T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HELİSEL SARIMLI TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SARIM ÖZELLİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

LEVENT DERE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SEMİH SEZER

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HELİSEL SARIMLI TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SARIM ÖZELLİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Levent DERE tarafından hazırlanan tez çalışması 22.07.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halil ÖZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hikmet KOCABAŞ

İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu çalışmadaki sayısal ve deneysel çalışmalar Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle tez danışmanım olan, bilgi birikimi ve tecrüberlerini benimle paylaşan Doç. Dr. Semih Sezer'e teşekkürlerimi arz ederim.

Tez çalışmamda firma imkanlarını kullanma fırsatı veren yönetim kurulu başkanımız Sn. İbrahim Mirmahmutoğulları'na ve Ar-Ge koordinatörüm Dr. Zafer Gemici'ye teşekkürlerimi arz ederim.

Deneysel çalışmalarda bana destek olan Özkan Aslan'a ve Mir Araştırma ve Geliştirme malzeme bölümü ve laboratuvar ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve iş hayatım boyunca bana en büyük desteği sunan ve sabır gösteren kıymetli eşim Esra Dere ve benden manevi desteğini eksik etmeyen anneme her şey için teşekkür ederim.

Levent DERE

Temmuz, 2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....vii

KISALTMA LİSTESİ.....ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.1.1 Kompozit Malzemelere Genel Bakış 1
1.1.1.1 Çekirdek (Core) Malzemeler 2
1.1.1.2 Matris (Reçine) Malzemeler 3
1.1.1.3 Takviye Malzemeleri 5
1.1.1.4 Kompozit Üretim Yöntemleri 7
1.1.2 Takviyeli Termoplastik Borular (RTP) 13
1.1.3 Akademik Çalışmalar 16
1.1.4 Teknolojinin Bugünkü Durumu 26
1.1.5 RTP İçin Test Yöntemleri 30
1.2 Tezin Amacı 33
1.3 Hipotez 33

BÖLÜM 2

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 35

2.1 Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Tespit Edilmesi 35
2.1.1 HDPE İç Katman ve Dış Katman Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Tespit Edilmesi 35

2.1.1.1 Sağlanması Gereken Test Koşulları ve Test Numunesinin Hazırlanması 35
2.1.1.2 Test Sonuçları 38
2.1.2 Cam Elyaf - PE Prepreg Takviye Katmanının Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Tespit Edilmesi 39
2.1.2.1 Sağlanması Gereken Test Koşulları ve Test Numunesinin Hazırlanması 39
2.1.2.2 Test Süreci ve Test Sonuçları 43

BÖLÜM 3

SAYISAL ÇALIŞMALAR 45

3.1 Modelin Tanımı 45
3.2 Malzeme Özellikleri 47
3.3 Sayısal Analiz 48
3.3.1 Koordinat Sistemi 49
3.3.2 1. ve 4. İzotropik Katmanlar için Gerilme – Gerinim Denklemleri 50
3.3.3 2. ve 3. Anizotropik Katmanlar için Gerilme – Gerinim Denklemleri 55
3.3.4 Sınır Koşulları 58
3.3.5 Çözüm 59
3.3.6 Sonuçlar 60
3.4 Sonlu Elemanlar Analizi 64
3.4.1 Sonlu Elemanlar Modeli 64
3.4.1.1 Sınır Koşulları 67
3.4.1.2 Yük Durumu 68
3.4.1.3 Mesh Kontrolü 68
3.4.2 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları 69
3.4.2.1 Gerilme ve Gerinim Sonuçları 69

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER 77

4.1 Sonuç ve Öneriler 77

KAYNAKLAR 83

EK-A

MALZEME TEKNİK VERİLERİ 90

EK-B

OTOKLAV NUMUNE ÜRETİM SÜRECİ 93

EK-C

MATRİS ELEMANLARI 95

ÖZGEÇMİŞ 97

SİMGE LİSTESİ

α_0	Elyaf sarım açısı
C	Lokal koordinatlardaki rijitlik (stiffness) matrisi
$\bar{C}$	Rijitlik (stiffness) matrisi
E_k	HDPE malzemenin Elastisite modülü
E_L	Takviye malzemesi için elyaf yönünde Elastisite modülü
E_T	Takviye malzemesi için elyaf yönüne dik doğrultuda Elastisite modülü
$\bar{\varepsilon}$	Gerinim matrisi
ε_l	Lokal koordinatlardaki gerinim matrisi
ε_r	Radyal gerinim
ε_θ	Çevresel gerinim
ε_z	Eksenel gerinim
G_k	HDPE malzemenin kayma modülü
G_{LT}	Takviye malzemesi için L-T düzleminde kayma modülü
G_{TT}	Takviye malzemesi için T-T düzleminde kayma modülü
$\gamma_{\theta r}$	$\theta - r$ düzleminde kayma gerinimi
γ_{zr}	$z - r$ düzleminde kayma gerinimi
$\gamma_{z\theta}$	$z - \theta$ düzleminde kayma gerinimi
k	Katman sırası
μ_k	HDPE malzemenin Poisson oranı
μ_{LT}	Takviye malzemesi için L-T düzleminde Poisson oranı
μ_{TL}	Takviye malzemesi için T-L düzleminde Poisson oranı
p_o	İç basınç
r_0	RTP iç çapı
r_1	RTP 1. katman dış çapı / 2. katman sarım iç çapı
r_2	RTP 2. katman dış çapı / 3. katman sarım iç çapı
r_3	RTP 3. katman dış çapı / 4. katman iç çapı
r_4	RTP dış çapı
$\bar{S}$	Gevşeklik (compliance) matrisi
$\bar{\sigma}$	Gerilme matrisi
σ_l	Lokal koordinatlardaki gerilme matrisi
σ_r	Radyal gerilme

σ_θ	Çevresel gerilme
σ_z	Eksenel gerilme
t	Takviye malzemesi kalınlığı
T_ε	Gerinim dönüşüm matrisi
t_s	HDPE katman kalınlığı
T_σ	Gerilme dönüşüm matrisi
$\tau_{\theta r}$	$\theta - r$ düzleminde kayma gerilmesi
τ_{zr}	$z - r$ düzleminde kayma gerilmesi
$\tau_{z\theta}$	$z - \theta$ düzleminde kayma gerilmesi
u_r	Radyal yer değiştirme
u_θ	Çevresel yer değiştirme
u_z	Eksenel yer değiştirme
z	RTP serbest boyu

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
ACRYLIC	Polymethyl methacrylamide
API	The American Petroleum Institute
ASTM	American Society of the International Association for Testing and Materials
BMI	Bismaleimid
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics
E&P	Exploration and Production
EN	European Standard
FEM	Finite Element Method
FRP	Fiber Reinforced Plastics
FW	Filament Wound
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics
GRE	Glass Fibre Reinforced Epoxy
HDPE	High Density Polyethylene
ISO	International Organization for Standardization
LDPE	Low Density Polyethylene
LLRTP	Long Length Reinforced Thermoplastic Pipe
PA	Polyamide
PAN	Poliacrylonitrile
PE	Polyethylene
PEEK	Polyether ether ketone
PMMA	Polymethyl methacrylate
PP	Polypropylene
PPA	Polyphthalamides
PPS	Poly phenylene suphide
PS	Polystyrene
PU	Polyurethane
PVC	Polyvinyl chloride
PVDF	Polyvinylidene fluoride
RTP	Reinforced Thermoplastic Pipe
SAN	Styrene acrylonitrile

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Jeotermal RTP boru 3
Şekil 1.2 Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin sınıflandırılması 6
Şekil 1.3 Polimer kompozitlerin üretim yöntemleri [7]....8
Şekil 1.4 Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. firması tarafından geliştirilen elyaf sarma makinesi....9
Şekil 1.5 Düzlemsel elyaf sarma [9] 10
Şekil 1.6 Helisel elyaf sarma [9] 11
Şekil 1.7 Çevresel elyaf sarma [9] 11
Şekil 1.8 RTP sürekli üretim süreç şeması 12
Şekil 1.9 RTP rotasyonel sarma makinesi (Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.) 12
Şekil 1.10 RTP rotasyonel sarma mekanizması 13
Şekil 1.11 RTP boruların genel yapısı [12] 14
Şekil 1.12 Kangal yapılabilir RTP (Fiberspar) [13] 15
Şekil 1.13 Global RTP üreticilerinin ürün kapasite karşılaştırması [psi/inç] [70] 27
Şekil 1.14 Bazı firmaların RTP ürün görselleri 28
Şekil 1.15 Türkiye Kompozit sektörü uygulama oranları [71] 30
Şekil 2.1 Boru üzerinden test numunesi alınması [78]....36
Şekil 2.2 Tip 1 test numunesi şekli [79]....38
Şekil 2.3 HDPE çekme testi gerinim-gerilme grafiği 38
Şekil 2.4 Tek yönlü kompozit malzemeler için test numunesi geometrisi [80] 39
Şekil 2.5 Ø1500 X L3000 mm laboratuvar ölçekli Italmatic marka otoklav....40
Şekil 2.6 Otoklav ile prepreg çekme numunelerinin hazırlanması 41
Şekil 2.7 Otoklav prosesi sonrası cam elyaf – PE plaka görüntüleri 41
Şekil 2.8 Laboratuvar ölçekli hidrolik pres 42
Şekil 2.9 ISO 527-5'e [80] göre hazırlanan numune kesme kalıbı 42
Şekil 2.10 Cam elyaf-PE çekme testi numuneleri....43
Şekil 2.11 Zwick Çekme Test Cihazı....44
Şekil 2.12 Cam elyaf– PE Prepreg takviye malzemesi çekme testi sırasındaki görüntüler....44
Şekil 3.1 Sandviç yapılı kompozit boru görünümü 46
Şekil 3.2 Helisel sarımlı sandviç yapılı boru için silindirik koordinatlar 46
Şekil 3.3 RTP kesit görünümü ve katman özellikleri....47
Şekil 3.4 Silindirik koordinat sistemi 49

Şekil 3.5 İki koordinat sistemi arasındaki ilişki [83] 50
Şekil 3.6 Elyaf sarım açısına göre iç ve dış yüzeylerdeki çevresel gerilmeler 60
Şekil 3.7 2. Katman (1. takviye katmanı) çevresel ve eksenel gerilme durumu 61
Şekil 3.8 3. Katman (2. takviye katmanı) çevresel ve eksenel gerilme durumu 61
Şekil 3.9 Elyaf sarım açısına göre takviye katmanları için çevresel ve eksenel gerilmeler 62
Şekil 3.10 Takviye katmanları için çevresel gerilme – gerinim ilişkisi 62
Şekil 3.11 Takviye malzemeleri için malzeme düzleminde gerilme – gerinim ilişkisi 63
Şekil 3.12 Lokal koordinatlarda takviye katmanları için L-T yönlerinde gerilme grafiği 63
Şekil 3.13 ANSYS sonlu elemanlar analizi proje akış şeması 64
Şekil 3.14 ANSYS Static Structural sınır koşulları, yük durumunu içeren model gösterimi 65
Şekil 3.15 ACP Oriented element set tanıtımı (0°) 65
Şekil 3.16 Elyaf yönlenmeleri ve yapı görünümü 66
Şekil 3.17 1. Takviye katmanı elyaf sarım açılarının ve normallerinin gösterimi 66
Şekil 3.18 2. Takviye katmanı elyaf sarım açılarının ve normallerinin gösterimi 67
Şekil 3.19 Sonlu elemanlar modeli sınır koşulları 67
Şekil 3.20 Sonlu elemanlar modeli yük durumu 68
Şekil 3.21 Mesh kalitesi ve mesh eleman sayısı 68
Şekil 3.22 Dış yüzey çevresel gerilme (ANSYS Structural) 69
Şekil 3.23 İç yüzey çevresel gerilme (ANSYS Structural) 70
Şekil 3.24 Dış yüzey eksenel gerilme (ANSYS Structural) 70
Şekil 3.25 İç yüzey eksenel gerilme (ANSYS Structural) 70
Şekil 3.26 Çevresel deformasyon (ANSYS Structural) 71
Şekil 3.27 Eksenel gerinim (ANSYS Structural) 71
Şekil 3.28 1. Katman (HDPE) gerilme dağılımı (ACP) 72
Şekil 3.29 4. Katman (HDPE) gerilme dağılımı (ACP) 72
Şekil 3.30 Elyaf sarım açısının boru iç ve dış yüzeylerindeki çevresel ve eksenel gerilmeye etkisi 73
Şekil 3.31 2. Katman (1. takviye katmanı) gerilme dağılımı (ACP) 73
Şekil 3.32 2. Katman (1. takviye katmanı) elyaf yönleri ve gerilme dağılımı (ACP) 74
Şekil 3.33 3. Katman (takviye katmanı) gerilme dağılımı (ACP) 74
Şekil 3.34 3. Katman (2. takviye katmanı) elyaf yönleri ve gerilme dağılımı (ACP) 75
Şekil 3.35 Elyaf sarım açısının takviye katmanları çevresel gerilmeleri üzerindeki etkisi 75
Şekil 3.36 RTP iç ve dış yüzey gerilme dağılımları 76
Şekil 4.1 Elyaf sarım açısının RTP iç yüzeyindeki çevresel gerilmeye etkisi 78
Şekil 4.2 Elyaf sarım açısının RTP dış yüzeyindeki çevresel gerilmeye etkisi 78
Şekil 4.3 Elyaf sarım açısının RTP iç ve dış yüzeylerindeki çevresel gerilmeye etkisi 79
Şekil 4.4 Elyaf sarım açısının takviye katmanlarında oluşan çevresel gerilmeye etkisi 79
Şekil 4.5 Elyaf sarım açısının takviye katmanlarında oluşan çevresel gerilmeye – gerinim ilişkisine etkisi 80
Şekil 4.6 Elyaf sarım açısının takviye katmanı gerilmelerine etkisi 80
Şekil 4.7 Elyaf sarım açısının çevresel – eksenel gerilme oranına etkisi 81

Şekil 4.8 Elyaf sarım açısının optimum sarım açısına etkisi.....82

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [2] 2
Çizelge 1.2 Bazı termoplastik polimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri [4] 4
Çizelge 1.3 Termoplastiklerin takviyesinde kullanılan bazı elyafların özellikleri [4] 7
Çizelge 1.4 Kompozit boru pazar sınıflandırması 29
Çizelge 1.5 API 15S standardının kapsadığı bazı test metotları 31
Çizelge 2.1 ISO 6259-1'e göre tavsiye edilen test numune sayısı [78] 36
Çizelge 2.2 Boru et kalınlığına göre test numunesi tipi ve test hızı [79] 37
Çizelge 2.3 Tip 1 test numunesi ölçüleri [79] 37
Çizelge 2.4 HDPE malzeme çekme testi sonuçları 39
Çizelge 2.5 Tek yönlü kompozit malzemeler için Tip A – Tip B test numunesi ölçüleri [80] 40
Çizelge 2.6 Cam elyaf – PE çekme testi sonuçları 43
Çizelge 3.1 RTP'nin geometrik parametreleri 47
Çizelge 3.2 Transverse izotropik takviye katmanı malzeme özellikleri 48
Çizelge 3.3 İzotropik HDPE malzeme özellikleri 48

ÖZET

HELİSEL SARIMLI TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN SARIM ÖZELLİKLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Levent DERE

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Semih SEZER

Takviyeli termoplastik borular, korozyon dayanımı, yüksek dayanım, hafiflik, montaj kolaylığı gibi birçok avantaja sahiptirler. Bu sebeple RTP boruların kullanımı son yıllarda artmaktadır. RTP akışkan geçişi ve korozyon dayanımı sağlayan yüksek yoğunluklu polietilen iç katman, iç basınca karşı dayanım sağlayan takviye katmanı ve bu takviye katmanını dış etkilerden koruyan dış yüksek yoğunluklu polietilen katmandan oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında, iç basınç altındaki RTP için farklı sarım özelliklerinin basınç dayanımına ve mekanik davranışa etkileri analiz edilecektir. Takviye katmanı için kullanılan cam elyaf homojen ve transverse izotropik olarak kabul edilmiştir. Teorik model için üç boyutlu (3D) anizotropik elastisite teorisine dayanan elastik çözüm gösterilmiştir. Teorik olarak hesaplanan mekanik davranışını karşılaştırmak için ANSYS Composite Prepost (ACP) kullanılarak sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Son olarak, teorik ve sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, cam elyaf takviyeli termoplastik matrisli kompozit boru (RTP) için iç basınç altında elyaf sarım açısının mekanik davranışa etkilerinin analiz edilmesidir.

Anahtar Kelimeler: RTP, takviyeli termoplastik boru, kalın cidarlı, iç basınç, sarım açısının etkileri, mekanik davranış

ABSTRACT

ANALYSIS OF EFFECTS OF WINDING ANGLE ON MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER WOUNDED REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES

Levent DERE

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Semih SEZER

Reinforced thermoplastic pipes have many advantages such as corrosion resistant, high strength, light weight and easy to install at relatively low cost than conventional pipes. For this reason areas of usage of plastic pipes have been increased for the last decades. In this study reinforced thermoplastic polyethylene pipe (RTP) configurations are mainly composed of three layers: high density polyethylene liner for to transport fluid and corrosion resistant, glass fiber reinforced tape over wrapping the liner to improve the resistance to internal pressure and a high density polyethylene for coating as an outer layer to protect fibers and pipe were studied. This study mainly focused on the analysis of the mechanical behavior and mechanical properties of angle effects of fiber wounded reinforced thermoplastic pipe (RTP) for different winding layers under internal pressure. In the calculations, main assumption is the consideration of the glass fiber reinforced tapes are homogeneous and transverse isotropic. To study the mechanical behavior of RTP, a theoretical model based on the three-dimensional (3D) anisotropic elasticity theory, an exact elastic solution is presented. Moreover, a finite element model is also developed with ANSYS Composite Prepost software to predict the mechanical behavior. Finaly, theoretical and finite element analysis results are compared.

Aim of the this thesis study is investigate of winding effects on mechanical properties of glass fiber reinforced thermoplastic composite pipe (RTP) under internal pressure.

Keywords: RTP; reinforced thermoplastic pipe, thick walled, internal pressure; winding effects, mechanical behaviour

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

1.1.1 Kompozit Malzemelere Genel Bakış

Kompozit malzemeler iki veya daha fazla malzemenin daha iyi özellikler meydana getirmek için bir araya getirilmesidir [1]. Uygulamada kompozitler, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak anılmaktadır. Kompozit malzemelerin nihai özellikleri bileşimi oluşturan malzemelerden daha iyi özellikler içerir. Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarından meydana gelirler. Matris-elyaf bileşiminin yapısı ve özellikleri kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin oluşmasında oldukça önemlidir.

Kompozit malzemelerin avantajları;

- Hafiflik – yüksek özgül mukavemet,
- Tasarım esnekliği (Kompleks geometriler için kolaylıkla uygulanabilir),
- Çok iyi yorulma dayanımı,
- Yüksek korozyon ve kimyasal dayanımı,
- Elektriksel özellikler (Yapıya göre çok iyi bir iletken veya yalıtkan olabilmektedirler.),
- Yüksek dielektrik iletimi,
- Isı dayanımı,

- Titreşim sönümleme,
- Düşük bakım maliyeti,

olarak sıralanabilir. Belirtilen avantajlarına karşın kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tam olarak öngörülememesi, polimer matrisli kompozitler haricinde üretim maliyetlerinin yüksek olması, kompozit malzemelerin farklı doğrultularda farklı mekanik özellikler göstermesi, gevrek malzeme olmalarından dolayı kolay zarar görmeleri gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Çok farklı yapıda malzeme kullanılarak oluşturulabilen kompozitlerin sınıflandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte kompozit malzemeler matris yapısını oluşturan malzemelere, takviye elemanlarının şekillerine ve kompozit yapının şekline göre Çizelge 1.1'deki gibi sınıflandırılabilir.

Çizelge 1.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [2]

Matris Malzemeleri	**Takviye Elemanları**	**Kompozit Yapının Şekli**
Metal	Elyaflar	Tabakalar
Seramik	Parçacık	Kaplamalar
Polimer	Kılcal kristal (whiskers)	Bal peteği
	Partikül	Elyaf sarılmış yapılar

Kompozit malzemeler günümüzde öncelikli olarak havacılık ve savunma sanayiinin ihtiyaçlarını karşılaştırmak için geliştirilmesi rağmen beyaz eşya sektörü, petrol endüstrisi (boru ve tank uygulamaları), ulaşım ve otomotiv sektörü, denizcilik ve yatçılık sektörü, yenilebilir enerji sektörü, tarım sektörü, elektrik ve elektronik sektörü, sağlık sektörü, inşaat, yapı ve şehircilik uygulamalarında da kullanılmaktadır.

1.1.1.1 Çekirdek (Core) Malzemeler

Core malzemeler kompozit yapıya gerekli olan kayma dayanımını sağlarlar. Core malzemeler normalde düşük dayanımlı malzemeler olmasına karşın, kalınlıkları sebebiyle sandviç yapılı kompozitlere yüksek bükülme direnci, düşük yoğunluk ve yüksek

ısı izolasyonu özelliği sağlarlar. Kıvrımlı core, köpük veya katı core, gergi core ve bal peteği core olmak üzere dört çeşit core malzeme tipi bulunmaktadır [1]. Genellikle köpük veya katı haldeki polivinil (PVC), polistren (PS), poliretan (PU) veya polimetil metakrilat (acrylic) malzemeler kullanılmaktadır. Şekil 1.1'de jeotermal uygulamalarda kullanılmak üzere ısı yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesi için core malzeme olarak PU köpük kullanılmış "Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş." tarafından üretilmiş RTP boru kesiti gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Jeotermal RTP boru

1.1.1.2 Matris (Reçine) Malzemeler

Matris malzemeler elyaflardan daha düşük modüle ve daha yüksek uzama oranına sahiptirler. Matris malzemeler takviye malzemelerini sararak elyafların zarar görmemesini, kuvvetin takviye malzemelerine dağıtımını sağlayarak kompozitin darbe, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklerine etki ederler. Matris malzemesi seçiminde, oluşturulacak kompozit malzeme özelliklerine bağlı olarak mukavemet, elastik uzama, tokluk, darbe dayanımı, kayma mukavemeti, kullanım sıcaklığındaki sürünme özellikleri, takviye malzemesi ile uyum, kimyasallara karşı dayanım, korozyon dayanımı, hızlı kürlenme, kürlenme sıcaklığı ile kürlenme sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı, raf ömrü, özgül ağırlık gibi özellikler dikkate alınır.

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre genel olarak metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olarak üç sınıfa ayırılabilirler. Metal matrisli kompozitler matris malzemesi olarak paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum, alaşımlar, magnezyum alaşımları, nikel bazlı alaşımlar, takviye malzemesi olarak silikon, karpit vb. kullanılarak oluşturulur ve genellikle yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Seramik matrisli kompozitler çok yüksek sıcaklık ve sürtünmeli çevre koşulları için alüminyum oksit, karbon, silikon karpit, silikon nitrat vb. matris malzemeleri kısa (kırpılmış) elyaf takviye malzemeleri ile kullanılarak oluşturulurlar. Elyaf takviyeli plastikler (FRP) olarak da bilinen polimer matrisli malzemeler en yaygın kullanılan gruptur. Matris malzemesinin işlenme şekline göre polimerler önem kazandığı için polimer matrisli malzemeler genel olarak kullanılan matris malzemesinin yapısına göre termoplastik ve termoset olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Termoplastik Matrisler: Termoplastik malzemeler çapraz bağ içermediklerinden dolayı yeniden eritilebilir ve şekillendirilebilir malzemelerdir. Polietilen (PE) (HDPE veya LDPE), polipropilen (PP), polifenilin sülfür (PPS), polieter eter keton (PEEK), polivinilklorür (PVC), poliamid (PA), polistiren, poliakrilonitril, ABS, stiren-akrilonitril (SAN), polimetil metakrilat (PMMA), polifitalamidler (PPA), polikarbonat, polisülfonlar, polieterimit, polifenilen sülfür termoplastik malzemeler olarak kullanılmaktadır [3]. Belirtilen bazı termoplastik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 1.2 Bazı termoplastik polimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri [4]

Termoplastik polimerler	Çekme Modülü, GPa	Çekme Dayanımı, MPa	Erime akış, g/10 min.	Erime Noktası, °C	Yoğunluk, gcm^{-3}
Polipropilen (PP)	1,50 – 1,75	28 – 39	0,47 - 350	134 - 165	0,89 – 0,91
Polietilen (PE)	0,15	10 - 18	0,25 – 2,6	104 - 113	0,918 – 0,919
Poliüretan (PU)	0,028 – 0,72	5 - 28	4 - 49	220 - 230	1,15 – 1,25
Polyamid (PA)	0,7 – 3,3	40 - 86	15 - 75	211- 265	1,03 – 1,16
Polifenilin sülfür (PPS)	3,4 - 4,3	28 - 93	75	280 - 282	1,35 – 1,43
Polibütülen tereftalat (PBT)	1,75 – 2,50	40 - 55	10	230	1,24 – 1,31
Polieter keton keton (PEKK)	4,40	110	30	360	1,31
Polieter eter keton (PEEK)	3,1 – 8,3	90 - 110	4 – 49,5	340 - 344	1,3 – 1,44
Polieterimid (PEI)	2,7 – 4,6	100 - 105	2,4 – 16,5	220	1,26 – 1,7
Polieter sulfon (PES)	2,4 – 8,62	83 - 126	1,36 – 1,58	220	1,36 – 1,58
Polieter tereftalat (PET)	2,47 - 3	50 - 57	30 - 35	243 - 250	1,3 – 1,33

Yüksek performanslı polimerlerin dikkat çekmesiyle, termoplastik kompozitler ile yapısal uygulamalara olan ilgi artmıştır. Termoplastik matrisli kompozitleri termoset matrisli

kompozitlerden ayıran önemli özellikler, geri dönüşüme olanak vermesi, yüksek özgül mukavemet ve özgül sertlik, korozyon dayanımı, gelişmiş darbe dayanımı, depolama koşullarındaki kolaylık, tekrar kullanılabilirlik ve şekil verilebilirlik, üretim verimliliği, düşük çevresel etki ve maliyet etkinliği olarak sayılabilir [4], [5].

Termoset Matrisler: Termoset matrisler esnek olmayan, yeniden şekillendirilemeyen ve eritilemeyen moleküler bağ içerirler. Genellikle polyester, poliimid, poliretan, vinil ester, fenolikler, epoksi (sıvı, katı, yarı katı), silikon ve bismaleimid (BMI) termoset malzemeler olarak kullanılmaktadır.

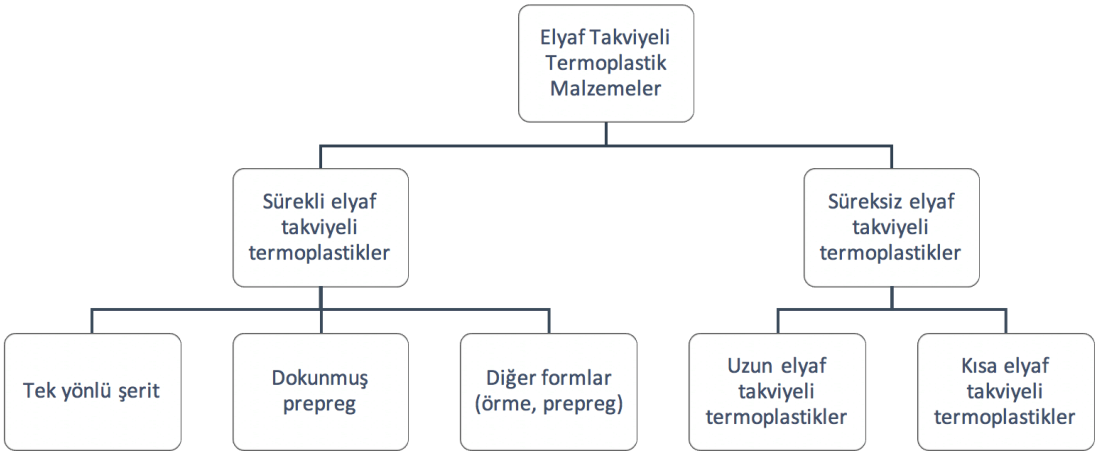
Polimer matrisli malzemeler aşağıdaki şekilde de sınıflandırılabilirler.

- Matris malzemesinin işleme esasına göre: Termoplastik, termoset
- Kullanım alanına göre: Plastikler, fiberler, kaplamalar
- Kimyasal bileşimine göre: Organik, inorganik
- Yapısına göre: Homopolimer, kopolimer, termopolimer
- Fiziksel yapısına göre: Amorf, kristalin, yarı kristalin

1.1.1.3 Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri, kompozit malzeme üzerine gelen yüklerin %70-80'ini taşıyarak kompozit malzemelerde yük taşıyıcı olarak görev yaparlar. Bu oran takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki bağa ve uyuma bağı olarak değişmektedir. Kompozit malzemenin mukavemeti kullanılan takviye malzemesinin tipine, yönüne, kompozit malzeme içerisindeki takviye malzemesi oranına (fiber hacim oranı) ve dağılımına, matris malzemesi ile uyumuna ve bağlanma kuvvetine bağlıdır. Elyaf hacim oranı kompozit malzemenin sertlik ve dayanımına doğrudan etki eder, elyaf hacim oranı arttıkça malzemenin sertlik ve dayanımı artmaktadır. Fakat tek yönlü kompozit malzemelerde, elyaf hacim oranı %65 civarına ulaştığında kompozit malzemenin dayanımı azalmaya başlamaktadır. Bu durum matris malzemesinin oranının azalması sebebiyle matris elyafları bir arada tutamamasından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen kompozit malzemenin sertliği %65'den sonra da artmaya devam etmektedir.

Takviye malzemeleri elyaf, iplik (whiskers), parçacık, partikül veya ince plakalar formunda olabilirler. Elyaflar uygulama veya üretim yöntemine göre sürekli, süreksiz, uzun veya kısa (kırpılmış) biçimde olabilirler. Sürekli elyaf; prepreg üretiminde, dokuma, örme uygulamalarında ve tek yönlü bantlarda kullanılabilmektedirler. Bütün matris malzemeleri ile birleştirilebilirler. Kısa elyaf ise genellikle enjeksiyon kalıplama ve basınçlı kapların üretiminde, püskürtme uygulamalarında kullanılırlar. Elyaf takviyeli kompozitlerin elyaf formuna göre sınıflandırılması Şekil 1.2'de belirtilmiştir.



Şekil 1.2 Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde kullanılabilen başlıca elyaf tipleri [6];

- Cam elyaf (E, A, C, E-CR, D, R, S-2, S+R, AR Tiplerinde),
- Aramid (Aromatic Polyamid) elyaf (Ticari İsmi: Kevlar (DuPont firması), Twaron (Akzo Nobel),
- Karbon (Grafit) elyaf (PA, poliakrilonitril veya zift),
- Bor elyafı,
- Oksit elyafı,
- Yüksek yoğunluklu polietilen elyaf,
- Yüksek yoğunluklu poliamid elyafı,
- Polyester elyafı,
- Doğal organik elyaflar,

- Seramik elyaflar,
- Silisyum karbür (SiC),
- Alümina,

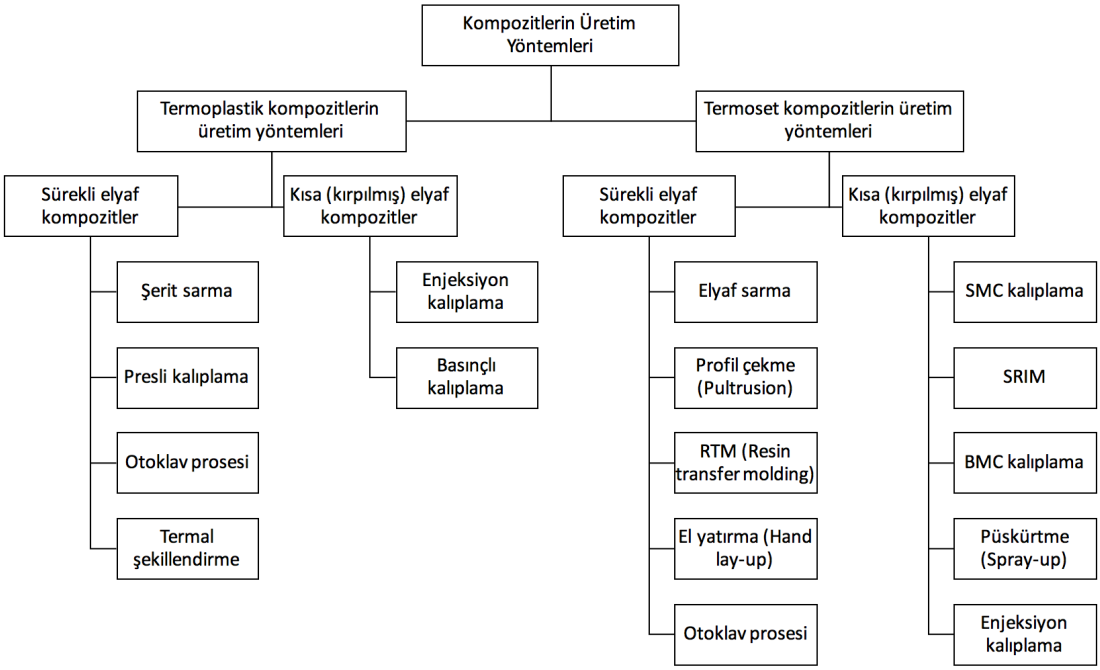
olarak sıralanabilir. Bunlar arasında endüstride en çok kullanılanlar E-Cam, S-Cam, karbon ve aramiddir. Termoplastiklerin takviyesinde kullanılan bazı elyafların mekanik özellikleri Çizelge 1.3'de belirtilmiştir.

Çizelge 1.3 Termoplastiklerin takviyesinde kullanılan bazı elyafların özellikleri [4]

Takviye Malzemeleri	**Çekme Modülü, GPa**	**Çekme Dayanımı, GPa**	**Basma Dayanımı, GPa**	**Yoğunluk, $\mathbf{gcm^{-3}}$**
Boron	415	3,5	5,9	2,5 – 2,6
SiC (Nicalon)	200	2,8	3,1	2,6
E-Cam	70	1,5 – 2,5	-	2,5
S-Cam	90	4,5	>1,1	2,46
Karbon P 100	725	2,2	0,48	2,15
Karbon M60J	585	3,8	1,67	1,94
Aramid (Kevlar 49)	125	3,5	0,39 – 0,48	1,45
PBZT	325	4,1	0,26 – 0,41	1,58
PBZO	360	5,7	0,2 – 0,4	1,58
PE (1000)	172	3,0	0,17	1,0
Vektran	65	2,9	-	1,4
Teknora	70	3,0	-	1,39
Naylon	6	1,0	0,1	1,14
Tekstil PET	12	1,2	0,09	1,39

1.1.1.4 Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler üretilirken matris ve takviye elemanının seçimi, elyafların yönlendirilmeleri ve üretim süreci sırasında elyafların gerekli düzeyde ıslatılması ile birlikte doğru üretim yönteminin seçilmesi de nihai ürünün mekanik ve fiziksel özellikleri için oldukça önemlidir. Kompozit parçaların imal edilmesi için birçok yöntem bulunmasına rağmen bu bölümde tez çalışası ile ilgili olan polimer kompozit üretim yöntemleri Şekil 1.3'de sınıflandırılarak kompozit boru üretiminde kullanılan elyaf sarma metodu ve sürekli elyaf sarma sürecine değinilecektir.



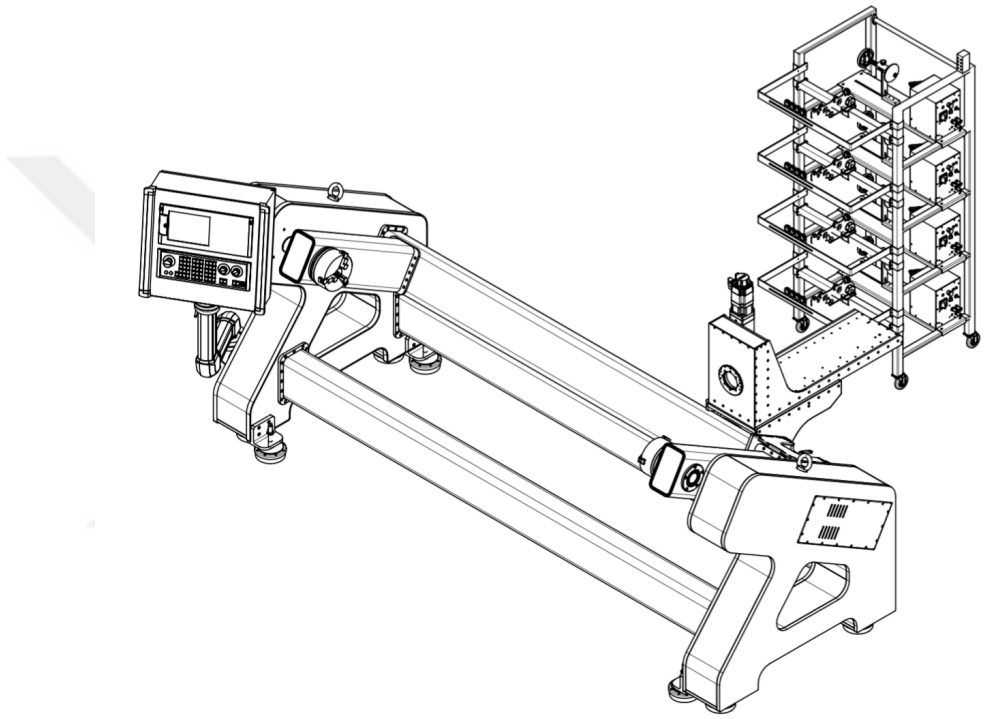
Şekil 1.3 Polimer kompozitlerin üretim yöntemleri [7]

Elyaf sarımlı basınçlı yapılar için alternatif malzemelerin geliştirilmesiyle sürekli elyaf takviyeli termoset matrisli kompozitler günümüzde de yoğun olarak tercih edilmektedir. Fakat 1980'lerden 1990'lı yıllar arasında yüksek performanslı termoplastikler, termoset matrisli filament sarımlı yapıların yerini havacılık, savunma gibi sektörlerde almış bulunmaktadır [8].

Elyaf sarım yöntemi silindirik, simetrik veya asimetrik geometriye sahip yüksek performanslı kompozit parçaların imalatı için kullanılan, bilgisayar kontrollü ve tam otomatik üretime olanak sağlamasından dolayı en verimli yöntemlerden biridir. Kompozit boru ve ek parçaları, basınçlı depolama tankları, havacılık sanayiine yönelik uçak ve helikopter parçaları, roket namluları, yapı elemanları, spor malzemeleri gibi elemanlar bu yöntemle üretilebilmektedir.

Süreksiz üretim sağlayan elyaf sarım makineleri üretim proseslerine göre helisel ve kutupsal olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kutupsal sarım makineleri daha çok büyük parçaların sarımında ağırlıktan dolayı oluşacak sehimi ortadan kaldırmak için sarım yapılacak olan geometrinin dikey olarak yerleştirilmesi ile sarım yaparlar. Mir Araştırma Geliştirme A.Ş. firmasında geliştirilen Şekil 1.4'de gösterilen tipte helisel elyaf sarma makinaları, daha çok kısa boruların ve boru ek parçalarının çok katmanlı üretimine

olanak sağlayan, temel çalışma mantığı olarak dönen bir boru, ek parça veya mandrel üzerine sarım kafasının lineer hareketiyle sarım yapan makinalardır. Buna ek olarak sarma kafası üzerine konumlandırılan ek çalışma eksenleri ile elyafın, sarım yapılacak geometri üzerinde yönlendirilmesi sağlanmış olur. Rotasyonel hareket yapan mandrel ve lineer hareket yapan sarma kafasının hızlarının ayarlanması ile istenilen sarım açısı sağlanmış olur. Daha önceden tasarımı yapılan sarım parametreleri sağlanana kadar katmanlar, aynı veya farklı sarım açıları ile oluşturulurlar.



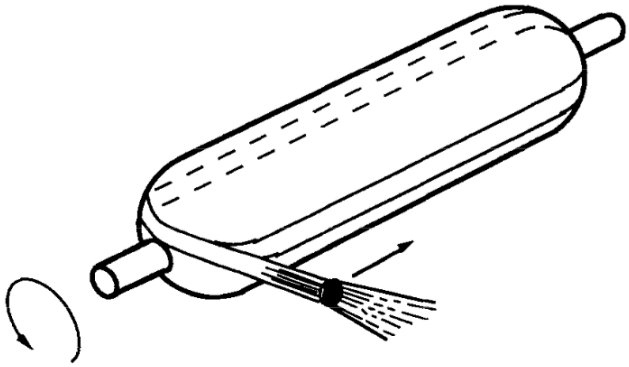
Şekil 1.4 Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. firması tarafından geliştirilen elyaf sarma makinesi

Elyaf sarım makinaları sarım yapılacak geometrinin şekline göre 2 ile 6 serbestlik derecelerine sahip olabilirler. Çoğunlukla sarım parametreleri daha önce tanımlanmış bilgisayar kontrollü bir imalat programı (CAM) yardımı ile sarım işlemi tam otomatik olarak gerçekleştirilir. Sarım yapılacak parça için tercih edilen matris tipine göre (ıslak veya kuru sarım) makineye ilave olarak reçine havuzu veya ısıtma-baskı mekanizmaları ilave edilir. Sarım, çelik, alüminyum, polimer vb.. mandreller üzerine yapıldığında bu mandrellerin sarım işleminden sonra kompozit parça içerisinden çıkarılması gerekmektedir. Ayrıca üretim hacmine göre, imalat süresini hızlandırmak için birden

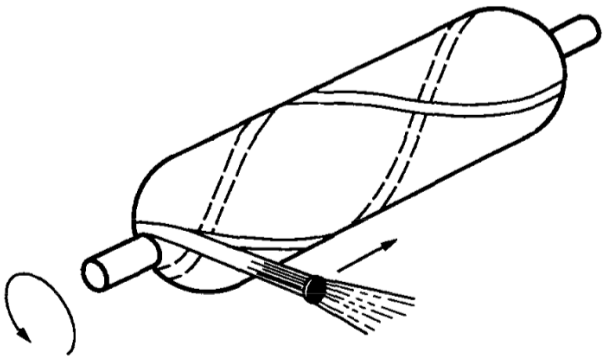
fazla kompozit parçanın aynı anda üretilmesine olanak sağlayan çoklu sarım yapabilen makine tasarımları da günümüzde kullanılmaktadır.

Elyaf sarma yönteminde sarma mekanizmasının eksenel hareketine ve mandrelin rotasyonel hareketine göre Şekil 1.5, Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de gösterildiği üzere düzlemsel, helisel ve çevresel olmak üzere üç tip sarma tipi bulunmaktır [9]. Sarım tipinin seçimi sarım parçasının geometrisine ve üretim sürecine göre belirlenmektedir. Düzlemsel sarım şekli elyafların geometri düzlemsel eksenine göre 5° den daha düşük sarılmasıyla oluşturulur. Düzlemsel sarım tipi ile geometrinin tüm çevresi sarılmaktadır. Tamamlanan her düzlemsel sarım yolu geometrinin tüm yüzeyini tek bir katman ile sarabilmektedir. Helisel sarım tipi ile elyaflar geometrinin düzlemsel ekseniyle 5° ile 80° sarım yapılarak oluşturulur. Elyaflar geometri yüzeyinde pozitif ve negatif yönlerde sarım yapılarak çift katmanlı bir sarım gerçekleştirilir. Helisel sarım açık uçlu geometrilere uygulanabildiği gibi kapalı uçlu geometriler için de uygulanabilir. Çevresel sarım tipi helisel sarım tipinin, geometri düzlemsel ekseniyle 90°'ye yakın sarım yapıldığı özel bir şeklidir. Çevresel sarım tipi sadece düz ve silindirik geometrilere uygulanarak tek katmanlı bir sarım ile geometrinin tüm yüzeyi sarılabilmektedir.

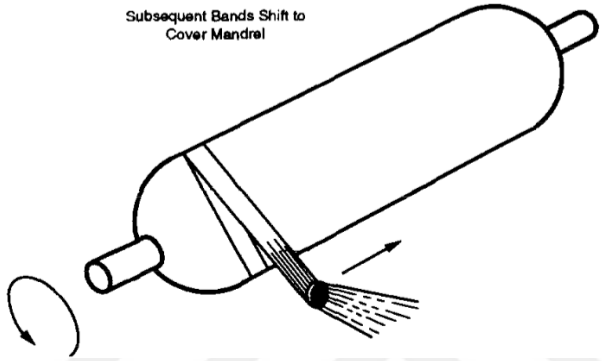
Elyaf sarma yöntemi ile sorunsuz bir üretim gerçekleştirmek için elyaf gerilimi, sarım hızı, reçine malzemesi yüzdesi, şerit genişliği, katman kalınlığı ve katmanlar arasında boşluk kalmaması oldukça önemlidir. Bu sebeple elyaflar ile sarım yapılması durumunda sarma makinesine ek olarak elyaflar üzerindeki gerginliğin kontrolünü sağlayan kontrollü cağarlık sistemleri (elyaf besleme sistemi) kullanılmaktadır.



Şekil 1.5 Düzlemsel elyaf sarma [9]



Şekil 1.6 Helisel elyaf sarma [9]

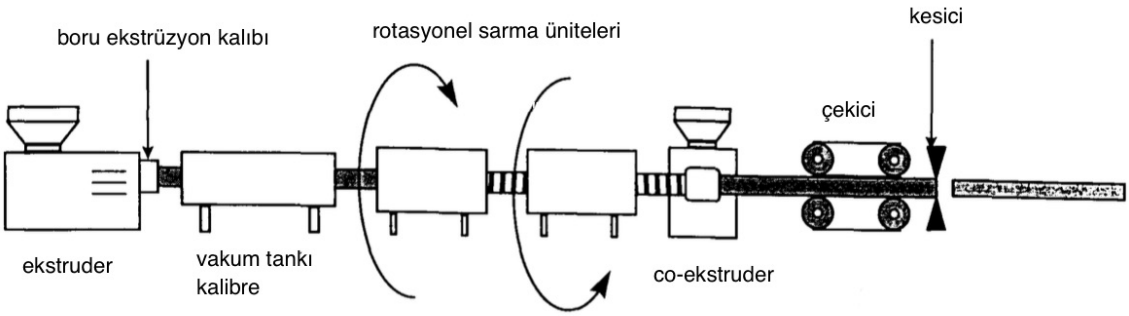


Şekil 1.7 Çevresel elyaf sarma [9]

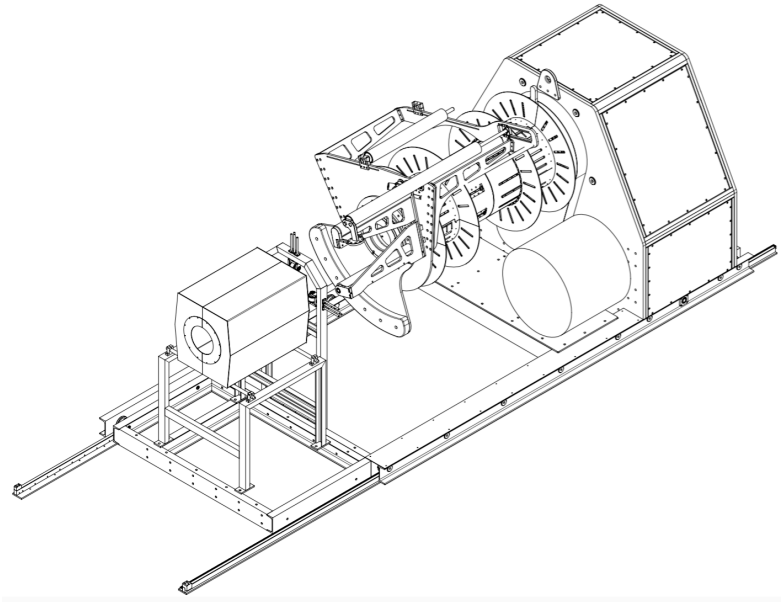
RTP birçok farklı helisel sarım yöntemi ile üretilebilmektedir. Sürekli borular için potansiyel olan helisel şerit sarma metotu bunlardan biridir. Şekil 1.8'de Sürekli formda RTP (LLRTP) boruların sürekli üretim sürecine ait şema gösterilmiştir. Bu süreç RTP'nin iç ve dış katmanının da takviye katmanı ile birlikte üretildiği süreci göstermektedir. Bu üretim süreci haricinde RTP iç katmanın takviye katmanı sarılmadan önce üretilip daha sonra sarma makinaları ile sarıldığı bir üretim süreci de bulunmaktadır. İki sürecin de farklı avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte RTP ürün tasarımına göre en uygun üretim sürecinin seçilmesi gerekmektedir.

LLRTP çoğunlukla helisel şerit sarma yöntemiyle üretilmektedir. Bu üretim yöntemine göre geliştirilmiş sürekli helisel sarım makinası Şekil 1.9'da ve helisel sarım mekanizması ise Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Bu yöntemin en önemli avantajı RTP borular için sürekli üretim olanağı sağlamasıdır. İlk olarak ekstrüzyon yöntemiyle üretilen sonrasında kalibre, vakum ve soğutucu tanklardan geçirilerek soğutulan HDPE iç katman üretilir. İkinci aşamada, ilk şerit takviye katmanı HDPE iç katman üzerine belirlenen açıda sarılır.

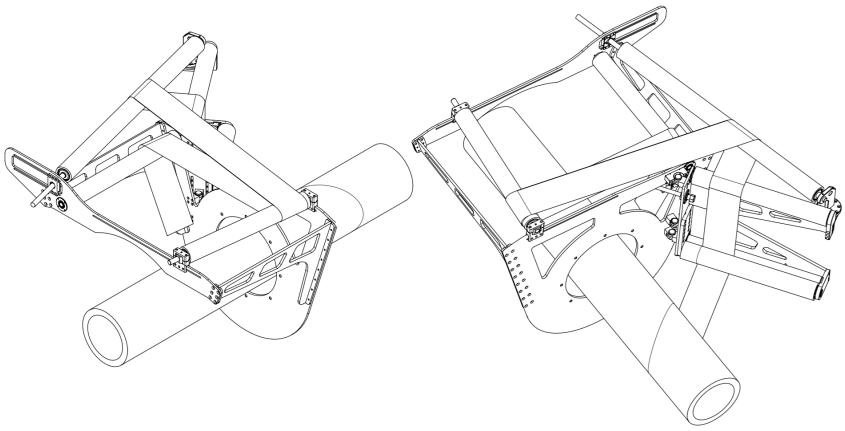
Daha sonra ikinci şerit katmanı, ilk takviye katmanı üzerine ters açı ile sarılır. Bu katmanlar iki veya daha fazla katlı olabilmekle birlikte her sarılan katmandan sonra katmanlar üzerine ısı uygulanarak şeritlerin konsolide olmaları sağlanır. Sarım sırasında şerit gerginliklerinden dolayı boru üzerinde bir basınç oluştuğu için ek olarak bir baskı kuvvetine ihtiyaç olmamaktadır. Son aşamada 2 ana katmandan oluşan yapı bir ekstruder kalıbı içerisinden geçirilerek takviye katmanının çevresine HDPE dış katman kaplanarak RTP elde edilir.



Şekil 1.8 RTP sürekli üretim süreç şeması



Şekil 1.9 RTP rotasyonel sarma makinesi (Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.)



Şekil 1.10 RTP rotasyonel sarma mekanizması

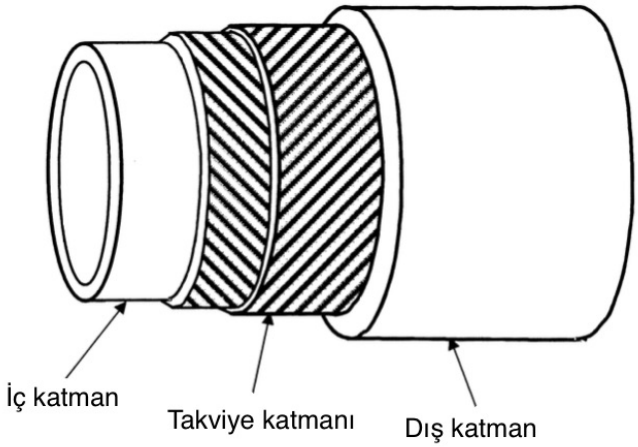
1.1.2 Takviyeli Termoplastik Borular (RTP)

Yüksek performanslı cam, karbon ve aramid elyaflarının takviyeli plastiklerle kullanımı boru hattı uygulamalarında yeni imkanlar oluşturmuştur. Cam elyaf takviyeli plastik borular kimyasal tesislerde yüksek korozif akışkanların taşınması için uzun yıllardır kullanılmaktadır [10]. Cam elyaf takviyeli epoksi (GRE) borunun, korozyon dayanımının gerektiği uygulamalarda kullanıldığı bilinmektedir. GRE borular birçok ulusal, uluslararası ve endüstriyel standartlara sahip olmakla birlikte, arama ve üretim (E&P) uygulamalarındaki iş gücü yoğun uygulamalar, kurulum maliyetleri ve düşük darbe dayanımı açısından GRE boruları sınırlamaktadır. Elyaf takviyeli borular (RTP) ile bu durum değişmiştir. RTP, helisel sarımlı, düşük maliyet ile kolay ve çabuk kurulum yapılabilen esnek borulardır. HDPE'nin korozyon dayanımı ile sentetik elyafların yüksek çekme dayanımı, darbe dayanımı ve ısı dayanımı birleştirilerek, bu borular petrol hatları, atıksu hatları ve enjeksiyon hat uygulamalarına oldukça uygun hale gelmiştir [11].

Takviyeli plastik borular, derin sularda petrol ve doğalgaz üretiminde esnek düşey hatlar, karada basınçlı sıvıların taşınması için de kullanılmaktadır. Her durum için, borular uygulamanın ihtiyacını karşılayabilecek şekilde özel olarak tasarlanıp üretilirler. Farklı katman sayısına sahip borular sarma prosesi ile üretilirler. Her takviye katmanı için sarım açısı, iç basınç veya dış basıncı veya eksenel gerilmeleri karşılayacak şekilde seçilirler.

RTP, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi genel olarak üç katmandan oluşmaktadır ve bileşenleri ile yapıdaki görevleri aşağıdaki gibi belirtilebilir.

- Sızdırmazlığı ve korozyon dayanımını sağlayan termoplastik iç katman (PE80 veya PE100),
- İç basınç ve diğer kuvvetlerin karşılanması için çift sayılı katmanlardan oluşan helisel sarımlı sürekli takviye malzeme katmanı (İç ve/veya dış katman ile tam yapışmanın sağlandığı (bonded) veya sağlanmadığı (unbonded) tipte kullanılabilir.)
- Elyafları darbe, aşınma gibi dış etkilerden ve UV ışınlarından koruyan için dış katman



Şekil 1.11 RTP boruların genel yapısı [12]

Genellikle gaz ve basınçlı sıvıların taşınması için çelik borular kullanılmakla birlikte 4 bara kadar olan uygulamalar için de polietilen borular da kullanılabilmektedir. Bu uygulamaların kompozit boru uygulamaları ile karşılaştırılmasıyla aşağıda belirtilen avantajlar belirtilebilir [4], [12].

- Daha yüksek basınç ve eksenel gerilme dayanımı
- Esnek malzeme özelliği
- Çeliklere göre daha düşük ağırlık
- Birleştirme yöntemi ve kurulum kolaylığı
- Korozyon dayanımı
- Daha yüksek kullanım ömrü

- Kimyasal malzemelere karşı direnç
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek darbe dayanımı
- Yüksek sıcaklıklarda kullanıma imkan tanıması
- Yüksek geçirgenlik dayanımı
- Düşük termal uzama katsayısı
- Çeliklere göre daha iyi aşınma dayanımı
- Geri dönüştürülebilirdik
- Sınırsız raf ömrü



Şekil 1.12 Kangal yapılabilir RTP (Fiberspar) [13]

RTP borularda çelik tel, karbon veya e-cam elyaf takviye katmanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1.3 Akademik Çalışmalar

RTP ve polimer bazlı basınçlı silindirik yapıların iç basınç, dış basınç, eksenel kuvvetler, eğme kuvvetleri, ısı etkisi altında davranışını incelemek, kuvvetlere karşı direncini tayin etmek, uygulama özelliklerine göre optimum sarım açısını belirlemek için teorik, deneysel ve sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde öncelikli olarak RTP'nin iç basınca karşı direncinin ve davranışının incelendiği çalışmalara yer verilerek bazı önemli çalışmalar kısaca belirtilecektir.

Lektnitskii teorisine dayalı elastik çözüm yöntemi basınçlı kapların iç basınca mukavemetin tayini için Tsai-Wu hasar kriteri, maksimum gerinim ve gerilme teorileri kullanılarak Onder vd. [14] tarafından geliştirilmiştir. Onder vd. [14], iç basınç ve hidrotermal kuvvetler altındaki ince cidarlı çok katmanlı cam/epoksi kompozit yapının patlama basıncının analizini Lekhnitskii'nin teorisinden faydalanarak matematiksel elastik çözüm ile gerçekleştirmişlerdir. Borunun hasar basıncını doğrulamak için Tsai-Wu, maksimum gerilme ve gerinim hasar kriterleri kullanılmıştır. Optimum sarım açısının 55° olduğu ve hidrotermal yüklerin hasar basıncına etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bulunan optimum açıyı doğrulamak için sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar teorik çalışmalar ile yakın sonuçlar vermiştir.

Xia vd. [15], klasik lalimat plaka teorisini kullanarak, iç basınç altındaki kalın cidarlı sandeviç yapılı kompozit boruları gerilme ve gerinimlerini incelemek için model geliştirmiş, sandeviç yapılı boruların 3 boyutlu, silindirik ve ortotropik olarak kabul edildiği modelde sarım açısına bağlı olarak gerilme gerinim analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kalın cidarlı borular için optimimum sarım açısının 60° civarında olduğunu ve dış katman modülünün 20 GPa'dan düşük olduğu durumlarda boru dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir.

Bakaiyan vd. [16], üç boyutlu anizotropik elastisite temel alınarak, iç basınç ve termal yükler altındaki kompozit borunun termal gerilim ve deformasyonları için elastik çözüm geliştirmişlerdir. Farklı sarım açıları ve kombinasyonları ayrı ayrı analiz edilerek borunun (+55/-55/+55/-55) sarım açısına sahip sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Zheng vd. [17], PSP boruların iç basınca mukavemetinin tayin edilmesi için, 3D anizotropik elastisite ve maksimum gerilme hasar kriterini kullanarak yeni bir çözüm geliştirmişlerdir.

Bai vd. [18], RTP borunun iç basınca direncin tayini ve mekanik davranışını analiz etmek için 3D anizotropik elastisite ve maksimum gerinim hasar kriterlerini uygulayarak Zheng vd. [17] tarafından geliştirilen çözümü kullanmışlardır. Üç boyutlu anizotropik elastisite teroisine dayalı olarak iç basınca maruz borunun patlama dayanımını hesaplamak için matematiksel ve FEA yaklaşımlarını kullanarak elastik çözüm çalışmışlardır. Çalışmada takviye katmanını anizotropik diğer katmanlar izotropik kabul edilmiştir. Oluşturulan modeli güçlendirmek için PE ve takviye malzemesinin nonliner olarak modellenmesi gerektiğini belirtilmiştir.

Khalid vd. [19], basınç dayanımı için kompozit borularda takviye malzemesinin etkisini incelemişlerdir. Tek ve çift katmanlı çeşitli borulara iç basınç uygulayarak, takviye katmanı sayısı arttıkça iç basınç dayanımının arttığını belirtilmiştir.

Hull vd. [20], imal ettikleri cam takviyeli polyester borular için iki eksenli ve tek eksenli çevresel iç basınç altında deformasyon ve hasar tipini incelemişlerdir. 55° sarım açısının bu çalışma için optimum sarım açısı olduğunu göstermişlerdir.

Takayanagi vd. [21], iç basınç altındaki $30^{\pm}$, $45^{\pm}$, $55^{\pm}$ ve $70^{\pm}$ elyaf sarımlı kompozit boruların sertlik ve dayanımını belirlemek için deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. $45^{\pm}$ ve $55^{\pm}$ sarım açıları için deneysel gerinim ve yer değiştirmeleri teorik sonuçlar ile tutarlı bulmuşlardır. Maksimum gerilme hasar kriterine göre iç basınç altındaki hasar dayanımını belirlemek için teorik yaklaşım sunulmuştur.

Xia vd. [22], da iç basınç altında elyaf sarılmış sandeviç tipli boruda gerilme ve yer değiştirmeyi belirlemek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Klasik laminat plaka teorisine (classical laminated plate theory) dayanarak sandeviç boru, 3D analiz için ortotropik olarak kabul edilmiştir. Kalın cidarlı silindirik yapılarda optimum açı için (1.1)'deki eşitlikten faydalanmış, optimum sarım açısını 60° civarında tespit etmişlerdir.

$$\alpha_{opt} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\sigma_\theta}{\sigma_z}} \quad (1.1)$$

Wild ve Vickers [23], ortotropik silindirik levhalar teorisine dayanan analitik yöntem geliştirmiş ve silindirik tabakalar içeren katmanlar için düzlemsel gerilme ve düzlemsel şekil değiştirme durumlarını modellemişlerdir. Optimum sarım açısının elyaf sarımlı silindirik parçaların tasarımında önemli bir rolü olduğu gösterilmiştir.

Kobayashi vd. [24], iç basınç altındaki helisel sarımlı karbon elyaf takviyeli kompozit boru için elasto-plastik analiz sunmuşlardır. Analiz gerilme ve gerinim dağılımları sonlu elemanlar metodu sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Ansari vd. [25], periyodik iç basınç ve sıcaklık etkisi altındaki kompozit boruların davranışını belirlemek için çok katmanlı elyaf sarımlı kompozit boruların 3D elastisite çözümünü kullanarak zamana bağlı gerilme, gerinim ve deformasyon dağılımlarını elde etmişlerdir.

Kruijer vd. [26], hidrostatik iç basınç ve burulmaya maruz aramid takviyeli HDPE RTP borular için çok katmanlı genelleştirilmiş düzlem gerinim modeli geliştirmişlerdir.

Xu vd. [27], iç basınç altındaki karbon/epoksi basınçlı kap için hasar ve hasar özelliklerini ANSYS APDL 3D parametrik sonlu elemanlar metodu ile maksimum gerilme, Hoffman, Tsai-Hill ve Tsai Wu gibi farklı hasar kriterleri için incelemişlerdir. Tsai-Wu hasar kriterlerinin tüm hasar kriterleri arasında deneysel sonuca göre en doğru sonucu verdiğini belirtmişlerdir.

Parnas ve Katırcı [28], elyaf takviyeli kompozit basınçlı kapların farklı yükler altındaki davranışını Lethnitskii yaklaşımını kullanarak analitik yöntemle incelemiş, deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Klasik laminat plaka teorisini kullanarak kalın cidarlı çok katmanlı elyaf sarımlı silindirik kabuğun düzlemsel gerinim modeli için iç basınç, eksenel kuvvet gibi farklı yükleme şartları dikkate alınmıştır. Farklı eksenel kuvvetler, iç basınç ve hidrotermal yükler ve açısal hız kaynaklı yükler için sarım açısının optimizasyonu yapılmıştır. İnce cidarlı ve kalın cidarlı basınçlı kaplar için olan iki kabul silindirik basınçlı yapı için analiz edilmiştir. Dış yarı çapın iç yarı çapa oranının 1.1 olduğu durumlarda hasar basıncı için yapılan optimum sarım açısı için iki kabul de benzer sonuçlar vermiştir. Bu

oran arttığında kalın cidarlı basınçlı kap kabulünün yapılması gerektiği belirtilmiştir. Yalnızca iç basınç altında kalın cidarlı basınçlı kap için malzeme tipine göre değişkenlik gösteren 52.1° ile 54.1° aralığında optimum sarım açısı elde edilmiştir. Et kalınlığı arttırıldığında iç basınca mukavemetin %30 a kadar arttığı izlenmiştir. Eksenel kuvvetlerin davranışı açısal hızın birinin tersidir. İç basınç ile birlikte açısal hız uygulandığında 90°'ye doğru yükseldiği görülmüştür. Açısal hız uygulandığında optimum sarım açısı 81° ile 83° aralığında analiz edilmiştir. Bu değer et kalınlığına göre değişiklik göstermektedir. İç yarı çapın et kalınlığına oranının 10'dan yüksek olduğu durumlarda kalın cidar kabulünün yapılması tercih edilmektedir.

Xia vd. [29], klasik laminat plaka teorisinden faydalanarak iç basınç ve sıcaklık değişimi altındaki elyaf sarımlı takviyeli sandviç borularda termal gerilme ve gerinimi incelemişlerdir. Kompozit boru 3 boyutlu, silindirik ve ortotropik kabul edilmiştir. Farklı sarım açıları için gerilim ve deformasyonları analiz etmek için bilgisayar programı geliştirilmiştir. İç basınç ve termal yükler altında kalın cidarlı borular için 55° sarım açısının optimum sarım açısı olmadığını belirtmişlerdir.

Tutuncu ve Winckler [30], bileşik yükler (iç ve dış basınç, eksenel yükler, dönme momenti) ve et kalınlığı boyunca sıcaklık değişimi altındaki kompozit silindirler için klasik laminat plaka teorisini kullanarak gerilme ve deformasyonları incelemişlerdir. Kompozit silindirler sürekli, ortotropik olarak kabul edilmiş analiz için yer değiştirmelere dayalı lineer elastik çözüm kullanılmıştır.

Çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranının 2 ye 1 olduğu ince cidarlı silindirik basınçlı kaplar için optimum sarım açısının 55° olduğu kaydedilmiş ve birçok deneysel hasar analizi çalışmaları da bu sarım açısı için yapılmıştır. Rosenow [31], 15° den 85° arasında altı farklı sarım açısı için çift eksenli iç basınç altında, boru üzerindeki gerilme ve şekil değiştirme etkilerini klasik laminat-plaka teorisini kullanarak öngörmüş ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırmıştır. Çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranının 2'ye 1 olduğu ince cidarlı silindirik kaplar için optimum sarım açısının 55° olduğu birçok çalışmada gösterilmiş olmasına rağmen eksenel gerilmenin olmadığı durumlar için optimum sarım açısının ortalama 75° olması gerektiğini belirtmiştir.

Spenver ve Hull [32], Uemura ve Fukumaga [33] , sırasıyla, karbon fiber katkılı plastikler (CFRP) ve cam elyaf katkılı plastikler (GFRP) için farklı sarım açıları için bozunma mekanizmalarını (hasar analizlerini) incelemişlerdir. Maksimum gerilme dayanımı 55° sarım açısı civarında, negatif eksenel gerinimler ise 35° - 50° aralığında gözlenmiştir.

Roy [34], kalın cidarlı ortotropik silindirik çember için ısıl gerilme analizi çalışmasını sunmuştur. Çember, analizde çevresel ve eksenel *(θ ve r)* düzlemlerdeki düzlemsel gerilme durumu için ortotropik malzeme olarak kabul edilmiştir.

Cho vd. [35], Hankel ve Laplace dönüşümlerini kullanarak ortotropik kalın cidarlı silindirik yapının termal gerilmeleri için elasto-dinamik çözümü incelemişlerdir.

Abdalla vd. [36] ince cidarlı cam elyaf epoksi bazlı kompozit borular için farklı yükleme modları için optimum sarım açılarının etkilerini analiz ederek optimum sarı açılarını tespit etmişlerdir. Çevresel basınç kuvveti altında optium sarım açısını 75°, iki eksenli basınç kuvveti altında sarım açısı 55°, eksenel basma kuvveti ve iki eksenli basınç kuvveti uygulandığında ise optimum sarım açısını 85° olarak tespit etmişlerdir. Bulunan sonuçlar deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.

Martins vd. [37], elyaf sarma metoduyla üretilen kompozit borularda optimum uzunluk, optimum açının tespit edilmesini, çap ve et kalınlığının hasar basıncına etkisini incelemişlerdir. Çalışma üç bölümde yapılmış olup ilk bölümde hidrostatik basınç altındaki borular için optimum uzunluğun tespit edilmesini, ikinci bölümde iç basınç altında farklı sınır koşullarına sahip borular için optimum açının tespit edilmesini, son bölümde ise iç basınca direncin tespit edilmesi için yapılan testler sırasında çap ve et kalınlığının hasar basıncına etkisini incelemişlerdir. Teorik ve ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı ile yapılan nümerik çalışmalar bir önceki çalışmalarda elde ettiği test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Parametrik analizler sonucunda farklı sınır koşulları için optimum sarım açısı 53.25°, 74.5° ve 88° (closed, restrained ve open-end) olarak, et kalınlığı ve çapın hasar basıncına etkisi (h/R) $0.03 \leq h/R \leq 0.1$ olarak tespit edilmiştir.

Xia vd. [38], sandviç yapılı borunun optimum yapı tasarımı için metot geliştirmişlerdir. Optimizasyon çalışması, ağırlık veya maliyet azaltma, minimum ağırlık ve maliyet koşullarına göre eğilme rijitliği ve eğme dayanımı için yapılmıştır.

Rasheed vd. [39], elyaf sarımlı kompozit boruların çekme ve iç basınç kuvvetleri altındaki mekanik özelliklerini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Farklı sarım konfigürasyonları için yapılan iç basınca direncin tayini testleri sonucunda $\pm 60^\circ$ $\pm 90^\circ$ sarım konfigürasyonu en yüksek hasar basıncı performansı ile birlikte daha iyi gerilme – gerinim ilişkisi göstermiştir. Ayrıca eğilme ve et kalınlığı boyunca gerilme dağılımları da bu çalışma içerisinde incelenmiştir.

Bai vd. [40], dış basınç altındaki RTP için çökme davranışını analiz etmişlerdir. Basınca bağlı ovalleşme ve çevresel gerinime bağlı ovalleşme sonuçlarını geliştirilen sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılmışlardır.

Kobayashi vd. [41], kalın cidarlı silindir teorisini kullanarak elyaf sarımlı karbon elyaf takviyeli kompozit borular için elastik-plastik analiz ileri sürmüşlerdir.

Roy ve Tsai [42], açık uçlu veya kapalı uçlu kalın cidarlı kompozit silindirler için genelleştirilmiş düzlemsel gerinim durumunu göz önünde bulundurarak iç basınç, dış basınç ve eksenel yükler için gerilme analizi çalışmışlardır. Optimum katman dizilimini belirlemek ve optimize etmek için en kolay yöntemlerden biri olan 3 boyutlu kuadratik hasar kriteri kullanılarak silindirlerin hasarı belirlenmiştir. Kalın cidarlı silindirlerde katman diziliminin optimizasyonda çok kritik olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca iç basınç altında tasarım parametreleri ve kapalı uçlu silindirlerde malzemenin verimli kullanımı da çalışılmıştır.

Liu vd. [43], sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak kompozit laminalar üzerindeki hasar oluşumu üzerine çalışmasında geniş kapsamlı incelemelerde bulunmuşlardır.

Sulaiman vd. [44] alüminyum iç katman üzerine karbon/epoksi elyaf takviyeli polimer ile sarım yapılarak oluşturulan basınçlı kap için sarım açısının etkilerinin incelenmesi, hasar basıncı, maksimum yer değiştirme ve optimum sarım açısının belirlenmesi için sonlu elemanlar metodunu kullanarak çalışma yapmışlardır. Çalışmada Tsai Hill, Tsai Wu, maksimum gerilme hasar kriterinden faydalanılmıştır. Optimum hasar açısı 55° olarak doğrulanmıştır.

Antunes vd. [45], çok ince çelik iç katman üzerine sürekli cam elyaf/polipropilen (GF/PP) malzemeden elyaf sarma metodunu kullanarak basınçlı kap modellemişlerdir.

Modellenen basınçlı kabın basınç ihtiyaçlarını karşıladığını doğrulamak için lineer ve nonlineer çelik iç katman, lineer ve nonlineer kompozit katman davranışları için sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizlerde Tsai Wu ve Von Mises hasar kriterlerinden faydalanılmıştır.

Literatür taraması sırasında iç basınç yükleri haricindeki diğer yükler altındaki RTP ve polimer matrisli kompozit silindirik modeller için benzer çalışmalara rastlanmıştır.

Bai vd. [46], yalnızca dış basınç, yalnızca eğme momenti ve dış basınç ile eğme momentinin birlikte uygulandığı durumlarda RTP borunun çökmesini analiz etmek için kayma deformasyonunu ve burulma deformasyonunu içeren 2D matematiksel model geliştirmişlerdir. Matematiksel sonuçlar 3D sonlu elemanlar modeli sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Chang [47], iç basınç altındaki farklı malzeme özellikleri, et kalınlığı yarı çap oranı ve farklı sayıda katmanlar ile kompozit basınçlı kaplarda ilk katman hasar dayanımının teorik ve deneysel analizini gerçekleştirmiştir. Deneysel verileri maximum gerinim, Hoffman, Tsai Hill ve Tsai Wu hasar teorileriyle karşılaştırarak deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların çok yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel verilere %0.2 ile %1.2 fark ile en yakın teorik sonuca Tsai Hill teorisi ile ulaşılmıştır.

Kam vd. [48], kompozit basınçlı tankların dayanımını teorik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Deneysel çalışmalar ilk katman hasarının ve iç basınca dayanımın tespiti için farklı katman düzenleri için gerçekleştirilmiştir. Farklı analitik yöntemler ve Tsai Hill, Tsai Wu, Hoffman, maksimum gerilme ve maksimum gerinim gibi farklı hasar teorileri kompozit basınçlı tankın ilk katman hasar dayanımını belirlemek için kullanılmıştır. İlk katman hasar dayanımını belirlemek için kullanılan teorik yaklaşımların doğruluğunu test verileri ile karşılaştırarak hasar basıncının hesaplanan ilk katman hasar dayanımından yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bunun sonucunda, ilk katman hasar dayanımının kompozit basınçlı kapların tasarımında bir kriter olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Xia vd. [49], yalnızca eğme kuvveti altındaki elyaf takviyeli sandviç yapılı borular için elyaf sarımının eğilme davranışını etkisini incelemiş, kalın cidarlı sandviç yapılı borular için klasik laminat plaka teorisinden faydalanarak gerilme-gerinim ve deformasyonunun

analizi için metot geliştirmişlerdir. Farklı malzemeler için sarım açısının maksimum-minimum gerilme ve deformasyon değerlerine etkisi incelenmiştir.

Bai vd. [50], katmanlar arasında tam yapışma sağlanmış, iç ve dış katmanları HDPE malzemeden ve takviye malzemesi olarak 55° sarım açısına sahip burulmuş aramid tel–HDPE matris içeren kompozit boru üreterek, sonlu elemanlar metodu ile RTP'nin eksenel kuvvetler altındaki davranışını incelemişlerdir. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak çekme, basma kuvvetleri etkisindeki sonuçlar için sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır.

Bai vd. [51], çekme kuvvetleri altındaki RTP'nin davranışının teorik çözüm ve numerik simülasyon modellerini sunmuşlardır. RTP, çekme kuvvetleri altında nonliner elastik-plastik davranış göstermiştir.

Bai vd. [52], eğme kuvveti altında RTP'nin ovalleşme durumunu teorik ve ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanarak nümerik olarak incelemişlerdir. 54.7° sarım açısına sahip RTP'nin hemen hemen takviyesiz bir HDPE boru ile aynı eğilme direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Et kalınlığı ve borunun çapının RTP'nin bükülme direncini doğrudan etkilediğini belirtmişlerdir.

Huille vd. [53], burulma altındaki kalın veya ince cidarlı kompozit borular için anizotropik veya izotropik malzeme özellikleri ile birlikte kullanılabilecek analitik model geliştirmişlerdir.

Kyriakide tafından geliştirilen eksenel ve kayma deformasyonlarını içeren teorik modeli kullanarak takviyeli termoplastik boruların (RTP) çökme ve burulma davranışını Bai vd. [54], yalnızca dış basınç kuvvetleri için Bai vd. [55], dış basınç ve eğme bileşik kuvvetleri için incelemişlerdir. Teorik model, ABAQUS ile oluşturulmuş sonlu eleman analizi sonuçları ve deneysel sonuçlar kaşılaştırılmak sureti ile sonuçlar doğrulanmıştır.

Natsuki vd. [56], elyaf sargılı kompozit boruların eğme dayanımını analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Dört nokta eğme testleri cam/vinil ester elyaf sargılı kompozit boru için ± 30, ± 55, ± 70 açıları için yapılmış, teorik sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Byon ve Vinson [57], kalın cidarlı sandviç yapılı polimer bazlı silindirik anizotropik yapılar için dış basınç altında gerilim ve deformasyonları belirlemek için sonlu elemanlar metodu geliştirmiştir. Silindirik yapı grafit/epoksi malzemeden 90-0-90 sarım açılarına sahiptir. Sonlu elemanlar modeli üç boyutlu problemi tek boyutta çözümü sağlamıştır. Silindirik yapının hasarını iç yüzeyde oluşan radyal çekme gerinimlerin oluşturduğunu ve bu çekme gerinimlerinin kompozit yapının poisson oranı ile bağıntılı olduğunu tespit etmiştir.

Yu vd. [58], dış basınç ve eğme kuvvetleri altındaki RTP'nin mekanik davranışını sonlu elamanlar yöntemini (FEA) kullanarak incelemiştir. Çalışmada PE ve elyaf takviyeli PE kompozit nonlineer olarak modellemiştir. Katman açılarının etkisi, yük durumları ve çap et kalınlığı oranının RTP borunun bu yükler altındaki performansına etkisi incelenmiştir.

Bai vd. [59], dış basınç ve çekme kuvvetleri etkisindeki RTP borunun burulma ve çökme davranışlarını 2D teorik çözüm ve 3D sonlu elemanlar modeli ile incelemişlerdir. Ek parametrik çalışmalar ile ovallik, çekme, basınç, basınç-çekme kuvveti oranı etkilerini araştırmışlardır.

İki eksenli çekme basma kuvvetleri altındaki cam elyaf takviyeli epoksi kompozit boruların mekanik davranışı Kaddour vd. [60] tarafından incelenmiştir. Hasar gerilme ve gerinimlerinin boru et kalınlığına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Boru davranışını etkileyen faktörler, kabartı, termal gerilme, et kalınlığına bağlı gerilme değişimlerini çalışmışlardır.

Bai vd. [61], RTP borunun dış basınç altındaki çökme basıncını matematiksel analiz, ABAQUS programının kullanıldığı sonlu elemanlar analizi ve matematiksel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının doğruluğunu göstermek için deneysel çalışmalar ile incelemiştir. Sonlu elemanlar ve teorik analiz ile belirlenmiş analiz sonuçlarını deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır.

Ashraf vd. [62], offshore uygulamaları için RTP borunun mekanik davranışının numerik modellemesini ve analizini gerçekleştirmiştir. Tek açılı katman ve çift açılı katmanlara sahip kompozit boru için farklı çap et kalınlığı oranlarının ve farklı sarım açısını kombinasyonlarının mekanik davranışa etkisi ve kangal yapılabilirliği incelenmiştir. Eksenel yönde sarım yapılmasının daha büyük çapta makaralar gerektiğini tespit

etmiştir. 100 mm iç çapa sahip RTP'nin boru dış yüzeyinde herhangi bir deformasyon oluşmadan 3.5 m yarı çapa sahip makaralara sarılabildiği gösterilmiştir. Daha küçük çapta makaralara sarım yapılması durumunda boruda burulmalar meydana gelebileceği ve dış çap et kalınlığı oranı 40'dan yüksek olması durumunda boru üzerinde burulmaların meydana gelebileceği belirtilmiştir.

Soden vd. [63], tek ve iki eksenli yükler altında iç basınç ve eksenel kuvvetler altındaki cam elyaf takviyeli epoksi boru için $\pm 45°$, $\pm 55°$ ve $\pm 75°$ sarım açılarının dayanım ve deformasyona etkilerini incelemişlerdir. Elastiklik sabitlerini farklı yapı ve geometriler için göstermişlerdir. Soden vd. [64] farklı bir çalışmasında eksenel yükler altındaki $\pm 55°$ sarım açısına sahip cam elyaf takviyeli epoksi matrisli ince cidarlı boru için hasar gerilmelerini deneysel olarak incelemişlerdir.

Zheng vd. [65], 3D anizotropik elastisite ve maksimum gerilme hasar kriterine dayalı HDPE iç katman, iki helisel sarımlı çelik tel takviye katmanlı ve en dışta HDPE katman bulunan kompozit boru için hidrostatik iç basınca mukavemetin tayini için analitik çözüm sunmuşlardır. İç basınç altında her bir katmanın gerilim ve gerinimlerini ve katmanlar arasındaki basınç durumlarını incelemişlerdir. Teorik analizlerin deneysel sonuçlar ile doğrulaması yapılmıştır.

Akçay ve Kaynak [66], iç basınç ve uniform termal yükler altındaki düzlem gerimim ve kapalı uçlu durumdaki çok katmanlı elyaf sarımlı kompozit silindirlerin analitik ifadesi için hasar analizi gerçekleştirmişlerdir. Hasar analizleri farklı sarım açıları için farklı sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Sayman [67], nem ve ısı altındaki kalın veya ince cidarlı, simetrik ve asimetrik katman yapısına sahip kompozit silindirler için genel bir gerilme analiz metodu geliştirmiştir. Düzlemsel gerinim için analizler hem açık uçlu hem de kapalı uçlu silindirik yapı için ayrıca yapılmıştır. Nem, ısı ve diğer mekanik özellikler cam-epoksi kompozit tabaka üzerinden ölçülerek elde edilmiştir. Bazı analitik sonuçlar ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan çözümler ile karşılaştırılmış, birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

1.1.4 Teknolojinin Bugünkü Durumu

Petrol ve doğalgaz endüstrilerinde kompozit boruların kullanımı çelik borulara kıyasla giderek artmaktadır. Bu artışın en önemli sebebi kompozit boruların çelik borulara kıyasla daha iyi korozyon dayanımı sağlamalarıdır. Termoset kompozitlerin özellikleri bilindiği ve belgelendiği için çelik boru hatları için ilk kompozit alternatifi termoset bazlı kompozit borular olmuştur [68]. Fakat petrol ve doğalgaz sanayisi için ısı dayanımı, darbe dayanımı ve esneklik gibi artan ihtiyaçlar genellikle termosetler ile karşılanamamaktadır. Termoplastiklerin bu ihtiyaçları karşılamasıyla birlikte günümüzde birçok tipte sürekli elyaf takviyeli termoplastik boru (RTP) geliştirilmeye devam edilmektedir [26].

Kompozitler, endüstrinin tüm alanlarında son günlerde yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra petrokimya endüstrisine yönelik kompozit boru uygulamaları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- Elyaf sarımlı termoset veya cam elyaf takviteli plastik (GRP)
- Kompozit üretim düşey hatları (CPR)
- Kangal yapılabilir termoset boru
- Astarlı boru
- Takviyeli termoplastik boru (RTP)

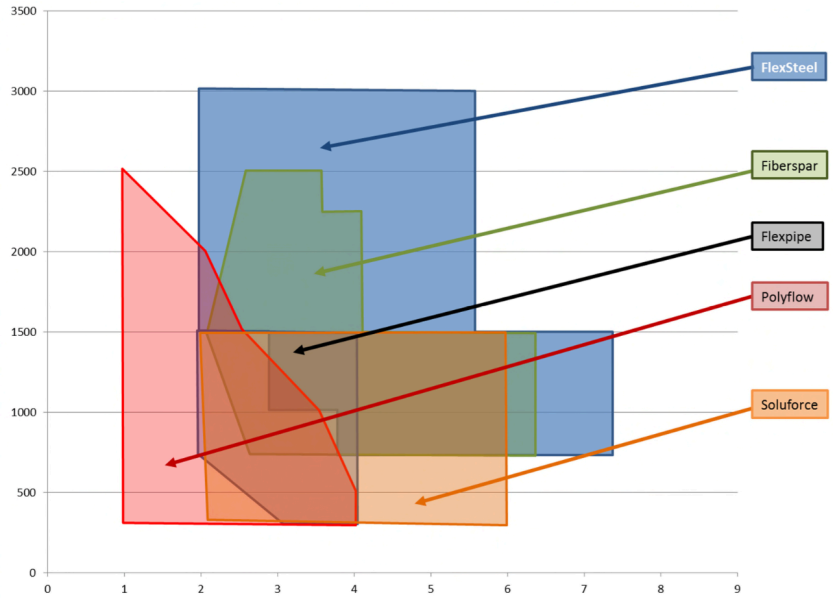
RTP boru Tubes d"Aquitaine firması tarafından bulunmuş [69] günümüzde çeşitli uygulamalara yönelik RTP üreticileri ve ürünlerinin bilgileri aşağıdaki listede belirtilmiştir. Listede belirtilen üretilecilerden bazılarının ürünlerin üretim çapı ve çapa bağlı olarak basınç dayanımları Şekil 1.13'de gösterilmiştir. Firmaların üretmiş olduğu bazı kompozit boruların görselleri ise Şekil 1.14'de sunulmuştur.

- Magma - mpipe (karbon elyaf takviyeli polimer matrisli boru)[1]
- National Oilwell Varco – Fiberspar Line Pipe (e-cam elyaf takviyeli, epoksi veya

[1] https://www.magmaglobal.com

HDPE polimer matrisli boru)[1]

- Flexsteel – Flexsteel Pipe (Çelik tel takviyeli polietilen matrisli boru)[2]
- Soluforce – Basınç sınıflarına göre Light, Classic, Heavy olarak adlandırılmış.[3]
- A Shawcore Company – FlexPipe (elyaf takviyeli termoplastik matrisli boru) ve FlexCord (Galvaniz kaplı çelik tel takviyeli termoplastik matrisli boru)[4]
- Polyflow – Thermoflex (aramid elyaf takviyeli naylon veya PPS matrisli boru)[5]
- Technip – Flexible Pipe (4 ile 19 katmanlı çelik takviyeli esnek boru)[6]



Şekil 1.13 Global RTP üreticilerinin ürün kapasite karşılaştırması [psi/inç] [70]

[1] http://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Fiber_Glass_Systems/Oil_and_Gas/Spoolable.aspx

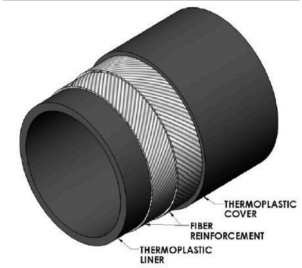
[2] http://www.flexsteelpipe.com/products/flexsteel-pipe

[3] http://www.soluforce.net/soluforce/products/

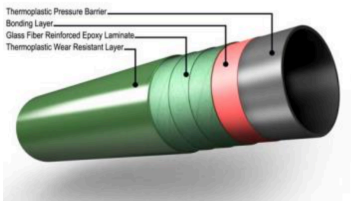
[4] http://www.flexpipesystems.com/products/pipe/pipe.html

[5] http://www.polyflowglobal.com/product/why-thermoflex/

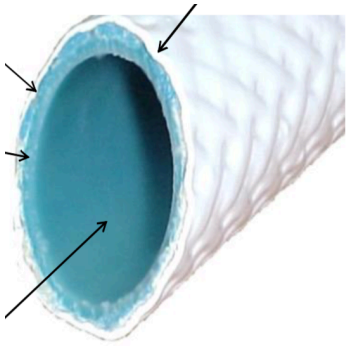
[6] http://www.technip.com/en/our-business/subsea/flexible-pipe



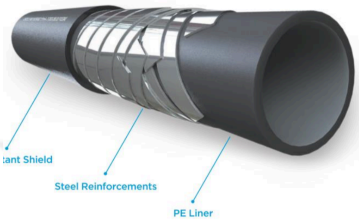
Flexsteel Pipe



Fiberspar



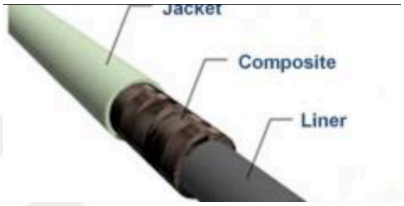
Thermoflex



Flexsteel



Soluforce



Airborne

Şekil 1.14 Bazı firmaların RTP ürün görselleri

RTP üretiminde karar verilmesi gereken en önemli detay borunun tam yapışma (bonded) veya yapışmama (unbonded) ile üretilecek olmasıdır. Bu borunun kangal yapılabilmesi için gerekli olan bükülebilme yarıçapına doğrudan etki edecektir. Tam yapışma sağlanarak üretilen RTP'lerin de kangal yapılabilmesi mümkünken bu çok büyük çapta hacim gerektirdiğinden tercih edilmemektedir. Günümüzde birçok firma sahada montaj kolaylığı ve daha uzun boyda üretime olanak sağlaması sebebiyle kangal yapılabilir boru olarak RTP üretmektedirler. Çizelge 1.4'de kompozit boru pazarında matris tipine ve borunun rijit (bonded) veya esnek (unbonded) olmasına göre takviyeli borular için oluşturulan isimlendirmeler yer almaktadır.

Çizelge 1.4 Kompozit boru pazar sınıflandırması

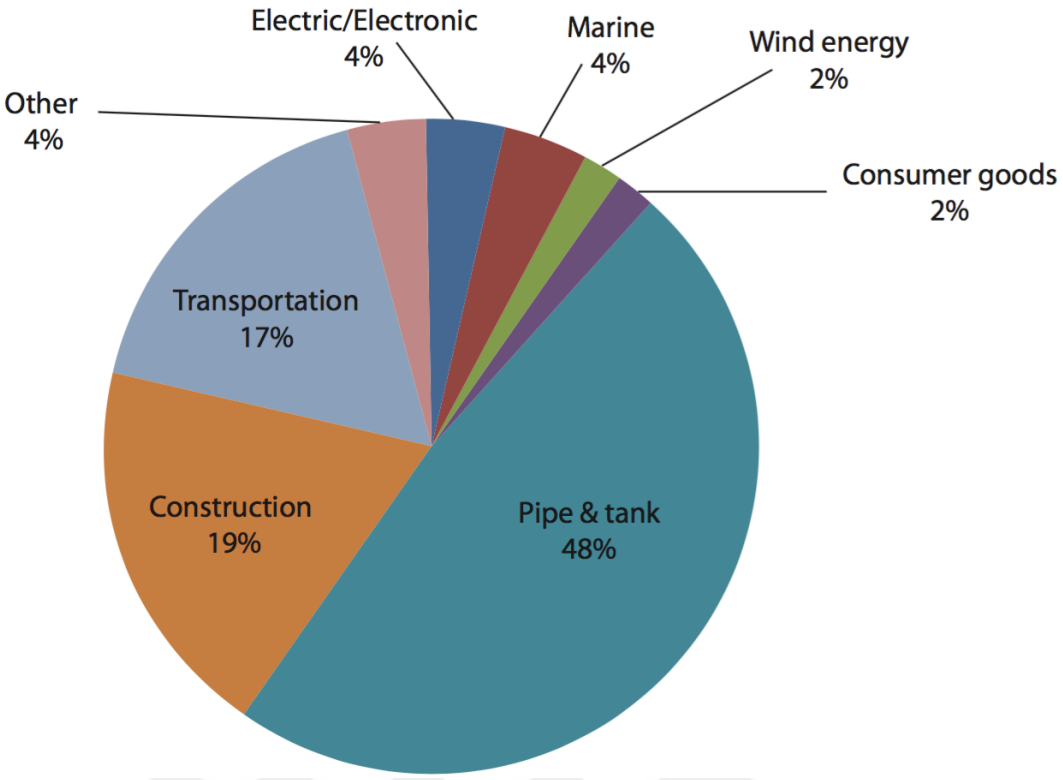
	Rijit	**Esnek**
Termoset	GRE (LP/HP)[1] CPR (HP)[1] Astarlı boru (LP/HP)[1]	Esnek termoset (HP) [1]
Termoplastik		RTP (LP/HP)[1]

RTP borular günümüzde aşağıda belirtilen uygulamalarda tercih edilmektedir.

- Karada doğalgaz ve petrokimya ürünlerinin taşınmasında
- Karada su enjeksiyon sistemlerinde (sondaj)
- Derin sularda doğalgaz ve petrokimya ürünlerin taşınmasında
- Derin sularda su enjeksiyon sistemlerinde
- Madenlerde su soğutma sistemlerinde
- Drenaj ve sulama sistemlerinde
- Jeotermal boru hatlarında

Yaklaşık olarak 150-200 firmanın yer aldığı ve %9-10 yıllık büyüme oranına sahip olan Türkiye kompozit pazarı 2011 yılında 190.000 ton ve 1.000.000 Euro değerinde bir üretim gerçekleştirmiştir. Şekil 1.15'de gösterilen uygulama alanlarında kompozit boru ve tank üretimi yaklaşık %50 pazar payı ile Türkiye kompozit sektörünün en önemli ürünlerindendir [71].

[1] LP: Düşük basınç, HP: Yüksek basınç



Şekil 1.15 Türkiye Kompozit sektörü uygulama oranları [71]

1.1.5 RTP İçin Test Yöntemleri

Petrol ve doğalgaz üretim tarihinde sızdırmazlık, korozyon dayanımı, yüksek basınç dayanımı, engebeli arazi koşulları gibi pazarın ihtiyaçlarına yönelik birçok inovatif teknoji geliştirilmiştir. API 15S [72] standardında tanımlanan, plastik boruların avantajlarıyla, tek katmanlı borulara göre daha yüksek basınç dayanımı sağlaması sebebiyle kangal yapılabilir kompozit borular, pazarın bu ihtiyaçlarına çözüm oluşturmaktadır [73].

API 15S standardı, servis ömrü içerisinde uzun yıllar yüksek basınç dayanımı sağlamasıyla birlikte, nakliye verimliliği sağlaması için kangal yapılabilir özellikte olan boruların uzun ömürlü olmasını sağlamak için malzeme, ürün ve uygulama için geniş testleri kapsamaktadır.

Kompozit borular genel olarak birden çok malzeme kullanılarak, kimyasallara karşı dirençli, taşıma ve depolama verimliliği için kangal yapılabilen, korozif su ve kimyasallara karşı dirençli olması için bariyer katmanı içeren ürünlerdir. Üreticiler takviye katmanı için çelik, cam elyaf ve birçok tipte termoplastik malzeme kullanabilmektedir. İhtiyaçları karşılayan birçok farklı malzemeden üretilen bu kompozit borular uluslararası kabul

edilmiş bir standart olarak API15S standartdı ile tanımlanmıştır. Bu standart tarafından önerilen mekanik özellikler sürünme dayanımı, gerilme ve gerinim özellikleri, darbe dayanımı, gerilme gevşeme özellikleri, Young Modülü, aşınma dayanımı, yoğunluk, yorulma testleri ve çentik duyarlılığını içermektedir. Isıl özellikler ise ısıl iletkenlik ve uzama katsayılarını, bozulma sıcaklığı, yumuşama noktası, ısıl kapasite ve cam geçiş sıcaklık parametrelerini kapsamaktadır. Ek olarak bu standart geçirgenlik özelliğini, akışkan uyumluğunu ve yaşlandırma testlerini de içermektedir.

Boru, ek parçalar ve kaplinler için iç ve dış basınçlara karşı mukavemetinin ve servis ömrünün tayin edilmesi için API 15S'e göre ek yeterlilik testleri gereklidir. Boru maksimum kullanım sıcaklığında ASTM D2992'de [74] açıklandığı şekilde uzun süreli hidrostatik basınç testine tabi tutulur. Borunun maksimum dış basınç kapasitesini belirlemek için ASTM D2412 [75] standardında tariflenen ezme testi yapılır. Borunun hidrostatik iç basınca karşı mukavemetin tayini için ise ASTM 1599 [76] standardına göre testler yapılır. API15S standardının tariflediği bazı testler Çizelge 1.5'de belirtilmiştir.

API 15S standardına ek olarak cam elyaf takviyeli kompozit borular için uygulanması gereken testler "F2686-14 Standard Specification for Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Pipe" 'de [77] belirtilmiştir.

Çizelge 1.5 API 15S standardının kapsadığı bazı test metotları

Özellik	Testler	Test Metodu
Mekanik özellikler	Sürünme dayanımı	ASTM D2990 - Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings
	Akma dayanımı/uzama	ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
	Kopma dayanımı/uzama	ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
	Gerilme gevşeme özellikleri	ASTM E328 - Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures
	Elastisite modülü	ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Çizelge 1.5 API 15S standardının kapsadığı bazı test metotları (devamı)

Özellik	Testler	Test Metodu
Mekanik özellikler	Sertlik	ASTM D2240 - Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness
	Basma dayanımı	ASTM D695 - Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics
	Darbe dayanımı	ASTM D256 - Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
	Aşınma dayanımı	ASTM D4060 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser
	Yoğunluk	ASTM D792 - Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
	Çentik duyarlılığı	ASTM D256 - Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
Isıl özellikler	Termal uzama katsayısı	ASTM D696 - Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between −30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer
	Bozulma sıcaklığı	ASTM D648 - Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position
	Yumuşama noktası	ASTM D1525 - Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics
	Isı kapasitesi	ASTM E1269 - Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry
	Camsı geçiş sıcaklığı	ASTM E1356 - Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry

Çizelge 1.5 API 15S standardının kapsadığı bazı test metotları (devamı)

Uyumluluk ve yaşlandırma	Çevresel gerilim çatlaması	ASTM D1693-05 - Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics
	Su emiciliği	ASTM D570 - Standard Test Method for Water Absorption of Plastics
Basınç dayanımı	Kısa süreli patlama basıncı (İç basınca direncin tayini)	ASTM D1599 - Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings TS EN ISO 1167 Themoplastik Borular, Ekleme Parçaları ve Takımlar-Sıvıların Taşınmasında Kullanılan-İç basınca Direncin Tayini
	Hidrostatik basınç testi (Uzun süreli iç basınç Testi)	ASTM D2992 - Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings
	Dış basınca karşı dayanım	ASTM D2412 - Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, cam elyaf takviyeli PE matrisli RTP boruların elyaf sarım açısının RTP’nin mekanik dayanımına etkileri üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Optimum sarım açısının belirlenmesi ile maksimum çevresel ve eksenel gerilme dayanımları sağlanarak ihtiyacı sağlayan en az miktarda malzeme kullanılarak uygulamalarda yüksek performans elde edilebilecektir.

1.3 Hipotez

Literatürde daha çok termoset matrisli ve ince cidarlı silindirik kompozit yapılar için sarım açısının mekanik dayanıma etkilerinin araştırıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Helisel sarımlı elyaf takviyeli, termoplastik ve kalın cidarlı silindirik yapılar bu çalışmalar içerisinde çok düşük miktarda bulunmaktadır. Bununla birlikte yapılan nümerik

çalışmalarda daha çok ABAQUS ve ANSYS APDL kullanıldığı tespit edilmiştir. Literatürde, bu tez çalışması sırasında nümerik analizlerin gerçekleştirilmesi için faydalanılan, kompozit ürün tasarım ve analizi için geliştirilen ANSYS ACP ile yapılan bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Çalışma sonucunda, teorik analiz ile ANSYS ACP ile yapılan analiz sonuçları doğrulanmıştır.

BÖLÜM 2

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Malzeme Özelliklerinin Deneysel Olarak Tespit Edilmesi

Tez çalışması sırasında yapılacak olan teorik ve nümerik analizlerde kullanılmak üzere RTP içerisinde kullanılan HDPE ve cam elyaf prepreg malzemelerin mekanik özellikleri (E, μ, G) ilgili standartlara göre deneysel olarak tespit edilecektir.

2.1.1 HDPE İç Katman ve Dış Katman Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Tespit Edilmesi

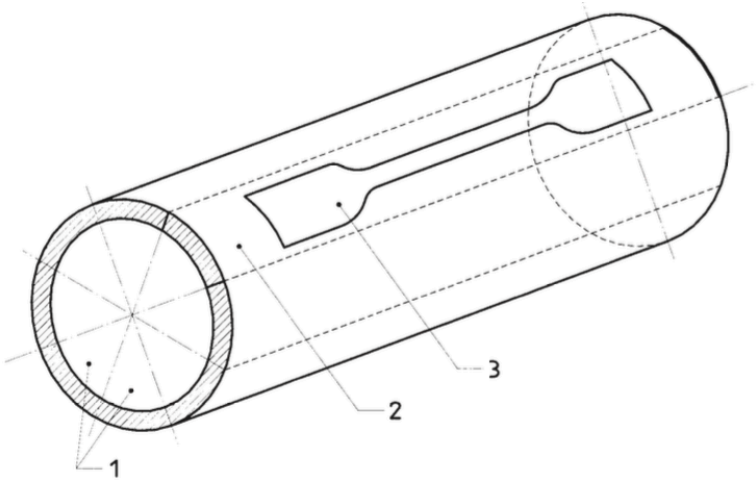
RTP içerisinde iç ve dış katman olarak kullanılan HDPE katmanlar ekstrüzyon yöntemiyle boru formu oluşturulduktan sonra "ISO 6259-1 Thermoplastics Pipes – Determination of Tensile Properties Part 1: General Test Method" [78] ve "ISO 6259-3 Thermoplastics Pipes – Determination of Tensile Properties Part 3: Polyolefin Pipes" [79] standartlarına göre mekanik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiştir.

2.1.1.1 Sağlanması Gereken Test Koşulları ve Test Numunesinin Hazırlanması

ISO 6259-1 [78] standardına göre;

- Ortalama 150 mm boru uzunluğu için Şekil 2.1'de gösterildiği gibi boru numunesi, Çizelge 2.1'deki boru numunesi dış çapına göre belirlenen hazırlanacak test numunesi sayısına göre eşit olarak kesilerek kesilen parçalardan çekme testi numuneleri hazırlanır.

- Et kalınlığı 12 mm ve daha düşük olan borular için test numunesi talaşlı imalat veya kesme kalıpları ile oluşturulmalıdır. Bu tez çalışmasında 6 mm et kalınlığına sahip iç ve dış katmanlar için test numuneleri boru üzerinden kesme kalıpları kullanılarak elde edilmiştir.
- Test numuneleri boru numunesi üretildikten en az 15 saat sonra test edilmelidir.



Şekil 2.1 Boru üzerinden test numunesi alınması [78]

Çizelge 2.1 ISO 6259-1'e göre tavsiye edilen test numune sayısı [78]

Nominal dış çap, $d_n\ [mm]$	$15 \leq d_n < 75$	$75 \leq d_n < 280$	$280 \leq d_n < 450$	$d_n \geq 450$
Kesim sayısı	3	5	5	8

ISO 6259-3 [79] standardında belirtilen Çizelge 2.2'ye göre boru et kalınlığına bağlı olarak test numunesi hazırlama metodu, test numunesi tipi ve test hızı belirlenmiştir.

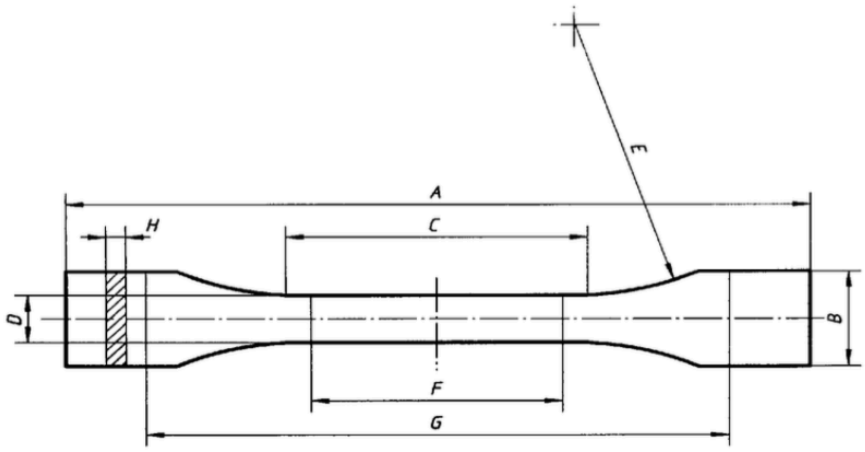
Çizelge 2.2 Boru et kalınlığına göre test numunesi tipi ve test hızı [79]

Borunun nominal et kalınlığı $e_n\ mm$	**Test numunesi hazırlama metodu**	**Test numunesi tipi**	**Test hızı mm/dak**
$e_n \leq 5$	Kalıpla kesme veya talaşlı imalat	Tip 2	100
$5 < e_n \leq 12$	Kalıpla kesme veya talaşlı imalat	Tip 1	50
$e_n > 12$	Talaşlı imalat	Tip 1	25
$e_n > 12$	Talaşlı imalat	Tip 3	10

Belirlenen Tip 1 test numuneleri Şekil 2.2'de gösterilen geometriye uygun olarak Çizelge 2.3'de belirtilen ölçülere göre kesme kalıbı ile hazırlanmıştır.

Çizelge 2.3 Tip 1 test numunesi ölçüleri [79]

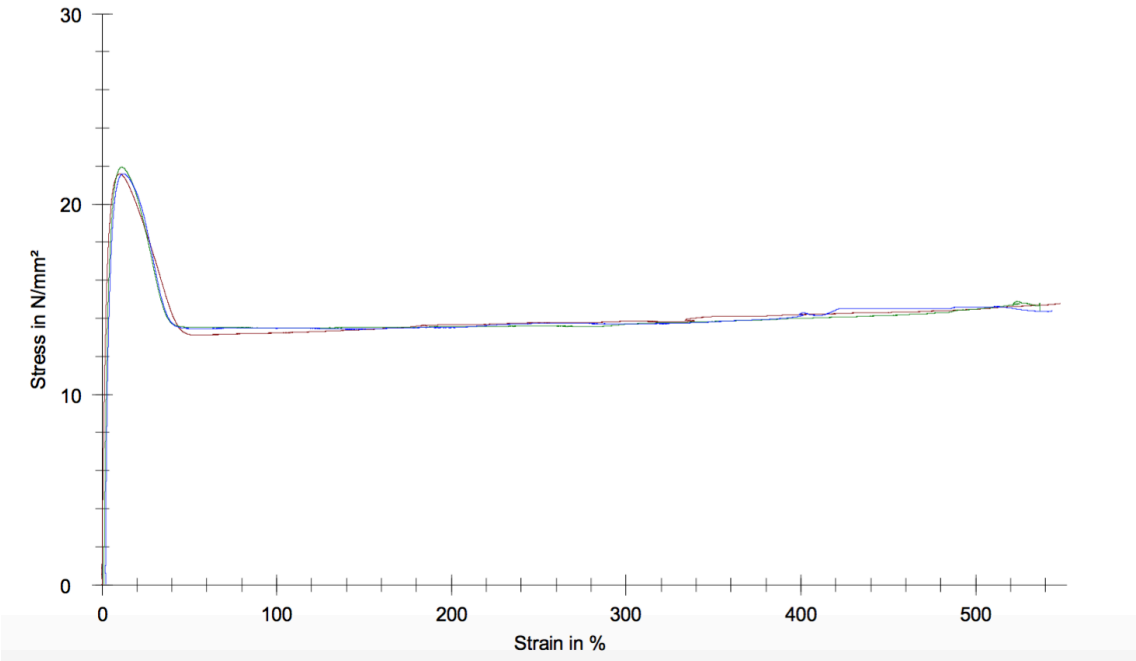
Sembol	**Açıklama**	**Ölçüler [mm]**
A	Boy (en az)	150
B	Genişlik	$20 \pm 0{,}2$
C	Dar kısmın boyu	$60 \pm 0{,}5$
D	Dar kısmın genişliği	$10 \pm 0{,}2$
E	Yarıçap	60
F	Uzama boyu	$50 \pm 0{,}5$
G	Çeneler arasındaki boy	$115 \pm 0{,}5$
H	Kalınlık	Boru et kalınlığı



Şekil 2.2 Tip 1 test numunesi şekli [79]

2.1.1.2 Test Sonuçları

HDPE malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için 2.1.1.1'de belirtilen test koşulları sağlandıktan ve test numuneleri belirtilen şartlara göre hazırlandıktan sonra testler Şekil 2.11'de gösterilen test cihazı ile 50 mm/dak test hızı ile gerçekleştirilmiş ve Çizelge 2.4'de belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.3 HDPE çekme testi gerinim-gerilme grafiği

Çizelge 2.4 HDPE malzeme çekme testi sonuçları

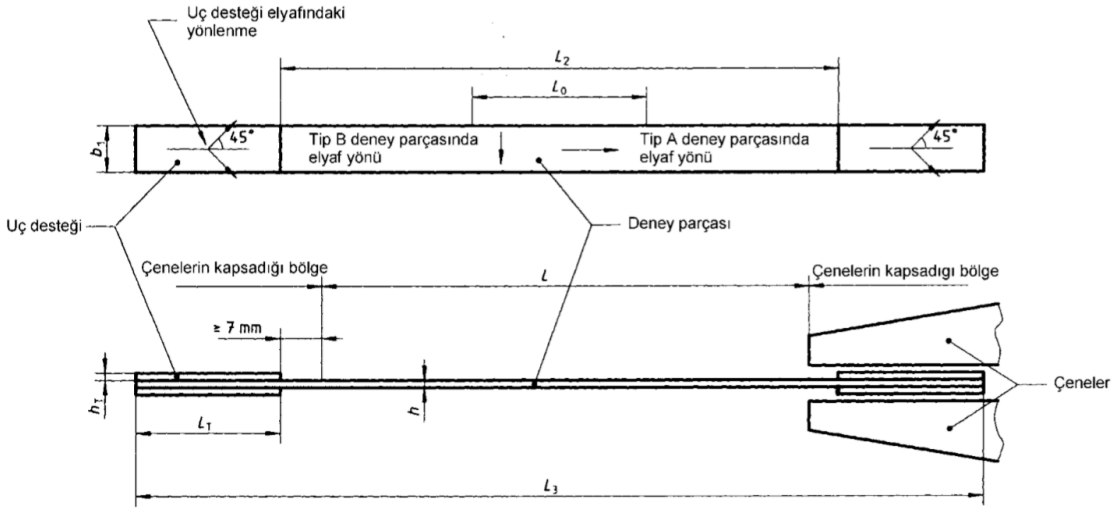
	Elastisite Modülü $[N/mm^2]$	**Poisson Oranı**	**Akma Mukavemeti** $[N/mm^2]$
HDPE	710.78	0.4	21.72

2.1.2 Cam Elyaf - PE Prepreg Takviye Katmanının Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Tespit Edilmesi

2.1.2.1 Sağlanması Gereken Test Koşulları ve Test Numunesinin Hazırlanması

RTP içerisinde orta katman (takviye katmanı) olarak kullanılan tek yönlü Cam Elyaf-PE prepreg malzemenin çekme özelliklerinin belirlenmesi için "ISO 527-5 Plastikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 5: Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler İçin Deney Şartları" [80] ve "ISO 527-1 Plastikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm1: Genel Prensipler" [81] standartlarından faydalanılmıştır. "

Elyaf yönüne bağlı olarak deney yönü için iki tip test numunesi kullanılmalıdır. Çizelge 2.5'de belirtilen test numunesi kalınlıklarını oluşturmak için cam elyaf-PE prepregler Şekil 2.5'de gösterilen otoklavda Tip A için 2 kat, Tip B için 4 kat prepreg şerit kullanılarak oluşturulmuştur. Hazırlanan numuneler Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Tek yönlü kompozit malzemeler için test numunesi geometrisi [80]

Çizelge 2.5 Tek yönlü kompozit malzemeler için Tip A – Tip B test numunesi ölçüleri [80]

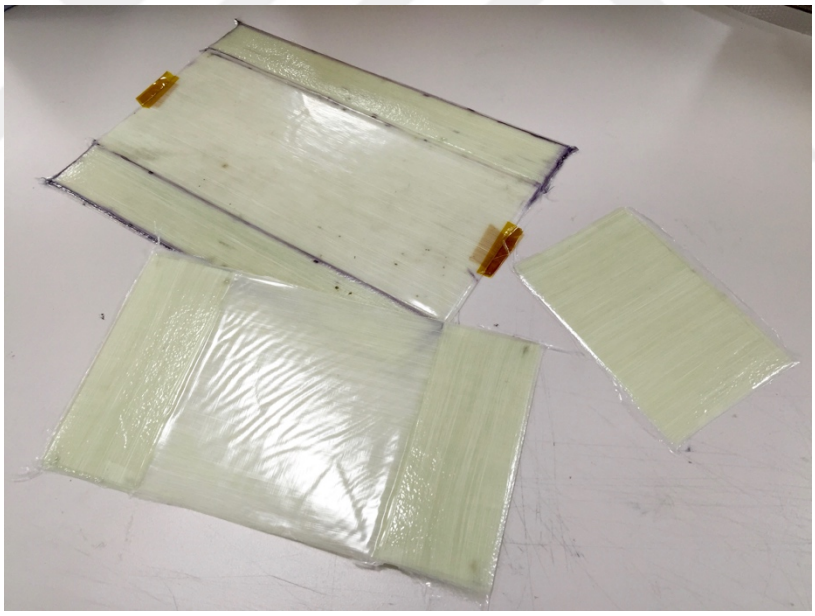
		Tip A [mm]	Tip B [mm]
L_3	Toplam uzunluk	250	250
L_2	Uç destekleri arasındaki mesafe	150 ± 1	150 ± 1
b_1	Genişlik	15 ± 0.5	25 ± 0.5
h	Kalınlık	1 ± 0.2	2 ± 0.2
L_0	Ölçme uzunluğu	50 ± 1	50 ± 1
L	Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi	136	136
L_T	Uç desteklerin uzunluğu	≥ 50	≥ 50
h_T	Uç desteklerin kalınlığı	0.5 - 2	0.5 - 2



Şekil 2.5 Ø1500 X L3000 mm laboratuvar ölçekli Italmatic marka otoklav



Şekil 2.6 Otoklav ile prepreg çekme numunelerinin hazırlanması



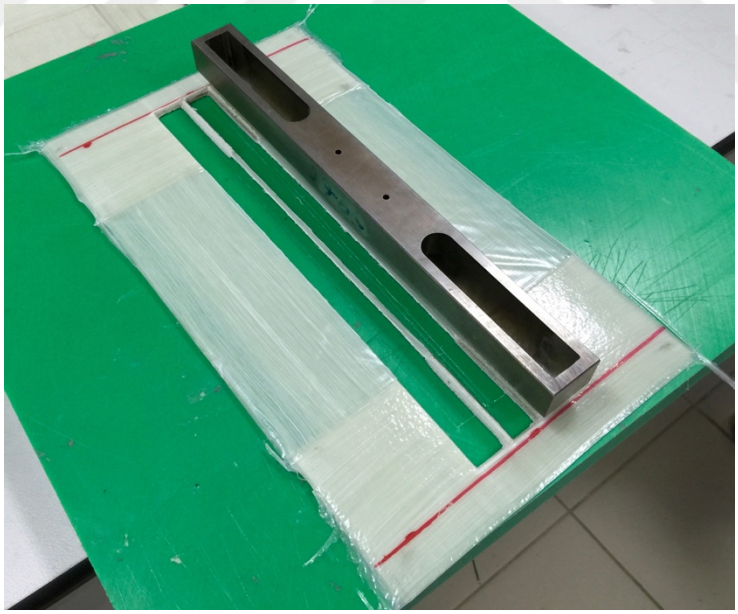
Şekil 2.7 Otoklav prosesi sonrası cam elyaf – PE plaka görüntüleri

Şekil 2.7'de gösterilen otoklavda, EK-B'de belirtilen prosese göre hazırlanan plakalardan, ISO 527-5'de [80] belirtilen Tip A (Elyaf yönünde - 0° yönü) ve Tip B (elyaf doğrultusunun dik yönünde - 90° yönü) çekme testi numunelerini hazırlamak için Şekil 2.4 ve Çizelge 2.5'den faydalanılmıştır. Belirtilen ölçülerde test numunelerini hazırlamak için Şekil 2.8'de gösterilen laboratuvar ölçekli hidrolik pres ve Şekil 2.9'da gösterilen kesme

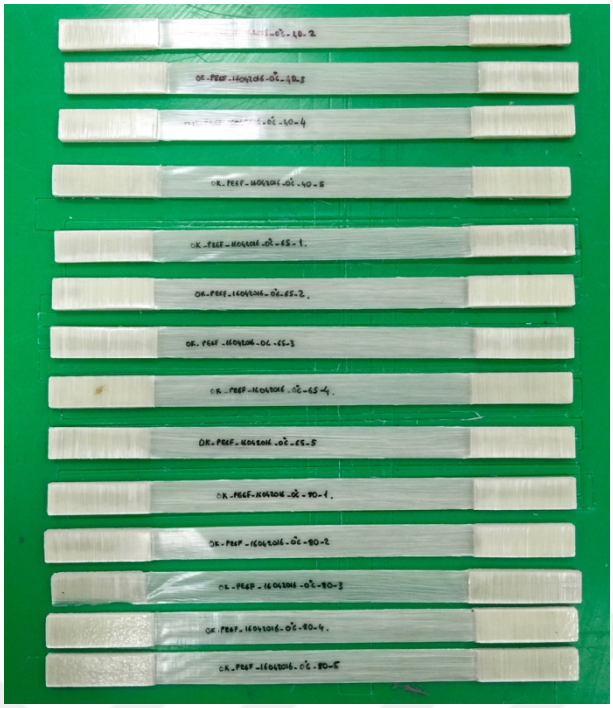
kalıpları kullanılmıştır. Çekme testi için hazırlanan test numuneleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Laboratuvar ölçekli hidrolik pres



Şekil 2.9 ISO 527-5'e [80] göre hazırlanan numune kesme kalıbı



Şekil 2.10 Cam elyaf-PE çekme testi numuneleri

2.1.2.2 Test Süreci ve Test Sonuçları

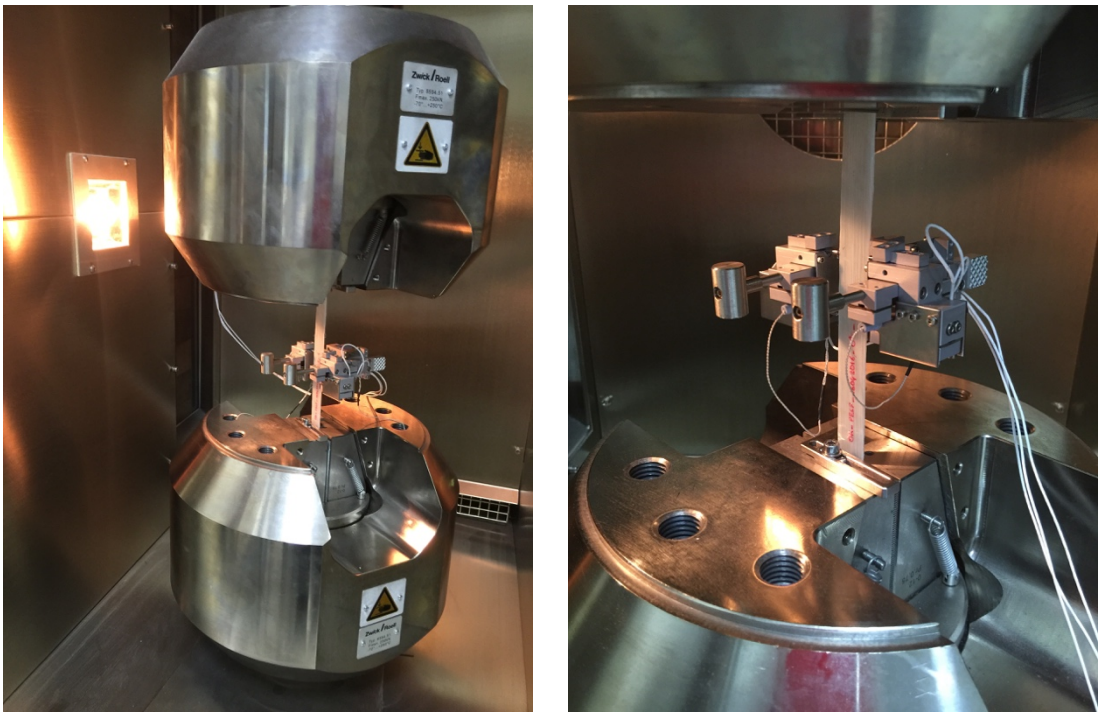
Cam elyaf-PE takviye malzemesinin çekme özelliklerinin tespit edilmesi için 2.1.2.1'de belirtilen şartlar sağlandıktan ve belirtilen şartlara göre Şekil 2.10'da gösterilen test numuneleri hazırlandıktan sonra testler Şekil 2.11'de gösterilen test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.12'de gösterilen testler sırasında malzeme Poisson oranının da tespiti için ekstansometre kullanılarak Çizelge 2.6'da belirtilen test sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 2.6 Cam elyaf – PE çekme testi sonuçları

	Elastisite Modülü $[MPa]$	**Poisson Oranı**	**Akma Mukavemeti** $[MPa]$
Cam elyaf - PE Prepreg	25900	0.34	424



Şekil 2.11 Zwick Çekme Test Cihazı



Şekil 2.12 Cam elyaf– PE Prepreg takviye malzemesi çekme testi sırasındaki görüntüler

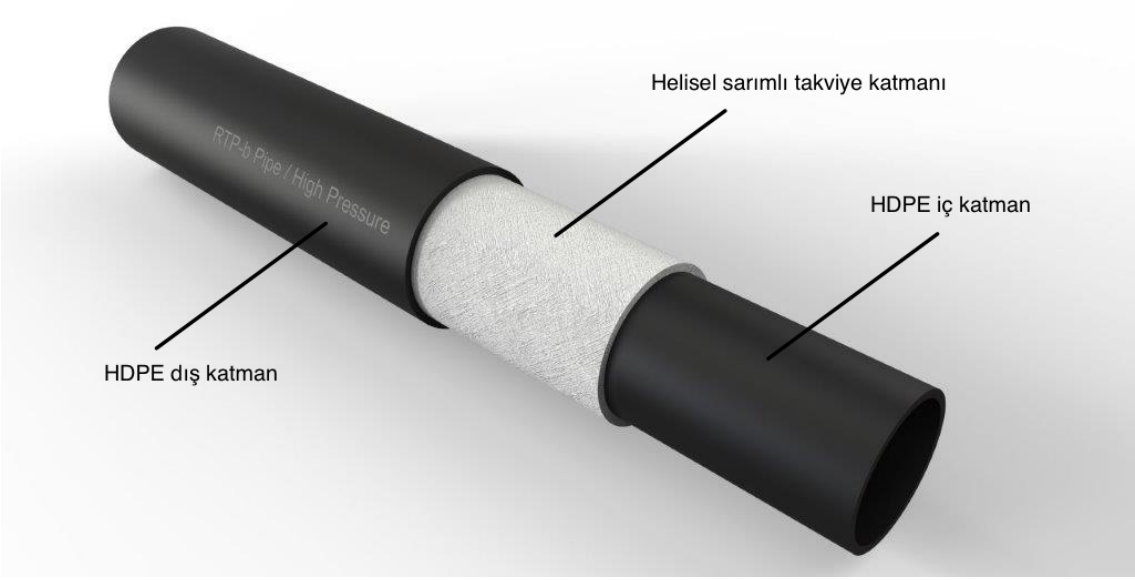
BÖLÜM 3

SAYISAL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, helisel elyaf sarımlı sandeviç yapılı kompozit boruların iç basınç altındaki sarım açısına bağlı gerilme ve gerinim ilişkilerini, şekil değiştirme durumlarını incelemek için teorik ve nümerik çalışmalar yapılacaktır. Elyaf sarım açısının boru yüzeylerinde ve takviye katmanları üzerinde oluşturduğu gerilmeler incelerek optimum sarım açısının belirlenmesi için yaklaşımlar yapılacaktır.

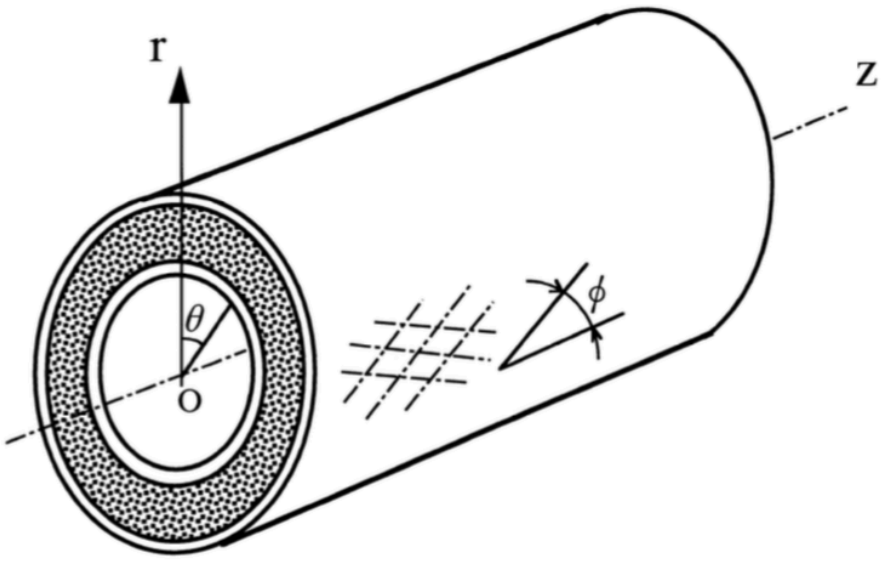
3.1 Modelin Tanımı

Bu tez çalışmasına konu olan sandeviç yapılı kompozit boru Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere RTP, HDPE malzeden oluşan bir iç katman, cam elyaf katkılı prepregden oluşan bir orta takviye katmanı ve kompozit yapılı orta katmanı dış etkilerden korunmasını sağlayan HDPE yapılı bir dış katman ile birlikte 3 ana katmandan oluşmaktadır. Orta katman olan takviye katmanı birbirine zıt helisel sarımlı olmak üzere iki ve ikinin katları şeklinde farklı kat sayılarına sahip olabilmektedir. Bu çalışmada takviye katmanı iki kat olarak modellenecektir.

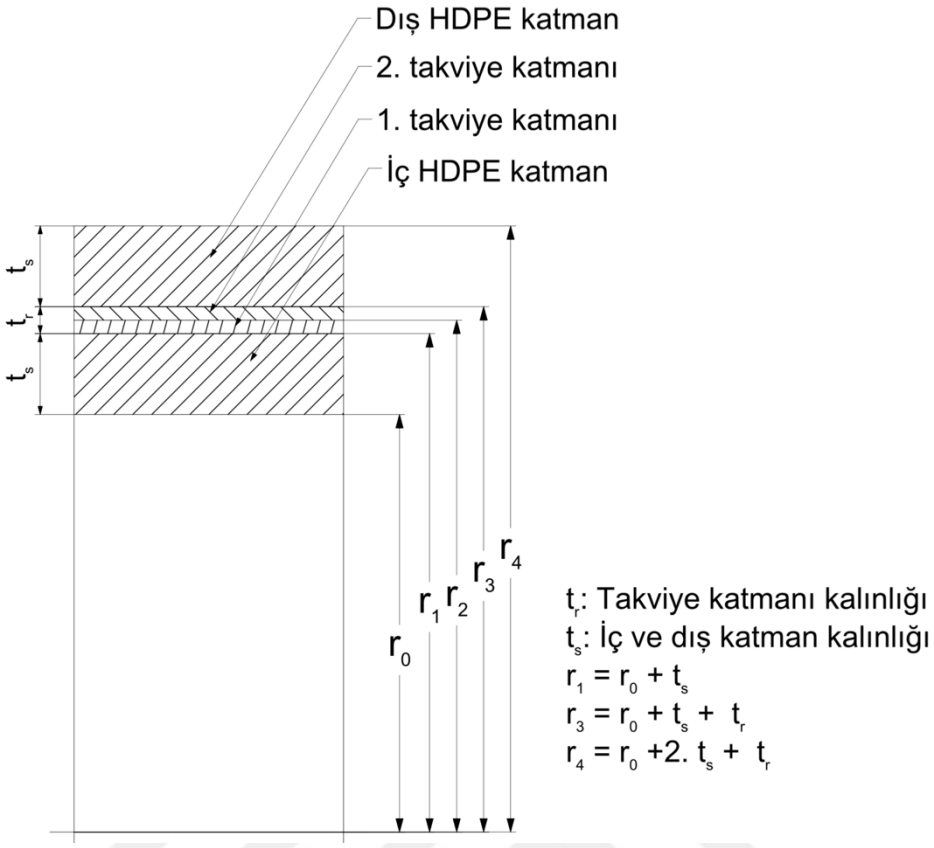


Şekil 3.1 Sandviç yapılı kompozit boru görünümü

Sandviç yapılı kompozit boru için silindirik koordinatlar Şekil 3.2'de, sandviç yapılı borunun kesiti ve tasarım parametreleri ise Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Helisel sarımlı sandviç yapılı boru için silindirik koordinatlar



Şekil 3.3 RTP kesit görünümü ve katman özellikleri

Çizelge 3.1 RTP'nin geometrik parametreleri

r_0 [mm]	r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_3 [mm]	r_4 [mm]	z [mm]
32.1	38.1	38.55	39	45	1000

3.2 Malzeme Özellikleri

RTP borunun iç ve dış katmanı olarak kullanılan HDPE malzemenin mekanik özellikleri Bölüm 2.1.1'de ISO 6259-1 [78] ve ISO 6259-3 [79] standartlarına göre, takviye katmanı olarak kullanılan PE matrisli cam elyaf takviyeli prepreg malzemenin mekanik özellikleri ISO 527-1 [81] ve ISO 527-5 [80] ve ASTM 3518/D3518M-13 [82] standartlarına göre belirlenmiş, elde edilen veriler ve malzeme katalog verileri ile birlikte Çizelge 3.2 oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2 Transverse izotropik takviye katmanı malzeme özellikleri

E_L [MPa]	E_T [MPa]	G_{LT} [MPa]	G_{TT} [MPa]	μ_{LT}	μ_{TT}
25900	313	240	84	0.34	0.4

Çizelge 3.3 İzotropik HDPE malzeme özellikleri

E_k [MPa]	μ_k	G_k [MPa]
710.78	0.4	253.85

3.3 Sayısal Analiz

RTP ölçüleri sebebiyle kalın cidarlı silindir olarak kabul edilmiştir. Eksenel yöndeki deformasyon uniform olarak kabul edilebilir. Çözüm için öncelikle, iki izotropik katmanın gerilme ve gerinim fonksiyonları elastik mekanik teorisi kullanılarak bulunur. Sonrasında iki takviye katmanının gerilme ve gerinim fonksiyonları gerinim süreklilik koşulu ile elde edilebilir. Son olarak, bilinmeyen sabitler ara yüzey durumları ve denge denklemleri ile belirlenir.

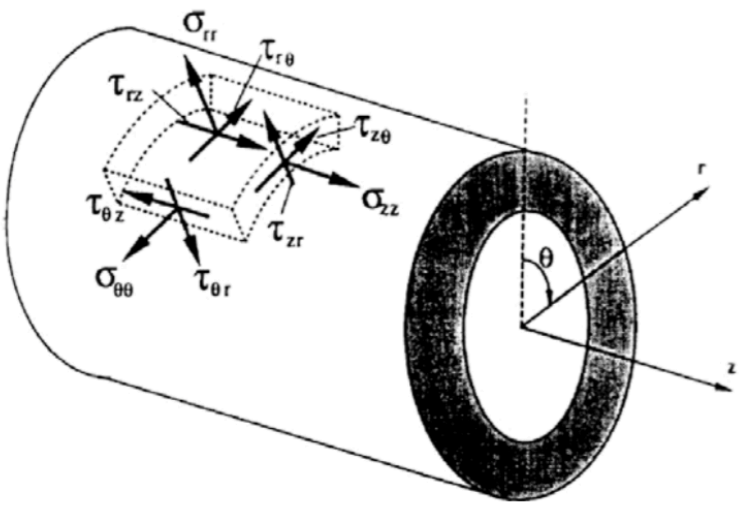
Analizi sadeleştirmek için RTP'nin yapısı ve malzeme özellikleri aşağıdaki maddelerde belirtildiği gibi kabul edilmiştir.

- RTP, HDPE iç katman, iki birbirine zıt sarımlı takviye katmanı ve en dışta HDPE katmandan oluşur.
- 1. ve 4. HDPE katmanlar homojen, sürekli ve izotropik malzemedir.
- 3. takviye katmanları homojen, sürekli ve transverse izotropiktir.
- 4 katmanın gerinimleri ara yüzeyde süreklidir.
- RTP'nin kesiti merkez eksenine diktir.
- HDPE lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir.

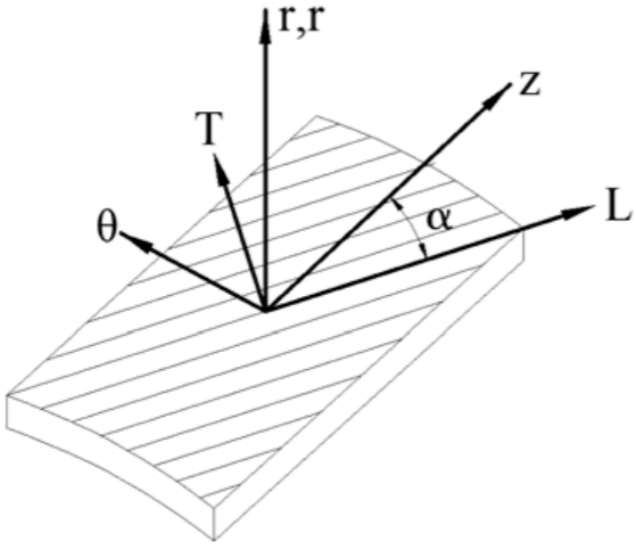
3.3.1 Koordinat Sistemi

Silindirik koordinatlar Şekil 3.4'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. r, θ, z koordinat eksenleri sırasıyla radyal, çevresel ve eksenel yönleri göstermektedir. Takviye katmanlarının lokal koordinat sistemleri L, T, r ile gösterilmiştir. L sarım doğrultusunu, T elyaf yönüne dik doğrultuyu, r ise silindirik koordinat sistemi ile aynı olarak normal doğrultuyu göstermektedir. Lokal malzeme koordinat ekseni ile silindirik koordinat sistemi arasındaki ilişki Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

Cam elyafların Young Modülü PE'ninkinden oldukça büyük olduğu için cam elyaflar üzerindeki gerilme PE üzerindekinden oldukça yüksek oluşacaktır.



Şekil 3.4 Silindirik koordinat sistemi



Şekil 3.5 İki koordinat sistemi arasındaki ilişki [83]

Radyal (u_r), çevresel (u_θ) ve eksenel (u_z) yer değiştirmeler (3.1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} u_r &= u_r(r) \\ u_\theta &= u_\theta(r,z) \\ u_z &= u_z(z) \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.3.2 1. ve 4. İzotropik Katmanlar için Gerilme – Gerinim Denklemleri

Şekil 3.4'de belirtilen silindirik koordinatlara göre 1. ve 4. izotropik katmanlar için gerilme – gerinim ilişkisi (3.2)'de belirtilen **Hooke Kanunu** ile belirlenecektir.

$$\{\bar{\sigma}\}^{(k)} = \bar{C}^{(k)}\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} \tag{3.2}$$

Burada, $\{\bar{\sigma}\}^{(k)}$ gerilme ve $\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)}$ gerinim fonksiyonları;

$$\{\bar{\sigma}\}^{(k)} = \begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \sigma_r \\ \tau_{\theta r} \\ \tau_{zr} \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.3}$$

$$\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{zr} \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.4}$$

şeklinde yazılabilir. İzotropik malzemeler için **rijitlik (stiffness)** $\bar{C}^{(k)}$ ve **gevşeklik (compliance)** $\bar{S}^{(k)}$ matrisleri;

$$\bar{C}^{(k)} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.5}$$

$$\bar{S}^{(k)} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.6}$$

şeklinde yazılır. Rijitlik $\bar{C}^{(k)}$ ve gevşeklik $\bar{S}^{(k)}$ matrisleri arasındaki ilişki;

$$\bar{C}^{(k)} = \bar{S}^{(k)^{-1}} \tag{3.7}$$

olarak tanımlanır. (3.7) ilişkisine göre (3.2)'de belirtilen **Hooke Kanunu** aşağıdaki hali alır.

$$\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} = \bar{S}^{(k)}\{\bar{\sigma}\}^{(k)} \tag{3.8}$$

Üç boyutlu sıralı katman malzeme özelliklerini belirlemek için, malzeme modülü matris elemanlarının $S_{ij}(i,j = 1,2,3)$ complianslarının bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler (3.9) da belirtilen malzeme sabitlerinin deneysel olarak elde edilmesi ile hesaplanır. İzotropik malzeme sabitlerinin her yönde aynı özelliği göstermesinden dolayı S_{ij} matris elemanları (3.9)'da belirtilen sabitler kullanılarak (3.10)'daki gibi yazılabilir.

$$E_x{}^{(k)}, E_y{}^{(k)}, E_z{}^{(k)}, \mu_{xy}{}^{(k)}, \mu_{zx}{}^{(k)}, \mu_{zy}{}^{(k)}, G_{xx}{}^{(k)}, G_{yy}{}^{(k)}, G_{zz}{}^{(k)} \tag{3.9}$$

Burada; E malzeme Elastisite modülünü [MPa], μ Poisson oranını ve G kayma modülünü [MPa] ifade etmektedir.

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = \frac{1}{E_k}$$
$$S_{12} = S_{13} = S_{21} = S_{23} = S_{31} = S_{32} = -\frac{\mu_k}{E_k} \tag{3.10}$$
$$S_{44} = S_{55} = S_{66} = \frac{1}{G_k}$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda (3.6)'da belirtilen $\bar{S}^{(k)}$ gevşeklik matrisi;

$$\bar{S}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_k}{E_k} & \frac{1}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_k}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & \frac{1}{E_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_k} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.11}$$

hallini alır. Bu durumda (3.8) ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \\ \gamma_{\theta r} \\ \gamma_{zr} \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_k}{E_k} & \frac{1}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_k}{E_k} & -\frac{\mu_k}{E_k} & \frac{1}{E_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \sigma_r \\ \tau_{\theta r} \\ \tau_{zr} \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.12}$$

İzotropik malzemeler için G kayma modülü (3.13)'de belirtilen **Lame Denklemi** kullanılarak hesaplanabilir.

$$G_k = \frac{E_k}{2(1+\mu_k)} \tag{3.13}$$

Boru iç çapının et kalınlığına oranı $t/r_o \geq 10$ eşitliğini sağlayan silindirik parçalar kalın cidarlı olarak tanımlanmaktadır. Kalın cidarlı basınçlı kaplar için denge denklemleri yazılır, z ekseni simetri ekseni olarak kabul edilir ve polar koordinatlardaki diferansiyel gerilme denklemleri çözülür ise gerilme denklemleri çözülebilir. Atalet kuvvetleri hesaba katılmadan, genel gerilme denge denklemleri ;

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \sigma_r^{(k)}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta r}^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}^{(k)}}{\partial z} + \frac{\sigma_r^{(k)} - \sigma_\theta^{(k)}}{r} = 0 \\
&\frac{\partial {\tau_{\theta r}}^{(k)}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial {\tau_\theta}^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial {\tau_{z\theta}}^{(k)}}{\partial z} + \frac{2{\tau_{\theta r}}^{(k)}}{r} = 0 \\
&\frac{\partial {\tau_{zr}}^{(k)}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial {\tau_{z\theta}}^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial {\sigma_z}^{(k)}}{\partial z} + \frac{{\tau_{zr}}^{(k)}}{r} = 0
\end{aligned} \tag{3.14}$$

şeklinde ifade edilir. Gerinim ve gerinim ilişkileri, $\varepsilon_r^{(k)}$, $\varepsilon_\theta^{(k)}$ ve $\varepsilon_z^{(k)}$, radyal yer değiştirme $u_r^{(k)}$ve eksenel yer değiştirme $u_z^{(k)}$cinsinde yazılırsa;

$$\begin{aligned}
&{\varepsilon_r}^{(k)} = \frac{\partial {u_r}^{(k)}}{\partial r} \\
&\varepsilon_\theta^{(k)} = \frac{1}{r}\frac{\partial {u_\theta}^{(k)}}{\partial \theta}\frac{u_r^{(k)}}{r} \\
&{\varepsilon_z}^{(k)} = \frac{\partial {u_z}^{(k)}}{\partial z}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
{\gamma_{z\theta}}^{(k)} &= \frac{1}{r}\frac{\partial {u_z}^{(k)}}{\partial \theta} + \frac{\partial {u_\theta}^{(k)}}{\partial z} \\
{\gamma_{zr}}^{(k)} &= \frac{\partial {u_z}^{(k)}}{\partial r} + \frac{\partial {u_r}^{(k)}}{\partial z} \\
{\gamma_{\theta r}}^{(k)} &= \frac{1}{r}\frac{\partial {u_r}^{(k)}}{\partial \theta} + r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{{u_\theta}^{(k)}}{r}\right)
\end{aligned} \tag{3.16}$$

şeklinde ifade edilebilir. İç basınç durumu için boru z ekseni için simetri ekseni kabul edilirse; $\frac{\partial}{\partial\theta} = 0$ olması durumunda ve boru tasarımının uniform radyal şekil değiştirme ve simetri özelliğine göre $\tau_{rz} = \tau_{\theta z} = \tau_{r\theta} = 0$ olur.

$$\varepsilon_r{}^{(k)} = \frac{\partial u_r{}^{(k)}}{\partial r}$$

$$\varepsilon_\theta^{(k)} = \frac{u_r^{(k)}}{r} \tag{3.17}$$

$$\varepsilon_z{}^{(k)} = \frac{\partial u_z{}^{(k)}}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{z\theta}{}^{(k)} &= \frac{\partial u_\theta{}^{(k)}}{\partial z} \\ \gamma_{zr}{}^{(k)} &= 0 \\ \gamma_{\theta r}{}^{(k)} &= r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\theta{}^{(k)}}{r}\right) \end{aligned} \tag{3.18}$$

şeklinde basitleştirilebilir. Bu durumda; (3.1), (3.12), (3.17) ve (3.18) de belirtilen denklemlerden silindirik simetri için denge denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial\sigma_r^{(k)}}{\partial r} + \frac{\sigma_r^{(k)} - \sigma_\theta^{(k)}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial\tau_{\theta r}^{(k)}}{\partial r} + \frac{2\tau_{\theta r}{}^{(k)}}{r} &= 0 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Yer değiştirme denklemleri [83];

$$\begin{aligned} u_r{}^{(k)} &= A^{(k)}r + \frac{B^{(k)}}{r} \\ u_\theta{}^{(k)} &= C^{(k)}zr \\ u_z{}^{(k)} &= D^{(k)}z + E^{(k)} \end{aligned} \tag{3.20}$$

şeklinde ifade edilir, (3.17) ve (3.18) denklemlerine (3.20) ifadeleri yazılırsa;

$$\varepsilon_r{}^{(k)} = A^{(k)} - \frac{B^{(k)}}{r^2}$$

$$\varepsilon_\theta^{(k)} = A^{(k)} + \frac{B^{(k)}}{r^2} \tag{3.21}$$

$$\varepsilon_z{}^{(k)} = D^{(k)}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{z\theta}{}^{(k)} &= C^{(k)} r \\ \gamma_{zr}{}^{(k)} &= 0 \\ \gamma_{\theta r}{}^{(k)} &= 0 \end{aligned} \tag{3.22}$$

elde edilir.

3.3.3 2. ve 3. Anizotropik Katmanlar için Gerilme – Gerinim Denklemleri

Takviye katmanları boru ile karşılaştırıldığında çok ince bir yapı olduğundan gerilme ve gerinimler et kalınlığı boyunca uniform modellenebilir böylece düzlem gerilmeler takviye katmanları için de kabul edilebilir. Takviye katmanlarının gerinimleri aşağıdaki şekilde açıklanabilir [83].

$$\varepsilon_r{}^{(2)} = A^{(1)} - \frac{B^{(1)}}{r^2}$$

$$\varepsilon_\theta^{(2)} = A^{(1)} + \frac{B^{(1)}}{r^2} \tag{3.23}$$

$$\varepsilon_z{}^{(2)} = D^{(1)}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{z\theta}{}^{(2)} &= C^{(1)} r \\ \gamma_{zr}{}^{(2)} &= 0 \\ \gamma_{\theta r}{}^{(2)} &= 0 \end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\varepsilon_r{}^{(3)} = A^{(4)} - \frac{B^{(4)}}{r^2}$$

$$\varepsilon_\theta^{(3)} = A^{(4)} + \frac{B^{(4)}}{r^2} \tag{3.25}$$

$$\varepsilon_z{}^{(3)} = D^{(4)}$$

$$\gamma_{z\theta}{}^{(3)} = C^{(4)} r$$
$$\gamma_{zr}{}^{(3)} = 0 \tag{3.26}$$
$$\gamma_{\theta r}{}^{(3)} = 0$$

kth katmanlarının silindirik koordinatlardaki gerilme-gerinim ilişkileri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\{\bar{\sigma}\}^{(k)} = \bar{C}^{(k)}\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} \tag{3.27}$$

$$\{\bar{\sigma}\}^{(k)} = \begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.28}$$

$$\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.29}$$

$$\bar{C}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} \\ \bar{C}_{31} & \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.30}$$

(3.28), (3.29) ve (3.30) ifadeleri (3.2)'deki eşitlik kullanılarak düzenlenirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} \\ \bar{C}_{31} & \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.31}$$

kth takviye katmanlarının lokal malzeme koordinatlarındaki gerilme-gerinim ilişkileri;

$$\{\sigma\}^{(k)} = C^{(k)}\{\varepsilon\}^{(k)} \tag{3.32}$$

$$\{\sigma_l\}^{(k)} = \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.33}$$

$$\{\varepsilon_l\}^{(k)} = \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.34}$$

şeklinde tanımlanabilir. Malzeme lokal koordinatlarındaki $C^{(k)}$ rijitlik matrisi;

$$C^{(k)} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.35}$$

olarak ifade edilir. (3.35)'de belirtilen lokal koordinat malzeme rijitlik matrisinin matris elemanları (3.36)'de belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} {C_{11}}^{(k)} &= \frac{{E_L}^{(k)}}{1 - {\mu_{LT}}^{(k)}{\mu_{TL}}^{(k)}} \\ {C_{12}}^{(k)} &= \frac{{E_L}^{(k)}{\mu_{LT}}^{(k)}}{1 - {\mu_{LT}}^{(k)}{\mu_{TL}}^{(k)}} = \frac{{E_T}^{(k)}{\mu_{TL}}^{(k)}}{1 - {\mu_{LT}}^{(k)}{\mu_{TL}}^{(k)}} \\ {C_{22}}^{(k)} &= \frac{{E_T}^{(k)}}{1 - {\mu_{LT}}^{(k)}{\mu_{TL}}^{(k)}} \\ {C_{33}}^{(k)} &= {G_{LT}}^{(k)} \end{aligned} \tag{3.36}$$

(3.37)'da belirtilen malzeme lokal koordinatlarındaki gerinimler ile silindirik koordinatlardaki gerinim dönüşümü (3.38)'da belirtilen ${T_\varepsilon}^{(k)}$ matrisi ile sağlanır.

$$\{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} = {T_\varepsilon}^{(k)}\{\varepsilon\}^{(k)} \tag{3.37}$$

$${T_\varepsilon}^{(k)} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -mn \\ n^2 & m^2 & mn \\ 2mn & -2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.38}$$

Kruijer vd. [84], takviye katmanlarındaki açı dönüşümleri için (3.39)'de belirtilen denklemi önermiştir.

$$\alpha^{(k)} = {\alpha_0}^{(k)} + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)\sin {\alpha_0}^{(k)} cos{\alpha_0}^{(k)} + \gamma_{z\theta}\cos^2 {\alpha_0}^{(k)} \tag{3.39}$$

(3.39)'deki eşitlikte belirtilen ${\alpha_0}^{(k)}$, kth takviye katmanınındaki elyaf sarım açısıdır. (3.38)'de belirtilen $m^{(k)}$ ve $n^{(k)}$ değerleri için;

$$m^{(k)} = \cos\alpha^{(k)}$$
$$n^{(k)} = \sin\alpha^{(k)} \tag{3.40}$$

eşitlikleri kullanılır. Malzeme lokal koordinatlarındaki gerilmeler ile silindirik koordinatlardaki gerilme dönüşümü için;

$${T_\sigma}^{(k)} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}^{(k)} \tag{3.41}$$

${T_\sigma}^{(k)}$ dönüşüm matrisi kullanılarak;

$$\{\bar{\sigma}\}^{(k)} = {T_\sigma}^{(k)}\{\sigma\}^{(k)} \tag{3.42}$$

eşitliğinden faydalanılır.

(3.32), (3.37) ve (3.42) denklemleri (3.27)'de kullanılırsa;

$$\{\bar{\sigma}\}^{(k)} = {T_\sigma}^{(k)} C^{(k)} {T_\varepsilon}^{(k)^{-1}} \{\bar{\varepsilon}\}^{(k)} \tag{3.43}$$

denklemi elde edilir. Buradan $\bar{C}^{(k)}$ ve $C^{(k)}$ arasındaki ilişki;

$$\bar{C}^{(k)} = {T_\sigma}^{(k)} C^{(k)} {T_\varepsilon}^{(k)^{-1}} \tag{3.44}$$

ifadesi ile belirlenebilir.

3.3.4 Sınır Koşulları

Bilinmeyen sabitler, denge denklemleri eklenmiş farklı katmanlar arasındaki ara yüzey kondisyonlarından hesaplanabilir. Takviye katmanı ile iç veya dış katmanlar arasında kalan ara yüzeylerde tam yapışma olduğu kabul edilirse, ara yüzeyler boyunca olan uzamalar ve çekme sürekliliği ve çekme serbestliği durumu homojen bir denklem sağlar.

İç ve dış yüzeydeki basınç koşulu;

$$\sigma_r{}^{(1)}(r_0) = -p_0$$
$$\sigma_r{}^{(4)}(r_4) = 0 \tag{3.45}$$

şeklinde ifade edilebilir. İşlemlerin sürekliliği,

$$u_r^{(k)}(r_k) = u_r^{(k+1)}(r_k), k = 1,2, \dots, n,$$
$$\sigma_r^{(k)}(r_k) = \sigma_r^{(k+1)}(r_k), k = 1,2, \dots, n, \tag{3.46}$$

şeklinde ifade edilebilir. İki ucu kapalı silindirik yapı için eksenel kuvvetler denge denklemi;

$$2\pi \sum_{k=1}^{4} \int_{r_{k-1}}^{r_k} \sigma_z{}^{(k)}(r)dr = \pi {r_0}^2 p_0 \tag{3.47}$$

şeklinde ifade edilir.

3.3.5 Çözüm

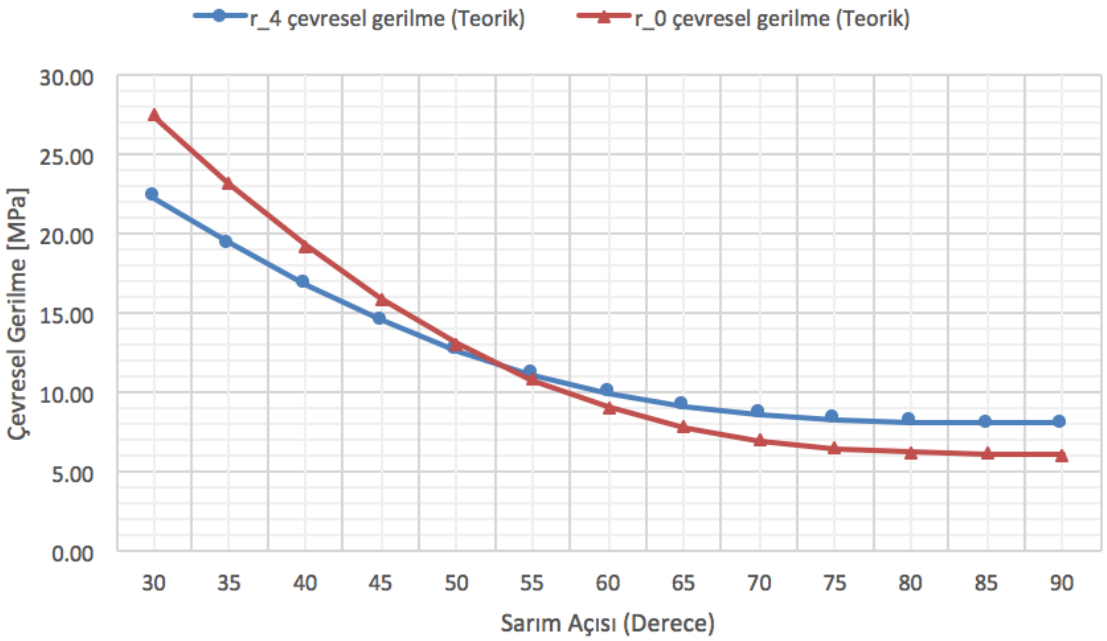
4 katmanlı RTP borunun, $A^{(1)}$, $B^{(1)}$, $A^{(4)}$, $B^{(4)}$, $C = C^{(1)} = C^{(4)}$, $D = D^{(1)} = D^{(4)}$ integrasyonunun bilinmeyen sabitleri takviye ile alt veya üst katmanlar arasındaki ara yüzeyler için sınır şartları ve temas koşullarından belirlenir. Sabitler de belirtilen eş zamanlı denklemin çözülmesi ile belirlenebilir [83].

$$\begin{Bmatrix} A^{(1)} \\ B^{(1)} \\ A^{(4)} \\ B^{(4)} \\ C \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & 0 & 0 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & 0 & 0 & 0 & e_{36} \\ 0 & 0 & e_{43} & e_{44} & 0 & e_{46} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} & e_{54} & e_{55} & e_{56} \\ e_{61} & e_{62} & e_{63} & e_{64} & e_{65} & e_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_0 \\ 0 \\ \pi {r_0}^2 p_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{3.48}$$

MATLAB yazılımında program yazılmak suretiyle (3.48)'de belirtilen denklem çözülmüş, $A^{(1)}$, $B^{(1)}$, $A^{(4)}$, $B^{(4)}$, $C = C^{(1)} = C^{(4)}$, $D = D^{(1)} = D^{(4)}$ sabitleri belirlenmiştir. e_{ij} matris elemanları EK-C'de belirtilmiştir.

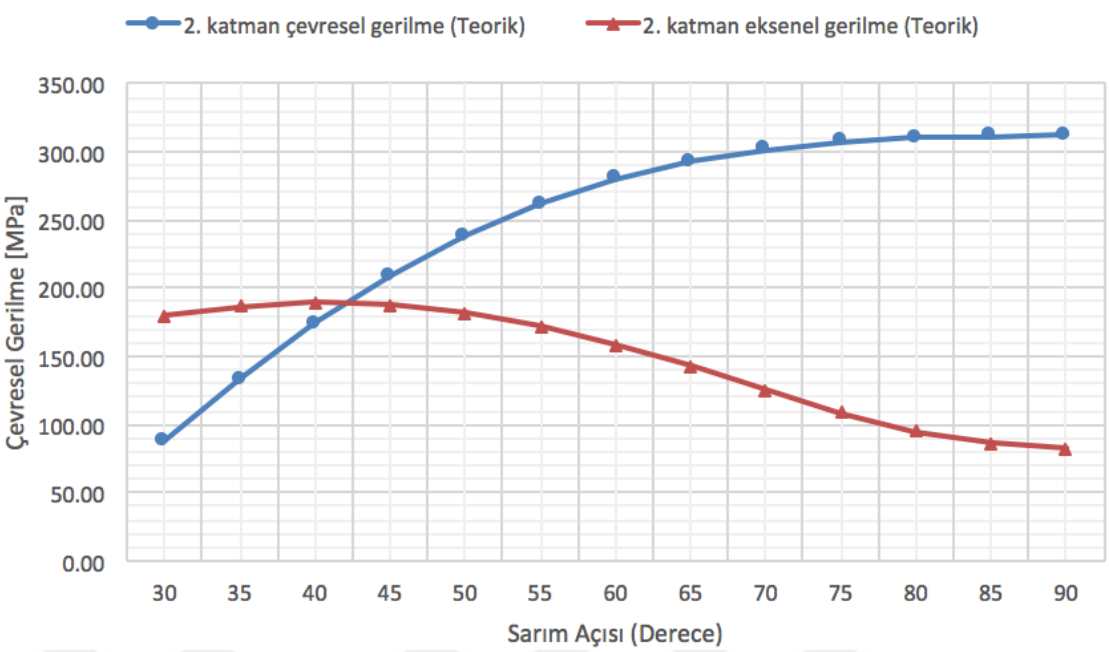
3.3.6 Sonuçlar

Matlab ile oluşturulan yazılım ile ±30° ile ±90° aralığındaki sarım açıları için çözümler yapılmış elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde belirtilmiştir.

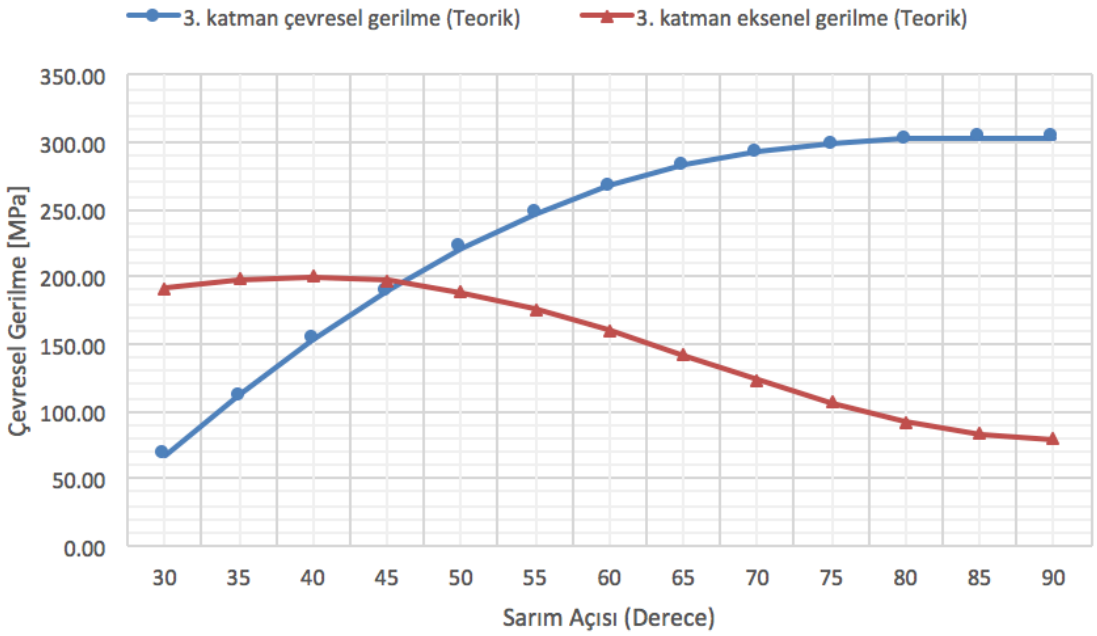


Şekil 3.6 Elyaf sarım açısına göre iç ve dış yüzeylerdeki çevresel gerilmeler

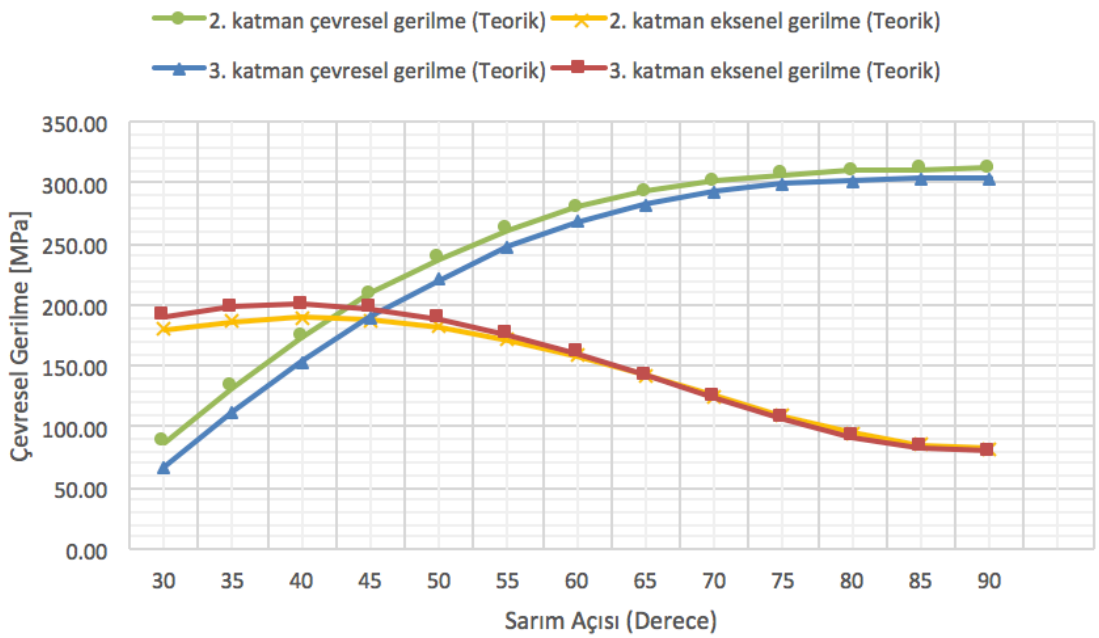
Şekil 3.6'da elyaf sarım açısına bağlı olarak boru iç yüzeyi ile dış yüzeyi için çevresel gerilme durumları gösterilmiştir. ±52°ye sarım açısına kadar hemen hemen aynı eğimde bir davranış gösterirlerken sonrasında dış yüzeydeki çevresel gerilme iç yüzeydeki çevresel gerilmeden daha yüksek bir duruma gelmiştir.



Şekil 3.7 2. Katman (1. takviye katmanı) çevresel ve eksenel gerilme durumu

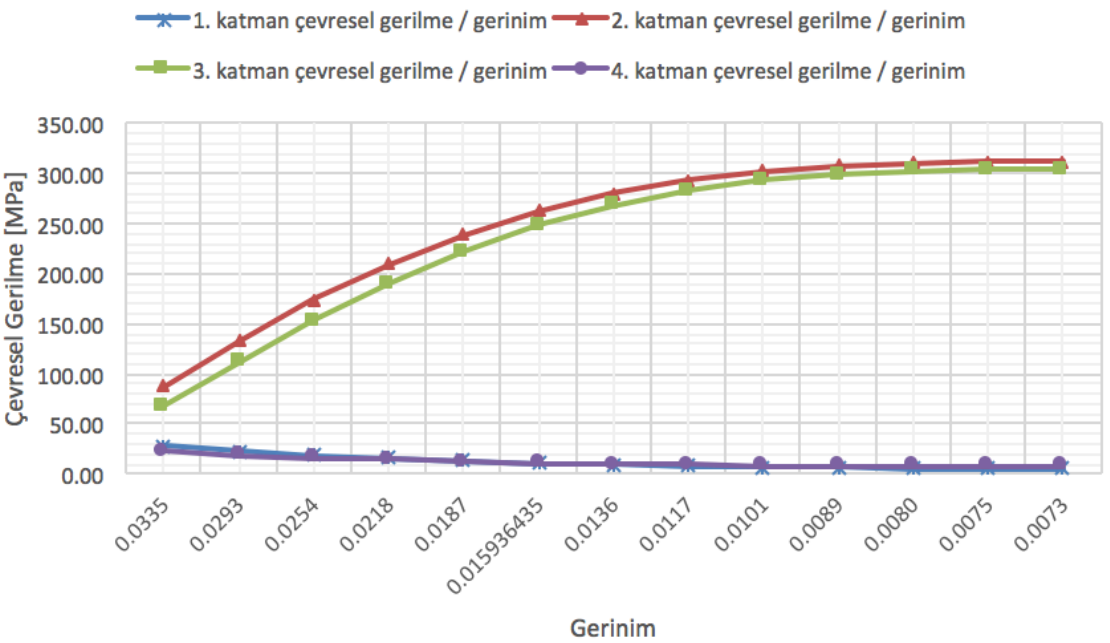


Şekil 3.8 3. Katman (2. takviye katmanı) çevresel ve eksenel gerilme durumu



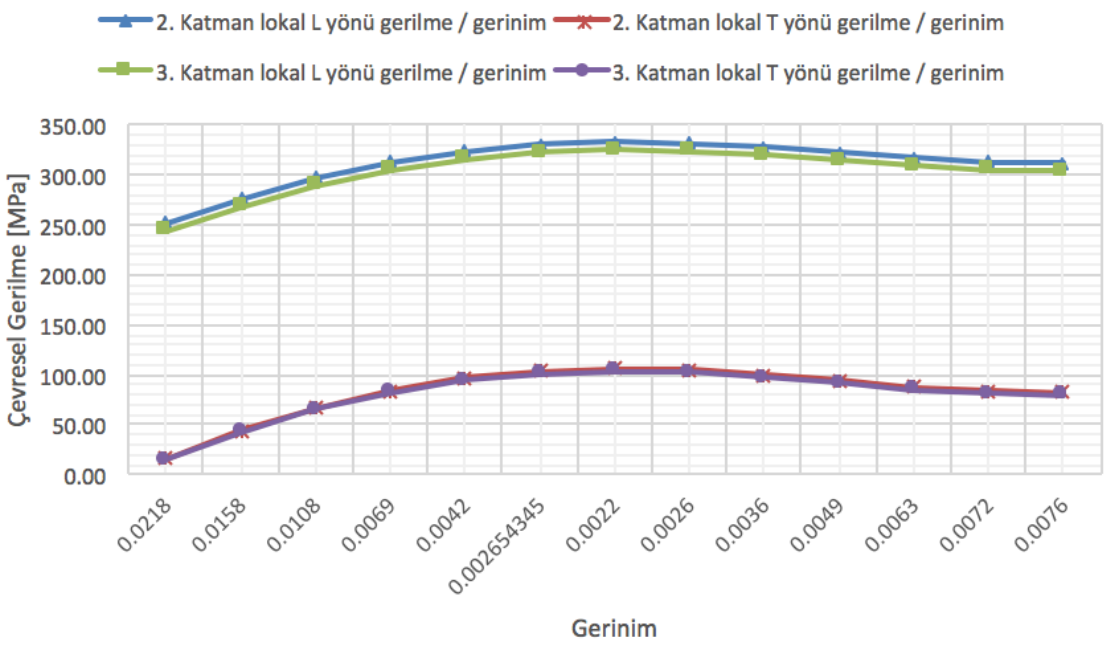
Şekil 3.9 Elyaf sarım açısına göre takviye katmanları için çevresel ve eksenel gerilmeler

Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da takviye katmanları için sarım açısına bağlı olarak çevresel ve eksenel gerilmeler gösterilmiştir.

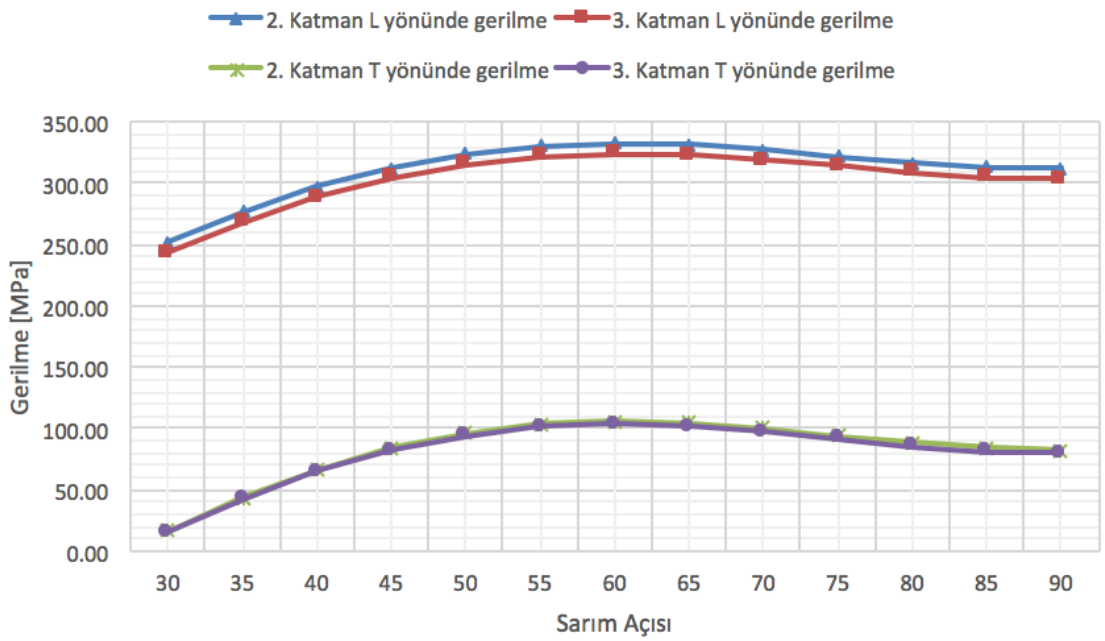


Şekil 3.10 Takviye katmanları için çevresel gerilme – gerinim ilişkisi

Şekil 3.10'da elyaf sarım açısının tüm takviye katmanları için çevresel gerilme ve gerinim ilişkisine etkileri görülmektedir.



Şekil 3.11 Takviye malzemeleri için malzeme düzleminde gerilme – gerinim ilişkisi



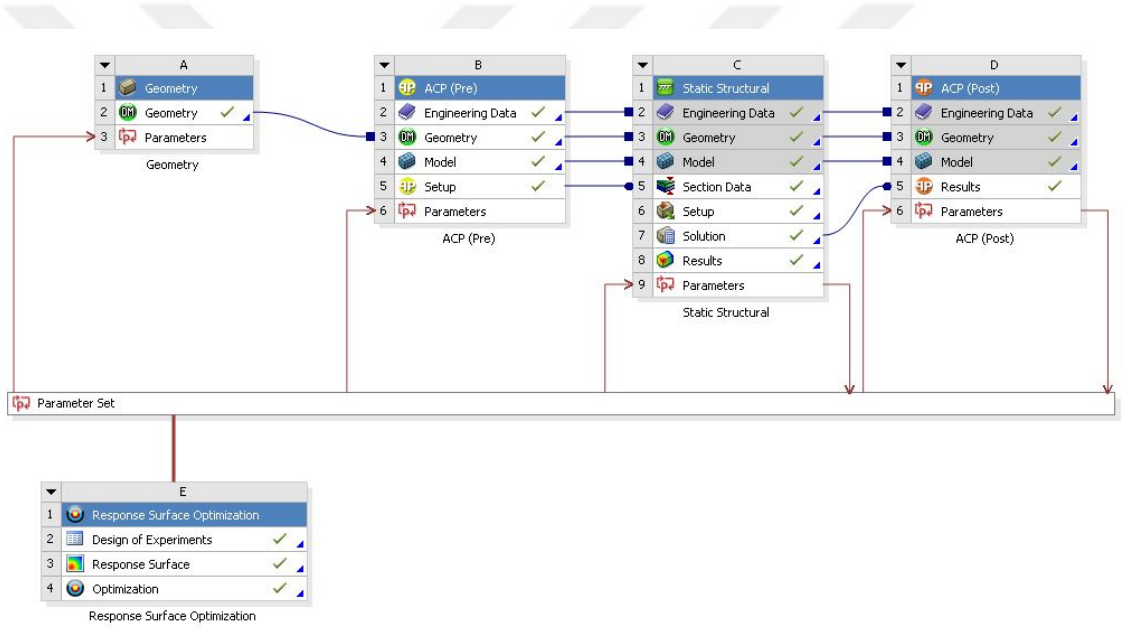
Şekil 3.12 Lokal koordinatlarda takviye katmanları için L-T yönlerinde gerilme grafiği

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de takviye katmanlarının elyaf sarım açısının etkisinde, malzeme lokal koordinatlarında elyaf doğrultusu ve elyaf doğrultusuna dik yöndeki gerilme gerinim ilişkileri gösterilmiştir.

3.4 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi mühendislik problemlerinin analizi ve çözümünde kullanılan güçlü bir araçtır. ANSYS/Multiphysics, yapısal (statik, dinamik, titreşim, optimizasyon) termal, elektrostatik, CFD, akustik, kompozit yapılar gibi farklı disiplinlere sahip problemlerin analizini yapabilecek kabiliyette bir yazılımdır.

Sonlu elemanlar model RTP borunun iç basınç altındaki mekanik davranışını ve iç basınca karşı mukavemetinin tayin edilmesi için geliştirilmiştir. Analiz için sonlu elemanlar analiz yazılımı olan ANSYS programının ACP (ANSYS Composite Pre-Post / Post Processing) ve Static Structural modülleri kullanılmıştır. Boru geometrisinin r_0 (iç çap) ve z (uzunluk) parametreleri ANSYS Design Modeler ile parametrik olarak oluşturulmuştur.



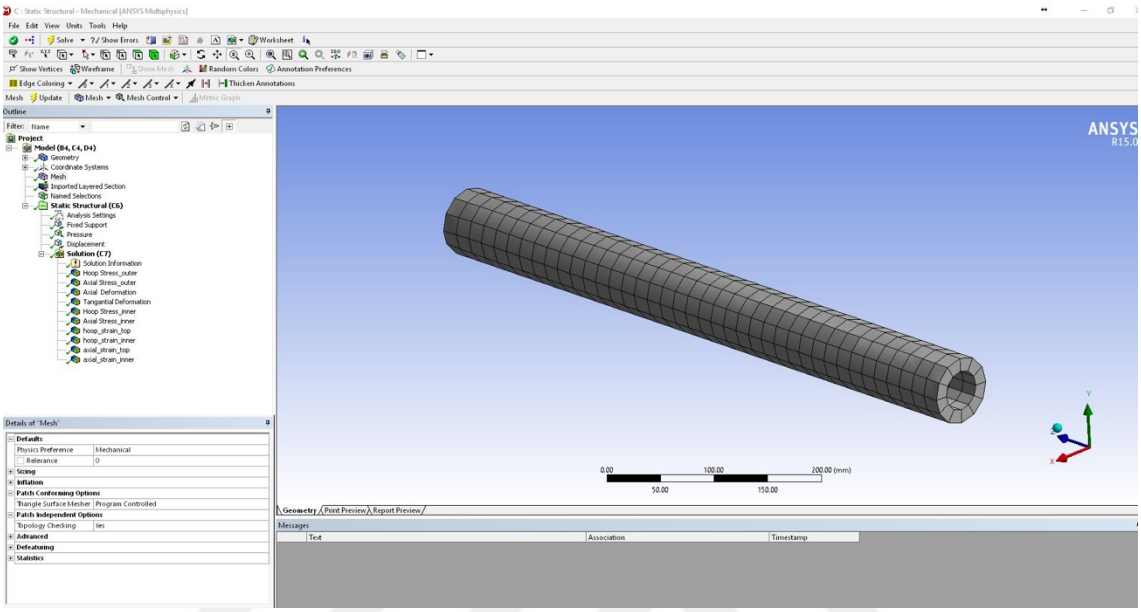
Şekil 3.13 ANSYS sonlu elemanlar analizi proje akış şeması

3.4.1 Sonlu Elemanlar Modeli

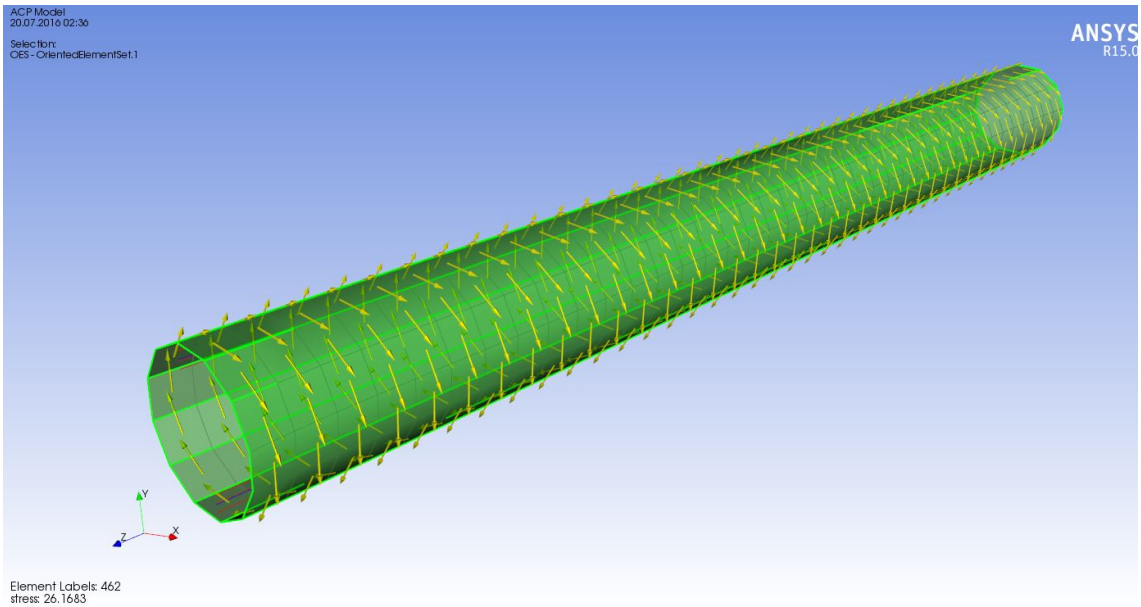
Şekil 3.3'de kesit görünümü verilen RTP boru ANSYS Composite Prepost modülü içerisinde 4 ana katman olarak modellenmiştir. İç ve dış katman olarak 1. ve 4. katmanlar izotropik ve HDPE olarak modellemiştir. Takviye katmanları ise (katman 2 ve katman 3) anizotropik ve farklı sarım açıları için parametrik olarak modellenmiştir. Katmanlara ait malzeme özellikleri ve sabitler Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de belirtilmiştir. Bu tablolarda verilen sabitlere göre izotropik HDPE malzeme ve anizotropik cam elyaf – HDPE prepreg

malzeme ANSYS Engineering Database içerisinde modellemelerde kullanılmak üzere oluşturulmuştur.

Modelleme de gerilme ve yer değiştirmelerin belirlenmesi için silindirik koordinat sistemi oluşturulup değerler, bu koordinat sistemi referans alınarak belirtilmiştir.

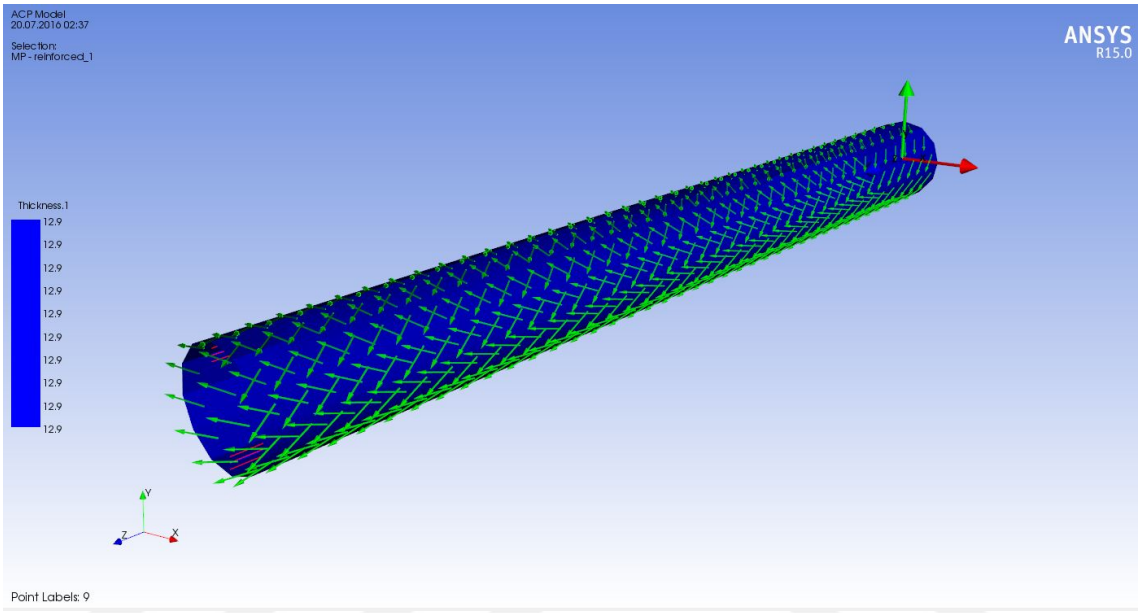


Şekil 3.14 ANSYS Static Structural sınır koşulları, yük durumunu içeren model gösterimi

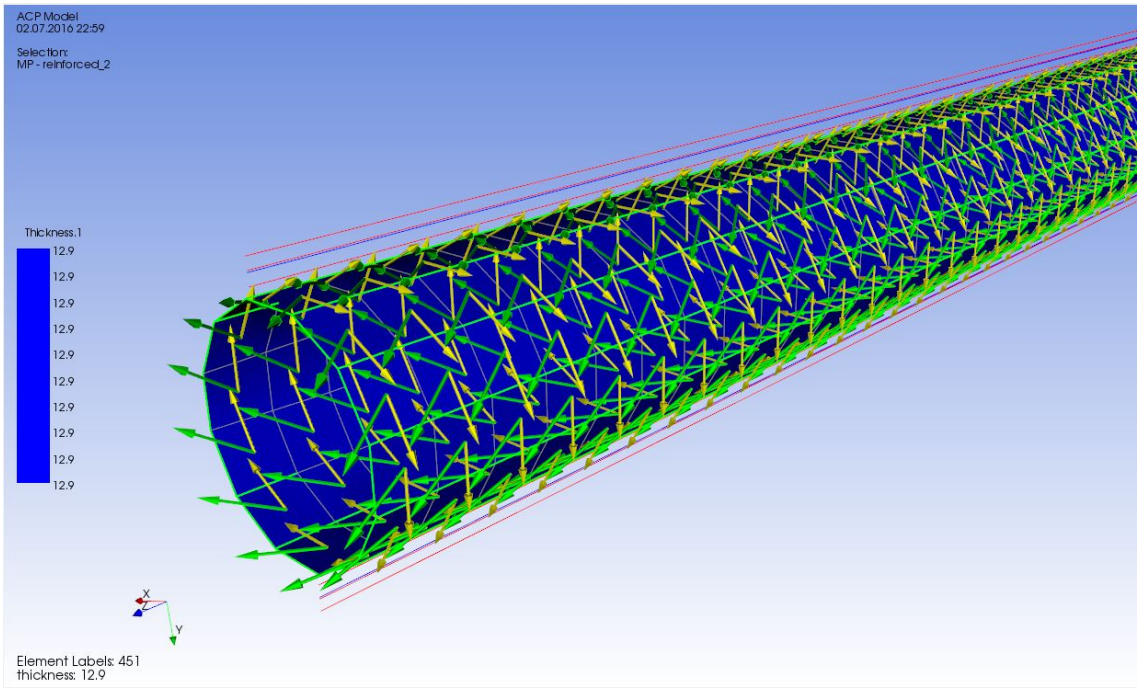


Şekil 3.15 ACP Oriented element set tanıtımı (0°)

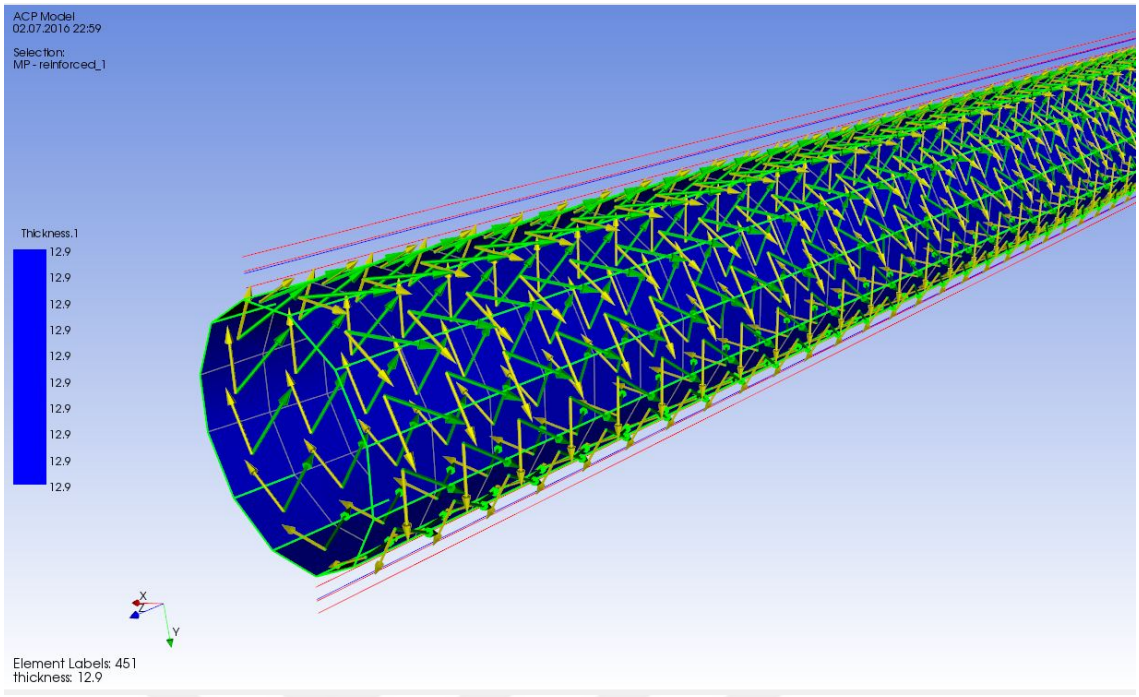
ACP içerisinde elyafların boru yüzeyinde yönlendirilmeleri için elyaf normallerini gösteren bir element set tanıtılmıştır. Burada 0°, teorik analizden farklı olarak Şekil 3.15'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Anlatımda karışıklık oluşturmaması için sonuçlarda çevrim yapılarak bu açıdan 90° olarak bahsedilecektir. Optimizasyonun yer aldığı ANSYS görüntülerinde çevrim yapılmadan gösterilecek dönüştürülmüş açı belirtilecektir.



Şekil 3.16 Elyaf yönlenmeleri ve yapı görünümü



Şekil 3.17 1. Takviye katmanı elyaf sarım açılarının ve normallerinin gösterimi

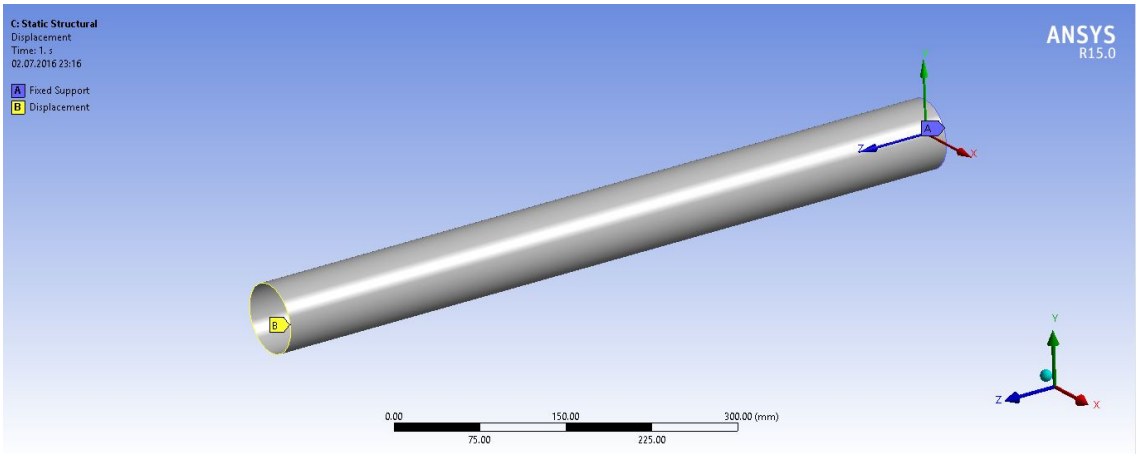


Şekil 3.18 2. Takviye katmanı elyaf sarım açılarının ve normallerinin gösterimi

RTP modelin serbest boyu test numunesi ile eşit uzunlukta, kapama başlığı uzunlukları RTP toplam boyundan çıkarılarak 660 mm serbest uzunlukta modellenmiştir.

3.4.1.1 Sınır Koşulları

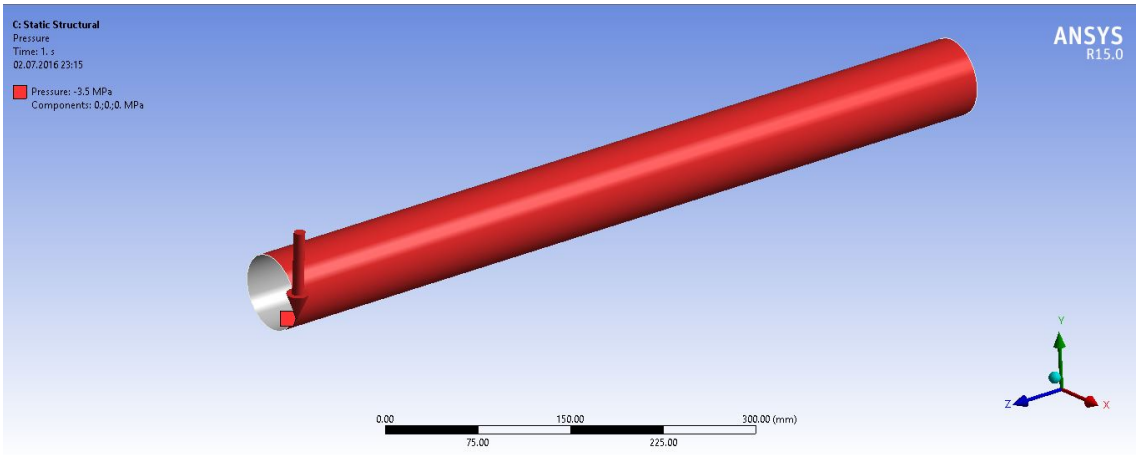
RTP boru modelinin bir ucu, testler sırasında kullanılan kapama başlığına uygun biçimde X, Y ve Z doğrultularında sabitlenmiş, diğer uç ise X ve Y doğrultularında sabitlenmiş, Z doğrultusunda eksenel uzama serbest bırakılmıştır.



Şekil 3.19 Sonlu elemanlar modeli sınır koşulları

3.4.1.2 Yük Durumu

P iç basıncı iç yüzeye uygulanmakta ve basınç ile oluşan F katman kuvveti (3.49) denklemi ile elde edilebilir. Burada r_o iç yarıçapı ve r_4 ise dış yarıçapı ifade etmektedir.



Şekil 3.20 Sonlu elemanlar modeli yük durumu

$$F = \frac{2P{r_0}^2}{r_0 + r_4} \tag{3.49}$$

3.4.1.3 Mesh Kontrolü

Details of "Mesh"

Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	480
Elements	468
Mesh Metric	Element Quality
Min	0.95978704835677
Max	0.999208305402089
Average	0.995481074007512
Standard Deviation	4.993716285493 97E-03

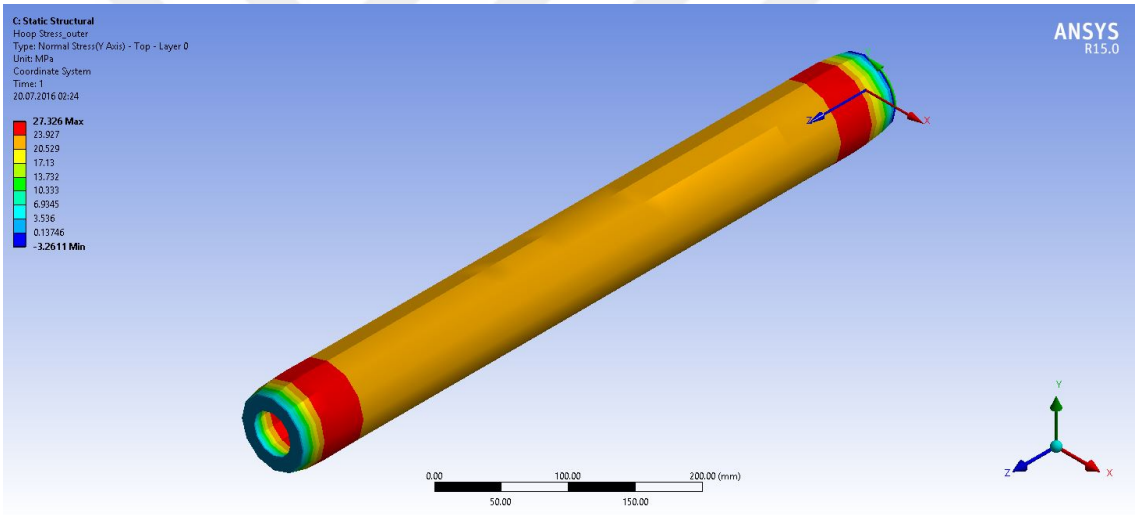
Şekil 3.21 Mesh kalitesi ve mesh eleman sayısı

Mesh yapısının kalitesi sayısal modelin daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi için oldukça önemli bir kriterdir. Oluşturulan sayısal modelin mesh kalitesi Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Silindirik ve Shell body olarak modellenen RTP boru modelinde 468 eleman oluşturularak 0.996 gibi yüksek bir mesh kalitesi elde edilmiştir.

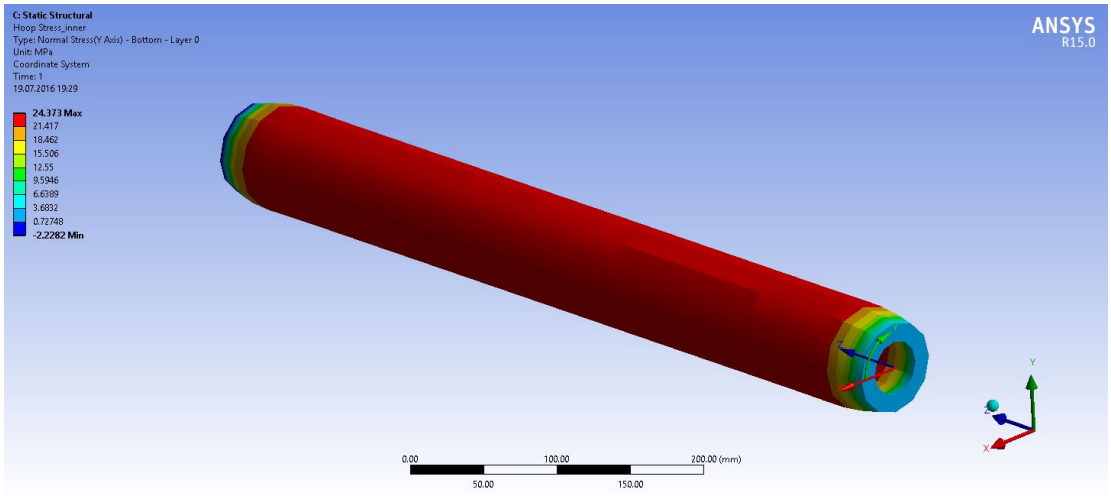
3.4.2 Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

3.4.2.1 Gerilme ve Gerinim Sonuçları

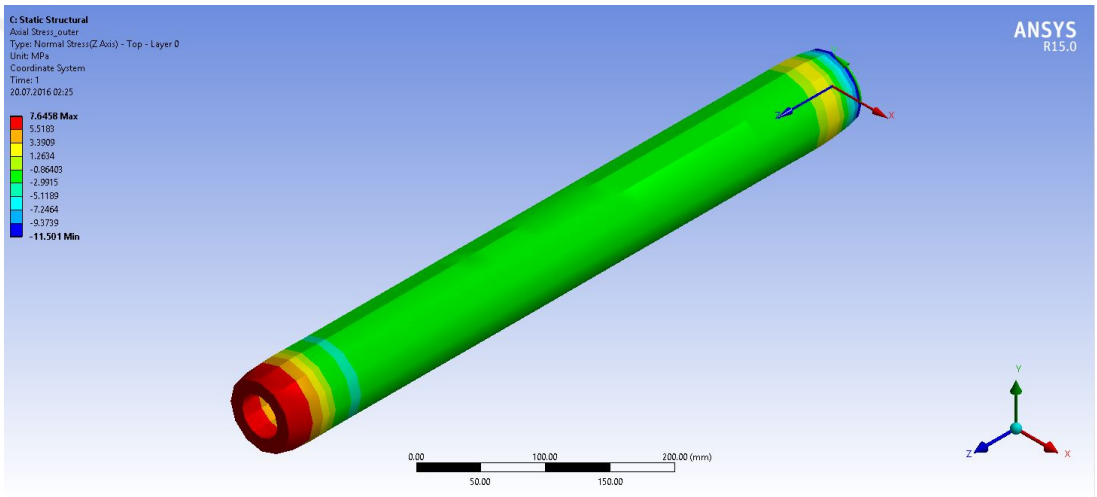
Bu tez çalışmasının bu bölümünde, elyaf sarım açısının RTP borunun mekanik davranışına etkisi sonlu elemanlar analiz yöntemiyle çalışılmıştır. RTP'nin iç basınç altında eksenel ve teğetsel gerilim ve gerinimleri aşağıdaki şekil ve grafiklerde gösterilmiştir.



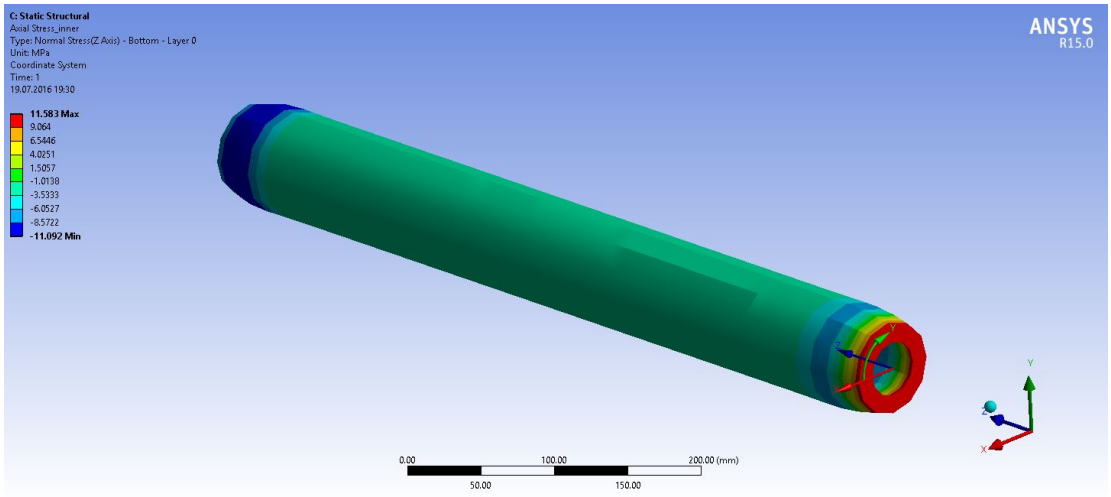
Şekil 3.22 Dış yüzey çevresel gerilme (ANSYS Structural)



Şekil 3.23 İç yüzey çevresel gerilme (ANSYS Structural)

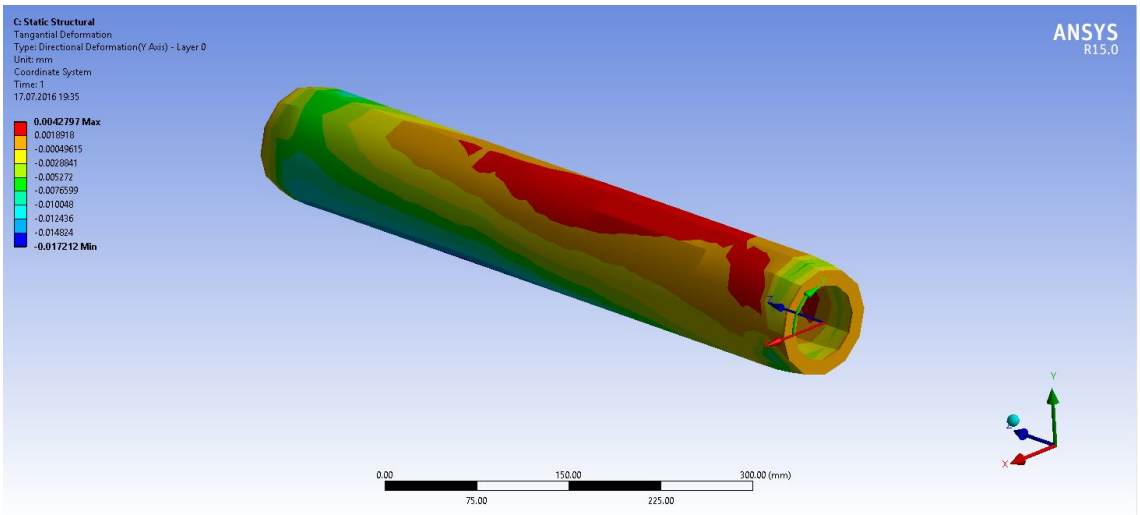


Şekil 3.24 Dış yüzey eksenel gerilme (ANSYS Structural)



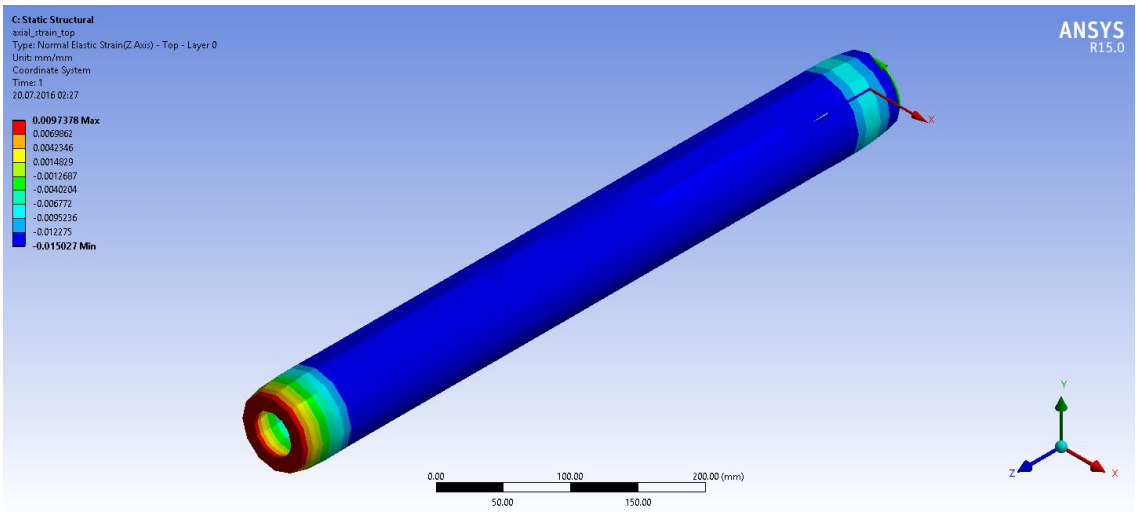
Şekil 3.25 İç yüzey eksenel gerilme (ANSYS Structural)

Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de RTP borunun iç ve dış yüzeylerindeki çevresel ve eksenel gerilmelerinin sarım açısı etkisindeki davranışı görülmektedir. Modellerde görünen gerilme dağılımları incelendiğinde elyaflar gerilme sınırına ulaştıktan sonra boru uç bölgelerine yakın noktalarda hasar oluşması muhtemeldir.

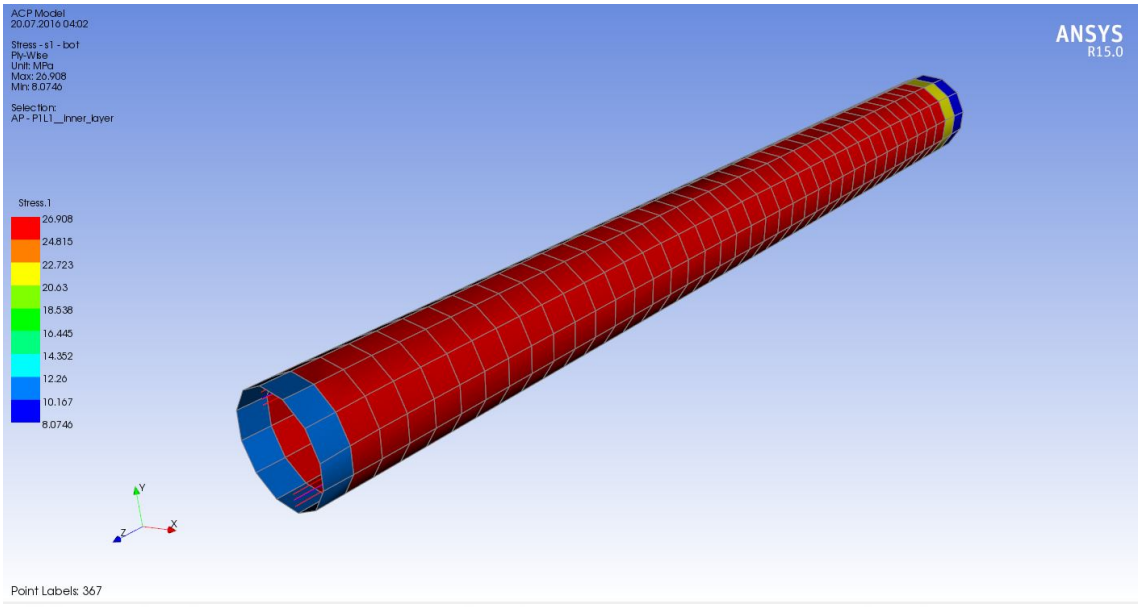


Şekil 3.26 Çevresel deformasyon (ANSYS Structural)

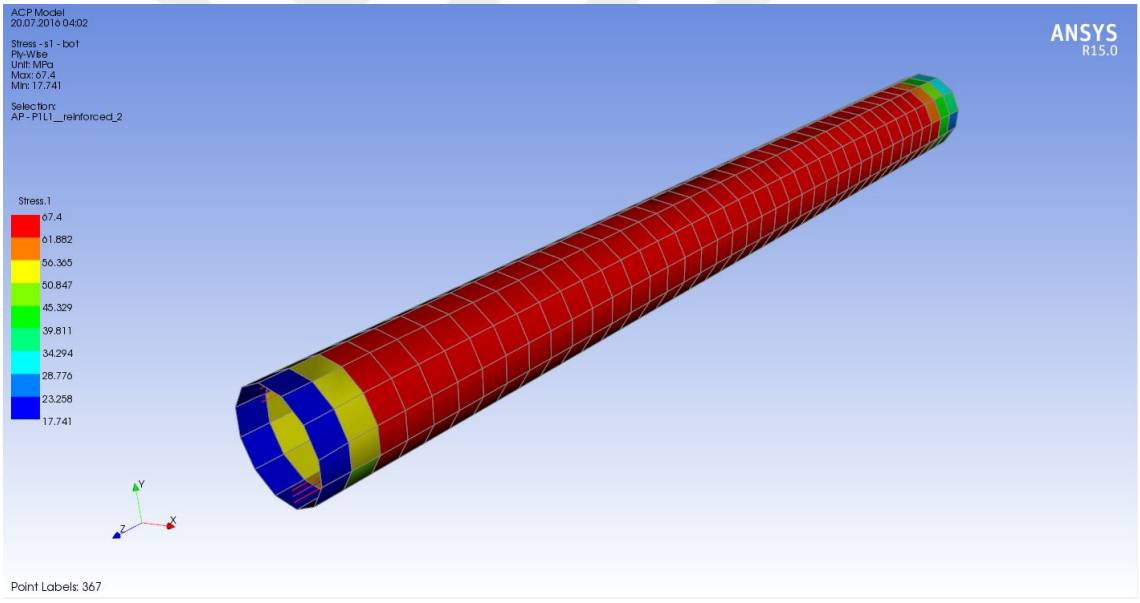
Bölüm 3.3'de teorik analizler sırasında çevresel yer değiştirme 0 kabul edilmişti. Şekil 3.26' da gösterilen deformasyon ve değerlerine bakıldığında yapılan kabulün sayısal analiz ile uyumlu olduğu görülmektedir.



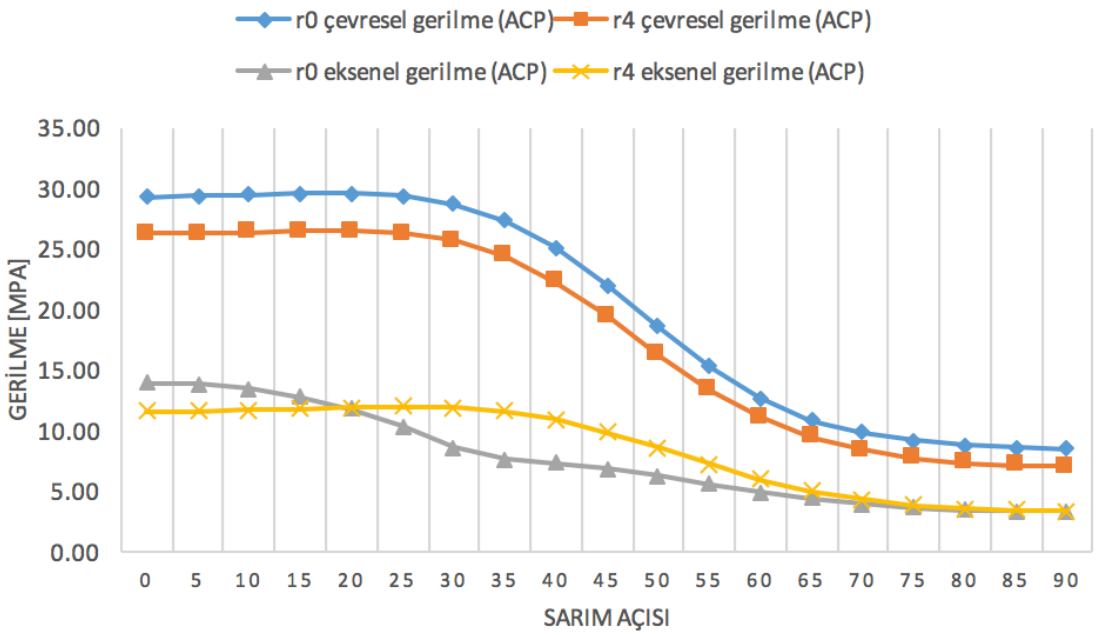
Şekil 3.27 Eksenel gerinim (ANSYS Structural)



Şekil 3.28 1. Katman (HDPE) gerilme dağılımı (ACP)

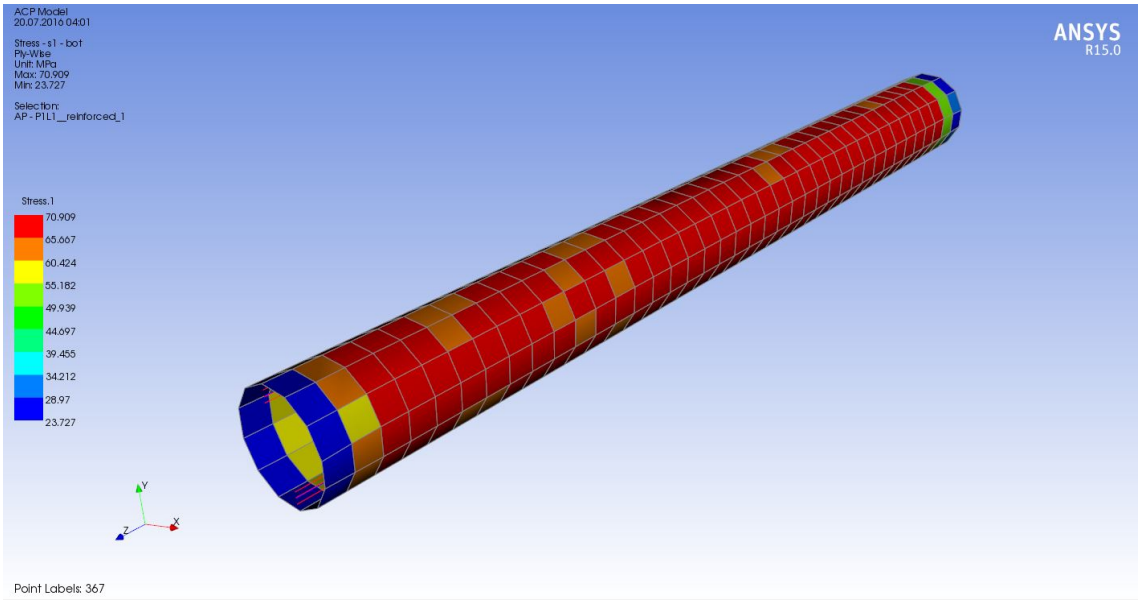


Şekil 3.29 4. Katman (HDPE) gerilme dağılımı (ACP)

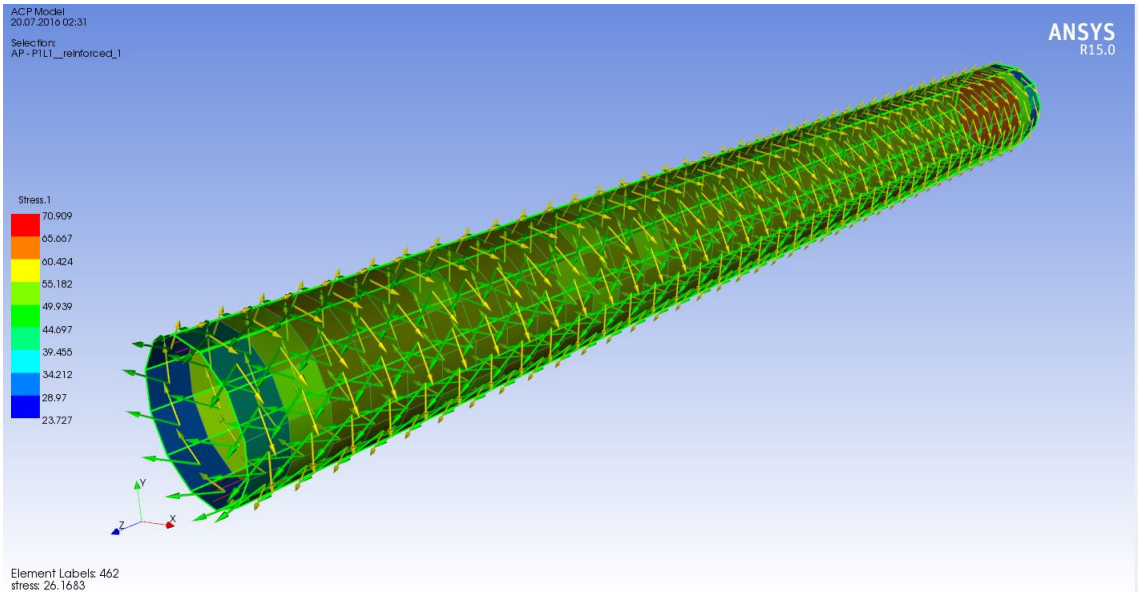


Şekil 3.30 Elyaf sarım açısının boru iç ve dış yüzeylerindeki çevresel ve eksenel gerilmeye etkisi

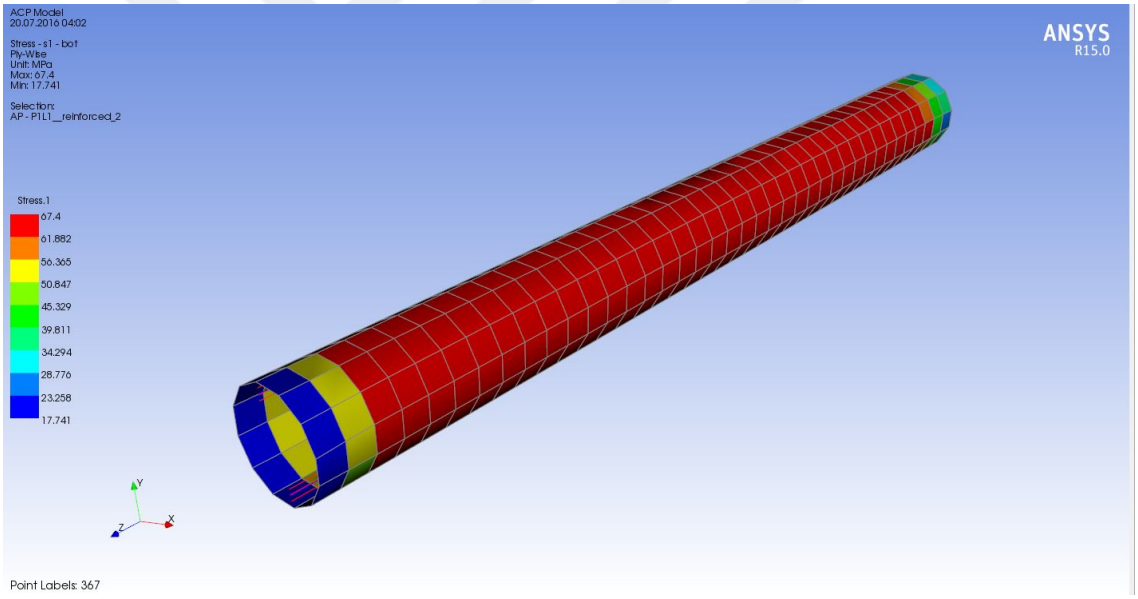
Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'da Composite Post Processing modül ekranından alınan 1. ve 4. katmanlara ait gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 3.30'da 1. ve 4. katman için sarım açısına bağlı olarak çevresel ve eksenel gerilme dağılımları gösterilmiştir.



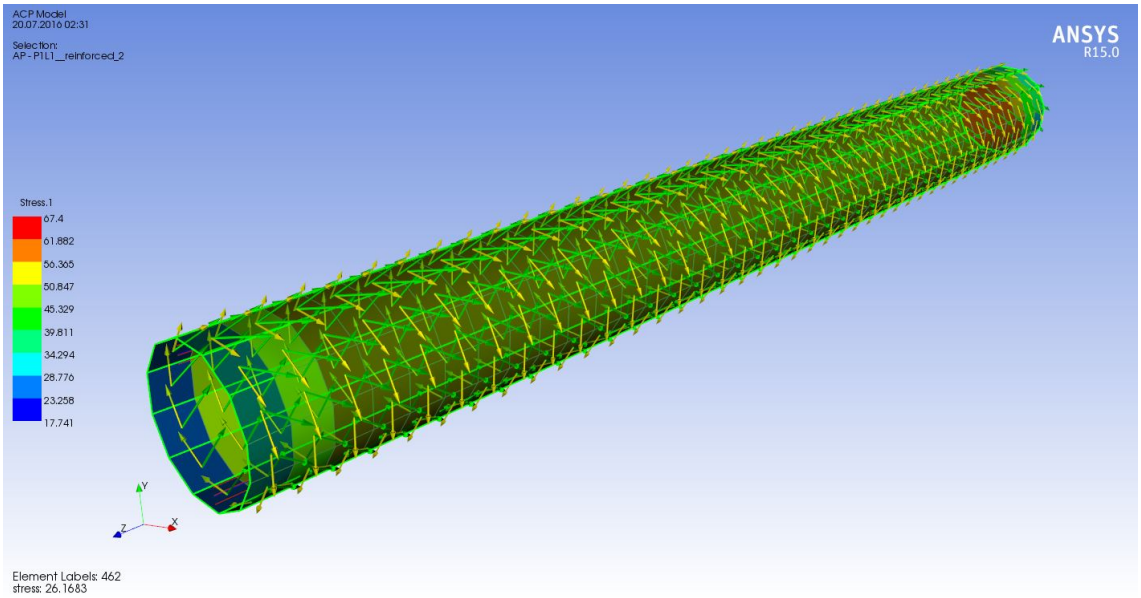
Şekil 3.31 2. Katman (1. takviye katmanı) gerilme dağılımı (ACP)



Şekil 3.32 2. Katman (1. takviye katmanı) elyaf yönleri ve gerilme dağılımı (ACP)

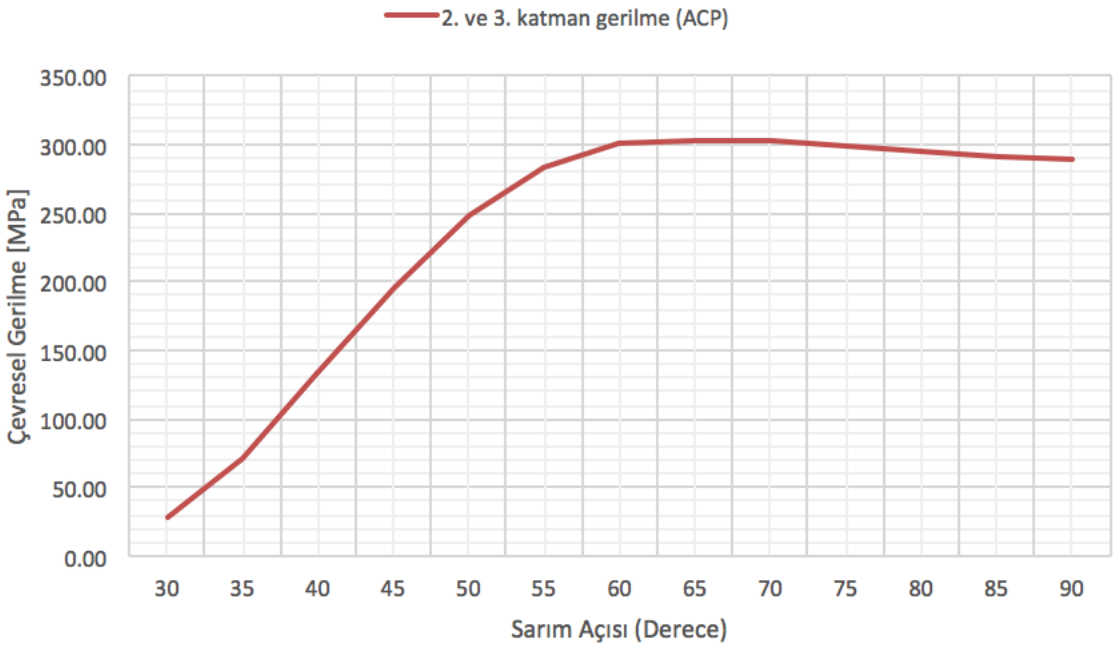


Şekil 3.33 3. Katman (takviye katmanı) gerilme dağılımı (ACP)

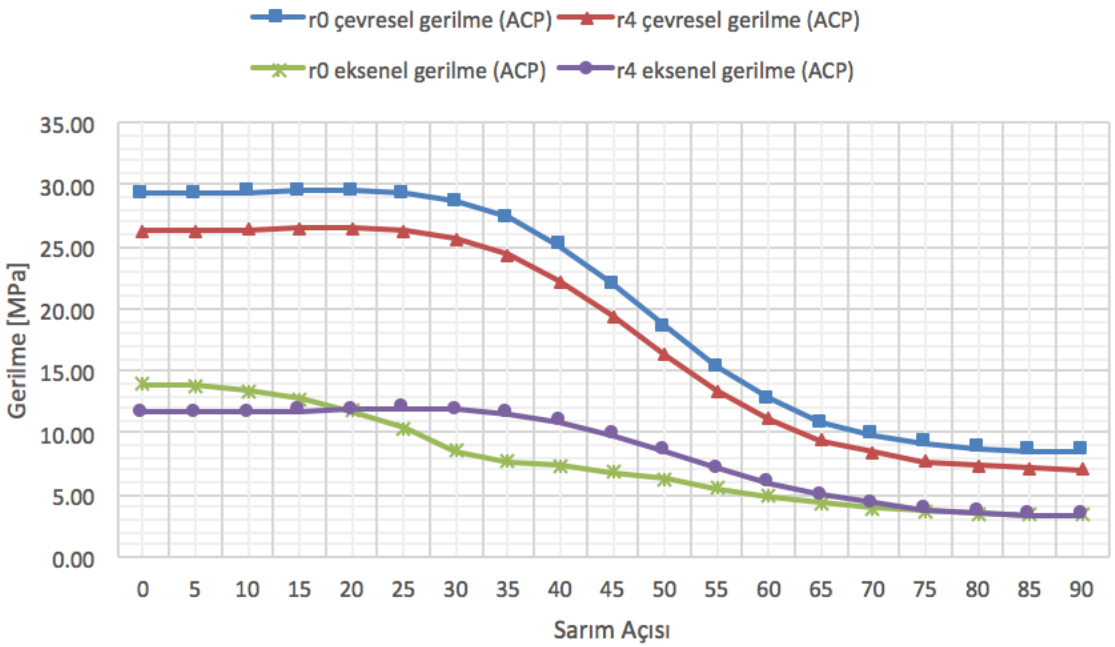


Şekil 3.34 3. Katman (2. takviye katmanı) elyaf yönleri ve gerilme dağılımı (ACP)

Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'de takviye katmanları için elyaf sarım doğrultuları ve geometri üzerindeki gerilme dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 3.35 Elyaf sarım açısının takviye katmanları çevresel gerilmeleri üzerindeki etkisi



Şekil 3.36 RTP iç ve dış yüzey gerilme dağılımları

Şekil 3.35'de elyaf sarım açısının 2. ve 3. katmanlar olan takviye katmanlarının çevresel gerilmesine etkisi görülmektedir. Şekil 3.36'da ise RTP'nin iç ve dış yüzeylerinde oluşan çevresel ve eksenel gerilme dağılımları görülmektedir.

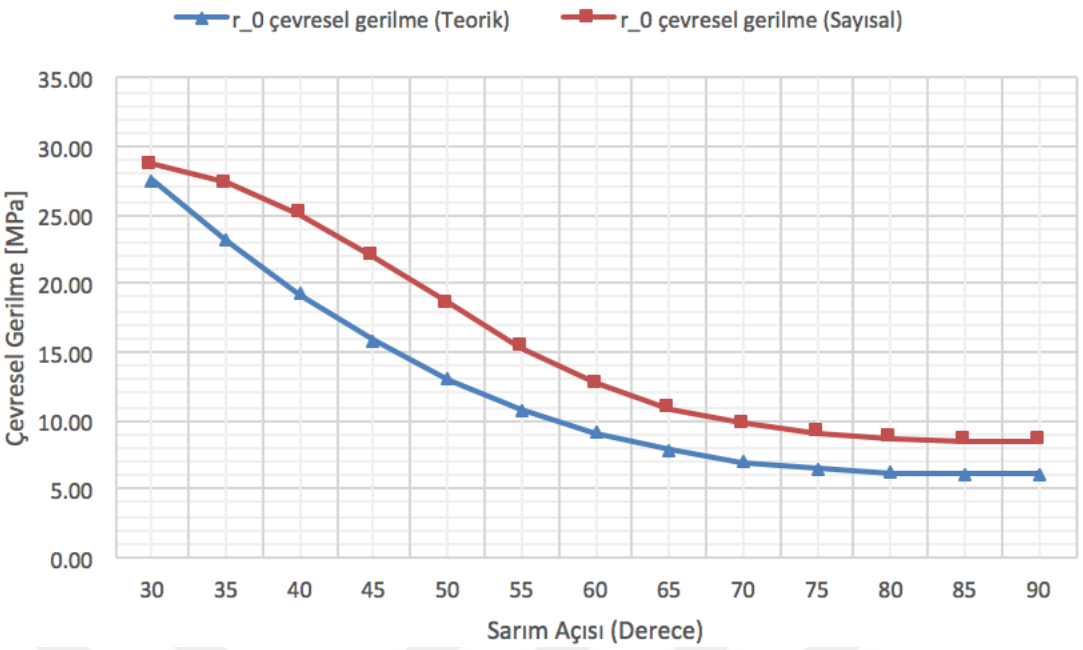
BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

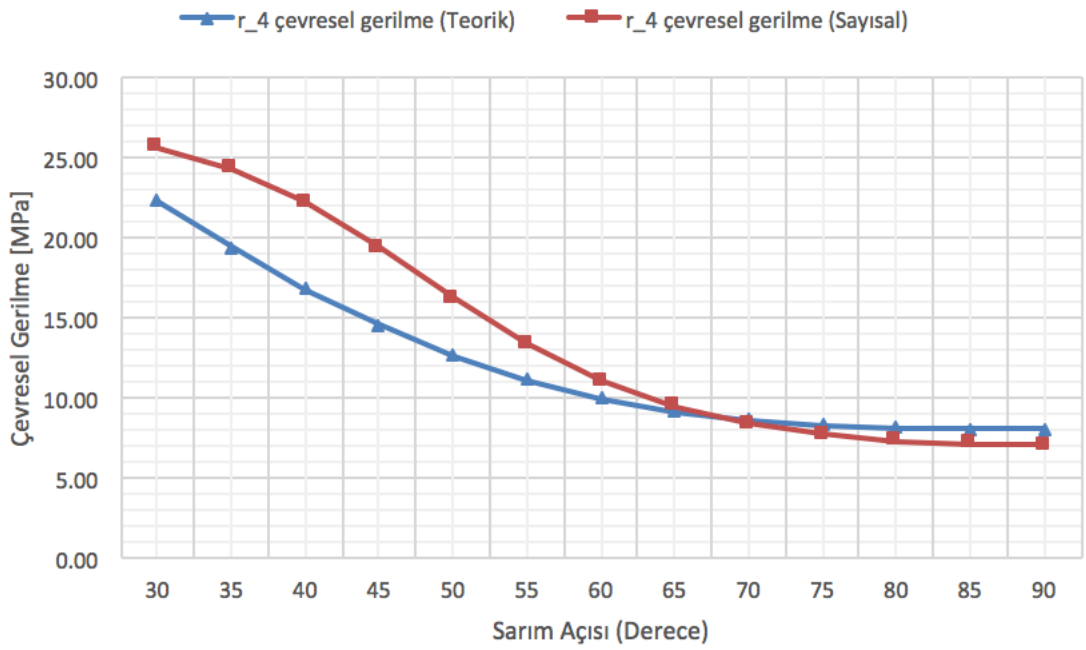
4.1 Sonuç ve Öneriler

Bu bölümde teorik ve sayısal analiz çalışmalarındaki sonuçlar karşılaştırılarak doğrulama yapılacak, analizler yorumlanacak ve öneriler getirilecektir.

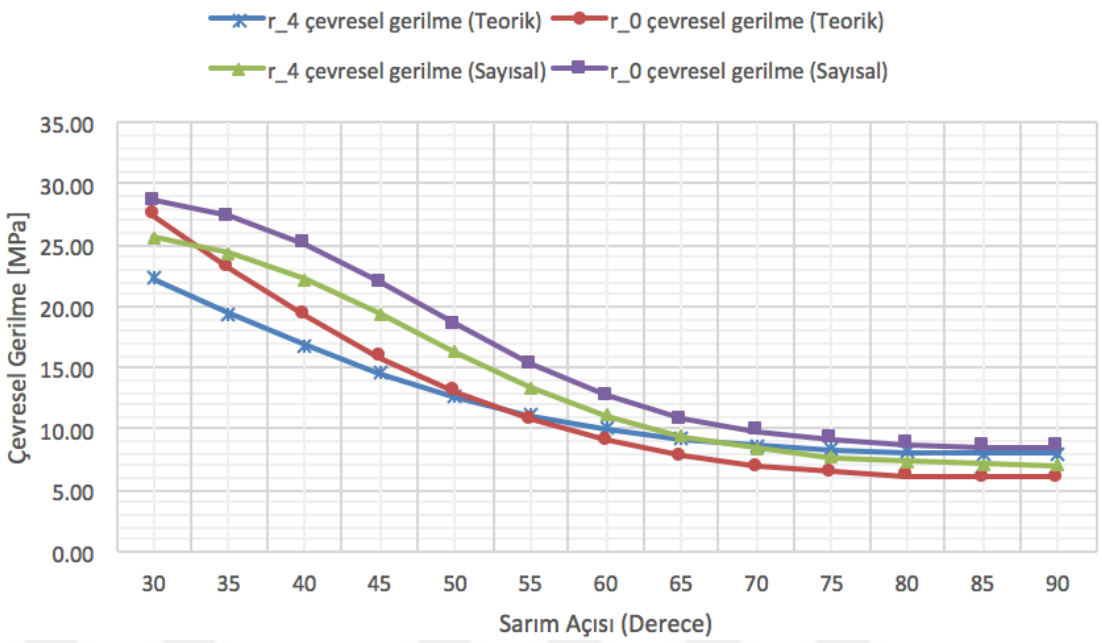
Xia vd. [22]'de çalışmasında belirttiği gibi ince cidarlı çok katmanlı silindir haricinde, elyaf sarılmış silindirik parçaların yüzeyi boyunca oluşan gerilme dağılımı düzgün olmamaktadır. Çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranı sarım açısına göre değişkenlik göstermektedir. Analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere kalın cidarlı borularda çevresel gerilme ve eksenel gerilme sarım açısına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4.1 Elyaf sarım açısının RTP iç yüzeyindeki çevresel gerilmeye etkisi

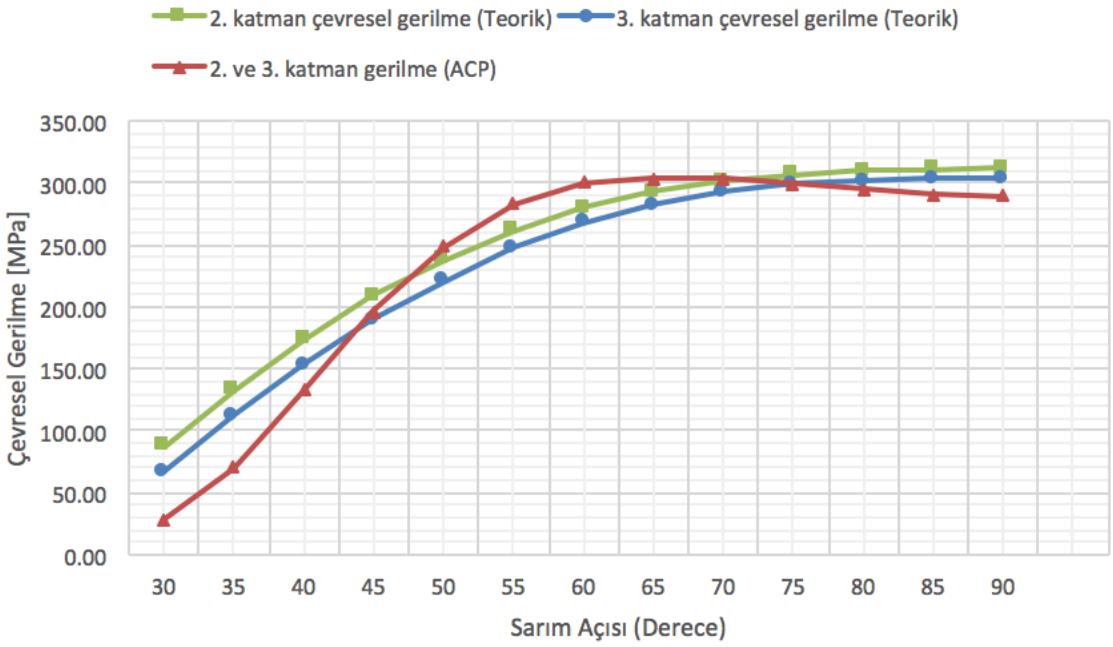


Şekil 4.2 Elyaf sarım açısının RTP dış yüzeyindeki çevresel gerilmeye etkisi

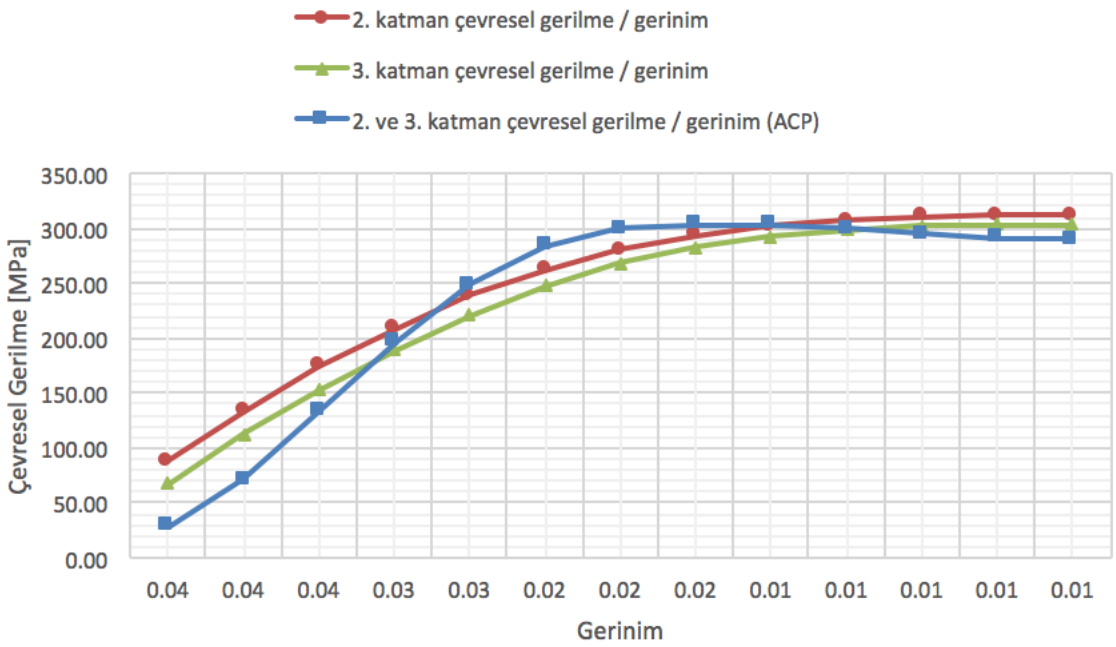


Şekil 4.3 Elyaf sarım açısının RTP iç ve dış yüzeylerindeki çevresel gerilmeye etkisi

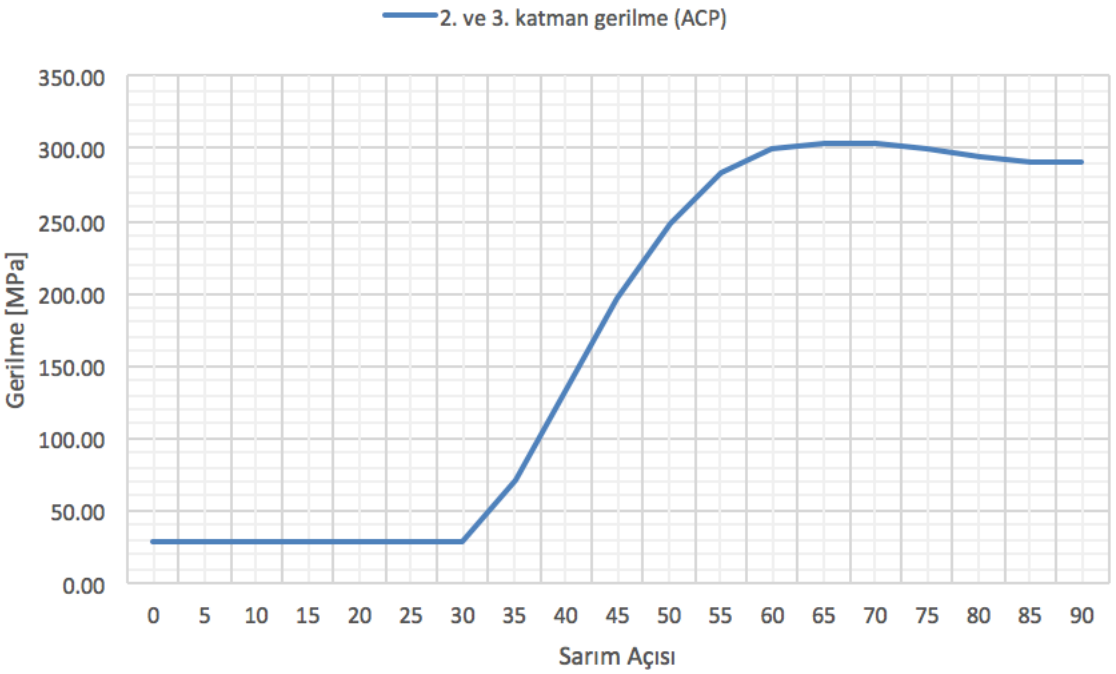
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de elyaf sarım açısının iç veya dış yüzeylerdeki çevresel gerilmeye etkisi gösterilmiştir. Yapılan teorik ve sayısal analizlerin karşılaştırılmasının yapılması neticesinde sonuçlar bir biriyle uyumlu görünmektedir.



Şekil 4.4 Elyaf sarım açısının takviye katmanlarında oluşan çevresel gerilmeye etkisi



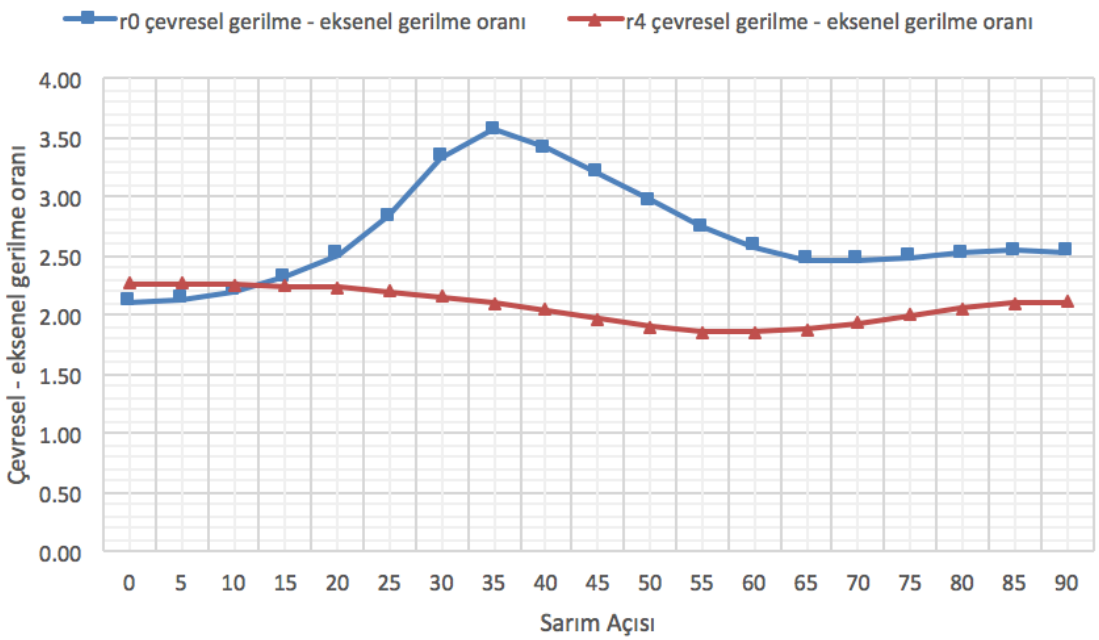
Şekil 4.5 Elyaf sarım açısının takviye katmanlarında oluşan çevresel gerilmeye – gerinim ilişkisine etkisi



Şekil 4.6 Elyaf sarım açısının takviye katmanı gerilmelerine etkisi

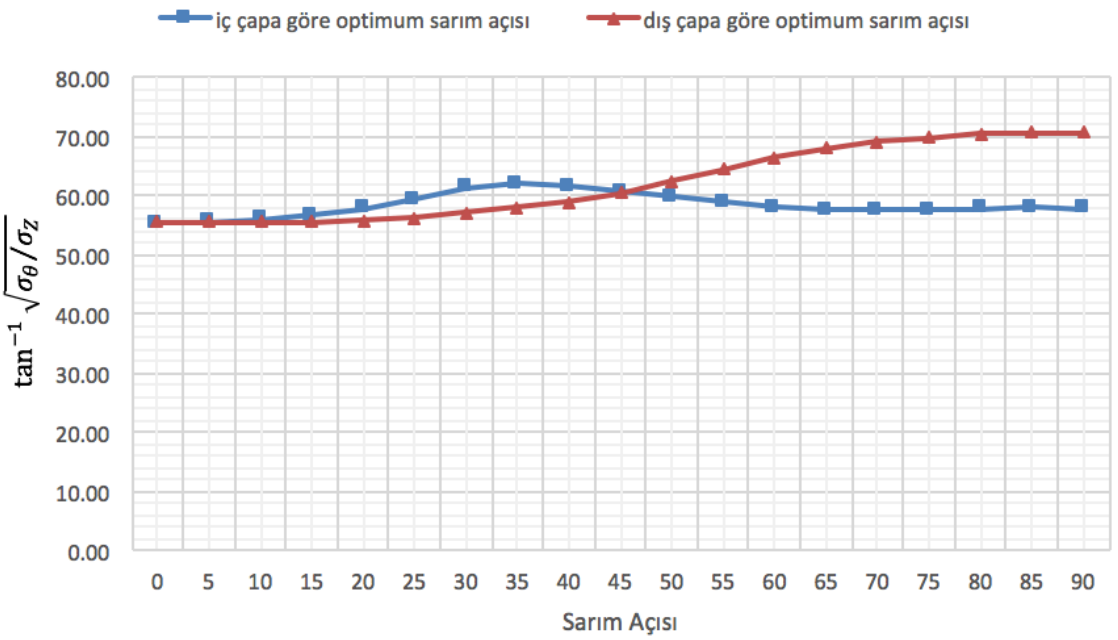
Elyaf sarım açısının iç basınç altındaki durumda takviye katmanı üzerindeki etkisi Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da belirtilen gerilme grafikleri incelendiğinde, ±30°'ye kadar basınç kuvvetleri karşısında bir etkisinin sabit olduğu, bu açıya kadar basıncın HDPE

katman tarafından taşındığı, ±30° sarım açısından sonra takviye katmanının etkisinin olduğu görülmektedir. Aynı zamanda ±60° sarım açısından daha yüksek sarım açılarında iç basınç altında katkısı fazla olmamakta ±65° sarım açısından sonra etkisi azalmaktadır. Optimum sarım açısı RTP'nin karşılaması istenen eksenel ve çevresel yüklere göre ±30 – 60° sarım açılarında seçilebilir.



Şekil 4.7 Elyaf sarım açısının çevresel – eksenel gerilme oranına etkisi

Elyaf sarımlı kalın cidarlı kompozit borular için çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranı araştırılmış ince cidarlı basınçlı kaplar için 2-1 olarak belirtilen çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranının kalın cidarlı basınçlı kaplar için geçerli olmadığı ve sabit bir değerin olmadığı görülmüştür. İç cidarda ve dış cidarda oluşan gerilmelere göre 2'nin üzerinde bir oranın olduğu ve bu oranın elyaf sarım açısının gerilmelere etkisi ile değiştiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Elyaf sarım açısının optimum sarım açısına etkisi

Kalın cidarlı borular için Wild ve Vickers [23] tarafından belirtilen optimum sarım açısının belirlenmesi için kullanılabilecek (1.1) ifadesine göre iç ve dış yüzeylerindeki çevresel – eksenel gerilme oranlarına göre elyaf sarım açısına bağlı olarak optimum sarım açısı hesaplanmış ve Şekil 4.8'deki dağılım oluşturulmuştur. Bu grafiğe göre tez çalışmasında belirtilen iç basınç ve çap değerlerine göre optimum sarım açısı $\pm$ 60° olarak kabul edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Kaw, A.K., (2006). Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor & Francies, New York.

[2] Solmaz, M.Y. ve Gür, M., (2007). "Tabakalı Kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi", Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 16-26.

[3] Smith, W.F. ve Hashemi, J., (2003). Foundations of Materials Science and Engineering, Mc Graw-Hill.

[4] Vaidya, U.K. ve Chawla, K.K., (2008). "Processing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites",International Materials Reviews, 53(4): 185-218.

[5] Nunes, J.P., Silva, J.F., Marques, A.T., Crainic, N. ve Cabral-Fonseca, S., (2003). "Production of Powder Coated Towpregs and Composites", Journal of Thermoplastic Composite Materials, 16: 231-248.

[6] Arıcasoy, O., (2006). "Kompozit Sektör Raporu"; Derleyen: İstanbul Ticaret Odası.

[7] Mazumdar, S.K., (2002). Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering, CRC Press, New York.

[8] Werdermann, C., Friedrich, K., Cirino, M. ve Pipes, B., (1989). "Design and Fabrication of an On-line Consolidation Facility for Thermoplastic Composites", Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2: 293-306.

[9] Shen, F.C., (1995). "A Filament Wound Structure Technology Overview", Materials Chemistry and Physics, 42: 96-100.

[10] Lührsen, H., (2001). "Reinforced Thermplastic Pipe (RTP)", Special Plastic Pipes, 40: 46-49.

[11] Dalmolen, B., (2006). "Reinforced Thermoplastic Pipe: Standardised Composite Solution for Oilfield Flowlines", Petromin, 30-37.

[12] Gibson, A.G. ve Cantrill, J.L., (2002). "Engineering Standards for Reinforced Thermoplastic Pipe", 2012 Offshore Technology Conference, 6-9 May 2012, Houston.

[13] National Oilwell Varco, Spoolable Pipe, http://www.nov.com/Segments/Completion_and_Production_Solutions/Fiber_Glass_Systems/Oil_and_Gas/Spoolable/Spoolable.aspx, 1 Haziran 2016.

[14] Onder, S., Sayman, O. ve Tarakcioglu, N., (2009). "Burst Failure Load of Composite Pressure Vessels, Composite Structures, 89: 159-166.

[15] Xia, M., Takayanagi, H., ve Kemmochi, K., (2001). "Analysis of Multi-layered Filament-wound Composite Pipes Under Internal Pressure", Composite Structures, 53: 483-491.

[16] Bakaiyan, H., Hosseini, H. ve Ameri, E., (2009). "Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Combined Internal Pressure and Thermomechanical Loading with Thermal Variation", Composite Structures, 88: 532-541.

[17] Zheng, J.Y., Gao, Y.J., Li, X., Lin, F., Lu, Y.B. ve Zhu, Y.C., (2008). "Investigation on Short-term Burst Pressure of Plastic Pipes Reinforced by Cross Helically Wound Steel Wires", J Zhejiang Univ Sci A, 9: 640-647.

[18] Bai, Y., Cheng, P., Badaruddin, M.F. ve Ashri, M., (2011). "Burst Capacity of Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) Under Internal Pressure", Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 19-24 June 2011, Rotterdam.

[19] Khalid, Y.A., Hamed, A.F. ve Sapuan, S.M., (2007). "Pressure Carrying Capacity of Reinforced Plastic Tubes", Polymer-Plastics Technology and Engineering, 46: 651-659.

[20] Hull, D., Legg, M.J. ve Spencer, B., (1978). "Failure of Glass/Polyester Filament Wound Pipe", Composites, 9: 17–24.

[21] Takayanagi, H., Xia, M. ve Kemmochi, K., (2002). "Stiffness and Strength of Filament-wound Fiber-reinforced Composite Pipes Under Internal Pressure", Advanced Composite Materials, 11(2): 137–149.

[22] Xia, M., Kemmochi, K. ve Takayanagi, H., (2000). "Analysis of Filament-Wound Sandwich Pipe Under Internal Pressure", Advanced Composite Materials, 9(3): 223-239.

[23] Wild, P.M. ve Vickers, G.W., (1997). "Analysis of Filament-Wound Cylindrical Shells Under Combined Centrifugal, Pressure and Axial Loading", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 28: 47-55.

[24] Kobayashi, S., Imai, T. ve Wakayama, S., (2007). "Burst Strength Evaluation of the FW-CFRP Hybrid Composite Pipes Considering Plastic Deformation of the Liner", Composites: Part A, 38: 1344–1353.

[25] Ansari, R., Alisafaei, F. ve Ghaedi, F., (2010). "Dynamic Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Subjected to Cyclic Internal Pressure and Cyclic Temperature", Composite Structures, 92: 1100-1109.

[26] Kruijer, M.P., Warnet, L.L. ve Akkerman, R., (2005). “Analysis of the Mechanical Properties of a Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP)”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36: 291-300.

[27] Xu, P., Zheng, J.Y. ve Liu, P.F., (2009). “Finite Element Analysis of Burst Pressure of Composite Hydrogen Storage Vessels”, Materials and Design, 30: 2295-2301.

[28] Parnas, L. ve Katırcı, N., (2002). “Design of Fiber-Reinforced Composite Pressure Vessels Under Various Loading Conditions”, Composite Structures, 58: 83-95.

[29] Xia, M., Kemmochi, K. ve Takayanagi, H., (2001). “Analysis of Filament-Wound Fiber-Reinforced Sandwich Pipe Under Combined Internal Pressure and Thermomechanical Loading”, Composite Structures, 51: 273-283.

[30] Tutuncu, N. ve Winckler, S.J., (1993). “Stresses and Deformations in Thick-Walled Cylinders Subjected to Combined Loading and a Temperature Gradient”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 12: 198-209.

[31] Rosenow, M.K., (1984). “Wind Angle Effects in Glass Fiber-Reinforced Polyester Filament Wound Pipes”, Composites, 15: 144-152.

[32] Spencer, B. ve Hull, D., (1978). “Effect of Winding Angle on The Failure of Filament Wound Pipe”, Composites, 9: 263-271.

[33] Uemura, M. ve Fukumaga, H., (1981). “Probabilistic Burst Strength of Filament-Wound Cylinders Under Internal Pressure”, J Comp Mater, 15: 462-480.

[34] Roy, A.K., (1991). “Response of Thick Laminated Composite Rings to Thermal Stresses”, Composite Structures, 18: 125-138.

[35] Cho, H., Kardomateas, G.A. ve Valle, C.S., (1998). “Elastodynamic Solution Forthe Thermal Shock Stresses in an Orthotropic Thick Cylindrical Shell”, Journal of Applied Mechanics, 65: 184-193.

[36] Abdalla, F.H., Sapuan, S.M., Hamdan, M.M. ve Sahari, B., (2008). “Internal Pressure Carrying Capacity for Different Loading Modes of Filament-Wound Pipes from Glass Fiber-reinforced Epoxy Composites”, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 47: 802–808.

[37] Martins, L.A., Bastian, F.L. ve Netto, T.A., (2014). “Reviewing Some Design Issues for Filament Wound Composite Tubes”, Materials and Design, 55: 242–249.

[38] Xia, M., Takayanagi, H. ve Kemmochi, K., (2000). “Optimal Design of a Thick-Walled Sandwich Pipe”, Advanced Composite Materials, 9(4): 349–361.

[39] Rasheed, T., Akbar, S. ve Mir, S., (2013). “Experimental Investigation of Filament-wound Composite Tubes for Mechanical Characterization by Inte al Pressure Testing”, 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST), 15-19 January 2013, Islamabad.

[40] Bai, Y., Wang, N. ve Cheng, P., (2012). “Collapse of RTP (Reinforced Thermoplastic Pipe) Subjected to External Pressure”, International Conference on Pipelines and Trenchless Technology, 725-743.

[41] Kobayashi, S., Imai, T. ve Wa, S., (2007). “Burst Strength Evaluation of the FW-CFRP Hybrid Composite Pipes Considering Plastic Deformation of the Liner”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38: 1344–1353.

[42] Roy, A.K. ve Tsai, S.W., (1988). “Design of Thick Composite Cylinders”, Journal of Pressure Vessel Technology, 10: 255-262.

[43] Liu, P.F. ve Zheng, J.Y., (2010). “Recent Developments on Damage Modeling and Finite Element Analysis for Composite Laminates: A Review”, Materials and Design, 31: 3825–3834.

[44] Sulaimana, S., Borazjani, S. ve Tang, S.H., (2013). “Finite Element Analysis of Filament-Wound Composite Pressure Vessel Under Internal Pressure”, 2nd International Conference on Mechanical Engineering Research.

[45] Antunes, P.J., Dias, G.J., Nunes, J.P. ve Van Hattum, F.W.J., (2008). “Finite Element Modelling of Thermoplastic Matrix Composite Gas Cylinders”, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 21: 411 – 441.

[46] Bai, Y., Tang, J., Xu, W., Cao, Y. ve Ruoshi, W., (2015). “Collapse of Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) Under Combined External Pressure and Bending Moment”, Ocean Engineering, 94: 10-18.

[47] Chang, R.R., (2000). “Experimental and Theoretical Analyses of First-Ply Failure of Laminated Composite Pressure Vessels”, Composite Structures, 49: 237-243.

[48] Kam, T.Y., Liu, T.W. ve Lee, E.T., (1997). “First-ply Failure Strength of Laminated Composite Pressure Vessels“,Composite Structures, 38: 67-70.

[49] Xia, M., Takayanagi, H. ve Kemmochi, K., (2002). “Bending Behaviour of Filament-Wound Fiber-Reinforced Sandwich Pipes”, Composite Structures, 56: 201-210.

[50] Bai, Y., Wang, N. ve Cheng, P., (2012). “Analysis of Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) under Axial Loads”, International Conference on Pipelines and Trenchless Technology, Reston.

[51] Bai, Y., Zhang, Y. ve Cheng, P., (2014). “Behavior of Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) Under Tension”, International Conference on Pipelines and Trenchless Technology, 298-307.

[52] Bai, Y., Yu, B., Cheng, P., Wang, N., Ruan, W., Tang, J. ve Babapour, A., (2015). “Bending Behavior of Reinforced Thermoplastic Pipe”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 137: 1-11.

[53] Huille, A., Yang, C. ve Pang, S.S., (1997). “Buckling Analysis of Thick- Walled Composite Pipe Under Torsion”, Journal of Pressure Vessel Technology, 119: 111-121.

[54] Bai, Y., Wang, N., Cheng, P., Qiao, H. ve Yu, B., (2015). “Collapse and Buckling Behaviors of Reinforced Thermoplastic Pipe Under External Pressure”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 137: 041401-1 - 041401-9.

[55] Bai, Y., Yuan, S., Tang, J., Qiao, H., Cheng, P. ve Cao, Y. (2015). "Behaviour of Reinforced Thermoplastic Pipe Under Combined Bending and External Pressure", Ships and Offshore Structures, 10(5): 575–586.

[56] Natsuki, T., Takayanagi, H., Tsuda, H. ve Kemmochi, K., (2003). "Prediction of Bending Strength for Filament-Wound Composite Pipes", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 22(8): 695-710.

[57] Byon, O.I. ve Vinson, J.R., (1992). "Stress Analyses for Laminated Thick-Walled Cylindrical Anisotropic Shells", AIAA Journal, 29(12): 2192 – 2196.

[58] Yu, K., Morozov, E.V., Ashraf, M.A. ve Shankar, K., (2015). "Numerical Analysis of the Mechanical Behaviour of Reinforced Thermoplastic Pipes Under Combined External Pressure and Bending", Composite Structures, 131: 453–461.

[59] Bai, Y., Xu, W., Cheng, P., Wang, N. ve Ruan, W., (2014). "Behaviour of Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) Under Combined External Pressure and Tension", Ships and Offshore Structures, 9(4): 464–474.

[60] Kaddour, A.S., Hinton, M.J. ve Soden, B.D., (2003). "Behavior of 45 Glass-Epoxy Filament-Wound Composite Tubes Under Quasistatic Equal Biaxial Tension-Compression Load: Experimental Results", Composites Part B, 34: 689–704.

[61] Bai, Y., Wang, N., Cheng, P., Yu, B., Badaruddin, M.F. ve Ashri, M., (2011). "Collapse of Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) Under External Pressure", Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 19-24 June 2011, Rotterdam.

[62] Ashraf, M.A., Morozov, E.V. ve Shankar, K. (2014). "Flexure Analysis of Spoolable Reinforced Thermoplastic Pipes for Offshore Oil and Gas Applications", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(6): 533–542.

[63] Soden, P.D., Kitching, R., Tse, P.C. ve Tsavalas, Y., (1993). "Influence of Winding Angle on the Strength and Deformation of Filament Wound Composite Tubes Subjected to Uniaxial and Biaxial Loads", Composites Science and Technology, 46: 363-378.

[64] Soden, P.D., Kitching, R. ve Tse, P.C., (1989). "Experimental Failure Stresses for ±55° Filament Wound Glass Fibre Reinforced Plastic Tubes Under Biaxial Loads", 20(2): 125-135.

[65] Zheng, J., Li, X., Xu, P., Lin, X. ve Li, Y., (2009). "Analyses on the Short-Term Mechanical Properties of Plastic Pipe Reinforced by Cross Helically Wound Steel Wires", Journal of Pressure Vessel Technology, 131: 031401-1-031401-10.

[66] Akçay, İ.H. ve Kaynak, İ., (2005). "Analysis of Multilayered Composite Cylinders Under Thermal Loading", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 24(11): 1119-1179.

[67] Sayman, O., (2005). "Analysis of Multi-Layered Composite Cylinders Under Hygrothermal Loading", Composites: Part A, 36: 923-933.

[68] Frost, S.R., (1994). “Glass Fibre-Reinforced Epoxy Matrix Filament-Wound Pipes for Use in the Oil Industry”, Composite Manufacturing, 5: 73-82.

[69] Wikipedia, Reinforced Thermoplastic Pipe, https://en.wikipedia.org/wiki/Reinforced_thermoplastic_pipe., 15 Mayıs 2016.

[70] Flexsteel, Gas Safety Seminar, http://www.puc.state.pa.us/transport/gassafe/pdf/Gas_Safety_Seminar_2014-PPT-Flexsteel.pdf, 14 Mayıs 2016.

[71] Hacialioglu, I.H., (2013). “Composites Market in Turkey Set for Growth”, Reinforced Plastics, January/February 2013, 43-44.

[72] API Recommended Practise 15S, (2006). Qualification of Spoolable Reinforced Plastic Line Pipe, API Publication, First Edition.

[73] Hauger, B., Spoolable Composite Pipe Testing - API15S, https://www.microbac.com/uploads/Technical%20Articles/PDF1/Hauger%20Tech.%20Article49.pdf, 1 Nisan 2016.

[74] ASTM D2992, (2012). Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings, ASTM, Philadelphia.

[75] ASTM D2412, (2011). Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, ASTM, Philadelphia.

[76] ASTM D 1599, (2014). Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings, ASTM, Philadelphia.

[77] ASTM F2686, (2014). Standard Specification for Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Pipe, ASTM, Philadelphia.

[78] ISO 6259-1, (1997). Thermoplastics Pipes – Determination of Tensile Properties - Part 1: General Test Method, ISO, Geneva.

[79] ISO 6259-3, (1997). Themoplastic Pipes - Determination of Tensile Properties - Part 3: Polyolefin Pipes, ISO, Geneva.

[80] TS EN ISO 527-5, (2007). Plastikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 5: Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler İçin Deney Şartları, TSE, Ankara.

[81] TS 1398-1 EN ISO 527-1, (1997). Plastikler-Çekme Özelliklerinin Tayini-Bölüm 1: Genel Prensipler, TSE, Ankara.

[82] ASTM D3518/D3518M, (2013). Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 45° Laminate, ASTM, Philadelphia.

[83] Bai, Y., Xu, F. ve Cheng, P., (2012). “Investigation on the Mechanical Properties of the Reinforced Thermoplastic Pipe (RTP) Under Internal Pressure”, Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June 2012, Rhodes.

[84] Kruijer, M.P., Warnet, L.L. ve Akkerman, R., (2006). “Modelling of the Viscoelastic Behavior of Steel Reinforced Thermoplastic Pipes”, Composites Part A, 37: 356-367.

[85] You, L., Long, S. ve Rohr, L., (1999). “Elastic-Plastic Stress Filed in a Coated Continuous Fibrous Composite Subjected to Thermomechanical Loading”, Journal of Applied Mechanics, 66: 750-757.

[86] TS 1398-2 EN ISO 527-2, (1997). Plastikler-Çekme Özelliklerinin Tayini-Bölüm 2: Kalıplama ve Ekstrüzyon Plastikleri için Deney Şartları, TSE, Ankara.

EK-A

MALZEME TEKNİK VERİLERİ

RTP borunun modellenmesinde ve imalatında kullanılan malzemelerin üretici malzeme teknik verileri (TDS) bu bölümde belirtilmiştir.

بروج
Borouge
SHAPING the FUTURE with PLASTICS

POLYETHYLENE
BorSafe™ HE3490-LS

BLACK BIMODAL PE100 POLYETHYLENE FOR PRESSURE PIPE

DESCRIPTION

BorSafe HE3490-LS is a black, bimodal, high density polyethylene classified as a MRS 10.0 material (PE100) produced by the advanced Borstar® Technology. Well dispersed carbon black gives outstanding UV resistance. Long term stability is ensured by an optimised stabilisation system.

APPLICATIONS

BorSafe HE3490-LS is recommended for pressure pipe systems in the applications field of drinking water and natural gas, pressure sewerage, relining, sea outfall and industrial. It is especially designed for the production of larger diameter, thick wall pipe, but can be processed for the whole range of diameters. It also shows excellent resistance to rapid crack propagation and slow crack growth.

PHYSICAL PROPERTIES

Property		Test Method	Unit	Typical Value*
Density	(Compound)	ISO 1183-1 Method A	kg/m³	960
Melt Flow Rate	(190°C/5.0 kg)	ISO 1133	g/10 min	0.25
Tensile Modulus	(1mm/min)	ISO 527-2	MPa	1100
Tensile Strain at Break	(50mm/min)	ISO 527-2	%	>600
Tensile Stress at Yield	(50mm/min)	ISO 527-2	MPa	25
Carbon Black Content		ISO 6964	%	≥2
Carbon Black Dispersion		ISO 18553	-	≤3
Oxidation Induction Time	(210°C)	ISO 11357-6	minutes	≥20
Resistance to Rapid Crack Propagation, S4 test	(Pc at 0°C, test pipe 250mm SDR11)	ISO 13477	bar	>10
Resistance to Slow Crack Growth	(9.2bar, 80°C)	ISO 13479	hours	>1000

* Data should not be used for specification work.

Borouge Pte Ltd 1 George Street | #18-01 | Singapore 049145
Tel +65 6275 4100 | Fax +65 6377 1233 | www.borouge.com
Borouge is part of the ADNOC and Borealis group of companies
Company Registration Number 199801755H

Member of CISQ Federation RINA ISO 9001 · ISO 14001 Certified Integrated Systems
TÜV NORD RC 14001

TECHNICAL DATA

TENCATE ADVANCED COMPOSITES

TenCate Cetex® TC930

High Density Polyethylene Thermoplastic Composite

PRODUCT TYPE

High Density Polyethylene

TYPICAL APPLICATIONS

- Pipe overwrap

FEATURES

- Ambient temperature storage
- Excellent impact resistance
- UV resistance

HEAT DISTORTION TEMPERATURE

Approximately 250°F/121°C

SHELF LIFE

Indefinite at 77°F/25°C

Revised 03/2014

Cetex® and CFRT ™ are registered trademarks of Royal TenCate. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and TenCate Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties.

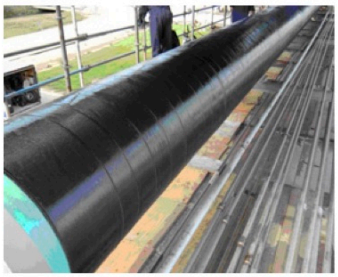
PRODUCT DESCRIPTION

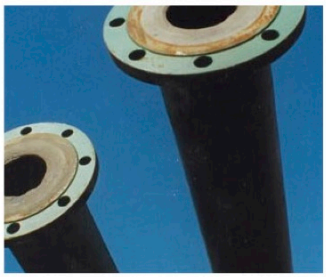
TenCate Cetex® TC930 HDPE *(formerly PMC/Baycomp CFRT® HDPE)* is a high strength high density polyethylene unidirectional tape. This TenCate thermoplastic composite is designed for applications like pipe wrapping in oil & gas and infrastructure piping. The high strength of this material reinforces the pipe, and provides both toughness and strength in overwrapping applications.

TENCATE CETEX TC930 HDPE PRODUCT BENEFITS/FEATURES

- Good toughness
- High strength
- Good chemical and solvent resistance
- Excellent hoop reinforcement strength
- Lightweight







TENCATE CETEX TC930 HDPE FIBERGLASS FIBER UNIDIRECTIONAL TAPE
Resin content by weight at 40%. Composite Density 1.55 g/cm³.
Tape Width 164 mm (6.5 inches) Tape Thickness 0.27 mm (0.011 inches).

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D3039	98 ksi	678 MPa
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D3039	4.1 Msi	28.3 GPa
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D790	79 ksi	546 MPa
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D790	4.2 Msi	29.2 GPa
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D3410	16 ksi	111 MPa
Short Beam Shear ILSS	RTD	ASTM D2344	1.9 ksi	13.4 MPa

Recommended Processing Temperature is 360-390°F (182-199°C)

TENCATE PERFORMANCE COMPOSITES

1150 Calle Suerte
Camarillo, CA 93012 USA
Tel: +1 805 482 1722
Fax: +1 805 482 8776

5035 N. Service Rd, Bldg. A-1
Burlington, Ontario L7L 5V2 CANADA
Tel: 905 332 0991
Fax: 905 332 0433

18410 Butterfield Blvd.
Morgan Hill, CA 95037 USA
Tel: +1 408 776 0700
Fax: +1 408 776 0107

www.tencate.com

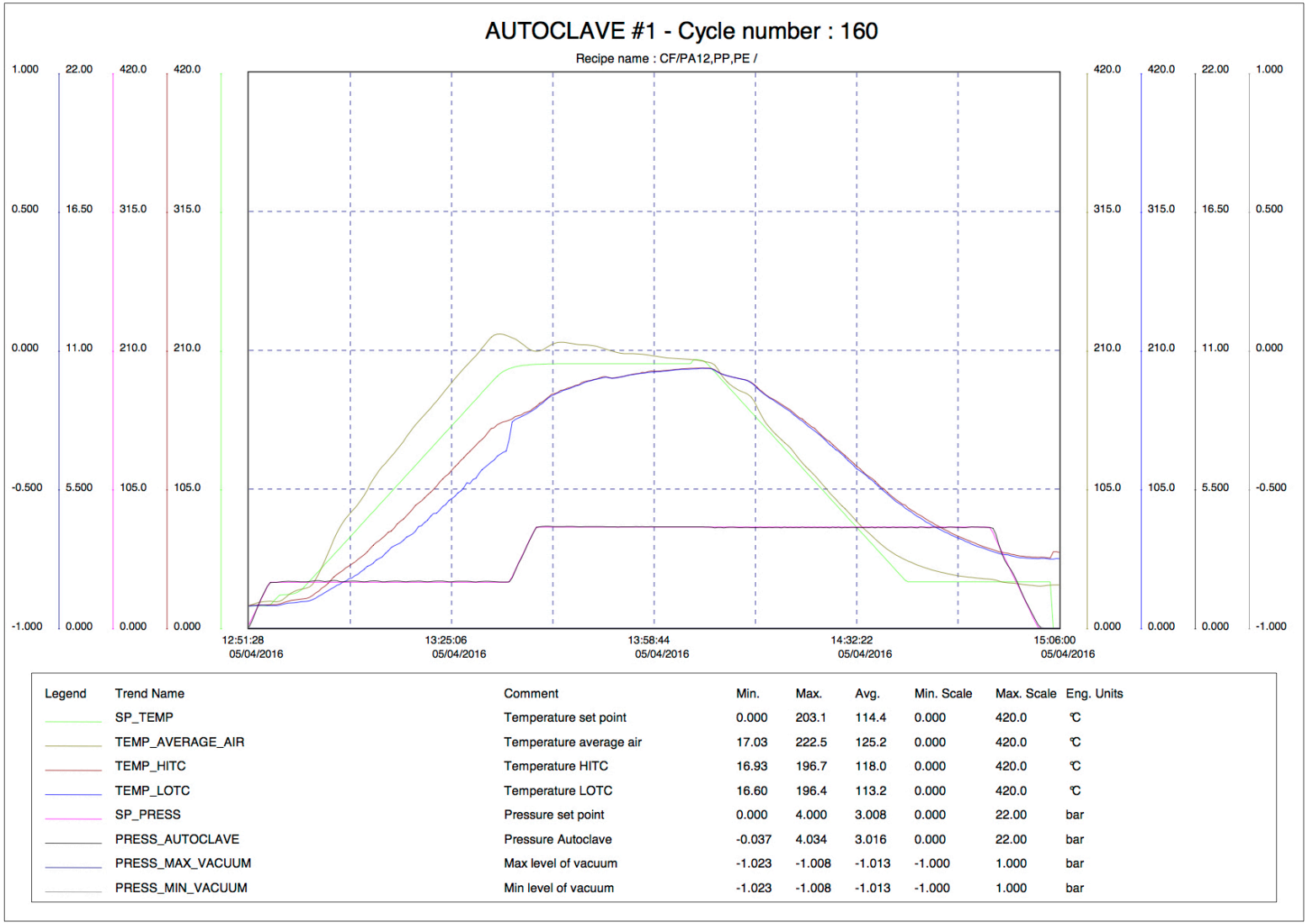
www.tencateperformancecomposites.com
www.tencateadvancedcomposites.com

E-mail: info@tcac-usa.com (USA)

EK-B

OTOKLAV NUMUNE ÜRETİM SÜRECİ

Takviye malzemesi mekanik özelliklerin tayin edilmesi amacıyla yapılacak çekme testleri için gerekli olan numuneler Şekil 2.5'de gösterilen otoklav ile aşağıda belirtilen proses izlenerek oluşturulmuştur. [55]



Legend	Trend Name	Comment	Min.	Max.	Avg.	Min. Scale	Max. Scale	Eng. Units
	SP_TEMP	Temperature set point	0.000	203.1	114.4	0.000	420.0	℃
	TEMP_AVERAGE_AIR	Temperature average air	17.03	222.5	125.2	0.000	420.0	℃
	TEMP_HITC	Temperature HITC	16.93	196.7	118.0	0.000	420.0	℃
	TEMP_LOTC	Temperature LOTC	16.60	196.4	113.2	0.000	420.0	℃
	SP_PRESS	Pressure set point	0.000	4.000	3.008	0.000	22.00	bar
	PRESS_AUTOCLAVE	Pressure Autoclave	-0.037	4.034	3.016	0.000	22.00	bar
	PRESS_MAX_VACUUM	Max level of vacuum	-1.023	-1.008	-1.013	-1.000	1.000	bar
	PRESS_MIN_VACUUM	Min level of vacuum	-1.023	-1.008	-1.013	-1.000	1.000	bar

EK-C

e_{ij} MATRİS ELEMANLARI

$$e_{11} = r_2$$

$$e_{12} = \frac{1}{r_2}$$

$$e_{13} = -r_2$$

$$e_{14} = -\frac{1}{r_2}$$

$$e_{21} = \bar{C}_{22}^{(2)} t + \bar{C}_{32}^{(1)} r_1 + \bar{C}_{33}^{(1)} r_1$$

$$e_{22} = \frac{4\bar{C}_{22}^{(2)} t}{(r_1 + r_2)^2} + \frac{\bar{C}_{32}^{(1)}}{r_1} - \frac{\bar{C}_{33}^{(1)}}{r_1}$$

$$e_{23} = \bar{C}_{22}^{(3)} t - \bar{C}_{32}^{(4)} r_3 - \bar{C}_{33}^{(4)} r_3$$

$$e_{24} = \frac{4\bar{C}_{22}^{(3)} t}{(r_2 + r_3)^2} - \frac{\bar{C}_{32}^{(4)}}{r_3} + \frac{\bar{C}_{33}^{(4)}}{r_3}$$

$$e_{25} = \bar{C}_{23}^{(2)} \left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) t + \bar{C}_{23}^{(3)} \left(\frac{r_2 + r_3}{2}\right) t$$

$$e_{26} = \bar{C}_{12}^{(2)} t + \bar{C}_{12}^{(3)} t + \bar{C}_{31}^{(1)} r_1 - \bar{C}_{31}^{(4)} r_3$$

$$e_{31} = \bar{C}_{32}^{(1)} + \bar{C}_{33}^{(1)}$$

$$e_{32} = \frac{\bar{C}_{32}^{(1)}}{{r_0}^2} - \frac{\bar{C}_{33}^{(1)}}{{r_0}^2}$$

$$e_{36} = \bar{C}_{31}^{(1)}$$

$$e_{43} = \bar{C}_{32}^{(4)} + \bar{C}_{33}^{(4)}$$

$$e_{44} = \frac{\bar{C}_{32}^{(4)}}{{r_4}^2} - \frac{\bar{C}_{33}^{(4)}}{{r_4}^2}$$

$$e_{46} = \bar{C}_{31}^{(4)}$$

$$e_{51} = 2\bar{C}_{12}^{(1)}({r_1}^2 - {r_0}^2) + \bar{C}_{12}^{(2)}({r_2}^2 - {r_1}^2)$$

$$e_{52} = \bar{C}_{12}^{(2)} \frac{4}{(r_1 + r_2)^2}({r_2}^2 - {r_1}^2)$$

$$e_{53} = 2\bar{C}_{12}^{(4)}({r_4}^2 - {r_3}^2) + \bar{C}_{12}^{(3)}({r_3}^2 - {r_2}^2)$$

$$e_{54} = \bar{C}_{12}^{(3)} \frac{4}{(r_2 + r_3)^2}({r_3}^2 - {r_2}^2)$$

$$e_{55} = \bar{C}_{13}^{(2)}({r_2}^2 - {r_1}^2)\left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) + \bar{C}_{13}^{(3)}({r_3}^2 - {r_2}^2)\left(\frac{r_2 + r_3}{2}\right)$$

$$e_{56} = \bar{C}_{11}^{(1)}({r_1}^2 - {r_0}^2) + \bar{C}_{11}^{(2)}({r_2}^2 - {r_1}^2) + \bar{C}_{11}^{(3)}({r_3}^2 - {r_2}^2) + \bar{C}_{11}^{(4)}({r_4}^2 - {r_3}^2)$$

$$e_{61} = \frac{2}{3}({r_2}^3 - {r_1}^3)\bar{C}_{32}^{(2)}$$

$$e_{62} = \frac{8}{3}({r_2}^3 - {r_1}^3)\frac{\bar{C}_{32}^{(2)}}{(r_1 + r_2)^2}$$

$$e_{63} = \frac{2}{3}({r_3}^3 - {r_2}^3)\bar{C}_{32}^{(3)}$$

$$e_{64} = \frac{8}{3}({r_3}^3 - {r_2}^3)\frac{\bar{C}_{32}^{(3)}}{(r_2 + r_3)^2}$$

$$e_{65} = \frac{\bar{C}_{66}^{(1)}}{2}({r_1}^4 - {r_0}^4) + \frac{2}{3}\bar{C}_{33}^{(2)}\left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right)({r_2}^3 - {r_1}^3) + \frac{2}{3}\bar{C}_{33}^{(3)}\left(\frac{r_2 + r_3}{2}\right)({r_3}^3 - {r_2}^3) + \frac{\bar{C}_{66}^{(4)}}{2}({r_4}^4 - {r_3}^4)$$

$$e_{66} = \frac{2}{3}({r_2}^3 - {r_1}^3)\bar{C}_{31}^{(3)} + \frac{2}{3}({r_3}^3 - {r_2}^3)\bar{C}_{31}^{(3)}$$

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Levent DERE

Doğum Tarihi ve Yeri : 21.06.1983 - İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : derelevent@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul / Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Makine Müh.	Bülent Ecevit Üniversitesi	2007
Lise	Sayısal	Cibali Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010 – …	Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.	Arge Uzmanı
2009-2010	Üstün İş Makina	Tasarım Uzmanı
2007-2008	Ata Haddecilik	Makine Mühendisi

YAYINLARI

Proje

1. Savunma Sanayi Müsteşarlığı - Havacılıkta kullanılan karbon elyaf takviyeli termoplastik reçineli prepreg geliştirilmesi (Araştırmacı)

2. SANTEZ - Melez iplikli termoplastik kompozit boru bağlantı elemanlarının elyaf sarma yöntemi ile üretimi ve modelleme teknikleri kullanılarak hatasız ürün geliştirilmesi (Yar. Personel)

3. KAMAG 1009G002 - Çevre altyapı tesislerinde kullanılan boruların (içme suyu + kanalizayon) ve üretim teknolojilerinin araştırılması, iyileştirilmesi ve geliştirilmesi (Araştırmacı)

4. SANTEZ - Katkılı polimer malzemelerin reolojik özelliklerinin modellenmesi ve ekstrüzyonda kullanılmak üzere üç katmanlı spiral kafa tasarımı (Araştırmacı)

5. TÜBİTAK, 1511 - Duvardan, yerden, tavandan ısıtma-soğutma uygulamalarında kullanılabilecek radyant klima panellerinin geliştirilmesi (Araştırmacı)

6. TÜBİTAK, 1511 - Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit boru üretimi (Araştırmacı)

7. TÜBİTAK, 1511 - Metal-Plastik ara yüzeylerinin yapışma özelliklerinin geliştirilmesi (Araştırmacı)