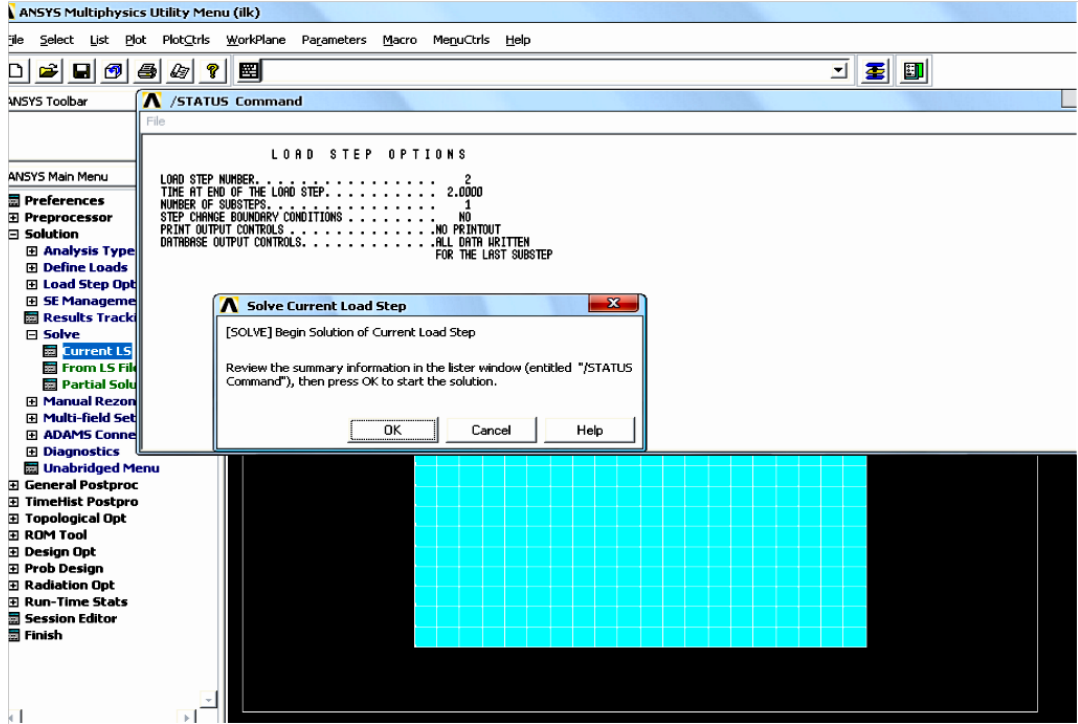
Çizelge 2.4. Kompozit sargılı borunun boyutları

Kompozit Borunun Boyu (mm)	650
Kompozit Borunun Çapı (mm)	75
Kompozit Borunun Et kalınlığı (mm)	1,7
Kompozit Borunun Sarım Açıları(°)	90 - 55 - (-55) - 90

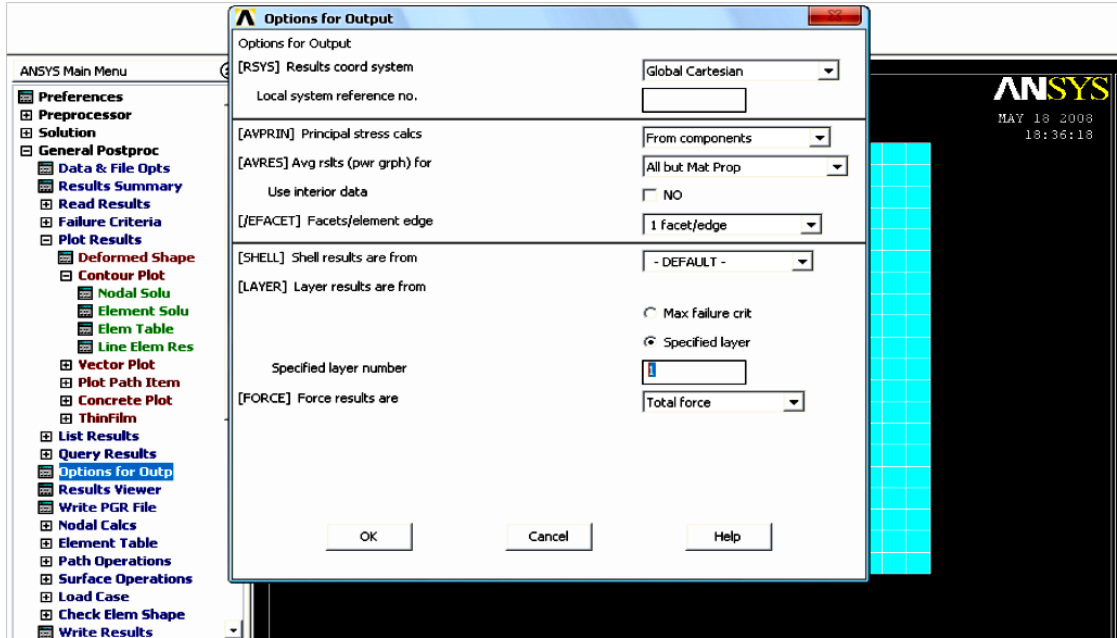


Şekil 2.25. Kompozit sargılı borunun sınır şartları

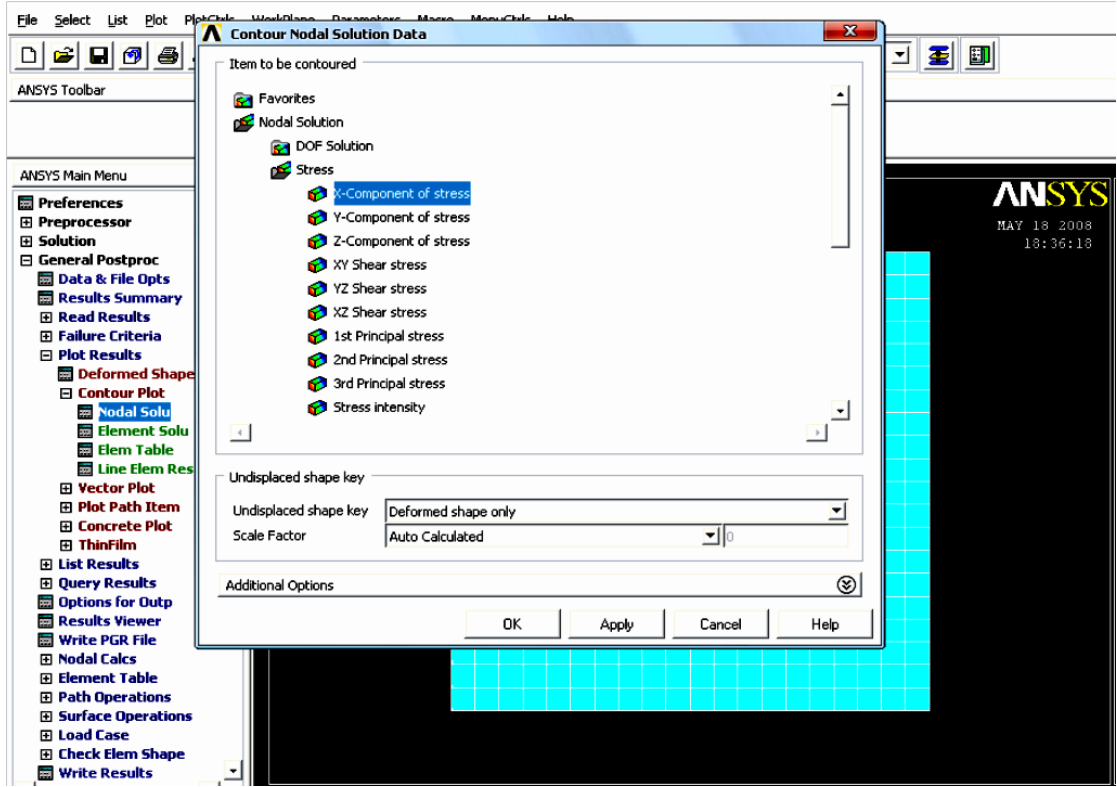
Mesh durumu ve sınır şartlarından sonra, çözüm işleminin başlatılması için bütün pencereler kapatılıp, çözüm işlemi başlatılmış olur.



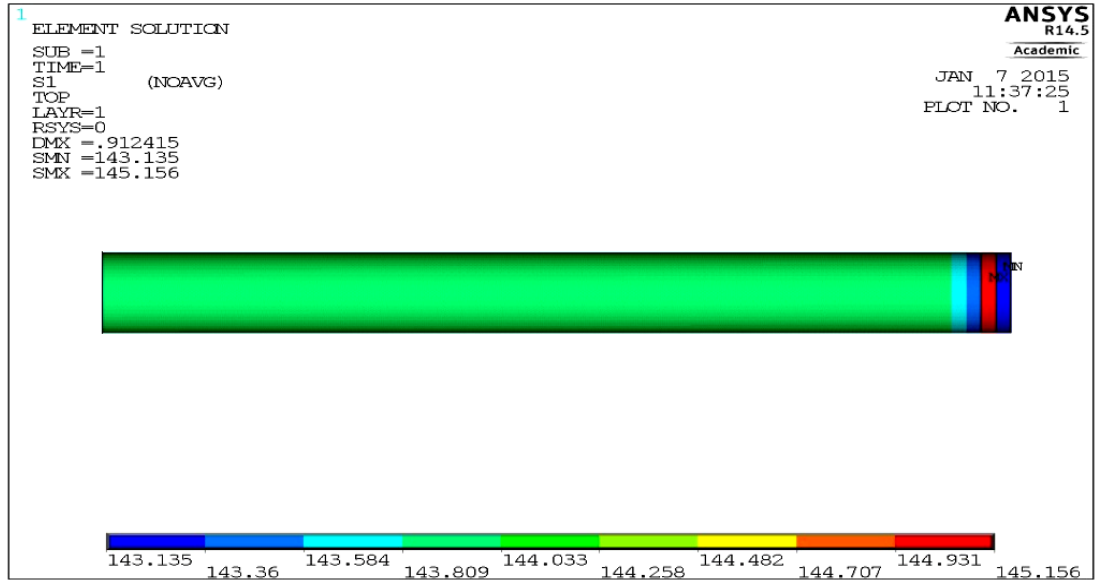
Şekil 2.26. Çözümün başlatılması işlemi



Şekil 2.27. Gerilme-Şekil değiştirme sonuçlarını göreceğimiz tabakanın seçimi

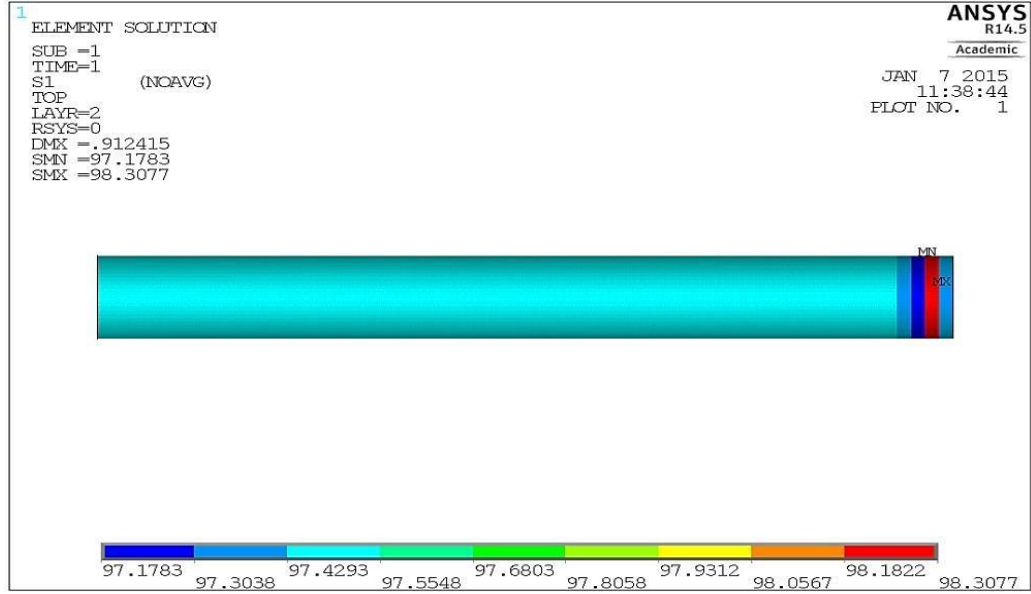


Şekil 2.28. Sonuçların ekrana yansıtılması

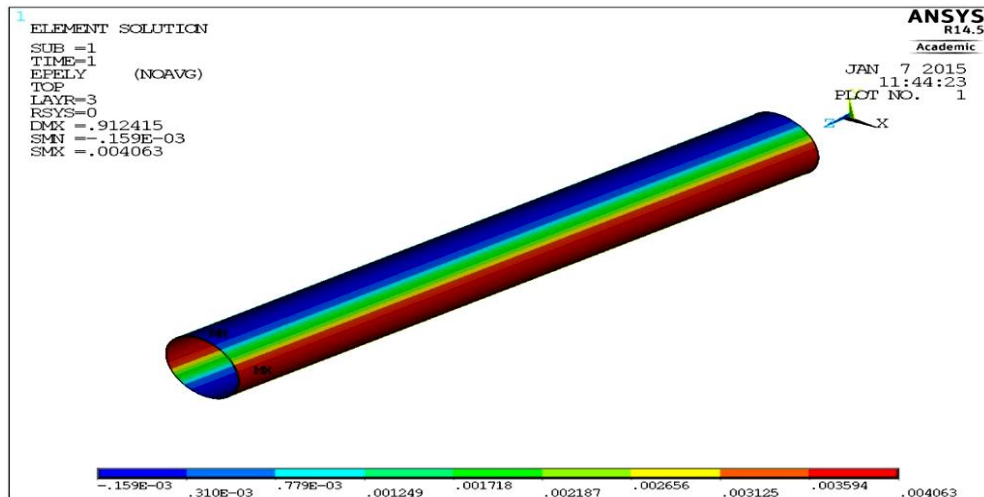


Şekil 2.29. Plakanın 1 yönlü gerilmesi (x eksenî yönünde)

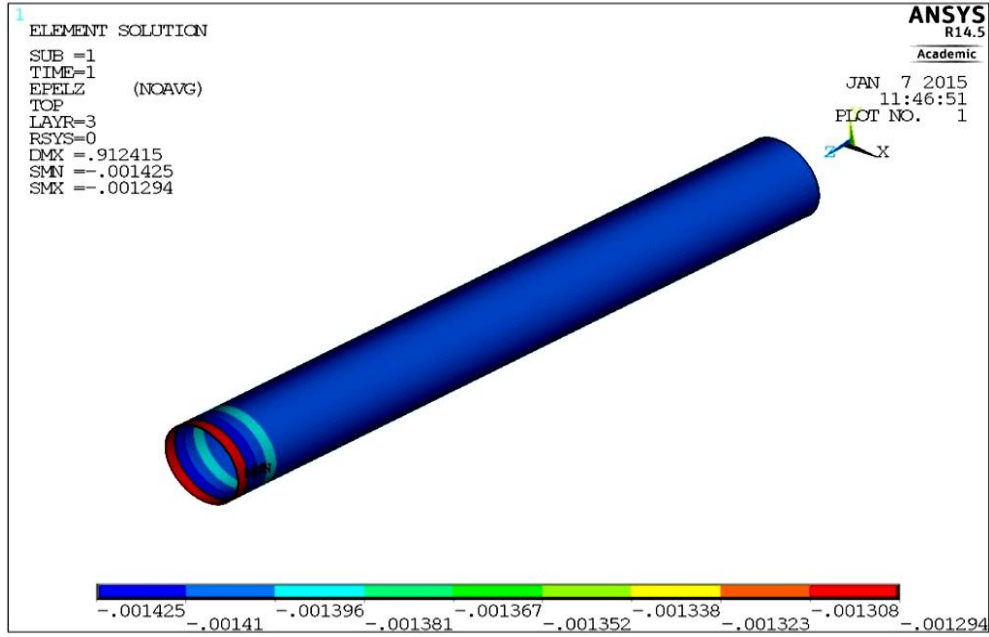
Şekil 2.29’ da görüldüğü üzere 1 yönlü gerilme 145.156 bar ve Şekil 2.30’ da ise 2 yönlü gerilme 98.307 bar olarak görülmüştür. Şekil 2.31’ de ise 1 yönlü şekil değiştirmesi maksimum 0,0040 mm olmuş ve ayrıca Şekil 2.32’ de ise 2 yönlü şekil değiştirme ise -0,014 mm olarak dışa doğru bir şekil değiştirme görülmüştür.



Şekil 2.30. Plakanın 2 yönlü gerilmesi (y eksenı yönünde)

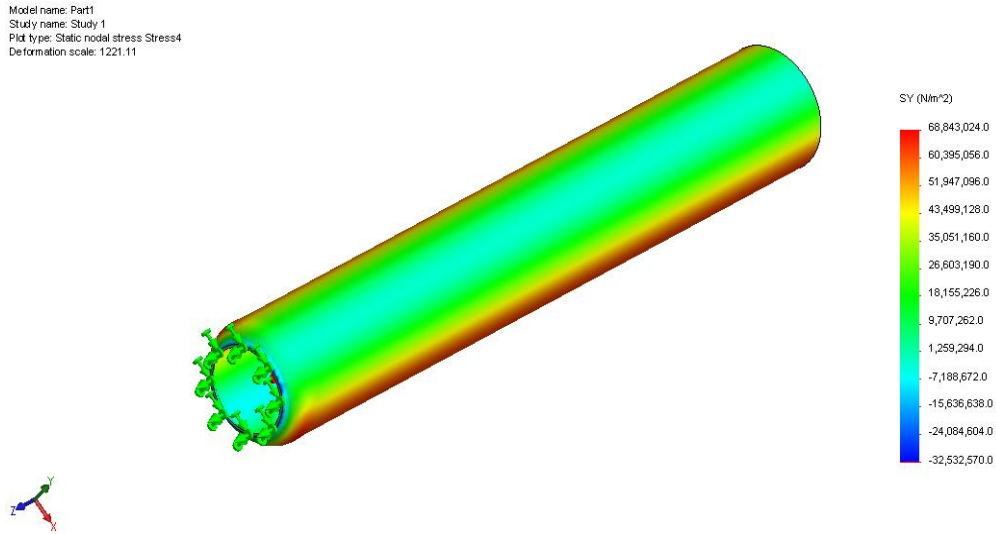


Şekil 2.31. Plakanın 1 yönlü şekil değiştirmesi (x eksenı yönde)

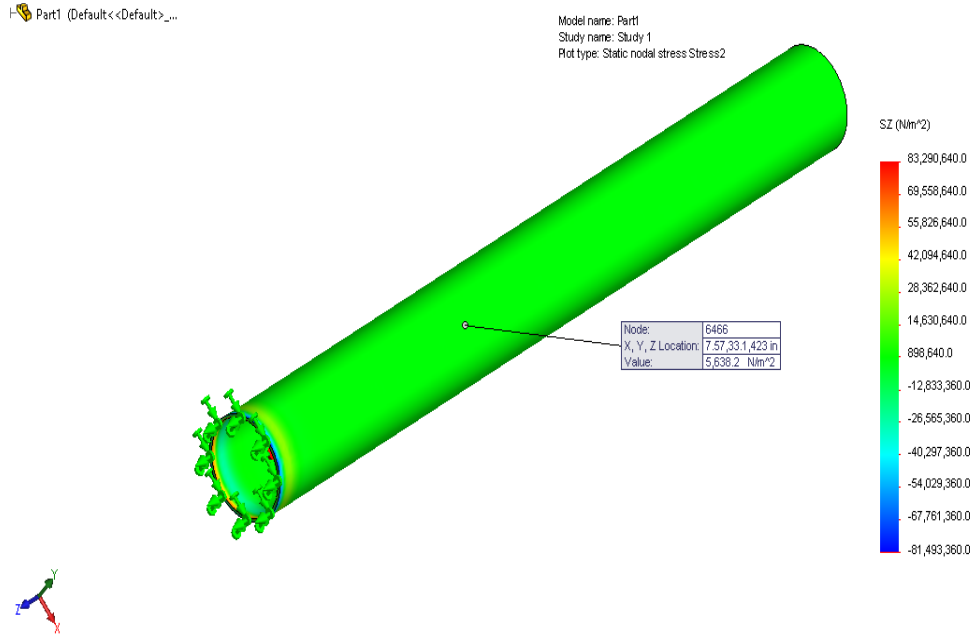


Şekil 2.32. Plakanın 2 yönlü şekil değiştirmesi (y eksenini yönünde)

Şekil 2.34 ve 2.35’ de uygulanmış olan teğetsel ve aksenal yönlü gerilmeleri solid olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Plakanın teğetsel yönlü gerilmesi Solid gösterimi



Şekil 2.34. Plakanın aksenal yönlü gerilmesi Solid gösterimi

Program uygulanan herhangi bir iç basınç yüklemesi için çalıştırılmış ve analiz sonlandığında iç basınçtan dolayı kompozit sargılı borunun hasar durumu her bir katmanı için Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak borunun hasar durumu incelenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tezin konusunu teşkil eden kompozit sargılı boru Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi hem iç hem de dış kısmı dikişsiz olarak sarım metodu ile üretilmiştir. Kompozit sargılı borunun iç yüzeyi ve dış yüzeyi hiçbir işleme maruz kalmamaktadır.

3.1. Kompozit Sargılı Borunun Üretimi

Yüksek basınca dayanıklı kompozit sargılı borular hiçbir yüzeysel işlem yapılmadan üretilmiştir. Tez çalışmasında yer alan kompozit sargılı boruların imalat aşamaları şu şekildedir.

Filament sargı makinesi 300 mm ve 700mm çapları arasında ve maksimum 1000 mm boyunda sarım yapabilen 10 adet mandreni bulunan ve aynı anda 10 adet kompozit boru sarabilen bir makinedir. Aynı açılarla sabit kalmak koşulu ile helisel ve konik biçimde istenilen kalınlıkta otomatik olarak sarım yapabilir.

1. Aşama: Kompozit sarımlı boru oluşturulurken cam elyaf malzememiz ve reçinemiz farklı yollardan filament sargı makinemize bağlanarak sistem sarım olayına hazırlanır. Şekil 3.1' de görülmektedir.



Şekil 3.1. Kompozit sargılı boru imalatı

2. Aşama: İstedığımız açılara ayarlanan filament sargı makinemiz sarımları Şekil 3.2' deki gibi yapmaktadır.

Sarım işlemi sarım yapacağımız elyaf malzemelerimizi epoksi havuzu öncesi paketlerinden çıkarıp havuza girip çıkmasını sağlayacak şekilde yerleştirilir. Epoksi havuzumuza yeteri kadar epoksi malzemesi konulduktan sonra, sarım yapılacak cam elyaf malzememizi geçen havuzdan filament sarım makineye ve malafalar ile sabitlenen mandrenlere bağlanır. Bağlama işlemi bittikten sonra bilgisayara komut verilerek sarım işlemine başlanır.



Şekil 3.2. İstenilen açılarda sarımın yapılması

3. Aşama: Sarımı yapılan kompozit borularımız oda sıcaklığında beklemeye alınmaktadır. Bekletilen kompozit sargılı borular bir süre sonra kalıbından çıkartılarak üretimi tamamlanmış olur.



Şekil 3.3. Üretimi tamamlanmış kompozit sargılı boru

3.2. Kompozit Sargılı Boruların Hidrolik Basınç Patlatma Deneyi

3.2.1. Deney Ekipmanları

Hidrolik basınç patlatma deneyi Şekil 3.4 'te görülmekte olan 1000 Bar kapasiteli, PLC kontrollü, servo motorlu hidrolik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Patlatılacak kompozit sargılı boru Şekil 3.5' de ve iki tarafı kapatılmış hidrolik hortumlu tıpa ile birlikte Şekil 3.6 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. PLC kontrollü, servo motorlu hidrolik test cihazı



Şekil 3.5. PLC kontrollü, hidrolik test cihazına bağlı olan kompozit boru



Şekil 3.6. Ekipmanları bağlanmış kompozit sargılı boru

Bu çalışmada Şekil 3.7 'da sarım metodu yardımıyla cam elyaf fiber malzemenen üretilen kompozit sargılı borulara hidrostatik basınç patlama testi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Kompozit sargılı boru

Üretimi tamamlanmış kompozit sargılı borular deney aparatları sayesinde bağlantısı yapılıp, PLC kontrollü deney kabininin içine alınarak Şekil 3.8’ de görüldüğü üzere 242 bar hidrolik test basıncına maruz bırakılarak hasara uğratılmıştır.



Şekil 3.8. Basınca maruz kalan kompozit sargılı borunun hasarı

4. TARTIŞMA VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

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

4.1. Kompozit Sargılı Borunun Tasarım Sonuçları

Cam Elyaf/Epoksi kompozit malzemedan üretilen borular iç basınç yüklerinin yaklaşık %35' ini taşıyan kısımdır. Kompozit sargılı borular 200 Bar ve üzeri değerdeki patlama basıncına göre tasarımı yapılırken ön tasarım parametrelerinin hesaplanmasında maksimum patlama basıncı değeri standartta verilen değerin 100 Bar üzerinde olacak şekilde 300 Bar olarak alınmıştır. Bu sayede kritik bölgeleri dikkate alan nihai tasarımın, standart ile belirlenmiş maksimum patlama basıncı değerinin üzerinde kalması hedeflenmiştir. Bu şekilde analiz ve deney sonucunda bulunan değerler Çizelge 4.1. ve 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. 90x55x-55x90 Açılı Kompozit sargılı boruların patlama basıncı değerleri

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

Çizelge 4.2. 55x-55x90x90 Açılı Kompozit sargılı boruların patlama basıncı değerleri

	Analitik Metot	Sayısal Metot	Deneysel Metot
Cidar Kalınlığı (mm)	1,7	1,7	1,7
Patlama Basıncı (Bar)	234	239	244,42

Kompozit sargılı borular Cam elyaflı, epoksi matrisli kompozit malzeme ile çift 90° ve $\pm 55^\circ$ simetrik katman düzenlerinde sarılan kompozit sargılı borunun sayısal olarak elyaf hasarına göre et kalınlığı ve patlama basıncı değerleri Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

Ayrıca hem $90 \times 55 \times 55 \times 90$ açılı hem de $55 \times 55 \times 90 \times 90$ simetrik katman düzenlerinde sarılan kompozit sargılı boruların hidrostatik patlama basıncı deneyine tabi tutulmuş ve maksimum patlama basıncı değerlerine ulaşılmıştır.

Sonuç olarak $90 \times 55 \times 55 \times 90$ açılı katman düzeninde sarılan kompozit borular için Excel tablosu kullanılarak analitik olarak yapılan işlemlerde patlatma basınç değeri 240 Bar olarak bulunmuş, ANSYS sonlu eleman programında ise 241 Bar olarak tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarda ise bu patlatma değeri 246,42 Bar olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere, hesaplanan değerler ve yapılan deneyler sonucu bulunan maksimum patlama basıncı değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

Ayrıca $55 \times 55 \times 90 \times 90$ açılı katman düzeninde sarılan kompozit borular için Excel tablosu kullanılarak analitik olarak yapılan işlemlerde patlatma basınç değeri 239 Bar olarak bulunmuş, ANSYS sonlu eleman programında ise 234 Bar olarak tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarda ise bu patlatma değeri 244,42 Bar olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere, hesaplanan değerler ve yapılan deneyler sonucu bulunan maksimum patlama basıncı değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

5. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında, ilk olarak belirli ebatlarda ve dört katmanlı cam elyaf-epoksi malzemelerinden oluşan silindirik kompozit boruların sabit bir iç basınç dikkate alınarak tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan kompozit basınç tankının hasar analizleri elyaf hasar durumuna göre analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak yapılmış olup, hasar kriteri olarak Tsai-Wu hasar kriterinden yararlanılmıştır. Analizlerde toplam cidar kalınlığı değiştirilmeden farklı katman düzenlerinin patlama basıncına etkileri incelenmiştir. Sonlu eleman analizinde boruların bütünüünün analizi yapılmış ve borulardaki kritik bölgelerin iç basınç altındaki davranışları gözlenmiştir.

Daha sonra Filament sargı makinesi kullanılarak İpliksi Sarım Yöntemi ile kompozit boruların üretimi yapılmıştır. Boruda fiber malzeme olarak cam elyaf, matris malzeme olarak epoksi reçine kullanılmış ve borular için sarım açısı 90° , 55° , -55° , 90° ve 55° , -55° , 90° , 90° olarak belirlenmiştir. Belirlenmiş bu açılarda, kompozit sargılı boruların 230 Bar üzeri bir iç basınca dayanması sağlanmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçları şöyle sıralayabiliriz;

- Bu tez çalışmasında kompozit sargılı borunun 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 uygulanabilmiştir.
- Kompozit sargılı boruların patlatma esasında kritik nokta bağlantı noktalarında değil de orta kısmından olduğu görülmüştür.
- Kompozit boruların oluşumunda en iyi katman düzeninin $\pm 55^\circ$ olduğu analitik olarak tespit edilmiştir. Ayrıca helisel katmanın sarımı aşamasında

elyafların birbirinin üzerine her yerde paralel gelememesi durumunda dolayı 90°'lik teğetsel sarım katmanı eklenmiştir.

- Kompozit sarımın 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°, ±55°, 90°] ile yapılan analizler neticesinde bulunan maksimum patlama basıncı 246,42 MPa olarak görülür.
- Tez çalışmamızda en iyi helisel ve teğetsel katmanlar sonucu seçmiş olduğumuz açılar [90°, ±55°, 90°] ile yapılan analizler sonucu patlama basıncı 246,42 MPa olarak görülmüştür.
- Tez çalışmamızda en iyi helisel ve teğetsel katmanlar sonucu seçmiş olduğumuz açılar [±55°, 90°, 90°] ile yapılan analizler sonucu patlama basıncı 244,42 MPa olarak görülmüştür. Bu da demek oluyor ki; teğetsel ve helisel katmanlarda en iyi helisel sarım açısının ±55° ve en iyi teğetsel sarım açısının da 90° olduğudur.

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] Gibson R. F. , Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- [3] Kalaycıoğlu B. ve Dirikolu M.H. , Dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı yüksek basınç tankı tasarımı, Int. J. Eng. Research and Development, 1, No.2, 53-60, 2009.
- [4] Tuttle M. E. , Structural Analysis of polymeric composite Materails, Marcel Dekker, 2003.
- [5] Mallick P. K. , 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] Olgun B. Ö. , Kompozit Yama İle Tamir Edilmiş, Çatlaklı Filaman Sarım Borularda Kırılma Analizi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [8] Tarakçıoğlu N., Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız Filaman Sarım Cam-Epoksi Borularda Sarım Açısının Malzeme Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1992.
- [9] Xia M., Takayanagi H., Kemmochi K., Analysis of Multi-Layered Filament-Wount Composite Pipes Under Internal Pressure, Composite Structures 53, 483-491, 2001.

- [10] Balya B., Design And Analysis Of Filament Wound Composite Tubes, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Ankara 2004.
- [11] Önder A. , First Failure Pressure of Composite Pressure Vessels, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İZMİR, Şubat 2007.
- [12] Roy A. K. , and Tsai S. W. , Design of Thick Composite Cylinders, Journal of Pressure Vessel Technology, 110, 255-62, 1988.
- [13] Sayman O. , Analysis of multi-layered composite cylinders under hygrothermal loading, Composites: Part A, 36, 923-33, 2005.
- [14] Akçay I. H. , Kaynak I. , Analysis of Multilayered Composite Cylinders under Thermal Loading, J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 24, No. 11, 2005.
- [15] Bakaiyan H. , Hosseini H. , Ameri E. , 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.
- [16] Gemia L. , Tarakçioğlu N. , Akdemir A. ve Şahin Ö. S. , Progressive Fatigue Failure Behavior Of Glass/Epoxy (± 75)₂ Filament-Wound Pipes Under Pure Internal Pressure, Materials & Design, Vol. 30, 4293-4298, 2009.
- [17] Pavlovski D. , Mislavsky B. ve Antonov A., CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, Reinforced Plastics, Sayfa: 36-38, 2007.
- [18] Cherevatsky S. , Cherevatsky A. , Dayan H. ve Stepanov A. , New Design of Composite/Metal Gas Storage Vessels and Propellant Tanks, AIAA 2004- 3508.
- [19] Djehiche B. , Eddahbi M. , Sun X. K., Du S.Y. ve Wang G. D., Bursting problem of filament wound composite pressure vessels, The International Journal of Pressure Vessels and Piping, Cilt: 76, No:1, Sayfa: 55-59 (5) 1999.

- [20] Tam W. H. , Griffin P. S. ve Jackson A. C. , Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Pressurant Tank Assembly, AIAA 2002-4349.
- [21] Parnas L. ve Katirci N. , Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions, Composite Structures, 58, 1, Sayfa: 83-95, 2002.
- [22] TS 138 EN 10002-1, Metalik malzemeler, Çekme deneyi, Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, 2004.
- [23] Tuttle M. E., Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Inc., New York, 2004.
- [24] Kollar L. P. , George S. Springer, Mechanics of Composite Structures, Cambridge University Press, 2003.
- [25] Liang C. C. , Chen H. W. ve Wang C. H. , Optimum Design Of Dome Contour For Filament-Wound Composite Pressure Vessels Based On A Shape Factor, Composite Structures, 58, 469–482, 2002.
- [26] Tsai S.W., Composite Design, Think Composites, USA, 1987.