

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK BASINÇLI ALÜMİNYUM
CİDARLI KOMPOZİT HİDROJEN
DEPOLAMA TANKLARININ
HESAPLAMALI GERİLME VE GERİNME
ANALİZLERİ VE HİDROJEN DEPOLAMA
VERİMLİLİKLERİ

Orçun ERGİNCAN

Y. LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK BASINÇLI ALÜMİNYUM
CİDARLI KOMPOZİT HİDROJEN
DEPOLAMA TANKLARININ
HESAPLAMALI GERİLME VE GERİNME
ANALİZLERİ VE HİDROJEN DEPOLAMA
VERİMLİLİKLERİ

Orçun ERGİNCAN

Y. LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Ali ATA

GEBZE

2009

 GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ	MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ JÜRİ ONAY FORMU
--	--

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Doç. Dr. Ali ATA

ÜYE : Doç. Dr. Metin USTA

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Osman ÖZTÜRK

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06/03/2009 tarih ve 2009/07 sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 17/03/2009 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Orçun ERGİNCAN'ın çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu 06/03/2009 tarih ve 2009/07 sayılı kararıyla Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Tezin Adı: Yüksek Basıncılı Alüminyum Cidarlı Kompozit Hidrojen Depolama Tanklarının Hesaplamalı Gerilme ve Gerinme Analizleri ve Hidrojen Depolama Verimlilikleri

Tezi Yazan: Orçun ERGİNCAN

Bu yapılan çalışmada, karbon fiber filaman sarmal yüksek basınçta hidrojen depolama tankı 2 ana şekilde incelenmiştir.

Bunlardan ilki teorik olarak ince ve kalın cidarlı depolama tanklarının incelenmesi ve bu modele uygun hasar modelinin çıkarılmasıdır. Matematiksel olarak çözümlenen gerilme ve gerinmeler, uzama katsayılarının çözümlenmeleri ele alınmış ve hesaplamalarında kullanılacak tensörler belirlenmiştir. Mikromekanik ve makromekanik özellikleri incelenerek lamine malzemenin özellikleri bulunmuştur.

İkinci kısımda yüksek basınçlı alüminyum iç çeperli karbon fiber kompozit sarmal hidrojen depolama tankı için teorik olarak belirlenmiş olan formüller yardımıyla karbon fiber lamine dış kabuğun hasar analizlerinde bulunabilmek için karbon fiber matrisli bir malzeme seçilerek uzama katsayıları hesaplanmıştır. Seçilen malzemenin çekme mukavemeti yardımıyla minimum cidar kalınlıkları hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar hesaplamaları yapan ANSYS programına bu veriler girilerek hasar analizleri yapılmış ve sonuçlar elle yapılan hesaplamalara uygun olarak bulunmuştur.

Tasarıma uygun olan bu malzemede, hesaplanan dış kabuk kalınlıklarında (cidar) seçilen malzemeden yapılan yüksek basınçlı tankın, DOE (Amerika Birleşik Devletleri Enerji Departmanı) 2010 hedefleri uyarınca hacimce yoğunluk ve ağırlıkça yoğunluk, 10 MPa dan 100 MPa a kadar olan basınçlardaki analizleri yapılarak sonuçlar grafiklere aktarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Hidrojen Depolama Tankı, Hasar Analizi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, İç Basınç, Hidrojen Depolama Verimliliği

SUMMARY

Name Of The Thesis: High Pressure Aluminum Lined Composite Hydrogen Storage Tanks Stress and Strain Analysis and Hydrogen Storage Efficiencies

The Author Of The Thesis: Orçun ERGİNCAN

In this study, carbon fiber filament wound high pressure hydrogen storage composite tanks are studied in two main headings. The results are driven to optimize the storage capacity of the high pressure tank.

First of these main headings are theoretical investigation of the micromechanics and macromechanics of the laminates and the theoretical investigation of thin and thick wall cylindrical storage tanks. Mathematically stresses and strains are acquired and tensors for analytical solutions are determined.

The second part of the thesis is aluminum lined carbon fiber composite storage tank is analytically experimented according to material properties of the carbon fiber Tsai-Wu and Von Misses failure analysis are applied to the model.

The minimum wall thicknesses are determined by the help of the tensile strength of the material. And by the help of ANSYS finite element modeling software program the model is subjected to itinerary stresses to find the maximum strain of the laminate model and the solutions are checked corresponding to analytical solutions of the model.

According to American Department of Energy (DOE) target 2010 maximum volume and maximum weight of the high pressure storage system is specified, according to those specification hydrogen storage tank is evaluated under pressures from 10MPa to 100MPa with 10MPa of pressure risings and the maximum hydrogen masses that the cylinders can store are determined.

Keywords: Composite Hydrogen Storage Tanks, Failure Analysis, Finite Element Analysis, Internal Pressure , Hydrogen storage efficiencies.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanma aşamasında değerli katkılarını ve zamanını esirgemeyen Doç. Dr. Ali ATA'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Işıl YULUSOY, Sinan ÖNER ve Savaş ÖZTÜRK'e

Bana tez yazım sürecinde koşulsuz destek olan Şeniz SAÇ'a

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve inanan Canım aileme

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Orçun ERGİNCAN

Mart, 2009

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1.1. Hidrojen Enerjisi Bugün	1
1.2. Hidrojen Depolama Çeşitleri	2
1.2.1 Gaz Hidrojen	3
1.2.2 Sıvı Hidrojen Depolama	6
1.2.3 Katı Hidrojen Depolama	8
1.3. Kompozit Metal İç Astarlı Tip Üç Basıncılı Tankların Gelişimi	13
1.4. Kompozit Tankların Yapısı	16
3.1. Filaman Sarmal Teknolojisi	21
3.2. Filaman Sarmal Teknolojisinin Endüstriyel Önemi	22
3.3. Filaman Sarmal Üretim Teknolojisi	22
3.4. Filaman Sarmal Malzemeleri	23
3.4.1 Fiber Türleri	23
3.4.2 Reçine tipleri (Matris)	27
3.4.3 Destekleyiciler	29
3.5. Sarmal Şablonlar	30
3.5.1 Kasmak Sarmalı	30
3.5.2 Helikal Sarmal	31
3.5.3 Polar Sarmal	31
4.1. Genel	32
4.2. Elastik Yapısal Denklem	32
4.3. Kompozit Malzemelerin Mikromekanik Davranışları	34
4.4. Laminenin Makromekanik Davranışı	36

4.5.	Görelî Yönlendirilmiş Laminelerdeki Gerilme-Gerinme Bağınıtları	39
4.6.	Lamine Malzemelerin Makromekanik Davranışları	48
4.6.1	Klasik Laminasyon Teorisi	48
4.6.2	Lamine gerilme, gerinme davranışı	49
4.7.	Lamine Malzemedeki Gerinme ve Gerilme Varyasyonları	50
4.8.	Bileşke Lamine Kuvvetleri ve Momentleri	54
5.1.	Basınçlı Tankların Tasarımı	58
5.1.1	İnce- Dış Kabuk (Shell) Denklemleri	58
5.1.2	Kalın Dış Kabuk Denklemleri	62
5.2.	Kompozit Basınçlı Kapların Gerilme analizleri	65
5.3.	Hasar Analizleri:	65
5.3.1	Tsai-Wu Hasar Teorisi	67
5.4.	Sonlu Elemanlar Yöntemi	68
5.4.1	Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi	69
6.1.	Temel Analizler	70
6.2.	Analiz parametreleri ve sabitler:	74
7.1.	Yüksek Basınçlı Hidrojen Depolama Tankı Tasarım Sınırlamaları	84
REFERANSLAR		102

SİMGELER VE KISALTMALAR

a = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, atm l³ Mol⁻³

A = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, atm l² Mol⁻²

α' = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, l² Mol⁻²

α'' = Hacimsel genleşme faktörü, boyutsuz

b = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, l² Mol⁻²

B = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, atm l Mol⁻¹

BWR = Bennedict-Webb-Rubin denklemi, boyutsuz

c = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, atm K² l³ Mol⁻³

C = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, atm K l² Mol⁻²

D = Tank Çapı, cm

γ = Bennedict-Webb-Rubin denklem sabiti, l² Mol⁻²

E_{outer} = Modulus Elastisitesi dış duvar, GPa

FS = Güvenlik Faktörü , boyutsuz

L = Tank uzunluğu cm

m_{gas} = Gaz hidrojen kütle, kg

m_{outer} = Dış duvar kütle, kg

m_{total} = Sistem kütle, kg

p = Basınç MPa

ρ_{gas} = Hidrojen gaz yoğunluğu

ρ_{outer} = Dış duvar kütle yoğunluğu, kg/ m³

r = Tank yarıçapı, cm

R = Evrensel gaz hidrojen için sabit, Nm / K kg

σ_1 = Birinci ilke gerilme, MPa

σ_2 = İkinci ilke gerilme, MPa

σ_3 = Üçüncü ilke gerilme, MPa

σ_y = Von Mises gerilme, MPa

t = Tek cidarlı basınç damar duvar kalınlığı, cm

t_{outer} = Dış duvar kalınlığı, cm

T = Dinamik duvar kalınlığı, cm

T = Sıcaklık Hidrojen gazı, K

V_{gas} = Gaz hacmi m^3

V_{outer} = Dış duvar hacmi, m^3

V_{total} = Sistem hacmi, l veya m^3

ν = Poisson oranı, boyutsuz

Z_{hidrojen} = sıkıştırılabilirlik faktörü, boyutsuz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Hacimce hidrojen yoğunluk – basınç grafiği	3
Şekil 1.2 Tip üç kompozit hidrojen depolama tankı	5
Şekil 1.3 Hidrojen gazı depolamakta kullanılan cam küreler	5
Şekil 1.4 Hidrojen atomlarının katı içerisine nüfus etme şeması	9
Şekil 1.5 Nano karbon tüpler	10
Şekil 1.6 Yeniden şarj edilebilir metal hidrit pil	11
Şekil 1.7 Tip 3 kompozit yüksek basınçlı depolama tankı	14
Şekil 3.1 Filaman sarmal tekniği	20
Şekil 3.2 Karbon fiber kesiti	25
Şekil 3.3 Filaman sarmal patern kasnak sarmalı şematik gösterimi	30
Şekil 3.4 Filaman sarmal patern helikal sarmal şematik gösterimi	31
Şekil 3.5 Filaman sarmal patern polar sarmal şematik gösterimi	31
Şekil 4.1 Unidirectional güçlendirilmiş lamine şematik gösterimi	36
Şekil 4.2 Güçlendirilen silindirik kabuk üzerindeki yönlerin gösterimi	40
Şekil 4.3 Gerilme ve gerinme varyasyonların lamine kalınlığınca gösterimi	54
Şekil 4.4 Düzlem içi bileşke kuvvetlerin şematik gösterimi	54
Şekil 4.5 Düzlem içi bileşke momentlerin şematik gösterimi	55
Şekil 4.6 Lamine malzemede orta yüzey ve kalınlığın şematik gösterimi	56
Şekil 5.1 İnce cidar döndürümü ve bileşke kuvvetlerin gösterimi	58
Şekil 5.2 İnce silindirik kabuk	61
Şekil 5.3 Kalın silindirik kabuk içerisindeki yarıçapların, radyal kuvvetlerin ve hoop kuvvetlerin gösterimi	62
Şekil 5.4 Basınçlı tanklarda tanjantal (sol) ve radyal gerilme dağılımı (sağ)	64
Şekil 7.1 Malzeme global ve yerel koordinatları	76
Şekil 7.2 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m ³) ağırlık yoğunluğu, çeşitli yarıçaplarda (%Ağırlık)	86
Şekil 7.3 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m ³) hacimce yoğunluk, çeşitli yarıçaplarda (Kg/m ³)	86
Şekil 7.4 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m ³) Çeşitli basınçlarda depoladığı hidrojen miktarı, çeşitli yarıçaplarda (kg-basınç)	87
Şekil 7.5 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m ³) Çeşitli basınçlardaki çeşitli yarıçaplarda, iç hacimleri (m ³ /10MPa)	87
Şekil 7.6 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m ³) Çeşitli hacimlerdeki cidar kalınlıkları	88
Şekil 7.7 Eğer hidrojen ağırlığı 5 Kg sabit alınacak olursa hidrojenin sahip olması gereken hacim aynı zamanda tüpün iç hacmi yarıçap 15cm için.	89
Şekil 7.8 Eğer hidrojen ağırlığı 5 Kg sabit alınacak olursa hidrojenin sahip olması gereken hacim aynı zamanda tüpün iç hacmi yarıçap 15cm için	89
Şekil 8.1 Beş katmanlı lamine kompozit malzeme	90
Şekil 8.2 5 adet katmandan oluşan ve sırasıyla 90 55 0 -55 90 oryantasyonuna sahip lamine malzeme.	91
Şekil 8.3 Bileşke elastik gerinme	92

Şekil 8.4 Maksimumum asıl elastik gerinme	93
Şekil 8.5 Asıl yöndeki maksimum gerinme	94
Şekil 8.6 5 Katmanlı toplam deformasyon miktarı.	95
Şekil 8.7 20 cm yarıçaplı, ve 67 cm uzunluğa sahip ve hesaplamalara uygun bir şekilde cidar kalınlığı 100 MPa için 2 cm olan depolama tankının simülasyonu için yapılan model	96
Şekil 8.8 Model simülasyondan doğru daha doğru bir sonuç alınabilmesi için en yüksek hassasiyette meshlenmiştir.	97
Şekil 8.9 Maksimum asıl elastik gerinme	98
Şekil 8.10 Bileşke Von-Misses Elastik gerilmesi	99

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1 Çeşitli Yakıtların Kimyasal enerji yoğunlukları	2
Tablo 1.2 Çeşitli yakıtların depolanan kimyasal enerji yoğunlukları	2
Tablo 1.3 Gaz fazında hidrojen depolama kıyaslaması	6
Tablo 1.4 Sıvı Hidrojen depolama tipleri kıyaslaması	7
Tablo 1.5 Metal Hidratların Hidrojen yoğunlukları	9
Tablo 1.6 Katı hidrojen depolama çeşitleri	10
Tablo 1.7 Aşağıdaki tabloda alenatlar ve başlıca özellikleri verilmiştir.	11
Tablo 1.8 Borohidratların hidrojen depolama ağırlık yüzde, çözünme sıcaklıkları	12
Tablo 1.9 Kimyasal hidratların hidroliz reaksiyonu ve H ₂ ağırlık yoğunlukları	12
Tablo 1.10 Kimyasal hidratların çözünmeleri ve H ₂ ağırlık yoğunlukları ve reaksiyon sıcaklıkları	13
Tablo 6.1 Çeşitli basınçlarda sıkıştırma faktörü	72
Tablo 7.1 IM6 Karbon Fiberin Özellikleri	75
Tablo 7.2 Verilen Basınçlardaki çeşitli yarıçaplardaki yüksek basınçlı kapların et kalınlıkları	77
Tablo 7.3 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m ³) depoladığı hidrojen miktarı (kg)	84
Tablo 7.4 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m ³) iç hacmi (m ³)	84
Tablo 7.5 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m ³) ağırlığı (kg)	85
Tablo 7.6 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m ³) ağırlık yoğunluğu	85
Tablo 7.7 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m ³) hacimce yoğunluk, çeşitli yarıçaplarda (Kg/m ³)	86
Tablo 7.8 Hidrojen ağırlığının 5 Kg sabit alınması halinde hidrojenin sahip olacağı hacim aynı zamanda tüpün iç hacmi aşağıda gösterilmiştir.	88

1 GİRİŞ

1.1. Hidrojen Enerjisi Bugün

Hidrojen ekonomisinde araştırma ve geliştirme öncelikleri bakımından varılan ortak kanaat, hidrojen enerjisinin maliyet bakımından fosil yakıtlarla yarışabilir konuma ulaştırılması, güvenli hale getirilmesi, müşteriye ulaştırılabilir olması ve karbondioksit emisyonu bakımından avantajlarının vurgulanması gerekliliğidir. Özellikle taşımacılık sektöründe yakıt hücreleri, depolama gereçleri ve dağıtım sistemleri gibi kritik konularda gelişim sağlanmıştır ve hidrojen teknolojisinin önünde geliştirilmesi öncelikli olan üç ana madde vardır[1].

- 1) Maliyet açısından verimli, dayanıklı, güvenli ve çevre bakımından istenilen ölçülere uygun yakıt hücreleri sistemleri ve hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması. Böylece araçların mevcut hidrojen depolama sistemiyle kısa olan mesafelerinin uzatılması.
- 2) Hafif tip ticari araç kullanıcılarının hidrojen ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için gerekli altyapının geliştirilmesi. Hidrojen dağıtılmasındaki yüksek maliyetlerin düşürülmesi.
- 3) Hidrojen üretimindeki yüksek maliyetlerin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilmeye başlanarak üretim maliyetlerinin düşürülmesi

Bu sayılan üç madde asıl olarak bütün yakıtlar için ticari geçerliliktedir. Ancak hidrojeni bu konuda özel bir konuma getiren yüksek yayılma gücü, gaz ve sıvı hallerinde oldukça düşük yoğunluk, düşük molekül ağırlıklı alkollere ve hidrokarbonlara göre yüksek yanıcı özellikleridir (bakınız Tablo1.1, Tablo1.2). Bu özgün özellikler, özel maliyetler ve dağıtımın her kademesinde özel güvenlik unsurlarını beraberinde getirerek üretimden taşıt üzerinde depolamaya maliyetleri arttırmaktadır[1].

Bu üç ana maddeden biri olan taşıt üzerinde depolama konusunda bazı teknolojiler, örnek olarak yüksek basınçlı tanklar ve sıvı hidrojen depolama tankları hali hazırda kullanılmakta olan sistemlerin uygun hale getirilmeleriyle var olan alt yapı üzerinden dağıtıma geçebilecekleri için özel bir konuma sahiptirler.

Tablo 1.1 Çeşitli Yakıtların Kimyasal enerji yoğunlukları[2].

Yakıt Vektör	Tipik Kimyasal Enerji Yoğunluğu
Hidrojen	142.0 MJ/kg
Etanol	29,7 MJ/kg
Amonyak	17.0 MJ/kg
Otomotiv benzini	45.8 MJ/kg
Metan	55.5 MJ/kg
Metanol	22.7 MJ/kg

Tablo 1.2 Çeşitli yakıtların depolanan kimyasal enerji yoğunlukları[2].

Yakıt Vektör	Tipik Depolanan Kimyasal Enerji Yoğunluğu
Hidrojen	7.1 MJ/kg at 5wt %
Etanol	26.7 MJ/kg at 90wt%
Amonyak	13,6 MJ/kg at 80wt%
Otomotiv benzini	41.2 MJ/kg at 90wt %
Metan	44.5 MJ/kg at 80wt %
Metanol	20.4 MJ/kg at 90wt %

1.2. Hidrojen Depolama Çeşitleri:

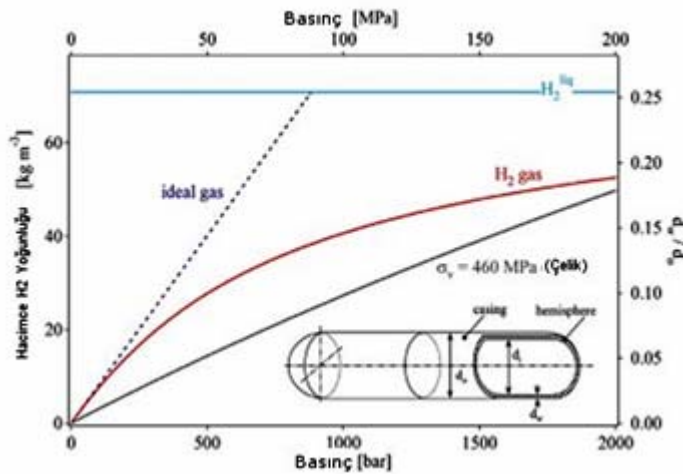
Hidrojenin bütün kimyasal yakıtlar içerisinde en yüksek yanma değerine sahip olması, yenilenebilir olması ve çevre dostu olması günümüzde hidrojeni geleceğin en gözde yakıtı olarak karşımıza çıkarır. Mobil ve durağan uygulamalarında depolanacak malzemedeki hidrojenin hacimsel ve ağırlıksal yoğunlukları ekonomik olarak geçerliliklerinin belirlenmesinde ve verimlilikleri arasında kıyaslama yapılması açısından büyük önem taşır[4].

Hidrojen günümüz teknolojisiyle üç değişik fazda ve değişik yöntemlerle depolanabilmektedir.

1.2.1 Gaz Hidrojen:

1.2.1.1 Yüksek Basıncılı Gaz Silindirleri

Günümüzde hidrojen depolamakta kullanılan en yaygın yüksek basınçlı gaz silindirleri 20MPa maksimum basınca sahip olanlardır. Yeni ve hafif kompozit sistemlerin geliştirilmesiyle 80 MPa basınca dayanacak sistemler üretilmiştir. Ve hidrojenin hacimsel yoğunluğu 36kg.m^{-3} e ulaşmıştır bu da normal kaynama noktasındaki sıvı halinin neredeyse yarısı büyüklüğündedir [4]. Ağırlıkça hidrojen yoğunluğu basıncın artırılmasıyla ve cidar kalınlığının artması sebebiyle düşer(bakınız şekil 1.1).



Şekil 1.1 Hacimce hidrojen yoğunluk – basınç grafiği [4].

Malzemelerin çekme mukavemetleri örnek olarak 50 MPa dan (alüminyum için) 1100 MPa (yüksek kalite çelik için)'a kadar çok büyük bir yelpazede incelenebilir. Yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesi ile çekme mukavemetleri çeliğinkinden fazla bunun yanında yoğunlukları da çeliğinkinin yarısı olan malzemelerin üretilmesi ihtimali yüksektir.

Basınçlı tankların çoğunda malzeme olarak östenit çelik kullanılır (örn AISI 316 ve 304 ve AISI 316L ve 304L, 300°C üzeri karbon tane sınırlarının bozulmasının engellenmesi için), bakır veya alüminyum alaşımlar ortam sıcaklıklarında hidrojen etkilerine karşı dirençlidirler [4]. Diğer bir çok malzemeler gevrekliğe uğrar ve kullanılmamalıdır (örneğin alaşım veya yüksek mukavemetli çelikler (ferritik, martensitik ve beynitik), titanyum ve alaşımları ve bazı nikel alaşımları).

Güvenlik özellikle fazla nüfuslu alanlarda basınçlı tanklar için özel önem arz eder. Gelecekte basınçlı tanklar üç veya daha çok katmandan oluşturularak mekanik ve korozyon etkilerine daha dayanıklı hale getirileceklerdir. Tanklar polimer iç astarlı, karbon fiber sarmalla kaplandıktan sonra aramid veya alüminyum köpük ile kaplanarak darbe, korozyon ve mekanik özellikleri artırılarak daha güvenli hale getirileceklerdir [3-4].

Yüksek Basınçlı tanklar günümüzde dört çeşide ayrılmışlardır.

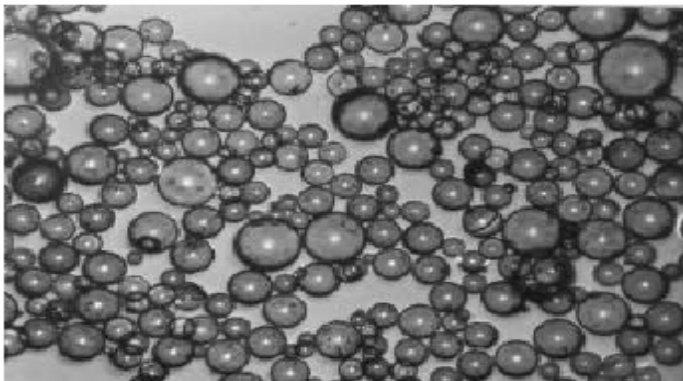
- Çelik ve alüminyum alaşımlarından yapılan bu metal tank ancak kullanılan malzemenin çekme mukavemeti ve güvenlik faktörü de ele alındığında alüminyum için 175bar ve çelik için 200bar olarak kullanılmaktadır.
- Metal Tank (alüminyum, çelik,) üzerine Cam Fiber/ Aramid Sarmal veya Karbon Fiber Sarmal uygulaması şeklindedir. Maksimum 350 bar civarında çalıştırılırlar.
- Tank kompozit malzemedan yapılır, Fiber/ Aramid Sarmal veya Karbon Fiber ve metal bir iç astarla sızdırmazlık sağlanır (Alüminyum veya çelik) uygulama alanına göre 500 ve 750 Bar uygulamalarda kullanılmıştır.
- Kompozit Tanklar örnek olarak karbon fiber tankın içinde termoplastik polimer iç astar. 750 ve üzeri uygulamaları bulunmaktadır(şekil 1.2).



Şekil 1.2 Tip üç kompozit hidrojen depolama tankı [47].

1.2.1.2 Cam Mikro Kapsüller

Cam Mikro kapsüller içerisinde hidrojen depolama tekniğinin mobil uygulamalarda kullanıma uygun hale getirilmesi üç aşamalı bir süreçtir. Bunlar yükleme, doldurma ve boşaltmadır. Öncelikle boş cam mikro kapsüller yüksek basınç (300-700 bar) ve yüksek sıcaklıkta (300°C) yüksek basınçlı tankın içerisinde H_2 ile doldurulur (şekil 1.3), daha sonra bu mikro kapsüller oda sıcaklığına kadar soğutulur ve düşük basınçlı araç tankına aktarılırlar ve son olarak da 200 ila 300 derece sıcaklığa çıkartılarak mikro kapsüller içerisindeki H_2 'in açığa çıkması sağlanır [5].



Şekil 1.3 Hidrojen gazı depolamakta kullanılan cam küreler [5].

Cam mikro kapsüllerin kullanımı önündeki problemler düşük hacimsel yoğunluk ve dolum için yüksek basınç ihtiyacıdır. Cam mikro kapsüller oda sıcaklığında yavaş da olsa hidrojen salınımı gerçekleştirirler. Bunun yanında pratik kullanımları önündeki bir diğer zorluk da uygulama esnasında kırılmalarıdır[5].

Bunun yanında şu gibi avantajları da vardır;

Bunlar hidrojeni düşük basınçlarda saklamaları sayesinde güvenli olmaları, hali hazırda kullanımda olan depolarda kullanılabilmeleri sayesinde depo maliyetlerinin azalması ve teknik avantaj olarak da ağırlıkça %5,4 hidrojen depolayabilmeleridir[5].

Tablo 1.3 Gaz fazında hidrojen depolama kıyaslaması[5].

Parametreler	Kompozit Tanklar		Mikro Cam Küre	
	Değer	Açıklama	Değer	Açıklama
Sıcaklık, T	+	Isı dönüştürücü ihtiyacı olmayan	-	Yüksek T gerekli
Basınç	-	Yüksek P kompresör ihtiyacı olan	+	Araç üstü düşük p mümkün
Enerji yoğunluğu	-	Sadece kısmen uygun	+	5 wt. ' kadar % H ₂ , uygun.
Dinçlik	+	Yaygın olarak test edilmiş	-	Kırılgan küre
Güvenlik	+	Var olan kodlar & standartlar	+	Niteliği gereği güvenli

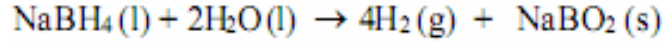
1.2.2 Sıvı Hidrojen Depolama

1.2.2.1 Kriyojenik tanklarda sıvı Hidrojen depolaması

Sıvı hidrojen kriyojenik tanklarda -250 °C de ortam basıncında depolanır. Hidrojenin kritik sıcaklığının düşük olması nedeniyle sadece açık sistemlerde kritik sıcaklığın üzerinde sıvı faz bulunmamasından dolayı depolanabilir. Kapalı depolama sisteminde basınç yaklaşık 10⁴ Bar artabilir. Sıvı hidrojenin hacimsel yoğunluğu 70.8 kgm⁻³ dür ve katı halinin yoğunluğundan biraz daha yoğunur. Sıvı hidrojen depolamanın karşısındaki zorluklar başlıca, verimli sıvılaştırma prosesi ve hidrojen kaynamasını önleyici süper termal izolasyonun sağlanmasıdır[8].

1.2.2.2 NaBH_4

Borohidratlar sıvı hidrojen depolamada kullanılabilirler. Katalitik hidroliz reaksiyonu

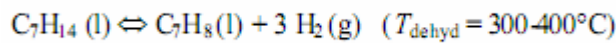


Teorik olarak maksimum hidrojen depolama yoğunluğu ağırlıkça %10.9'dur. [5].

1.2.2.3 Yeniden şarj edilebilir Organik Sıvılar

Bazı organik sıvılar da dolaylı yollardan hidrojeni sıvı fazda depolamak için kullanılabilirler. Temel uygulama, ilk olarak hidrojen organik sıvıdan uzaklaştırılır (dehydrogenize). Bir sonraki aşamada hidrojeni uzaklaştırılmış ürün aracın tankından merkezi işleme birimine aktarılırken hidrojen zengin olan sıvı doldurma tankına doldurulur. Son olarak Hidrojeni biten sıvıya yeniden hidrojen eklenerek dolum istasyonun ilk zincirine katılır [4-5].

Yeniden şarj edilebilir organik sıvılara örnek olarak Metilklorohekzan (C_7H_{14}) ve Toluene (C_7H_8) verilebilir.



Tablo 1.4 Sıvı Hidrojen depolama tipleri kıyaslaması [4].

Parametreler	LH_2		NaBH_2 Çözümleri		Organik Sıvılar	
	Değer	Açıklama	Değer	Açıklama	Değer	Açıklama
Sıcaklık, T	-	30 - 40 % kayıplar	+		-	Tdehyd= 300-400°C
Basınç	+		+		+	
Enerji yoğunluğu	+		+	10,9wt % H_2	+	6,1 wt % H_2
Güvenlik	-	Genel anlayış	?		-	Zehirlilik
Maliyeti	-	Altyapı	-	Yenileme masrafı	-	Altyapı

1.2.3 Katı Hidrojen Depolama

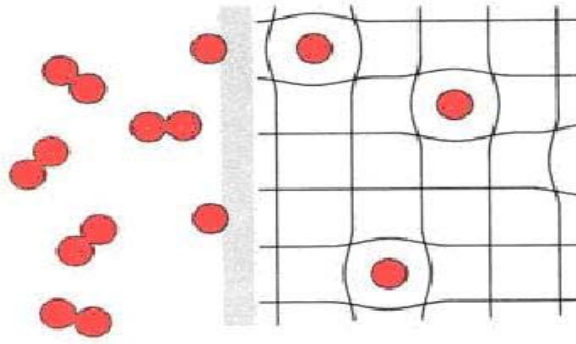
Katılar içerisinde hidrojen depolama enerji depolamanın güvenli ve verimli bir yöntemidir. Bundan dolayı mobil ve durağan uygulamalarda enerji sağlamak amacıyla kullanılmaları için büyük bir potansiyele sahiptirler.

Uygun malzemelerin dört ana grubu karbon ve diğer yüksek yüzey alanına sahip malzemeler, H_2O reaktif kimyasal hidritler, yeniden şarj edilebilir hidritler ve termal reaktif hidritler olarak sınıflandırılabilirler [5].

Yüksek yüzey alanına sahip malzemelerin yüzeylerine hidrojenin tutunması, bir gazın bir yüzeye adsorpsiyonu (şekil 1.4) katının yüzeyindeki alan kuvvetine bağlıdır. Gaz moleküllerinin bu fiziksel yerleşmesi yük dağılımlarının düzensiz hareketinden kaynaklanır ve aralarında Van Der Waals bağları oluşur. Bu etkileşim iki terimden oluşur: Çekme terimi molekülle yüzey arasındaki mesafeyi -6 nın kuvveti şeklinde azaltarak aralarındaki mesafeyi azaltır. Bir diğeri de molekül ve yüzey arasındaki mesafenin azalmasıyla oluşan ve -12 nin kuvveti ile artan itme terimidir. Bu şekilde moleküller minimum potansiyel enerjiyi yaklaşık bir moleküler Yarıçaplık mesafede gösterir. Bu minimum enerji 0.01 den 0.1 eV 'un (1 den 10 kJ mol^{-1}) katlarıdır. Aralarındaki zayıf bağlar sayesinde fiziksel adsorpsiyon düşük sıcaklıkta gözlenir [4-5].

Yüzeye tutunan moleküller bir tabaka oluşturduktan sonra gaz molekülleri sıvı veya katı tutucunun yüzeyiyle bağlanırlar. Bu açıdan oluşturulan ikinci katmanın bağlama enerjisi sublimleşme veya buharlaşma gizli ısısına eşittir. Bu bakımdan kaynama noktasında ya da daha yüksek sıcaklıklarda yapılan adsorpsiyon sonucunda yalnızca bir tek tabaka oluşur [18].

Bir tabaka üzerine tutunacak molekül miktarının ölçülebilmesi için tutunacak molekülün yoğunluğu ve hacmi gereklidir. Sıvı eğer kübik yüzey merkezli (kym) dizilişe sahip ise, katmandaki 1 mol adsorbe edilen maddenin en küçük yüzey alanı sıvının yoğunluğu ve adsorbantın moleküler ağırlığından hesaplanabilir [4-5].



Şekil 1.4 Hidrojen atomlarının katı içerisine nüfus etme şeması [6].

Nanotüpler ve grafit nanofiberler gibi karbon temelli malzemeler son yüzyılın araştırmacıları ve basın tarafından en çok ilgi gören malzemeleridir(şekil 1.5). Genel uzlaşma yüksek H_2 depolama kapasitelerinin (%30-60) hesaplama hatası olduğu şeklindedir. H_2 'in fiziksel adsorpsiyon ile ancak kriyojenik sıcaklıklarda ağırlıkça %6 kadar depolanabilmekte ve çok yüksek yüzey alanına sahip karbonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı şekilde H_2 kimyasal adsorpsiyonun da ise ağırlıkça %8 hidrojen depolanabilmekte ancak kovalent bağların koparılabilmeleri için çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır [5].

Tablo 1.5 Metal Hidratların Hidrojen yoğunlukları[6].

Metal Hidrürler	Hidrojen yoğunluğu (kg/m^3)
Magnezyum	109.0
Lityum	98.5
Titanyum	150.5
Alüminyum	151.5
Zirconyum	122.2
Lanthanum -Nikel bileşik	89.0

Metaller, hidrojenle yaptıkları intermetalik bileşiklerinde ve alaşımlarında bir katı metal bileşik meydana getirirler. Hidritler, iyonik, polimerik kovalent, uçucu



Şekil 1.5 Nano karbon tüpler a) tek duvarlı b)yan yana çoklu duvarlı c) iç içe geçmiş d) hidrojenin tutunması[7].

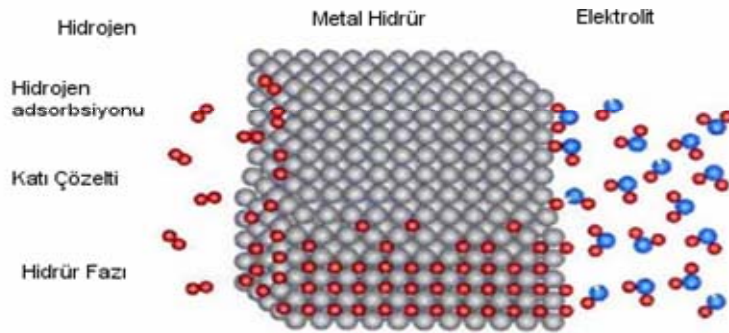
kovalent, ve metal hidrür şekillerinde bulunurlar. Hidrojen yüksek sıcaklıklarda bir çok geçiş metali ve bunların alaşımları ile hidrür oluşturur. Elektropozitif olanlar en reaktif olanlardır. Örnek olarak scandium, yttrium, lanthanides, actinides, titanyum ve vanadium grupları verilebilir. Ara metallerin oluşturdukları hidrürler yoğunlukta olarak metal özellikler taşırlar ve bunlara metal hidrürler denir. Bileşiklerinin bir çoğunda (MHn) ideal stokyometriden farklılıklar gösterirler ve çok fazlı şekilde bulunurlar. Kafes yapıları ara yüzlerde bulunan hidrojen atomlarıyla oluşturulmuş tipik metallere benzerler, bu sebeple ara boşluklu hidrürler olarak adlandırılırlar. Hidrojen atomları metal kafes içerisindeki oktahedral ve tetrahedral boşluklara yerleşirler ya da iki tipin birleşiminden oluşurlar(bakınız şekil 1.5) [9].

Tablo 1.6 Katı hidrojen depolama çeşitleri[5].

Karbon & diğer yüksek yüzey alanına sahip malzemeler	Kimyasal Hidratlar (H₂O-reaktif)
Aktif karbonlar	Kapsüllenmiş NaH
Nanotüpler	LiH & MgH ₂
Grafit nanofiberler	CaH ₂ , LiAlH ₄ vs
MOF'lar, Zeolitler	Kimyasal Hidratlar (Termal)
Klatrat Hidratlar	Ammonya Boran
Yeniden Yüklenebilir Hidridler	Alüminyum Hidrat
Bileşikler&intermetalikler	
Nanokristalinler	
Kompleks	

1.2.3.1 Yeniden Şarj edilebilir Hidritler

İki ana şarj edilebilir metal hidrit pil türü üzerine yapılan ar-ge çalışmaları çok uzun zamandır yapılmaktadır ve sahip oldukları özelliklere dair elde geniş bir veri arşivi bulunmaktadır. Bu noktadan yola çıkarak kompleks hidritlerin özellikle geçiş metali olmayan tiplerinin gelecekte hidrojen depolamada önemli bir yer kaplayacakları söylenebilir [12]. Bu tür hidritlere örnek olarak Borohidratlar, alenatlar ve amidler verilebilir.



Şekil 1.6 Yeniden şarj edilebilir metal hidrit pil [18].

1.2.3.2 Alenatlar

Alenatların anahtar özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. NaAlH_4 başta olmak üzere birçok açıdan derinlemesine çalışmalar yapılmıştır. Düşük sıcaklık kinetiği ve geri dönüşebilirliği katalizör eklenerek iyileştirilmiştir [11].

Bunun yanında NaAlH_4 konulan hedefler tutturulamamıştır; ağırlıkça (%4-5) düşük hidrojen geri dönüştürülebilirliği, kendiliğinden tutuşabilir olması ve yüksek maliyet.

Tablo 1.7 Aşağıdaki tabloda alenatlar ve başlıca özellikleri verilmiştir[5].

Çeşit	Depolama Yoğunluğu Ağırlıkça % H_2	Desorpsiyon Sıcaklığı, C
LiAlH_4	10,6	190
NaAlH_4	7,5	100
$\text{Mg}(\text{AlH}_4)$	9,3	140
$\text{Ca}(\text{AlH}_4)$	7,8	>230

1.2.3.3 Borohidratlar

Borohidratlar alenatlardan daha yüksek potansiyele sahiptirler ancak bunun yanında alenatlardan daha az çalışılmışlardır. Genel olarak borohidratlar çok stabildirler, alenatlar kadar geri dönüştürülebilir değildirler, ancak bunun yanında alenatlardan daha güvenlidirler. Başlıca borohidratlar ve özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir [18].

Tablo 1.8 Borohidratların hidrojen depolama ağırlık yüzde ve çözünme sıcaklıkları[5].

Çeşit	Depolama Yoğunluğu Ağırlıkça % H ₂	Desorpsiyon Sıcaklığı, C
LiBH ₄	18,5	300
NaBH ₄	10,6	350
KBH ₄	7,4	125
Mg(BH ₄) ₂	14,9	320
Ca(BH ₄) ₂	11,6	260

1.2.3.4 Kimyasal Hidratlar (H₂O reaktif)

Kimyasal hidratlar yarı sıvı halde elde edilebilirler. Kontrollü H₂O enjeksiyonu sonrasında hidroliz reaksiyonu ile beraber H₂ ortaya çıkar. H₂ nin serbest kalmasının ekzotermik bir reaksiyon olması sayesinde aracın gücünden gereksiz ısı ihtiyacı yoktur. Teorik hidrojen depolama ağırlıkça %5-8'dir. Kimyasal hidratların başlıca örnekleri ve özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. [18].

Tablo 1.9 Kimyasal hidratların hidroliz reaksiyonu ve H₂ ağırlık yoğunlukları[5].

Hidroliz Reaksiyonu	Depolama yoğunluğu*, ağırlıkça %H ₂
$\text{LiH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{LiOH}$	7.8
$\text{NaH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{NaOH}$	4.8
$\text{MgH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{Mg(OH)}_2$	6.5
$\text{CaH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{Ca(OH)}_2$	5.2

*Teorik olarak maksimum

1.2.3.5 Kimyasal hidratlar (Termal)

Ammonia Boran bir diğer kimyasal hidrat grubudur ve katı halde hidrojen depolama potansiyeline sahiptir. Ön çalışmalar göstermiştir ki NaH_4BH_4 termal olarak 4 aşamada ayrıştırılabilir. Elde edilen gaz hidrojenin içerisindeki gaz haldeki boran toksik olduğu için dikkatli olarak ele alınmalıdır. Toksik olmaları nedeniyle yakıt hücrelerine zarar verirler. [17].

Tablo 1.10 Kimyasal hidratların çözünmeleri ve H_2 ağırlık yoğunlukları ve reaksiyon sıcaklıkları [4].

Çözünme reaksiyonu	Depolama yoğunluğu*, Ağırlıkça % H_2	Sıcaklık**, °C
$\text{NH}_4\text{BH}_4 \rightarrow \text{NH}_3\text{BH}_3 + \text{H}_2$	6,1	<25
$\text{NH}_3\text{BH}_3 \rightarrow \text{NH}_2\text{BH}_2 + \text{H}_2$	6,5	<120
$\text{NH}_2\text{BH}_2 \rightarrow \text{NHBH} + \text{H}_2$	6,9	>120
$\text{NHBH} \rightarrow \text{BN} + \text{H}_2$	7,3	>500

*Teorik olarak maksimum

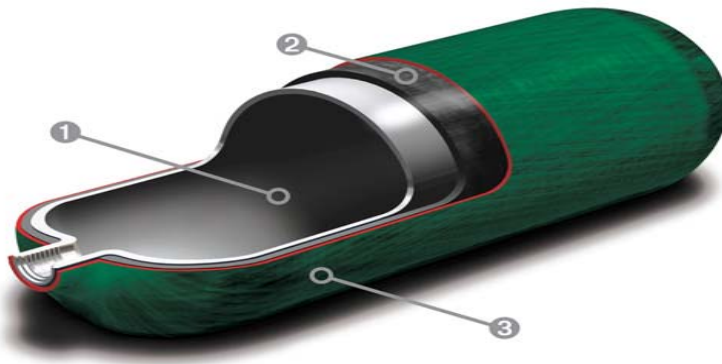
**Çözünme sıcaklığı

1.3. Kompozit Metal İç Astarlı Tip Üç Basıncılı Tankların Gelişimi

Basıncılı tanklar filaman sarmal yöntemiyle uzun bir süredir üretilmektedir. Basit bir yapıya sahip olmalarına rağmen, basıncılı tanklar tasarımları en zor yapılardan birine sahiptirler. Filaman Sarmal kompozit basıncılı tanklar sadece askeri uygulamalarda değil sivil yaşamda da geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Askeri ve uzay uygulamaları için geliştirilmiş olan bu teknoloji sivil yaşama adapte edilerek ticari pazara sunulmuştur. Tıbbi uygulamalardan, skuba dalışında kullanılan tüplere, itfaiyecilerin nefes alma tüplerine, medikal uygulamalarda kullanılan oksijen tüplerinden, uçaklarda acil durum basınç düşmelerinde, kapıların açılmasında veya iniş takımlarının indirilmesine, dağcılık uygulamalarında vs. kullanılmaktadır. Yeni potansiyel uygulama alanı olarak değişen ve gelişen yeni dünyada otomotiv endüstrisine yakıt sağlamak amacıyla doğal gaz depolama ve hidrojen yakıtı depolama olarak seçilmiştir. Mühendisler geleceğe yönelik çalışmalarını fosil

yakıtlar yerine geçebilecek olan doğal gaz ve hidrojen yakıtı teknolojileri üzerinde çalışmaktadırlar[8].

Temel enerji kaynağı olarak kullanılan kömür, petrol ve günümüzde ağırlıklı olarak kullanılan doğalgaz gibi fosil yakıtların tükenmeye yüz tuttıkları bir gerçektir. Ayrıca fosil yakıtların çevreye verdikleri zarar sebebiyle, hidrojen enerjisi fosil yakıtlara alternatif olarak durmaktadır. Hidrojen üretimi, depolanması ve elektrik enerjisine çevrilmesi noktasındaki çözüm bekleyen sorunlar sebebiyle, hidrojenin yaygın olarak kullanımı gecikmektedir. Hidrojenin depolanması Hidrojen enerjisi teknolojilerinin gelişimde önemli bir noktada bulunmaktadır. Hidrojen hacimce enerji yoğunluğu düşük bir yakıttır. Hidrojen enerjisinin günümüz teknolojilerinin ihtiyaç duyduğu enerji miktarını karşılayabilmesi ve fosil yakıtların karşısında ekonomik ve fiziksel açıdan kabul edilebilir performanslara erişmesi için depolama teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Depolama yöntemlerinden günümüzde en yaygın olarak kullanılanı yüksek basınçlı tanklarda hidrojen depolanmasıdır. Gaz fazında depolamada 350-500 bar gibi yüksek değerlere kompozit tanklar kullanılarak güvenlik standartlarına uygun şekilde çıkmıştır. Fakat Hidrojen enerjisinin fosil yakıtlar karşısında avantajlı duruma gelebilmesi için 1000 bar basınca dayanıklı, güvenlik standartlarına uygun, makul boyutlarda ve ağırlıkta, ekonomik tanklara ihtiyaç vardır. Bu kısıtlara erişebilmek için kompozit tankların geliştirilmesi hidrojen depolama açısından çok önemlidir[14].



Şekil 1.7 Tip 3 kompozit yüksek basınçlı depolama tankı[48].

- 1- Ultra ince alüminyum iç astar
- 2- Karbon Epoksi Fiber Sarmal
- 3- Cam Fiber Sarmal

Filaman sarmal kompozit tankların yüksek mukavemet ve yoğunluk-yüksek elastikiyet modülü oranının çok iyi olması sayesinde ağırlık hacim oranının küçülmesi alüminyum iç astarlı kompozit karbon fiber sarmal yüksek basınçlı tankları önemli bir konuma getirmektedir[20].

Yapısal verimlilik aşağıda belirtilen formülizasyonla hesaplanır:

$$e = \frac{P_b V}{W}$$

P_b = Patlama Basıncı

V = Saklanan Hacim

W = Tankın Ağırlığı

Kompozit tanklar yüksek patlama basınçları için (70-100MPa) uzay endüstrisinde bugün kullanımdadır. 200 – 400 MPa patlama basıncına sahip basınçlı tankların araştırmalarına günümüzde halen devam edilmektedir. Bunun gibi ultra yüksek basınçtaki kompozit tankların tasarım teknikleri uygulanmalıdır. [14].

Hali hazırda var olan yasal standartlar uygulamalarında şu anda maksimum 35 MPa basınca izin vermektedir, 21 MPa sivil uygulamalarda standart araçların yakıt doldurumun da kullanılan nominal çıkış basıncıdır. Daha yüksek basınç için sivil ve ticari hava yolu uygulamalarına halen onay verilmemiştir.

İnce cidarlı kompozit tankların basınç barındırma limitleri taşıma endüstrisindeki geniş kapsamlı kullanım için şu anda yeterli değildir. Bunun için kalın cidarlı basınçlı tankların geliştirilmeleri ultra yüksek basınçlara dayanabilmeleri için gereklidir. Bilindiği üzere gerilme duvar kalınlığı boyunca

hızlıca düşer. İlk bakışta sarmal fiberlerin geriliminin gerilmeyi cidar kalınlığı boyunca dağılımını değiştirebildiği görülür, fakat etkileri üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır[19]. Basınçlı tankların tasarım aşamalarında gerilimin dağılımının optimizasyonu yapılmalıdır. Belirtildiği üzere, şu anki ultra-yüksek basınçlı tanklar düşük yapısal verimliliğe sahiptirler. Bu da yapabileceklerinin temelini anlaşılmamasına dair ve davranışlarının önceden sezilmesi konusunda güvensizlik yaratır[20].

Kompozit tankların sonlu elemanlar analizleri çoğunlukla dış kabuk (shell) element temel alınarak klasik laminasyon teorisi kullanılarak yapılır. Sonuçlar iç basınçların çok yüksek olmadıkları durumlarda ve çap ile cidar kalınlığının oranının 15'i aşmadığı durumlarda iyi sonuçlar verir.

1.4. Kompozit Tankların Yapısı:

Silindirik kompozit basınç tankları metalik bir iç astar üzerine sarmal ve bunların üzerine kompozit bir kabuktan oluşmaktadır. Metal iç astar sızdırmazlığın sağlanması ve aynı zamanda bazı metal iç astarlar iç basınç yükünün paylaşılmasını sağlarlar. Kompozit basınçlı tanklar için uygulanan yükün büyük bir kısmı güçlü sarmal kompozit sarmal tarafından taşınır.

Kompozit basınçlı tankların en önemli özellikleri yapıldıkları fiberlerin oldukça yüksek çekme gerilmesine sahip olmaları ve yüksek elastik modülüsleridir. Lamine kompozit malzemelerin değerlendirmeleri için iki adet kompozit malzeme davranışı modellenmesi vardır[23].

- 1) Mikromekanik modellenmesi yapılırken kompozit malzemeyi oluşturan parçalar birbirinden bağımsız olarak malzeme yapısı derinlemesine incelenir.
- 2) Makromekanik modellenmesi yapılırken malzeme homojen olarak ele alınır ve etkiler ortalama özellikler üzerinde taranır.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Yapılan literatür taramasında anlaşılmıştır ki kompozit basınçlı tanklarla üzerinde yapılan analizlerin çoğu ince cidarlı tanklar baz alınarak yapılmıştır. Daha önceden belirtildiği üzere dış çaptan iç çapa olan oranın 1,1 in üzerinde olması halinde, tank kalın cidarlı olarak ele alınmalıdır. Sadece birkaç araştırmacı cidar kalınlığını da göz önünde bulundurarak araştırma yapmıştır.

Lekhnitskii'nin teorisine göre (1981) yapılan çıkarımda düzlemsel gerinme veya genelleştirilmiş düzlemsel gerinmeler durumunda göre[24]. Roy ve Tsai (1988) kalın cidarlı kompozit silindirler için tasarım metodu öne sürmüşlerdir[35]. Gerilme analizleri 3 boyutlu elastiklik temeline dayanır ve açık uçlu (borular) ve kapalı uçlu (basınçlı tanklar) olanların genelleştirilmiş düzlemsel gerinme durumunu ele almışlardır.

Sayman (2005) çok katmanlı kompozit silindirlerin higrotermal yükleme altındaki analizleri üzerine çalışmıştır[28]. Mackerle (2002) basınçlı tankların yapıları ve boruları teorik ve pratik noktalarına değinerek sonlu elemanlar metodu analizleri uygulamaları üzerine bibliyografik bir çalışma yapmıştır[26]. Xia (2001) çok katmanlı sarmal kompozit boruların iç basınç altındaki durumlarını çalışmıştır. Xia (2001) çok katmanlı sarmal reçineli kompozit boruların eğme yüklemesi altında tam çözümlemesini yapmıştır. Rao ve Sinha (2004) sıcaklık ve nemin çok yönlü katmanlar üzerindeki serbest vibrasyon ve geçiş tepkileri üzerine etkisini çalışmıştır. Bunun çözümü için 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi geliştirmiştir[29].

Parnas ve Katırcı (2002) fiberle güçlendirilmiş basınçlı tankların değişik yüklere maruz kaldıkları durumlarda kalın cidarlı çok katmanlı filaman sarmal silindir dış kabuklar için çözümlemelerini yaptılar. Çok sayıda alt katmana sahip olan silindir dış kabuk in, her biri silindirik olarak ortotrofik olan, düzlemsel gerinme şeklinde çözümlemişlerdir[28].

Roy (1992) kalın cidarlı çok katmanlı kompozit küre basınçlı tankı temel olarak 3 boyutlu lineer elastik çözümleme üzerine çalışmıştır. Tsai-Wu hata kriterlerinin gerilme analizlerine uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Roy'un araştırmasının önemli olan buluşu hibrit kürelerin iki malzemedan yapılması halinde patlama basıncını arttırma olanağı tanınmasıdır[30].

Adalı (1995) çok katmanlı kompozit tankların tam elastik çözümlemesini kullanarak yeni bir optimizasyon metodu geliştirmiştir. Üç boyutlu bu teori anisotropik kalın cidarlı kompozit tankların eksenel simetrik yüklemelerdeki durumlarını çözümlemiştir. Üç boyutlu interaktif Tsai-Wu hata kriteri kullanılarak maksimum patlama basıncına ulaşılmıştır. Yüksek basınçlı tankın optimizasyonu göstermiştir ki yığma doğrultuları maksimum patlama basıncına verimli bir şekilde uygulanmıştır. Ancak Adalı'nın sonuçları deneysel test yöntemleriyle doğrulanmamıştır ve sertlik azalması bu analizler esnasında göz önüne alınmamıştır.

Mirza (2001) farklı zorluk pozisyonlarındaki yoğun moment uygulamalarında kompozit tankların sonlu elemanlar metodu yardımıyla çalışmıştır. Jacquemin ve Vautrin (2002) çevresel şartlara maruz bırakılmış kalın cidarlı kompozit boruların nem ve higrotermal iç gerilme alanlarının dayanıklılığa etkisini etüt etmiştir[22]. Sun et al. (1999) filaman sarmal katı-roket motoru şasilerindeki, kompozit basınçlı tanka benzeyen, gerilme ve patlama basınçlarını hesaplamıştır; maksimum gerilme hata kriteri ve sertlik azalması modeli hata analizi uygulanmıştır[33]. Hwang et al. (2003) sürekli sarmal fiber şeritleri uzunlamasına ve ters yönlerde güçlendirmiş haliyle kompozit tank üretmiştir ve geleneksel isotensoid tankların yerine ticari uygulamalarda kullanılması için sunmuştur[21]. Sonnen (2004) lamine kompozitler ve yapılarının bilgisayarlı hesaplamalarını çalıştı[32].

Literatür Göstermiştir ki:

- Yapılan sonlu elemanlar analizlerinin büyük bir çoğunluğu temel olarak elastik yapıli bağıntıları ve geleneksel ince cidarlı lamine dış kabuk (shell) teorisini kullanmıştır.

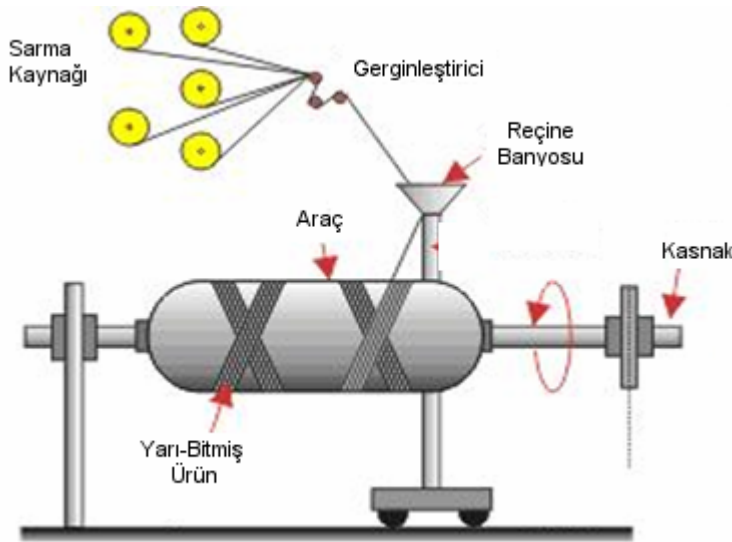
- Kompozit basınçlı tankların optimizasyonu kompozit malzemenin filaman sarmal açısı, laminasyon sıklığı ve malzeme parametreleri değiştirilerek yapılmıştır.
- Tsai-Wu hata kriteri kompozit malzemenin hatasının anlaşılması için en iyi yöntemlerden biridir.

Bu araştırma:

- Kompozit basınçlı tankların patlama basınçlarını sonlu elemanlar yöntemiyle çözümleyecek
- Kompozit basınçlı tankların optimizasyonu
- Değişik basınçlarda saklanacak hidrojen miktarlarını ve cidar kalınlıkları optimizasyonu
- Yüksek basınçlı kompozit tankların sonlu elemanlar analizlerinin yorumlamasını yapacaktır.

3 FİLAMAN SARMAL

Filaman Sarmal metodu yüksek hız ve kesinlikte kompozite katmanların yerleştirilebileceği bir metottur. Kullanılan mandrel silindirik, yuvarlak veya spiralli dönemeçlere sahip olmayan bütün şekillere uygulanabilirler. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, Helikopter kanatları, roket motor şasileri yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır. Üretim yöntemi simetrik eksenli yapılarla sınırlı değildir, prizmatik şekiller ve kompleks T-eklemler, dirsekler makineye uygun serbestlik parametresi uygulanarak elde edilebilir. Nümerik kontrol (numerically controlled) yöntemiyle çalışan modern filaman sarma makineleri yüksek serbestlik parametresi yardımıyla güçlendirme için gereken sayıda katmanı sarar. Filaman sarmalla elde edilen parçaların mekanik mukavemeti uygulanan sadece malzemenin kompozisyonuna değil aynı zamanda üretim parametrelerine de bağlıdır örnek olarak sarmal açısı, fiber gerginliği, reçine kimyası ve tavlama döngüsü. [13].



Şekil 3.1 Filaman sarmal tekniği[49].

3.1. Filaman Sarmal Teknolojisi:

1964'te, yazarlar Rosato D.V ve Grove C.S. kitaplarında, filaman sarmal: Gelişimi, Üretimi, uygulamaları ve dizayn yöntemleri başlıklı kitaplarında; Yüksek mukavemet ve hafif ürünlerin üretiminde kullanılır ve temel olarak iki malzemeden oluşur, bir filaman ya da bant türü bir güçlendirici ve bir matris veya reçineden meydana gelir. Malzemelerin bu kendilerine has karakteristikleri yıllarca çığır açmıştır. Filaman sarmal üretim yöntemi 40'lı yılların başlarına dayanır ve filaman sarmal makinesi geliştirilmesi için ilk çalışmalara başlanır. 50'lerde tasarlanan ilk ekipman çok temeldir; iki eksenli (yatay hareket ve milin dönmesi) hareket yaparak basit görevleri yerine getirebilmektedir. Makine bir filaman, birkaç bacak ve bir kam döndürücüdür oluşmaktaydı. Bu basit tasarım ilk filaman sarmal parçaların üretimi için yeterliydi: roket motoru şasileri. Mekanik sistemlerdeki yeni gelişmeler sayesinde operatörlerin dişliler, kemerler, zincirler ve makaralar yardımıyla makineleri programlaması sağlandı. Makinelerin sınırlı becerileri ve kapasiteleri vardı ancak isabetliydi.

Teknik yenilikler sayesinde, mühendisler servo-kontrollü, hidrolik sistemlerle çalışan foto-optik makineleri tasarladılar. Arzu edilen fiber yolu artık siyah beyaz bir ara yüzden izlenen foto-optik cihaz tarafından kontrol edilen makinenin yolu olmuştur. Filaman sarmal makinesinin tasarımın giderek sofistike bir hal almış ve 3. eksenin (radyal veya ters yönlü besleme), profil rayların ve bilyeli şaftların eklenmesiyle birlikte daha gelişmiş dişli kutuları sayesinde daha pürüzsüz ve daha isabetli filaman sarmal yapılmaya başlanmıştır.

70'lerin ortalarında, makine tasarımı bir kez daha büyük bir sıçrama yaparak. İleri servo teknolojisi makine tasarım dünyasına katılmış oldu. Yüksek hızlı bilgisayarlar hızlı veri işlemeye izin vererek, sonuçta pürüzsüz hareket ve daha ileri fiber yerleştirme isabeti sağladılar. Kemerler, dişliler, makaralar ve zincirlerle kontrol edilen sistemler yerlerini bilgisayar kontrollü servo sistemlere bırakmıştır.

1980'ler ve 90'lar bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimine şahit oldular. Bilgisayar ve hareket kontrol kartları makinelerin donanımlarının vazgeçilmez bir parçası oldu. Makine hız kontrolü büyük oranda gelişti; bilgisayar kontrollü sistemler sarmal yolunu ve hızlı büyük bir isabetle takip edebiliyorlardı. Ek eksenel hareket sistemleri de makine tasarımlarına eklendi; dört, beş hatta 6 eksenli hareket kontrolü sağlandı.

3.2. Filaman Sarmal Teknolojisinin Endüstriyel Önemi

Fabrikasyon tekniğinin daha güçlü ve daha hafif parçaların üretilmesini sağlamasından beri, havacılık, askeri uygulamalar ve ticari ve endüstriyel uygulamalarda faydalanılmaya başlanmıştır. Güçlendirme ve matris özellikleri kullanılarak istenilen her türlü özellik elde edilebilir oldu. Böylece filaman sarmal teknolojisi mukavemet ağırlık oranının önemli olduğu ticari parçalarda kullanılmaya başlanmıştır. Mukavemet-Ağırlık oranı ve düşük maliyetlerin yanında, filaman sarmal kompozit parçalar daha iyi korozyon ve elektrik dirençlerine sahiptirler. [13].

3.3. Filaman Sarmal Üretim Teknolojisi

Filaman sarmal üretimi ilk olarak içi boş ve genel olarak da silindirik veya oval kesitli ürünler üzerinde kullanılmıştır. Fiberler hem kuru olarak hem de reçine banyosundan geçirilerek mandrele sarılmaya başlanmıştır. Sarmal düzeni mandrelin döngüsel hızının ve fiber besleme mekanizmasının hareketi ile kontrol edilmiştir.

Filaman sarmal genel olarak konvansiyonel filaman sarmal işlemine denir. Ancak bazı endüstriyel uygulamalarında firmalar, basınçlı tankların üretimine 'Hızlı Filaman Sarmal' olarak adlandırırlar. Temel olarak üretim şekilleri aynıdır ancak makinelerin işletim sistemleri ve mandrelin hareketi farklıdır.

Sarma işleminden sonra, filaman sarmal mandreli kürlleme ve ileri kürlleme işlemlerine, yüzeydeki uniform reçine dağılımını korumak amacıyla mandrel sürekli

dönme hareketine devam ederken, tabi tutulur. Kürleme işleminden sonra, ürün mandrelden hidrolik veya mekanik çıkarıcı kullanılarak ayrılır. [13].

Malzemeler:

- Reçinelerin uygulandıktan sonra filaman sarmal uygulanabilecek herhangi bir sürekli fiber.

Avantajları

- Hızlı üretim
- Düşük malzeme maliyeti, fiberler yeni bir işleme maruz kalmadan direk üretimde kullanılırlar.
- Laminelerin yapısal özellikler çok iyidir, fiberler yük yönünde kompleks şekilde sarılarak yük karşılanır.
- Fiberlere uygulanan reçine miktarı çekilirken kalıplar ve merdaneler tarafından ölçülerek kontrol edilebilir.

Dezavantajları:

- Sınırlı konveks şekilli parçalar
- Mandrel maliyetleri yüksek

3.4. Filaman Sarmal Malzemeleri

3.4.1 Fiber Türleri

Fiberlerin mekanik özellikleri fiber/reçine kompozitlerin genel özellikleri üzerinde üstün olarak etkili olur. Fiberlerin katkısını etkileyen 4 ana etken vardır.

- Fiberlerin temel mekanik özellikleri
- Fiber ile reçinenin yüzey etkileşimleri

- Kompozit fiberlerin miktarı (fiber hacim fraksiyonu)
- Kompozit içerisindeki fiberlerin oryantasyonu.

Fiber ve reçine arasındaki yüzey etkileşimi ikisi arasındaki bağlama derecesine bağlıdır. Bu yüzey bağlanması fiber yüzeyine uygulanan işlemle direk olarak etkilidir (sizing). Bu, sizing uygulamadan kaynaklanan hasarı en aza indirir. Sizing' in seçimi kompozitin istenilen özelliklerine göre, fiber türü ve fiberlerin işleneceği yöntemle göre yapılır.

Kompozit içerisindeki fiber miktarı mukavemet ve bükülmezliği belirler. Genel bir kural olarak, laminenin mukavemet ve bükülmezliği fiber miktarıyla doğru orantılı olarak artar. Ancak fiber hacim fraksiyonu %60-70'lerin üzerine çıkarsa çekme gerilmesi artmaya devam ederken, laminenin mukavemeti üst noktaya vardikten sonra yavaşça düşmeye başlar. Böyle bir durumda az miktarda reçine fiberleri bir arada tutmaya çalışır.

Fiberlerin oryantasyonu kompozitin son mukavemetini belirler. Güçlendirilmiş fiberler yükü uzunlukları boyunca taşımak üzere tasarlanmıştır, bu da fiberlerin kompozit içerisindeki özelliklerinin büyük oranda yönleriyle belirlendiğini gösterir. Fiberlerin yük yönünde yerleştirilmeleri ile, az yük veya yükün olmadığı yönlerdeki malzeme miktarı en aza indirilebilir. [13].

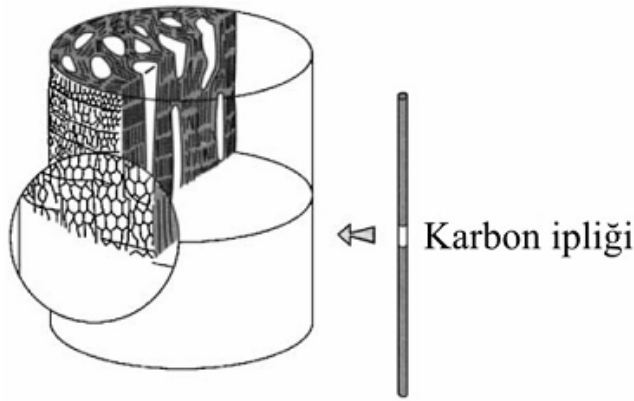
3.4.1.1 Karbon

Diğer fiberlere kıyasla mükemmel özelliklere sahiptirler: Yüksek bükülmezlik, her iki yönde de basma ve çekmede çok yüksek mukavemet, çok yüksek korozyon direnci ve yorulma. [13].

Karbon fiberler tasarımcılara şu özellikleri sağlarlar:

- Düşük yoğunluk
- Yüksek çekme mukavemeti
- Yüksek çekme modülü
- İyi yorulma direnci

- İyi aşınma direnci
- Düşük termal genişleme
- Düşük sürtünme
- İyi elektrik iletkenliği
- İyi termal iletkenlik
- İyi kimyasal direnç
- Düşük büzüşme
- Azaltılmış nem emme



Şekil 3.2 Karbon fiber kesiti [13].

3.4.1.2 Aramid

Fiberler genel olarak Kevlar ve Twaron olarak bilinirler, ticari olarak 1960 lardan beri bulunurlar, ve kendilerine geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Termal özellikleri asbestin yerine kullanılmalarını sağlamıştır. Aramid fiberleri, diğer hiçbir fiberin göstermediği yüksek enerji emme ve balistik özellikleri sayesinde mermi ve parça tesiri için veya darbe direnci isteyen uygulamalarda olduğu gibi ipler ve kablolarda da kullanılırlar. [13].

Aramid fiberler tasarımcıları şu özellikleri sunarlar.

- Düşük yoğunluk
- Yüksek çekme modülü
- Yüksek çekme mukavemeti

- İyi vibrasyon söndürme
- Yüksek enerji absorpsiyonu
- Yüksek darbe direnci
- Düşük yorulma ve düşük basma mukavemeti
- İyi ısı direnci, iyi kimyasal direnç
- Ortalama bağlayıcı özellikler
- Düşük ısı iletkenliği

3.4.1.3 Cam:

Fiberler kimyasal kompozisyonları doğrultusunda gruplara bölünebilirler. En iyi bilinenleri A-cam, C-cam, S-cam ve E-cam fiberlerdir, yalnızca sonuncusu uzay uygulamalarında kullanılır. Cam fiberler ergimiş camdan direk olarak veya erimiş cam bilyelerden elde edilirler. Ergimiş cam bir tanka boşaltılır ve sabit bir viskoziteye erişene kadar sabit sıcaklıkta bekletilir. Akışkan cam çapları 1 ila 25 10⁻⁶ m arasında değişen filamanlar oluşturur. [13].

Cam fiberler tasarımcılara şu özellikleri sunarlar

- Yüksek çekme mukavemeti
- Yüksek akma mukavemeti
- Düşük Poisson oranı
- İyi elektrik direnci
- İyi termal direnç
- Düşük termal genişleme
- Düşük maliyet

3.4.2 Reçine tipleri (Matris)

Reçine veya matris kompozitlerin önemli bir parçasıdır. Temel olarak kompoziti bir arada tutan yapıştırıcıdır. Reçine çok iyi mekanik özellik, iyi yapışma özelliği ve iyi tokluk özelliklerinin yanı sıra iyi çevresel özelliklere de sahip olmalıdır.

Mekanik özellikleri için ideal bir reçine en başta sert olmalı ancak kırılma hasarı göstermemelidir. Aynı zamandan fiberin mekanik özelliklerinin tam anlamıyla kullanılabilmesi için reçine mutlaka fiberin deformasyonu kadar deforme olabilmelidir.

Reçine ile güçlendirme fiberi arasındaki iyi bağlanma yükleri verimli bir şekilde transfer edebilmeli ve çatlaklar ve fiber/reçine arasındaki bağların kopmasına izin vermemelidir. Çatlak büyümesine karşı direnç malzemenin tokluk özelliğidir. Kompozitlerde doğru olarak ölçülmesinin zor olmasından dolayı, reçine hata öncesi deformasyona ne kadar dayanırsa, kompozit malzeme o kadar toktur. Tokluk ile fiberlerin uzamasını birbirleriyle ilişkilendirmek çok önemlidir.

Kompozitin uygulama alanı sert çevresel koşullara sahip olabilir, özellikler su ve diğer agresif maddeler. Reçine sabit mukavemet çevrimine dayanıklı olmalı.

İki değişik matris grubu vardır ve bunlar: Termoset matris sistemleri ve termoplastik matris sistemleridir[13].

3.4.2.1 Termoset matris sistemleri

Termoset malzemeler, reçinelerin bir sertleştirici veya katalizörle terse çevrilemeyen bir kimyasal reaksiyona girmeleriyle oluşturulur. Sonuç sert ve eritilemez bir yapıdır. Kompozit endüstrisinde kullanılmak üzere bir çok reçine türü olmasına rağmen, termoset yapılarda kullanılan en çok kullanılan üç reçine türü: Polyester, Vinylester ve Epoksi dir.

3.4.2.2 Termoplastik Matris Sistemler

Termoplastikler, metaller gibidirler, sıcaklık etkisiyle yumuşarlar ve erirler, soğutulmalarıyla tekrar sertleşirler. Yumuşama ve ısıl skaladaki erime noktası arasındaki geçiş herhangi bir ek işleme gerek duyulmadan dilendiği kadar malzeme her iki durumdaki özelliklerinde bir değişiklik görülmeden yapılabilir. Tipik termoplastikler nylon, polypropylene ve ABS'dir ve bunlar genellikle sadece kısa, kesilmiş fiberlerle (örn. cam) güçlendirilirler. [13].

3.4.2.3 Polyester:

Polyester reçineler ya da basit haliyle polyester, kompozit ve denizcilik sektöründe en sık ve en ucuza kullanılan matristir. Organik kimyada alkolün organik asit ile reaksiyona girmesi sonucunda ester ve su açığa çıkar. Özel alkollerin kullanılmasıyla örnek olarak glikol, ve değişik bileşiklerin (asitler ve monomerler) eklenmesiyle değişik özellikte polyesterler elde edilir.

Temel olarak kompozitlerde kullanılan iki çeşit polyester çeşidi vardır: orthophtalic polyester ve isophthalic polyester. İlki birçok kimse tarafından kullanılan standart ekonomik reçinedir; ikincisi ise daha ileri su direnci beklenen endüstrilerde tercih edilen reçine türüdür.

Epoksi ve Vinilestere kıyasla, polyester daha düşük yapışma ve mekanik özellikler gösterir. Kürleme sonrasında %8 civarında büzüşme görülür, bu da epoksininkinden fazladır. Bu büzüşme iç streslere gerilmelere neden olur ve buna güçlendirilmiş fiberlerin “print-through” etkisi denir. Bu kozmetik defektlerin düzeltilmesi pahalı ve zordur. [13].

3.4.2.4 Vinilester:

Vinilesterin moleküler yapısı polyesterinki ile aynıdır, ancak yapının reaktif yerleşimleri farklıdır. Bu farklılık vinilesteri daha tok ve polyesterden daha dayanıklı yapar. Vinilesterde daha az ester grubunun olması, bu su atılımını kolaylaştırır, daha

iyi su ve diğer birçok kimyasala karşı polyesterden daha iyi direnç gösterir. Bu özelliği sayesinde vinilester çok boru ve kimyasal tank uygulamalarında sıklıkla kullanılır.

Polyestere kıyasla vinilester daha iyi bağlanır ve mekanik özellikleri ve su ve kimyasallara karşı gösterdiği direnç daha iyidir. Kürleme sonrası büzüşme polyesterinkiyle aynı olan %8 seviyesindedir, aynı şekilde iç streslerin oluşmasına neden olur. Vinilesterin fiyatı polyesterin fiyatının yaklaşık iki katı kadardır. [13].

3.4.2.5 Epoksi:

Epoksiler genel olarak diğer reçine türlerine göre çok iyi mekanik ve çevresel faktörlere karşı direnç gösterirler. Bu nedenle, epoksi reçineler uzay endüstrisinde yüksek performanslı uygulamalar için en çok kullanılan reçine türüdür. Aynı zamanda fiyatı polyesterin fiyatının 3 ila 8 katı kadardır.

Epoksi, iki karbon atomuna bağlanmış oksijen atomu grubu anlamına gelmektedir. Epoksiler polyester ve vinilester reçinelerden kürleme şekliyle de ayrılır katalizörden daha çok bir sertleştirici ile kürlenirler ve düşük büzüşme yüzdeleri (yaklaşık %2), değişik kürleme metodu sayesinde oluşan, mekanik özelliklerinin polyester ve vinilesterden daha iyi olmasının nedenlerindendir. [13].

3.4.3 Destekleyiciler:

Bazı katkıların kullanılması ile sıvı reçine sistemi özel performansları sağlayacak uygun hale getirilebilirler. formülasyonların büyük bir kısmını dolgular ikinci büyük kısmını da reçinenin temeli kaplar. En çok kullanılan dolgular kalsiyum karbonat, alümina silikat (kil) ve alümina trihydratedır. Kalsiyum karbonat ilk olarak hacim arttırıcı olarak reçine formülasyona düşük reçine maliyeti sağlamak için performansın çok da önemli olmadığı durumlarda eklenir. Alümina trihydrate alev ve duman çıkarıcı özellikleri önlemesi nedeniyle kullanılırlar. Dolgular reçinenin içine toplam reçine formülasyonun ağırlıkça %50'si civarında eklenebilirler (100 birim

dolgu 100 birim reçine). Hacim sınırlaması genellikle geliştirilen kullanılabilir viskoziteye, partikül boyutu ve reçinenin karakteristiğine bağlı olarak belirlenir.

Daha iyi ıslanabilir ekranlar için ultraviyole radyasyon, ateş geciktirici özellik için antimony oksit, renklendirme için pigment ve yüzey pürüzsüzlüğü için düşük profilli ajanlar ve çatlak önleme karakteristikleri dahil olmak üzere özel durum katkı maddeleri kullanılır. Kalıp ayırıcı ajanlar (metalik strearates, silikon jel veya organik fosfat esterler vb.) mandrelden ayırdıktan sonra pürüzsüz yüzey sağlanabilmesi ve düşük uygulama sürtünmesi için uygundur. [13].

3.5. Sarmal Şablonlar

Filaman Sarmal yönteminde sargı gerginliği, sarma açısı ve/veya güçlendirilmiş tabakalardaki reçine miktarı dahil olmak üzere kompozitte istenilen kalınlık ve mukavemete erişilene kadar değişiklikler yapılabilir. Bitmiş kompozitin özellikleri seçilen sarmal şablona göre değişebilir. Üç çeşit filaman sarmal şablonu mevcuttur bunlar:

3.5.1 Kasmak Sarmalı

Aynı zamanda dairesel veya girth sarmal olarak da bilinir. Açık şekliyle yüksek açılı yapılan yaklaşık 90 derecelik helikal sarma işlemine denir (şekil 3.3). Mandrelin her bir tam dönüşü ipliğin bir tam tur atmasını sağlar. [13].



Şekil 3.3 Filaman sarmal patern kasmak sarmalı şematik gösterimi[50].

3.5.2 Helikal Sarmal

Helikal sarmal de, mandrel sabit hızla döner fiber besleyici ileri ve geri hareketiyle ayarlanmış hızda istenilen helikal açıyı yaratır (şekil 3.4).



Şekil 3.4 Filaman sarmal patern helikal sarmal şematik gösterimi[50].

3.5.3 Polar Sarmal

Polar Sarma da, fiberler tanjantsal olarak polar açıklığın bir ucundan diğerine geçer ve yön değiştirerek tanjantsal olarak diğer polar açıklığa gider. Bir başka deyişle fiberler bir uçtan diğer uca doğru sarılırlar (şekil 3.5). Mandrel yatay eksen üzerinde döner. Bu yöntem paralel açıklığa sahip tankların aksenal fiberler tarafından güçlendirilmeleri için kullanılır.

Yukarıdaki üç işlemten, helikal sarma yöntemi büyük çeşitlilik içerir. Neredeyse her türlü çap ve uzunluk sarma açılarını değiştirerek kapalı devre şablon elde edilebilir. Genellikle kompozit tüpler ve basınçlı tüpler bu yöntemle üretilir.



Şekil 3.5 Filaman sarmal patern polar sarmal şematik gösterimi [50].

4 KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

4.1. Genel

Fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin lineer elastik teorileri geliştirilmiş ve mühendislikte geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu bölümde kompozitlerin mikromekanik davranışları anlatılacaktır. [13].

4.2. Elastik Yapısal Denklem

Bu yapısal denklemler genel lineer elastik katılarla bağlantılı gerilme ve gerinme tensörlerini vurgular.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (4.1)$$

σ_{ij} , ϵ_{kl} = sırasıyla gerilme ve gerinme tensörleridir

C_{ijkl} = elastik sabitin dördüncü derecesi

Fiberle güçlendirilmiş kompozit malzemeler ortotrofik elastikliğe sahip oldukları varsayılır çünkü bu malzemeler birbirlerine dik üç adet simetrik elastik düzlemden oluşurlar. Bu denklemde dokuz adet bireysel elastik katılık parametresi tanımlanabilir. Bu durumda gerilme-gerinme bağıntıları aşağıdaki gibi olur

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{1212} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{1313} & 0 \\ & & & & 0 & C_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

Malzeme katılık parametresi C_{ijkl} mühendislik sabiti olarak tanımlanır;

$$\begin{aligned}
 C_{1111} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \\
 C_{2222} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \\
 C_{3333} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \\
 C_{1122} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \\
 C_{1133} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta} \\
 C_{2233} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta} \\
 C_{1212} &= G_{12} \\
 C_{1313} &= G_{13} \\
 C_{2323} &= G_{23}
 \end{aligned}$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad (4.3)$$

Kompozit malzemenin stabilizesinden dolayı elastik sabit üzerindeki sınırlandırmalar;

$$\begin{aligned}
 C_{ijkl} &> 0 \\
 |C_{1122}| &< \sqrt{C_{1111} C_{2222}} \\
 |C_{1133}| &< \sqrt{C_{1111} C_{3333}} \\
 |C_{2233}| &< \sqrt{C_{2222} C_{3333}}
 \end{aligned}$$

Kompozit malzemeler sıkıştırılabilirler. Bu nedenle, katılık matrisin determinantı pozitif olmalıdır,

$$\text{Det}(C_{ijkl}) > 0$$

Veya

$$C_{1111}C_{2222}C_{3333} + 2C_{1122}C_{1133}C_{2233} - C_{2222}C_{1133}^2 - C_{1111}C_{2233}^2 - C_{3333}C_{1122}^2 > 0 \quad (4.4)$$

C_{ijkl} Elastik sabitinin elastik modülüne, akma modülüne ve poisson oranına bağlı olarak değiştiği aşıkardır. Ancak, bu malzeme parametrelerinin deneysel yöntemlerle belirlenmeleri çok zordur. Alternatif çözümü mikromekanik yaklaşımla bu malzeme parametrelerinin belirlenmesidir.

4.3. Kompozit Malzemelerin Mikromekanik Davranışları

Fiberlerle güçlendirilmiş kompozit malzemeler (FRC) fiberler ve reçine matrislerinden oluşur. FRC malzemelerinin mekanik özellikleri sadece kullanılan fiber ve reçineye bağlı olarak değil aynı zamanda reçine matrisi içinde fiberlerin diziliş şekline ve paketlenme yöntemine göre de değişir. Fiberlerle reçinelerin yüzey bağlanma mukavemetleri de kompozitlerin mukavemetlerine etki eden etmenlerden biridir. Filaman sarmal kompozit basınçlı tanklar, tek yönlü (unidirectional) FRC bileşimi olarak görülebilir.

Şu ana kadar literatür taramasından da görüleceği gibi kompozitlerin özelliklerini belirlemek üzere çeşitli modellemeler yapılmıştır.

$$E_1 = \phi E_f + (1 - \phi) E_m \quad (4.5)$$

$$V_{12} = \phi V_f + (1 - \phi) V_m \quad (4.6)$$

ϕ = fiber hacim katsayısı ,

Unidirectional laminelerin enine elastik modülüslerin değerlendirildiği en ileri teorilerden biri Hashin tarafından türetilmiştir. Denklemler karmaşıktır ve bazı malzeme sabitlerinin elde edilmesi oldukça güçtür. Yüksek derecede sofistike

matematik modeller gerekli verinin elde olmadığı durumlarda pek de kullanışlı değildirler. Chamis'in formülü ile Hashin'in teorisi karşılaştırıldığında, sonuçların aynı olduğu, bunun yansıra Chamis'in formülünün oldukça basit olduğu görülmektedir. Bundan dolayı enine elastik modülü uygulamalarında Chamis'in formülü önerilir,

$$E_{22} = \frac{E_m}{1 - (1 - \frac{E_m}{E_{22}^f})\sqrt{\phi}} \quad (4.7)$$

Formülde E_{22}^f = Fiberin enine elastik modülüdür.

Aynı sebeplerden dolayı, Chamis tarafından önerilen akma modülü

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - (1 - \frac{G_m}{G_{12}^f})\sqrt{\phi}} \quad (4.8)$$

Aynı iç yüzey Poisson ν_{21} oranı eş orantıdan,

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12}E_{11}}{E_{22}} \quad (4.9)$$

Dış yüzey akma modülü fiber yönünün enine düzlem için Hashin tarafından üst ve alt sınır koşulları verilerek G_{23} olarak ön görülmüştür. Tsai aynı şekilde (4.4, 4.5) Hashin'in üst sınır koşuluyla uygun bir şekilde G_{23} olarak almış ve ona kıyasla da daha kolay bir formüldür,

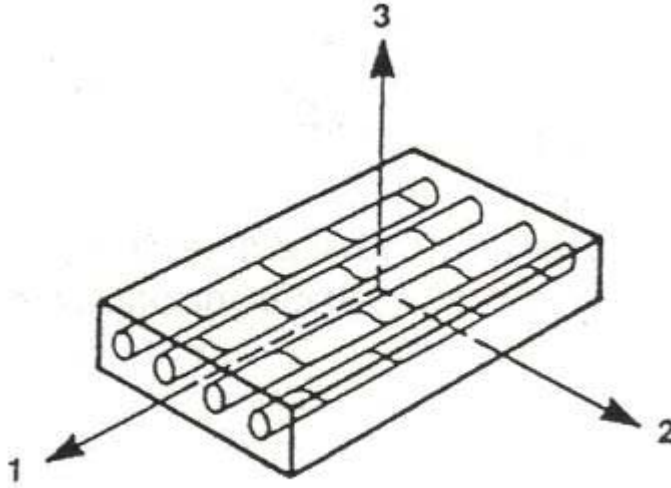
$$G_{23} = \frac{\phi + \delta(1 - \phi)}{\frac{\phi}{G_{23}^f} + \frac{\delta(1 - \phi)}{G_m}} \quad (4.10)$$

Ve,

$$\delta = \frac{3 - 4\nu_m + \frac{G_m}{G_{23}^f}}{4(1 - \nu_m)} \quad (4.11)$$

(4.1) ve (4.11) no'lu denklemlerin her ikisi de fiber ve reçinenin elastik olarak deforme olduğu ön görüşü üzerinden ve reçine içinde hiçbir boşluk olmadığı varsayılmıştır. Gerçekte reçine içerisinde kalan boşlukların mekanik özellikleri üzerinde çok önemli etkileri vardır.

4.4. Laminenin Makromekanik Davranışı



Şekil 4.1 Unidirectional güçlendirilmiş lamine düzlem içi yönlerin şematik gösterimi [13].

Ortotrofik Malzemede düzlemsel gerilmeler için gerilme-gerinme bağıntıları.

Unidirectional olarak güçlendirilmiş laminede gerilme durumu şu şekildedir (şekil 4.1).

$$\sigma_3 = 0, \tau_{23} = 0, \tau_{31} = 0$$

Böylece

$$\sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_2 \neq 0, \quad \tau_{12} \neq 0$$

Lamineler üzerindeki düzlemsel gerilme yalnızca gerçeğin idealize edilmesi değil, düzlemsel fiberlerden oluşan laminelerin nasıl kullanılmaları gerektiği, pratik ve ulaşılabilir nesnel sonuçlardır. Bu yapılan hesaplamalardan sonra laminelerin her yönde yüksek gerilmelere dayanıklı olmadıkları yalnızca fiberlerin yönünde mukavim oldukları bilinmektedir. Bu durum karşısında neden fiberleri doğal olmayan σ_3 gibi gerilmelere maruz bırakmak yersizdir. Unidirectional güçlendirilmiş lamine, fiberleriyle dik yönlü gerilmelere dayanabilmek için yardıma ihtiyaç duyar, bu yardım gerilmelerle aynı yönlü fiber doğrultularına sahip diğer (paralel) tabakalarla sağlanacaktır. Bu kısımda sadece karakteristikleriyle ilgilenilecektir.

Ortotrofik malzemeler, düzlemsel gerilmelere maruz kaldıklarında, düzlem dışı şu gerilmeler meydana gelir,

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \quad \gamma_{23} = 0 \quad \gamma_{31} = 0 \quad (4.11a)$$

Burada

$$S_{13} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} = -\frac{\nu_{31}}{E_3}, \quad S_{23} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{32}}{E_3}$$

gerilme-gerinme bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Denklemler birleştirildiklerinde,

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad , \quad S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad , \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad , \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (4.11b)$$

Denklem (4.11a) da ε_3 ' ün determinantının alınabilmesi için ν_{13} ve ν_{23} de mühendislik sabitlerinin denklem (4.11b) yanında bilinmelidir. ν_{13} ve ν_{23} denklem (4.11a) S_{13} ve S_{23} den elde edilir.

Gerinme-Gerilme bağıntısının verildiği denklem (4.12) çevrilerek gerilme-gerinme bağıntısı haline getirilebilir,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Burada 1 ve 2 düzlemleri için Q_{ij} düzlemsel gerilmelerde azaltılmış katılık belirtir bunlar şu yöntemlerle belirlenir (1) denklem(4.12)da bileşenlerin matrisine uygun şekilde değiştirilmeleriyle veya (2) C_{ij} ' e direk olarak $\sigma_3 = 0$ şartını gerinme-gerilme bağıntısında uygulayarak ε_3 için bir ifade elde etmek ve sonuçları sadeleştirerek,

$$Q_{ij} = C_{ij} - \frac{C_{i3}C_{j3}}{C_{33}} \quad , \quad i,j = 1,2,6 \quad (4.14)$$

Ortotrofik laminelerin ana malzeme koordinatlarında akma uzaması var olmadığı için C_{63} sıfırdır. Ortotropik laminelerin, Q_{ij} leri,

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, \quad Q_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \quad (4.15)$$

$$Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, \quad Q_{66} = \frac{1}{S_{66}}$$

Mühendislik Sabitleri eklendiği haliyle,

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.16)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

Dikkat edilmelidir ki 4 birbirinden bağımsız malzeme özelliği belirtilmiştir ; E_1, E_2, ν_{12} ve G_{12} , denklemler (4.12) , (4.13) eş orantı bağıntısından yararlanılarak,

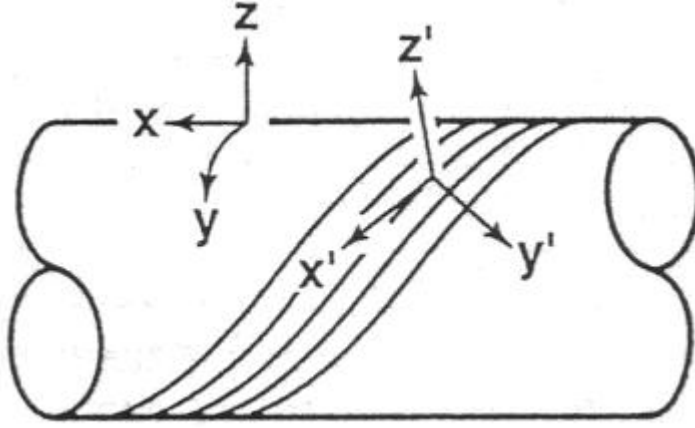
$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (4.17)$$

Önceki gerilme-Gerinme ve Gerinme-gerilme bağıntılarının katılık ve gerilme analizlerinin bağımsız bir lamineye uygulanabilirliğinin temellerini atmaktadır. Bu nedenle lamine analizlerinde bu bağıntılar olmazsa olmazlardandır.

4.5. Görelî Yönlendirilmiş Laminelerdeki Gerilme-Gerinme Bağıntıları

Ortotrofik malzemelerin ana malzeme koordinatları için gerilmeler ve gerinmeler tanımlanmıştır. Ancak, genel olarak problemin çözümü için gerekli olan yönler geometrik olarak doğal olan ortotrofik ana yönlerle çakışmaz. Örnek olarak, helikal olarak sarılmış güçlendirilmiş fiberli silindirik dış kabuk şek (4.2), orada dış kabuk probleminin çözümüne uygun olan koordinatlar x', y', z' dir. Filaman sarmal açısı $\cos(y', y) = \cos \alpha$; aynı zamanda $z' = z$ olarak tanımlanır. Diğer örnekler lamine plakaların farklı katmanlarda farklı yönlendirilmeleri bu duruma dahildir. Bu nedenle ana malzeme koordinatları ile body koordinatlar arasında bağıntıya ihtiyaç

vardır. Aynı şekilde , gerilme- gerinme bağıntısını bir koordinat sisteminden diğerine çevirmek içinde bir metoda ihtiyaç vardır.



Şekil 4.2 Fiber ile helikal olarak güçlendirilen silindirik kabuk üzerindeki yönlerin gösterimi[13].

Bu noktada malzemelerin mekanik özelliklerinden, 1-2 yönündeki gerilmelere uygun z-y koordinatlı sisteme uygun olarak gerilmelerin transformasyonları yapılmış denklemlerini geri çağırmanız gerekmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\cos\theta\sin\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Bu matris de θ açısı z-ekseninden 1-eksenine olan açıdır. Bu dönüştürmenin malzeme özellikleriyle hiçbir ilgisi yoktur, yalnızca gerilme yönlerinin döndürülmesiyle ilgilidir ve aynı zamanda döndürme yönleri çok önemlidir.

Aynı şekilde gerinmenin dönüştürülmesi denklemi,

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Gerinmelerin dönüştürülmesinin, gerilmelerin dönüştürülmesiyle aynı olduğu ve eğer akma gerinmesi için tensör tanımlaması yapılacak olsaydı (mühendislik akma gerilmesinin iki ile bölünmesine eşit).

Dönüşümler şu şekilde yazılırdı.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Üst “-1” matrisin tersinimini anlatmaktadır.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \cos \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta & \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Ancak eğer basit matris,

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Reuter’ e göre tanımlanırsa, o zaman mühendislik gerinme vektörleri

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

gerinme dönüşümlerindeki tensör gerinme vektörleri yerine ve gerilme-gerinme kural değişimlerdeki dönüşümlerin yerlerine kullanılabilir, Reuter'in dönüşümlerinin güzel olan tarafı az ve öz matris dönüşümü kullanılabilmesidir.

Sonuç olarak, sırada ifadelerdeki katılık ve uygun matrislerdeki değişik dizinlerdeki $\frac{1}{2}$ ve 2 gibi kullanılması zor üstler önlenmiş olmaktadır.

Özel ortotrofik lamine adı verilen ortotrofik laminelerde malzeme eksenleri doğal body eksenleri ile aynı yönlüdür:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Ana malzeme eksenleri şekil 4.1 de gösterilmiştir. Bu gerilme-gerinme bağıntıları ortotrofik laminenin ana malzeme eksenleri koordinat olarak kullanıldığında geçerlidir.

Ancak, daha öncede bahsedildiği gibi, ortotrofik lamineler genellikle ana malzeme koordinatları doğal body koordinatlarla kesişmeyecek şekilde ele alınır. Bu malzeme artık ortotrofik olarak ele alınmayacak demek değildir; bunun yerine ortotrofik bir malzemeye doğal olmayan bir açıdan ele alınacak demektir. Örnek olarak koordinat sistemi ana malzeme koordinat sistemine belirli bir açıyla yönlendirilmiş ise. O zaman temel soru: verilen gerilme-gerinme bağıntılarında ana malzeme koordinatlarına göre, gerilme-gerinme bağıntıları x-y koordinatlarında nelerdir?

Buna bağlı olarak, gerilme ve gerinme dönüşümleri denklemler 4.20,4.21 ve Reuter'in matrisi kullanılarak ,4.23, 4.26 denkleminin kısaltılmasıyla aşağıdaki şekilde bulunur,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Elde edilmesi için,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Ancak, $[R][T][R]^{-1}$, $[R]^T$ olarak gösterilebilir ve üst karakter T matrisin tranzposesini belirtir, bu kısaltma kullanıldığı zaman.

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T]^{-T} \quad (4.29)$$

Gerilme- Gerinme bağıntılarının x-y koordinatlarındaki hali,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Açılımı ile,

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{12} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta^3 \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \end{aligned} \quad (4.31)$$

$\bar{Q}$ matrisi dönüştürülmüş azaltılmış katılık anlamına gelir, ve azaltılmış katılık Q_{ij} yerine kullanılır.

Dönüştürülmüş azaltılmış katılık matrisi $\bar{Q}$, azaltılmış katılık Q_{ij} deki 0 ların yerine her bir dokuz pozisyonda değere sahiptir. Ancak, halen 4 bağımsız malzeme sabiti bulunmaktadır çünkü lamine ortotrofikdir. Body koordinatların x ve y oldukları genel durumda, akma gerilmesi ve normal gerilmeler ve akma gerilmesi ve normal gerilmeler aralarındaki eşleşme, örnek olarak, akma-uzama eşleşmesi vardır. Bu durumda, body koordinatlar, ortotrofik lamine malzeme anisotropik olsa bile. Ancak, laminenin ana malzeme koordinatlarında ortotrofik karaktere sahip olmasından dolayı, buna genel olarak ortotrofik lamine denir çünkü denklem (4.30) da verilen gerilme-gerinme bağıntılarıyla tanımlanır. Bu da, genel olarak ortotrofik lamine ortotrofik laminedir ve body eksenleri ana malzeme eksenleri ile eşleşmemektedir.

Genel ortotrofik laminenin anisotropik katmanlarının tek avantajı genel ortotrofik lamineler deneysel olarak daha kolay karakterize edilebilirler. Ancak ana malzeme eksenlerinin var olduklarını fark edemezsek, o zaman genel ortotrofik lamine anisotropik lamineden farksız olur. Bundan dolayı ortotrofik karakteri lamineden ayırmadan, lamineyi bu karakterleri birbirlerinden ayırması güç bir halde yönlendirebiliriz.

Süregelen prosedüre alternatif olarak, gerilmeleri gerilme body koordinatlarından (1) gerilme-gerinme bağıntılarının ters çevrilmesi ile veya (2) gerinme- gerilme bağıntılarının ana malzeme koordinatlarının body koordinatlara dönüştürülmesiyle elde edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

İkinci yaklaşımı ele alır ve dönüşümleri uygularsak ,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^T [S] [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Elde ederiz ve $[R][T]^{-1}[R]^{-1}$, $[T]^T$ olarak bulunmuştur ve

$$\begin{aligned} \bar{S}_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{S}_{12} &= S_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \bar{S}_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{S}_{16} &= (2S_{11} - S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{S}_{26} &= (2S_{11} - S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{S}_{66} &= 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \end{aligned} \quad (4.34)$$

S_{ij} mühendislik sabitleri terimlerinde açıklanmış (4.11b) denkleminde çağırılmıştır.

Denklem (4.30) da Q_{16} , Q_{26} varlıkları nedeniyle ve denklem (4.33) de S_{16} , S_{26} varlıkları nedeniyle problemin çözümü genel ortotrofik laminedir ve özel ortotrofik lamineden daha bir çözüme sahiptir. Bunun nedeni de, akma-uzama eşleşmesinin pratik çözümü zorlaştırmasıdır. Aslında, genel ortotrofik lamine ve anisotropik laminelerin gerilme-gerinme bağıntılarının çözümlerinde düzlemsek gerilme durumunda bir farklılık yoktur ve şu şekilde yazılabilir,

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

veya şu şekilde dönüştürülebilir,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{26} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Anisotropik uygunluk mühendislik sabitleri cinsinden yazılırsa,

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} & S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} & S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} & S_{16} &= \frac{\eta_{12,1}}{E_1} = \frac{\eta_{1,12}}{G_{12}} & S_{26} &= \frac{\eta_{12,2}}{E_2} = \frac{\eta_{2,12}}{G_{12}} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Bazı yeni mühendislik terimleri kullanılmıştır ve yeni sabitler Lekhnitskii tarafından “coefficients of mutual influence” (“ortak etki sabiti”) olarak tanımlanmıştır, [24].

$\eta_{i,j}$ = coefficients of mutual influence , ij düzlemindeki akma gerilmesini, i yönündeki germenin ilk karakteristiğinin.

$$\eta_{i,j} = \frac{\varepsilon_i}{\gamma_{ij}} \quad (4.38)$$

$\tau_{ij} = \tau$ ve diğer bütün stresler 0 için.

$\eta_{i,j}$ = coefficients of mutual influence, i yönündeki normal gerilmenin yol açtığı ij- düzlemindeki kaymanın ikinci karakteristiğinin

$$\eta_{i,j} = \frac{\gamma_{ij}}{\varepsilon_i} \quad (4.39)$$

$\sigma_{ij} = \sigma$ ve diğer bütün gerilmeler 0.

Lekhnitskii, coefficients of mutual influence ve poisson oranın alt simgeleriyle beraber çevrilmiş belirtilen gösterimlerini tanımlar. The coefficients of mutual influence yeterince verimli olarak isimlendirilmemişlerdir çünkü poisson oranı da aynı zamanda coefficients of mutual influence olarak isimlendirilebilir.

Bunun yerine $\eta_{i,jj}$ ve $\eta_{ij,i}$ akma-uzama eşleşmesi katsayısı olarak daha fonksiyoneldir[24].

Diğer anisotropik elastik bağıntılarında, poisson oranı akma gerilmeleri ve akma gerinmelerinde ne ise, Chentsov katsayısı da akma gerinmesi için tanımlanır. Ancak, Chentsov katsayısı düzlemsel gerilmelerdeki düzlem içi lamine davranışlarından etkilenmez. $\mu_{ij,ik}$ = Chentsov katsayısı, ij düzlemindeki akma gerilmelerinden meydana gelen kl-düzlemi gerinmelerini karakterize eder.

$$\mu_{ij,kl} = \frac{\gamma_{kl}}{\gamma_{ij}} \quad (4.40a)$$

$\tau_{ij} = \tau$ ve diğer tüm gerilmeler 0

Chentsov katsayısı resiprokal bağıntıya dönüştürüldüğünde.

$$\frac{\mu_{kl,ij}}{G_{kl}} = \frac{\mu_{ij,kl}}{G_{ij}} \quad (4.40b)$$

Chentsov katsayısı akma-akma eşleştirmesi katsayısı olarak isimlendirilmek için daha fonksiyoneldir.

Anisotropik laminelerin düzlem içi akma gerilmelerinden ve normal gerilmelerden kaynaklanan düzlem dışı akma gerinmelerinde;

$$\gamma_{13} = \frac{\eta_{1,13}\sigma_1 + \eta_{2,13}\sigma_2 + \mu_{12,13}\tau_{12}}{G_{13}} \quad (4.41)$$

$$\gamma_{23} = \frac{\eta_{1,13}\sigma_1 + \eta_{2,13}\sigma_2 + \mu_{12,13}\tau_{ij}}{G_{23}} \quad (4.42)$$

Akma-akma eşleşme katsayıları ve akma-uzama eşleşme katsayılarına ihtiyaç duyarlar. Ortotrofik malzemede bu akma gerilmelerinden hiçbiri gerilmelerin ana malzeme koordinatlarından farklı bir koordinatta uygulanmadığı sürece bulunmaz. Bu gibi durumlarda, akma-akma eşleşmesi katsayısı ve akma-uzama eşleşmesi katsayılarına uygun dönüşümleri ileride gösterilmiştir.

Denklem (4.34) deki ortotrofiğe uygun dönüştürülmüş olanlarla mühendislik sabitlerinin terimlerine uygun şekilde yazılmış olan anisotropik denklem (4.37) karşılaştırılınca. Ortotrofik lamine ana eksen dışındaki malzeme koordinatlarında gerilmelere maruz kaldığı zaman, akma-uzama eşleşme katsayısı sonuç olarak karşımıza çıkar. Denklem (4.36) da 1 ve 2 yeniden x ve y olarak düzenlendiğinde, tanım gereği, anisotropik malzeme ana malzeme yönleri yoktur. Daha sonra, denklem (4.37) den (4.34) denklemdeki S_{ij} denklem (4.10) deki ortotrofik uygunluğa göre indirgenir. Son olarak, ana eksenler dışındaki x ve y koordinatlarında gerilmelere maruz kalan ortotrofik laminenin anlaşılır mühendislik sabitleri:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{E_x} &= \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left[\frac{1}{G_{12}} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \sin^4 \theta \\
 \nu_{xy} &= E_x \left[\frac{\nu_{12}}{E_1} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) - \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \\
 \frac{1}{E_y} &= \frac{1}{E_1} \sin^4 \theta + \left[\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^4 \theta \\
 \frac{1}{G_{xy}} &= 2 \left[\frac{2}{E_1} + \frac{2}{E_2} + \frac{4\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{12}} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\
 \eta_{xy,x} &= E_x \left[\left[\frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin \theta \cos^3 \theta - \left[\frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^3 \theta \cos \theta \right] \\
 \eta_{xy,y} &= E_y \left[\left[\frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin^3 \theta \cos \theta - \left[\frac{2}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}} \right] \sin \theta \cos^3 \theta \right]
 \end{aligned} \tag{4.42b}$$

4.6.1 Klasik Laminasyon Teorisi:

Klasik laminasyon teorisi malzemede ki gerilmelerin mekaniği ve deformasyon hipotezlerinin bir bileşkesi olarak karşımıza çıkar. Bu teoriyi

kullanarak, temel yapı taşından, lamineye ve sonuç olarak da laminenin yapısına direk olarak ulaşabiliriz. Tüm bu uygulamalarda en etkin ve kabul edilebilir uygun sonuçlara komplike üç boyutlu elastik problem çözümü için gerekli olan kısımların varsayımlarla elenerek iki boyutlu çözülebilir mekanik deformasyon problemi olarak çözülmesidir.

Aslında, gerilmelerin ve deformasyon hipotezleri nedeniyle klasik ince cidarlı laminasyon teorileri veya klasik lamine plaka teorileri birbirlerinden ayrılamazlar. Bunun için klasik laminasyon teorisi ortak terim olarak kullanılacaktır.

İlk olarak laminenin davranışı kendi başına iken gerilme-gerinme davranışları incelenecek ve bir denklemle lamine k. tabaka halinde belirtilecektir. Daha sonra, gerilme ve gerinmelerin lamine kalınlığı boyunca olan değişimleri gözden geçirilecektir. Son olarak, lamine kuvvetleri ve gerinme momentleri ve eğrileri ile laminenin katılığı aralarındaki bağlar kurulacaktır. [13].

4.6.2 Lamine gerilme, gerinme davranışı

Gerinme-gerilme davranışları ana malzeme koordinatlarında gerilme halindeki ortotrofik malzeme için :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.43a)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.43b)$$

$\bar{Q}_{ij}$ dönüştürülmüş azaltılmış katılık anlamına gelir, ve azaltılmış katılık Q_{ij} yerine kullanılır.

Gerilme- gerinme bağıntıları düzlem için koordinatlarda, çünkü lamine bileşenlerinin rast gele seçilmiş oryantasyonları için denklem (4.43a) laminenin katılığı için kullanışlı bir tanımdır. Her iki denklemde (4.43a) (4.43b) çok tabaklı laminenin “k”ıncı katmanı için gerilme-gerinme bağıntısı için düşünülebilir. Burada, denklem (4.43b) şöyle yazılabilir:

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\varepsilon\}_k \quad (4.44)$$

4.7. Lamine Malzemedeki Gerinme ve Gerilme Varyasyonları:

Gerilme ve Gerinmelerin laminenin kalınlığı karşısındaki varyasyonları laminenin uzama ve eğilme katılıklarının tanımlanmaları açısından çok önemlidir. Lamine malzemenin birbirine mükemmel bağlanmış katmanlardan oluştuğu varsayılır. Bunun yanında bağların sonsuz incelikte olduğu kadar akma deformasyonuna uğramadıkları varsayılır. Bu da, yer değiştirmeler lamine sınırları boyunca sonsuzdur ve hiçbir lamine diğerine göre kaymaya uğramaz. Böylece, katmanlı lamine malzeme tek bir katman gibi davranır ve ileride bahsedilecek olan özel özellikli yapı elementini oluşturur. [28].

Lamine malzeme ince ise, laminenin orta yüzeyinden geçen ve bu yüzeye dik ve düz bir çizgi geçtiği varsayılır, örnek olarak orta yüzeye normal, bu çizginin laminenin deformasyonunda (eğilme, uzama, büzüşme, akma veya burkma) düz ve dik kaldığı varsayılır. Bu orta yüzeye normal olan çizginin deformasyon altında düz ve dik kalması orta yüzeye dik düzlemlerin akma gerinmelerini göz ardı etmemizi sağlar. Bu da $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$ z de normalden orta yüzeye olan yöne eşittir.

(γ_{xz} , γ_{yz} normalin deformasyona uğramış orta yüzeye yaptığı açılardır). Buna ek olarak normallerin sabit uzunlukları oldukları varsayılır böylece orta yüzeye dik gerinmeler göz ardı edilirler, $\varepsilon_z = 0$. Bu tek katmanın davranışları için yapılan varsayımlar lamine tabakalar için oluşturulmuş Kirchhoff hipotezini temsil eder ve dış kabuklar için Kirchhoff-Love hipotezini temsil eder. Düz lamineler için hiçbir

sınırlamanın olmadığını belirtelim; lamineler, aslında, kavisli ve dış kabuk gibidirler. X,y ve z yönlerindeki yer laminelerin değiştirmelerindeki u,v ve w için Kirchoff hipotezi, lamine x-z düzlemindeki kesiti kullanılarak türetilmiştir. x yönündeki B noktasının deforme olmayan orta yüzeyinden deforme orta yüzeye göre yer değiştirmesi u_0 (“₀” sembolü orta yüzeydeki değişkenlerin değerlerini belirtir) Çünkü ABCD çizgisi lamineni deformasyonu altında düz kalır, C noktasındaki yer değiştirme,

$$U_c = U_0 - Z_c \beta \quad (4.45)$$

Ancak, deformasyon altında, ABCD çizgisinin orta yüzeye göre dik kalması, Laminenin orta yüzeyinde x yönündeki β eğimini,

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (4.46)$$

Buradan, yer değiştirme, u ve lamine kalınlığı boyunca herhangi bir z noktası,

$$u = u_0 - z = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (4.47)$$

Aynı nedenle, y yönündeki v 'nin yer değiştirmesi,

$$v = v_0 - z = \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (4.48)$$

Lamine gerinimleri $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{yz}$ Kirchhoff Hipotezi dolayısıyla azaltılır. Bu da lineer elastik (küçük gerinmeler) için $\epsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$, geriye kalan yer değiştirme terimleri şöyle tanımlanır,

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (4.49)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Buradan yer değiştirmeler u ve v denklem (4.47) ve denklem (4.48) e göre türetilirse, gerinmeler,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (4.50)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (4.51)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (4.52)$$

Veya

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Burada orta yüzey gerinmeleri,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Orta yüzey eğrileri

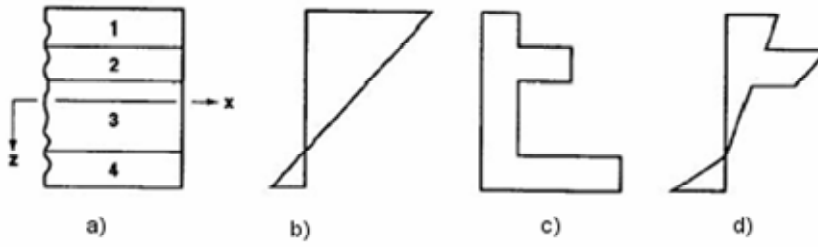
$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Denklemin (4.55) son kısmındaki terim orta yüzeydeki burkulma eğimini verir. Referans yüzey olarak sadece orta yüzeydeki eğimleri baz alıyoruz. Bu yüzden k_x, k_y ve k_{xy} deki üst simgelerin belirtilmesine ihtiyaç duymadık. Böylece Kirchhoff hipotezi, lamine kalınlığı boyunca gerilmelerin lineer varyasyonlarını uygulamak için uygun hale gelmiş olur, çünkü denklem (4.53) deki gerilmeler düz çizgi formunu almış olurlar, $y = mx+b$. Denklemler (4.50, 4.51, 4.52) deki gerinme-yer değiştirmesi bağıntıları sayesinde ileride yapılacak gerinme analizleri sadece düzlemler için geçerlidir. Dairesel silindirik dış kabuklardaki denklemler (4.50, 4.51, 4.52) deki ε_y terimi w_0/r şeklinde kullanılacaktır, r dış kabuğun yarıçapıdır; diğer dış kabuklar daha komplike gerinme-yer değiştirme bağıntılarına sahiptirler.

Gerinme varyasyonlarının kalınlık boyunca indirgenmesi sayesinde, denklem (4.55), gerilme-gerinme bağıntılarında, denklem (4.44) deki, “k”ıncı katmandaki gerilmeler lamine orta yüzey ve eğimler cinsinden belirtilebilir,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

$\bar{Q}_{ij}$ laminenin her tabakası için farklı olabilir, bu yüzden gerilme varyasyonları gerinme varyasyonları boyunca lineerdir. Bunun yerine, tipik gerinme ve gerilme varyasyonları gerilmelerin parça başına lineer oldukları (her tabakada lineer fakat lamineler arasındaki sınırlar boyunca süreksiz) şekil (4.3) gösterilmiştir.



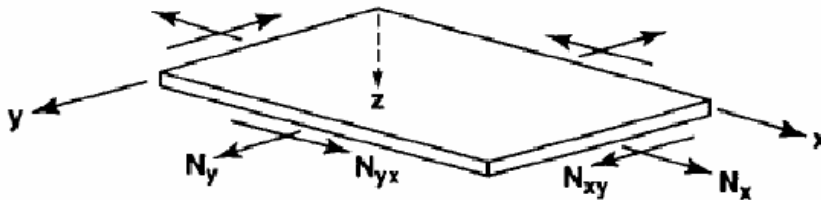
Şekil 4.3 Gerilme ve gerinme varyasyonların lamine kalınlığınca gösterimi a) lamine b) gerinme dağılımı c) karakteristik modül d) gerilme dağılımı [13].

4.8. Bileşke Lamine Kuvvetleri ve Momentleri

Lamineye etki eden bileşke kuvvetler ve momentler gerilmelerin lamine kalınlığı boyunca veya her tabaka için entegrasyonuyla bulunmuştur. Örnek olarak,

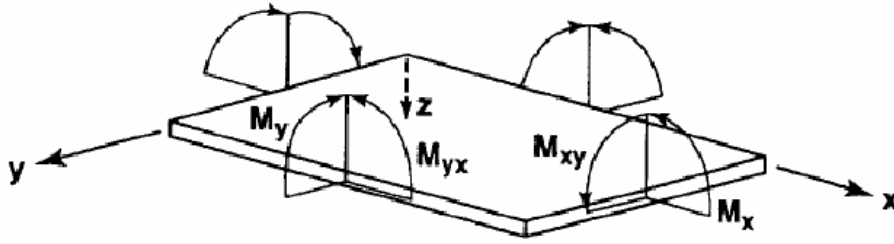
$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad (4.60)$$

Düzlem içi gerilmeler laminenin içinde değişiklik göstermekte bunu yanında lamineden lamineye de değişiklik göstermektedir, bu yüzden entegrasyon bayağı değildir. Aslında N_x laminenin kesit alanı boyunca etki eden bir kuvvettir ve şekil (4.4) da gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Düzlem içi bileşke kuvvetlerin şematik gösterimi [13].

Aynı şekilde, M_x şekilde de (4.5) gösterildiği şekilde birim genişliğe etki eden momenttir. Ancak N_x ve M_x , kuvvetler ve momentler olarak uygunluk açısından “birim genişlik için” şartıyla atıfta bulunulacak. N-katmanlı bir lamine için kuvvet ve moment bileşenlerinin hepsi şekil (4.4) ve şekil(4.5) de belirtilmiştir ve tanımı



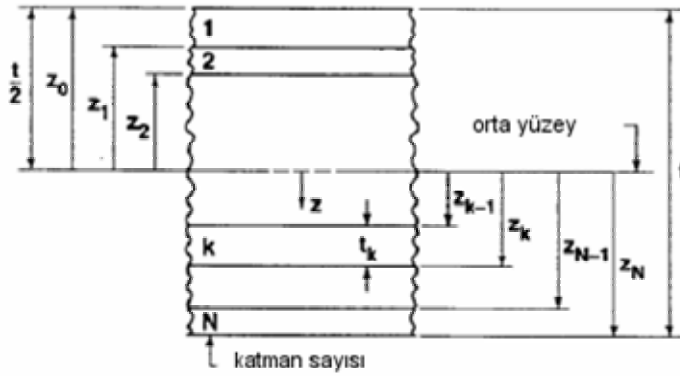
Şekil 4.5 Düzlem içi bileşke momentlerin şematik gösterimi [13].

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (4.61)$$

Ve

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{Z_{k-1}}^{Z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (4.62)$$

Burada Z_k ve Z_{k-1} şekil (4.6) deki temel lamine geometrisini tanımlamaktadır. z_i ler yönlendirilmiş uzaklıklar(koordinatlar), Z_i lerin konveksiyonel olarak pozitif ve aşağıya doğru oldukları doğrultusunda. z_k lar k. Tabakalara doğru yönlendirilmiş uzaklıklar. $z_0 = -t/2$, $z_1 = -t/2 + t_1$, $z_N = +t/2$, $z_{N-1} = +t/2 - t_N$. Bu bileşik kuvvetler ve momentler entegrasyondan sonra z ye bağlı olarak değişmezler, ancak x ve y, laminenin orta yüzeyinin düzlemin içindeki koordinatların fonksiyonudurlar.



Şekil 4.6 Lamine malzemede orta yüzey ve kalınlığın şematik gösterimi[13].

Denklemler (4.61) (4.62) yeniden düzenlenerek katılık matrisini lamine içerisinde genel olarak sabit kılabilirler (ancak laminenin sıcaklık-değişkeni veya nem-değişkeni özellikleri yoksa ve lamine boyunca sıcaklık gradyeni veya nem gradiyenti yoksa). Eğer yüksek sıcaklık veya nem laminenin kalınlığı boyunca sabit ise, o zaman lamine içerisinde $[\bar{Q}_{ij}]_k$ lar sabittir ancak muhtemelen sıcaklık ve/veya nemin etkisiyle azaltılmıştır. Bundan dolayı, bileşke kuvvetlerin ve momentlerin her bir tabaka için toplamı dahilinde, her bir tabakada katılık matrisi entegrasyonun dışına çıkar. Bu durumda laminenin gerilme-gerinme bağıntıları,

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_x^0 \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} z dz \right] \quad (4.63)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_x^0 \end{bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \right] \quad (4.64)$$

Bazı durumlarda katılık matrisi lamine için, $[\bar{Q}_{ij}]_k$, lamine kalınlığı boyunca sabit değildir. Örnek olarak, eğer sıcaklık gradiyenti veya nem gradiyenti laminede mevcut ise ve lamine malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı ve/veya neme bağlı ise, o zaman $[\bar{Q}_{ij}]_k$ z nin fonksiyonudur ve integralin içinde bırakılmalıdır. Bu gibi

durumlarda, lamine her bir katman için homojen değildir, bu yüzden daha komplike sayısal çözümler aşağıda belirtildiği üzere gerekmektedir,

Yeniden, $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, k_x, k_y$ ve k_{xy} z nin fonksiyonu değildirler ancak orta yüzey değerleridirler bu yüzden toplam işaretlerden çıkarılabilirler. Buna göre denklemler (4.63) (4.64) şu şekilde yazılırlar,

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Burada,

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (4.67)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (4.68)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (4.69)$$

5 SAYISAL ÇALIŞMA

5.1. Basıncılı Tankların Tasarımı:

5.1.1 İnce- Dış Kabuk (Shell) Denklemleri

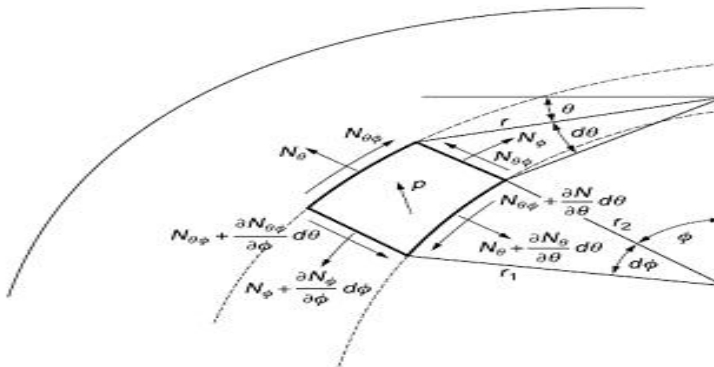
Dış kabuk kavis verilmiş levha yapısına denir. Bizim burada bahsedeceğimiz dış kabuklar tam döndürülmüş olanlardır. Şekil (5.1) φ açıyla döndürülmüş, merkez çizgisinden itibaren meridyen yarıçapı r_1 ve konik yarıçapı r_2 . Yatay yarıçapı eksen dik olduğu zaman r dir.

Eğer dış kabuk kalınlığı t ise, z kalınlık boyunca koordinat, Flugge'ın aşağıda belirtilen uyarlamasında, şu gerilme bileşenlerini buluruz, [28].

$$N_\theta = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\theta \left(\frac{r_1 + z}{r_1} \right) dz \quad (5.1)$$

$$N_\phi = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_\phi \left(\frac{r_2 + z}{r_2} \right) dz \quad (5.2)$$

$$N_{\theta\phi} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\theta\phi} \left(\frac{r_2 + z}{r_2} \right) dz \quad (5.3)$$



Şekil 5.1 İnce cidar döndürümü ve bileşke kuvvetlerin gösterimi[42].

$$N_{\phi\theta} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{\phi\theta} \left(\frac{r_1 + z}{r_1} \right) dz \quad (5.4)$$

Bu gerilme bileşkeleri iç basınç, p , r yönünde etki etmesiyle oluştuğu varsayılır. Zarlı dış kabuklarda eğme etkisi yok sayılabilir, bütün momentler sıfırdır ve formül,

$$N_{\phi\theta} = N_{\theta\phi}$$

Aşağıdaki formül kuvvet dengesinin döngüsel simetri ihtiyacının da eklenmesiyle oluşturulmuştur.

$$\frac{dN_{\phi}}{d\phi} - r_1 N_{\phi} \cos \phi = 0 \quad (5.5)$$

$$N_{\theta} = pr_2 - \frac{r_2}{r_1} N_{\phi} \quad (5.6)$$

Denklemler (5.5) (5.6) çözülmesiyle $r = r_2 \sin \phi$,

$$N_{\phi} = \frac{pr_2}{2} \quad (5.7)$$

$$N_{\theta} = pr_2 \left(2 - \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (5.8)$$

Yukarıdaki iki denklem genel döndürülmüş dış kabuk sonuçlarıdır. İki adet özel durum sonucu vardır:

Küresel bir dış kabuk için yarıçap R , $r_1 = r_2 = R$ bu da,

$$N_{\theta} = N_{\phi} = \frac{pR}{2} \quad (5.9)$$

Silindirik basınç tankı için yarıçap R , $r_1 = \infty$, $r_2 = R$ buradan da,

$$N_{\phi} = \frac{pR}{2}, \quad N_{\theta} = pR \quad (5.10)$$

Bu formül Hoop gerilmesini verir.

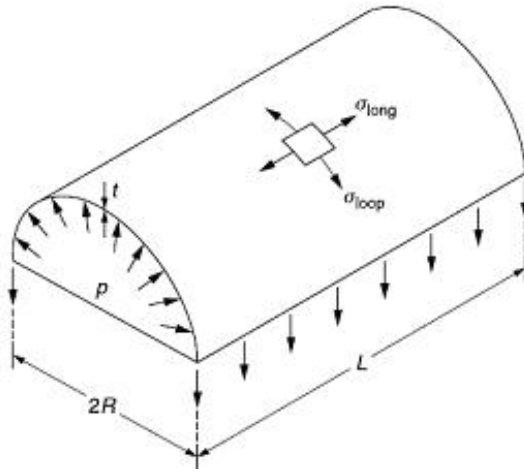
$$\sigma_{hoop} = \sigma_{\theta} = \frac{N_{\theta}}{t} = \frac{pR}{t} \quad (5.11)$$

Ve boylamasına gerilmeler,

$$\sigma_{long} = \sigma_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{t} = \frac{pR}{2t} \quad (5.12)$$

Bu sonuçlar ileride göstereceklerimizle aynı sonuçlardır. Eğer uzun ince cidarlı, R yarıçaplı ve t kalınlıkta ve p iç basınca maruz bırakılmış bir silindir düşünecek olursak. İnce cidarlı diyerek R/t oranının 10 dan büyük olduğu durumlar anlaşılmalıdır. Eğer silindirin her iki ucu da kapalı ise, o zaman eksenel (uzunlamasına) gerilmeler olacağı gibi hoop (dairese) gerilmelerde olacaktır.

Bu tür bir dış kabuğun kesitleri şekil 5.2 de gösterilmiştir. Dairesel gerilme, σ_{hoop} ve düzlemsel gerilme, σ_{long} şekil de belirtilmiştir. Dairesel gerilmelerde, σ_{hoop} , dış kabuğun uzun ve ince olduğu ve düzlemsel gerilmelerin, σ_{long} , kalınlık boyunca düzenli bir dağılım gösterdiği anlaşılır. Bu yüzden bu durumda σ_{hoop} ve σ_{long} aynı zamanda zar gerilmeler olarak da belirtilebilirler (Bu çeşit yüklemelerde eğme gerilmeleri bulunmaz). [28].



Şekil 5.2 İnce silindirik kabuk[13].

Denklemleri kesme bölgesinden alırsak,

$$pL(2r) = 2\sigma_{hoop} tL \quad (5.13)$$

Buradan

$$\sigma_{hoop} = \frac{pR}{t} \quad (5.14)$$

dış kabuğun eksenine dik bir kesit alan düşünülürse,

$$p\pi r^2 = \sigma_{long} (2\pi Rt) \quad (5.15)$$

Buradan da,

$$\sigma_{long} = \frac{pR}{2t} \quad (5.16)$$

5.1.2 Kalın Dış Kabuk Denklemleri

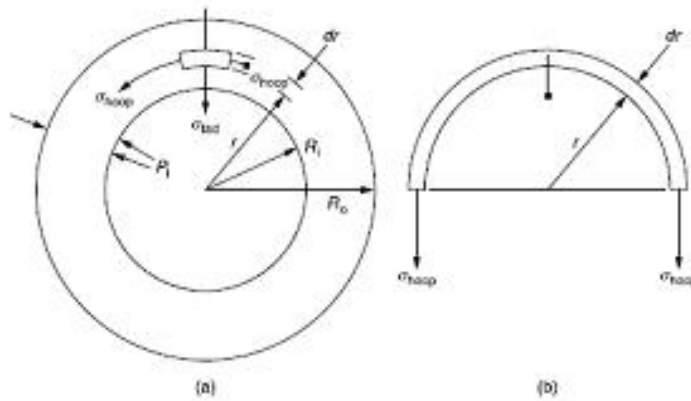
R/t oranı 10 dan küçük olan dış kabuklara kalın cidarlı dış kabuklar denir, denklemler (5.15) ve (5.16) isabetli sonuçlar vermezler, ve kalın cidarlı dış kabuk denklemleri kullanılmalıdır[28].

Kalın cidarlı silindirik dış kabuğun Şekil (5.3) de gösterildiği şekilde iç yarıçapı R_i , dış yarıçapını R_o ve iç basıncı p olarak alınacaktır.

Yarıçapı r için bu durumda kullanılacak gerilme fonksiyonu,

$$\phi = A \ln r + B r^2 \quad (5.17)$$

A ve B belirlenen sınır şartlarıdır.



Şekil 5.3 Kalın silindirik kabuk içerisindeki yarıçapların, radyal kuvvetlerin ve hoop kuvvetlerin gösterimi[13].

Eğer radyal gerilmeyi σ_{rad} ve hoop ve boylamsal gerilmeyi de daha önceden belirtildiği gibi σ_{hoop} ve σ_{long} olarak alırsak,

$$\sigma_{rad} = \frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} = \frac{A}{r^2} + 2B \quad (5.18a)$$

$$\sigma_{hoop} = \frac{d^2\phi}{dr^2} = -\frac{A}{r^2} + 2B \quad (5.18b)$$

Sabitler A ve B aşağıdaki sınır koşullarından belirlenmiştir:

$$\begin{aligned} r = R_i \quad \text{için} \quad \sigma_{rad} &= -p \\ r = R_0 \quad \text{için} \quad \sigma_{rad} &= 0 \end{aligned} \quad (5.19)$$

Denklemler (5.18a) ve (5.18b), (5.19) uygulanırsa elimizde

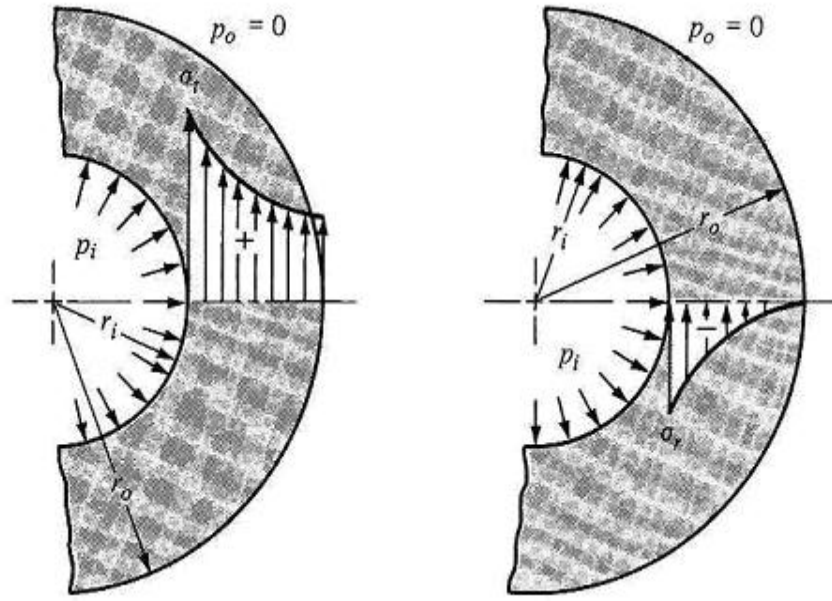
$$A = -\frac{R_i^2 R_0^2 p}{2(R_0^2 - R_i^2)} \quad (5.20)$$

$$B = \frac{R_i^2 p}{2(R_0^2 - R_i^2)} \quad (5.21)$$

Dış yarıçapın iç yarıçapa oranını m olarak isimlendirirsek, $m = R_0 / R_i$, radyal ve hoop gerilmeleri,

$$\sigma_{rad} = \frac{p}{(m^2 - 1)} \left[1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right] \quad (5.22)$$

$$\sigma_{hoop} = \frac{p}{(m^2 - 1)} \left[1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right] \quad (5.23)$$



Şekil 5.4 Basıncı tanklarda tanjantal (sol) ve radyal gerilme dağılımı (sağ)[42].

Boylamsal gerilme, σ_{long} dış kabuğun eksenine normal bir düzlem üzerindeki denge kuvvetlerinin değerlendirilmesiyle belirlenmiştir.

$$p\pi R_i^2 = \sigma_{\text{long}}\pi(R_o^2 - R_i^2) \quad (5.24)$$

Bu da tabi ki boylamsal gerilmenin bir tür zar gerilme olduğu varsayımına dayanarak (şekil 5.4) dış kabuğun kalınlığı boyunca gerilme çeşitliliklerinin (varyasyonlarının) bulunmayacağıdır. Buradan da,

$$\sigma_{\text{long}} = \frac{pR_i^2}{(R_o^2 - R_i^2)} = \frac{p}{(m^2 - 1)} \quad (5.25)$$

5.2. Kompozit Basınçlı Kapların Gerilme analizleri:

Kompozit malzemelerin özellikleri, bütün yapısal malzemelerin özelliklerinde olduğu gibi çevresel ve uygulamaya bağlı koşullardan etkilenirler. Dahası, polimerik kompozitler konvansiyonel metal alaşımlardan daha fazla bahsedilen koşullardan etkilenirler çünkü polimerler sıcaklığa, neme ve zamana karşı metallerden daha duyarlıdırlar. Aynı zamanda belirli polimer malzemeler için kompozit yapının dışında bulunmaları mümkün değildir ve bu yapıların üretimleri esnasında oluşturulurlar. Sonuç olarak, malzeme karakteristikleri türe ve üretim parametrelerine bağlıdır. Örnek olarak tek yönlü (unidirectional) kompozitler pultrusion, hand lay-up ve filaman sarmal yöntemleriyle üretilmeleri farklı özelliklere sahip sonuçlar doğurur.

Araştırmanın bu kısmı çevresel karşısında kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ele almaktadır. Genel Hıgrotermal gerilim analizi çok katmanlı ince veya kalın cidarlı kompozit silindirlerin aksel simetrik durumlarını uniform sıcaklık dağılımlarındaki hallerini ele almaktadır. Çözüm kapalı uçlu silindir şartlarında yapılmıştır. Sarmal açıları her biri simetrik ve asimetrik olan durumlar için $[90/55^\circ/0/-55^\circ/90]_s$ seçilmiştir.

5.3. Hasar Analizleri:

Lamine malzeme homojen olarak varsayılır ve mekanik davranışı eşlenik serisiyle veya efektif modülüslerle ve mukavemet özellikleriyle karakterize edilir. Bu özellikler mikro-mekanik yaklaşımla veya fenomenal yaklaşımla hesaplanır. Mikro mekanik yaklaşımda, lamine özellikleri matematik model kullanılarak bileşenleri (fiber, matris) özelliklerindeki terimler kullanılarak tahmin edilir; fenomenal yaklaşımda, lamine özellikleri deneysel olarak tek bir katmana veya katmanlara uygulanarak elde edilir. Bu uygulamada fenomenal açıdan yaklaşılarak çözümleme yapılmıştır.

Katmanın mekanik özellikleri bulunduğundan sonra katmanın hasar tespiti uygun bir hasar tespit kriteri uygulanarak elde edilir. Hasar çeşitleri yüklemeye, yığılma düzenine ve numunenin geometrisine bağlıdır. Çoğu hasar kriteri laminedeki gerilme durumu temel alınmıştır. Bu nedenle, üç boyutlu gerilme/gerinme alanlarının bulunabilmesi için laminenin isabetli bir kinematik modeline ihtiyaç vardır. Hasar kriteri, örnek olarak, quadratic polynomial kriteri deneysel olarak elde edilmiş parametrelere ihtiyaç duyar. Sıklıkla, bu parametreler kesin olarak elde edilmesi güçtür.

Lamine kompozitin mukavemetini analiz edebilmek için, mukavemet teorilerine ihtiyaç vardır. Hasar analizi kompozit laminenin, çeşitli katmanlarda ve yönlendirmelerdeki, mukavemetini tahmin edilebilmesi için bir araçtır. Kompozit malzemenin gözlenen kompleks hasar tespitlerinin doğasının sonucu olarak çok sayıda hasar kriteri vardır. Bu kriterler ancak kademeli hasar analizlerinde kullanılırlarsa faydalı olurlar, bu da sonlu elemanlar formülasyonu ile uyumlu olmaları gerektiğini anlamına gelir.

Genel olarak iki çeşit hasar tespit kategorisi vardır: bağımsız ve interaktif (veya quadratic polynomial) kriterler. Bağımsız kriterde, maksimum gerilme ve maksimum gerinmelerin uygulanmaları kolay ve belirgindir, hasarın modu hakkında bilgi verir, ancak gerilme etkileşimlerini yok sayar. Bu nedenle oldukça kapalı bir kriterdir. İnteraktif kriterler, Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hoffman gerilme etkileşimlerini hasar mekanizmasına dahil etmiştir ve katman için ilk hasar tespiti yapabilir ancak parametrelerinin elde edilebilmesi için efor sarf edilmesi gerekmektedir.

Lamine kompozit basınçlı tankın katman hasar analizi uygun hasar kriteri uygulanarak yapılır. Bu nedenle Tsai-Wu kriteri temel olarak lamine basınçlı kapların basınç yükleri altında belirlenmesi kullanılır.

5.3.1 Tsai-Wu Hasar Teorisi

Düzlemsel gerilme şartlarında, Tsai-Wu hasar teorisi ortotrofik lamine için aşağıdaki bağıntı uygulanırsa hasar bulunabilir:

$$F_1\sigma_{11}+F_2\sigma_{22}+F_6\tau_{12}+F_{11}\sigma_{11}^2+F_{22}\sigma_{22}^2+F_{66}\tau_{12}^2+2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22}=1 \quad (5.26)$$

x ekseniiyle θ açısı yapan unidirectional fiberlerin oluşturduğu ortotrofik lamineler düzlemsel gerilme şartlarında kabul edilir. 4 bağımsız elastik sabit, E_{11}, E_{22}, G_{12} ve ν_{12} elastik karakteristiğın belirlenebilmesi için gereklidir. Mukavemet özellikleri 5 bağımsız mukavemet özelliğiiyle karakterize edilir, bunlar:

X_t = uzunlamasına çekme gerilmesi

Y_t = enine çekme gerilmesi

X_c = uzunlamasına basma gerilmesi

Y_c = enine basma gerilmesi

S = düzlem içi (lamineler arası) akma gerilmesi

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, \quad F_{22} = -\frac{1}{Y_t} \frac{1}{Y_c},$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_t} \frac{1}{X_c}, \quad F_6 = 0, \quad F_{66} = -\frac{1}{S^2}$$

F_{12} terimi σ_{11} ve σ_{22} arasındaki gerilim etkileşimini göstermektedir. F_1, F_2, F_{11}, F_{22} ve F_{66} çekme, basma ve akma gerilmesi özelliklerinden ana malzeme eksenleri için hesaplanabilir. F_{12} nin determinantı uygun bieksenel teste ihtiyaç duyar. Basit bir örnekle, bieksenel gerilim testlerinde hasar durumunda $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$, Denklem () den yararlanarak,

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1 \quad (5.27)$$

Buradan da,

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t} \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} \frac{1}{Y_c} \right) \sigma^2 \right] \quad (5.28)$$

Güvenilebilir biekselel testlerin her zaman uygulanmalarının kolay olmamasından dolayı, yaklaşık F_{12} aralığı değerleri önerilir,

$$-\frac{1}{2}(F_{11}F_{22})^{1/2} \leq F_{12} \leq 0 \quad (5.29)$$

Deneyisel verilerin eksik olduğu durumlar için alt limit olarak denklem (5.29) genel olarak F_{12} yerine kullanılır.

5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu bölümde, Ansys 11 sonlu elemanlar analiz yazılımı kullanılarak, statik hasar analizi kompozit basınçlı tanklar için uygulanmıştır.

İnce cidarlı varsayımları iç basıncın p olduğu durumlar için basınçlı tanka uygulanmıştır.

$$\sigma_{hoop} = \frac{pR}{t}$$

$$\sigma_{long} = \frac{pR}{2t}$$

Parametrik çalışmalar çeşitli oryantasyon açılarında uygulanmıştır.

5.4.1 Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi

Üç Boyutlu sonlu elemanlar formülasyonları, yer değiştirme, çekme bileşenleri (komponentleri) ve dağılımlı gövde (body) kuvvetleri değerleri (x,y,z) konum belirteçlerinin fonksiyonlarının değerleridir[45,46]. Yer değiştirme vektörü u

$$u = [u, v, w]^T$$

ler x,y,z lerin u ya göre componentleri u, v, w dir. Gerilme ve gerilmeler şu şekilde verilir.

$$\sigma = [\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{xy}]^T$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T$$

Üç boyutlu genel problemi gösteren kuvvet ve çekme vektörü ,

$$f = [f_x, f_y, f_z]^T, \quad T = [T_x, T_y, T_z]^T$$

Kuvvet f , birim hacme etki eden kuvvet, T de birim alana etki eden kuvvet olarak belirtilir.

6 PARAMETRİK ÇALIŞMA

Parametrik analizlerini yapacağımız yüksek basınçlı tankı, daha öncelerde belirttiğimiz formüllerden ve varsayımlardan faydalananarak tasarladık. Tasarlanacak olan depolama tankı DOE tarafından 2010 ve 2015 yılları için çizilen yüksek basınçlı kompozit tank standartlarına uyacak şekilde tasarlandı. Bunun için DOE nin 2010 yılı için öngördüğü maksimum tüp hacmi 0.111 m^3 ve ağırlığı da maksimum 83 kg olması planlanmıştır. Bunun yanında daha önce de bahsedildiği üzere ekonomik bakımdan hidrojen enerjisinin elverişli bir hale gelebilmesi ve fosil yakıtlar karşısında tercih edilebilir olması için orta dereceli bir araçta 5kg hidrojen depolaması gerektiği bilinmektedir.

6.1. Temel Analizler:

Karbon fiber epoksi kompozit tankın sahip olması gereken özellikler, hidrojen depolamada büyük önem taşıyan hacimsel yoğunluk ve ağırlıksal yoğunluk bakımından uygun olması için cidar kalınlığının uygulanacak basınçlara dayanabilmesi ve aynı zamanda depolama tankı ağırlığını arttırmaması gerekmektedir.

Hesaplamaların doğru yapılabilmesi için öncelikle depolanacak olan hidrojen yoğunluğu doğru olarak hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar için sıkıştırma faktörünün hesaplanması gerekmektedir.

Yükselen basınçlarda, bütün gazlar sıkıştırılabilme özelliklerini yitirirler. Yüksek basınçlarda, sıkıştırma zorlukları daha belirgin bir hal alır. Bundan dolayı sıkıştırma faktörünü de içinde barındıran bir durum denklemi kullanılması ideal gaz denkleminin kullanılmasından çok daha iyi sonuçlar verecektir. Bu duruma uygun ideal gaz denklemleri,

$$PV_{gas} = zRT' \quad (6.1)$$

P basıncı , V_{gas} özgül hacim, z sıkıştırma faktörü, R gaz sabiti (Hidrojen için 4124.18Nm/KgK) ve T' sıcaklıktır.

Bir gazın sıkıştırılabilirliğini öngören birkaç yol vardır. Beattie-Bridgeman denklemi, Soave-Redlich-Kwong denklemi, Benedict-Webb-Rubin denklemi, p-v-T deneysel verilerinin değerlendirilmesi bunlara örnek olarak gösterilebilir. [43].

Bütün bu formüller deneysel verilerin doğruları üzerinde yapılan değerlendirmelerin sonucunda bulunmuştur. Benedict-Webb-Rubin denklemi Beattie-Bridgeman Denkleminin bir uzantısıdır. Soave-Redlich-Kwon, Benedict-Webb-Rubin ve deneysel P-V-T (basınç-hacim-yoğunluk) verileri arasında yapılan karşılaştırmada z değerlendirmesi bakımından deneysel P-V-T ye en yaklaşık sonucu ve yaklaşık sonucun Benedict-Webb-Rubin (BWR) olduğu görülmüştür. [43].

BWR denklemi hidrojenin yüksek basınçlardaki hesaplamalarında sıkıştırma faktörünün etkilerini en doğruya yakın biçimde gösteren denklemdir. BWR denkleminde kullanılan katsayılar malzeme özellikleridir ve gazdan gaza değişirler.

$$p = \frac{RT}{v} + \left(BRT - A - \frac{C}{T^2} \right) \cdot \frac{1}{v^2} + \frac{(bRT' - a)}{v^3} + \frac{a\alpha'}{v^6} + \frac{c}{v^3 T^2} \cdot \left(1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\gamma}{v^2}\right) \quad (6.2)$$

$$z = 1 + \left(B - \frac{A}{RT'} - \frac{C}{T'^3} \right) \cdot \rho_{gas} + \left(b - \frac{a}{RT'} \right) \cdot \rho_{gas}^2 + \frac{a\alpha'}{RT'} \cdot \rho_{gas}^5 + \frac{c\rho_{gas}^2}{RT'^3} \cdot \left(1 + \gamma\rho_{gas}^2 \right) \cdot \exp(-\gamma\rho_{gas}^2) \quad (6.3)$$

P_{gas} , gaz yoğunluğunu belirtir. Diğer parametreler,

$$\begin{aligned}
 a &= -9.2211 \times 10^{-3} \text{ atm} \cdot \text{l}^3 \cdot \text{mol}^{-3}, \\
 A &= 9.7319 \times 10^{-2} \text{ atm} \cdot \text{l}^2 \cdot \text{mol}^{-2}, \\
 b &= 1.7976 \times 10^{-4} \text{ l}^2 \cdot \text{mol}^{-2}, \\
 B &= 1.8041 \times 10^{-2} \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}, \\
 c &= -2.4613 \times 10^2 \text{ atm} \cdot \text{K}^2 \cdot \text{l}^3 \cdot \text{mol}^{-3}, \\
 C &= 3.8914 \times 10^2 \text{ atm} \cdot \text{K} \cdot \text{l}^2 \cdot \text{mol}^{-2}, \\
 \alpha' &= -3.4215 \times 10^{-6} \text{ l}^3 \cdot \text{mol}^{-3}, \\
 \gamma &= 1.89 \times 10^{-3} \text{ l}^2 \cdot \text{mol}^{-2}.
 \end{aligned}$$

Bu değerleri gaz sabiti, hidrojenin kütle ve sıcaklığı ile birlikte BWR denkleminde (6.2) yerlerine koyduğumuzda, basınç ifadesi karşımıza çıkar, bu ifade hidrojenin yoğunluğunun bulunabilmesi için iteratif (yinelenen) bir yaklaşımla çözülerek elde edilir. Sekant Metodu yöntemiyle yapılan bu çözümleme için MATLAB bilgisayar programından faydalanılmıştır. Buradan elde edilen yoğunluk değerleri denklemde (6.3) yerine konularak sıkıştırma faktörü değerlerine ulaşılmıştır. Sıkıştırma faktörünün elde edilmesiyle, hidrojenin hesaplanan basınçlardaki sıkıştırma değerleri hesaplanmış ve uygulanabilir olmuştur.

Tablo 6.1 Çeşitli basınçlarda sıkıştırma faktörü

Basınç	Sıkıştırma Faktörü
10	1,06013
20	1,12445
30	1,22368
40	1,25694
50	1,32339
60	1,38960
70	1,45545
80	1,52091
90	1,58590
100	1,65039

Gerilme analizleri, gerilme haritasının çıkarılmasında ve akma mukavemetlerinin, burada belirtmek gerekir ki CRFP (carbon fiber reinforced polymer) polimer matrisli karbon fiberlerin akma mukavemetleri, maksimum çekme mukavemetleri birbirlerine eşit alınacaktır. Herhangi bir iç basınçta, aşağıdaki denklem tek cidarlı tanklar ve iki ucu yarım kürelerle kapalı olan silindirik tanklar için minimum cidar kalınlığı değerlerini vermektedir ve denklemden türetilmiştir (), Sırasıyla P basıncı, r tankın yarıçapını, FS güvenlik faktörünü ve $S_{y\sin gle}$ malzeme akma mukavemetini vermektedir.

$$t = \frac{P \cdot r \cdot FS}{S_{y\sin gle}} \quad (6.4)$$

$$t = \frac{P \cdot r \cdot FS}{2 \cdot S_{y\sin gle}} \quad (6.5)$$

Bu bağıntılardan,

Burada tankların ekstenel olarak simetrik olduklarına dikkat edilmelidir. Cidar kalınlığının R/t 10 oranını aşmasıyla kalın cidarlı silindirler denklemi devreye girmektedir. R/t nin 10 değerinin altında olduğu yerlerde ince cidarlı silindir denklemi uygulanacaktır.

Kalın cidar denkleminde radyal ve tanjantal gerilmelerin radyal yönde arttıkları ve merkezden uzaklaştıkça azaldıkları daha önce detaylı biçimde gösterilmiştir. Maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki fark çok büyük olabilmekte ve gerilim dağılımı lineer olmaktan çıkabilmektedir.

Tek cidarlı silindirlere nazaran, katmalı cidarlı silindirlerin gerilme dağılımları uniform değildir ve hesaplanmaları çok komplikedir. Hesaplamalar için sonlu elemanlar programı kullanılarak gerilme dağılımları hesaplanabilir. Bunun için bu araştırmada ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

6.2. Analiz parametreleri ve sabitler:

Tankın performansı birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler sınıflandırıldığı zaman geometrik parametreler, malzeme özellikleri ve uygulama koşulları olarak adlandırılabilir. Her şekil için cidar kalınlıkları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda referans olarak DOE 2010 ve 2015 hedefleri referans alınmıştır. [44]. Bundan dolayı bazı değişken parametrelerin sabit olarak alınması gerekmektedir.

Geometrik parametreler tankın dış yarıçapı, tankın kalınlığı, uzunluğu ve hidrojen gazının hacmi olarak seçilmiştir. Buradan kolaylıkla anlaşılacağı üzere bu parametreler iki ucu yarı küre olan silindirik tankları belirtmektedir. Bunun yanında parametrelerin kendileri içinde varyasyonları mümkündür ve optimum uygunluk için incelenmiştir.

Tankın çapı 30cm ile 40cm arasında seçilmiştir. Cidar kalınlığı 10MPa dan 100 MPa kadar olan basınçlar malzeme özellikleri de hesaba katılarak hesaplanmıştır.

Geometrik parametrelerin malzeme özellikleriyle birleştirilmesi sonucunda hacimsel ve ağırlıksal yoğunlukları hesaplanacaktır. Bunun yanında akma gerilmesi (CFRP de çekme gerilmesi) ve elastik modül malzeme özellikleridir ve seçilen malzemedan alınmıştır.

Son olarak çalışma şartları 2010, hidrojen depolama güvenlik şartları hesaba katılarak hesaplanmış ve basınç aralığı 10MPa dan 100MPa 10 MPa artışlarla analiz edilmiştir. Hidrojen depolama tankının analizleri oda sıcaklığında yapılmıştır.

7 Hidrojen Depolama Tankı Hesaplamaları

Tasarımda kullanılacak malzemenin seçiminde DOT (USA Department of Transportation) Basic requirement for fully wrapped carbon fiber reinforced aluminum lined cylinders (DOT-CFFC) 2000 appendix A da belirtilen malzemelere uygun malzeme seçimi yapılmıştır. Bu duruma uygun malzeme IM6 karbon epoksidir.

Tablo 7.1 IM6 Karbon Fiberin Özellikleri

Karbon	rho(g/cm ³)	E11(GPa)	E22(GPa)	G12(GPa)	nu12
IM6	1,56	203	11,2	8,4	0.32
F1t (MPa)	F1c(MPa)	F2t(MPa)	F2c(MPa)	F6(MPa)	Vf (%)
3500	1540	56	150	98	0,66

Tablo 7.1 deki kısaltmalar;

rho	laminenin hacmi
Vf	fiber hacim fraksiyonu
E11	boylamsal elastik modülü
E22	Enlemsel elastik modül
G12	düzlem içi kayma modülü
nu12	en yüksek poisson modülü
F1t	boylamsal çekme mukavemeti
F1c	boylamsal basma mukavemeti
F2t	enlemsel çekme mukavemeti
F2c	enlemsel basma mukavemeti
F6	düzlem içi kayma mukavemeti

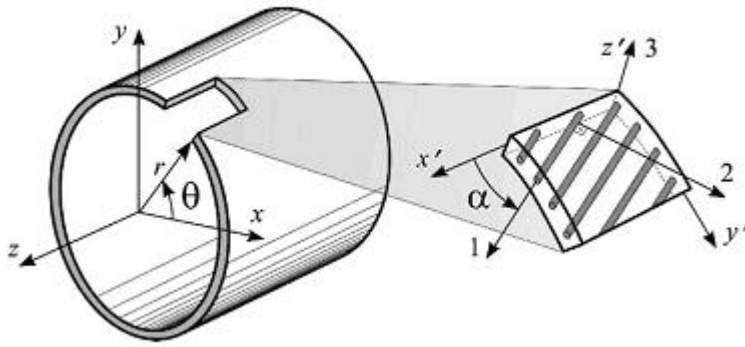
Önceki konularda çözümlemelerini gösterdiğimiz denklemleri kullanarak düzlem içi gerilme tensörlerini bulmamız gerekmektedir. Daha öncede bahsettiğimiz üzere, CFRP kompozit sürekli fiber malzemeler fiberlerin yöneldiği yönde onlardan beklediğimiz özelliklere sahiptirler. Tankın içindeki yüksek basınç ince cidarlı

tanklara boylamsal ve hoop gerilmeler uygulamaktadır. Bu malzemenin özelliklerinden de görüleceği üzere boylamsal çekme mukavemeti ve enlemsel çekme mukavemetleri oldukça farklıdır. Tankın içerisindeki yüksek basınca dirençli bir kompozit tank yapmak için filaman sarmallarımızı açılı olarak yerleştirmeliyiz.

Simetrik açılı bir paketleme seçecek olursak laminelerin yönleri iç basınçlı tanklardaki kuvvetlerin en güçlü olduğu yönler baz alınarak seçilmiştir;

$$90^\circ, 55^\circ, 0^\circ, -55^\circ, 90^\circ$$

bir lamine malzemenin toplam bileşke (resultant) kuvveti hesaplanmalıdır(şekil 7.1). Ancak bu şekilde tankın cidar kalınlığı üzerinde uygun hesaplamalarımıza başlayabiliriz.



Şekil 7.1 Malzeme global ve yerel koordinatları

Ancak daha iyi bir örneklendirme için,

Eğer tankımız sadece tek bir yönelmeye sahip tek katmanlı karbon filaman sarmal olsaydı sabitlerimiz yardımıyla yapacağımız cidar kalınlığı varsayımı şu şekilde olacaktı.

$$t = \frac{P \cdot r \cdot FS}{S_{single}} \quad t = \frac{P \cdot r \cdot FS}{2 \cdot S_{single}}$$

Bu iki denklemde malzemeye etki eden basınçların malzeme akma gerilmesi, sürekli karbon fiber matris olması ve yüksek basınç etkisindeyken akmaya uğramadan hasara uğraması nedeniyle bizim çekme gerilmemiz akma gerilmesi yerine geçecektir, kalınlık varsayımı yapılabilir.

Bu durumda 10MPa dan 100MPa a kadar tüm basınçlar için,

Silindir çapı 30 cm ila 40cm arasında olacak şekilde

Çekme mukavemeti 3500MPa olan IM6 CFRP filaman sarmal için

FS DOT un belirlediği 3.4 güvenlik faktöründe

Tablo 7.2 Verilen Basınçlardaki çeşitli yarıçaplardaki yüksek basınçlı kapların et kalınlıkları

	10(MPa)	20(MPa)	30(MPa)	40(MPa)	50(MPa)	60(MPa)	70(MPa)	80(MPa)	90(MPa)	100(MPa)
15cm	0,1457	0,2914	0,4371	0,5829	0,7286	0,8743	1,0200	1,1657	1,3114	1,4571
16cm	0,1554	0,3109	0,4663	0,6217	0,7771	0,9326	1,0880	1,2434	1,3989	1,5543
17cm	0,1651	0,3303	0,4954	0,6606	0,8257	0,9909	1,1560	1,3211	1,4863	1,6514
18cm	0,1749	0,3497	0,5246	0,6994	0,8743	1,0491	1,2240	1,3989	1,5737	1,7486
19cm	0,1846	0,3691	0,5537	0,7383	0,9229	1,1074	1,2920	1,4766	1,6611	1,8457
20cm	0,1943	0,3886	0,5829	0,7771	0,9714	1,1657	1,3600	1,5543	1,7486	1,9429
21cm	0,2040	0,4080	0,6120	0,8160	1,0200	1,2240	1,4280	1,6320	1,8360	2,0400
22cm	0,2137	0,4274	0,6411	0,8549	1,0686	1,2823	1,4960	1,7097	1,9234	2,1371
23cm	0,2234	0,4469	0,6703	0,8937	1,1171	1,3406	1,5640	1,7874	2,0109	2,2343
24cm	0,2331	0,4663	0,6994	0,9326	1,1657	1,3989	1,6320	1,8651	2,0983	2,3314

Et kalınlıkları cm cinsindendir.

Tablo 7.2 de görüleceği gibi yükselen basınçlarda cidar kalınlıkları yapının yüksek gerilmelere dayanabilmesi için kalınlaşmaktadır.

Daha önceki konularda bahsettiğimiz açılar işleme katıldığı zaman yönelmiş gerilme tensörleri bulunmalıdır. Buradan elde edilen gerilme, katılık, uyma tensörleri sayesinde bileşke kuvvetler bulunmalı ve cidar kalınlığı işlemi yapılmalıdır. Bileşke kuvvetin bulunabilmesi için ANSYS programından faydalanılmıştır.

Sırasıyla katmanlarımız yönlendirilmiş açılarının her biri için ayrı ayrı gerilme tensörleri hesaplanmıştır. Fiber hacim fraksiyonunun %60 üzerinde fiberden oluşması halinde çekme mukavemeti fiberin çekme mukavemetine eşittir, matrisin yük taşımadığı varsayılır.

$$\nu_{12} = \frac{\nu_{21} E_{11}}{E_{22}} \quad (7.1)$$

Denklemden

$\nu_{21} = 0.0177$ olarak bulunur.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{11}} - \nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_{22}}$$

$$\varepsilon_2 = -\nu_{21} \frac{\sigma_1}{E_{11}} + \frac{\sigma_2}{E_{22}}$$

$$\tau_{12} = \frac{G_{12}}{\gamma_{12}}$$

Denklemleri sırasıyla çözüldüğünde;

$$\varepsilon_1 = 0.0171 \quad \sigma_1 = 3500$$

$$\varepsilon_2 = 0.047 \quad \sigma_2 = 56$$

$$\gamma_{12} = 0.00117 \quad \tau_{12} = 98$$

Buradan,

$Q, \bar{Q}, S, \bar{S}$ tensörleri her yönelme açısı için ayrı ayrı bulunur. $\bar{Q}, \bar{S}$ tensörlerinin bulunmasında Matlab kullanılmıştır.

0° için $Q=\bar{Q}$ (GPa)

201,13	3,56	0,00
3,56	11,60	0,00
0,00	0,00	8,35

ve $S=\bar{S}$ (GPa⁻¹)

0,0050	-0,0016	0,0000
-0,0016	0,0901	0,0000
0,0000	0,0000	0,1198

90° için

$\bar{Q}$

11,16	3,56	0,00
3,56	201,13	0,00
0,00	0,00	8,35

$\bar{S}$

0,9010	-0,0016	0,0000
-0,0016	0,0050	0,0000
0,0000	0,0000	0,1198

55° için,

$\bar{Q}$

35,7390	41,4792	30,8269
41,4792	100,7126	58,4298
30,8269	58,4298	46,2692

$\bar{S}$

0,0668	-0,0063	-0,0365
-0,0063	0,0050	-0,0434
-0,0365	-0,0434	0,1008

–55° için

 $\bar{Q}$

35,7390	41,4792	-30,8269
41,4792	100,7126	-58,4298
-30,8269	-58,4298	46,2692

 $\bar{S}$

0,0668	-0,0063	0,0365
-0,0063	0,0377	0,0434
0,0365	0,0434	0,1008

Açılara göre hesaplanan tensörler yardımıyla artık malzemenin o yönlerdeki özelliklerini, daha önceki konularda verdiğimiz formüller yardımıyla yazacak olursak;

Yine Açılara Göre;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = 10^{-3} \begin{bmatrix} \bar{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

0° için

Malzeme özellikleri tablo (7.1) da verildiği şekilde olacaktır.

90° için,

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_x = 0.0053 & \sigma_x = 56 \\ \varepsilon_y = 0.0174 & \sigma_y = 3500 \\ \gamma_{xy} = 0.001 & \tau_{xy} = 8.4 \end{array}$$

55° için,

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_x = 0.079 & \sigma_x = 1185 \\ \varepsilon_y = 0.089 & \sigma_y = 2370 \\ \gamma_{xy} = 0.325 & \tau_{xy} = 3233 \end{array}$$

-55° için,

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_x = 0.079 & \sigma_x = 1185 \\ \varepsilon_y = 0.089 & \sigma_y = 2370 \\ \gamma_{xy} = 0.325 & \tau_{xy} = 3233 \end{array}$$

olacaktır bu formüllerdeki σ_x , σ_y , τ_{xy} MPa cinsindendir ve asıl eksene göre yönlendirilmiş gerilmelerdir.

Bu veriler ve malzeme özellikleri doğrultusunda lamine 5 li paket oluşturulup ANSYS programında enlemsel ve boylamsal olarak kuvvetlere tabi tutulmuş ve yüksek basınçlı tüp simüle edilerek böylece malzeme özellikleri içinde bulunan ve lamine malzemeler için bileşke kuvvetler bulunmuştur. Bu bileşke kuvvetler $0^\circ, 55^\circ, 90^\circ, -55^\circ, 0^\circ$ simetrik paket için maksimum çekme mukavemetini verir ve

en başta yaptığımız cidar kalınlığı işlemi tekrar yapılarak modifiye edilmiştir. Katman kalınlığı (t ply) 0.15mm alınmıştır.

Daha önce anlatılan [A]. tensörünün belirlenmesiyle lamine kalınlığı hesaba katılmıştır.

$$A_{rs} = \sum_{j=1}^p \bar{Q}_{rsj} [h_j - h_{j-1}]$$

5 katlı lamine malzeme için, t kalınlığında (0.15mm) ve önceden hesaplanmış olan $\bar{Q}$ tensörleri kullanılarak. Lamine malzemenin çok katmanlı yapısı belirli yönlerdeki katmanların global koordinatlardaki yönleri malzemenin homojen yapısı için belirlenmiştir.

A_{rs}

88,478	28,0915	0
28,0915	184,585	0
0,0000	0,0000	35,276

Buradan hareketle;

Gerinme değerlerinin aynı yönlerdeki maksimum gerinme değerleri olduğu değerlendirilerek, minimum değeri maksimum sınır koşulu olarak alındığında Lamine malzemelerin uzamalarının ortak olacağı daha önce de belirtilmiştir. Minimum uzama katsayı aşılacak olduğu zaman asıl eksenlerdeki gerilme değerleri daha az olarak hesaplanmış lamine katmanların kopmasına ve katastrofik patlamaya neden olmuştur.

Böylece,

$[N] = [A][\varepsilon^0]$ (Denklemdaki B paket yapısı simetrik olduğu için 0 , D de düzlem içi yükleme olduğu için gerek duyulmamaktadır. Denklem sadeleştirilmiştir)

Lamine kalınlığı $t=0.75\text{mm}$ için $90^\circ, 55^\circ, 0^\circ, -55^\circ, 90^\circ$ lamine malzeme, üst sınır koşulu olan $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.0177$ uzamada

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.03 \\ 1.37 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ GPa değerleri elde edilmiştir.}$$

Buradan hareketle ince cidarlı depolama tankımızdaki paket tasarımı iç basıncın, gerilme değerleri olarak belirtilen

$$\sigma_{\text{hoop}} = 2\sigma_{\text{long}}$$

Olmasından dolayı y yönündeki gerilme tensörümüz daha büyük olmuştur. İç basıncın komponentlerinin τ_{xy} yönünde bir gerilmeye maruz kalmamaktadır.

Tekrar eden paketler kullanılarak 10MPa dan 100 MPa a kadar olan basınçlar için gerekli özelliklere sahip bir Tank tasarımı yapılması mümkün olacaktır.

7.1. Yüksek Basıncılı Hidrojen Depolama Tankı Tasarım Sınırlamaları

Depolama tankının DOE 2010 hedefleri doğrultusunda 10 MPa dan 100MPa kadar olan basınçlarda, kalınlıkları hesaplanan CFRP kompozit yüksek basınçlı tank için hacimsel, ağırlık hesaplamaları[44].

Tablo 7.3 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m³) depoladığı hidrojen miktarı (kg)

	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa	100MPa
15 cm	0,8340	1,5466	2,1363	2,6545	3,0774	3,4546	3,7533	4,0021	4,2341	4,4064
16 cm	0,8340	1,5452	2,1363	2,6519	3,0713	3,4475	3,7455	3,9935	4,2248	4,3916
17 cm	0,8340	1,5437	2,1343	2,6493	3,0682	3,4440	3,7376	3,9850	4,2109	4,3817
18 cm	0,8332	1,5437	2,1302	2,6467	3,0620	3,4369	3,7298	3,9721	4,2017	4,3620
19 cm	0,8332	1,5423	2,1281	2,6415	3,0559	3,4298	3,7180	3,9593	4,1831	4,3472
20 cm	0,8324	1,5408	2,1261	2,6363	3,1206	3,5005	3,7965	3,9464	4,1692	4,3275
21 cm	0,8324	1,5394	2,1220	2,6310	3,0436	3,4086	3,6944	3,9293	4,1507	4,3078
22 cm	0,8317	1,5379	2,1199	2,6258	3,0343	3,3980	3,6827	3,9165	4,1322	4,2832
23 cm	0,8317	1,5365	2,1158	2,6206	3,0251	3,3874	3,6669	3,8951	4,1090	4,2585
24 cm	0,8309	1,5336	2,1117	2,6154	3,0158	3,3732	3,6512	3,8779	4,0858	4,2339

Tablo 7.4 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m³) iç hacmi (m³)

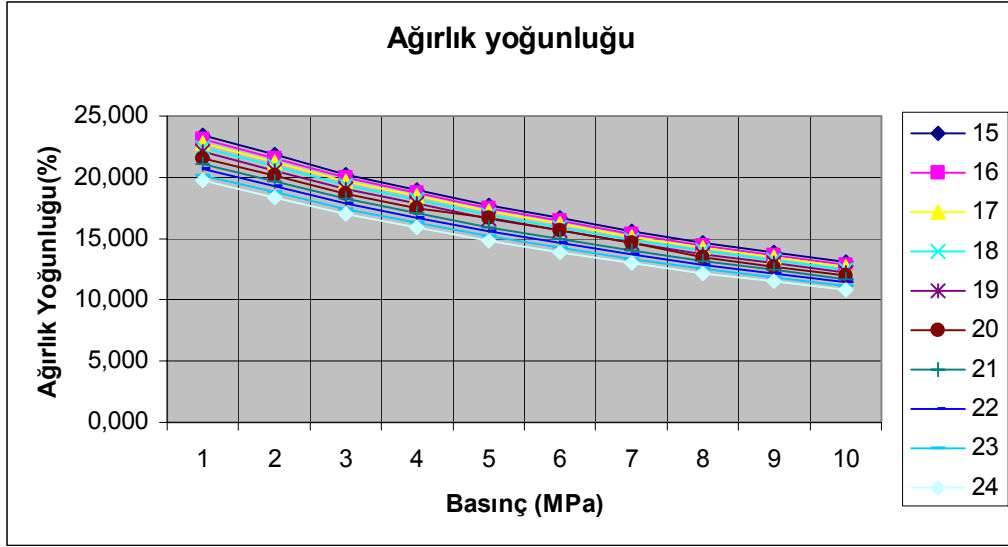
	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa	100 MPa
15 cm	0,1087	0,1065	0,1042	0,102	0,0999	0,0977	0,0956	0,0935	0,0914	0,0894
16 cm	0,1087	0,1064	0,1042	0,1019	0,0997	0,0975	0,0954	0,0933	0,0912	0,0891
17 cm	0,1087	0,1063	0,1041	0,1018	0,0996	0,0974	0,0952	0,0931	0,0909	0,0889
18 cm	0,1086	0,1063	0,1039	0,1017	0,0994	0,0972	0,095	0,0928	0,0907	0,0885
19 cm	0,1086	0,1062	0,1038	0,1015	0,0992	0,097	0,0947	0,0925	0,0903	0,0882
20 cm	0,1085	0,1061	0,1037	0,1013	0,1013	0,099	0,0967	0,0922	0,09	0,0878
21 cm	0,1085	0,106	0,1035	0,1011	0,0988	0,0964	0,0941	0,0918	0,0896	0,0874
22 cm	0,1084	0,1059	0,1034	0,1009	0,0985	0,0961	0,0938	0,0915	0,0892	0,0869
23 cm	0,1084	0,1058	0,1032	0,1007	0,0982	0,0958	0,0934	0,091	0,0887	0,0864
24 cm	0,1083	0,1056	0,103	0,1005	0,0979	0,0954	0,093	0,0906	0,0882	0,0859

Tablo 7.5 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m³) ağırlığı (kg)

	10MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa	100 MPa
15 cm	3,5606	7,0776	10,5538	13,9894	17,3844	20,7391	24,0535	27,3277	30,5619	33,7562
16 cm	3,6075	7,1675	10,6851	14,1603	17,5933	20,9843	24,3334	27,6407	30,9065	34,1308
17 cm	3,6574	7,2663	10,8308	14,3510	17,8271	21,2593	24,6478	27,9927	31,2942	34,5526
18 cm	3,7200	7,3837	11,0008	14,5715	18,0960	21,5744	25,0071	28,3941	31,7358	35,0323
19 cm	3,7746	7,5000	11,1762	14,8036	18,3824	21,9128	25,3951	28,8295	32,2163	35,5558
20 cm	3,8632	7,6564	11,3978	15,0876	18,7262	22,3139	25,8508	29,3374	32,7738	36,1605
21 cm	3,9441	7,8127	11,6264	15,3856	19,0906	22,7418	26,3395	29,8839	33,3756	36,8147
22 cm	4,0209	7,9726	11,8661	15,7018	19,4801	23,2014	26,8661	30,4745	34,0271	37,5241
23 cm	4,1256	8,1679	12,1484	16,0675	19,9257	23,7234	27,4611	31,1391	34,7580	38,3182
24 cm	4,2138	8,3554	12,4313	16,4419	20,3878	24,2693	28,0871	31,8416	35,5333	39,1627

Tablo 7.6 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m³) ağırlık yoğunluğu (%Ağırlık)

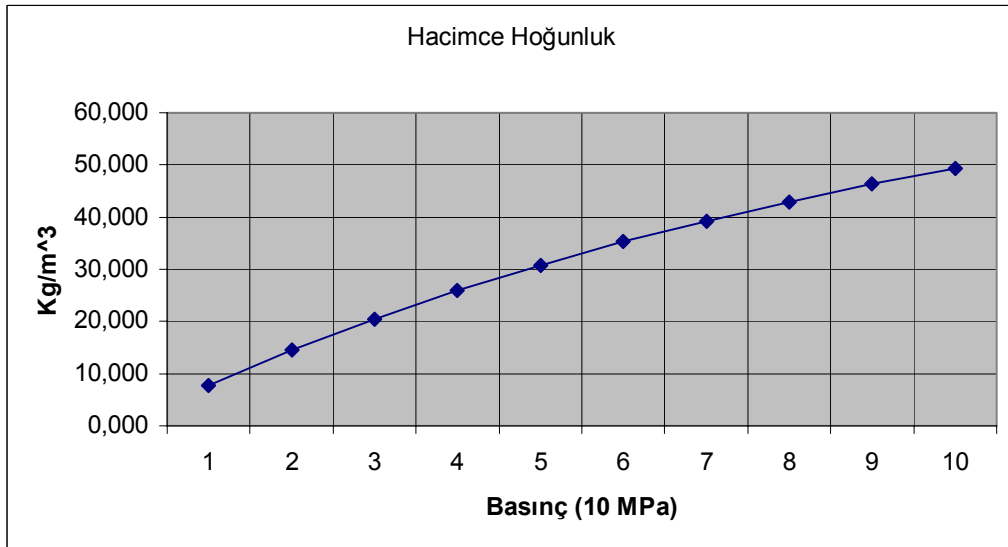
	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa	100 MPa
15 cm	23,423	21,852	20,242	18,975	17,702	16,657	15,604	14,645	13,854	13,054
16 cm	23,119	21,558	19,993	18,728	17,457	16,429	15,392	14,448	13,670	12,867
17 cm	22,803	21,245	19,706	18,461	17,211	16,200	15,164	14,236	13,456	12,681
18 cm	22,398	20,907	19,364	18,164	16,921	15,930	14,915	13,989	13,240	12,451
19 cm	22,074	20,564	19,041	17,844	16,624	15,652	14,641	13,734	12,984	12,226
20 cm	21,547	20,124	18,654	17,473	16,664	15,688	14,686	13,452	12,721	11,967
21 cm	21,105	19,704	18,252	17,100	15,943	14,988	14,026	13,149	12,436	11,701
22 cm	20,684	19,290	17,865	16,723	15,576	14,646	13,708	12,852	12,144	11,415
23 cm	20,159	18,811	17,416	16,310	15,182	14,279	13,353	12,509	11,822	11,114
24 cm	19,719	18,355	16,987	15,907	14,792	13,899	13,000	12,179	11,499	10,811



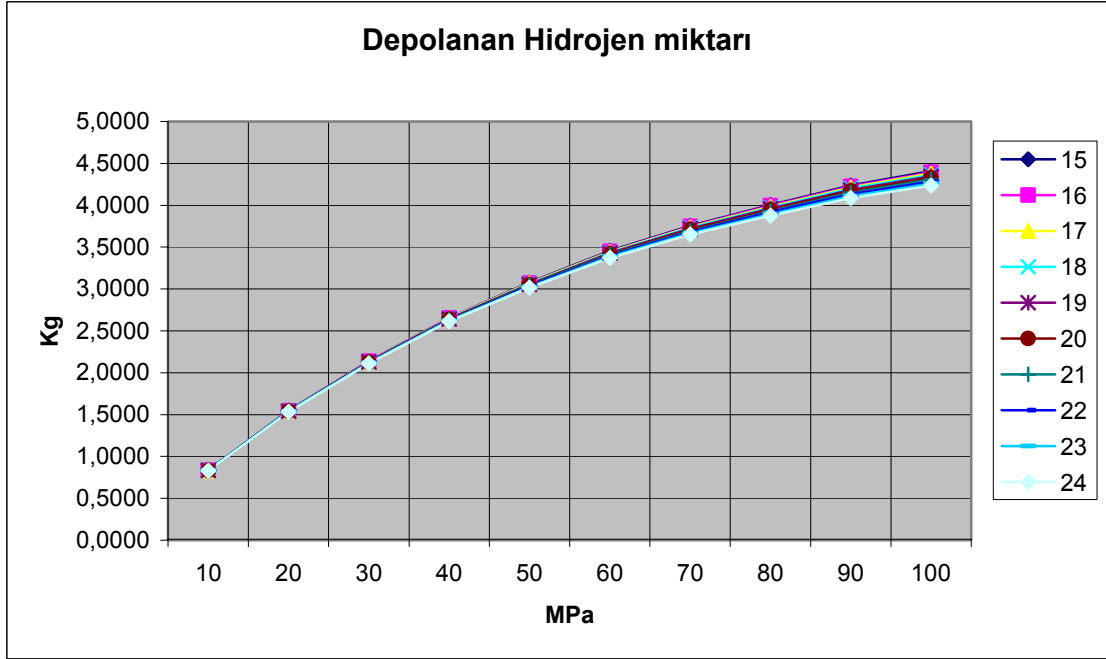
Şekil 7.2 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m^3) ağırlık yoğunluğu, çeşitli yarıçaplarda (%Ağırlık)

Tablo 7.7 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m^3) hacimce yoğunluk, çeşitli yarıçaplarda (Kg/m^3)

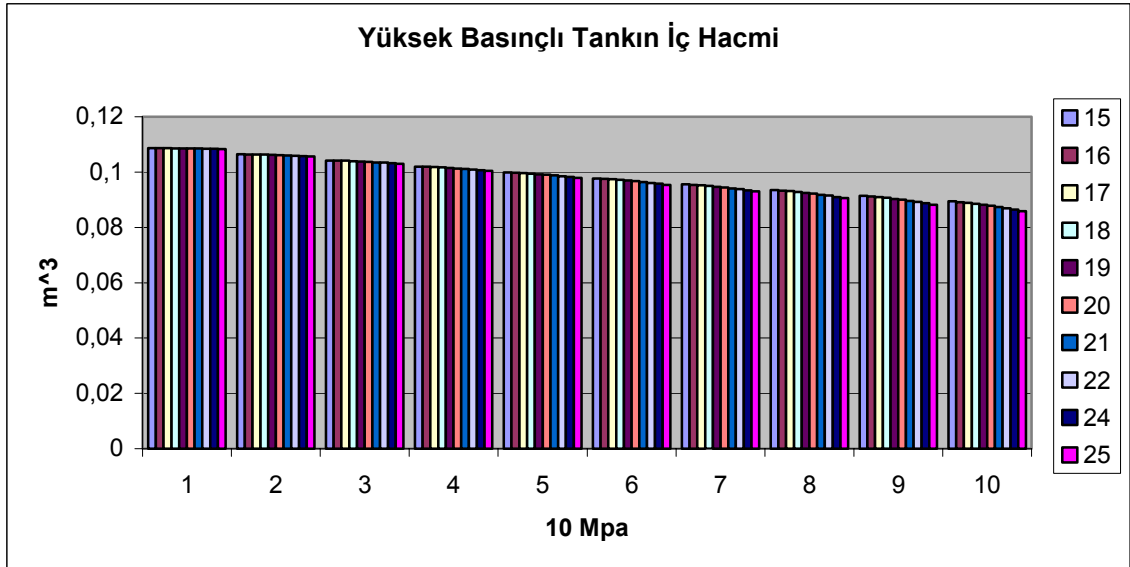
10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa	100 MPa
7,672	14,522	20,502	26,024	30,805	35,359	39,261	42,803	46,325	49,288



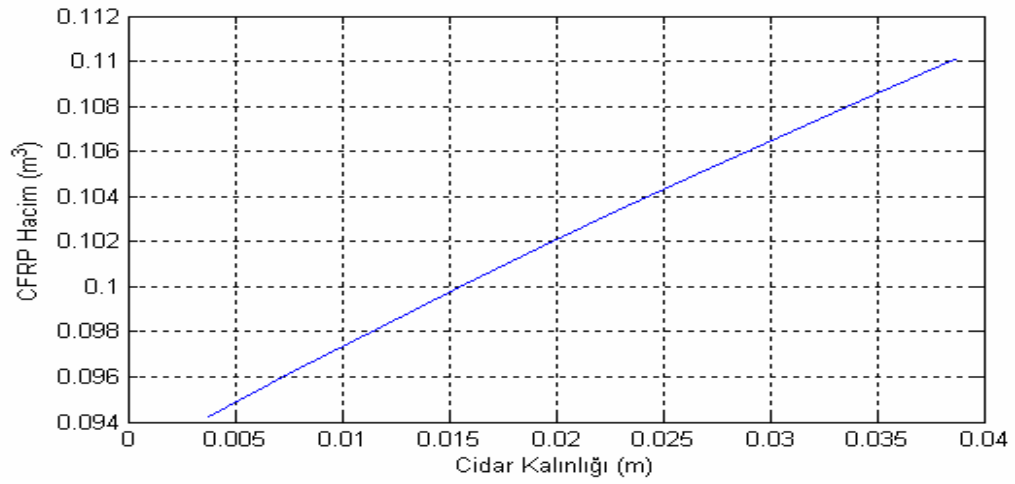
Şekil 7.3 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111m^3) hacimce yoğunluk, çeşitli yarıçaplarda (Kg/m^3)



Şekil 7.4 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m^3) Çeşitli basınçlarda depoladığı hidrojen miktarı, çeşitli yarıçaplarda (kg-basınç)



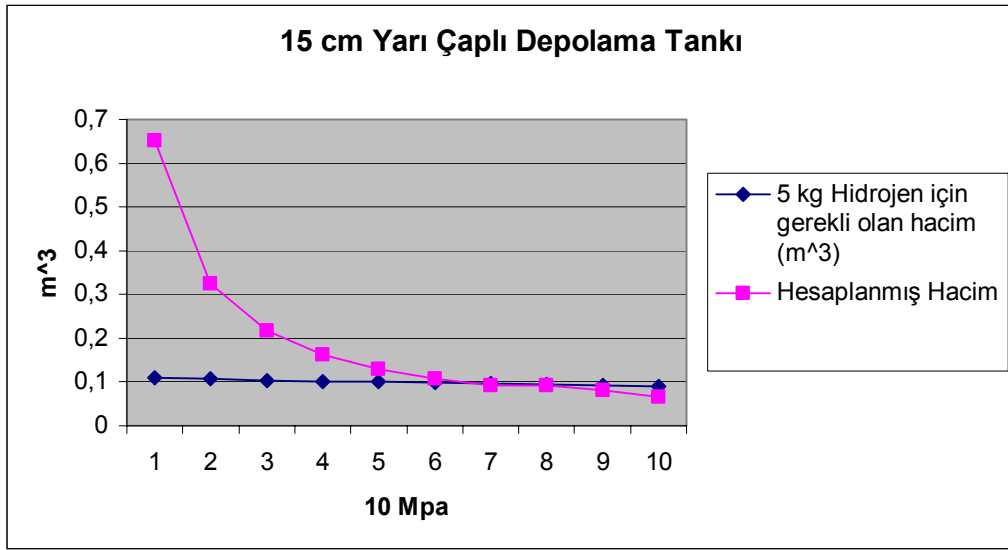
Şekil 7.5 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m^3) Çeşitli basınçlardaki çeşitli yarıçaplarda, iç hacimleri ($\text{m}^3/10\text{MPa}$)



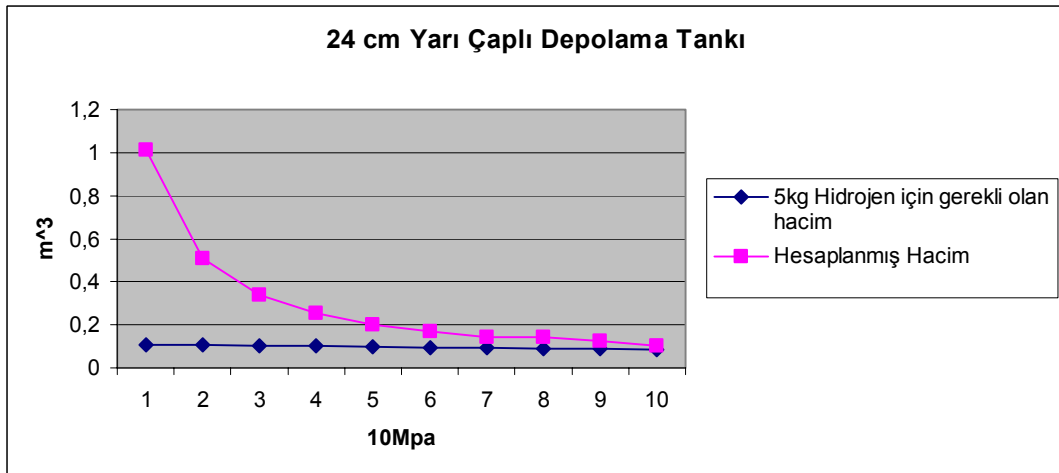
Şekil 7.6 DOE hedeflerine uygun seçilen tankın (0.111 m^3) Çeşitli hacimlerdeki cedar kalınlıkları

Tablo 7.8 Hidrojen ağırlığının 5 Kg sabit alınması halinde hidrojenin sahip olacağı hacim aynı zamanda tüpün iç hacmi aşağıda gösterilmiştir.

	10 MPa	20 MPa	30 MPa	40 MPa	50 MPa	60 MPa	70 MPa	80 MPa	90 MPa	100 MPa
15 cm	0,6517	0,3259	0,2172	0,1629	0,1303	0,1086	0,0931	0,0931	0,0815	0,0652
16 cm	0,6886	0,3443	0,2295	0,1721	0,1377	0,1148	0,0984	0,09837	0,0861	0,0689
17 cm	0,7316	0,3658	0,2439	0,1829	0,1463	0,1219	0,1045	0,10452	0,0915	0,0732
18 cm	0,7685	0,3843	0,2562	0,1921	0,1537	0,1281	0,1098	0,10979	0,0961	0,0769
19 cm	0,8116	0,4058	0,2705	0,2029	0,1623	0,1353	0,1159	0,11594	0,1014	0,0812
20 cm	0,8484	0,4242	0,2828	0,2121	0,1697	0,1414	0,1212	0,12121	0,1061	0,0848
21 cm	0,8915	0,4457	0,2972	0,2229	0,1783	0,1486	0,1274	0,12735	0,1114	0,0891
22 cm	0,9345	0,4673	0,3115	0,2336	0,1869	0,1558	0,1335	0,1335	0,1168	0,0935
23 cm	0,9714	0,4857	0,3238	0,2429	0,1943	0,1619	0,1388	0,13877	0,1214	0,0971
24 cm	1,0144	0,5072	0,3381	0,2536	0,2029	0,1691	0,1449	0,14492	0,1268	0,1014

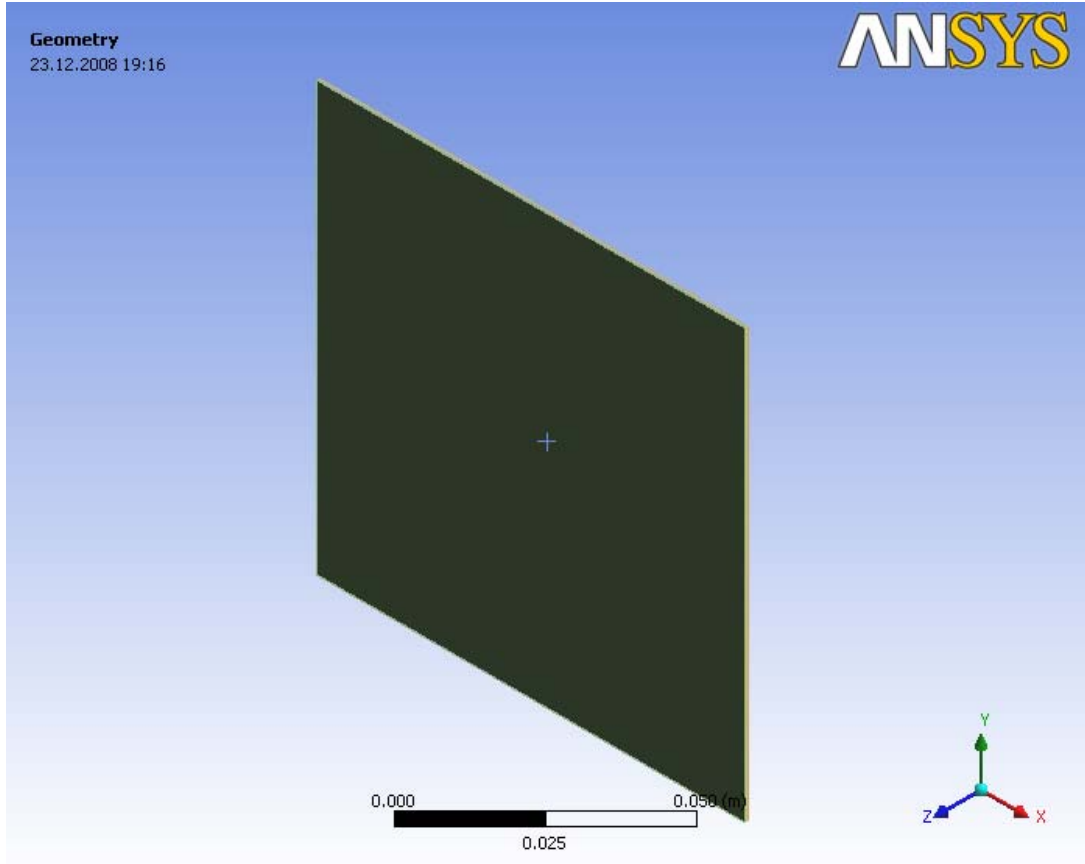


Şekil 7.7 Eğer hidrojen ağırlığı 5 Kg sabit alınacak olursa hidrojenin sahip olması gereken hacim aynı zamanda tüpün iç hacmi yarıçap 15cm için.



Şekil 7.8 Eğer hidrojen ağırlığı 5 Kg sabit alınacak olursa hidrojenin sahip olması gereken hacim aynı zamanda tüpün iç hacmi yarıçap 15cm için

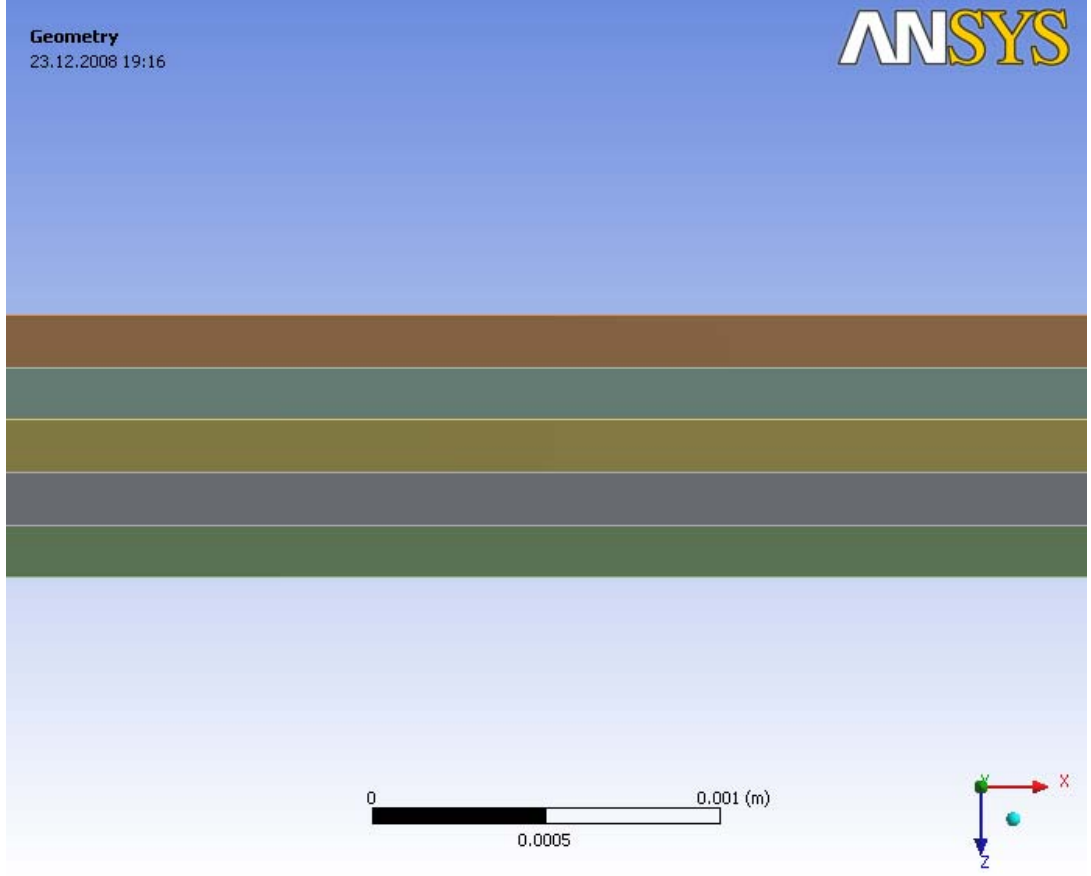
8 ANSYS ÇALIŞMASI



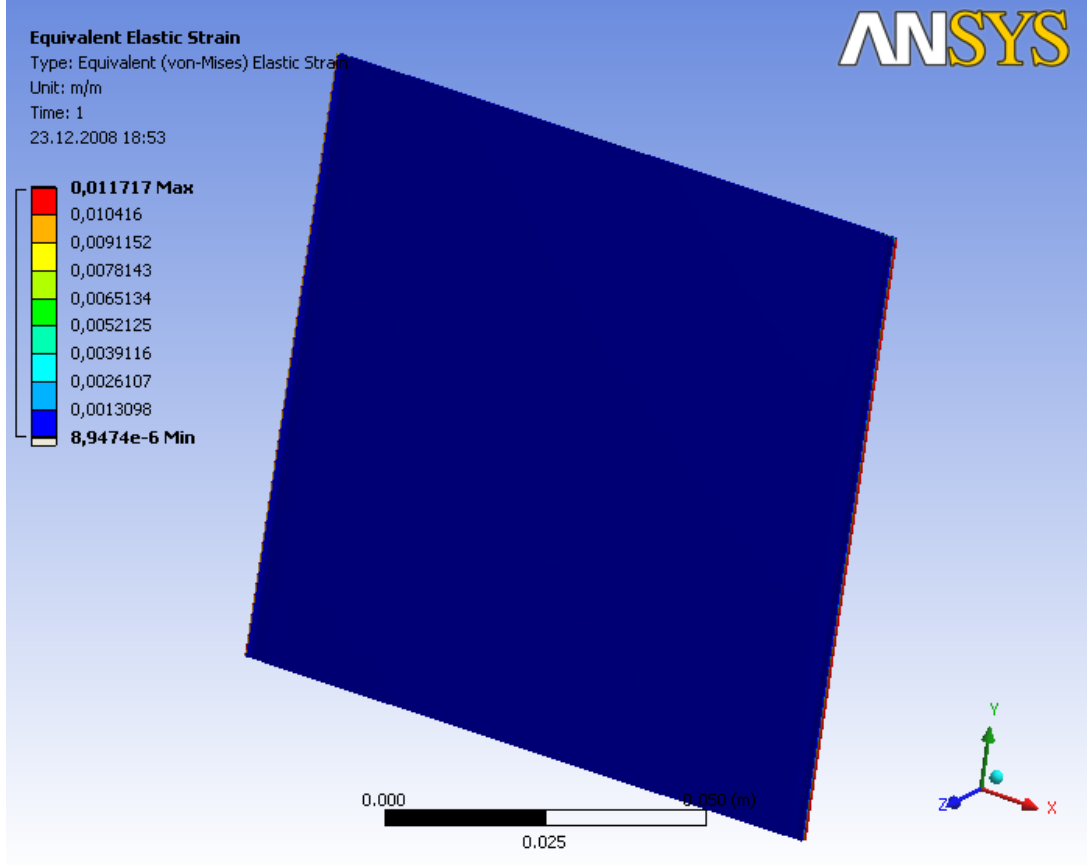
Şekil 8.1 Beş katmanlı lamine kompozit malzeme

Ansys 11 yazılım programı kullanılarak, malzeme simüle edilmiştir. Solid layered elementi seçilerek malzeme modeli olarak lineer elastik ortotrofik seçilmiştir. Malzeme indislerine seçilmiş malzeme özellikleri girilerek simüle edilmiştir.

Simülasyon için her katmana ayrı ayrı malzeme tanımlaması yapılarak hesaplanmış malzeme özellikleriyle hesaplamalarda temel aldığımız maksimum gerilime tabi tutulmuş ve sonucu yapılan hesaplamalara uygunluk bakımından değerlendirilmiş. Lamine kalınlıkları, kullanılan karbon fiber matrisin kalınlığına eş şekilde 0.2mm seçilmiştir.

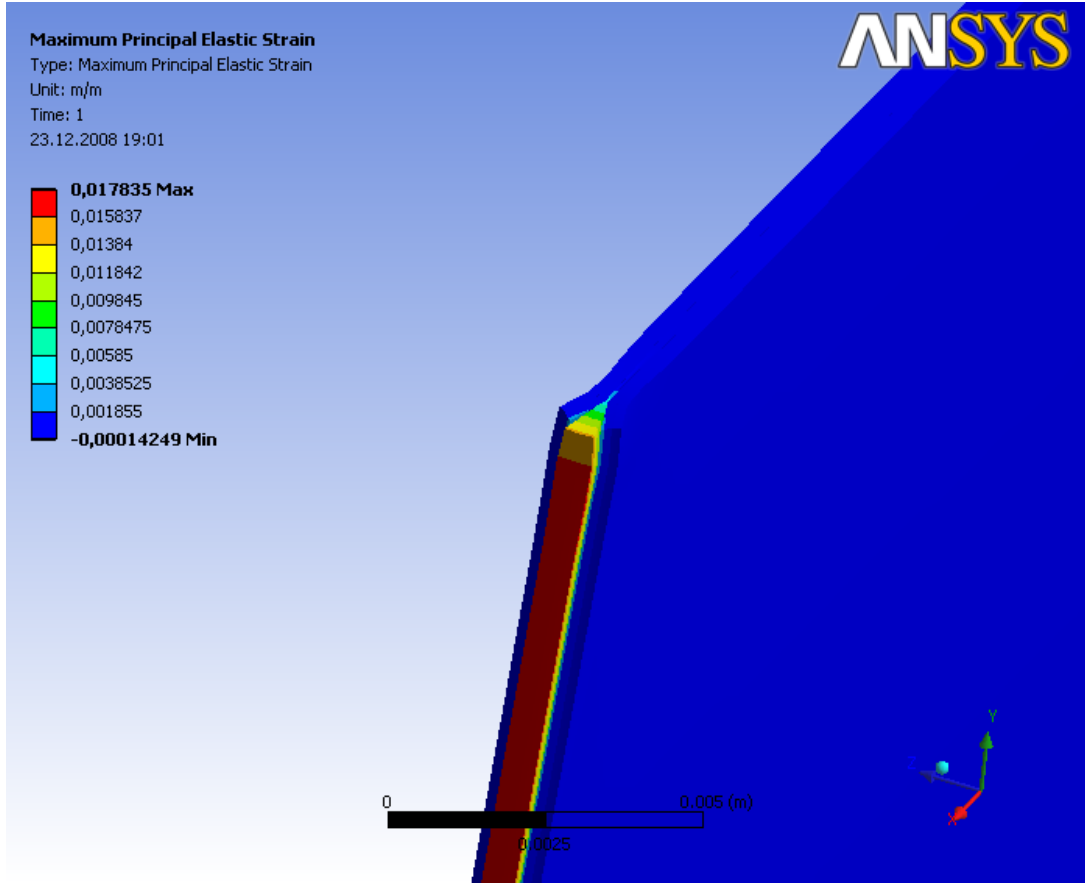


Şekil 8.2 5 adet katmandan oluşan ve sırasıyla 90 55 0 -55 90 oryantasyonuna sahip lamine malzeme.



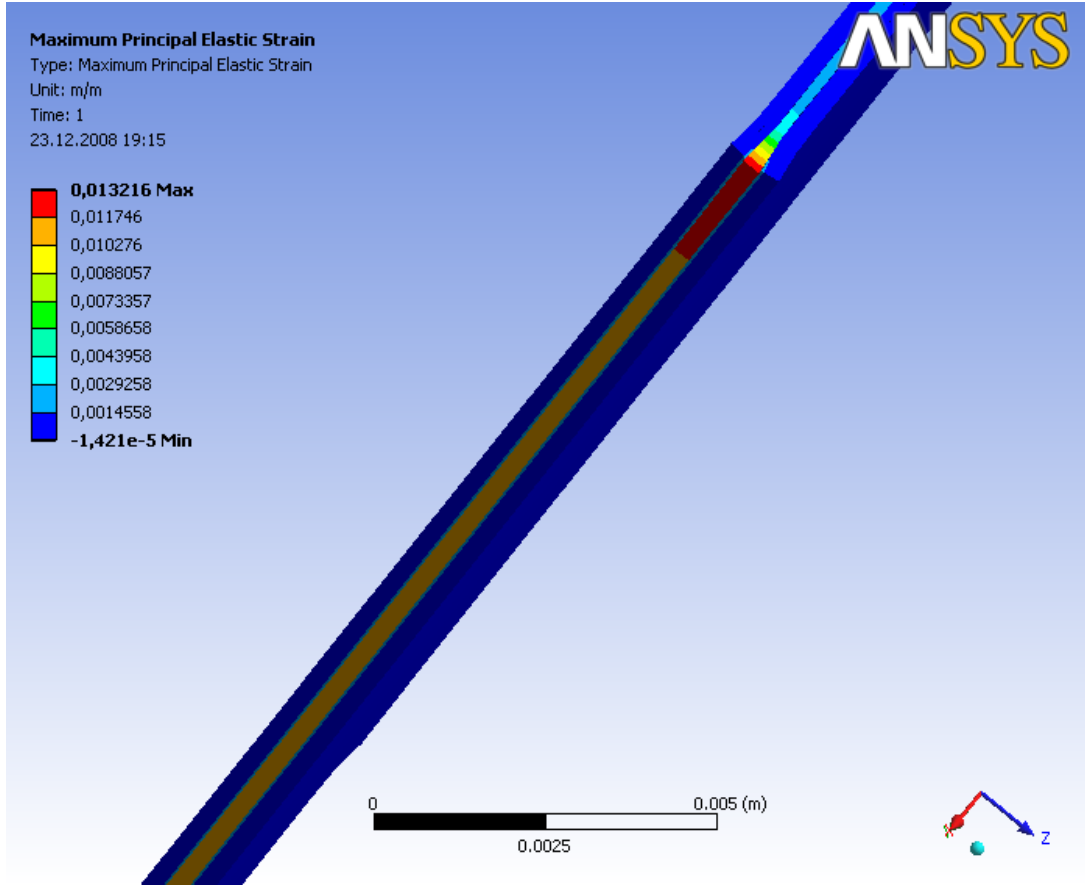
Şekil 8.3 Bileşke elastik gerinme

Uygulanan maksimum çekme kuvveti sonrası maksimum elastik gerinme miktarı bileşke gerilme miktarının 0.0117 olduğu görülmüştür. Bileşke gerilme miktarlarında kalınlığın etkisi hesaplamaların en komplike kısmıdır. Ve maksimum elastik gerinmeden daha düşük bir değere sahip olması kalınlığın artmasıyla lamine malzemelerin asıl yönlerdeki x, y yönlerdeki gerilme mukavemetlerinin arttığını göstermektedir.



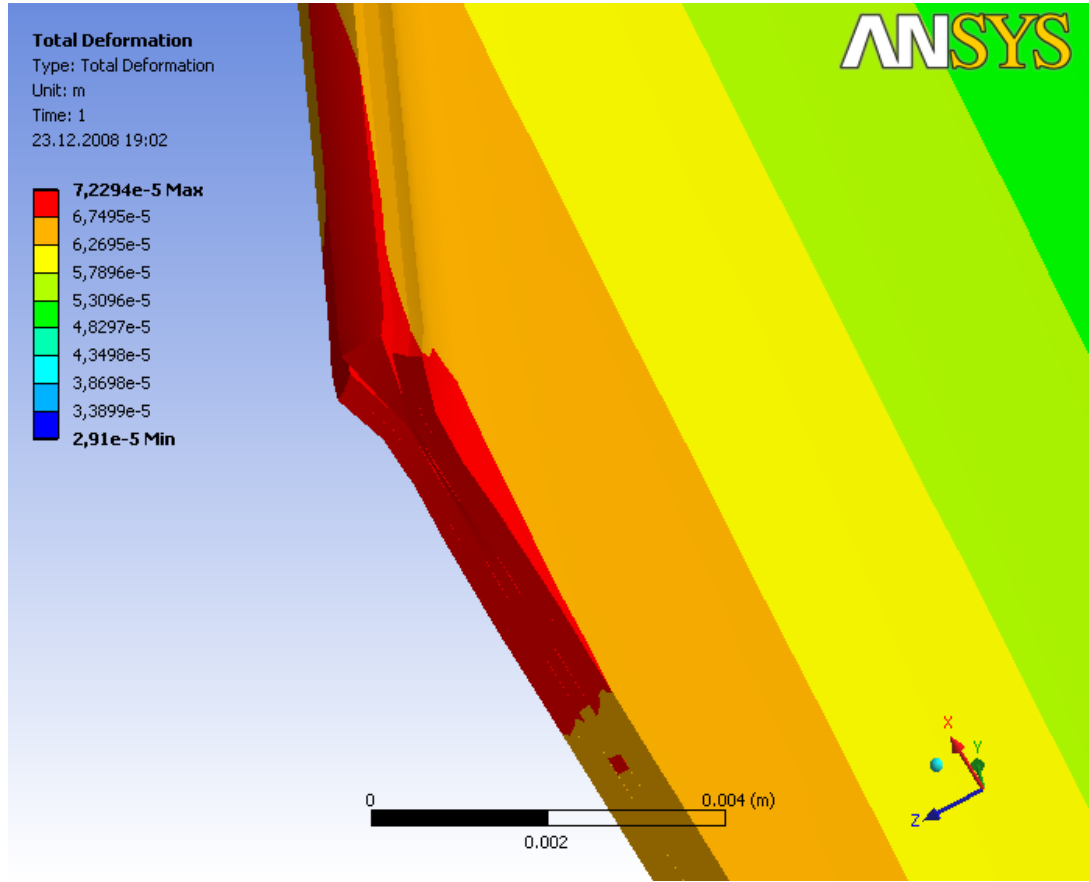
Şekil 8.4 Maksimumum asıl elastik gerinme

Uygulanan maksimum gerilme sonrasında malzemenin uygulanan gerilmelere dik olarak yönlendirilmiş olan katmanların plastik deformasyona uğradıkları görülmektedir ve maksimum elastik gerilmenin 0.0178 olduğu gösterilmektedir.



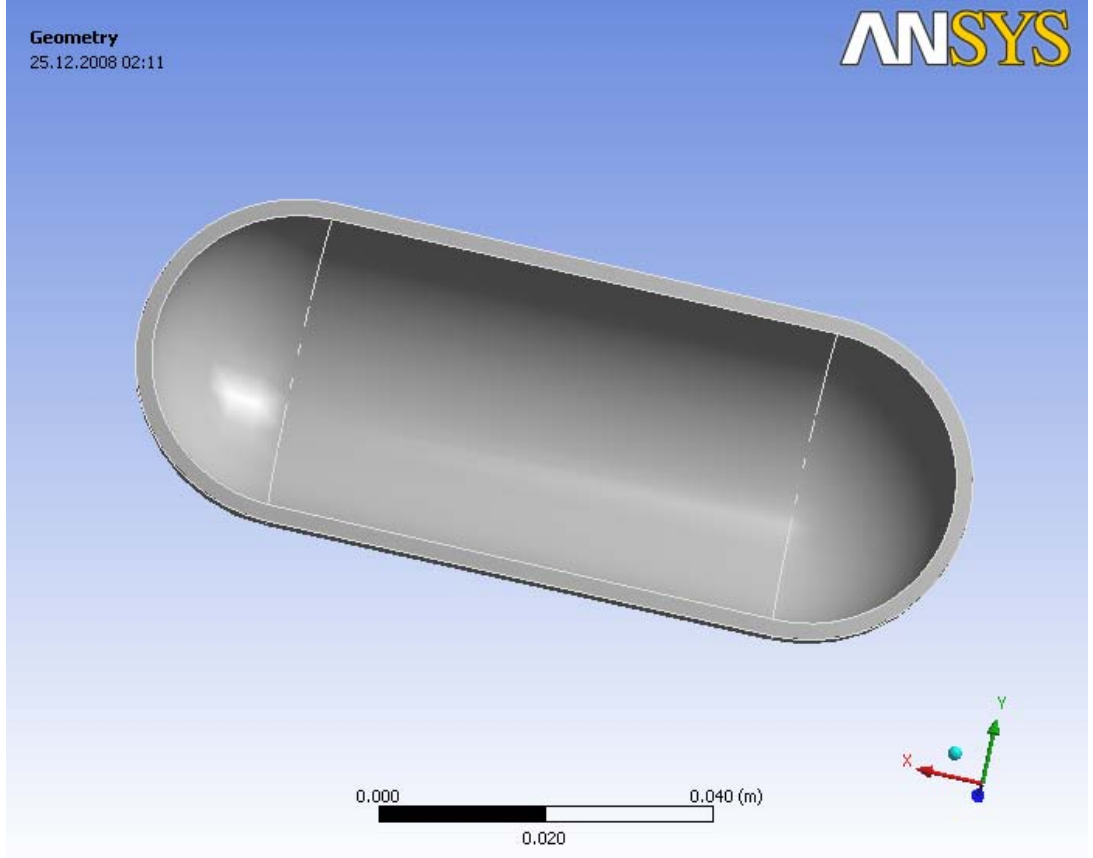
Şekil 8.5 Asıl yöndeki maksimum gerinme

Şekil 8.5 gösteriminde lamine malzemeye uygulanan kuvvetin lamine malzemeyi oluşturan katmanlardan oryantasyon yönüne uygun olarak ilk önce 55, -55 yönlerinde hasara uğradıkları gösterilmiştir.



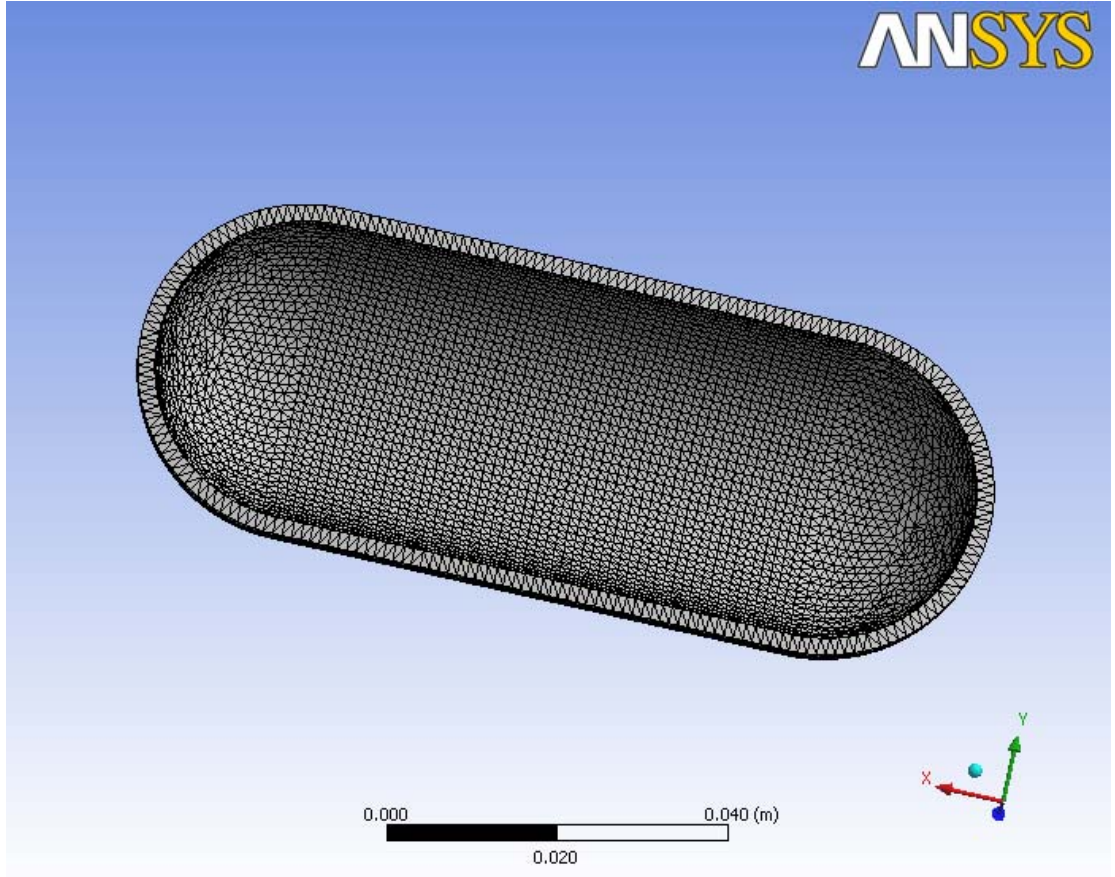
Şekil 8.6 5 Katmanlı toplam deformasyon miktarı.

Toplam deformasyona yakından bakıldığı zaman şekil 8.6 , şekil 8.5 ile aynı şekilde hasar yönü ve hasarın toplam miktarını göstermektedir. Bu gösterimde hasarın renklendirmesine bakılarak kontak yüzey etkileşimleri tanımlanmış olan lamine malzemede, uygulanan kuvvetler yönünde dizilmiş olan katmanların uygulanan kuvvet yönünde dizilmemiş olan katman oryantasyonlarının deformasyonlarının ne şekilde gerçekleştiği görülmektedir, kontak yüzeylerdeki kayma gerilmeler de gösterilmiştir.



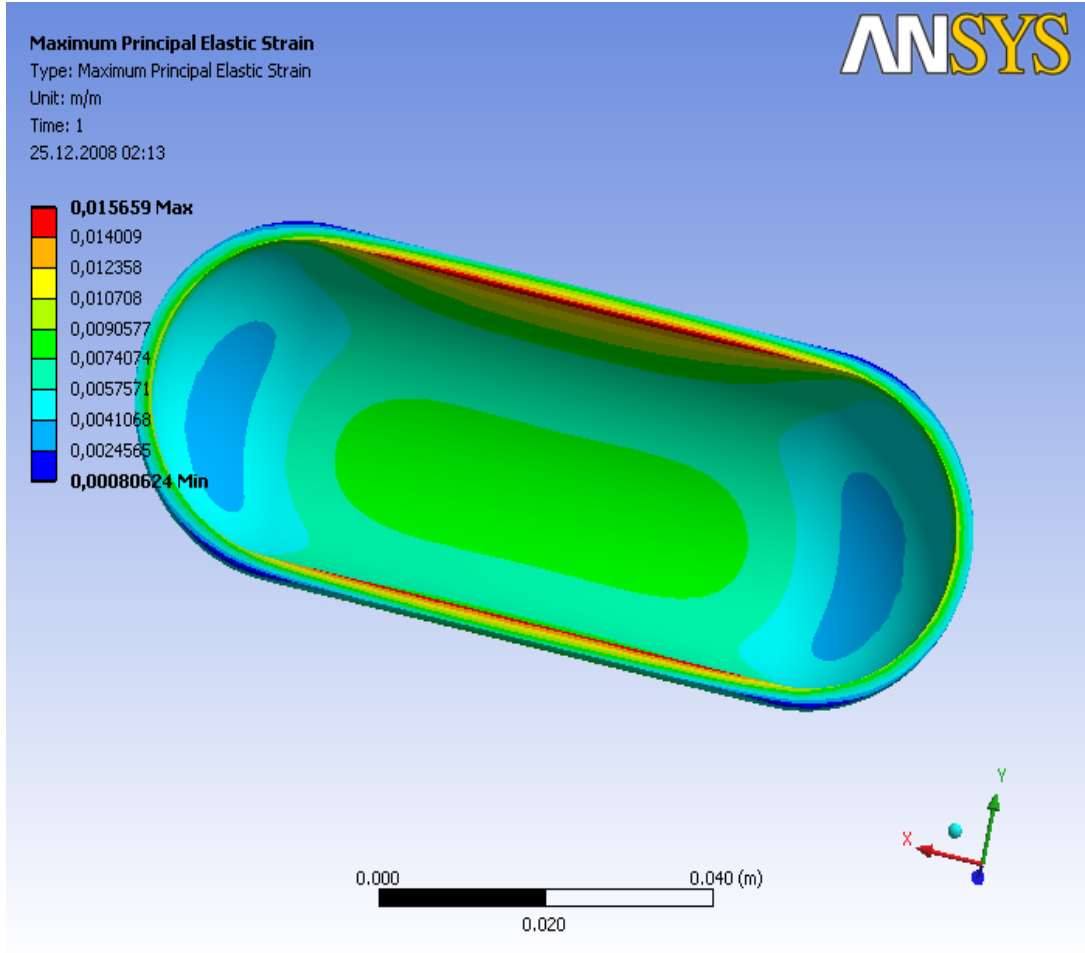
Şekil 8.7 20 cm yarıçaplı, ve 67 cm uzunluğa sahip ve hesaplamalara uygun bir şekilde cidar kalınlığı 100 MPa için 2 cm olan depolama tankının simülasyonu için yapılan model

İç basınç simülasyonu yapılacak olan şekil dikkatli bir biçimde tasarlanmış et kalınlıkları ve boyutları parametrik çalışmaya uygun olarak seçilmiştir.



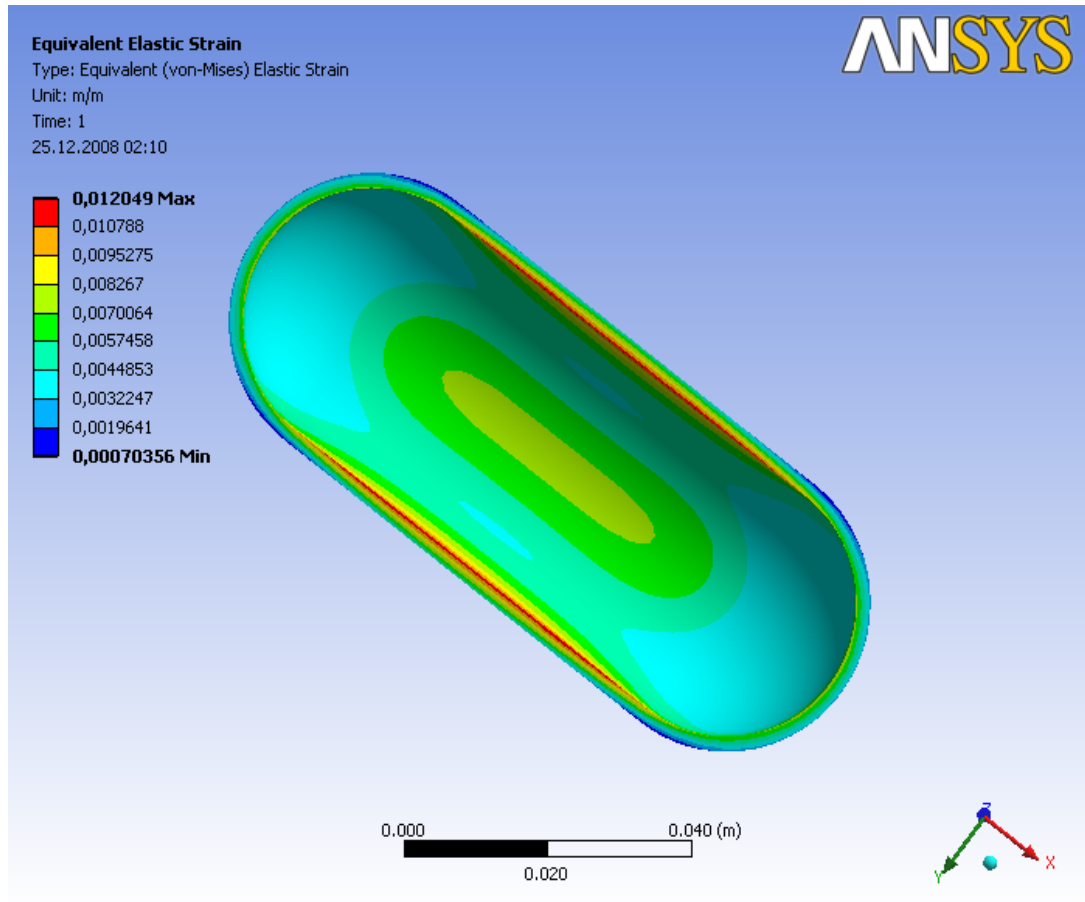
Şekil 8.8 Model simülasyondan doğru daha doğru bir sonuç alınabilmesi için en yüksek hassasiyette meshlenmiştir.

Sonlu elemanlar analizinin gerçek hayattaki uygulamalarına uygun sonuçlar verebilmesi için düğüm noktaları tasarıma ve kullanımına uygun bir şekilde seçilmelidir. Şekil 8.8 deki gösteriminde modelimiz parçalara ayrılmış hali gösterilmektedir.



Şekil 8.9 Maksimum asıl elastik gerinme

Uygulanan basınç sonucunda maksimum uzamanın, hesaplandığı şekilde hoop yönünde olduğu görülmüştür. Ve maksimum uzama miktarı 0.0156 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8.10 Bileşke Von-Misses Elastik gerilmesi

9 SONUÇLAR:

Bu yapılan çalışma sonucunda, karbon fiber filaman sarmal yüksek basınçta hidrojen depolama tankı 2 ana şekilde incelenmiştir.

Bunlardan ilki teorik olarak ince ve kalın cidarlı depolama tanklarının incelenmesi ve bu modele uygun hasar modelinin çıkarılmasıdır. Matematiksel olarak çözümlenen gerilme ve gerinmeler, uzama katsayılarının çözümlenmeleri ele alınmış ve hesaplamalarında kullanılacak tensörler belirlenmiştir.

İkinci kısımda yüksek basınçlı alüminyum iç çeperli karbon fiber kompozit sarmal hidrojen depolama tankı için teorik olarak belirlenmiş olan formüller yardımıyla karbon fiber lamine dış kabuğun hasar analizlerinde bulunabilmek için karbon fiber matrisli bir malzeme seçilerek uzama katsayıları hesaplanmıştır.

Seçilen malzemenin çekme mukavemeti yardımıyla minimum cidar kalınlıkları hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar hesaplamaları yapan ANSYS programına bu veriler girilerek hasar analizleri yapılmış ve sonuçlar elle yapılan hesaplamalara uygun olarak bulunmuştur.

Tasarıma uygun olan bu malzemede, hesaplanan dış kabuk kalınlıklarında (cidar) seçilen malzemeden yapılan yüksek basınçlı tankın, DOE 2010 hedefleri uyarınca hacimce yoğunluk ve ağırlıkça yoğunluk, 10 MPa dan 100 MPa a kadar olan basınçlardaki analizleri yapılarak sonuçlar grafiklere aktarılmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde artan basınçlarda silindirin cidar kalınlıklarının artması sabit olarak seçilen sistem hacmi için iç hacmi küçültmesine rağmen depolanan hidrojen miktarı artmıştır.

Seçilen katmanların kalınlığının iç basınca karşı koyabilmeleri için taşıdıkları önem yapılan işlemler sonucunda gösterilmiş. Seçilen oryantasyonlu katmanın yüksek basınçlara dayanabilmesi için birden fazla kez aynı lamine kalınlığının uygulanması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Yapılan analizlerin sonucunda yüksek basınçlı tankların ekonomik olarak verimli hale gelebilmeleri için DOE tarafından belirlenmiş olan hidrojenin kütlece 5kg ve 0.111 m³ hedeflerinin seçilen malzemeye uygun olmadığı görülmüştür. Şekiller 7.2 den 7.8'e kadar olan kısım tablolarda hesaplamaları yapılmış olan depolama tankının belirtildiği üzere yükselen basınçlardaki cidar kalınlıklarındaki değişimler, bunun depolanan hidrojen hacmindeki değişiklikler ve toplam sistem ağırlıklarının grafik olarak gösterimidir.

Ancak 80MPa dan 100MPa kadar olan basınçlı kaplarda DOE 2005 hedeflerine göre belirlenmiş sistem hacmi ve maksimum ağırlık değerlerine uygun olarak bulunmuştur ve 4 kg civarı hidrojen depolamak mümkündür.

ANSYS programı ile yapılan denemelerde 90 55 0 -55 90 olarak seçilen malzeme oryantasyonlarının iç basınca dayanımlarının, iç basıncın dış kabuk üzerinde oluşturduğu gerilmelere dayanımları için çok uygun bir paket sistem olduğu görülmüştür.

Bu yapılan çalışma sayesinde hidrojen depolama tanklarında dış kabuk malzemenin iç basınca vereceği tepkiler incelenmiş ve seçilen malzemenin depolama miktarı, hacimce ve ağırlıkça yoğunluk olarak etkisi açıklanmıştır. Ve yüksek basınçlı tankların hidrojen teknolojisinde yerlerini alabilmeleri için gelecekte 90 MPa ve üzeri basınçların şart olduğu ve yeni daha mukavim ve daha hafif malzemelere ihtiyaç olduğu görülmüştür.

REFERANSLAR :

- [1]. Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use(CB). *Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*. Washington, DC, USA: National Academies Press, 2004. p 41.
- [2]. United States Department of Energy, *Hydrogen Posture Plan*, An Integrated Research, Development, and Demonstration Plan, 2004
- [3]. L. Schlapbach, A. Züttel, *Hydrogen-storage Materials for Mobile Applications*, Nature, Vol. 414, 2001
- [4]. A. Züttel, *Materials for Hydrogen Storage*, Materialstoday, September 2003
- [5]. Trygve Riis Øystein Ulleberg and Gary Sandrock and Preben J.S. Hydrogen Storage – Gaps and Priorities Vie 2005
- [6]. <http://www.ifw-dresden.de/mw/32/hydrogen.htm> (entered on 06.08.2008)
- [7]. <http://nanotechnologies.qc.ca/projects/hydrogene> (entered on 06.08.2008)
- [8]. Fred Mitlitsky, Andrew H. Weisberg, and Blake Myers Lawrence Livermore National Laboratory “*Vehicular hydrogen storage using light weight tanks*”, 2000
- [9]. Y. Kojima, Y. Kawai, *Hydrogen Storage of Metal Nitride by a Mechanochemical Reaction*, The Royal Society of Chemistry, August 2004
- [10]. A. Y. Esayed, *Metal Hydrides*, Energy Sources, Vol. 23, 2001
- [11]. M. Morinaga, H. Yukawa, K. Nakatsuka, M. Takagi, *Roles of Constituent Elements and Design of Hydrogen Storage Alloys*, Journal of Alloys and Compounds, 2002
- [12]. R. T. Walters, J. H.Scogin, *A Reversible Hydrogen Storage Mechanism for Sodium Alanate: The Role of Alanes and the Catalytic Effect of the Dopant*, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 379, 2004
- [13]. F. L. Mathews, R. D. Rawlings, *Composite Materials: Engineering and Science*, Woodhead Publishing Ltd and CRC Pres LLC, 2002
- [14]. A. J. Colozza, *Hydrogen Storage for Aircraft Applications Overview*, NASA/CR-211867, September 2002
- [15]. <http://www.corrosion-doctors.org> (entered on 06.08.2008)

- [16]. NASA/MSFC, *Hydrogen Resistant Alloy*, NASA Patent Application Serial: 08/248611, 1994
- [17]. N. Sirosh, R. Corbin, A. Niedzwiecki, *Hydrogen Composite Tank Project*, Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies, FY 2003 Progress Report, 2003
- [18]. F. Schüth, B. Bogdanovic, M. Felderhoff, *Light Metal Hydrides and Complex Hydrides for Hydrogen Storage*, The Royal Society of Chemistry, September 2004
- [19]. S. Quin, G. E. O. Widera, *Use of Stress-Strength Model in Determination of Safety Factor for Pressure Vessel Design*, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 118, 1996
- [20]. Cohen, D., Mantell, S. C. & Zhao, L. (2001). The Effect of Fiber Volume Fraction on Filament Wound Composite Pressure Vessel Strength, *Composites: Part B*, 32, 413-429.
- [21]. Hwang, T. K., Hong, C. S., & Kim, C. G. (2003). Size Effect on the Fiber Strength of Composite Pressure Vessels, *Composite Structures*, 59, 489-498.
- [22]. Jacquemin, F. & Vautrin, A. (2002). The Effect of Cyclic Hygrothermal Conditions on the Stresses near the Surface of a Thick Composite Pipe, *Composite Science and Technology*, 62, 567-570.
- [23]. Kabir, M. Z. (2000). Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner, *Composite Structures*, 49, 247-255.
- [24]. Lekhnitskii, S. G. (1981). Theory of Elasticity of an Anisotropic Body, Mir Publishers, Moscow
- [25]. Liang, C. C., Chen, H.W., Wang, C.H. (2002). Optimum Design of Dome Contour for Filament-Wound Composite Pressure Vessels Based on a Shape Factor, *Composite Structures*, 58, 469-482
- [26]. Mackerle, J. (2002). Finite Elements in the Analysis of Pressure Vessels and Piping, an Addendum: a Bibliography (1998-2001), *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79, 1-26.
- [27]. Ochoa, O. O. & Reddy, J. N. (1992). *Finite Element Analysis of Composite Laminates*. Netherland: Kluwer Academic Publishers

- [28]. Parnas, L. & Katirci, N. (2002). Design of Fiber-Reinforced Composite Pressure Vessels under Various Loading Conditions, *Composite Structures*, 58, 83-95.
- [29]. Rao, V. V. S. & Sinha, P. K. (2004). Dynamic Response of Multidirectional Composites in Hygrothermal Environments, *Composite Structures*, 64, 329-338.
- [30]. Roy, A. K., Massard, T. N.(1992). A Design Study of Multilayered Composite Spherical Pressure Vessels, *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, VII, 479-493
- [31]. Soden, P. D., Kitching, R., Tse, P. C., Hinton, M. J. & Tsavalas, Y. (1993). Influence of Winding Angle on the Strength and Deformation of Filament-Wound Composite Tubes Subjected to Uniaxial and Biaxial Loads, *Composites Science and Technology*, 46(4), 363-378.
- [32]. Sonnen M., Laval C. & Seifert A. (2004). Computerized Calculation of Composite Laminates and Structures: Theory and Reality, Material S.A.
- [33]. Sun, X. K., Du, S. Y. & Wang, G. D. (1999). Bursting Problem of Filament Wound Composite Pressure Vessels, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 76, 55-59.
- [34]. Tabakov, P.Y. (2001). Multi-Dimensional Design Optimization of Laminated Structures Using an Improved Genetic Algorithm, *Composite Structures*, 54, 349-354.
- [35]. Tsai, S. W. & Roy A. K. (1988). Design of Thick Composite Cylinders, *Journal of Pressure Vessel Technology*
- [36]. Vasiliev, V.V., Krikanov, A.A., & Razin, A.F. (2003). New Generation of Filament -Wound Composite Pressure Vessels for Commercial Applications, *Composite Structures*, 62, 449-459

- [37]. Vasilev, V. V. & Morozov, E. V. (2001). *Mechanics and Analysis of Composite Materials*. Oxford: Elseiver.
- [38]. Wild, P. M. & Vickers, G. W. (1997). Analysis of Filament-Wound Cylindrical Shells under Combined Centrifugal, Pressure and Axial Loading, *Composites: Part A*, 28A, 47-55.
- [39]. Xia, M., Takayanagi, H. & Kemmochi, K. (2001). Analysis of Multi-Layered Filament- Wound Composite Pipes under Internal Pressure, *Composite Structures*, 53, 483-491.
- [40]. Xia, M., Takayanagi, H. & Kemmochi, K. (2001). Analysis of Transverse Loading for Laminated Cylindrical Pipes, *Composite Structures*, 53, 279-285.
- [41]. <http://www.harveyscomposites.co.za/Information/ApplicationTechniques.aspx> (entered on 12.09.2008)
- [42]. J. E. Shigley, C. R. Mischke, *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill, 2002
- [43]. Y. A. Cengel, M. A. Boles, *Thermodynamics an Engineering Approach*, McGraw- Hill, 1989
- [44]. N. Takeichi, H. Senoh, T. Yokota, H. Tsurata, K. Hamada, H. T. Takeshita, H. Tanaka, T. Kiyobayashi, T. Takano, N. Kuriyama, “Hybrid Hydrogen Storage Vessel”, a Novel High-pressure Hydrogen Storage Vessel Combined with Hydrogen Storage Material, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, 2003
- [45]. K. J. Young, E. H. Perez, *Finite Element Modeling and Design Criteria for Elastic- Plastic Analysis of High Pressure Vessels*, High Pressure Vessel Technology ASME, Vol. 344, 1997
- [46]. G. Z. Voyiadjis, C. S. Hartley, *Residual-Stress Determination of Concentric Layers of Cylindrically Orthotropic Materials*, *Experimental Mechanics*, 1987
- [47]. http://www.batteriesdigest.com/hydrogen_10k.htm
- [48]. http://wiingv.com/?page_id=13 (entered on 10.08.2008)
- [49]. <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=401> (entered on 14.08.2008)
- [50]. http://www.compositesatlantic.com/what_comp/vol4/vol4.html (entered on 19.11.2008)