

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**İÇ BASINCA MARUZ KARBON FİBER VE CAM FİBER
TAKVİYELİ KOMPOZİT TÜPLERİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE PATLAMA BASINCI ANALİZİ**

Ümit ŞAFAK

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK**



MANİSA-2017

TEZ ONAYI

Ümit ŞAFK tarafından hazırlanan "**İç Basınca Maruz Karbon Fiber Ve Cam Fiber Takviyeli Kompozit Tüplerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Patlama Basıncı Analizi**"adlı tez çalışması 06/11/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Yrd. Doc. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK
Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Yrd. Doc. Dr. İbrahim AYDIN
Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Yrd. Doc. Dr. Okan ÖZDEMİR
Dokuz Eylül Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ümit ŞAFAK



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	8
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
2.1.1. Parçacık Kompozitler	12
2.1.2. Pul Kompozitler	12
2.1.3. Fiber Kompozitler	12
2.1.4. Polimer Matrisli Kompozitler	13
2.1.5. Metal Matrisli Kompozitler.....	16
2.1.6. Seramik Matrisli Kompozitler.....	17
2.1.7. Karbon-Karbon Kompozitler	19
2.2. Fiberlerin Sınıflandırılması	20
2.2.1. Cam Fiber	21
2.2.2. Karbon Fiber	23
2.2.3. Aramid Fiber	24
2.3. Kompozit Malzeme Mekaniği	27
2.3.1. Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi	27
2.4. Kompozit Tank Üretim Yöntemleri	35
2.4.1. Filaman Sergi Yöntemi	35
2.4.1.1. Kutupsal Sergi.....	37
2.4.1.2. Helisel Sergi.....	38
2.4.1.3. Çembersel Sergi.....	39
2.5. Kompozit Yapılar İçin Hata Kriterleri	40
2.5.1. Maksimum Gerilme Teorisi	41
2.5.2. Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi	42
2.5.3. Tsai-Hill Hasar Teorisi.....	44
2.5.4. Tsai-Wu Hasar Teorisi	44
2.5.5. Hashin Hasar Teorisi.....	46
3. DENEYSEL KISIM.....	48
3.1. Tank Tasarımı.....	48
3.2. Tank Tasarım Akış Şeması	49
3.3. Karbon Epoksi İçin Patlama Basıncı Analizi	53
3.4. E-Cam Epoksi İçin Patlama Basıncı Analizi.....	57
3.5. Farklı Katman Sayısı İçin Hacim Hesabı	63
3.6. Farklı Katman Sayısına Sahip Tank Tasarımı	65
3.6.1. Farklı Katmanlı Tank Tasarım Akış Şeması.....	65
3.7. Farklı Katmana Sahip Karbon Epoksi Tank İçin Patlama Basıncı Analizi .	66
3.8. Farklı Katmana Sahip E-Cam Epoksi Tank İçin Patlama Basıncı Analizi .	70
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	73
4.1. 6 Katman Karbon Epoksi Tank İle 5-6-8 Katmana Sahip Karbon Epoksi Tankın Patlama Basıncı Karşılaştırılması	73

4.2. 6 Katman E-Cam Epoksi Tank İle 5-6-8 Katmana Sahip E-Cam Epoksi Tankın Patlama Basıncı Karşılaştırılması	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKÇA	78
EKLER	82
ÖZGEÇMİŞ	84



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ANSYS	Sonlu Elemanlar Metodu
CDM	Composite damage mechanic
CMC	Seramik Matrisli Kompozit
FE	Finite Element
FW	Filaman Sargı
GRP	Glass Reinforced Plastic
MMC	Metal Matrisli Kompozit
PAN	Poliakrilonitril
PLC	Programlanabilir Kontrol Cihazı
PMC	Polimer Matrisli Kompozit
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
RVE	Representative Volume Element
SEM	Sonlu Eleman Analiz
YYY	Yanıt Yüzey Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Elyaf ve reçineyi kullanarak kompozit oluşumu [23].....	8
Şekil 2.2 Ticari uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapılar [23]	10
Şekil 2.3 Motor uygulamalarında kullanılan kompozit parçalar [23].....	11
Şekil 2.4 Uydu sistemlerinde kullanılan kompozit parçalar [23]	11
Şekil 2.5 Takviye şekline göre kompozit türleri [22]	13
Şekil 2.6 E-cam fiber [25].....	22
Şekil 2.7 Tek eksenli cam elyafı [26]	22
Şekil 2.8 Tek eksenli karbon fiber [26]	24
Şekil 2.9 Bazı fiberlerin çekme ve basma grafikleri [25]	25
Şekil 2.10 İki eksenli aramid fiberler [26]	25
Şekil 2.11 Fiber, matris ve kompozit malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırılması [11].....	26
Şekil 2.12 Ortotropik malzemeye örnek olarak verilebilecek lamina [22].....	29
Şekil 2.13 Enine izotropik malzeme [21]	31
Şekil 2.14 Laminadaki lokal ve global eksen takımı [32]	34
Şekil 2.15 Filaman sargı yöntemi [33].....	36
Şekil 2.16 Farklı şekilde tasarlanmış filaman sargı makineleri [33].....	37
Şekil 2.17 Üç eksenli sargı [34].....	37
Şekil 2.18 Kutupsal sargı yöntemi [11]	38
Şekil 2.19 Helisel sargı yöntemi [35]	39
Şekil 2.20 Polar ve helisel sargı [34]	39
Şekil 2.21 Çembersel sargı [35].....	40
Şekil 2.22 Filaman sargılı basınç tank örneği [36]	40
Şekil 2.23 Lamina meydana gelebilecek hasar türleri [39].....	41
Şekil 2.24 Laminada düzlem gerilme durumu [35]	44
Şekil 3.1 Tank tasarım akış şeması	49
Şekil 3.2 Tank geometrisi	49
Şekil 3.3 Tank mesh görüntüsü.....	50
Şekil 3.4 Tank katman görüntüsü	51
Şekil 3.5 Fiber yönlenmesi örneği	51
Şekil 3.6 60 ° Sarım açısında ve 10 Mpa basınçdaki karbon epoksi tankın görüntüsü	54
Şekil 3.7 60 ° Sarım açısında ve 10.3 Mpa basınçdaki karbon epoksi tankın görüntüsü.....	55
Şekil 3.8 Karbon epoksi tankın fiber açılara göre patlama basıncı değerleri	56
Şekil 3.9 55° Sarım açısında ve 4 Mpa basınçdaki E-cam epoksi tankın görüntüsü .	57
Şekil 3.10 55° Sarım açısında ve 4.5 Mpa basınçdaki E-cam epoksi tankın görüntüsü	58
Şekil 3.11 E-cam epoksi tankın fiber açılara göre patlama basıncı değerleri.....	59
Şekil 3.12 İnce cidarlı kap'da gerilme durumu [2]	60
Şekil 3.13 Denge denklemi için kesit görünümü [2]	61
Şekil 3.14 İnce cidarlı silindirin x ekseninden kesilmiş kesit görüntüsü [21]	61
Şekil 3.15 Kompozit sarımlı boru için eksen takımlarının gösterimi [2]	63
Şekil 3.16 Hacim hesabı için h değerlerinin konumu	64
Şekil 3.17 Farklı katman tank tasarım akış şeması	65
Şekil 3.18 Farklı katman sayısındaki tank tasarımı	66

Şekil 3.19 65° Sarım açısında ve 10.8 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman karbon epoksi tankın görüntüsü.....	67
Şekil 3.20 65° Sarım açısında ve 11.5 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman karbon epoksi tankın görüntüsü.....	68
Şekil 3.21 5-6-8 Katmana sahip karbon epoksi tankın fiber açılarına göre patlama basıncı değerleri	69
Şekil 3.22 60° Sarım açısında ve 5.3 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman E-cam epoksi tankın görüntüsü.....	70
Şekil 3.23 60° Sarım açısında ve 5.8 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman E-cam epoksi tankın görüntüsü.....	71
Şekil 3.24 5-6-8 Katmana sahip E-cam epoksi tankın fiber açılarına göre patlama basıncı değerleri	72
Şekil 4.1 6 Katman karbon epoksi tank ile 5-6-8 katmana sahip karbon epoksi tankın patlama basıncı karşılaştırılması	73
Şekil 4.2 6 Katman E-cam epoksi tank ile 5-6-8 katmana sahip E-cam epoksi tankın patlama basıncı karşılaştırılması	74

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Polyester, vinilester ve epoxy avantaj ve dezavantajları [25]	14
Tablo 2.2 Yaygın olarak kullanılan termoset ve termoplastik malzemelerin mekanik özellikleri [26]	15
Tablo 2.3 Kullanılan bazı reçinelerin maksimum sıcaklıkları [26]	16
Tablo 2.4 MMC malzemeler ile PMC malzemelerin karşılaştırılması [22, 27]	17
Tablo 2.5 CMC malzemeler ile PMC malzemelerin karşılaştırılması [27]	18
Tablo 2.6 Bazı reçinelerin başlıca özellikleri [26]	19
Tablo 2.7 Karbon-karbon kompozitlerin özellikleri [22]	20
Tablo 2.8 E-Cam ve S-Cam mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [22]	22
Tablo 2.9 İki karbon fiberin mekanik özellikleri [22]	23
Tablo 2.10 Kevlar fiberlerin özellikleri [22]	25
Tablo 2.11 Fiberlerin mekanik özellikleri [22]	26
Tablo 3.1 E-Cam epoksi özellikleri [44]	52
Tablo 3.2 Karbon epoksi özellikleri [44]	53
Tablo 4.1 Patlama basıncındaki artış miktarı	75

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Yrd. Doc Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK'e, çalışmalarında bana yardımcı olan ve her türlü desteği sağlayan Gebze Teknik Üniversitesi araştırma görevlisi Sayın Gökçe AYGÜN'e, tecrübeleri ile beni aydınlatan sayın Muzaffer ÇETİN'e, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Ümit ŞAFAK
Manisa, 2017



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İç Basınca Maruz Karbon Fiber Ve Cam Fiber Takviyeli Kompozit Tüplerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Patlama Basıncı Analizi

Ümit ŞAFAK

Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK

Bu tez çalışmasında, aynı hacime sahip filaman sargılı kompozit tankların tasarımında değişiklik yaparak modellenmesi ile gerilme değerlerini azaltmak amaçlanmıştır. Kompozit tankın tasarımında sadece silindirik kısım olup, küresel kısımları içermemektedir. Kompozit tank'da [45, 55, 60, 65, 75, 90] derece sarım açıları kullanılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizinde ANSYS yazılımı kullanılmış, kompozit tankın farklı oryantasyon açılarında patlama basınçları elde edilmiş ve aynı hacimde tasarımda değişiklik yapılan kompozit tanklar ile bu değerler karşılaştırılmıştır. Kompozit tank'da üç farklı tasarım gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzemede meydana gelebilecek hasarları belirlemek için sık olarak kullanılan Tsai-Wu ve maksimum stress hata kriterleri her iki tasarım için karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ansys workbench, Basıncı, Filaman sarım, Kompozit sarımlı tank, Ortotrop

2017, 84 sayfa

ABSTRACT

Master of Science Thesis

Burst Pressure Analysis of Carbon Fiber and Glass Fiber Reinforced Composite Tubes Subjected to Internal Pressure Using Finite Element Method

Ümit ŞAFAK

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK

In this thesis, the purpose was decreasing the stress values by modeling which is changing the design of the filament winding composite vessels having the same value. The composite vessel designing contained only the cylindrical part, not spherical part. In the composite vessel [45, 55, 60, 65, 75, 90] degree winding angles were used. ANSYS software was used in the finite elements analysis, burst pressures were obtained at different orientation angles of the composite vessel and these values were compared with the composite vessels which were changed in design in the same volume. Three different designs carried out in the composite vessel.

The Tsai-Wu, and maximum stress failure criteria, which are commonly used to determine damage that may occur in composite materials, are compared for both designs.

Keywords: Ansys workbench, Pressure, Filament winding, Composite wound vessel, Orthotrop

2017, 84 pages

1. GİRİŞ

Günümüzde ilerleyen teknolojiyle birlikte insanların ihtiyaçları daha fazla artmaktadır ve bununla birlikte yeni malzeme üretiminde bir hayli önem kazanmıştır. Çevrede belli başlı bulunan temel malzeme özellikleri ilerleyen teknolojiye yetersiz kaldığı görülmüştür. İstenilen özelliklere daha uygun bir malzeme üretmek amacıyla, iki yada daha fazla malzemenin bir araya gelerek üretilen malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzemelerin temel özelliği kendini meydana getiren malzemenin üstün özelliğini kendinde barındırmasıdır.

Kompozit malzemeler son yıllarda askeri , otomotiv ve uzay sektörlerinde çok sık kullanılmaya başlanmıştır. Bunun belli başlı nedenlerinin başında diğer malzemelere göre hafif ve daha mukavim olmasıdır. Bunun yanında korozyon direncinin yüksek olması , ısı ve elektrik yalıtkanlığı gibi özelliklerindeki diğer malzemelere göre üstün performans göstermesi tercih sebeplerinin başında gelir. Günümüzde basınç tankları kompozit malzemelerden üretilmeye başlanmıştır. Bunun en önemli sebeplerinden biri dayanımının diğer basınç tanklarından daha fazla olması ve ağırlığının daha hafif olmasındandır. Günümüz endüstrisinde kullanılan tanklar ;

- Tip I (Metal monolitik basınçlı tanklar),
- Tip II (Dairesel fiber takviyeli metal tanklar),
- Tip III (Metal astarlı tamamen sarılmış fiber takviyeli tanklar) ,
- Tip IV (Plastik veya metal olmayan astarlı tamamen sarılmış fiber takviyeli tanklar)

Kompozit tankların en basit üretim şekli filaman sarım yöntemidir. Filaman sarım yöntemi istenilen mukavemet özelliklerine göre istenilen açıda sarılabilen bir yöntemdir.

Güvensay S. Çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak düşük hızda kuvvete maruz kompozit boruların dinamik analizini araştırmış ve yorumlamıştır. Elde ettiği veriler ile kuvvet-zaman grafikleri ve hız-zaman değişim grafiklerini bulmuştur. [1]

Akgün M.B çalışmasında cam elyaf /epoksi kompozit malzemeden silindirik boruların patlama basıncına göre tasarımın analitik ve sayısal yöntemler ile gerçekleştirmiş ve daha sonra iplikli sarım yöntemiyle kompozit boruların üretimini yapmıştır. Sayısal analizler ansys sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmiştir. Kompozit boruların elyaf sarım açılarını $[90^\circ, \pm 55^\circ, 90^\circ]$ ve $[\pm 55^\circ, 90^\circ, 90^\circ]$ şeklinde iki farklı yapıda seçmiştir. Yapılan analizler sonucunda kompozit boruların patlama basıncına elyaf sarım açılarının etkilerini incelemiştir. [2]

Akarsu M. Çalışmasında belirli bir üniform sıcaklıkta simetrik dizilime sahip kompozit bir plağın farklı oryantasyon açılarındaki ısı gerilme durumlarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Sonrasında dik katmanlı simetrik ve asimetrik dizilime sahip kompozit plağın ansys programında 3 boyutlu ve 2 boyutlu modellemesini gerçekleştirerek maksimum ve minimum gerilme sonuçlarını karşılaştırmıştır. [3]

Dönmez A. Çalışmasında kompozit malzemelerin gelen etkilere karşı davranışını gerilme analizi ile incelemiştir. Kompozit zırhlar için kompozit malzemelerden oluşturulan bir tasarımın gerilme analizini yapmıştır. Kompozit zırh Al, Ti ve çelikten oluşan modellerle en stabil tasarımı aramıştır. Alüminyum levha içine çelik ve titanyumdan meydana gelen borular yerleştirerek yüke maruz bırakıp bu yük altında meydana gelen gerilme davranışlarını incelemiştir. Bu araştırma için sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Fotoelektrik yöntemle yapılan mekanik deneyin sonuçlarıyla sonlu elemanlar programı olan ansys de aynı modelin gerilme analizleri karşılaştırılmış ve gerilmeler arasında kabuledilebilir bir hata oranı olduğunu görmüştür. [4]

Önder A ve arkadaşları çalışmasında simetrik ve asimetrik kabuklara uygun açı katlı yönelimleri için tasarlanmış filamanın maksimum patlama basıncını incelemişlerdir. Filaman sargılı kompozit basınç tanklarının patlama basıncı farklı teoriler altında iç basıncı incelemişlerdir. Filaman sargılı kompozit basınçlı tanklar üzerine sarım açısı ve sıcaklığın etkisine değinilmiştir.

En uygun sarma açılarını doğrulama için sonlu elemanlar metodu ve deneysel yaklaşımları kullandılar. Basınç tankındaki patlama basıncını tahmin etmek amacıyla elastik çözüm yöntemi temel alınarak Lekhnitskii teorisi geliştirildi. Borularda

patlama basıncını doğrulamak için tsai – wu hata kriteri, maksimum şekil değiştirme ve gerilme teorisini kullandılar. Bu çözümü farklı yönelim açıları için tartıştılar ve sundular. Kapalı uçlu durum için test yaptılar ve E-glass-epoksi kullanarak camla güçlendirilmiş plastik boru üretimini yaptılar. Test numunesi 4 tabakaya ve farklı yönelim açlarına sahiptir. Tabakalar simetrik ve asimetrik olarak konumlandırılmıştır.

Bu çalışma için PLC kontrollü hidrolik makine kullanmışlardır. Hidrotermal ve diğer mekanik özellikler e-glass epoksi düz kompozit tabakadan ölçülmüştür. Bazı analitik ve deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar çözümü karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar metodu olarak ansys 10.0 kullanılmıştır. Bazı yönelimler için analitik ve deneysel sonuçlar arasında yakın sonuçlar elde etmişlerdir. [5]

M. Menshykova ve arkadaşları çalışmasında eğilme yüküne maruz kompozit boruların gerilme analizini incelemiştir. Farklı tabaka ve tasarımı filaman sargı yöntemiyle üretilmiş kompozit boruları karşılaştırmışlardır. Kompozit boru üzerindeki araştırmanın odak noktası çoklu dış katman parçaları ve ince homojen iç tabakadır. Kompozit malzeme özelliklerinin gerilme dağılımı nasıl etkilediğini araştırmışlardır. [6]

M.F.S Al-Khalil ve arkadaşları çalışmasında filaman sargılı cam epoxy silindirlerin iç basınç ve farklı eksenel yüklere maruz hata kriterlerini incelemiştir. Radyal gerilme terimlerinin dahil edilmesinin, deney sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermişlerdir ve radyal gerilmelerin önemli olabileceği geometri ve kasnak-eksenel oranlarını belirtmişlerdir. [7]

N. Tarakçıoğlu ve arkadaşları filaman sargılı yüzey çatlaklı cam fiber plastik (GRP glass reinforced plastic) kompozit boruların iç basınç altında yorulma davranışlarını incelemiştir. Cam epoxy kompozit malzeme kullanmışlardır ve açık ve kapalı uç şartlarında test etmişlerdir. Test numunesi asimetrik dizilim 6 tabaka $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahiptir. Eksenel doğrultuda çentik en/boy oranı 0.2 ve çentik kalınlık oranı 0.25 , 0.38 , 0.50 in olan bir yüzey çatlağına sahip boruların yorulma testleri ASTM D-2992 standartlarına göre gerçekleştirmişlerdir. Test üç farklı maksimum gerilme değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Son olarak GRP

boruların hatalarını incelemişler, yorulma sonuçlarını , S-N eğrilerini ve hasar bölgelerinin alan-çevrim (A-N) eğrilerini göstermişlerdir. [8]

Liu , P.F ve arkadaşları karbon fiber epoxy kompozit laminatların hasar mekaniğini kullanarak aşamalı hasarını analiz etmişlerdir. CDM(composite damage mechanic) teorisine dayanarak Al-karbon elyaf / epoksi kompozit laminatların aşamalı arıza özelliklerini öngörmek için bir enerji esaslı sertlik bozulma yöntemi önermişlerdir. Aşamalı arıza analizini gerçekleştirmek için çoklu çerçeve yeniden başlatma analizi ve yay uzunluğu algoritması içeren bir 3B sonlu elemanlar tekniği geliştirilmişlerdir. Hesaplanan yük-yer değiştirme eğrisi ve yapının nihai kopma gücü, deneylerden ve diğer mevcut modellerden elde edilenlerle karşılaştırılmışlardır. Bu çalışmayı, yukarıdaki kompozit lamine yapıların hasar başlatma ve yayılım davranışlarının aşamalı olarak anlaşılmasını sağlamak için yapmışlardır. [9]

Chu, J.K ve arkadaşları kompozit basınçlı tankın patlama basıncı ve hata özelliklerini öngörmek için çok parçalı bir hasar modeli önermişlerdir. Kompozit tankın sertlik özelliklerini ve makroskobik hasarını değerlendirmek için temsili bir hacim elementini (RVE : representative volume element) baz almışlardır. [10]

Muzaffer Ç. Çalışmasında kompozit sarımlı basınçlı bir yakıt tankının mekanik tasarımını ve yapısal analizlerini yapmıştır. Bu tasarımda aynı hacme sahip metal malzemelerden üretilmiş yakıt tanklarına göre daha hafif olmasına dikkat etmiştir. Yapmış olduğu sonlu elemanlar analizinde ANSYS yazılımını kullanmış ve kompozit sarım için en uygun sarım açısını belirlemiştir. Kompozit yapıda oluşabilecek hasarları belirlemek için Tsai-Hill, Tsai-Wu ve Hashin teorileri dikkate almıştır. [11]

Roh, H.S ve arkadaşları yakıt hücresi otomobilleri için Tip 4 hidrojen depolama tanklarında karbon fiber kullanımının optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Bu optimizasyonu kubbe şekli, sarım açısı, hesli sel sargı ve tabaka kalınlıkları ile yapmışlardır. Kubbe bölümündeki sarma açısının ve sarmal tabakanın kalınlığının değişimi FE(finite element) modeline dahil etmişlerdir. Analiz, tankın yapısal bütünlüğünü sağlamak için gereken asgari sarmal ve kasnak katman kalınlıklarını

belirlemek için kullanılmışlardır. Aynı zamanda silindirik kesit etrafına sarılan sarmal tabakaların sayısını azaltmak için tankların kubbe ve kalın bölümlerini takviye etmek için "takviye parçası" kullanımını incelemişlerdir. Kubbe bölümünü güçlendirmek için yeni bir entegre uç kapağı tasarımı önermişlerdir. [12]

Xia M ve arkadaşları çalışmasında iç basınç altında filaman sargılı (FW) kompozit boruların analizini incelemişlerdir. Borunun her tabakasının özelliğini anizotropik varsaymışlardır. İç basınç altındaki borunun deformasyon ve gerilme için tam elastik çözüm gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte mevcut teoriyi kullanarak üç katman açısı için boru tasarımında gerilme detayları ve şekil değiştirme dağılımını araştırmışlardır. [13]

Yakup D çalışmasında kompozit plakalarda cam-dokuma tipi, istifleme sırası ve tabaka sayısı gibi parametrelerin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Kompozit plakalar vakum destekli reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi ile üretmiştir. Fiber olarak, ağırlıkları 800-500-300-200 gr/m² olan cam-dokumalar kullanmıştır. Reçine ise, RTM'ye uygun Polipol-336 polyester'dir. On yedi farklı istifleme ve altı farklı tabaka sayısına sahip plakalar elde etmiştir. RTM sonrası kalıp üzerine ≈ 135 KPa'lık kürleme basıncı uygulamıştır. Elde ettiği kompozit plakalar için çekme ve üç noktadan eğme gibi temel mekanik özellikleri incelemiştir. Tekrarlı enjeksiyon ile iyi ıslanan cam dokumalar, kompozit plakanın mekanik özelliklerini artırdığını gözlemlemiş ve istifleme sırasında reçine geçirgenliği en düşük olan 200 gr/m² dokumaların merkezde olması çekme mukavemetini düşürürken eğilme mukavemetini arttırmıştır. Sonuçta Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak optimum RTM parametreleri, istifleme sırası ve tabaka sayısı önermiştir. [14]

Tolga D çalışmasında iç basınç altında kompozit tankların direncini incelemiştir. Plastik astarlı filaman sargılı kompozit tank üzerinde sıcaklık ve sargı açılarının ne gibi etkisi olduğunu incelemiştir. Basınç tankının ilk kat başarısızlığını öngörmek için Lekhnitskii teorisine dayanan bir çözüm geliştirmiştir. Yaptığı analizde, üniform sıcaklık altında çeşitli yönlendirme açılarındaki başarısızlık basıncını açıklamıştır. Bazı analitik sonuçları karşılaştırmak için sonlu elemanlar metodu ANSYS 9 programını kullanmıştır. [15]

Barış K ve arkadaşları çalışmasında ağ analizi ve klasik katman teorisi yardımıyla TSE tarafından tip 3 olarak isimlendirilen dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının patlama basıncına göre tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Kompozit levha teorisine dayanarak simetrik ve asimetrik plaka düzenleri için helisel ve teğetsel kısımların birbiri arasındaki kalınlık değişiminin patlama basıncına ve teğetsel şekil değişimine etkisini incelemişlerdir. [16]

Bora B çalışmasında farklı kuvvetler etkisi altındaki filaman sargı tüplerin tasarım ve analizini gerçekleştirmiştir. Filaman sargı tüplerin çeşitli kombine yükler altındaki davranışını incelemek için Sonlu Eleman Analiz (SEM) tekniğini kullanmıştır. Çalışmasının sonucunda farklı kuvvetler etkisi altındaki filaman sargılı tüplerin tasarımında ihtiyaç duyulan verileri ortaya koymuştur.. [17]

R.R. Chang çalışmasında değişik malzeme özelliklerini kullanarak simetrik lamınaya sahip kompozit tanklarda ilk katman hasarına göre analitik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. [18]

T.Y. Kam ve arkadaşları kompozit basınçlı tanklardaki gerilmeyi analitik ve deneysel olarak incelemiştir. Farklı lamina düzenlemeleri ile kompozit basınçlı tankın patlama basıncı ve ilk kat hata analizlerini deneysel teknoloji ile sundu. Farklı analitik çözümler kullanarak değişik hata kriterleriyle birlikte kompozit basınçlı tankın ilk kat hata gerilmelerini öngördü. [19]

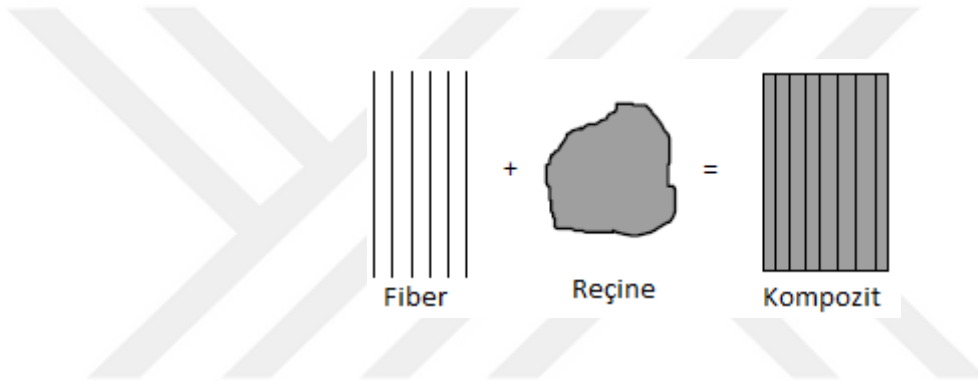
P.F Liu ve arkadaşları çalışmasında kompozit tank tasarımı için sayısal simülasyon ve optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak kompozit tanklarda bozulma mekanizması ve hata özelliklerini öngörmek için hasar modellemesine ilişkin yöntemleri gözden geçirmişlerdir. Daha sonra kompozit tankların ömür ve patlama basınçlarını araştırmışlardır. Kompozit tankların patlama basıncını, ömür değerlerini ve gerilme dayanımlarını bilgisayar programları ile değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda kompozit tankların en az hafiflikte olacak şekilde rijitlik sabitleri ve maksimum çekme gerilmesine dayanacak şekilde ideal bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. [20]

İç basınca maruz kompozit tank'da meydana gelen gerilme değerlerini düşürmek için tankın farklı bölgelerinde fark katman sayısı olacak şekilde bir tasarım gerçekleştirilmiş ve patlama basınçları karşılaştırılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

Kompozit malzemeler, makro seviyede birleştirilmiş ve birbirini içinde çözünme söz konusu olmayan iki yada daha fazla maddeden meydana gelmiş malzemelerdir. Maddelerden biri kuvvetlendirici faz (takviye), diğeri ise kuvvetlendirici fazı bir arada tutan matris olarak bilinir. Takviye fazın malzemeleri fiber, parçacık veya pul formunda olabilir. Matris fazın malzemesi genellikle sürekli dir. Kompozit malzemeler eski uygarlıktan beri kullanılır. Örnek verilecek olursa ahşap, saman ve çamur gündelik kompozit malzemeler olmuştur. Bazı klasik silahların performansını optimize etmek için kompozit malzemeler kullanılmıştır. [21, 22]



Şekil 2.1 Elyaf ve reçineyi kullanarak kompozit oluşumu [23]

Kompozit malzemeler piyasada yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık, otomotiv, sivil altyapı, spor malzemeleri ve benzeri uygulamalar. Kompozit malzemelerin tasarımı diğer malzemelere göre zor örneğin metal gibi. [24] Kompozit malzemelerin kullanım alanı oldukça geniştir. Birkaç örnek ile listelenecek olursa ;

1 Elektrik , Elektronik

- a) Elektrik yapıları için izolasyon
- b) Devre kesiciler için destekler
- c) Baskı devreler için destekler
- d) Zıhrlar
- e) Türbin kanatları

2 Binalar ve yapılar

- a) Muhafaza hücreleri
- b) Beton kalıpları

- c) Çeşitli kapaklar (kubbe , pencere vb)
- d) Yüzme havuzları
- e) Kapılar, mobilya, banyolar

3 Karayolu taşımacılığı

- a) Gövde parçaları
- b) Tekerlekler, radyatör ızgarası
- c) İletim milleri
- d) Süspansiyon yayları
- e) Sıkıştırılmış gaz şişeleri
- f) Şasi

4 Demiryolu taşımacılığı

- a) Lokomotiflerin çepheleleri
- b) Vagonlar
- c) Kapılar, koltuklar, iç paneller
- d) Havalandırma gövdeleri
- e) Yapı parçaları

5 Deniz taşımacılığı

- a) Kurtarma ekipmanları,
- b) Devriye tekneleri
- c) Tarak ağı tekne
- d) Mayın patlatma gemileri
- e) Deniz tekneleri

6 Hava taşımacılığı

- a) Bütün kompozit planörler
- b) Bütün kompozit hafif uçaklar ve uçaklar
- c) Birçok uçak bileşenleri: dikey ve yatay kuyruk düzlemi, kanat kutuları ön kenarlar, kanatçıklar, orta kanat kutuları, gövde, kapılar, uçak fren diskleri vb
- d) Birçok helikopter bileşenleri: bıçak ağızları, ana rotorlar, kuyruk rotorları, iletim milleri, kabinler vb
- e) Uçak motorları: pervaneler, bıçak ağızları, kaplamalar, fan korumaları vb

7 uzay taşımacılığı

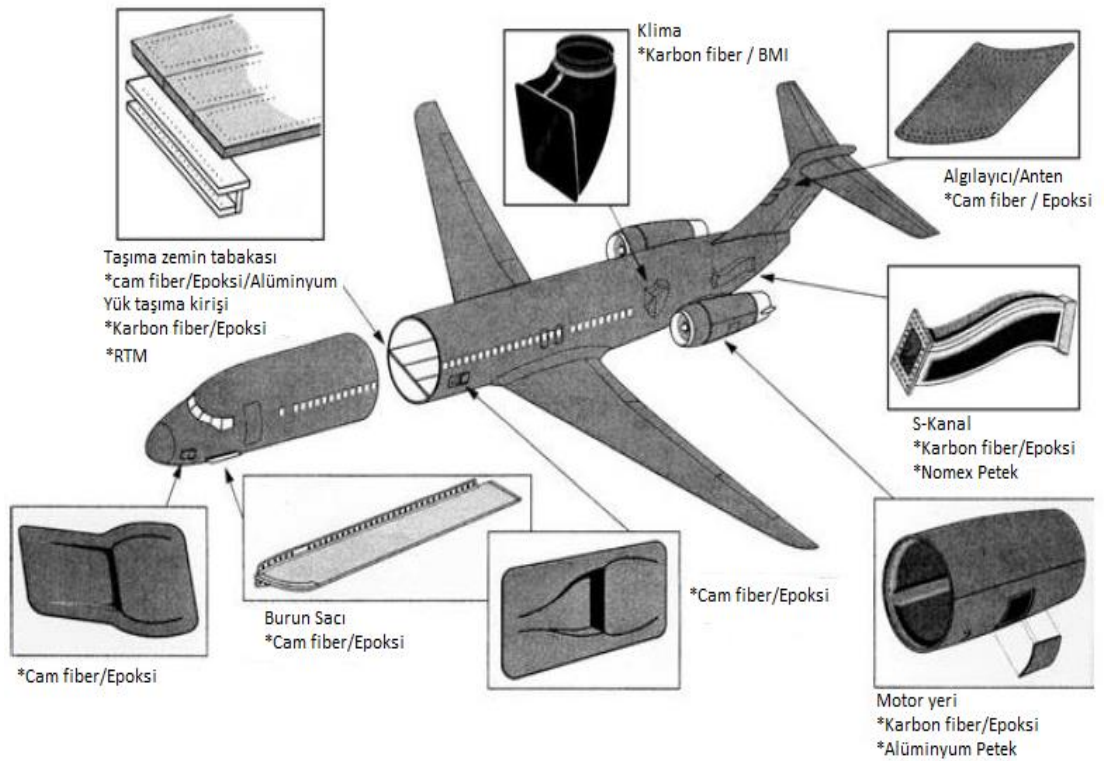
- a) Gövdeler
- b) Tanklar
- c) Nozullar

8 Genel mühendislik sektörleri

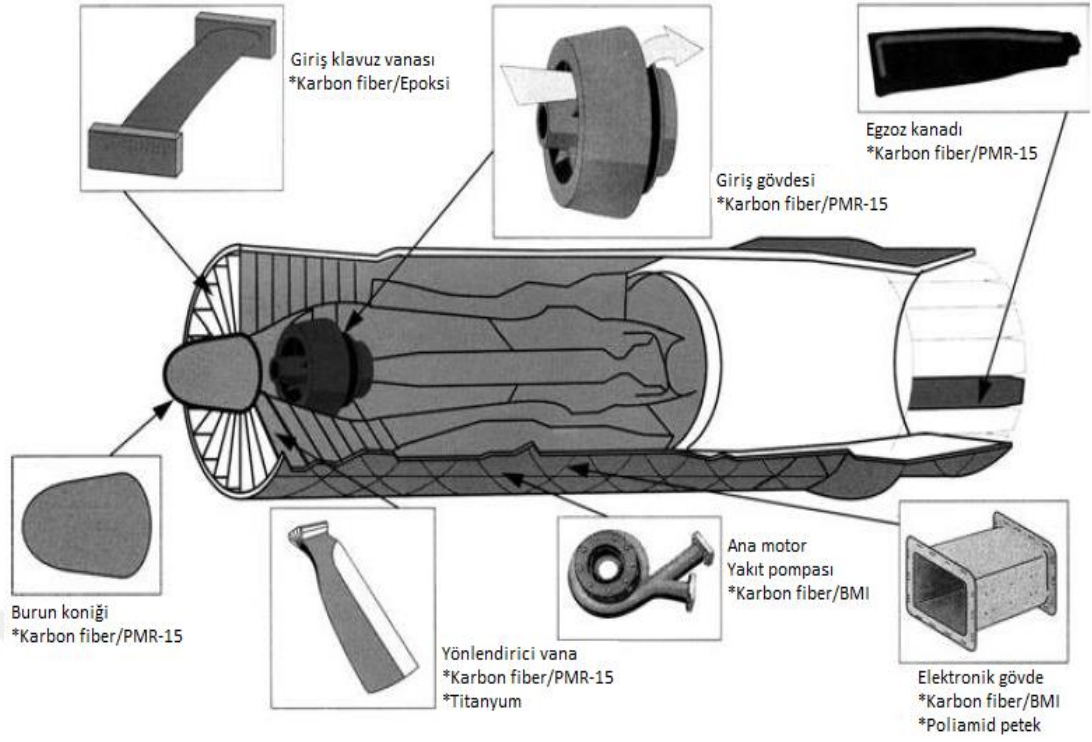
- a) Dişliler
- b) Yataklar
- c) Korumalar
- d) Robot kolları
- e) Volanlar
- f) Borular

9 Spor ve eğlence

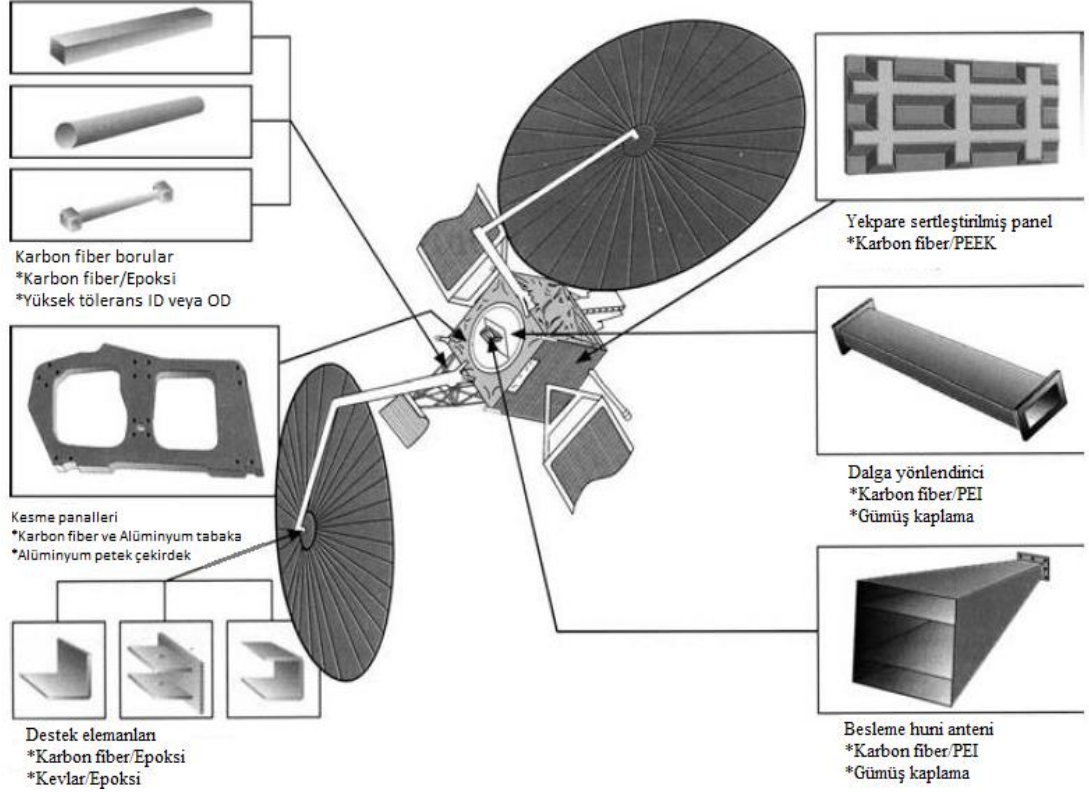
- a) Tenis racketleri
- b) Balıkçılık direkleri
- c) Kayaklar
- d) Yaylar ve oklar
- e) Koruyucu kasklar
- f) Kürekler, yarış gemileri
- g) Bisikletler. [21]



Şekil 2.2 Ticari uçaklarda kullanılan tipik kompozit yapılar [23]



Şekil 2.3 Motor uygulamalarında kullanılan kompozit parçalar [23]



Şekil 2.4 Uydu sistemlerinde kullanılan kompozit parçalar [23]

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviye geometrisine veya matris türüne göre sınıflandırılır. Takviye geometrisi parçacık, pul veya fiber şeklinde matris türü ise polimer, metal, seramik ve karbon türünde olabilir. [22]

2.1.1. Parçacık Kompozitler

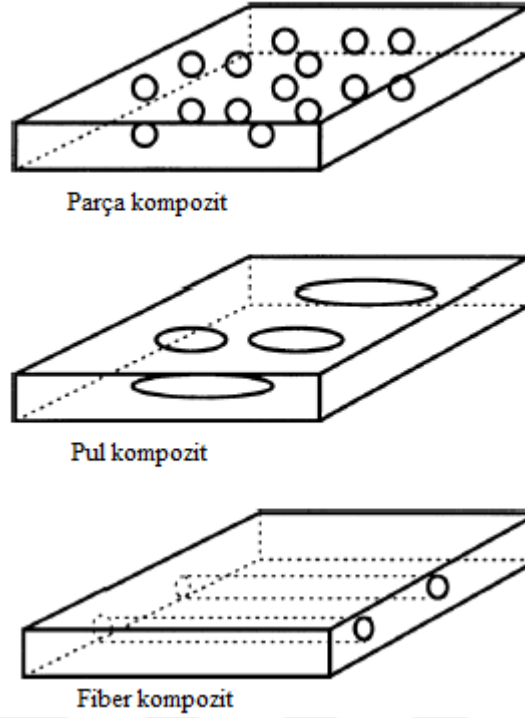
Alaşım ve seramik gibi matrislerin içinde parçacıklar yer alır. Bu parçacıklar matrislerin içinde gelişigüzel dağıldığı için izotropiktir. Parçacık kompozitler iyi mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı vb gibi avantajlara sahiptir. Örnek olarak alüminyum içinde silisyum karbür parçacıkları ve betonarme yapımında kullanılan çakıl, kum ve çimento verilebilir. [22]

2.1.2. Pul Kompozitler

Matris içinde düz takviyelerden oluşur. Pul malzemeleri cam, mika, alüminyum ve gümüşdür.

2.1.3. Fiber Kompozitler

Kısa veya uzun fiber takviyeli matrislerden oluşur. Fiberler genellikle anizotropiktir. Örnek olarak karbon ve aramid verilebilir. Matris olarak epoksi, alüminyum gibi metaller verilebilir. [22]



Şekil 2.5 Takviye şekline göre kompozit türleri [22]

2.1.4. Polimer Matrisli Kompozitler

Küçük çaplı fiberlerle takviye edilmiş bir polimerden oluşan polimer matrisli kompozitlerdir (PMC). Çok sık kullanılan kompozit türlerindendir. Bunun nedeni İyi yapışma, kolay işlenebilme, elektrik yalıtkanlığı ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinin üst seviyede olmasıdır. Polimer esaslı kompozitler kendi arasında termosetler ve termoplastikler olarak ikiye ayrılır.

- **Termoplastikler** : Metallere benzer şekilde ısıtılıp eritildikten sonra istenilen şekil verilebilir. Geri dönüşümü mümkün olan polimer yapılarıdır. Örnek olarak naylon, polipropilen ve polietilen verilebilir.
- **Termosetler** : kompozit bir malzeme meydana getirirken belirli bir miktarda katalizör ile karıştırılır ve fiberin malzemeye emdirilmesi sağlanır. Termosetler termoplastikler gibi geri dönüşümü mümkün olan malzemeler değildir. Eğer belirli bir sıcaklığın üzerine çıkılırsa mekanik özellikleri değişime uğrar. En çok kullanılan termosetlere örnek olarak polyester, vinilester ve epoxy'dir. [22, 23]

Tablo 2.1 Polyester, vinilester ve epoxy avantaj ve dezavantajları [25]

Polyester	Vinilester	Epoxy
<u>Avantajlar</u> • Kullanımı kolay • Reçine maliyeti düşük	• Çok yüksek çeyresel/kimyasal direnç • Polyestere göre yüksek mekanik özellikler	• Yüksek mekanik ve termal özellikler • Yüksek su direnci • Uzun çalışma süreleri • Düşük büzüşme
<u>Dezavantajlar</u> • Düşük mekanik özellikler • Açık kalıpta yüksek stiren emisyonları • Yüksek sıcaklıkta büzüşme	• Yüksek özellikler için kürlenme şarttır • Yüksek stiren içeriği • Polyestere göre maliyeti fazla • Yüksek sıcaklıkta büzüşme	• Vinilestere göre fazla maliyetli • Kritik karıştırma • Korozyona elverişli

Tablo 2.2 Yaygın olarak kullanılan termoset ve termoplastik malzemelerin mekanik özellikleri [26]

Reçine	Tip	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastisite modülü (N/mm^2)	Çekme gerilmesi (N/mm^2)
Epoxy	Termoset	1.1-1.4	2.1-5.5	40-85
Fenol fermaldehit	Termoset	1.2-1.4	2.7-4.1	35-60
Polyester	Termoset	1.1-1.4	1.3-4.1	40-85
Asetal	Termoplastik	1.4	3.5	70
Naylon	Termoplastik	1.1	1.3-3.5	55-90
Polikarbonat	Termoplastik	1.2	2.1-3.5	55-70
Polietilen	Termoplastik	0.9-1	7-1.4	20.35
Polyester	Termoplastik	1.3-1.4	2.1-2.8	55-60

Tablo 2.3 Kullanılan bazı reçinelerin maksimum sıcaklıkları [26]

Termoset	°C	Termoplastik	°C
Polyester	95	Naylon 66	140
Vinilester	95	Poliüretanlar	180
Epoxy	175	Polisülfonlar	150
poliamid	315	Poliamid-imidler	240

2.1.5. Metal Matrisli Kompozitler

Sürekli veya kesik fiberli metal matrisli kompozitler (MMC) otuz yılı aşkın bir süredir geliştirilmekte ancak henüz geniş ölçüde kullanılamamaktadır. Bu tür kompozitlerde kullanılan matrislere örnek olarak alüminyum, magnezyum ve titanyum, fiberlere örnek olarak karbon ve silisyum karbür verilebilir. Metal matrisli kompozitler polimer matrisli kompozitlerden daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir bu sıcaklık matrisi oluşturan metalin türüne bağlıdır. Metal matrisli kompozitlerin uygulama alanları motor parçalarıdır. Fan, kompresör bıçakları, muhtamel diskler ve taşıyıcı gövde parçaları gibi. Karbon/alüminyum alaşımlı ve karbon/magnezyum alaşımlı kompozit malzemeler anten ve uydu uygulamaları için daha çok kullanılır. [22, 26, 27]

Tablo 2.4 MMC malzemeler ile PMC malzemelerin karşılaştırılması [22, 27]

<u>Avantaj</u> • Yüksek sıcaklık kalitesi, özellikle titanyum ve titanyum alüminid • Yüksek gerilme tokluğu, darbe hasar direnci • Yüksek basma gerilmeleri • Nemden etkilenmeme • Yüksek elektrik termal iletkenlik • Yorulma ve çatlak direnci
<u>Dezavantaj</u> • Sınırlı ve pahalı üretim teknolojisi • Zor ve verimli olmayan bağlantı teknolojisi • Yüksek işlem sıcaklıkları • Yüksek yoğunluk • Termal yorulma eğilimi • Korozyona yatkın, özellikle iletken lifler

2.1.6. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (CMC), karbon veya silisyum karbür gibi fiberlerle takviyeli alümina kalsiyum alümina silikat gibi bir seramik matris içerir. Seramik matrisli kompozitler mekanik özellikler açısından çok yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilir. Teknoloji yeteri kadar geliştirilemediği için matris içindeki lifleri üniform şekilde dağıtmak ve gözenekli yapıları yok etmek oldukça güçtür ve bu sebepten dolayı az kullanılır. Gaz türbin motorlarında ve yüksek sıcaklıkta çalışan gövde yapılarında üretim aşamaları çok zor olsa bile kullanılmaktadır. Başlıca kullanılan matris malzeme alüminyum oksit ve silikon oksittir. (Al_2O_3 , SiO_2) [22, 26, 27]

Tablo 2.5 CMC malzemeler ile PMC malzemelerin karşılaştırılması [27]

<u>Avantaj</u> • Yüksek sıcaklık kapasitesi (500-1500 °C) • Neme karşı direnç • Düşük iletkenlik • Düşük termal genleşme • Kötü ortam şartlarına dayanıklılık
<u>Dezavantaj</u> • İmalatı maliyetli ve zor • Bağlantı zorluğu • Düşük kırılma tokluğu • Düşük gerilme seviyelerinde matrisde mikro çatlakların oluşması

Tablo 2.6 Bazı reçinelerin başlıca özellikleri [26]

Başlıca özellikler	
Polyester	• Düşük sıcaklık limitleri • Orta ve düşük mekanik özellikler • Düşük maliyet
Epoxy	• Düşük sıcaklık limitleri • Yüksek maliyet • Yüksek mekanik özellikler
Metal matris	• Yüksek sıcaklık limitleri • Orta maliyet • Orta mekanik özellikler
Seramik matris	• Yüksek sıcaklık limitleri • Düşük maliyet • Orta mekanik özellikler

2.1.7. Karbon-Karbon Kompozitler

Karbon-karbon kompozitler, karbon matrisin içinde karbon fiberin kullanılmasıyla oluşan kompozitlerdir. Bu kompozitler, 6000°F (3315°C) çevre sıcaklığının üstünde kullanılabilir. Grafit fiberlerden 20 kat güçlü ve %30 hafiftir. [22]

Tablo 2.7 Karbon-karbon kompozitlerin özellikleri [22]

<u>Avantaj</u> • Yüksek sıcaklıklara dayanma • Yüksek sıcaklıklarda düşük sünme • Düşük yoğunluk • İyi çekme ve basma dayanımı • Yüksek yorulma dayanımı • Yüksek termal iletkenlik • Yüksek sürtünme katsayısı
<u>Dezavantaj</u> • Yüksek maliyet • Düşük kesme mukavemeti • Yüksek sıcaklıklarda oksidasyon yatkınlığı

2.2. Fiberlerin Sınıflandırılması

Fiberler yüzlerce veya binlerce filamantlardan oluşur. Bunların herbirinin çapları 5 ile 15µm arasında bir çapa sahiptir, böylece tekstil makinelerinde işlenebilir hale gelirler. [21]

Fibere ait dört özellik mekanik performansa etkisi olur.

- **Uzunluk** : Fiberler uzun veya kısa olabilir. Uzun ve sürekli fiberlerin yönlendirilmeleri işlemleri kolay olurken, kısa fiberlerin tam olarak yönlendirilmesi zordur. Uzun elyaflar kısa elyaflara birçok yönden üstünlük sağlar. Bunlar darbe direnci, düşük çekme, pürüzsüz yüzey ve ölçüsel duyarlılık. Ancak kısa fiberlerin maliyeti düşük ve işlemesi kolaydır.
- **Yönelim** : Kompozit malzeme fiber yönünde yüksek rijitlik ve dayanıma sahiptir. Eğer fiberler birden fazla yönde yönlendirilirse fiber doğrultularında daha yüksek rijitlik ve dayanım görülür.
- **Şekil** : Üretim kolaylığı baz alındığında fiberlerin en yaygın kullanılan şekli daireseldir. Altıgen ve kare kesitli fiberlerin imalatı zor olması sebebiyle mukavemet ve yüksek ambalaj faktörü iyi olmasına rağmen tercih edilmez.

- **Malzeme** : Lif malzemesi direk olarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Liflerin genellikle yüksek elastik modül ve mukavemete sahip olması beklenir. [22]

Yaygın olarak kullanılan fiberler:

- Cam fiber
- Karbon fiber
- Aramid veya keklar fiber

2.2.1. Cam Fiber

Taş ocağı ürünlerinin (kum, kil, kireçtaşı vb) 1600°C de karışımıyla sıvı cam oluşmuştur. Cam sıvı haldeyken mikro ince burçlardan geçirilir ve aynı anda 5-24mm çapında cam elyaf filamentleri üretmek üzere soğutulur. Cam elyaflar PMC malzemelerinde sıkça kullanılan elyaf türüdür.

Cam elyafların başlıca avantajları:

- Düşük maliyetli olması
- Yüksek çekme mukavemeti
- Yüksek kimyasal direnç
- Mükemmel izolasyon özellikleri

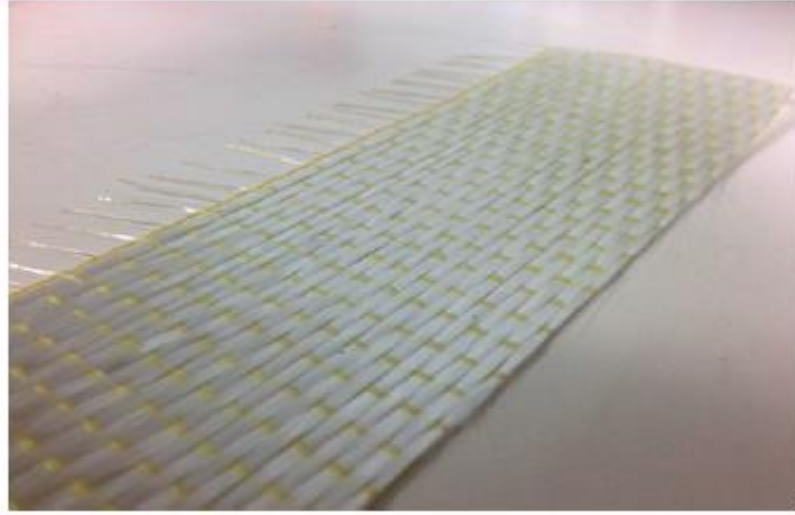
Dezavantajları

- Nispeten düşük gerilme modülü
- Yüksek yoğunluk (ticari rifler arasında)
- Aşınmaya karşı hassasiyet
- Nispeten düşük yorulma direnci
- Yüksek sertlik

E-cam ve S-cam endüstride en yaygın kullanılan tipleridir. C-cam olarak bilinen başka türü ise, E-cam'a oranla daha fazla korozyon direnci gerektiren kimyasal uygulamalarda kullanılır. E-cam, piyasada bulunan tüm takviye elemanlarının en düşük maliyete sahip olmasından dolayı FRP endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Başlangıçta uçak parçaları ve füze kasaları için geliştirilen S-cam, kullanılan tüm elyaflar arasında en yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Ancak üretim maliyeti E-cam'a oranla daha fazladır. S-camın daha düşük maliyetli olan versiyonu S2-cam dır. [25, 28]



Şekil 2.6 E-cam fiber [25]



Şekil 2.7 Tek eksenli cam elyafı [26]

Tablo 2.8 E-Cam ve S-Cam mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [22]

Özellik	Birim	E-cam	S-cam
Birim sistemi : SI			
Özgül ağırlık	-	2.54	2.49
Young modülü	GPa	72.40	85.50
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	3447	4585
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m/m}^{\circ}\text{C}$	5.04	5.58

2.2.2. Karbon Fiber

Karbon fiberler genellikle rayon, poliakrilonitril (PAN) ve zift gibi maddelerden üretilir. Diğer elyaf türlerine göre daha yüksek elastik modülüne sahiptir. 1500°C sıcaklıklara dayanabilmektedir. Karbon fiberler, uçak parçaları gibi yüksek dayanımlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. [11, 22]

Karbon fiberlerin avantajları :

- Yüksek özgül mukavemet ve modül
- Düşük termal genleşme katsayısı
- Yüksek yorulma dayanımı

Dezavantajları

- Yüksek maliyet
- Düşük darbe direnci
- Yüksek elektrik iletkenliği [22]

Tablo 2.9 İki karbon fiberin mekanik özellikleri [22]

Özellik	Birim	Zift	PAN
Birim sistemi : SI			
Özgül ağırlık	-	1.99	1.78
Young modülü	GPa	379.2	241.3
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	1723	3447
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$	-0.54	-1.26



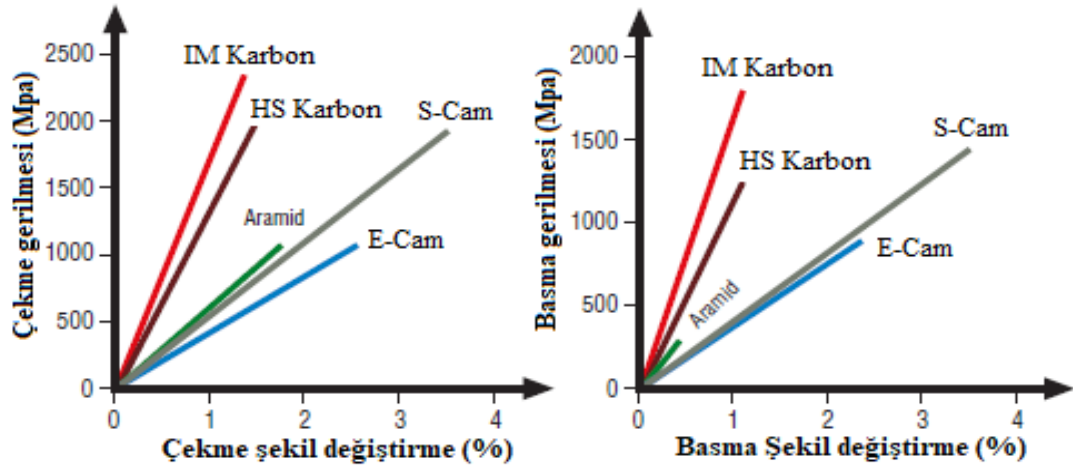
Şekil 2.8 Tek eksenli karbon fiber [26]

2.2.3. Aramid Fiber

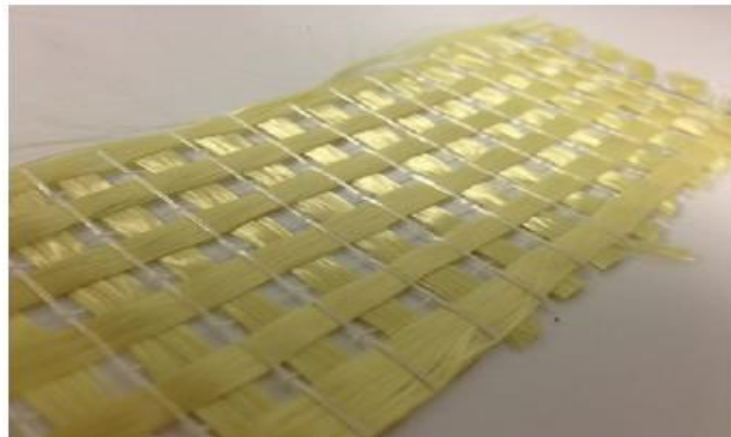
Aramid fiberler, karbon, hidrojen, oksijen ve azottan oluşmuş aromatik bir organik bileşiktir. Takviye malzemesi olarak aramid fiberler, hafif, yüksek çekme mukavemeti ve çarpma hasarına karşı dirençli olması sebebiyle denizcilik ve havacılık uygulamasında kullanılır. Karbon lifleri gibi , aramid liflerde uzunlamasına yönde düşük termal katsayısına sahip oldukları için düşük termal genleşme kompozit panellerin tasarımında kullanılır. Aramid elyaf takviyeli kompozit malzemelerin en büyük dezavantajı düşük basma dayanımları ve işleme zorluğudur. Aramid fiberlerin iki ana türü vardır. Kevlar 29 ve kevlar 49 dur. Kevlar fiberlerin iki türünde benzer özgül mukavemete sahiptir fakat kevlar 49 daha yüksek özgül rijitliğe sahiptir. Kevlar 29 genellikle kurşun geçirmez yelekler, halat ve kablolarda kullanılır. Uçak endüstrisinde ve yüksek performans uygulamalarında kevlar 49 kullanılır. [22, 28]

Tablo 2.10 Kevlar fiberlerin özellikleri [22]

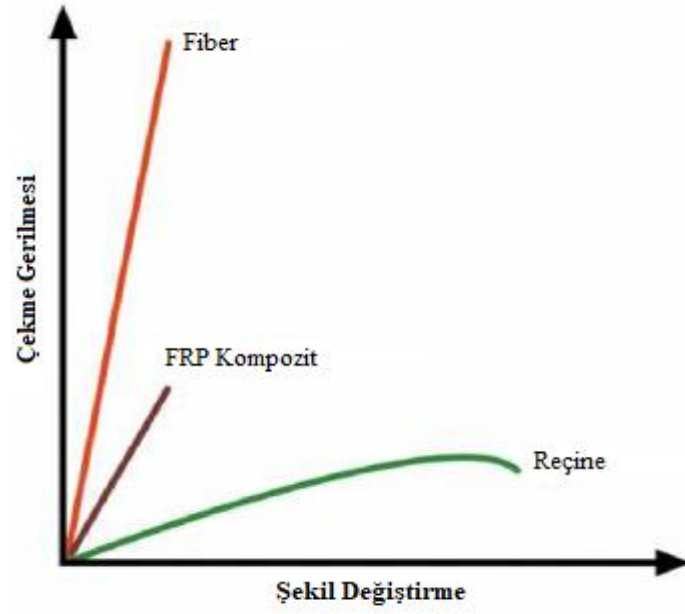
Özellik	Birim	Kevlar 29	Kevlar 49
Birim sistemi : SI			
Özgül ağırlık	-	1.44	1.48
Young modülü	GPa	62.05	131
Maksimum çekme mukavemeti	MPa	3620	3620
Termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m/m/}^{\circ}\text{C}$	-2	-2



Şekil 2.9 Bazı fiberlerin çekme ve basma grafikleri [25]



Şekil 2.10 İki eksenli aramid fiberler [26]



Şekil 2.11 Fiber, matris ve kompozit malzemelerinin özelliklerinin karşılaştırılması [11]

Tablo 2.11 Fiberlerin mekanik özellikleri [22]

Özellik	Birim	Karbon	Cam	Aramid
Eksenel modül	GPa	230	85	124
Enide modül	GPa	22	85	8
Eksenel poisson oranı	-	0.30	0.20	0.36
Enine poisson oranı	-	0.35	0.20	0.37
Eksenel kayma modülü	GPa	22	35.42	3
Eksenel termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$	-1.3	5	-5
Enine termal genleşme katsayısı	$\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$	7.0	5	4.1
Eksenel çekme mukavemeti	MPa	2067	1550	1379
Eksenel basma mukavemeti	MPa	1999	1550	276
Enine çekme mukavemeti	MPa	77	1550	7
Enine basma mukavemeti	MPa	42	1550	7
Kayma mukavemeti	MPa	36	35	21
Özgül ağırlık	-	1.8	2.5	1.4

2.3. Kompozit Malzeme Mekanik

2.3.1. Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi

Kompozit bir bileşenin mekanik davranışlarını öngörmek için öncelikle gerilme-şekil değiştirme bağlantıları incelememiz gerekir. Genelleştirilmiş hooke konununun üç boyutlu anizotropik malzeme için denklem 2.1'deki gibi yazılır. [22]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & S_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de verilen C matrisi rijitlik matrisi olarak adlandırılır ve benzer şekilde denklem (2.2)'deki gibide yazılabilir.

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de verilen S matrisi esneklik matrisi olarak adlandırılır ve benzer şekilde denklem (2.4)'deki gibi yazılır.

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (2.4)$$

Eğer malzemede, karşılıklı olarak birbirine dik üç malzeme simetri düzlemi varsa malzeme ortotropik malzeme olarak adlandırılır. Ortotropik malzemede dokuz bağımsız elastik sabiti mevcuttur. Rijitlik matrisi denklem 2.5'deki gibi yazılır. [22]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Rijitlik [C] matrisi mühendislik sabitleri cinsinden denklem 2.6'daki gibi yazılır. [29]

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}}{\Delta \cdot E_2 \cdot E_3}, \quad C_{12} = \frac{\nu_{21} - \nu_{31} \cdot \nu_{23}}{\Delta \cdot E_2 \cdot E_3} = \frac{\nu_{12} - \nu_{32} \cdot \nu_{13}}{\Delta \cdot E_1 \cdot E_2} \\ C_{13} &= \frac{\nu_{31} - \nu_{21} \cdot \nu_{32}}{\Delta \cdot E_2 \cdot E_3} = \frac{\nu_{13} - \nu_{12} \cdot \nu_{23}}{\Delta \cdot E_1 \cdot E_2}, \quad C_{22} = \frac{1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}}{\Delta \cdot E_1 \cdot E_3} \\ C_{23} &= \frac{\nu_{32} - \nu_{12} \cdot \nu_{31}}{\Delta \cdot E_1 \cdot E_2} = \frac{\nu_{23} - \nu_{21} \cdot \nu_{13}}{\Delta \cdot E_1 \cdot E_2}, \quad C_{33} = \frac{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}{\Delta \cdot E_1 \cdot E_2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$C_{44} = C_{23}, \quad C_{55} = C_{13}, \quad C_{66} = C_{12}$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21} - \nu_{23} \cdot \nu_{32} - 2 \cdot \nu_{21} \cdot \nu_{32} \cdot \nu_{13}}{E_1 \cdot E_2 \cdot E_3}$$

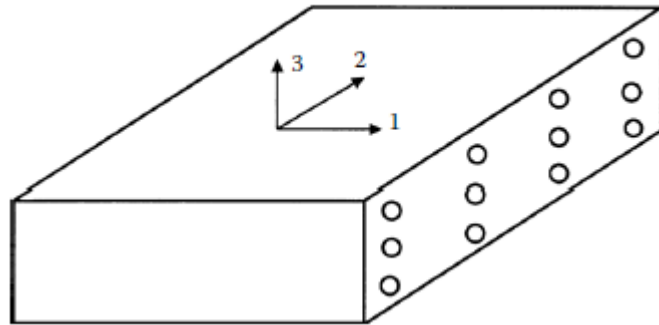
Benzer şekilde ortotropik malzeme için esneklik matrisi denklem 2.7'deki gibi yazılır.[22]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Ortotropik malzemeler için [S] esneklik matrisi mühendislik sabitleri cinsinden denklem 2.8'deki gibi yazılır. [22]

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Şekil 2.12 de Ortotropik bir malzemede fiber düzlemine dik iki simetrik düzlemi olduğundan malzeme ortotropik kabul edilir. [22]



Şekil 2.12 Ortotropik malzemeye örnek olarak verilebilecek lamina [22]

Ortotropik bir malzemeye, ana düzlemlerinden biri izotropi düzlemi olduğunda enlemesine (transvörlü) izotropik malzeme denir. Denklem 2.9’da enine izotropik malzeme için rijitlik $[C]$ matrisi verilmiştir. [30]

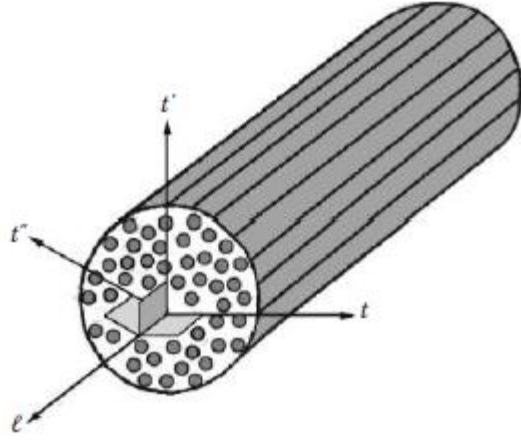
$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Enine izotropik malzemede rijitlik $[C]$ matrisleri denklem 2.10’deki gibi yazılabilir.

$$C_{22} = C_{33}, C_{12} = C_{13}, C_{55} = C_{66}, C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \quad (2.10)$$

Enine izotropik malzemede esneklik $[S]$ matrisi denklem 2.11’deki gibi yazılır.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$



Şekil 2.13 Enine izotropik malzeme [21]

Bir izotropik malzeme, bir noktadan sonsuz sayıda malzeme simetri düzlemi ile karakterize edilebilir. Böyle bir malzeme için malzeme sabitlerinde, 1, 2 ve 3 numaralı alt simgeler birbiri yerine kullanılabilir. İzotropik malzeme için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir. [30]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

İzotropik malzeme için C sabitleri aşağıdaki gibi yazılabilir

$$C_{11} = C_{22} , C_{12} = C_{23} , C_{66} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2}$$

$$C_{11} = \frac{E \cdot (1 - \nu)}{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)} \quad (2.13)$$

$$C_{12} = \frac{\nu \cdot E}{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 + \nu)}$$

Benzer şekilde esneklik [S] matrisi denklem 2.13'deki gibi yazılır

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Eğer bir malzemede simetri düzlemi varsa malzeme monoklinik malzeme olarak adlandırılır ve 13 adet bağımsız elastik sabiti vardır. [31]

Monoklinik malzemenin rijitlik [C] matrisi denklem 2.15'deki gibi yazılır.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Ortotropik malzemeler için düzlem gerilme durumu gözönüne alındığı zaman $\sigma_3 = 0$, $\tau_{31} = 0$, $\tau_{23} = 0$ dır. Düzlem gerilme durumu gözönüne alındığında ortotropik malzemeler için esneklik matrisi denklem 2.16'daki gibi yazılır. [31]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'nın tersi alınarak gerilme-şekil değıştirme bağıntısı denklem 2.17'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Burada Q_{ij} , indirgenmiş rijitlik katsayılarıdır.

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12}^2}$$

$$Q_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12}^2}$$

$$Q_{22} = -\frac{S_{11}}{S_{11} \cdot S_{22} - S_{12}^2}$$

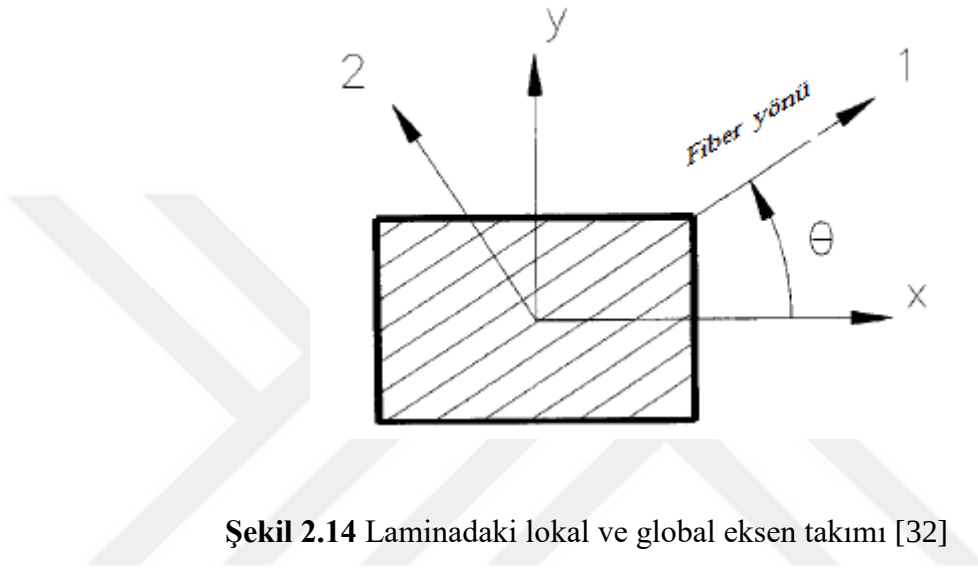
$$Q_{66} = \frac{1}{S_{66}}$$
(2.18)

Düzlem gerilme kabul edilmiş ortotropik malzeme mühendislik sabitleri cinsinden denklem 2.19'daki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Laminatlar yaygın olarak farklı açılarda laminalardan meydana gelir bu durumun en önemli nedeni farklı açılarda mukavemeti artırmaktır.

Açılı bir laminayı gözönüne aldığımızda global ve lokal eksenlerden oluşur. x-y koordinat sistemindeki eksenler global eksen, 1-2 yöndeki eksenler ise lokal eksenler olarak adlandırılır. Eksenler arasındaki açı θ ile gösterilir. Şekil 2.14’ de global ve lokal eksenler gösterilmiştir. [22]



Şekil 2.14 Laminadaki lokal ve global eksen takımı [32]

1-2 kordinat sistemi ile x-y koordinat sistemi arasında $[T]$ dönüşüm matrisini kullanılarak aşağıdaki denklem yazılır. [22, 29]

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Burada $[T]$, dönüşüm matrisi olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi yazılır. [22]

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2 \cdot s \cdot c \\ s^2 & c^2 & 2 \cdot s \cdot c \\ s \cdot c & -s \cdot c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2 \cdot s \cdot c \\ s^2 & c^2 & -2 \cdot s \cdot c \\ -s \cdot c & s \cdot c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} C &= \cos(\theta) \\ S &= \sin(\theta) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Global ve lokal şekil değiştirmeler, dönüşüm matrisi ile aşağıdaki şekilde ifade edilir. [22]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.4. Kompozit Tank Üretim Yöntemleri

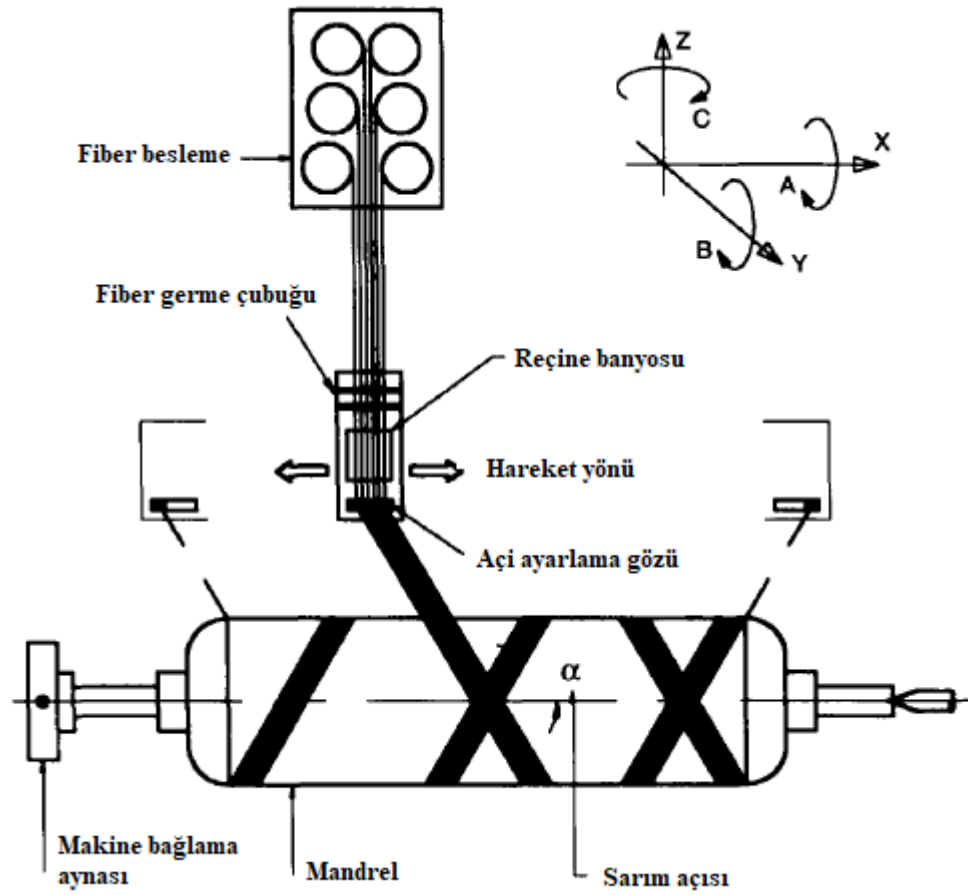
Kompozit tanklar, iki ana kısımdan meydana gelir. İç kısımda sızdırmazlığı sağlayan plastik veya metal astar kısım, dış kısımda asıl yükü taşıyan kompozit sarım kısmıdır. İç kısımdaki astarın sızdırmazlık görevi yanında kompozit tanka gelen yükleri eşit şekilde dağıtmaktır. Kompozit malzemelerin düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemete sahip olması nedeniyle tasarlanan kompozit tank diğer kompozit tanklara oranla daha hafif olmasını sağlamaktadır. Kompozit tanklar piyasada silindir, koni ve küre şeklinde bulunmaktadır. Piyasada daha çok silindir tanklar tercih edilir. [11]

Kompozit tanklar filaman sargı yöntemiyle üretilmektedir. Filaman sargı yönteminin kutupsal sargı, helisel sargı ve çembersel sargı yöntemi olarak 3'e ayrılır.

2.4.1. Filaman Sargı Yöntemi

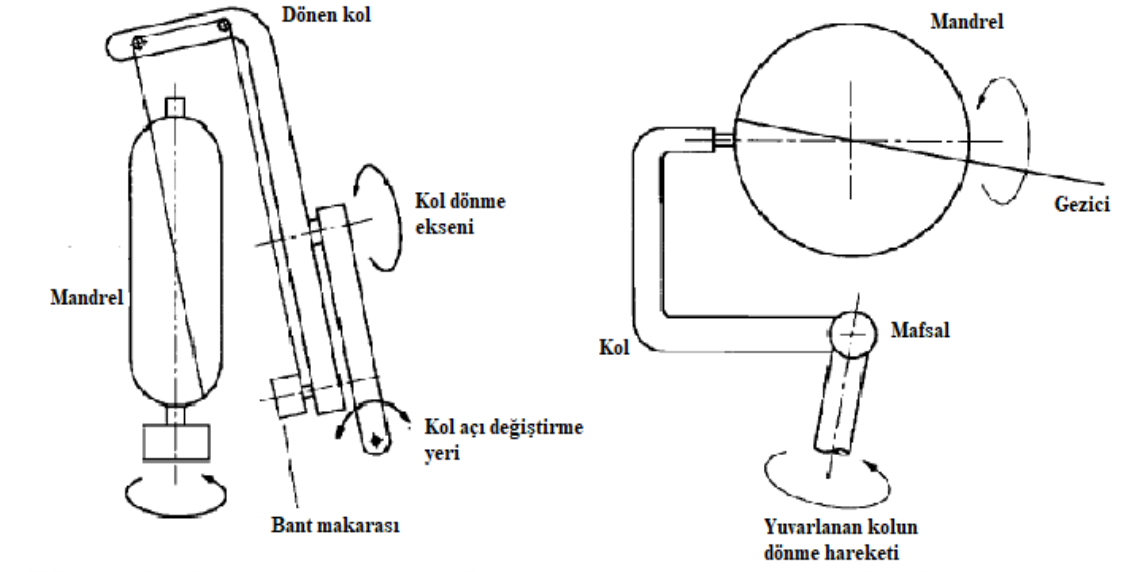
Filaman sargı yöntemi, dönme eksenine sahip kompozit parçaların üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.15'de filaman sargı yönteminin taslağı gösterilmiştir. Yöntemin çalışma prensibi, fiberler makaradan geçirilerek

reçine banyosuna yönlendirilir ve reçine emdirilmiş fiberler hareketli ve dönen x eksenli mandrel üzerine yönlendirilir. Fiberler mandrel yüzeyine x ekseninin dönme ve yatay hareketiyle senkronize bir şekilde sarılır. Uygulamaya bağlı olarak aynı veya farklı açılarda sarılma işlemi gerçekleştirilebilir. Sarımın tüm katmanları uygulandığında reçinenin mandrelle sızmasını önlemek için belli bir sıcaklıkta ısıtılır ve kompozit sargı mandrelinden çıkartılır. Son olarak mandrel temizlenir ve yeni sarma işlemi için hazır bekletilir. [11, 33]

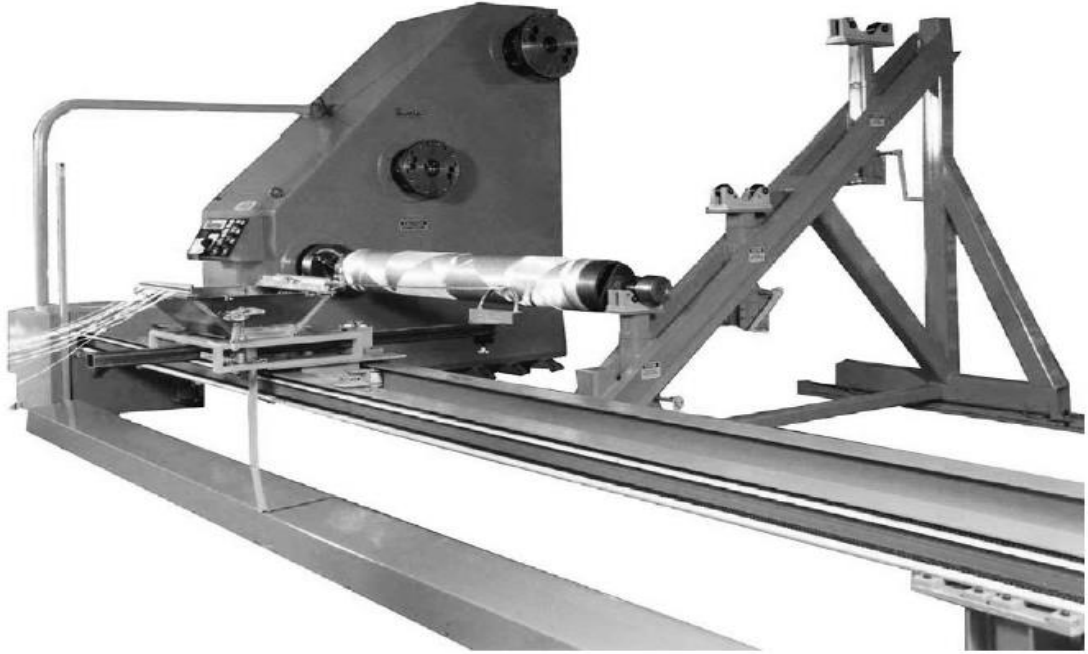


Şekil 2.15 Filaman sargı yöntemi [33]

Boşluk ve hata içermeyen iyi bir laminat üretmek için reçine emdirilmiş fiberin çıkış ucunun mandrel yüzeyine konumu doğru şekilde ayarlanmalıdır. Sarma miktarı sarma makinesinin büyüklüğüne ve sarılan parçanın boyutuna bağlıdır. [33]



Şekil 2.16 Farklı şekilde tasarlanmış filaman sargı makineleri [33]

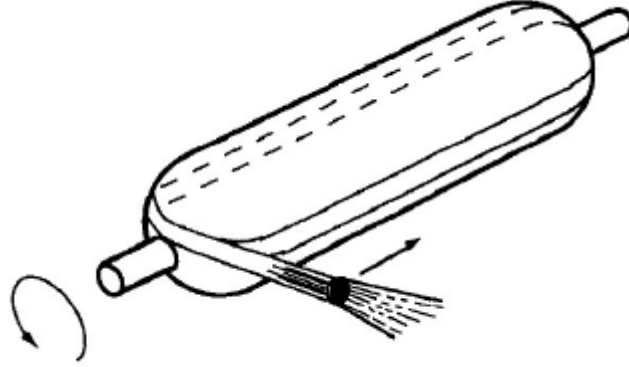


Şekil 2.17 Üç eksenli sarıcı [34]

2.4.1.1. Kutupsal Sargı

Kutupsal sargı yönteminde, mandrel sabit bir şekilde dururken filaman mandrel eksenini boyunca sarılır ve her turun sonunda mandrel belli bir açıda

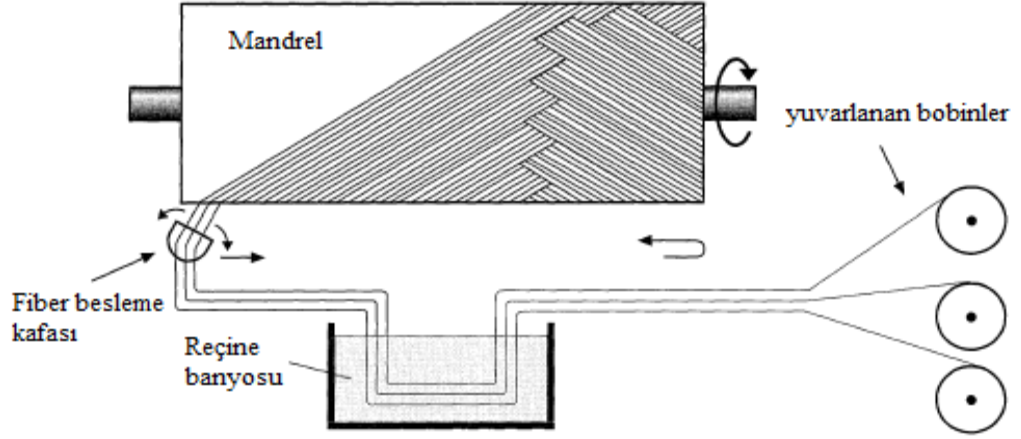
dönderilerek sarma işlemine devam edilir. Kutupsal sargı yönteminde aynı açıda fakat birbirlerinin negatifi şeklinde katmanlar oluşur. Kutupsal sargının açısı tank uzunluğu ve tankın uç kısılarında bulunan bağlantı elemanlarının durumuna göre değişmektedir ve bu nedenden dolayı kontrollü bir sarım açısı gerçekleştirilememektedir. [11]



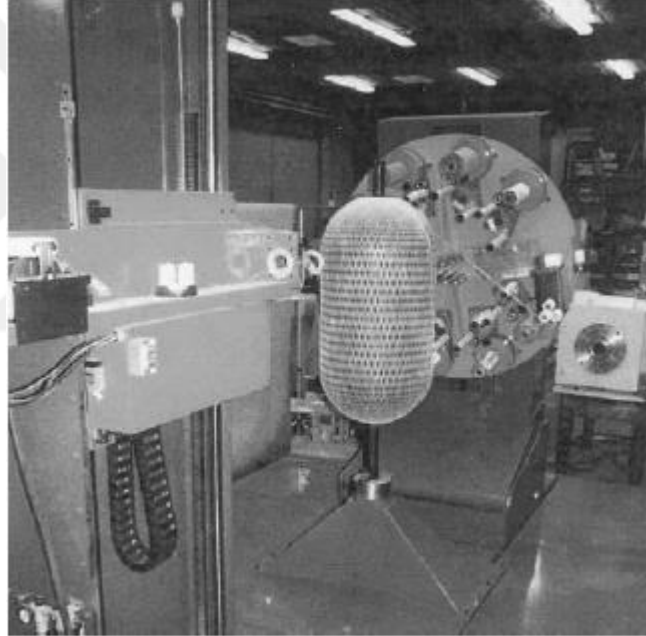
Şekil 2.18 Kutupsal sargı yöntemi [11]

2.4.1.2. Helisel Sargı

Helisel sargı yönteminde, mandrel sürekli dönme hareketi yaparken filaman mandrel eksenini boyunca ileri geri hareketi yaparak sarma işlemini gerçekleştirir. Sarım açısı filaman taşıyıcı hızı ve mandrel dönme hızı ile kontrol edilir. Helisel sargı yönteminde birbirinin negatifi olacak şekilde sarım açısı meydana gelir. Helisel sargı yöntemi kullanılarak farklı açılarda sarma işlemi gerçekleştirilebilir. Bu farklı açılarda sarma özelliği kompozit yapının farklı mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar. [11]



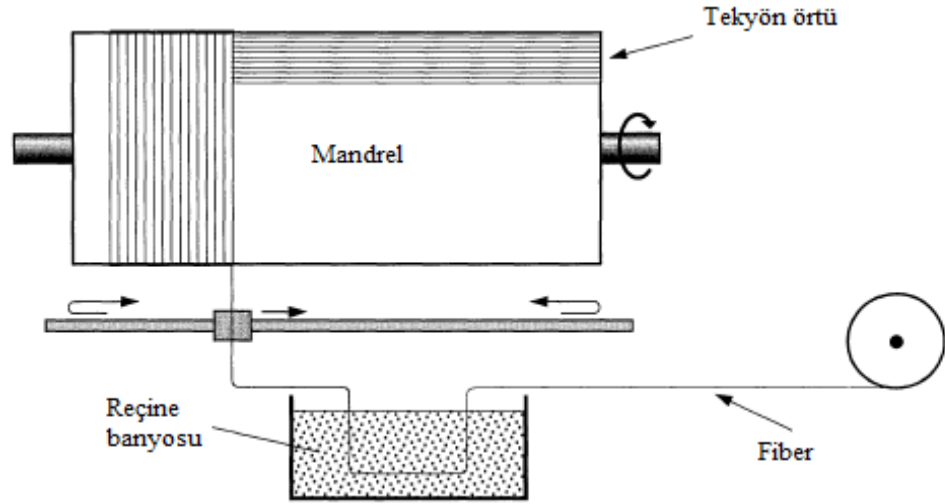
Şekil 2.19 Helisel sargı yöntemi [35]



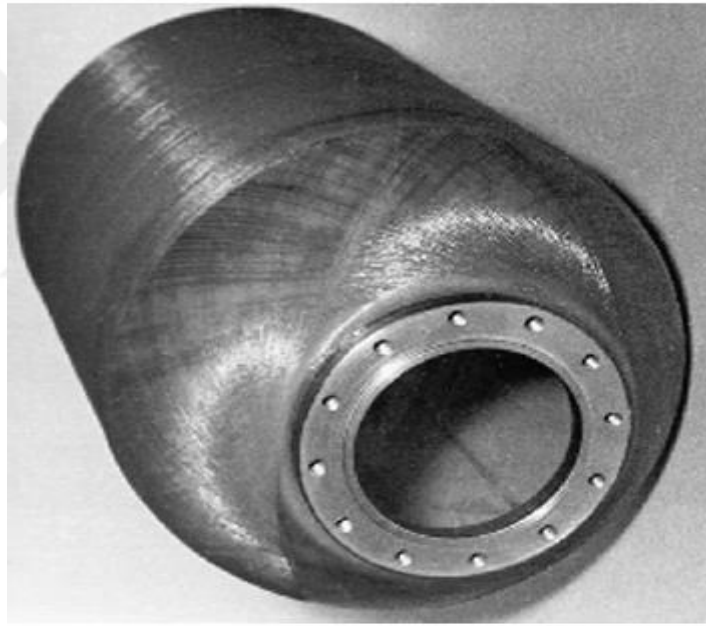
Şekil 2.20 Polar ve helisel sargı [34]

2.4.1.3. Çembersel Sargı

Çembersel sargı yönteminde, mandrel dönme hareketi yaparken filaman 90 derecelik açı ile mandrel dönme eksenine paralel hareket yapar. Helisel sargı yönteminin 90 derecelik özel hali gibi düşünülebilir. [11]



Şekil 2.21 Çembersel sargı [35]

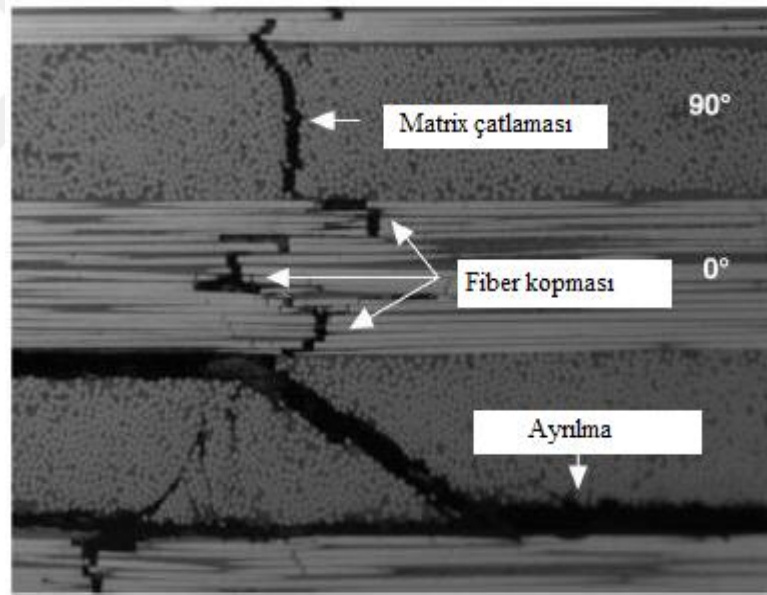


Şekil 2.22 Filaman sargılı basınç tank örneği [36]

2.5. Kompozit Yapılar İçin Hata Kriterleri

Ortotropik malzeme davranışları izotropik malzemelere göre daha karmaşık davranışlar sergilemesi nedeniyle birden çok hata ile karşılaşılabilir. Farklı hata durumlarını tahmin etmek için birden fazla kriter mevcuttur. [37]

- **Çekme Gerilmesi Durumu** : Elyaf yönünde yüksek gerilmeler nedeniyle fiber yönünde bozulmalar meydana gelebilir bu durum fiber hatası olarak adlandırılır. Fiberler etrafında gerilim yoğunluğu nedeniyle matrisde hatalar meydana gelebilir bu hata matris hatası olarak adlandırılır. Gerilimler normal ve maksimum kayma gerilmelerinin etkileşimli bir kombinasyonunu aştığında meydana gelir. [37, 38]
- **Basma Hata Durumu** : Elyaf yönünde sıkışma, matris kesilmesinin yanında burkulmada dahil olmak üzere fiberlerin bozulmasına neden olabilir. Burada mukavemet elyaflara ve matris özelliklerinin yanı sıra matrislerin elyaflara bağlanma/yapışma özelliğinede bağlıdır. Sıkıştırma, matris veya elyafların ezilmesine neden olabilir. [37]
- **Kesme Hata Durumu** : kesme hatası genellikle fiber/matris seviyesindeki gerilme konsantrasyonuna bağlı olarak ortaya çıkar. [37]



Şekil 2.23 Lamina meydana gelebilecek hasar türleri [39]

2.5.1. Maksimum Gerilme Teorisi

Maksimum gerilme teorisine göre, malzeme eksenindeki gerilmelerden herhangi biri sınır değerine ulaşır veya geçerse malzemede hasar gerçekleşir. Hasar oluşması için aşağıdaki kriterler dikkate alınır. [30]

$$\sigma_1 = \begin{cases} F_{1t} & \sigma_1 > 0 \\ -F_{1c} & \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\sigma_2 = \begin{cases} F_{2t} & \sigma_2 > 0 \\ -F_{2c} & \sigma_2 < 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\tau_{12} > F_6 \quad (2.27)$$

F_{1t} : 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı

F_{2t} : 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı

F_{1c} : 1 yönündeki maksimum basma dayanımı

F_{2c} : 2 yönündeki maksimum basma dayanımı

F_6 : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

2.5.2. Maksimum Şekil Değiştirme Teorisi

Maksimum şekil değiştirme kriteri, maksimum gerilme teorisine oldukça benzerdir. Kompozit malzemenin asal veya global eksenlerinin birinde gerçekleşen şekil değişimi maksimum sınıra ulaşır veya o sınırı aşması durumunda malzemede hasar gerçekleşir. Matematiksel olarak ifade edilmesi aşağıdaki gibidir. [35]

$$-X_{\varepsilon c} < \varepsilon_L < X_{\varepsilon t}$$

$$-Y_{\varepsilon c} < \varepsilon_L < Y_{\varepsilon t} \quad (2.28)$$

$$-S_{\varepsilon} < \tau_{LT} < S_{\varepsilon}$$

$X_{\varepsilon c}$: Fiber yönünde maksimum basma şekil değiştirmesi

$X_{\varepsilon t}$: Fiber yönünde maksimum çekme şekil değiştirmesi

$Y_{\varepsilon c}$: Fibere dik yönde (transverse) maksimum basma şekil değiştirmesi

$Y_{\varepsilon t}$: Fibere dik yönde (transverse) maksimum çekme şekil değiştirmesi

S_ε : Maksimum kesme şekil değıştirmesi

Eğer fiberlerler lamidana açılı bir şekilde konumlanmış ise aşağıdaki denklemler dikkate alınır. [35]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Şekil değıştirmeler mühendislik sabitleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_L = \frac{(\sigma_L - \nu_{LT} \cdot \sigma_T)}{E_L} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon_T = \frac{(\sigma_T - \nu_{TL} \cdot \sigma_L)}{E_T} \quad (2.31)$$

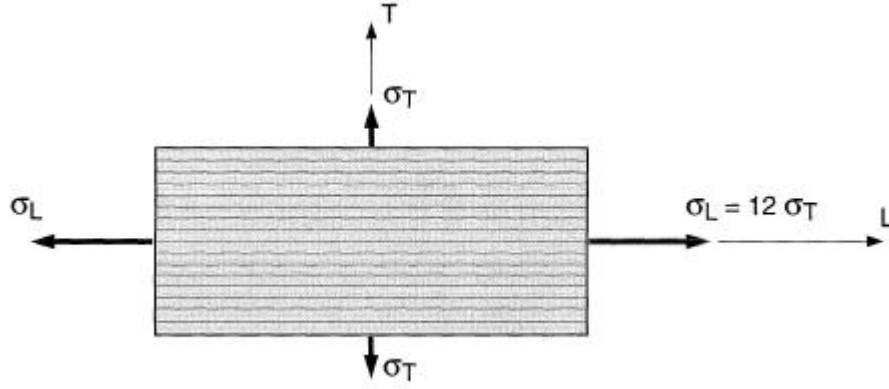
$$\gamma_{LT} = \frac{\sigma_{LT}}{G_{LT}} \quad (2.32)$$

Maksimum değeri bulabilmek için aşağıdaki eşitlikler yazılır.

$$X_{\varepsilon t} = \frac{X_t}{E_L}, \quad X_{\varepsilon c} = \frac{X_c}{E_L} \quad (2.33)$$

$$Y_{\varepsilon t} = \frac{X_t}{E_L}, \quad Y_{\varepsilon c} = \frac{X_c}{E_L}$$

$$S_\varepsilon = \frac{S}{G_{LT}} \quad (2.34)$$



Şekil 2.24 Laminada düzlem gerilme durumu [35]

2.5.3. Tsai-Hill Hasar Teorisi

Anizotropik malzemeler için geliştirilmiş bir teoridir. İzotropik malzemeler için geliştirilmiş von-mises çarpılma kriterini baz alır. Cisimlerdeki şekil değiştirme iki ana unsurdan oluşur. Birincisi dilatasyon enerjisi, ikincisi distorsiyon (çarpılma) enerjisidir. Dilatasyon enerjisi hacim değişimine bağlı, distorsiyon ise şekil değişimine bağlıdır. Teoriye göre çarpılma enerjisi, hasar çarpılma enerjisinden daha büyük olduğunda malzemede hasar gerçekleşir. Hasarın belirlenebilmesi için aşağıdaki eşitsizlik kullanılır. [22]

$$\left[\frac{\sigma_1}{(\sigma_1^T)_{ult}} \right]^2 - \left[\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{(\sigma_1^T)^2_{ult}} \right] + \left[\frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}} \right]^2 < 1 \quad (2.35)$$

$(\sigma_1^T)_{ult}$: 1 Yönünde maksimum boylamasına çekme kuvveti

$(\sigma_2^T)_{ult}$: 2 Yönünde maksimum transverse (enine) çekme kuvveti

$(\tau_{12})_{ult}$: 1-2 Yönünde maksimum kayma mukavemeti

2.5.4. Tsai-Wu Hasar Teorisi

Teori temel olarak, beltrami toplam şekil değiştirme enerjisi hasar teorini esas alır. Tsai-wu, düzlem gerilmeye maruz laminaya teoriyi uygulamıştır. Anizotropik malzemeler için geliştirilmiştir ve aşağıdaki denklem gerilme bileşenlerinin polinom fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. [11, 22, 40]

$$H_1 \cdot \sigma_1 + H_2 \cdot \sigma_2 + H_6 \cdot \tau_{12} + H_{11} \cdot \sigma_1^2 + H_{22} \cdot \sigma_2^2 + H_{66} \cdot \tau_{12}^2 + 2 \cdot H_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 < 1 \quad (2.36)$$

Tsai-Wu hasar teorisi, Tsai-Hill hasar teorisinden daha geniş kapsamlıdır. Bunun nedeni laminanın basma ve çekme kuvvetlerinin ikisinde hesaba dahil edilmesidir. Burada H sabitleri aşağıdaki gibi bulunabilir. [22]

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (2.37)$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} \cdot (\sigma_1^C)_{ult}} \quad (2.38)$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} \quad (2.39)$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult} \cdot (\sigma_2^C)_{ult}} \quad (2.40)$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2} \quad (2.41)$$

H_{12} nin bulunması için bazı formüller vardır.

- Tsai – Hill teorisine göre

$$H_{12} = -\frac{1}{2 \cdot (\sigma_1^T)_{ult}^2} \quad (2.42)$$

- Hoffman kriterine göre

$$H_{12} = -\frac{1}{2 \cdot (\sigma_1^T)_{ult} \cdot (\sigma_1^C)_{ult}} \quad (2.43)$$

- Mises-Hencky kriterine göre

$$H_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} \cdot (\sigma_1^C)_{ult} \cdot (\sigma_2^T)_{ult} \cdot (\sigma_2^C)_{ult}}} \quad (2.44)$$

2.5.5. Hashin Hasar Teorisi

Hashin hasar teorisi diğer hasar teorilerine göre biraz daha ayrıntılıdır yanı bu teoride hasar şeklide ayırt edilebilmektedir. Bu sebepten dolayı daha fazla tercih edilen bir hasar teorisidir. [41, 42]

- Matris çekme hasarı, $\sigma_1 > 0$ için

$$\left(\frac{\sigma_1}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (2.45)$$

- Matris basma hasarı, $\sigma_2 < 0$ için

$$\left(\frac{\sigma_1}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (2.46)$$

- Fiber çekme hasarı, $\sigma_1 > 0$ için

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (2.47)$$

- Fiber basma hasarı, $\sigma_1 < 0$ için

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \geq 1 \quad (2.48)$$

- Fiber-Matris arası kesme (kayma) hasarı, $\sigma_1 < 0$ için

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (2.49)$$

X_C : Maksimum basma kuvveti (1 yönünde)

X_T : Maksimum çekme kuvveti (1 yönünde)

Y_C : Maksimum basma kuvveti (2 yönünde)

Y_T : Maksimum çekme kuvveti (2 yönünde)

S_{12} : Maksimum kayma gerilmesi (1-2 düzleminde)

S_{13} : Maksimum kayma gerilmesi (1-3 düzleminde)

S_{23} : maksimum kayma gerilmesi (2-3 düzleminde)

Hashin hasar teorisinde, normal gerilmelerin yanında kayma gerilmeleride denkleme eklenmiştir. Maksimum şekil değiştirme ve maksimum gerilme teorilerinde kayma gerilmeleri dikkate alınmamıştır. Hashin hasar teorisi, hasar şekillerinide belirlediği için daha çok tercih edilen bir hasar teorisidir. [43]

3. DENEYSEL KISIM

3.1. Tank Tasarımı

Tez çalışmasında Onur Sayman ve arkadaşlarının [5] çalışması göz önünde bulundurulmuştur. Onur Sayman ve arkadaşlarının [5] simetrik ve asimetrik kabuklara uygun açılı katlı yönelimleri için tasarlanmış filamanın maksimum patlama basıncını incelemişlerdir. Filaman sargılı kompozit basınç tanklarının patlama basıncı farklı teoriler altında iç basıncı incelemişlerdir. Filaman sargılı kompozit basınçlı tanklar üzerine sarım açısı ve sıcaklığın etkisine değinilmiştir. Borularda patlama basıncını doğrulamak için Tsai – Wu hata kriteri, maksimum şekil değiştirme ve gerilme teorisini kullandılar. Bu çözümü farklı yönelim açıları için tartıştılar ve sundular. Kapalı uçlu durum için test yaptılar ve E-glass-epoksi kullanarak camla güçlendirilmiş plastik boru üretimini yaptılar. Test numunesi 4 tabakaya ve farklı yönelim açlarına sahiptir. Tabakalar simetrik ve asimetrik olarak konumlandırılmıştır.

Bu çalışma için PLC kontrollü hidrolik makine kullanmışlardır. Hidrotermal ve diğer mekanik özellikler e-glass epoksi düz kompozit tabakadan ölçülmüştür. Bazı analitik ve deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar çözümü karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar metodu olarak ansys 10.0 kullanılmıştır. Bazı yönelimler için analitik ve deneysel sonuçlar arasında yakın sonuçlar elde etmişlerdir.

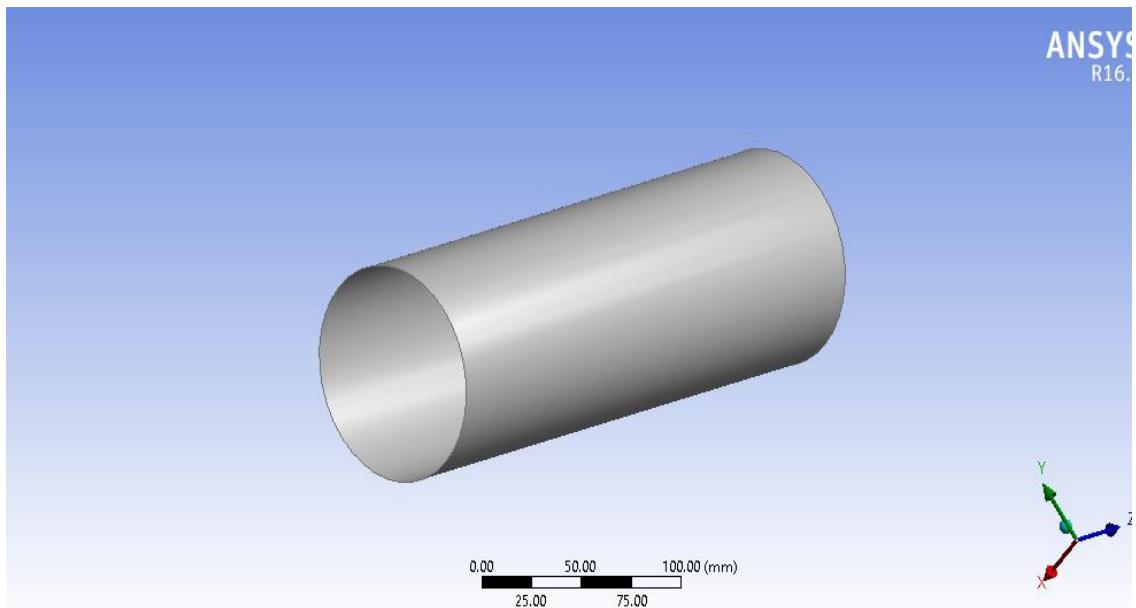
Literatür çalışmaları dikkate alınarak yapılan bu çalışmada ANSYS workbench yazılımı kullanılarak tank tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda patlama basıncını artırmak için farklı kalınlıkta aynı malzeme miktarı (hacim) kullanarak birkaç tasarım oluşturulmuştur. Çalışmanın en önemli noktası malzeme miktarını artırmadan tasarımda değişiklik yaparak patlama basıncını artırmaktır.

3.2. Tank Tasarım Akış Şeması

	A
1	ACP (Pre)
2	Engineering Data ✓
3	Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Parameters

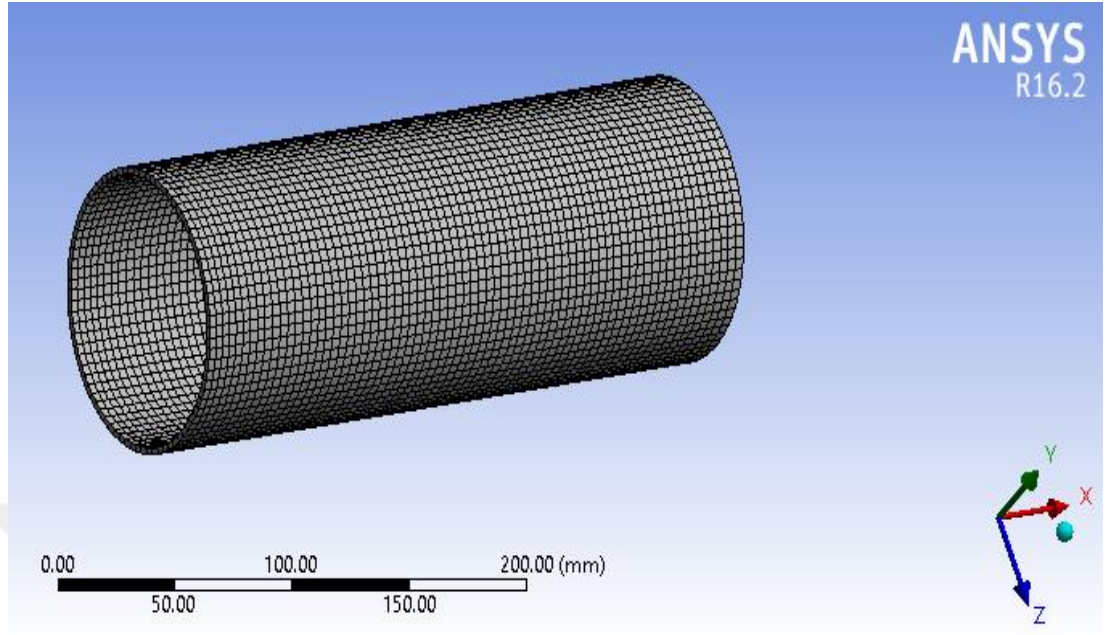
Şekil 3.1 Tank tasarım akış şeması

Tank tasarımı gerçekleştirirken ANSYS (16.2) programının ACP(pre) modülü kullanılmıştır. Akış şemasının geometri kısmında tank ilk olarak yüzey şeklinde modellenir. Tank modellerken tankın uç kısımları tasarıma dahil edilmemiş ve sadece silindirik kısımlar dikkate alınmıştır. İlk olarak 6 katmanlı tank tasarlanmıştır ve diğer tank tasarımları ile karşılaştırılmıştır. 6 katmanlı tank'ın et kalınlığı 2.4 mm dir.



Şekil 3.2 Tank geometrisi

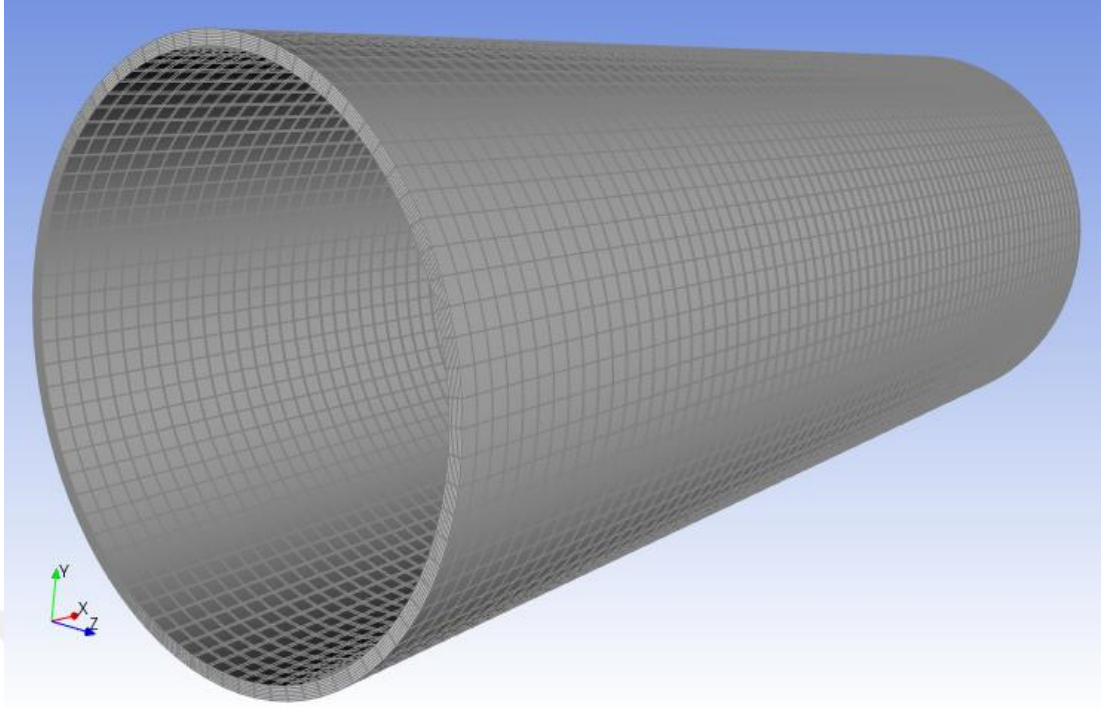
Yüzeysel geometrisi oluşturan tank daha sonra model kısmında mesh atılır.



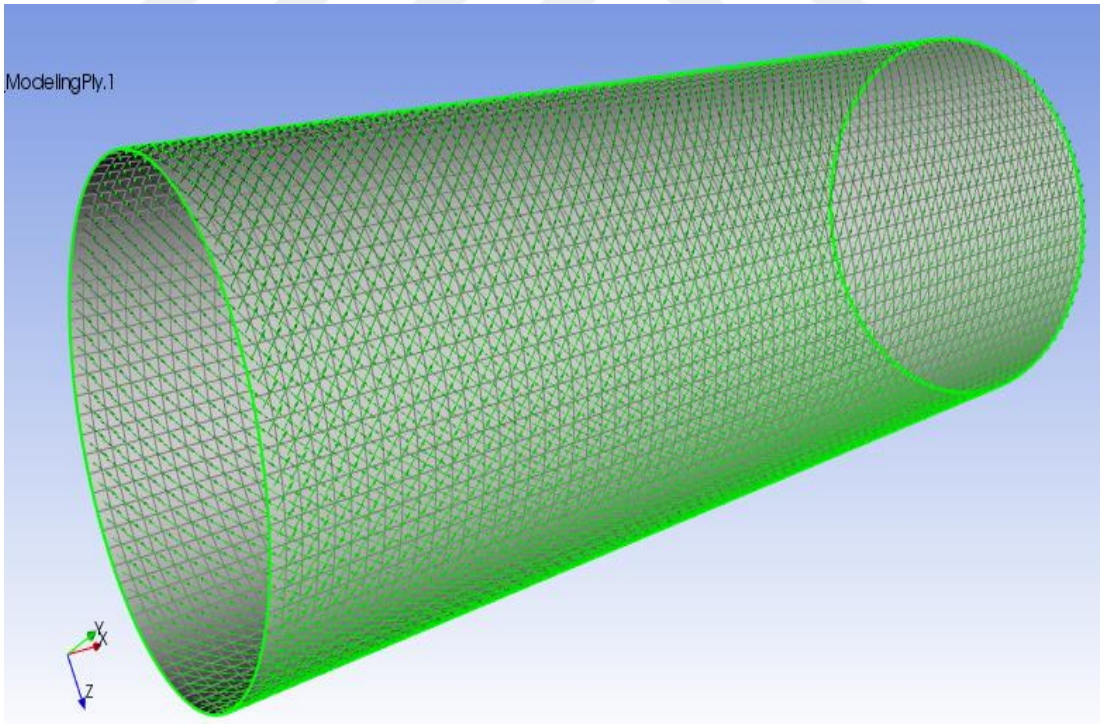
Şekil 3.3 Tank mesh görüntüsü

Model kısmında mesh işlemi uygulandıktan sonra setup kısmında kompozit modelleme gerçekleştirildi.

Setup kısmında katman sayıları, fiber açıları, katman kalınlıkları gibi özellikler yanı kompozit malzeme tanımlaması için gerekli tüm değerler oluşturulur.



Şekil 3.4 Tank katman görüntüsü



Şekil 3.5 Fiber yönlenmesi örneği

Akış şemasının ilk basamağı alan malzeme seçimi ansys malzeme kütüphanesi kullanılarak karbon epoksi ve E-cam epoksi seçilmiştir.

Tablo 3.1 E-Cam epoksi özellikleri [44]

Malzeme özellikleri	Birim	Değer	Malzeme özellikleri	Birim	Değer
E_1	GPa	45	X_c	MPa	-675
E_2	GPa	10	Y_c	MPa	-120
E_3	GPa	10	Z_c	MPa	-120
G_{12}	MPa	5000	S_{12}	MPa	80
G_{23}	MPa	3846.2	S_{23}	MPa	46.154
G_{13}	MPa	5000	S_{13}	MPa	80
ν_{12}	-	0.3			
ν_{23}	-	0.4			
ν_{13}	-	0.3			
X_t	MPa	1100			
Y_t	MPa	35			
Z_t	MPa	35			

Tablo 3.2 Karbon epoksi özellikleri [44]

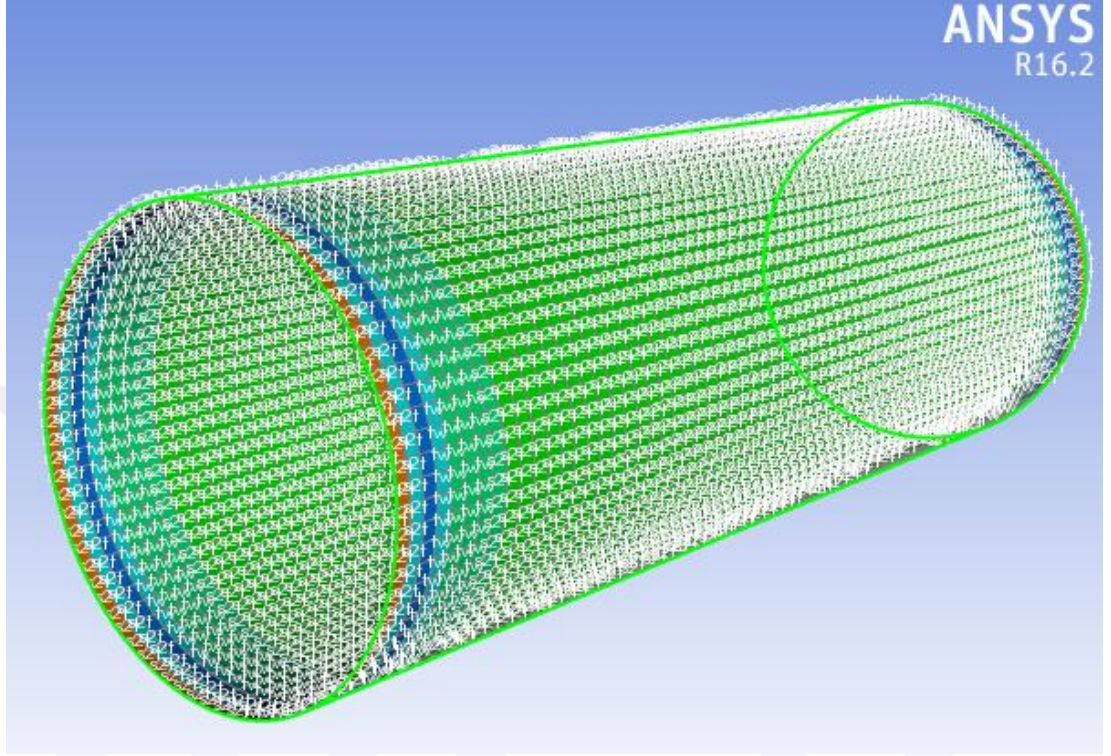
Malzeme özellikleri	Birim	Değer	Malzeme özellikleri	Birim	Değer
E_1	GPa	121	X_c	MPa	-1082
E_2	GPa	8.6	Y_c	MPa	-100
E_3	GPa	8.6	Z_c	MPa	-100
G_{12}	MPa	4700	S_{12}	MPa	60
G_{23}	MPa	3100	S_{23}	MPa	32
G_{13}	MPa	4700	S_{13}	MPa	60
ν_{12}	-	0.27			
ν_{23}	-	0.4			
ν_{13}	-	0.27			
X_t	MPa	2231			
Y_t	MPa	29			
Z_t	MPa	29			

3.3. Karbon Epoksi İçin Patlama Basıncı Analizi

Patlama basıncı analizini gerçekleştirebilmek için kompozit tankın her iki tarafı sabitlenerek farklı değerlerde iç basınç uygulandı. Vasovic İ. [45] , Shultz M , Smith L [46], Radulovic J, Maksimovic K [47] ve Sayman O ve arkadaşları [5] deneysel çalışmasında kompozit tank'ın patlama basıncını bulabilmek için tank'ın her iki tarafını sabitleyecek şekilde düzeneklerde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

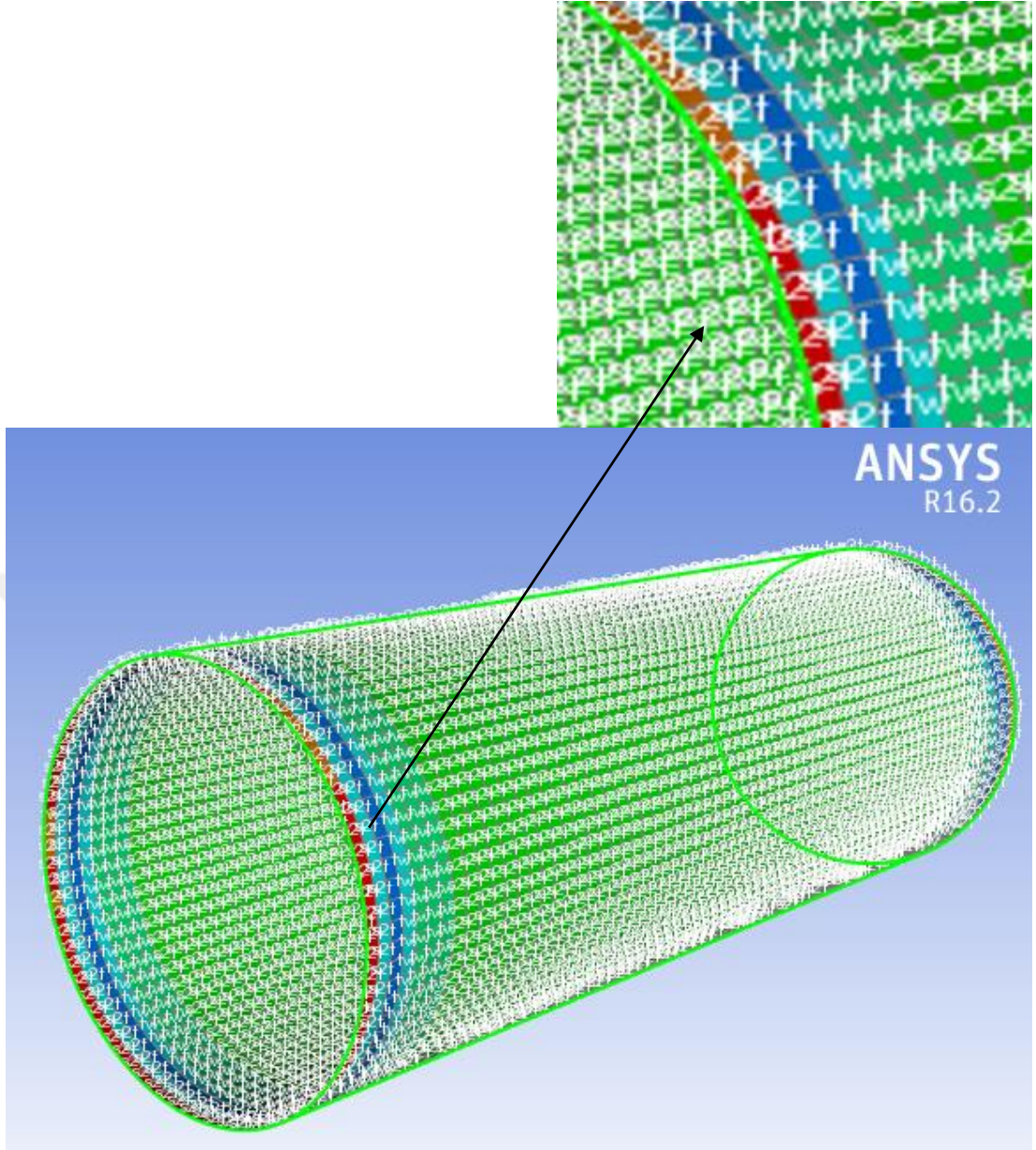
Kompozit tankın hasar alıp almadığı Ansys'in ACP (post) modülünde maksimum stress ve tsai-wu hasar kriterlerine göre patlama basıncı incelendi. Kompozit tankın üzerindeki herbir elemanın renk kodları incelenilen hasar kriterlerinin maksimum değere sahip olduğu hasar kriterini ifade etmektedir. Bu renk

kondlarından üzeri kırmızı olan yerlerde kompozit tankın hasara uğradığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.6 da kompozitin herhangi bir hasar almadığı ancak şekil 3.7 de kompozitin hasar aldığı gözlemlenmektedir.



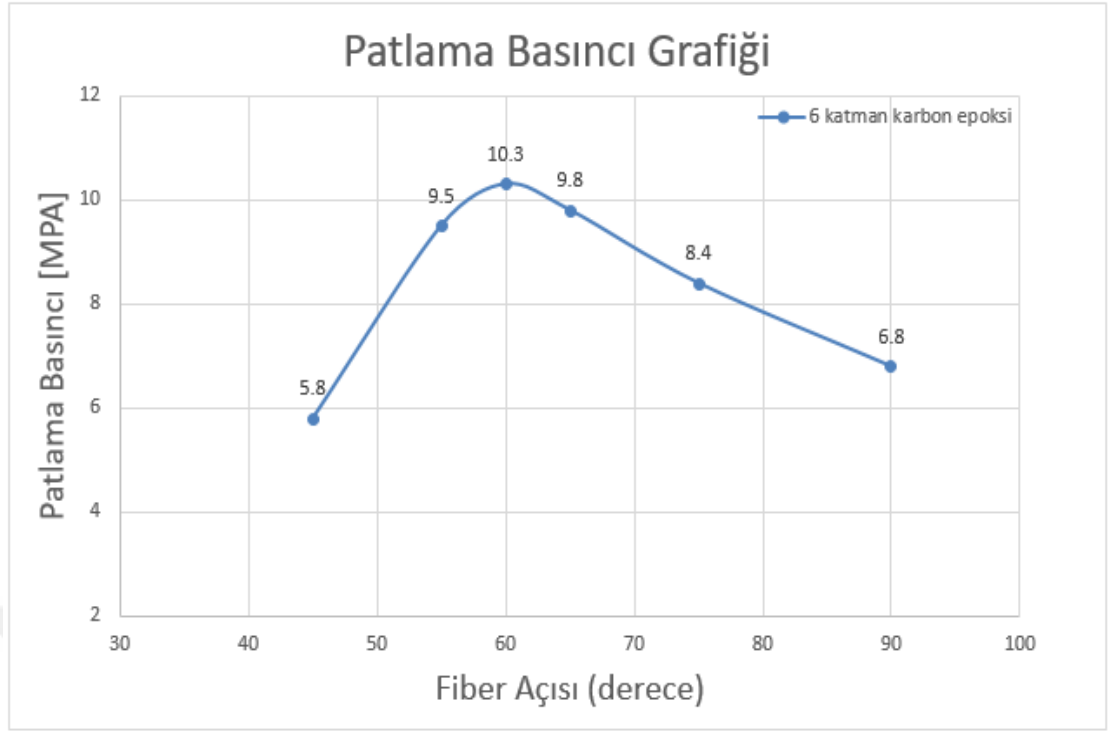
Şekil 3.6 60 ° Sarım açısında ve 10 Mpa basınçdaki karbon epoksi tankın görüntüsü

Karbon epoksi tanka 100 bar basınç uygulandığında tankın sabitlendiği yerde maksimum stress ve Tsai-wu hata kriterine göre henüz patlamadığı görülmektedir.



Şekil 3.7 60 ° Sarım açısında ve 10.3 Mpa basınçdaki karbon epoksi tankın görüntüsü

Karbon epoksi tanka 103 bar basınç uygulandığında tankın sabitlendiği yerde maksimum stress kriterine göre patlama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

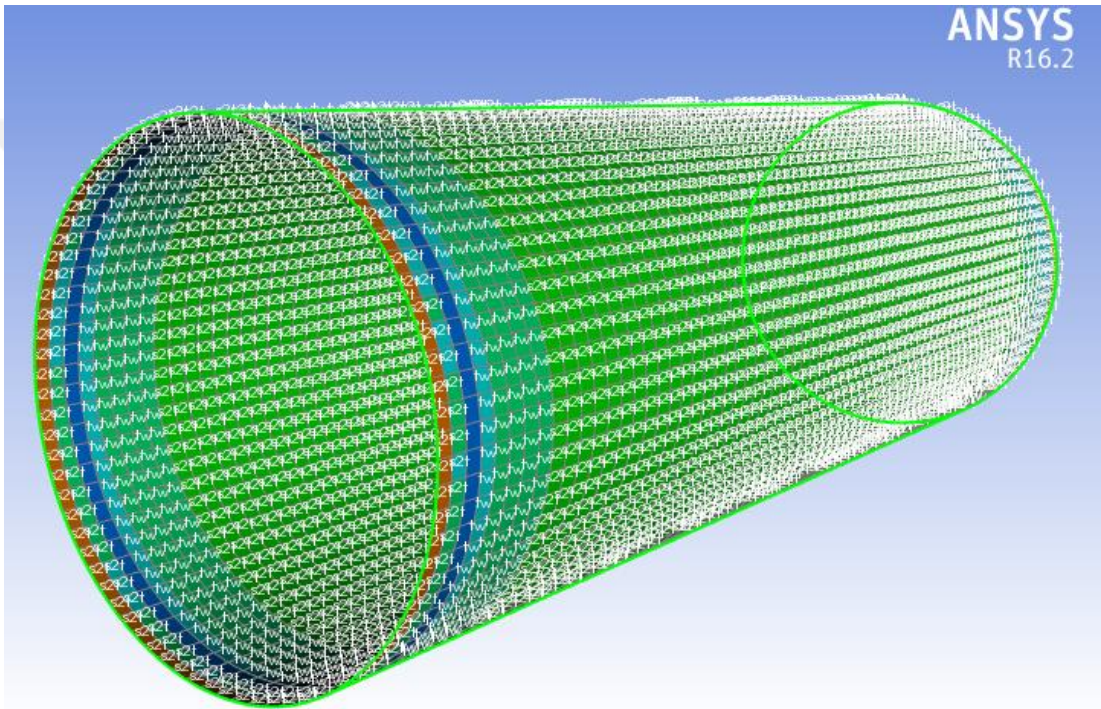


Şekil 3.8 Karbon epoksi tankın fiber açılarına göre patlama basıncı değerleri

Patlama basıncı grafiği incelendiğinde 55° ve 65° arasındaki açılarda maksimum patlama basıncı değerine ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada karbon epoksi için maksimum patlama basıncı 60° olarak belirlenmiştir. Sayman O ve arkadaşları [5] FEM çalışmasında asimetrik durum için tsai-wu, maksimum stress ve maksimum strain hasar kriterlerine göre en uygun açı olarak 60° bulmuştur. Simetrik durum için ise 55° olarak bulmuştur.

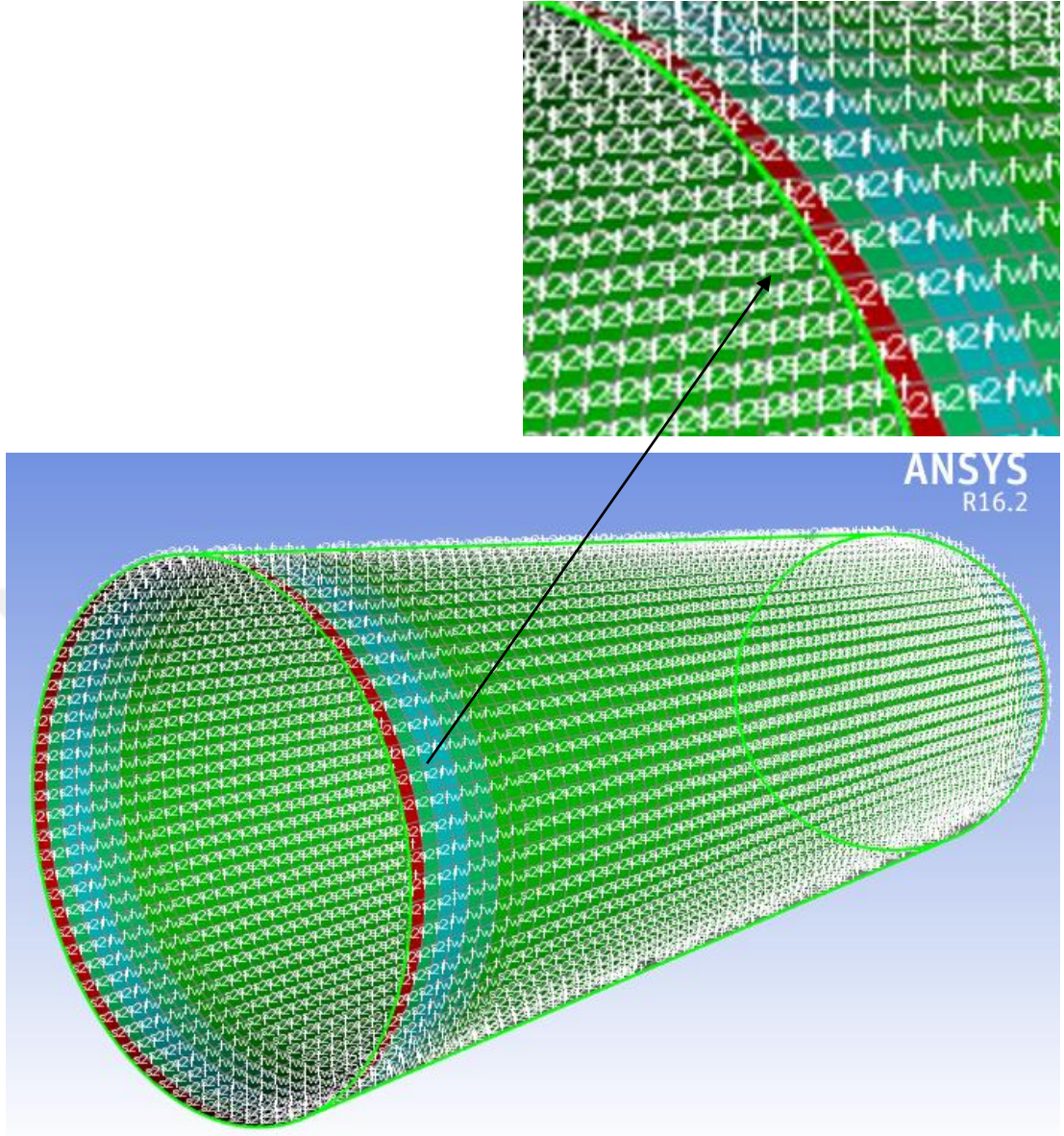
3.4. E-Cam Epoksi İçin Patlama Basıncı Analizi

E-cam epoksi patlama basıncını belirlemek için aynı şekilde tankın her iki ucu sabitlenip farklı değerlerde basınç uygulanarak E-cam epoksi tankın patlama basıncı belirlenmiştir. Karbon epoksi patlama basıncını belirlemek için kullanılan yöntemlere benzer şekilde E-cam epoksi içinde aynı yöntemler uygulandı ve E-cam epoksi tankın patlama basıncı incelendi. Şekil 3.9 da kompozit tankın herhangi bir hasar almadığı gözlemlendi. Şekil 3.10 da kompozit tankın hasar aldığı gözlemlendi.



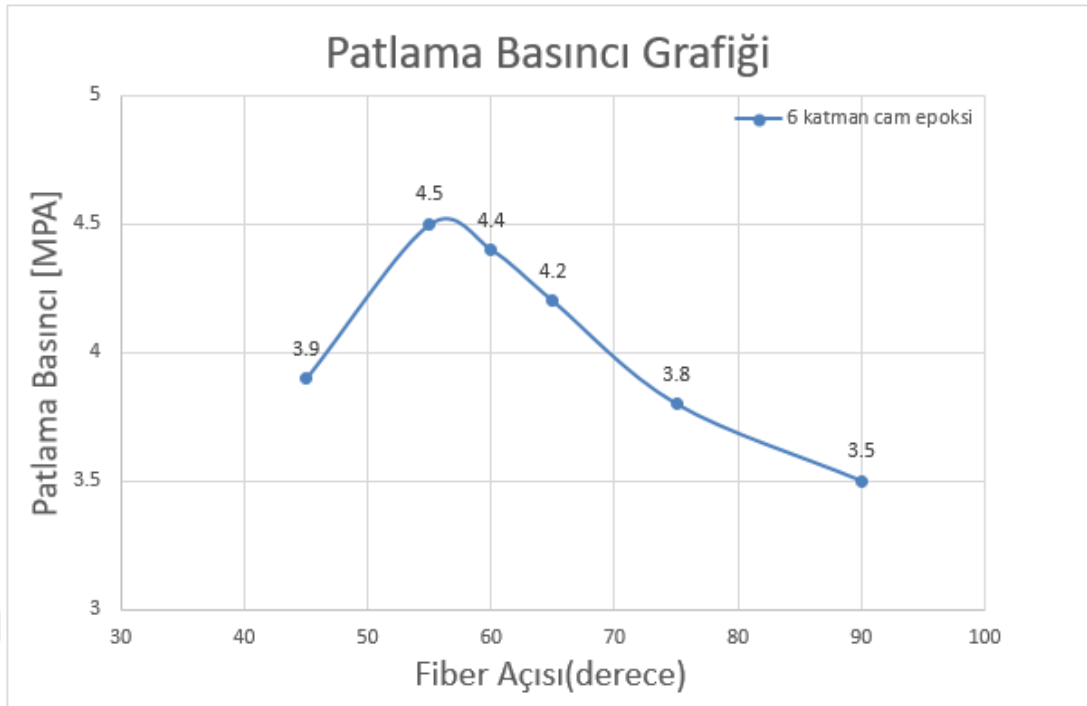
Şekil 3.9 55° Sarım açısında ve 4 Mpa basınçdaki E-cam epoksi tankın görüntüsü

E-cam epoksi tanka 40 bar basınç uygulandığında tankın sabitlendiği yerde maksimum stress ve Tsai-wu hata kriterine göre henüz patlamadığı görülmektedir.



Şekil 3.10 55° Sarım açısında ve 4.5 Mpa basınçdaki E-cam epoksi tankın görüntüsü

E-cam epoksi tanka 45 bar basınç uygulandığında tankın sabitlendiği yerde maksimum stress kriterine göre patlama gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



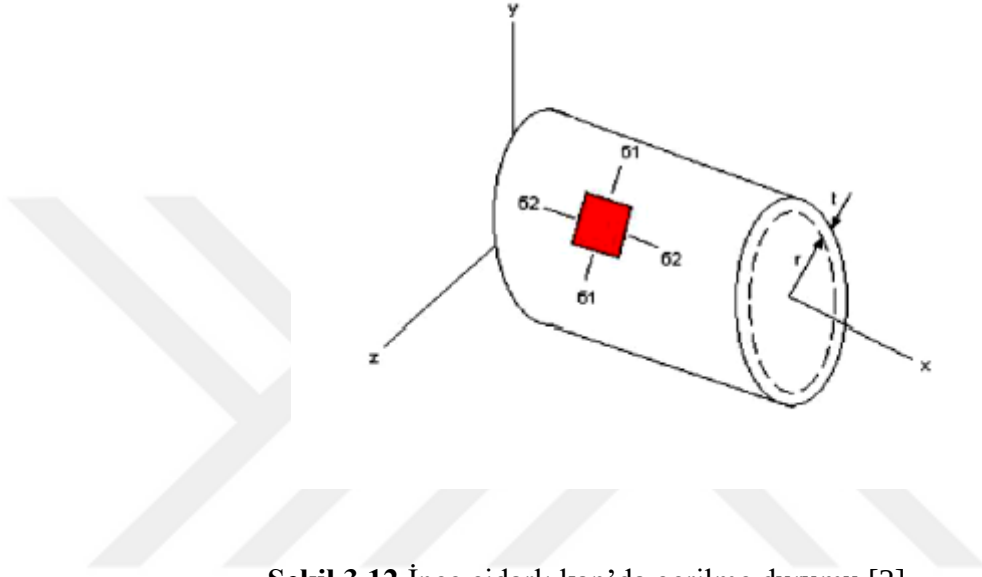
Şekil 3.11 E-cam epoksi tankın fiber açılara göre patlama basıncı değerleri

E-cam epoksi için patlama basıncı grafiği incelendiğinde 55° de maksimum değere ulaştığı gözlemlenmektedir.

Literatür incelendiğinde 55° civarındaki açılarda kompozit sarımın daha dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır. Akgün M.B çalışmasında [2] kompozit boruların yapısal analizini gerçekleştirmiş ve elyaf sarım açılarının patlama basıncına etkisini araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre en uygun katman açısının $\pm 55^\circ$ olduğunu analitik olarak tespit etmiştir. Araştırmasının diğer bir sonucu ise teğetsel ve helisel katmanlarda en uygun sarım açısının $\pm 55^\circ$ olduğunu gözlemlemiştir. Tolga D çalışmasında [15] iç basınca maruz kompozit tankların direncini incelemiştir. İç basınca maruz kompozit lamimat için optimum sarım açısını numerik çalışma sonucu 54° olarak bulmuştur. Kam, T.Y ve arkadaşları [19] kompozit tanklardaki gerilmeyi analitik ve deneysel olarak incelemiştir. Araştırmaları sonucu optimum sarım açısı olarak $\pm 54^\circ$ bulmuşlardır.

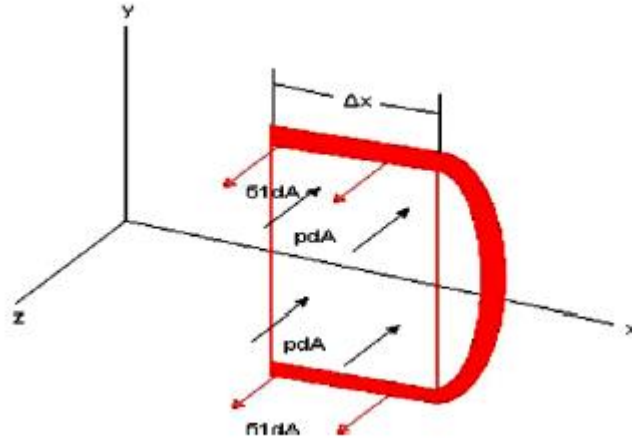
İnce cidarlı basınç kaplarında düzlem gerilme durumu gözönüne alındığında, bu kapların cidarlarının eğilme mukavemeti küçük olduğundan, bir cidar parçasına tesir eden iç kuvvetlerinin kap yüzeyine teğet olarak tesir ettiği kabul edilebilir. Cidar kalınlığı t , iç yarıçapı r olan ve içinde basınçlı bir akışkan taşıyan silindirik bir tank

ele alındığında, cidar yüzeyinde küçük bir eleman üzerine gelen kuvvetler tayin edildiğinde, küçük elemanın kenarlarına herhangi bir kayma gerilmesinin tesir etmeyeceği bilinmektedir. (Akışkanın silindir eksenine göre simetrik olması) Bu nedenle şekil 3.18 de σ_1 ve σ_2 asal gerilmelerdir. Burada şekildende anlaşılaacağı üzere σ_1 gerilmesi radyal gerilme σ_2 gerilmesi eksenel gerilmedir. [48]



Şekil 3.12 İnce cidarlı kap'da gerilme durumu [2]

σ_1 radyal gerilmeyi bulabilmek için bazı yaklaşımlarda bulunulur. Kabın içindeki akışkan dikkate alındığında, xy düzlemi ve aralarında Δx uzaklığı bulunan ve yz düzlemine paralel olan iki düzlemle sınırlı kısım incelenir. (Şekil 3.19) Z doğrultusunda oluşan kuvvetlerin bileşkesi sıfırdır. Z doğrultusunda denge denklemi denklem 3.1'deki gibi yazılabilir. [48]



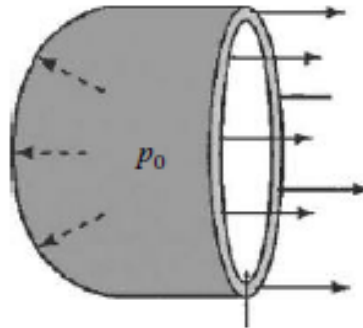
Şekil 3.13 Denge denklemi için kesit görünümü [2]

$$\sum F_z = 0 , \quad \sigma_1 \cdot (2t \cdot \Delta x) - p \cdot (2r \cdot \Delta x) = 0 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'den σ_1 aşağıdaki gibi bulunur

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot r}{t} \quad (3.2)$$

Eksenel σ_2 gerilmesini bulabilmek için x eksenine dik bir kesitle kestiğimizi varsayıp (Şekil 3.20) x ekseninde denge denlemini denklem 3.3'deki gibi yazarız.



Şekil 3.14 İnce cidarlı silindirin x ekseninden kesilmiş kesit görüntüsü [21]

$$\sum F_x = 0, \quad \sigma_2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot t) - p \cdot (\pi \cdot r^2) = 0 \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'den σ_2 aşağıdaki gibi bulunur ;

$$\sigma_2 = \frac{p \cdot r}{2t} \quad (3.4)$$

Helisel bir şekilde sarılmış borular için, yükün tamamı lifler tarafından taşınıyor varsayımı yapılırsa ;

$$\sigma_1 = \sigma_f \cdot \cos^2 \theta \quad (3.5)$$

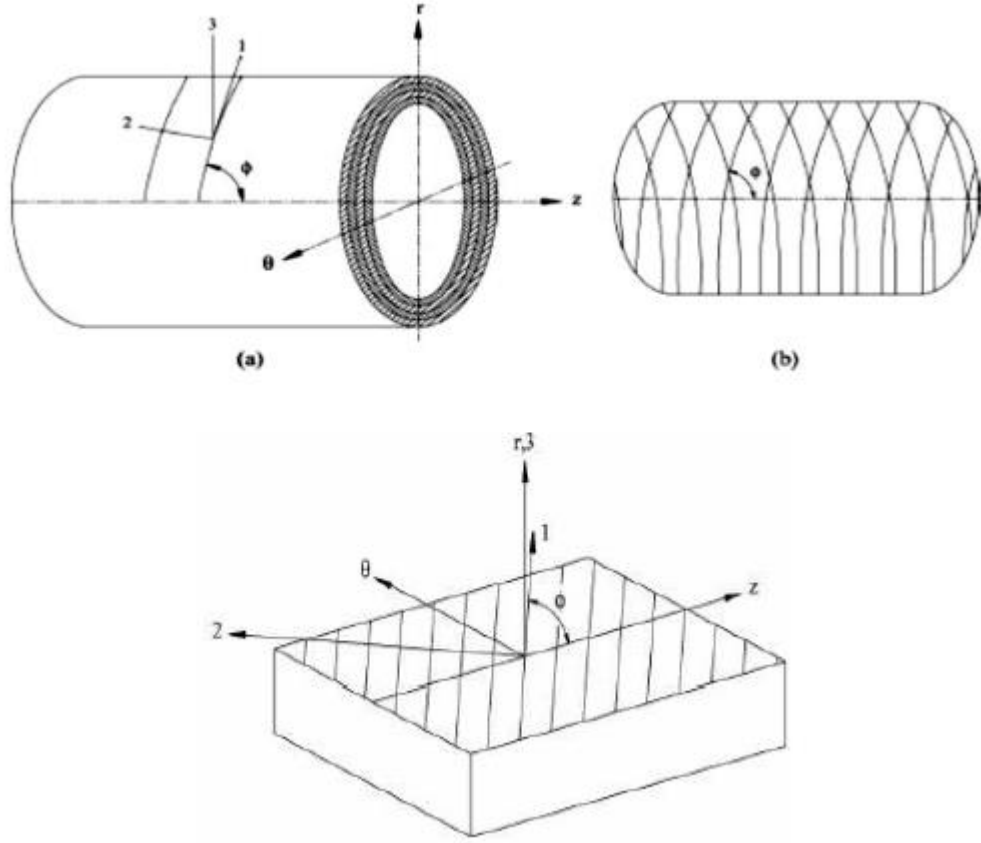
$$\sigma_2 = \sigma_f \cdot \sin^2 \theta \quad (3.6)$$

Daha önce bulduğumuz σ_1 ve σ_2 değerleri denklem 3.5 ve denklem 3.6'nın ortak çözümünden liflerin maksimum dayanım açısını bulmuş oluruz.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\sigma_f \cdot \sin^2 \theta}{\sigma_f \cdot \cos^2 \theta} = \tan^2 \theta \quad (3.7)$$

σ_1 ve σ_2 değerleri denklem 3.7'de yerine konulduğunda $\theta = 55^\circ$ olarak bulunur.

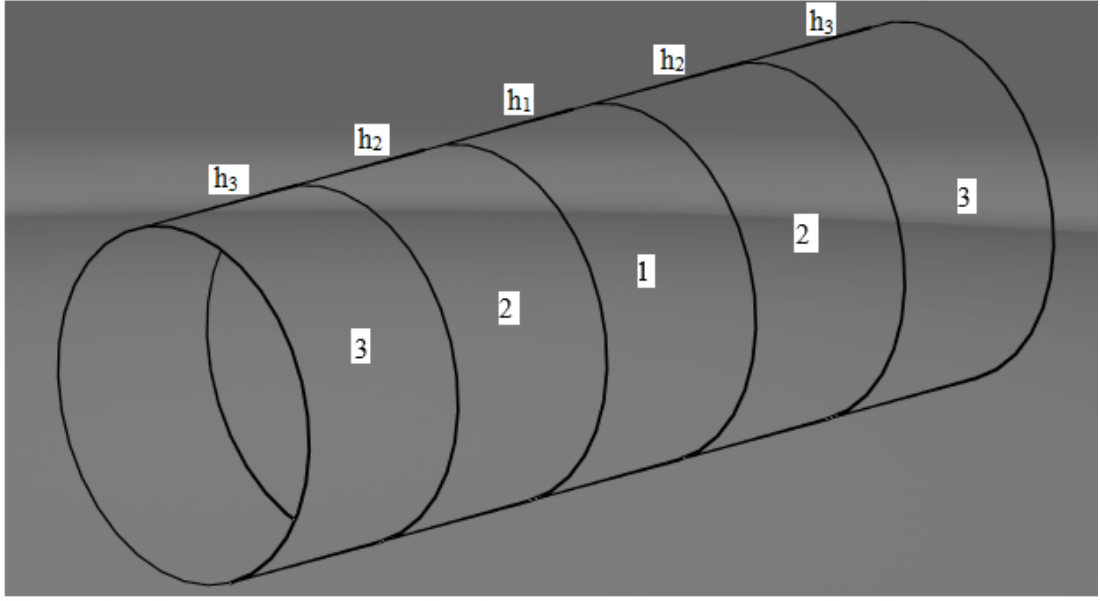
Şekil 3.21'de kompozit sarımlı borunun gerilme şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Kompozit sarımlı boru için eksen takımlarının gösterimi [2]

3.5. Farklı Katman Sayısı İçin Hacim Hesabı

Tez çalışmasında 6 katmanlı tank ile farklı bölgelerinde farklı katman sayısına sahip tanklar tasarlanmış ve gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Katman sayıları farklı tank tasarlarırken 6 katmanlı tank’da kullanılan malzeme miktarına eşit miktarda malzeme kullanarak tasarlanmıştır. Aynı malzeme miktarı kullanabilmek için 6 katmanlı tank ile farklı katmanlı tank hacimleri eşitlenerek tasarım yapılmıştır. Tank çapı 100 mm ve tank boyu 280 mm dir.



Şekil 3.16 Hacim hesabı için h değerlerinin konumu

Şekil 3.16’da 1, 2 ve 3. bölgeler farklı katman sayılarına göre h değerleri hesaplanmıştır.

$$(r_{d_1}^2 - r_{i_ç}^2) \cdot h_1 + 2 \cdot (r_{d_2}^2 - r_{i_ç}^2) \cdot h_2 + 2 \cdot (r_{d_3}^2 - r_{i_ç}^2) \cdot h_3 = (r_{d_2}^2 - r_{i_ç}^2) \cdot 280 \quad (3.8)$$

$$h_1 + 2 \cdot h_2 + 2 \cdot h_3 = 280 \quad (3.9)$$

$$h_1 - h_2 = 0 \quad (3.10)$$

$$r_{d_1} = 52 \text{ mm}$$

$$r_{d_2} = 52.4 \text{ mm}$$

$$(3.11)$$

$$r_{d_3} = 53.2 \text{ mm}$$

$$r_{i_ç} = 50 \text{ mm}$$

Denklem (3.1) , (3.2) ve (3.3) ortak çözülür ve h değerleri denklem (3.5)’deki gibi bulunur.

$$h_1 = 80.13 \text{ mm}$$

$$h_2 = 80.13 \text{ mm} \quad (3.12)$$

$$h_3 = 19.804 \text{ mm}$$

3.6. Farklı Katman Sayısına Sahip Tank Tasarımı

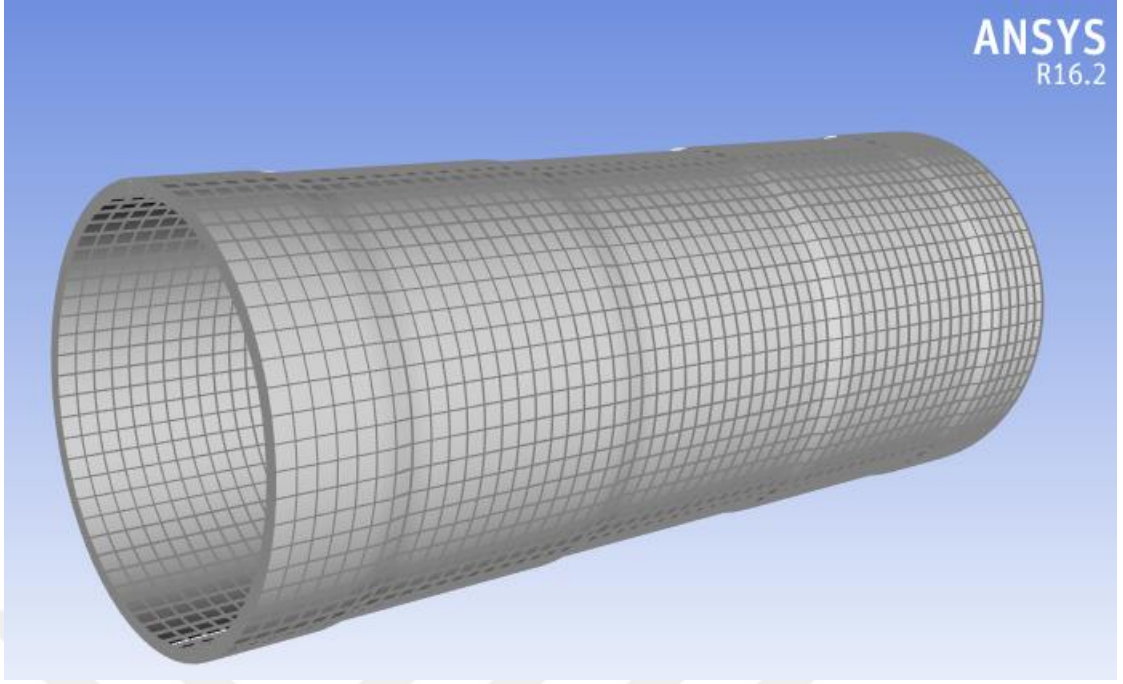
Yeni tasarımı sabit katmanlı (6 katman) tasarım ile karşılaştırabilmek için kullanılan malzeme türü, fiber açısı değerleri ve static structural sınır koşulları aynı şekilde uygulanmıştır.

3.6.1. Farklı Katmanlı Tank Tasarım Akış Şeması

Sabit katmanlı tank tasarımına benzer şekilde bir yol izlenmiştir. Katman uygulamaları ACP (pre) modülünün setup kısmında gerçekleştirilmiştir.

	A
1	ACP (Pre)
2	Engineering Data ✓
3	Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Parameters

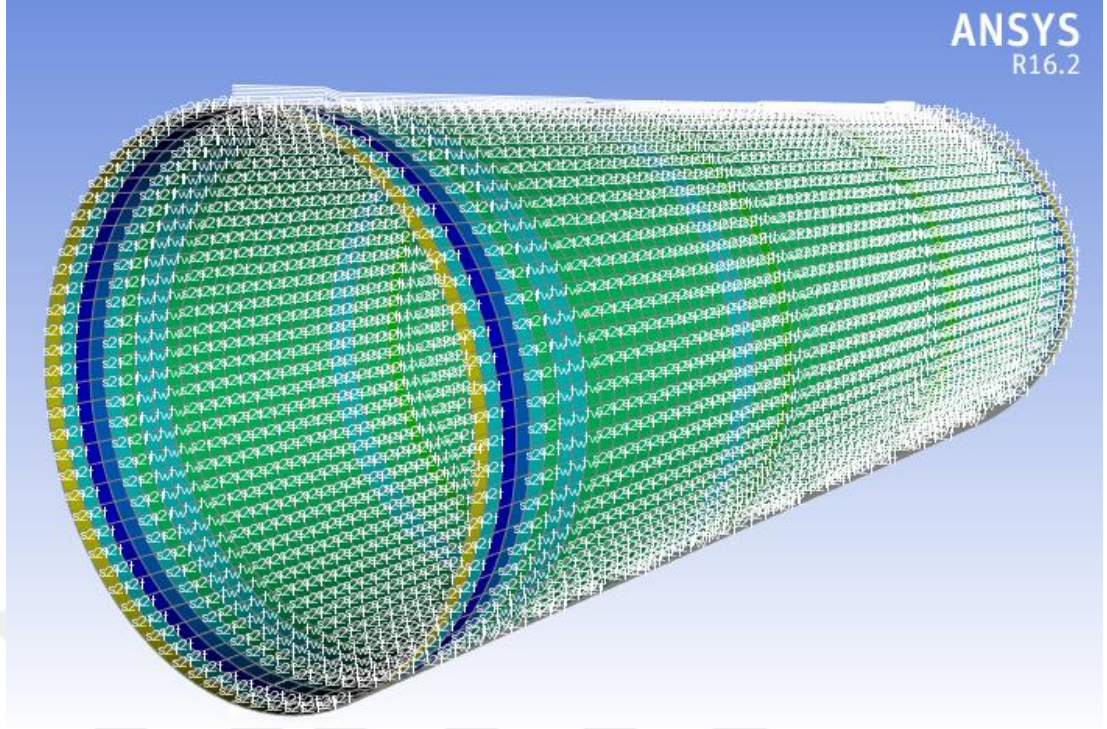
Şekil 3.17 Farklı katman tank tasarım akış şeması



Şekil 3.18 Farklı katman sayısındaki tank tasarımı

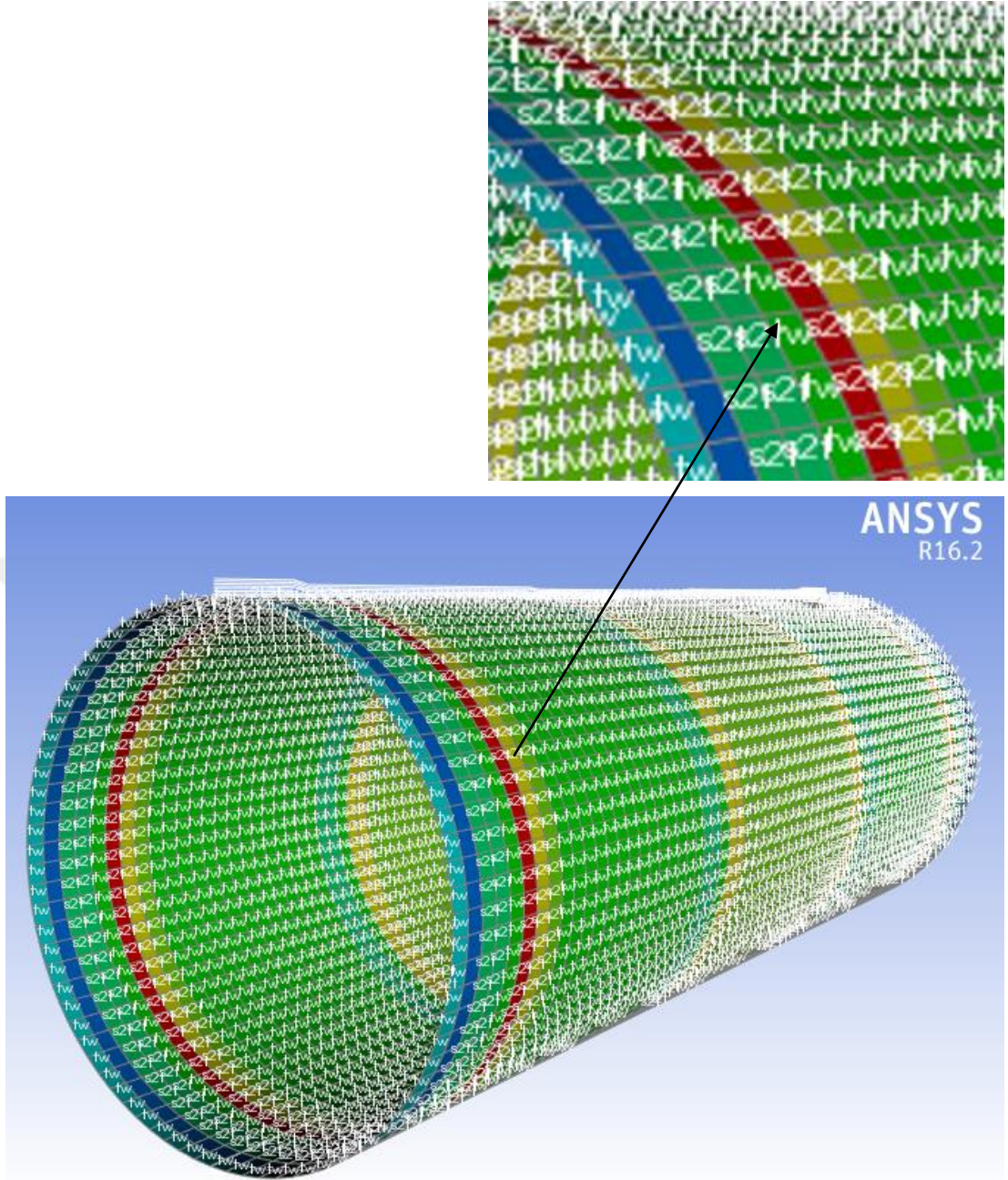
3.7. Farklı Katmana Sahip Karbon Epoksi Tank İçin Patlama Basıncı Analizi

Farklı katman sayılı tank ACP(pre) modülünde tasarlanmış ve altı katmanlı tank analizlerine benzer şekilde ACP (post) modülünde patlama analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre karbon epoksi kompozit tankın patlama basınçları belirlenmiş ve açı değişimlerine göre patlama basıncı grafiği çizilmiştir. Şekil 3.19 da kompozit tank da herhangi bir hasar oluşmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.20 de ise kompozit tankda hasar gerçekleşmiştir.



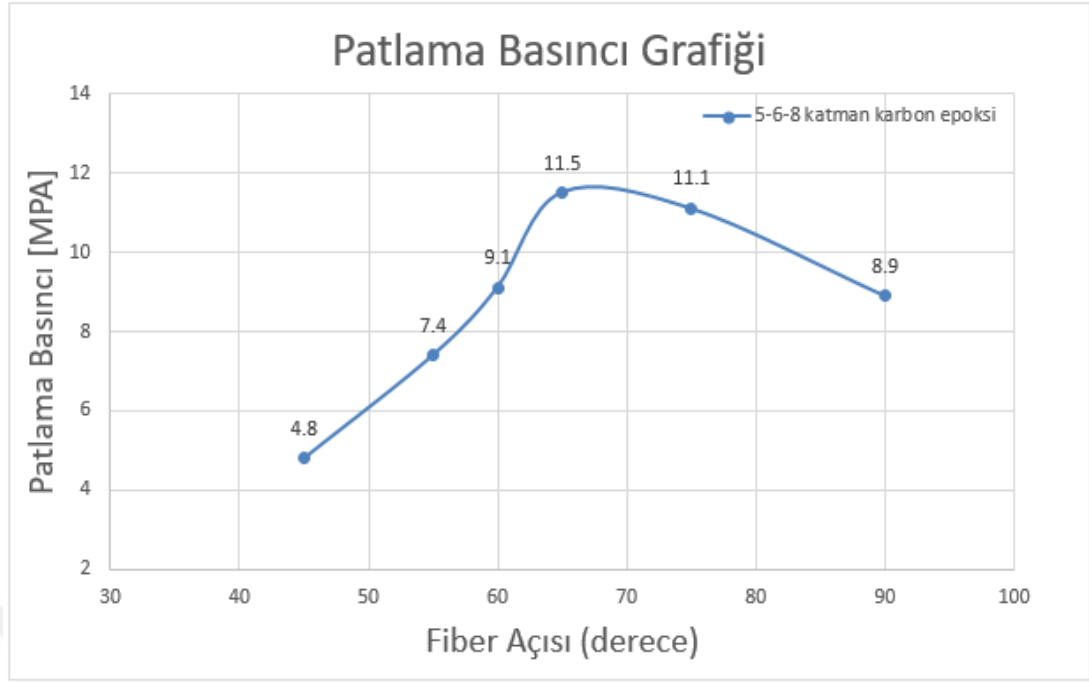
Şekil 3.19 65° Sarım açısında ve 10.8 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman karbon epoksi tankın görüntüsü

5-6-8 Katmana sahip karbon epoksi tankın 108 bar basınç altında maksimum stress ve tsai-wu hasar kriterine göre herhangi bir hasar olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.20 65° Sarım açısında ve 11.5 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman karbon epoksi tankın görüntüsü

5-6-8 katmana sahip karbon epoksi tankın 115 bar basınç altında maksimum stress kriterine göre 8 katmanlı bölümden 6 katmanlı bölüme geçiş yerinde (bağlantı yeri) hasar aldığı yani patladığı gözlemlenmiştir.

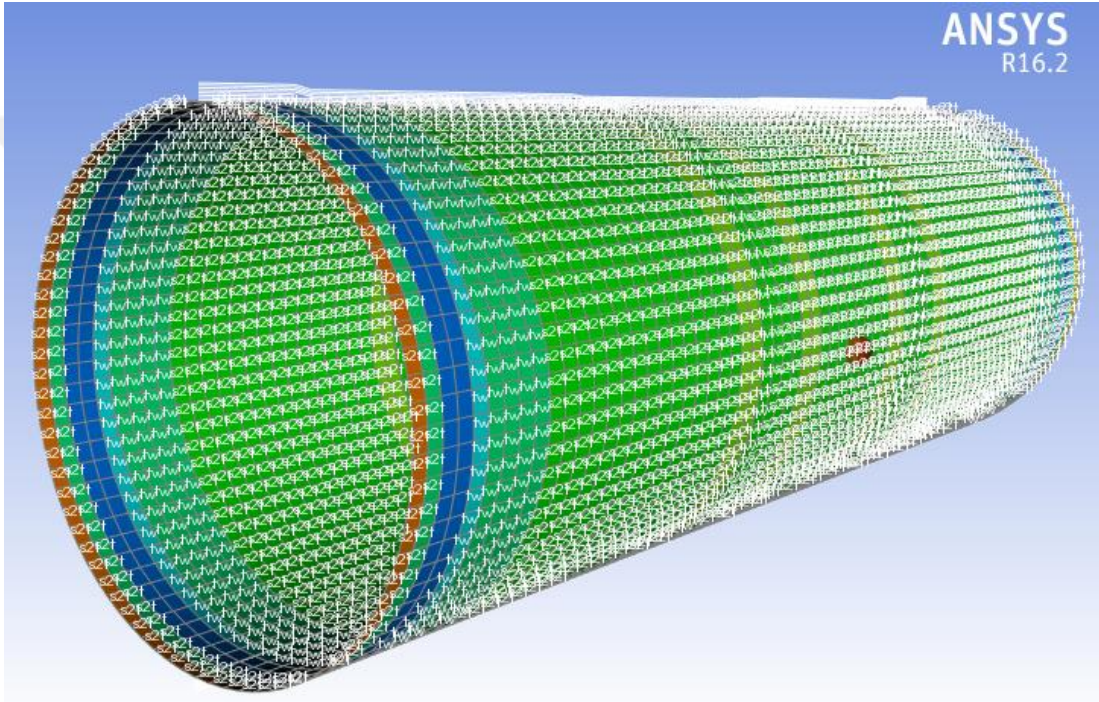


Şekil 3.21 5-6-8 Katmana sahip karbon epoksi tankın fiber açılarına göre patlama basıncı değerleri

5-6-8 katmana sahip karbon epoksi tankın patlama basıncı grafiği incelendiğinde en ideal açının 65° olduğu 45° de ise en düşük patlama basıncına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Mohan R.K ve arkadaşları [49] sonlu elemanlar çalışmasında ansys 12 versiyonunu kullanarak karbon epoksi tankların patlama basıncı için en ideal açının 65° olduğunu ifade etmişlerdir.

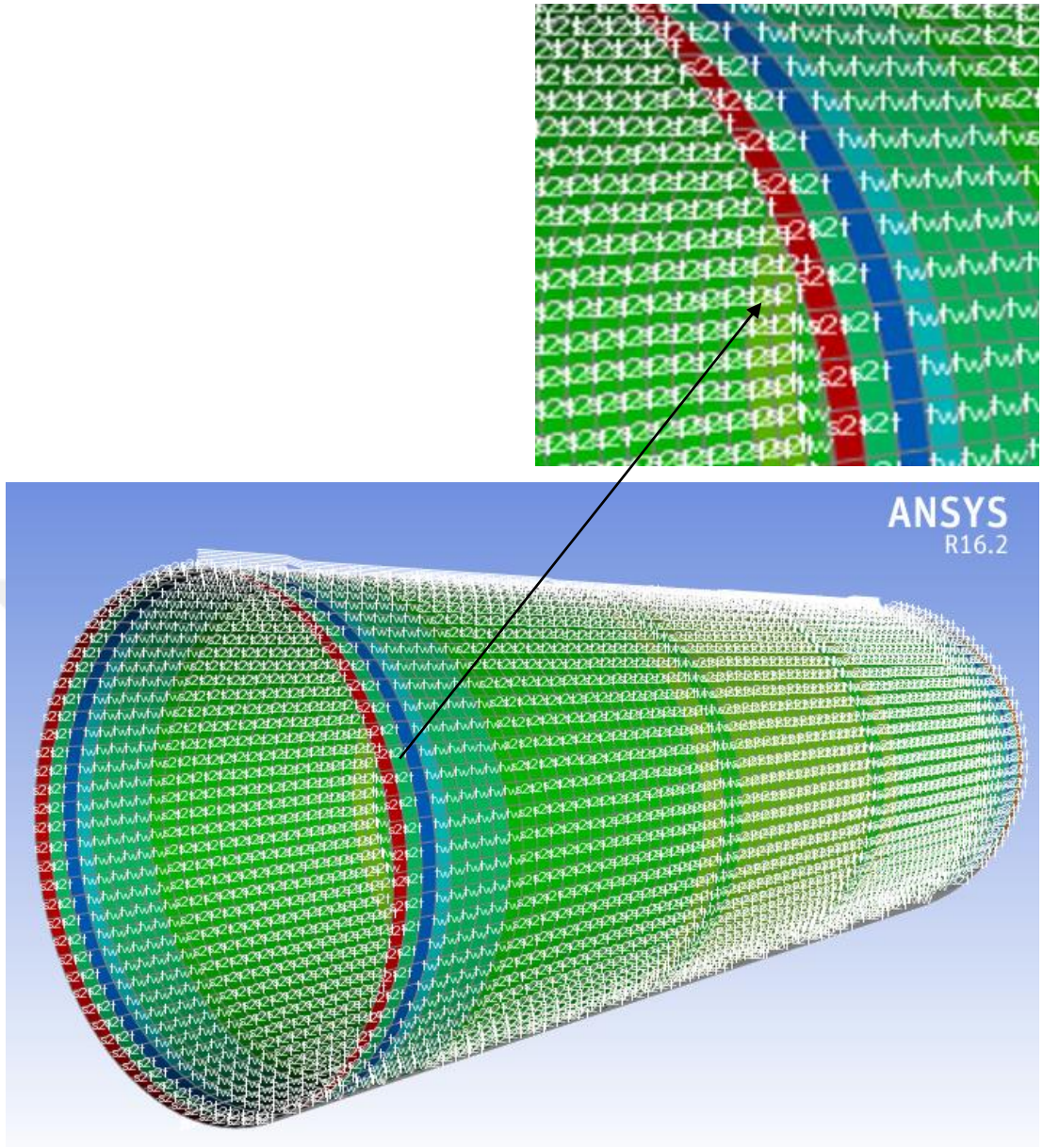
3.8. Farklı Katmana Sahip E-Cam Epoksi Tank İçin Patlama Basıncı Analizi

E-cam epoksi tankın patlama basıncını belirlemek için ansys ACP(post) modülü kullanılmıştır. Farklı basınç değerleri uygulanarak maksimum stress ve tsai-wu hasar kriterlerine göre patlama basıncı belirlenmiştir. Şekil 3.22 de kompozit tankda herhangi bir hasar oluşmadığı ancak şekil 3.23 de kompozit tankda hasar meydana geldiği görülmektedir.



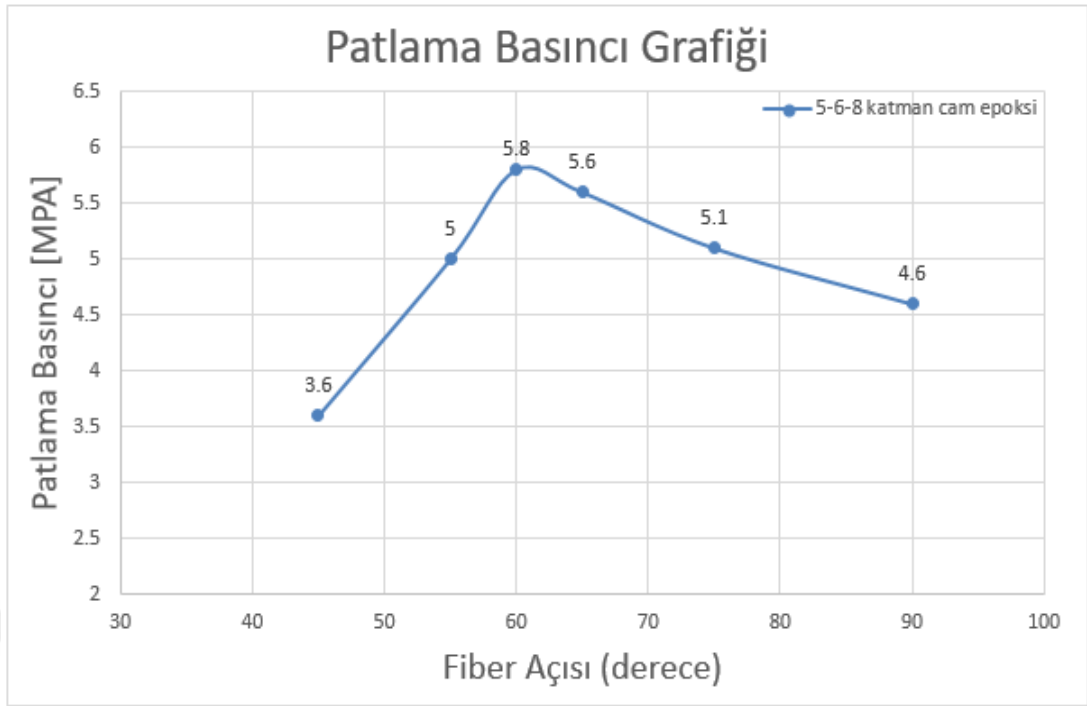
Şekil 3.22 60° Sarım açısında ve 5.3 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman E-cam epoksi tankın görüntüsü

5-6-8 Katmana sahip E-cam epoksi tankın 53 bar basınç altında maksimum stress ve tsai-wu hasar kriterine göre herhangi bir hasar olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.23 60° Sarım açısında ve 5.8 Mpa basınçdaki 5-6-8 katman E-cam epoksi tankın görüntüsü

5-6-8 katmana sahip E-cam epoksi tankın 58 bar basınç altında maksimum stress kriterine göre hasar aldığı yani patladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24 5-6-8 Katmana sahip E-cam epoksi tankın fiber açılarına göre patlama basıncı değerleri

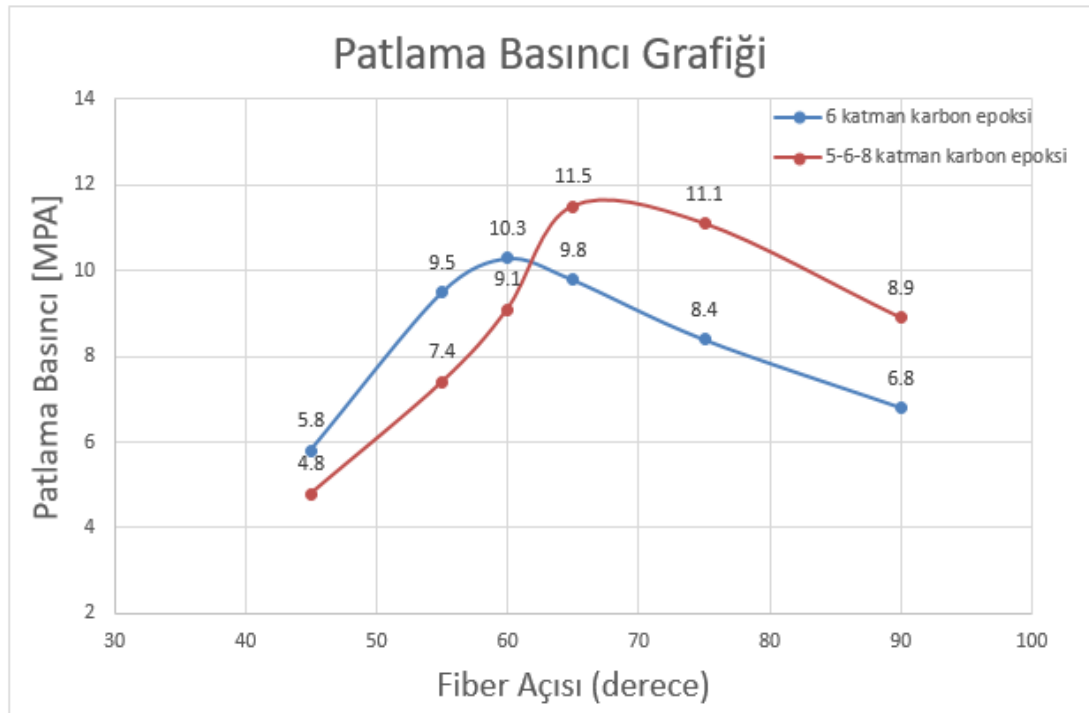
5-6-8 katmana sahip E-cam epoksi tankın patlama basıncı grafiği incelendiğinde ideal açının 60° olduğu 45° de ise en düşük patlama basıncına sahip olduğu gözlemlenmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Ansys ACP (post) modülünde patlama basıncı analizleri sonrası 6 katmanlı karbon epoksi ile 5-6-8 katmana sahip karbon epoksi , 6 katmanlı E-cam epoksi ile 5-6-8 katmanlı E-cam epoksi tanklarının patlama basınçları kendi aralarında karşılaştırılmış ve grafikleri çizilmiştir. Yine aynı şekilde şekil EK A 1’den şekil EK A 2’e kadar aynı basınçta değişik fiber sarım açılarına göre maksimum strain grafikleri karşılaştırılmalı olarak çizilmiştir.

4.1. 6 Katman Karbon Epoksi Tank İle 5-6-8 Katmana Sahip Karbon Epoksi Tankın Patlama Basıncı Karşılaştırılması

Yapılan tasarım sonrası patlama basıncı incelendiğinde bir iyileşme gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’de karbon epoksi tanklar için patlama basıncı karşılaştırma grafiği çizilmiştir.

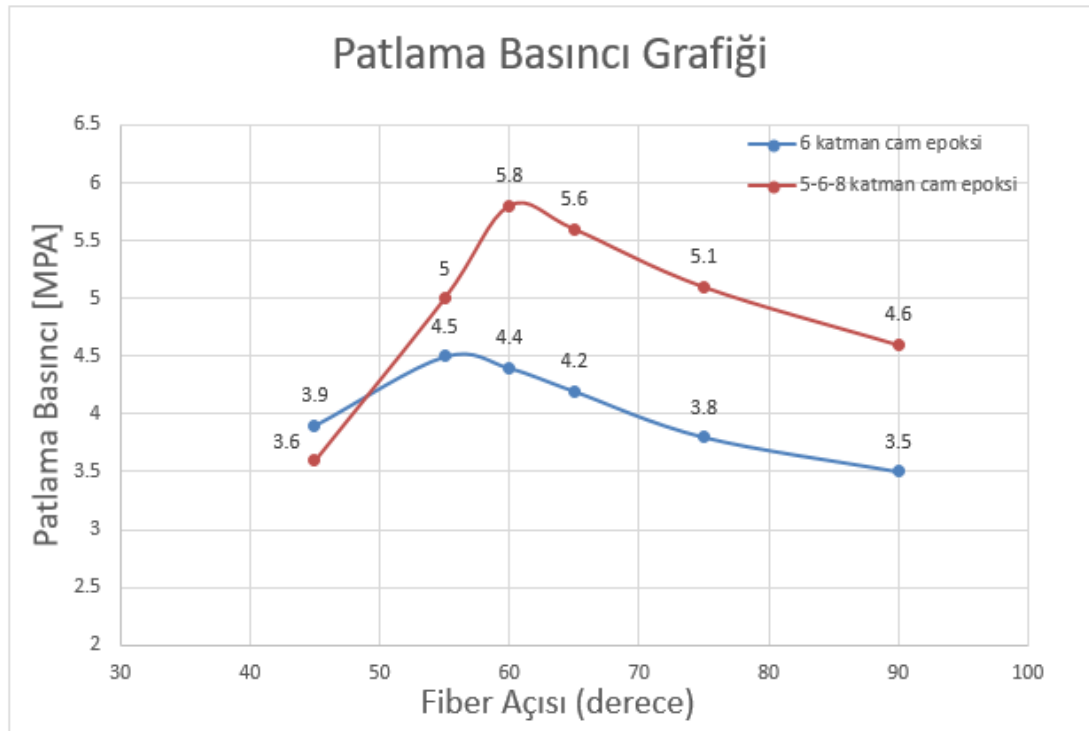


Şekil 4.1 6 Katman karbon epoksi tank ile 5-6-8 katmana sahip karbon epoksi tankın patlama basıncı karşılaştırılması

Şekil 4.1'deki Karbon epoksi tankların her iki durumu için patlama basıncı grafiği incelendiğinde 60° ye kadar olan açılarda patlama basıncında bir azalma 60° den sonraki açılarda patlama basıncında bir artış gözlemlenmiştir. Tasarımda değişiklik yapıp aynı malzeme miktarı kullanılarak patlama basıncında bir iyileşme gözlenmektedir. 65° de 115 bar'da maksimum patlama basıncı elde edilmiştir.

4.2. 6 Katman E-Cam Epoksi Tank İle 5-6-8 Katmana Sahip E-Cam Epoksi Tankın Patlama Basıncı Karşılaştırılması

Aynı malzeme miktarı kullanılarak yapılan tasarımda patlama basıncında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Şekil 4.2 de E-cam epoksi tanklar için patlama basıncı karşılaştırma grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.2 6 Katman E-cam epoksi tank ile 5-6-8 katmana sahip E-cam epoksi tankın patlama basıncı karşılaştırılması

Şekil 4.2'de E-cam epoksi tanklar için patlama basıncı grafiği incelendiğinde 50° den sonra 5-6-8 katmana sahip E-cam epoksi tankın patlama basıncında bir artış

gözlemlenmiştir. 60° fiber yönlenmesinde 58 bar’da maksimum patlama basıncı elde edilmiştir.

Tablo 4.1 Patlama basıncındaki artış miktarı

	Maksimum Patlama Basıncı (Bar)	Açı Değeri (derece)	Patlama Basıncındaki Artış Miktarı (Bar)
6 Katman karbon epoksi	103	60	12 (%11.6)
5-6-8 Katman karbon epoksi	115	65	
6 Katman E-cam epoksi	45	55	13 (%28.8)
5-6-8 Katman E-cam epoksi	58	60	

Tablo 4.1 İncelendiğinde karbon epoksi için 12 bar’lık (%11.6) bir patlama basıncı artışı söz konusu iken E-cam epoksi için 13 bar’lık (%28.8) bir patlama basıncı artışı söz konusudur.

Mohan R.K ve arkadaşları [49] sonlu elemanlar çalışmasında karbon epoksi tanklar için optimum sarım açısını 65° , cam epoksi tanklar için optimum sarım açısını 55° bulmuşlardır. Sulaiman S ve arkadaşları [50] kompozit sarımlı tankların sonlu elemanlar analizini ABAQUS 6.12 programında gerçekleştirmişlerdir. Analiz verilerinde Tsai-Wu, Tsai-Hill ve maksimum stress hata kriterlerini kullanmışlardır. Bu hata kriterlerine göre optimum açı değerini 55° olarak bulmuşlardır. Çetin M çalışmasında [11] Ansys ACP (post) modülünü kullanarak kompozit tankın patlama basıncını belirlemiş ve sadece kompozit yapıyı dikkate aldığında en uygun fiber açısını 59° olarak belirlemiştir. Shultz M, Smith L deneysel çalışmasında [46] kompozit tank’da optimum açı 50° olarak, Tsai-Hill hata kriterine göre 52.5° , maksimum stress ve maksimum strain hata kriterine göre 50.5° olarak bulmuştur. Aziz Ö. çalışmasında [51] kompozit tüplerin maksimum patlama basıncı için uygun fiber açısını araştırmıştır. Sonlu elemanlar çalışmasında katmanların simetrik durumu için en uygun açıyı 60° olarak bulmuştur. Deneysel çalışmasında ise en uygun açıyı 55° olarak bulmuştur. Patil V ve arkadaşları [52] kompozit hidrojen tanklarını incelemiş ve optimum sarım açısını 51.2° ile 54.2° arasında bir açı değeri bulmuştur.

Literatür incelendiğinde optimum sarım acısı genel itibariyle 50° ile 65° arasında olduğu görülmektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, aynı malzeme miktarı kullanarak kompozit bir tankın tasarımında değişiklik yaparak gerilme azaltma hedeflenmiş ve tanklar için patlama basınçları karşılaştırılmıştır. Tank tasarımı için Onur sayman ve arkadaşlarının [5] çalışması gözönüne alınmıştır. Tez çalışmasında gerekli sonlu elemanlar analizler yapılmış ve bu analizlerde ANSYS yazılımı kullanılmıştır.

Tank üzerindeki gerilmeleri azaltmak için farklı tasarımlar gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Bu yeni tasarımlarda aynı malzeme miktarı kullanabilmek için hacim hesabı yapılmış ve en uygun tasarım aranmıştır. Sonlu elemanlar analizleri ile bu tasarımlar karşılaştırılmıştır. Tasarımlarda 45°, 55°, 60°, 65°, 75° ve 90° fiber yönlenme açıları kullanılmıştır. Kompozit tankların patlama basıncını incelemek için Ansys yazılımının ACP (post) modülü kullanılmış ve patlama basınçlarına karar verebilmek için Maksimum stress ve Tsai-Wu hasar kriterleri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda karbon epoksi ve E-cam epoksi tanklara ait fiber açı değişimine göre patlama basınçları grafiği oluşturulmuştur.

Sonuç olarak karbon epoksi tank için %11.6'lık bir patlama basıncı artışı gözlenirken, E-cam epoksi tank için %28.8'lik bir patlama basıncı artışı söz konusudur.

KAYNAKÇA

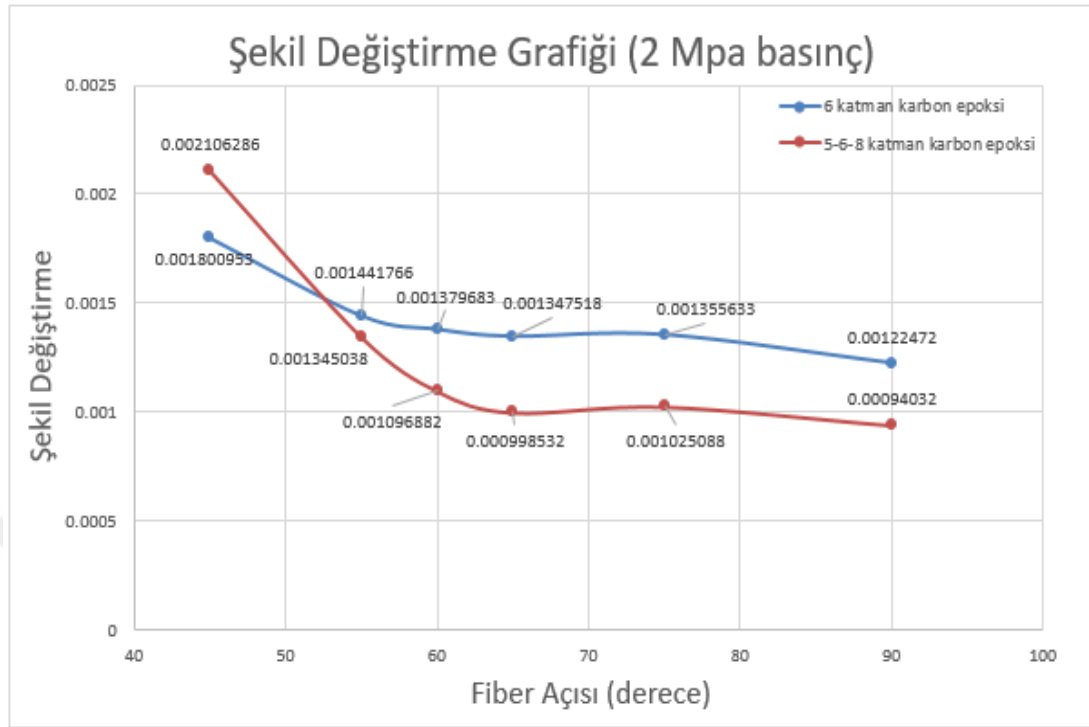
- [1] Güvensoy, S. Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2010, 70. (Yüksek Lisans Tezi)
- [2] Akgün, M.B. Kompozit Sargılı Borularda Patlama Basıncının İncelenmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Kırıkkale, 2015, 75. (Yüksek Lisans Tezi)
- [3] Akarsu, M. Üniform Sıcaklık Etkisindeki Kompozit Plakta Ansys Programı İle Isıl Gerilme Analizi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 2013, 62. (Yüksek Lisans Tezi)
- [4] Dönmez, A. Yapısal Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2009, 79. (Yüksek Lisans Tezi)
- [5] Onder, A., Sayman, O., Dogan, T., Tarakcioglu, N. Burst failure load of composite pressure vessels. Composite Structures. 2009, 89, 159-166.
- [6] Menshykova, M.,Guz, I.A. Stress Analysis of Layered Thick-Walled Composite Pipes Subjected to Bending Loading. International Journal of Mechanical Sciences. 2014, 88, 289-299.
- [7] M. F. S. AL-Khalil, P. D. Soden, R. Kitching, Hinton, M.J. The Effects of Radial Stresses On The Strength Of Thin-Walled Filament Wound GRP Composite Pressure Cylinders. İnt. J. Mech. Sci. 1996, 38, 97-120.
- [8] Tarakcioglu, N., Samanci, A., Arıkan, H., Akdemir, A. The Fatigue Behavior of $(\pm 55^\circ)_3$ Filament Wound GRP Pipes With a Surface Crack Under İnternal Pressure. Composite Structures. 2007, 80, 207-211.
- [9] Liu, P.F.,Zheng, J.Y. Progressive Failure Analysis of Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates Using Continuum Damage Mechanics. Materials Science and Engineering: A. 2008, 485, 711-717.
- [10] Liu, P.F., Chu, J.K., Hou, S.J., Zheng, J.Y. Micromechanical Damage Modeling and Multiscale Progressive Failure Analysis Of Composite Pressure Vessel. Computational Materials Science. 2012, 60, 137-148.
- [11] Çetin, M. Uzay Uygulamalarında Kullanılan Kompozit Sargılı Basınçlı Bir Tankın Yapısal Tasarımı Ve Analizi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 2014, 69. (Yüksek Lisans Tezi)
- [12] Roh, H.S., Hua, T.Q., Ahluwalia, R.K. Optimization Of Carbon Fiber Usage İn Type 4 Hydrogen Storage Tanks For Fuel Cell Automobiles. International Journal of Hydrogen Energy. 2013, 38, 12795-12802.

- [13] M.Xia, H.Takayanagi, K.Kemmochi. Analysis Of Multi-Layered Lament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure. Composite Structures. 2001, 53, 483-491.
- [14] Daban, Y. Kompozit Plakalarda Farklı Tabaka Sayısı, Farklı Yapı Ve İstifleme Sırasına Bağlı Optimum Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 2016, 72. (Yüksek Lisans Tezi)
- [15] Doğan, T. Prediction Of Composite Vessels Under Various Loadings. Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural Mechanics Program, İzmir, 2016, (Degree of Master of Science)
- [16] Kalaycıoğlu, B.,Dirikolu, M.H. Dikissiz Metal Astarlı Ve Kompozit Sargılı Yüksek Basınç Tankı Tasarımı. Int.J.Eng.Research & Development. 2009, 1, 53-60.
- [17] Balya, B. Design And Analysis Of Filament Wound Composite Tubes. Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural, M.S., Department of Mechanical Engineering, 2004, 144. (Degree Of Master Of Science)
- [18] Chang, R.R. Experimental And Theoretical Analyses Of First-Ply Failure Of Laminated Composite Pressure Vessels. Composite Structures. 2000, 49, 237-243.
- [19] Kam, T.Y., Liu, Y.W., Lee, E.T. First-Ply Failure Strength Of Laminated Composite Pressure Vessels Composite Structures. 38, 65-70.
- [20] Liu, P.F., Chu, J.K., Hou, S.J., Xu, P., Zheng, J.Y. Numerical Simulation And Optimal Design For Composite High-Pressure Hydrogen Storage Vessel: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012, 16, 1817-1827.
- [21] Gay, D. Composite Materials Design and Applications. Taylor & Francis Group, New York, 2015
- [22] Kaw, A.K. Mechanics of Composite Materials. Taylor & Francis Group, LLC, New York, 2006,457s
- [23] Mazumdar, S.K. Composites manufacturing - Materials, Product and Process Engineering-. CRC Press, Washington, 2002,396s
- [24] Barbero, E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials Taylor & Francis Group, New York, 2008,331s
- [25] Systems, S. Composite Materials Handbook. U.K., 1998, 357s, <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>
- [26] Brigante, D. Composite Materials Selection, Design, and Application. Springer International Publishing Switzerland, Italy, 2014

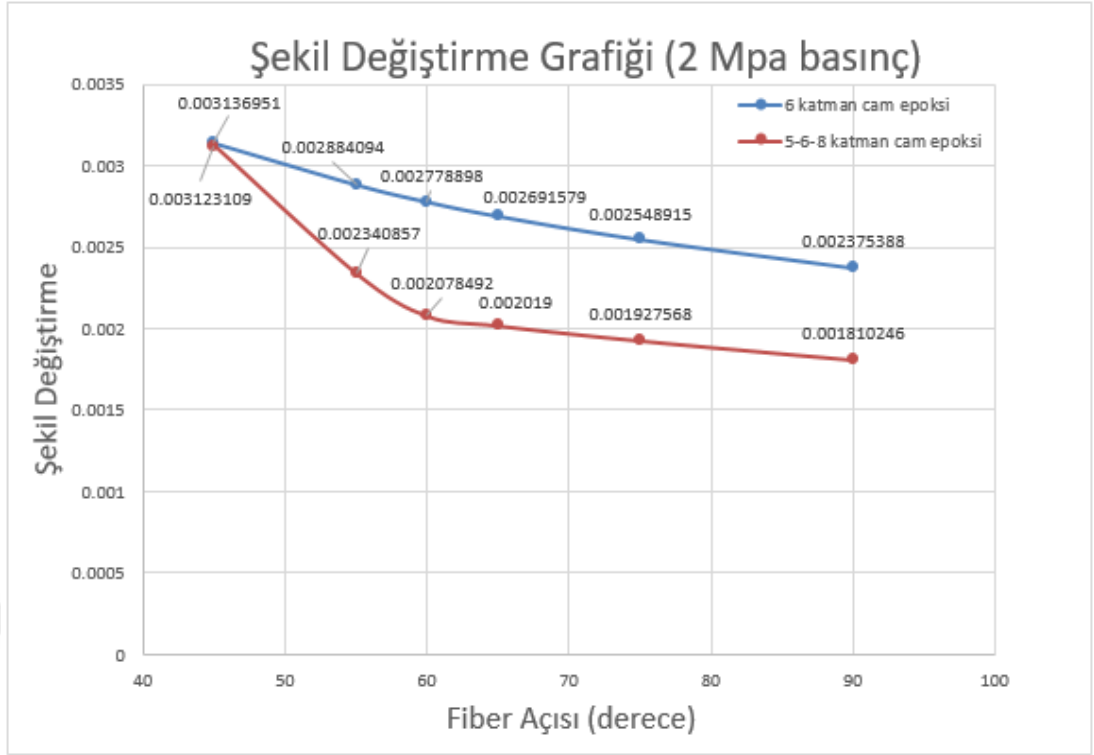
- [27] Baker, A., Dutton, S., Kelly, D. Composite Materials for Aircraft Structures. Joseph A. Schetz, Virginia, 2004,597s
- [28] Mallick, P.K. Fiber-Reinforced Composites-Materials, Manufacturing, and Design. CRC Press, New York, 2007,616s
- [29] Dursun, T. Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Ankara, 2006, 174. (Doktora Tezi)
- [30] Daniel, I.M., Ishai, O. Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press, New York, 2006,396s
- [31] Reddy, J.N. Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells_ Theory and Analysis. CRC Press, New York, 2003,831s
- [32] Hinton, M.J., Kaddour, A.S., Soden, P.D. Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer Composites. Elsevier Ltd. All rights reserved, 2004,1269s
- [33] Owen, M.J., Middleton, V., Jones, I.A. Integrated Design and Manufacture Using Fibre-Reinforced Polymeric Composites. CRC Press, New York, 2000,400s
- [34] Peters, S.T. Composite Filament Winding. ASM International, United States of America, 2011,174s
- [35] Berthelot, J.-M. Composite Materials_ Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer, New York, 1999,662s
- [36] Vasiliev, V.V., Morozov, E. Advanced Mechanics of Composite Materials Elsevier Ltd. All rights reserved, USA, 2013,815s
- [37] ANSYS. Composite PrepPost Modeling Composites the Simple Way. 14s,
- [38] Miravete, A. 3D Textile Reinforcements in Composite Materials. CRC Press, New York, 1999,315s
- [39] Robinson, P., Greenhalgh, E., Pinho, S. Failure Mechanisms In Polymer Matrix Composites. Woodhead Publishing Limited, USA, 2012,460s
- [40] Talreja, R., Singh, C.V. Damage and Failure of Composite Materials. Cambridge University Press, New York, 2012,315s
- [41] Hashin, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. Journal of Applied Mechanics. 1980, 47, 329-334.
- [42] Tserpes, K.I., Labeas, G., Papanikos, P., Kermanidis, T. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates. Composites Part B: Engineering. 2002, 33, 521-529.

- [43] Lessard, L.B.,Shokrieh, M.M. Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned-Joint Failure. Journal of Composite Materials. 1995, 29, 671-697.
- [44] ANSYS. Ansys Malzeme Kütüphanesi.
- [45] Ivana, V. Strength Analysis of Filament-Wound Composite Tubes. Hemijska industrija. 2010, 64, 239-245.
- [46] Shultz, M.,Smith, L.V. Optimal-Fiber-Orientation-Fiber-Reinforced-Pressure-Vessels. 7s,
- [47] Radulović, J.,Maksimović, K. Filament Wound Composite Tubes. Scientific Technical Review. 2009, 6.
- [48] P.Beer, P.D.F.,Prof.Dr.E.Russell Johnston, J. Cisimlerin Mukavemeti. Beta Basım, İstanbul, 2003,719s
- [49] k.s.s, R.Y., Mohan, R.K., Kiran, B.V. Composite Pressure Vessels. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2012, 22.
- [50] Sulaiman, S., Borazjani, S., Tang, S.H. Finite Element Analysis of Filament-Wound Composite Pressure Vessel Under Internal Pressure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2013, 50, 11.
- [51] Aziz, Ö. First Failure Pressure of Composite Pressure Vessels. Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural End Applied Science, Mechanical Engineering, İzmir, 2007, 116. (Degree of Master of Science)
- [52] Gosavi, M.B., Rao, P.A.S., Patil, V. A Review on Failure Modes of Composite Pressure Vessel. International Journal of Engineering Development and Research. 2014, 7.

EKLER



Şekil EK A 1 Karbon epoksi için 2 Mpa basınçta açı değişimine göre şekil değişim grafiği



Şekil EK A 2 E-cam epoksi için 2 Mpa basınçta açı değişimine göre şekil değişim grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ümit ŞAFAK

Doğum Yeri ve Yılı : Düzce, 1992

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : umitsafak213@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Gebze Cumhuriyet Lisesi, 2007-2011

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
2011-2015

Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Konstrüksiyon ve İmalat Bölümü,
2015-2017