

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV UYGULAMALARI İÇİN KOMPOZİT BİR ŞAFTIN
YAPISAL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem OK

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinlerarası Programı

ARALIK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV UYGULAMALARI İÇİN KOMPOZİT BİR ŞAFTIN
YAPISAL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erdem OK
511121204**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinlerarası Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN

ARALIK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511121204 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Erdem OK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AĞIR TİCARİ ARAÇ İÇİN KOMPOZİT ŞAFT TASARIMI VE, BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Demet BALKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zafer KAZANCI
Hava Harp Okulu

Teslim Tarihi : 27 Kasım 2015
Savunma Tarihi : 25 Aralık 2015

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması yaklaşık bir buçuk yıllık bir grup çalışmasının ardından ortaya konulan, 529.STZ.2013-2 nolu ‘CARGO Ağır Ticari Kompozit Şaft Tasarımı’ isimli, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı’nca desteklenmiş bir SAN-TEZ Projesi kapsamında ortaya çıkarılmış bir tez çalışmasıdır. Projenin her safhasında yer alınmış ve konsept tasarım sürecinden fabrikasyona ve tasarımın iyileştirmelerine kadar her çalışma itina ile sürdürülmüştür.

Çalışma süresince ortaya konulan emek için başta proje yürütücüm ve tez danışmanım Prof. Dr. Halit Süleyman Türkmen olmak üzere; bizlere bu çalışma için en ideal ortamı sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakülte’si Yönetimine, yardımcı personel olarak projemize destek veren kıymetli hocalarımız; Prof. Dr. Vedat Ziya Doğan ve Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu’na, gerçekleştirilen testler ile ilgili olarak bizlere destek veren; Araş. Gör. Dr. Erdem Akay, Araş. Gör. Dr. Sedat Süssler ve kıymetli teknisyenimiz Müslüm Çakır’a; Ayrıca Ford Otosan ’dan projemizde yardımcı personel olarak çalışan Sn Ali Aykut Şen ve Sn Sibel Kaya’ya teşekkürü borç bilirim.

Kasım 2015

Erdem Ok
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	1
2. KATMAN TEORİSİNİ KULLANARAK KOMPOZİT ŞAFTIN ÖN TASARIMI	7
2.1 Katman Teorisi	7
2.2 Tsai-Wu Hasar Teorisi	11
2.3 Katman Sayısının Belirlenmesi İçin Yazılan Program ve Alınan Sonuçlar	13
2.4 Analiz Sonuçlarının Güncellenmesi	30
2.4.1 Mekanik analizlerin güncellenmesi ve sonuçlar	30
3. KOMPOZİT TÜPÜN ABAQUS VE PATRAN/NATRAN ORTAMINDA SONLU ELEMAN MODELİ	41
3.1 Sonlu Eleman Modeli ve Yakınsama Çalışmaları	41
3.1.1 Sonlu eleman modeli	41
3.1.2 Statik analizde yakınsama çalışmaları	42
3.1.3 Serbest titreşim analizinde yakınsama çalışması	45
3.2 Statik Analiz Sonuçları	47
3.2.1 B Modelleri sonuçları	47
3.2.2 C Modelleri sonuçları	51
3.3 Serbest Titreşim Analiz Sonuçları	56
3.3.1 B modeli sonuçları	56
3.3.2 C Modeli sonuçları	62
4. KOMPOZİT TÜP KATMAN ORYANTASYON OPTİMİZASYONU ÇALIŞMASI	67
4.1 Optimizasyon Çalışması ile İlgili Literatür Araştırması	67
4.2 Hesaplama Sürecinde Kullanılan Teori	68
4.3 Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Metodu Matlab Akış Diyagramı	69
4.4 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Matlab Akış Diyagramı	70
5. TEST KUPONU HAZIRLAMA METODLARI VE KULLANILAN TEST STANDARTI	83
5.1 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Test Standartı ve Elde Edilen Sonuçları	83
5.2 Yoğunluk Sonuçlarının Belirlenmesinde Kullanılan Test Standartı ve Elde Edilen Test Sonuçları	84
6. KOMPOZİT TÜP VE METAL MAFSAL BAĞLANTI YÖNTEMLERİ	87
6.1 Sıkı Geçme Bağlantısı	87
6.2 Yapıştırma Bağlantısı	94
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99

KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ	105

KISALTMALAR

CLT	: Classical Laminate Theory (Klasik Katman Teorisi)
PSOA	: Particle Swarm Optimization Algorithm (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması)
GA	: Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
UD	: Unidirectional (Eş yönlü)

SEMBOLLER

C_{ij}	: Rijitlik Katsayıları
ν	: Poisson Oranı
M_x, M_y, M_{xy}	: Moment Bileşenleri
N_x, N_y, N_{xy}	: Normal Kuvvet Bileşenleri
p	: Basınç
t	: Zaman
u	: Yer değiştirme vektörü
v	: Hız vektörü
r_m	: Ortalama Yarıçap
p_{best}	: Parçacıklardan birinin en iyi değeri
q_{best}	: Tüm parçacıkların içerisindeki en iyi değer
ρ	: Yoğunluk
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$	: Gerilme bileşenleri
A	: Uzama rijitliği
B	: Kaplin (Coupling) Rijitliği
D	: Eğilme Rijitliği
τ_{ort}	: Ortalama kayma gerilmesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Grafit/Epoksi Mekanik Özellikleri.....	14
Çizelge 2.2: Şaft Modelleri ve Elyaf oryantasyonları.....	17
Çizelge 2.3: Boyu 1910 mm İç Çapı 120 mm Olan Şaft Modelleri İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	23
Çizelge 2.4: Boyu 1910 mm İç Çapı 140 mm Olan Şaft Modelleri İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	24
Çizelge 2.5 : Güncel şaft modelleri ve elyaf oryantasyonları.....	31
Çizelge 2.6 : Güncel Şaft Modelleri Matlab Genel Sonuçları.....	34
Çizelge 3.1 : Boyu 1910 mm İç Çapı 140 mm Olan Şaft Modelleri İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	45
Çizelge 3.2 : B2 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	47
Çizelge 3.3 : B3 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	50
Çizelge 3.4 : B4 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	50
Çizelge 3.5 : B5 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	51
Çizelge 3.6 : B6 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	52
Çizelge 3.7 : C2 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	54
Çizelge 3.8 : C3 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	55
Çizelge 3.9 : C4 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	55
Çizelge 3.10 : C5 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	56
Çizelge 3.11 : C6 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri.....	57
Çizelge 3.12 : B2 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesu.....	57
Çizelge 3.13 : B3 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesu.....	58
Çizelge 3.14 : B4 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesu	59
Çizelge 3.15 : B5 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesu	60
Çizelge 3.16 : B6 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesu	61
Çizelge 3.17 : C2 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi.....	62
Çizelge 3.18 : C3 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi.....	63
Çizelge 3.19 : C4 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi.....	64
Çizelge 3.20 : C5 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi	65
Çizelge 3.21 : C6 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi	66
Çizelge 4.1 : Kompozit Şaft Temel Parametreleri	68
Çizelge 4.2 : Normalizasyon için kullanılacak maksimum değerler.....	73

Çizelge 4.3 : Her bir amaç fonksiyonu için ağırlık değerleri	74
Çizelge 4.4 : Parçacık sayısı ve hasar indeksi değerleri	75
Çizelge 4.5 : İterasyon sayısı ve hasar oranı değerleri.....	76
Çizelge 4.6 : Simetrik durum için sonuçlar.....	77
Çizelge 4.7 : Simetrik & dengeli durum için sonuçlar.....	79
Çizelge 4.8 : Rastgele Katman Sıralaması Durumu İçin Sonuçlar.....	80
Çizelge 5.1 : Kompozit Numunerlerin Çekme Mekanik Özellikleri	84
Çizelge 5.2 : Yoğunluk Test Sonuçları.....	85
Çizelge 6.1 : Geçme Miktarına Bağlı Basınç Dağılımı.....	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Matlab programında yazılan programın akış şeması	14
Şekil 2.2: A3 Modeli için ilk girdiler	17
Şekil 2.3: A3 modeli için okunan excel sütunu	17
Şekil 2.4: A3 Modeline ait A, B, D matrisi değerleri	17
Şekil 2.5: A3 Modeline ait gerinim değerleri (ilk 3 katman & global eksen)	18
Şekil 2.6: A3 Modeline ait gerilme değerleri (ilk 3 katman & global eksen)	18
Şekil 2.7: A3 Modeline ait gerinim değerleri (ilk 3 katman & lokal eksen)	18
Şekil 2.8: A3 Modeline ait gerilme değerleri (ilk 3 katman & lokal eksen)	19
Şekil 2.9: A3 Modeline ait Tsai-Wu dayanım oranı değerleri(ilk 3 katman)	19
Şekil 2.10: A3 Modeline ait teorik frekans ve kritik burkulma tork değeri	19
Şekil 2.11: A3 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	20
Şekil 2.12: A1 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	22
Şekil 2.13: A2 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	23
Şekil 2.14: A3 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	23
Şekil 2.15: A4 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	24
Şekil 2.16: A5 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	24
Şekil 2.17: A6 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	25
Şekil 2.18: B2 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	25
Şekil 2.19: B3 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği..	26
Şekil 2.20: B4 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği .	26
Şekil 2.21: B5 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği..	27
Şekil 2.22: B6 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi	27
Şekil 2.23 : C3 Model ABD Matris Değerleri	29
Şekil 2.24 : C3 Model İlk Dört Tabaka Gerilme ve Gerinim Dağılımı (Global Eksen)	30
Şekil 2.25 : C3 Model İlk Dört Tabaka Gerilme ve Gerinim Dağılımı (Lokal Eksen)	30
Şekil 2.26 : C3 Model İlk Dört Tabaka Tsai-Wu Hasar Oranı Dağılımı.....	31
Şekil 2.27 : B2 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	33
Şekil 2.28 : B3 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	33
Şekil 2.29 : B4 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	34
Şekil 2.30 : B5 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	34
Şekil 2.31 : B6 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	35
Şekil 2.32 : C2 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	35
Şekil 2.33 : C3 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	36
Şekil 2.34 : C4 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	36
Şekil 2.35 : C5 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı.....	37
Şekil 2.36 : C6 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı	37
Şekil 3.1 : S8R eleman geometrisi	38
Şekil 3.2 : Kalınlık girdisi ile birlikte elemanın modellenme şekli	38
Şekil 3.3 : 125 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı	39
Şekil 3.4 : 500 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı	40
Şekil 3.5 : 1125 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı.....	41
Şekil 3.6 : 2000 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı	41
Şekil 3.7 : Toplam eleman sayısına bağlı gerilme değişim	42

Şekil 3.8 : 1. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı	43
Şekil 3.9 : 2. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı	43
Şekil 3.10 : 3. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı	43
Şekil 3.11 : 4. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı	43
Şekil 3.12 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (57. Katman Alt Yüzey)	45
Şekil 3.13 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (57. Katman Üst Yüzey)	45
Şekil 3.14 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (57. Katman Alt Yüzey)	45
Şekil 3.15 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (57. Katman Üst Yüzey)	46
Şekil 3.16 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (57. Katman Alt Yüzey)	46
Şekil 3.17 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (57. Katman Üst Yüzey)	46
Şekil 3.18 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (67. Katman Alt Yüzey)	49
Şekil 3.19 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (67. Katman Üst Yüzey)	50
Şekil 3.20 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (67. Katman Alt Yüzey)	50
Şekil 3.21 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (67. Katman Üst Yüzey)	50
Şekil 3.22 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (67. Katman Alt Yüzey)	51
Şekil 3.23 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (67. Katman Üst Yüzey)	51
Şekil 3.24 : Statik analiz sonuçlarının okunduğu düğüm noktası	53
Şekil 3.25 : B2 Modeli ilk 5 mod şekli	54
Şekil 3.26 : B3 Modeli ilk 5 mod şekli	55
Şekil 3.27 : B4 Modeli ilk 5 mod şekli	56
Şekil 3.28 : B5 Modeli ilk 5 mod şekli	57
Şekil 3.29 : B6 Modeli ilk 5 mod şekli	58
Şekil 3.30 : C2 Modeli ilk 5 mod şekli	59
Şekil 3.31 : C3 Modeli ilk 5 mod şekli	60
Şekil 3.32 : C4 Modeli ilk 5 mod şekli	61
Şekil 3.33 : C5 Modeli ilk 5 mod şekli	62
Şekil 3.34 : C6 Modeli ilk 5 mod şekli	63
Şekil 4.1 : Kompozit Katman Teorisi Matlab Akış Diyagramı	67
Şekil 4.2 : Tsai-Wu ilk tabaka hasarı matlab akış diyagramı	68
Şekil 4.3 : Konum ve Hız Vektörleri	69
Şekil 4.4 : Temel Hesaplama Süreci	70
Şekil 4.5 : Parçacık sayısı ve hasar indeksi dağılımı	73
Şekil 4.6 : İterasyon sayısı ve yakınsama oranı dağılımı	74
Şekil 4.7 : Simetrik Durum için Amaç Fonksiyonları Değerleri Dağılımı	76
Şekil 4.8 : Simetrik & Dengeli Durum için Amaç Fonksiyonları Değerleri Dağılımı	77
Şekil 4.9: Rastgele Durum için Amaç Fonksiyonları Değerleri Dağılımı	78
Şekil 6.1 : 0.1-0.5mm arası Geçme Miktarı için Basınç Dağılımları	85
Şekil 6.2 : 1-5mm arası Geçme Miktarı için Basınç Dağılımları	86
Şekil 6.3 : Geçme Miktarındaki Artışa Bağlı Basınç Dağılımı	87
Şekil 6.4 : Sıkı Geçme Uygulaması Abaqus Modeli	88
Şekil 6.5 : Tüp Boyunca σ_{11} Dağılımı (68. Tabaka Üst Yüzey)	89
Şekil 6.6 : Tüp Boyunca σ_{22} Dağılımı (68. Tabaka Üst Yüzey)	89
Şekil 6.7 : Tüp Boyunca σ_{12} Dağılımı (68. Tabaka Üst Yüzey)	90
Şekil 6.8 : İç İç Yapıştırılmış İki Silindir	90
Şekil 6.9 : 10mm Yapıştırma Boyu için Kayma Gerilmesi Dağılımı	92
Şekil 6.10 : 25mm Yapıştırma Boyu için Kayma Gerilmesi Dağılımı	92
Şekil 6.11 : 50mm Yapıştırma Boyu için Kayma Gerilmesi Dağılımı	93
Şekil 6.12 : 100mm Yapıştırma Boyu için Kayma Gerilmesi Dağılımı	93
Şekil 6.13 : Uç Bağlantısı için Düşünülen Eleman	94

Şekil 6.14 : Üzerindeki Bağlantı Elemanlarıyla Birlikte Kompozit Şaft	95
--	-----------

OTOMOTİV UYGULAMALARI İÇİN KOMPOZİT BİR ŞAFTIN YAPISAL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu tez çalışmasında; Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının desteğiyle yürütülmüş olan, 529.STZ.2013-2 numaralı SAN-TEZ projesi kapsamında kompozit malzemeden üretilen kompozit bir şaftın tasarımı, bilgisayar destekli analizi ve kompozit şaftın katman sıralaması konusunda bir optimizasyon çalışmasının detayları sunulmuştur. Bu proje onsekiz aylık bir döneme yayılmış olan iş paketleri altında değerlendirilmiş olup bu iş paketleri altında konsept tasarım'dan optimizasyona gerek teorik gerek analiz çalışmaları birbirleriyle kıyaslandırılarak sonuçları paylaşılmıştır. Çalışmamızda öncelikli olarak; belirli geometrik, yapısal ve üretime bağlı detaylara göre güvenlik katsayıları baz alınarak bir konsept tasarım ortaya konulmuştur. Konsept tasarım incelendiğinde mevcut yapı, bir tüp ve iki hooke bağlantı elemanından oluşmaktadır. Hooke mafsalların piyasada çeşitli standartlara göre tasarlanıp üretildiği göz önünde bulundurulduğunda, çalışmada üzerinde durulacak olan husus, kompozit bir tüpün tasarlanmasına indirgeniş olacaktır. Ancak bu durum yeni bir çalışma alt başlığını da beraberinde getirmektedir. Bu başlık ise kompozit tüp ile metal mafsal eleman arasında gerçekleştirilecek olan bağlantı yöntemidir.

Kompozit ve Metal malzemeler arasındaki bağlantı yöntemleri gerek literatür gerek patent gerek ise çeşitli tecrübelerle elde edilmiş yöntemlerin irdelenerek üretilebilirliğe uygun ve gerekli yapısal özellikleri sağlayacak olan çalışmalar vasıtasıyla çeşitlendirilmiştir. Bu anlamda bağlantı metodu olarak bir sıkı geçme, bir de yapıştırma uygulaması üzerinde durulup sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir.

Kompozit tüp oluşturulurken öncelikle bir ilkel tasarımdan (on katman) yola çıkılarak tüpün statik durumda bir ucundan ankastre diğer ucundan tork uygulamasının yapıldığı koşul altında Tsai-Wu dayanım oranı baz alınarak, güvenlik katsayısı 2 olarak seçilerek gerekli katman sayısı elde edilmiştir. Elde edilen yapının gerek burkulma gerek ise minimum eğilme doğal frekans değerine ulaşabilmesi için, katman sayısı değiştirilmeden, üretime uygun düşük sarım açılı katmanlar ilave edilerek toplamda on beş farklı model ortaya konulmuştur. Sonrasında on beş model sonlu eleman tabanlı analiz programı Abaqus aracılığıyla modellenip analiz edilerek teorik çözümlemeyle ulaşılan değerler ile sonuçlar mukayese edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, aracında dinamik durumunda yapısal davranışında etkili olacak olan modal analizler yapılmıştır. Modal analiz hesaplamaları serbest-serbest sınır koşulları altında tamamlanmıştır. Modal analiz için verilen teorik sonuçlar ise mevcut yapı için minimum değeri veren formüle dayanmaktadır.

Tez çalışmasında ayrıca kompozit tüp katman oryantasyonu ile ilgili olarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında genel olarak amaç; pahalı uygulamaların maliyetini düşürmek, mekanik olarak ergonomik bir yapı elde etmek şeklinde sıralanabilir. Bizim çalışmamızda optimizasyon çalışmasında hedef ise

üç farklı amaca eş zamanlı olarak hizmet edecek yapının sağlanması ve böylelikle yapının beklenen yapısal davranışı göstermesidir.

Yapısal optimizasyonu birçok farklı optimizasyon teorisi ile gerçekleştirmek mümkündür. Ancak yöntemlerden birçoğu istenen global değerleri sağlayamayacak ya da çözüm süresini artıracaktır. Bu tip çalışmalarda literatür araştırmaları ise teorik olarak ilgilenilebilecek başlıkların sayısını ikiye düşürmemizi sağlamaktadır. Bunlar genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyon metodlarıdır.

Genetik algoritma, biyolojik tabanlı bir yöntemdir ve ilgilenilen amaç fonksiyolarının global optimum değerlere yakınsaması hususunda gerekli yaklaşımları göstermesi açısından mutasyon, crossing over gibi bazı geri besleme sağlayacak özelliklere sahip olması açısından tercih edilmektedir. Ancak, problemimizde ele alınan amaç fonksiyonunun birden fazla ve karmaşık olması sebebiyle çözüm süresini artırmaktadır. Bu sebeple çalışmamızda daha basit ve hızlı çözüm üretecek olan parçacık sürüsü optimizasyon algoritması tercih edilmiştir.

Parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemi, balık ve kuş sürülerinin beslenme davranışlarının incelenerek sayısal olarak ifade edilmesi üzerine ortaya çıkarılmış olan bir optimizasyon yöntemidir ve herhangi bir problem üzerinde uygulaması yapıldığında her bir parçacık beslenme ihtiyacını giderme amacıyla olan bir kuş olarak düşünülebilir. Burada ilgili parçacık amaç fonksiyonunun değerini iyileştirme amacıyla olan yani besine ilerlemekte olan kuş olarak düşünüldüğünde, ilgili parçacığın yön ve hız vektörleri fonksiyon değerini örneğin bir maksimizasyon probleminde her bir iterasyon sonucunda en iyi konumdaki parçacığa göre konum ve hız vektörlerini güncelleyerek en kötü konum ve hıza sahip parçacığın amaç fonksiyonunu iyileştirmek adına katkıda bulunmasını sağlamaktadır.

Tez çalışmasında ilgilenen üç amaç fonksiyonu; Tsai-Wu dayanım oranı değeri, minimum eğilme doğal frekansı değeri ve burulma kaynaklı burkulma kritik tork değeri şeklindedir. Bu üç amaç fonksiyonundan eğilme doğal frekans ve burulma kaynaklı burkulma kritik tork değerlerinin hesaplandığı amaç fonksiyonları basit formüller olarak doğrudan ifade edilebilmektedir. Bu formüllerde yapıyla ilgili değişkenler ile mekanik özellikleri ifade eden elastisite değerleri sabit değerler olarak kabul edilmiştir. Bağımsız değişken olarak ise elyaf sarım açısı ve katman dizilimi seçilmiştir.

Tsai-Wu dayanım oranı değerinin hesaplaması bir takım çözümlerin art arda yapılmasına dayanmaktadır. Burada birçok bağımsız değişken olarak seçilebilecek nicelik bulunmaktadır. Bu nicelikler gerek tez içeriğinde teorik yaklaşım başlıkları altında verilen formüllerde gerek ise optimizasyon başlığı altında verilen akış diyagramlarında görülebilmektedir. Ancak diğer iki amaç fonksiyonunda olduğu gibi Tsai-Wu dayanım oranı hesap akışında da elyaf sarım açısı ve katman dizilimi bağımsız değişken olarak düşünülerek literatürde yer alan üç farklı katmanlama yapısına göre; simetrik, simetrik-dengeli ve rastgele durumları için 3 farklı kompozit tüp model oluşturulmuş ve sonuçları verilmiştir.

Tez çalışmasında son olarak ise, kompozit tüp ve metal mafsalları arasındaki bağlantı yöntemi üzerinde durulmuştur. Değerlendirilen iki bağlantı yöntemi; yapıştırma ve sıkı

geçme bağlantısı için ayrı iki model oluturularak önce konsept model sonrasında teorik hesaplamalar ve son olarak ise Abaqus ile statik analizler gerçekleştirilerek uygulamaların uygunlukları değerlendirilmiştir.

STRUCTURAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A COMPOSITE DRIVE SHAFT FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

SUMMARY

In this study; Science, which was conducted with the support of Industry and Technology Ministry, 529.STZ.2013-2 number SAN-TEZ project, which will be made from composite materials, composite drive shaft design which includes computer-aided analysis details and optimization study were presented on composite shaft of the layer stacking sequence. This eighteen-month project is evaluated under the work packages that need to be spread over a period. From the theoretical solution portion to computer based analysis of the model and to the study of optimization portion, the whole results are discussed by making comparings with each results.

As a priority in our study; geometric specific safety factor according to the structural and production details have been revealed on the basis of a conceptual design when examining existing structure concept design consists of a tube and two hook connection elements. When considering that the joint Hooke designed and manufactured according to various standards in the market, which will focus on issues in the study, the design of the composite will be the reduced tube. However, this case raises a new study in the subtitle. This title is the method which will be held in connection with the composite tube and metal joint elements.

The required connection method between composite and metallic materials must have been diversified through the patent literature should work to ensure that appropriate and necessary structural features examined reproducibility of the method were obtained through various experiences. In this sense, an interference fit as the connection method, one is folded over the bonding results were analyzed in detail.

Building composite tube began initially a primitive design (one layer), starting tube static state under the condition where the torque application from the one end other one is from the another end and Tsai-Wu strength ratio based on a safety factor was obtained the required number of layers selected as 2. The resulting structure is needed to achieve the required minimum bending buckling natural frequency, without changing the number of layers it has been introduced by adding a total of fifteen different models suitable low angled winding layers production. Fifteen models analyzed and modeled through finite element analysis program based Abaqus results with theoretical solutions were compared with values achieved after.

In the second part of the study, modal analysis, which will be effective in the case of dynamic structural behavior of the vehicle it is made. Modal analysis calculations have been completed under free-free boundary conditions. The theoretical results for modal analysis is based on the formula that the minimum value for existing buildings.

In this thesis an optimization study is also made with respect to the orientation of the layer composite tubes. To optimize the overall objective; To reduce the cost of expensive application it can be arranged as to obtain a mechanically ergonomics. The objective of our study to ensure the structure will serve optizational working

simultaneously on three different purpose and is thus expected to show the structural behavior of the structure.

Structural optimization is possible to perform many different optimization theory. However, many of these methods can not achieve the desired global value or will increase the time resolution. Literature in this type of work allows us to reduce to two the number of titles that can be dealt with if theoretically. These are the genetic algorithm and particle swarm optimization method. Genetic algorithm is a method of bio-based and mutations in terms of showing the necessary approaches to the convergence point for the global optimum value of interest objective function, crossing over like is preferred since it is packed with features that provide some feedback. However, since the problem has to be dealt with multiple and complex objective function increases the resolution time. For this reason, our work easier and particle swarm optimization algorithm that will produce quick solutions are preferred.

Particle swarm optimization method, examining the fish and bird feeding behavior is a method of optimization is revealed upon quantified and considered a bird with the aim of removal of each particle nutritional needs of the application carried out any problems. When considered here as bird advancing food so with the aim of improving the value of the corresponding particle objective function by updating its position and velocity by particles in the best position on the results of each iteration the value of function regarding particle's direction and velocity, for example, in a maximization problem is the worst position and the particles have speeds in order to improve the objective function it is to ensure contribute.

Three objective function is interested in the thesis; Tsai-Wu strength ratio value, minimum value of flexural and torsional natural frequency is in the form of critical buckling-induced torque. That this calculation of bending and torsional natural frequency purpose induced torsional torque of the three critical functions of the objective function can be expressed directly as simple formulas. Elasticity values representing the mechanical properties associated with the structure In these formulas the variables are assumed to be constant values. The independent variables fiber winding angle and layer sequence is selected. Calculation of the Tsai-Wu strength value is based on the performed repeatedly a number of solutions. There are many arguments as the quantity that can be selected. The content of this thesis required quantities needed in the formula given under headings theoretical approaches can be seen in the flow diagram given under the title optimization. However, as in the other two objective functions Tsai-Wu strength ratio of the fiber winding angle in the calculation flow and layer sequence as an argument in the literature by considering three different layering structure; symmetrical, three models for different composite tube-balanced and symmetrical random situations created and the results are given.

Finally the thesis is focused on the method of connection between the metal and composite tube joint. Mentioned two connection methods; After bonding concept models and theoretical calculations before building the model for retaining two separate connection and finally compliance with Abaqus applications were evaluated by performing the static analysis.

All in all, the thesis includes the topics from the concept design to optimization of the concept and the concept has been developed both theoretical and analysis by using commercial programs that's for obtaining model in better condition. The final condition of the composite tube is ready to get used in fabrication step of design processes.

1. GİRİŞ

Mühendislik tasarımı çeşitli başlıklar altında incelenebilir olup bu başlıklar bir araya geldiğinde bir bütün oluşturmaktadır. Söz konusu başlıklardan konsept yani idealizasyon sonrası ilk model ile tasarım konusu anlam kazanmaya başlamış olmaktadır. Konsept tasarım, detaylı tasarım ve analiz, son olarak fabrikasyon süreçleri ayrı ayrı incelendiğinde bu aşamaların her biri kendi içinde bir gelişim sürecinden geçmiştir ve gelişmeye devam etmektedir. Bu gelişim süreci mühendislerin uygulama süresini kısaltmakta ve gitdige daha ideal yani gerçeğe daha yakın bir sonuç ortaya konmasını sağlamaktadır.

Yaklaşık olarak bir buçuk yıllık sürece yayılmış planlı bir çalışma sonucu bu tez ortaya çıkmış olup, bahsi geçen tasarım süreçlerinin her biri bu tez kapsamında kullanılmış ve ayrı başlıklar altında modelin gelişim süreçlerine detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Çalışmada ağır ticari araca ait iki parçadan oluşan bir çelik şaft modeli yerine tek parçadan oluşan bir kompozit şaft tasarımı yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez konusun seçilmesindeki en önemli neden ülkemizde konuyla ilgili bilgi birikimi açığının olması ve proje kapsamında üretilecek olan kompozit şaftın ülkemizde henüz üretim faaliyetinin bulunmamasıdır.

Tasarlanan kompozit şaft ağır ticari bir araçta kullanılacaktır ve daha önceden seri olarak üretilmiş olan muhadil şaftlar yalnızca binek taşıtlarda kullanılmakta olup herhangi bir ağır ticari araç üzerinde seri olarak kullanımı söz konusu değildir.

1.2 Literatür Araştırması

Geçmiş yıllarda, kompozit şaft tasarımı, analizi ve uygulamaları konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Daugherty [1], 5 tonluk kamyonlar için kullanılan yaprak yay ve şaftlarda kompozit malzeme kullanımını Birleşik Devletler ordusu için araştırmış ve raporlandırmıştır. Bir araştırma programı kapsamında yapılan çalışma için şaft

tasarımı yapılmış, prototipler üretilmiş ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Şaft tasarımı için karbon-epoksiden üretilmiş tüpler kullanılmıştır. Şaft testleri, statik ve yorulma olmak üzere iki ayrı test tipi içerir. Statik test, şafta uygulanan devamlı ve sürekli artan bir tork uygulanarak, şaftta hasar oluşana kadar devam etmiştir. Yorulma testi için, yaklaşık $\pm 5084 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($\pm 45000 \text{ lb} \cdot \text{in}$) tork değeri 150000 kez şafta uygulanmış ve hasar görülmemiştir.

Leslie ve arkadaşları [2], otomotiv sektöründe kullanılan metal şaftların karşılaştığı ağırlık, titreşim karakteristiği ve kritik şaft hızı gibi limitleri aşabilecek çözüm olarak kompozit şaft teknolojisinin varlığını ortaya koymuştur. O ana kadar yapılan kompozit şaft tecrübelerini inceleyerek performanslarını, çelik, alüminyum ve titanyum uygulamalarıyla karşılaştırmalı olarak göstermiştir.

Rastogi [3], otomotiv uygulamalarında kullanılabilecek kapsamlı bir kompozit şaft tasarımı sunmuştur. Rastogi çalışmayı iki kısma ayırarak, kompozit bir şaft tüpünün tasarımını ve mafsallı çatal ile şaft tüpü arasındaki yapıştırıcı bağlantı elemanının tasarımını ayrı ayrı incelemiştir. Kapalı form analitik çözümler yardımıyla ön tasarım araçları geliştirilmiş ve sonlu elemanlar analizleri yapılarak tasarımlar doğrulanmıştır. Ön tasarım araçları MS-EXCEL makroları kullanılarak yazılmış, sonlu elemanlar analizi IDEAS ticari programı yardımıyla yapılmıştır. Analiz aşamasında, katmanlı kompozit yapının yönelim açıları, GENESIS ticari optimizasyon programı yardımıyla optimize edilmiştir.

Chowdhuri ve Hossain [4], yaygın olarak kullanılan 2 parçalı çelik araç şaftı yerine, tüm gereklilikleri karşılayabilecek tek parçadan oluşan kompozit bir şaftın optimum tasarımı konusunda çalışmışlardır. Katmanlı karbon-epoksi ve alüminyum ile karbon-epoksi birleşimi şeklinde iki farklı malzeme tasarımı çalışmada yer alır. Amaçları, en hafif ve en ucuz şaftı tasarlamaktır. Bunun yanında, yükleme ile ilgili tasarım kısıtlamaları oluşturarak tasarımın dayanımını korumayı hedeflemişlerdir. Öncelikli yükleme şartı, şaftın maksimum tork değerinde burulmaya olan dayanımıdır. İkincil kritik yükleme, ince cidarlı bir tüpte görülebilecek burkulmadır. Üçüncü kritik sorun ise böyle bir şaftta görülecek yüksek eğilme doğal frekansı değerleridir. Chowdhuri ve Hossain, her bir tasarım kısıtlaması için farklı değerlerde emniyet faktörleri belirlemiştir. Çalışmanın son bölümünde, ilerleyen hasar analizinin kompozit şafta uygulanması konusunda PROMAL yazılımı ile elde ettikleri sonuçları da göstermişlerdir.

Mohammed ve arkadaşları [5], otomotiv uygulamalarında kullanılabilecek tek parçadan oluşan kompozit şaft tasarımı ve şaftın titreşim analizi konusunda ANSYS ticari sonlu elemanlar yazılımı kullanarak çalışmalar yapmıştır. Önceki çalışma ile benzer şekilde, iki parçalı çelik şaftların yerini alacak bir tasarım düşünmüşlerdir. Şaft için düşündükleri malzeme, %60 elyaf yoğunluklu HM karbon-epoksidir. Çalışmalarında ilk olarak, belirledikleri tork transmisyon kapasitesi, kritik hız ve burkulma kapasite değerlerini hasara uğramadan karşılayabilecek bir tasarım yapmışlardır. Ardından, belirlenen tasarım üzerinde ANSYS yardımıyla modal analizler yapmışlar ve ilk mod için frekans değerleri elde ederek kontur grafiklerini çalışmada göstermişlerdir. Çalışmanın son bölümünde, kompozit şaft için kullanılacak yapışkan bağlantının performansını incelemişler ve metal bir şaft ile tasarladıkları karbon-epoksi kompozit şaftı karşılaştırarak ağırlık analizi yapmışlardır. Kompozit şaft kullanımı ile %72 oranında ağırlık azalması elde etmişlerdir. Hibrid yapıdaki kompozit şaftlar konusunda da çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Talip ve arkadaşları [6] ve Mutasher [7] hibrid kompozit otomotiv şaftlar konusunda iki farklı çalışma yapmışlardır. Talip ve arkadaşları, bir sıra karbon-epoksi ve üç sıra cam/epoksiyle oluşturdukları kompozit hibrid şaft tasarımlarının, farklı yönelim açılarında sonlu elemanlar analizlerini yaparak 6 mod için doğal frekanslarını ve burkulma torklarını elde edip farklı konfigürasyonları karşılaştırmışlardır. Mutasher, iç kısmı alüminyum tüp ve bu tüp etrafına sarılı cam/epoksi ve en dışta da karbon/epoksi katmandan oluşan hibrid şaft tasarımı için sonlu elemanlar analizi yaparak burulma dayanımını incelemiştir. Farklı katman sayısı ve farklı yönelim açılara sahip 5 farklı tasarımı karşılaştırmıştır.

Khalid ve arkadaşları ise [8], Mutasher tarafından yapılan hibrid şaft tasarımının aynısını kullanarak, şaftın yorulma davranışının incelenmesi konusunda deneysel çalışmalar yapmıştır. Katman sayıları ve yönelim açıları farklı 4 farklı konfigürasyon için S-N diyagramları elde edilmiştir.

Diğer bir hibrid çalışmada, Lee ve arkadaşları [9] alüminyum kompozit otomotiv şaftının tasarımını ve yeni bir üretim metodu gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri numuneler üzerinde yaptıkları testlerde iki parçalı metal bir şafta göre, %75 ağırlık azalması, %160 tork kapasitesinde artış görülmüştür.

Badie ve arkadaşları [10] elyaf oryantasyonu ve katman sıralamasının şaftın burulma rijitliği, doğal frekansı, burkulma dayanımı, yorulma ömrü ve hasar şekillerine olan etkilerini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar analizlerini LUSAS programında QTS8

elemanlar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre şaftın dinamik performansı elyaf oryantasyonu şaft eksenine yaklaştıkça artmaktadır; elyaf oryantasyonunun şaft eksenine dikten paralele değiştirildiği durumda doğal frekans %54.3 artmaktadır. Oryantasyonu 20 – 40° arasındaki katmanların burkulma dayanımı minimum iken 90° oryantasyonlu katmanlarda maksimum olmaktadır. $\pm 45^\circ$ oryantasyonlu katmanlar da kesme zorlamasına karşı dayanımları maksimum olduğundan maksimum tork taşıma kabiliyetine sahiptir ancak ani bir şekilde hasara uğramaktadırlar.

Poul ve arkadaşları [11], içten yanmalı bir motor ile aksenal akışlı fan arasında güç aktarımı gerçekleştirebilecek çeşitli şaft tasarımları üzerine çalışmışlardır. Üç farklı konfigürasyondaki şaftın teorik tasarım hesapları mevcuttur. Şaft borusu ile uçlardaki Al alaşımı bağlantı elemanları arasındaki yapıştırıcı ile alakalı sonlu elemanlar analizlerini de gerçekleştirmişlerdir.

Keys, Kinkler ve Santiago [12]; bir kompozit şaftın tasarımı, üretimi ve test edilerek performansının belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Şaftın tasarım hesapları NENastran Modeler sonlu elemanlar analiz programı ile doğrulanmıştır. Mandrel üretimi ve sarımı bitmiş şaft borusunun mandrelden sorunsuz bir şekilde ayrılabilmesi ile ilgili değerli bilgiler içeren çalışmada, üretilen şaft 1968 model Ford Mustang üzerine monte halde şasi dinamometresi üzerinde test edilmiştir.

Ummuhaani ve Sadagopan [13], Maruti Omni aracına ait çelik şaftın kompozit bir şaft ile değiştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Şaftın tasarım parametreleri ağırlığın minimize edilmesi üzerine şekillendirilmiş ve sonlu elemanlar analizleri ANSYS 11 programında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan çeşitli düzenekler yardımı ile şaftın eğilme, burulma ve yorulma testleri gerçekleştirilmiş ve nihayetinde de maliyet analizi sunulmuştur.

Gireesh, Shrishail ve Satwik [14]; tork iletim kabiliyeti, burkulma dayanımı ve temel eğilme frekans değerlerini tasarım kısıtları olarak belirlenmiş bir şaftın ağırlığının minimize edilmesi üzerine çalışmışlardır. Sonlu elemanlar analizlerinin ANSYS 13 programı kullanılarak gerçekleştirildiği çalışmada çelik malzemeli bir şafta göre %72 oranında bir ağırlık kazancı sağlanmıştır.

Dr. Andrew Pollard [15], GKN Technology adına gerçekleştirdiği çalışmada kompozit şaft uygulamalarında geline son durumu ağırlık kazancı, çarpışma performansı, NVH, bağlantı şekilleri ve geri dönüştürülebilme gibi çeşitli konu başlıkları altında incelemiştir.

Tüm bu çalışmalarda ağır ticari araçlar için bir şaft tasarımı, imalatı ve testleri bir bütün olarak mevcut değildir. Bu çalışmada, öncelikle Klasik Katman Teorisi kullanılarak bir konsept tasarım ortaya konulmuş, daha sonra bu konsept tasarım baz alınarak öncelikle statik analizler gerçekleştirilmiş, akabinde ise modal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın diğer bölümlerinde ise bir bağlantı yöntemi çalışması yapılmış ve bağlantı yöntemine göre Abaqus'te statik analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise Parçacık Sürüsü Optimizasyonu metodu kullanılarak oryantasyon ve katman sıralaması değişken kabul edilecek şekilde bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir ve farklı katman yapısında tasarım önerileri sunulmuştur.

Optimizasyon çalışması kapsamında ise, [18, 19, 20 ve 21] referanslarıyla gösterilen çalışmalarda araştırmacılar, Manjunath ve arkadaşları [18], tork iletim kapasitesi, doğal eğilme frekansı, eksenel titreşim ve tork dayanımı tasarım kısıtları altında ağırlık minimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmayı yürütürken farklı türde elyaf malzemelerini baz almışlardır.

D. Jebakani ve T. Paul Robert [19], muğlaklık içeren bir mühendislik tasarımı için güvenilirlik çalışması ortaya koymuşlardır. Malzeme türü ve geometrik muğlaklık etkisini, yapının hasar riskini belirlemek için kullanmışlardır. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) evrimsel algoritma, bu hasar riskini belirlerken kritik tasarım parameter değerlerinin optimum değerlerine ulaşmak amacıyla kullanılmıştır.

H. Ghasphochi- Barg ve M.H. Sadr [20], klasik sınır şartları altındaki fiber takviyeli metal panellerin doğal frekans değerleri hususuyla ilgilenmişlerdir.

H. Li ve K. Chandrashekhara [21], malzeme seçimi, katman sayısı, katman sıralaması, katman kalınlığı ve oryantasyonu gibi geniş kapsamlı bir optimizasyon çalışması gerektiren bir hidrokinetik türbin için kompozit kanat üretimi üzerinde çalışmışlardır. Bu nicelikler, kanat hasarı ve kompozit kanadın ağırlığı baz alınıp standart parçacık sürüsü optimizasyonu metoduyla optimize edilmiştir.

P. Kere ve J. Koski [22] birden fazla yükleme durumuna bağlı olarak, bir çoklu optimizasyon metodu ortaya koymuştur. Bu optimizasyon metodunda uygulanan yükleme durumlarına göre bir ilk katman hasarı için katman marjini ortaya konulmaktadır.

K. Lakshmi ve A. Rama Moham Rao [23], düzgün basınç yüklemesi durumunda ‘isogrid form stiffner’ lı simetrik ve dengeli katman sıralamasına ve optimum değerlere sahip kompozit silindir tasarımı ortaya koymuştur. Maksimum burkulma yüklemesi optimizasyonu durumunda, katman sıralaması ve ‘stiffener’ konfigürasyonu tasarım değişkenleri olarak seçilmiştir.

2. KATMAN TEORİSİNİ KULLANARAK KOMPOZİT ŞAFTIN ÖN TASARIMI

Bu bölümde öncelikle katman teorisi ve Tsai-Wu hasar kriteri anlatılmış, sonra da kompozit şaftın katman sayısını ve elyaf oryantasyonlarını belirlemek amacıyla Matlab kullanılarak bir program yazılmıştır. Söz konusu program kullanılarak iki farklı şaft çapı ve her bir çap için beş farklı elyaf oryantasyon ve katman sıralaması belirlenmiştir.

2.1 Katman Teorisi

Katmanlı bir kompozitin bünye denklemi (gerilme-gerinim ilişkileri) üç boyutlu durumda aşağıdaki şekilde verilebilir. [17]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Üç boyuttaki bünye denklemi kalınlık doğrultusu olan “3” nolu yöndeki gerilmenin ihmal edilmesi sonucu düzlem gerilme haline dönüşür ve iki boyutlu durum için bünye denklemi aşağıdaki hali alır.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Burada $Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$, $Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{21}\nu_{12})$, $Q_{66} = G_{12}$ şeklindedir. Burada E_1 uzunlamasına (1 yönündeki) elastisite katsayısını, E_2 yanlamasına (2 yönündeki) elastisite katsayısını, ν_{12} Poisson oranını, G_{12} düzlem içi kayma modülünü göstermektedir.

İki boyutlu hal için yazılan bünye denklemi aşağıdaki şekilde esneklik matrisi cinsinden de verilebilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Burada $S_{11} = 1/E_1$, $S_{12} = -\nu_{12}/E_1$, $S_{22} = 1/E_2$, $S_{66} = 1/G_{12}$ olarak verilir.

Elyaf oryantasyonunun eksenlerle bir θ açısı yaptığı durumdaki esneklik ve rijitlik matrisleri “dönüştürülmüş” olarak ifade edilir. Bu durumdaki esneklik ve rijitlik matrislerini elde etmek için $c = \cos \theta$ ve $s = \sin \theta$ olmak üzere:

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

şeklinde bir dönüşüm matrisi tanımlanır. Elyaf koordinat sistemindeki gerilmeler genel kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Gerinimler ise,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Elyaf koordinat sisteminde verilen bünye denklemi de kullanılarak gerilme-gerinim ilişkileri genel kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Matris çarpımları gerçekleştirilerek,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Burada,

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (2.9a)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \quad (2.9b)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (2.9c)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \quad (2.9d)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \quad (2.9e)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \quad (2.9f)$$

Bir plağın deformasyonunu tanımlayan gerinim-yer değiştirme ilişkileri aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (2.11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (2.12)$$

Gerilme-gerinim ilişkileri matris formatında yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

Burada,

$\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0$ plağın orta düzlemindeki normal gerinimleri, γ_{xy}^0 plağın orta düzlemindeki kayma gerini

κ_x, κ_y eğilme eğriliklerini, κ_{xy} burulma eğriliğini göstermektedir. Söz konusu

ifadeler bünye denkleminde kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Katmanlı bir kompozit için her bir katmanın kalınlığı t_k alınırsa toplam kalınlık $h = \sum_{k=1}^n t_k$ şeklinde yazılabilir. Plağın düzlem içi kuvvetleri ve plağın momentleri gerilmelerin ve gerilme kalınlık çarpımlarının integrasyonu ile aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (2.17)$$

Kalınlık boyunca katmanlar dikkate alındığında söz konusu ifadeler aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz \quad (2.19)$$

Yukarıdaki ifadelerde bünye denklemleri de kullanılarak aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Yukarıdaki ifadelerde integraller gerçekleştirilerek aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Burada,

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), i = 1,2,6, j = 1,2,6$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), i = 1,2,6, j = 1,2,6$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3), i = 1,2,6, j = 1,2,6$$

şeklinde katılık matrislerini ifade etmektedir. Böylece kuvvet-gerinim ilişkileri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.2 Tsai-Wu Hasar Teorisi

Katmanlı yapılar mekanik ve ısı yükleri altında hasar görebilecektir. Katmanların hasarı her zaman geri dönüşü olmayan boyutta olmayabilir. Herhangi bir yükleme sonrası bazı katmanların hasar görmesi durumunda, hasar görmeyen katmanların bulunması mevcut yükten daha fazla yükün hala taşınabileceği anlamına gelebilmektedir. Her bir katmanın rijitlik ve dayanımının bozulması aşağıdaki şekilde açıklanabilir; [17]

- 1) Bir katman hasar gördüğünde, bu hasar, elyaf yönüne paralel bir çatlak şeklinde gerçekleşmiş olabilir. Ancak bu katman hala elyaf yönüne paralel yönde yük taşıyabilecektir. Yapılacak modellemede söz konusu katman herhangi bir farazi, yanal rijitliği, çekme ve kayma dayanımı olmayan bir katmanla yer değiştirebilir. Yani bahsedilen değerler '0' alınabilir. Fakat burada boylamasına yöndeki dayanımın değişmediği varsayımı yapılmalıdır.
- 2) Bir katman hasar gördüğü durumda, bu rijitlik ve dayanım değerlerinin '0' alınacağı anlamına gelmektedir. Bu durum aynı zamanda ilgili matrislerindeki tekilliğin önüne geçmektedir.

İlk katman ve son katman hasarı için uygulanabilecek yükün saptanması için aşağıdaki prosedür uygulanabilir:

- 1) Mekanik yükler göz önüne alındığında, uygulanan yükler dayanım yüklerine denk olmalıdır.
- 2) Orta katman gerinim ve eğrilik değerlerini bulmak için katman analizi kullanılmalıdır.
- 3) Uygulanan yüke karşılık gelen lokal gerinim değerleri ve gerilme değerleri her bir katman için saptanmalıdır.
- 4) Katman-katman gerilme ve gerinim değerleri bulunarak teorisinin detayları verilen hasar kriterlerine göre dayanım oranları saptanmalıdır. Bulunan

dayanım oranının yükle çarpılması durumunda bulunacak olan değer, ilgili katmanın hasar yükünü verecektir.

Bu aşamaya kadar olan kısım ilk katman hasar kriterini açıklamaktadır. Tsai-Wu hasar kriterinin ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (2.25)$$

$$1. \quad \sigma_1 = (\sigma_1^T)_{ult} \quad \sigma_2 = 0 \quad \tau_{12} = 0$$

$$H_1(\sigma_1^T)_{ult} + H_{11}(\sigma_1^T)_{ult}^2 = 1$$

$$2. \quad \sigma_1 = -(\sigma_1^C)_{ult} \quad \sigma_2 = 0 \quad \tau_{12} = 0$$

$$-H_1(\sigma_1^C)_{ult} + H_{11}(\sigma_1^C)_{ult}^2 = 1$$

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

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

$$3. \quad \sigma_1 = 0 \quad \sigma_2 = (\sigma_2^T)_{ult} \quad \tau_{12} = 0$$

$$H_2(\sigma_2^T)_{ult} + H_{22}(\sigma_2^T)_{ult}^2 = 1$$

$$4. \quad \sigma_1 = 0 \quad \sigma_2 = -(\sigma_2^C)_{ult} \quad \tau_{12} = 0$$

$$-H_2(\sigma_2^C)_{ult} + H_{22}(\sigma_2^C)_{ult}^2 = 1$$

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

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

$$5. \quad \sigma_1 = 0 \quad \sigma_2 = 0 \quad \tau_{12} = (\tau_{12})_{ult}$$

$$H_6(\tau_{12})_{ult} + H_{66}(\tau_{12})_{ult}^2 = 1$$

$$6. \quad \sigma_1 = 0 \quad \sigma_2 = 0 \quad \tau_{12} = -(\tau_{12})_{ult}$$

$$-H_6(\tau_{12})_{ult} + H_{66}(\tau_{12})_{ult}^2 = 1$$

$$H_6 = 0$$

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

H_{12} katsayısının belirlenmesi aşağıda verilmiştir,

- 1) Tek yönlü katmana x ve y yönlerinde eşit büyüklükte çekme gerilmesi uygulansın.

Hasarın gerçekleştiği gerilmenin $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$ olduğu durumda:

$$(H_1 + H_2)\sigma + (H_{11} + H_{22} + 2H_{12})\sigma^2 = 1 \quad (2.26)$$

$$H_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} [1 - (H_1 + H_2)\sigma - (H_{11} + H_{22})\sigma^2] \quad (2.27)$$

- 2) 45° oryantasyonlu katmana tek yönlü σ_x çekme gerilmesi uygulansın. Hasar durumundaki σ_x gerilmesi not edilsin. Hasar gerilmesinin $\sigma_x = \sigma$ olduğu durumda lokal gerilmeler:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} \quad \sigma_2 = \frac{\sigma}{2} \quad \tau_{12} = -\frac{\sigma}{2}$$

$$(H_1 + H_2)\frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma^2}{4}(H_{11} + H_{22} + H_{66} + 2H_{12}) = 1 \quad (2.28)$$

$$H_{12} = \frac{2}{\sigma^2} - \frac{(H_1 + H_2)}{\sigma} - \frac{1}{2}(H_{11} + H_{22} + H_{66}) \quad (2.29)$$

H_{12} katsayısının belirlenmesinde deneysel modeller de kullanılabilir ve söz konusu modeller aşağıda verilmiştir,

Tsai-Hill hasar teorisine göre,

$$H_{12} = -\frac{1}{2(\sigma_1^T)_{ult}^2} \quad (2.30)$$

Hoffmann kriterine göre,

$$H_{12} = -\frac{1}{2(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (2.31)$$

Mises-Hencky kriterine göre,

$$H_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}} \quad (2.32)$$

Bu çalışmada H_{12} katsayısının belirlenmesinde Mises-Hencky yöntemi kullanılmıştır.

2.3 Katman Sayısının Belirlenmesi İçin Yazılan Program ve Alınan Sonuçlar

Katman teorisi ve Tsai-Wu hasar teorisi kullanılarak kompozit şaftın katman sayısı ve katmanlarının elyaf oryantasyonlarını belirlemek için bir çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışmada şafttaki burulma momenti nedeniyle meydana gelen düzlem içi kuvvetler hesaplanmış ve söz konusu kuvvetler etkisi altında katmanlı plağın Tsai-Wu hasar kriterine göre dayanım oranı hesaplanmıştır. Daha sonra istenen dayanım oranını elde etmek için uygun katman sayısı ve elyaf oryantasyonları belirlenmiştir. Bu amaçla

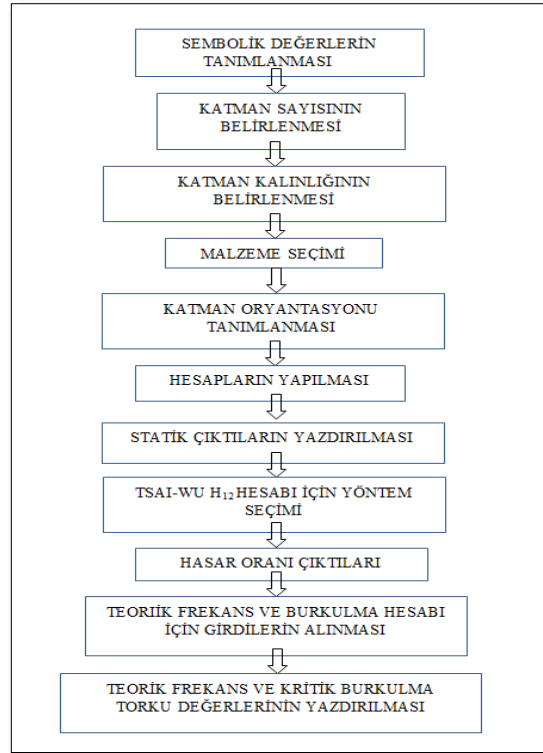
yukarıda anlatılan teorik hesaplamalar Matlab kullanılarak program haline getirilmiştir. Söz konusu program kullanılarak teorik analizler gerçekleştirilmiştir. Buradaki analizlerde literatürde mevcut olan tek yönlü bir Grafit/Epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri kullanılmıştır ve söz konusu özellikler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1: Grafit/Epoksi Mekanik Özellikleri [17]

Malzeme Özelliği	Sembolü	Değeri
Boyuna Elastisite Modülü	$E_1(\text{GPa})$	181
Enine Elastisite Modülü	$E_2(\text{GPa})$	10.3
Poisson Oranı	ν_{12}	0.28
Kayma Modülü	$G_{12}(\text{GPa})$	7.17
Boyuna Çekme Mukavemeti	$(\sigma_1^T)_{ult}(\text{MPa})$	1500
Enine Çekme Mukavemeti	$(\sigma_2^T)_{ult}(\text{MPa})$	40
Boyuna Basma Mukavemeti	$(\sigma_1^C)_{ult}(\text{MPa})$	1500
Enine Basma Mukavemeti	$(\sigma_2^C)_{ult}(\text{MPa})$	246
Düzlem İçi Kayma Mukavemeti	$(\tau_{12})_{ult}(\text{MPa})$	68

Katmanlı yapıların makromekanik analizi ve Tsai-Wu hasar analizinde teorik çözüm algoritmasından yani çözüm prosesinden bahsedilmiştir. Bu teorik çözümler çalışmamız boyunca sürekli tekrarlanacak olup, farklı değişkenler aracılığıyla farklı sonuçlar elde edilecektir. Bu sebepten ötürü, tüm çözüm yolunun bir programlama dili aracılığıyla ifade edilmesi gerekliliği düşünülerek, çözüm yolunun tümü Matlab programlama dili ile ifade edilmiştir.

Programlama dili olarak Matlab tercih edilmesinin nedenlerine değinirsek, öncelikle basit bir dil olması, geniş kütüphane ve grafik çıktısı ortamı sağlaması, sembolik değişken ve fonksiyon tanımlamalarına ve çözümüne imkan sağlaması, diferansiyel denklem tanımlaması ve çözümünde kolaylık sağlaması bu dili kullanmamızın başlıca sebebidir. Tabi bunun yanında diğer programlama dillerine kıyasla ör; Fortran, C++ vs. Zaman açısından verimsiz olması bu dilin dezavantajıdır. Fakat bahsettiğimiz pozitif özellikleri sebebiyle bu dil tercih edilmiştir ve oluşturulan çözüm akışı Şekil 2.1 ‘deki gibidir.



Şekil 2.1: Matlab programında yazılan programın akış şeması

Şekil 2.1 ‘deki akış şemasında yer alan ifadelerin ayrıntıları aşağıda vermiştir,

- 1) Sembolik değerlerin tanımlanması: örneğin ‘S’ değeri. Tsai-Wu ilk katman hasarı için oluşturulan eşitsizlik fonksiyonunun kök değeri olarak tanımlanmıştır.
- 2) Katman sayısının belirlenmesi: kullanıcıya sunulan katman sayısı değeri ‘command window’dan okunarak Excel dokümanında hazır oryantasyonların bulunduğu sayfa da dahil olmak üzere belirlenmektedir. Örneğin 120mm ve 140mm için 11 adet farklı oryantasyon bulunmaktadır. Bunlar çözümün hızlandırılması ve açısal değişimlerin kolay yapılması açısından bir ‘or.xlsx’ dokümanında saklanmaktadır. Bu dokümanın 2. Sayfasında 120mm iç çaplı tasarım için oryantasyon değerleri ve 3. Sayfasında 140mm iç çaplı tasarım için oryantasyon değerleri bulunmaktadır.
- 3) Katman kalınlığı belirlenmesi: Kullanıcıdan [m] boyutunda bir katman kalınlığı girmesi beklenmektedir.
- 4) Malzeme seçimi: Matlab girdi doyası (.m file) içerisinde ilgili bölümde 5 farklı malzeme tanımlanmıştır. Bunlar kullanıcıya seçenek olarak sunulmaktadır. Bu malzemeler;

- Grafit/Epoksi
- Cam/Epoksi
- Al Alaşım
- HSC/Epoksi
- HSC+HMC/Epoksi

şeklindedir.

- 5) Katman oryantasyonu tanımlaması: Bu adımda kullanıcı için 2 seçenek sunulur. Birincisi oryantasyon değerlerinin daha önceki adımda bahsedilen Excel dokümanından okunmasını, ikincisi ise kullanıcının ‘command window’ dan bu değerleri girmesini sağlar.
- 6) Hesapların yapılması ve Statik çıktıların gösterilmesi: Bu aşamada yapılan girdilere karşılık A, B, D matrisleri, gerinim, gerilme değerleri hesaplanır. Ayrıca global ve lokal eksenlerde gerinim ve gerilme değerleri her bir katmanın alt ve üst yüzeyi için hesaplanır.

Bu aşamanın öncesinde kullanıcıdan mukavemet hali ile ilgili Birim kalınlık başına düşen kuvvet ve moment bileşenleri ya da doğrudan boruya uygulanan tork değeri istenmektedir.

Tork değeri girdiğimizde (ayrıca metre cinsinden iç/ ya da dış yarıçap değeri) bu değer, düzlemsel levha formunda uygulanacak olan N_{xy} (birim kalınlık başına düşen kuvvet) olarak dönüştürülecektir. Burada program şu basit hesabı yapmaktadır.

$$T = (\text{kayma gerilmesi}) \times (\text{kesit alanı}) \times (\text{moment kolu})$$

$$T = \tau_{xy(ort)} \pi (r_o^2 - r_i^2) r_m \quad (2.33)$$

Burada, $N_{xy} = \tau_{xy(ort)} t$, $t = r_o - r_i$, $r_m = \frac{r_o + r_i}{2}$ alınarak,

$$N_{xy} = \frac{T}{2\pi r_m^2} \quad (2.34)$$

şeklinde elde edilir.

- 7) Gerilme değerlerinin gösterilmesi: Çıktı birimi [Pa] dır. ABD matrisi, gerinim ve eğrilik değerleri, her bir katmanın alt ve üst yüzeyinde oluşan gerilmelerin lokal ve global eksenlerdeki bileşenleri gösterilir ve gerilme bileşenlerinin değerleri katman kalınlıkları boyunca çizdirilir.
- 8) Tsai-Wu ilk katman hasar teorisi için H_{12} hesaplama yöntemi seçimi: Tsai-Wu ilk katman hasarında H_{12} üç farklı şekilde bulunabilir. Bunlar kullanıcıya

seçenek olarak sunulur. Bu yöntemlerin detayları hasar analizi başlığı altında verilmiştir.

9) Dayanım oranı çıktıları: Bu adımda Tsai-Wu İlk katman hasarı için dayanım oranları değerleri her bir katmanın alt ve üst yüzeyi için verilmektedir.

10) Teorik frekans ve burkulma için girdilerin alınması ve sonuçların yazdırılması:

Bu adımda kullanıcıdan kompozit tüp boyu girdisi istenmektedir. Bununla birlikte, Aşağıda verilen formüller aracılığıyla frekans değeri ve kritik burkulma tork değeri hesaplanarak gösterilmektedir.

$$T_c = (2\pi r_m^2 t)(0.272)(E_x E_y^3)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{r_m}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.35)$$

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_x I}{m L^4}} \quad (2.36)$$

Yazılan Matlab programı ile yapılacak analizlerde öncelikle iki farklı shaft çapı için burulma momenti nedeniyle meydana gelen düzlem içi kuvvetler hesaplanmıştır. Burada 120 mm iç çaplı olan shafta “A” modeli, 140 mm iç çaplı olana ise “B” modeli denilmiştir. Modeller ve elyaf oryantasyon ve katman sıralamaları Çizelge 2.2 ‘de verilmiştir.

Çizelge 2. 2: Shaft Modelleri ve Elyaf oryantasyonları

Model Numarası	Katman sayısı	Katman kalınlığı (mm)	Oryantasyon
A1	10	0.3	[(45/-45) ₂ /45] _s
A2	32	0.3	[(45/-45) ₈] _s
A3	32	0.3	[30/-30/30/(45/-45) ₆ /45] _s
A4	32	0.3	[0 ₃ /(45/-45) ₆ /45] _s
A5	32	0.3	[(30/-30) ₃ /(45/-45) ₅] _s
A6	32	0.3	[(0) ₆ /(45/-45) ₅] _s
B1	10	0.3	[(45/-45) ₂ /45] _s
B2	24	0.3	[(45/-45) ₈] _s
B3	24	0.3	[30/-30/30/(45/-45) ₆ /45] _s
B4	24	0.3	[0 ₃ /(45/-45) ₆ /45] _s
B5	24	0.3	[(30/-30) ₃ /(45/-45) ₅] _s
B6	24	0.3	[(0) ₆ /(45/-45) ₅] _s

A3 modeli için Matlab çözüm aşamaları Şekil 2.2’de verilmiştir (Çizelge 2.2 – Çizelge 2.10).

```

Command Window

katman sayısını girin :32

Her bir katmanın kalınlığı aynı mı? [e/h] e

katman kalınlık değeri girin : 0.3e-3

1. Grafit/Epoksi
2. Cam/Epoksi
3. Al Alaşım
4. HSC/Epoksi
5. HSC+HMC/Epoksi

Malzeme seçin 1/5 : 1

1. Katman Oryantasyonunu Excel Dökümanından Oku
2. Katman Oryantasyonunu el ile gir

fx Katman oryantasyonu hangi yöntemle tanımlansın ? [1/2]

```

Şekil 2.2: A3 Modeli için ilk girdiler

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, aynı kalınlıkta 32 katman tanımlanmıştır ve malzeme olarak Grafit/Epoksi kullanılmıştır. Oryantasyon değerleri Şekil 2.3 ‘te görülmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	45	45	30	0	30	0			
2	-45	-45	-30	0	-30	0			
3	45	45	30	0	30	0			
4	-45	-45	45	45	-30	0			
5	45	45	-45	-45	30	0			
6	45	-45	45	45	-30	0			
7	-45	45	-45	-45	45	45			
8	45	-45	45	45	-45	-45			
9	-45	45	-45	-45	45	45			
10	45	-45	45	45	-45	-45			
11		45	-45	-45	45	45			
12		-45	45	45	-45	-45			
13		-45	45	45	-45	-45			
14		45	-45	-45	45	45			
15		-45	45	45	-45	-45			
16		45	-45	-45	45	45			
17		-45	45	45	-45	-45			
18		45	-45	-45	45	45			
19		-45	45	45	-30	0			
20		45	-45	-45	30	0			
21		-45	45	45	-30	0			
22		45	30	0	30	0			
23		-45	-30	0	-30	0			
24		45	30	0	30	0			
25									

Şekil 2.3: A3 modeli için okunan excel sütunu

Bir önceki adımda tanımlama şeklini [1] olarak belirlediğimizde verilen çıktılar Şekil 2.4’te olduğu gibi görünmektedir. Gerilme değerleri, gerinim değerleri ve akabinde dayanım oranı değerleriyle eğilme doğal frekans değerleri Şekil 2.4 ‘ten Şekil 2.10 ‘a kadar olan dağılımlar ile görülmektedir.

-----Genişlemesine Rijitlik Matrisi -A- -----			
1.0e+08 *			
6.3881	3.9514	0.5824	
3.9514	4.8449	0.3775	
0.5824	0.3775	4.2953	
-----Eşleştirme Rijitlik Matrisi -B- -----			
1.0e-09 *			
-0.0873	-0.2910	0.0728	
-0.2910	-0.4220	0.0655	
0.0728	0.0655	-0.2765	
-----Eğilme Rijitlik Matrisi -D- -----			
1.0e+03 *			
5.9794	2.8303	0.8166	
2.8303	3.0489	0.4251	
0.8166	0.4251	3.0982	

Şekil 2.4: A3 Modeline ait A, B, D matrisi değerleri

----- GERİNİM DAĞILIMI (XYZ Eksenlerinde)-----			
eps_x		eps_y	gama_xy
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1			
-0.0003	-0.0000	0.0031	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1			
-0.0003	-0.0000	0.0031	
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2			
-0.0003	-0.0000	0.0031	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2			
-0.0003	-0.0000	0.0031	
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3			
-0.0003	-0.0000	0.0031	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3			
-0.0003	-0.0000	0.0031	

Şekil 2.5: A3 Modeline ait gerinim değerleri (ilk 3 katman & global eksen)

-----GERİLME DAĞILIMI (XYZ Eksenlerinde)-----		
sigma_x	sigma_y	tao_xy
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1		
139.0712	53.2292	99.7338
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1		
139.0712	53.2292	99.7338
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2		
-199.8734	-72.1935	130.0256
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2		
-199.8734	-72.1935	130.0256
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3		
139.0712	53.2292	99.7338
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3		
139.0712	53.2292	99.7338

Şekil 2.6: A3 Modeline ait gerilme değerleri (ilk 3 katman & global eksen)

----- GERİNİM DAĞILIMI (Lokal eksenler-12)-----		
eps_1	eps_2	gama_12
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1		
0.0011	-0.0014	0.0018
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1		
0.0011	-0.0014	0.0018
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2		
-0.0016	0.0013	0.0013
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2		
-0.0016	0.0013	0.0013
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3		
0.0011	-0.0014	0.0018
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3		
0.0011	-0.0014	0.0018

Şekil 2.7: A3 Modeline ait gerinim değerleri (ilk 3 katman & lokal eksen)

-----GERİLME DAĞILIMI (Lokal eksenler-12)-----				
sigma_1		sigma_2		tao_12

Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1				
203.9827	-11.6823	12.6962		
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1				
203.9827	-11.6823	12.6962		
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2				
-280.5590	8.4920	9.7258		
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2				
-280.5590	8.4920	9.7258		
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3				
203.9827	-11.6823	12.6962		
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3				
203.9827	-11.6823	12.6962		

Şekil 2.8: A3 Modeline ait gerilme değerleri (ilk 3 katman & lokal eksen)

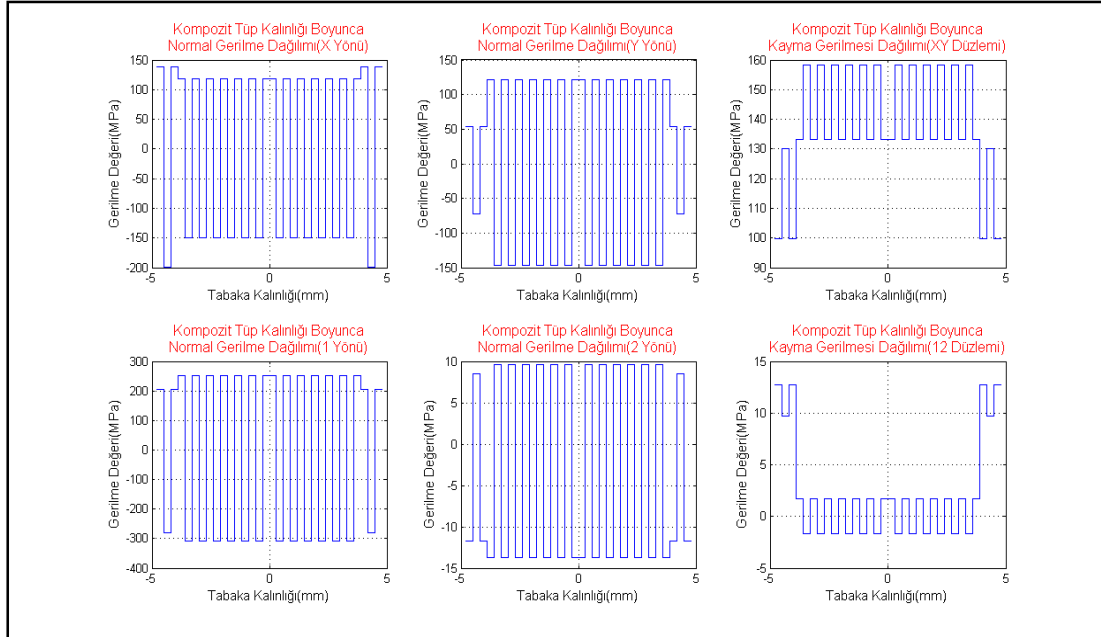
***** TSAI-WU İLK TABAKA HASARI HESAPLAMALARI *****	
1. Tsai-Hill Kriteri	
2. Hoffman Kriteri	
3. Mises-Hencky Kriteri	
Tsai-Wu H12 hesabı için bir kriter seçin [1-3] 3	
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 1	
5.2337	
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 1	
5.2337	
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 2	
2.6089	
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 2	
2.6089	
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 3	
5.2337	
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 3	
5.2337	

Şekil 2.9: A3 Modeline ait Tsai-Wu dayanım oranı değerleri (ilk 3 katman)

EĞİLME FREKANS	
HESAPLAMALARI	
Şaft Uzunluğu girin (m): 1.91	
Eğilme doğal frekans değeri :89.1982 Hz	
BURULMA BÜKÜLMESİ	
HESAPLAMALARI	
Kritik burulma bükülme yük değeri :105125.3241 Nm	

Şekil 2.10: A3 Modeline ait teorik frekans ve kritik burkulma tork değeri

Katmanlı kompozitin kalınlığı boyunca gerilme bileşenlerinin değişimleri hem katman koordinat sisteminde hem de global kartezyen koordinat sisteminde elde edilmiştir. A3 modeline ait kalınlık boyunca gerilme değişimleri Şekil 2.11’de verilmiştir. Burada beklenildiği gibi elyaf açısı farklı olan katmanlarda gerilme değerleri farklı çıkmış, elyaf açısının aynı olması durumunda gerilme değerleri de aynı olmuştur. Bu analitik hesap yönteminde sadece iç çap dikkate alınarak elde edilen düzlem içi kuvvetler uygulandığından kalınlık boyunca çapın artması sonucu etkilememiştir. İç çaptan dış çapa doğru gidildiğinde burulma rijitliğinin artması sonucu gerilme değerlerinde bir miktar düşme olacaktır, ancak söz konusu düşme katman sayısının belirlenmesinde etkili olmayacaktır. Böylece katman sayısı ve elyaf oryantasyonları analitik bir yöntemle belirlenebilmiştir.



Şekil 2.11: A3 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği

Boyu 1910 mm ve iç çapı 120 mm olan kompozit şaft için elde edilen düzlem içi kuvvetlerin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 2.3’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere on katmanlı model (A1) için elde edilen minimum dayanım oranı, kritik burkulma moment değeri ve serbest titreşim frekansı istenilen değerlerin altında kalmıştır. Minimum dayanım oranını 2.5 yapabilmek için katman sayısı 32 olarak belirlenmiştir ve A2 – A6 modellerinde istenilen değerlerin elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 2. 3: Boyu 1910 mm İç Çapı 120 mm Olan Şaft Modelleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

Model Numarası	Katman sayısı	Katman kalınlığı (mm)	Oryantasyon	Minimum SR (Tsai-Wu)	Doğal frekans (Hz)	Kritik burkulma torku (Nm)
A1	10	0.3	$[(45/-45)_2/45]_s$	0.79	72.05	4986
A2	32	0.3	$[(45/-45)_8]_s$	2.55	76.25	94122
A3	32	0.3	$[30/-30/30/(45/-45)_6/45]_s$	2.59	89.20	105125
A4	32	0.3	$[0_3/(45/-45)_6/45]_s$	2.23	114.28	143746
A5	32	0.3	$[(30/-30)_3/(45/-45)_5]_s$	2.34	100.45	108483
A6	32	0.3	$[(0)_6/(45/-45)_5]_s$	1.74	142.47	158830

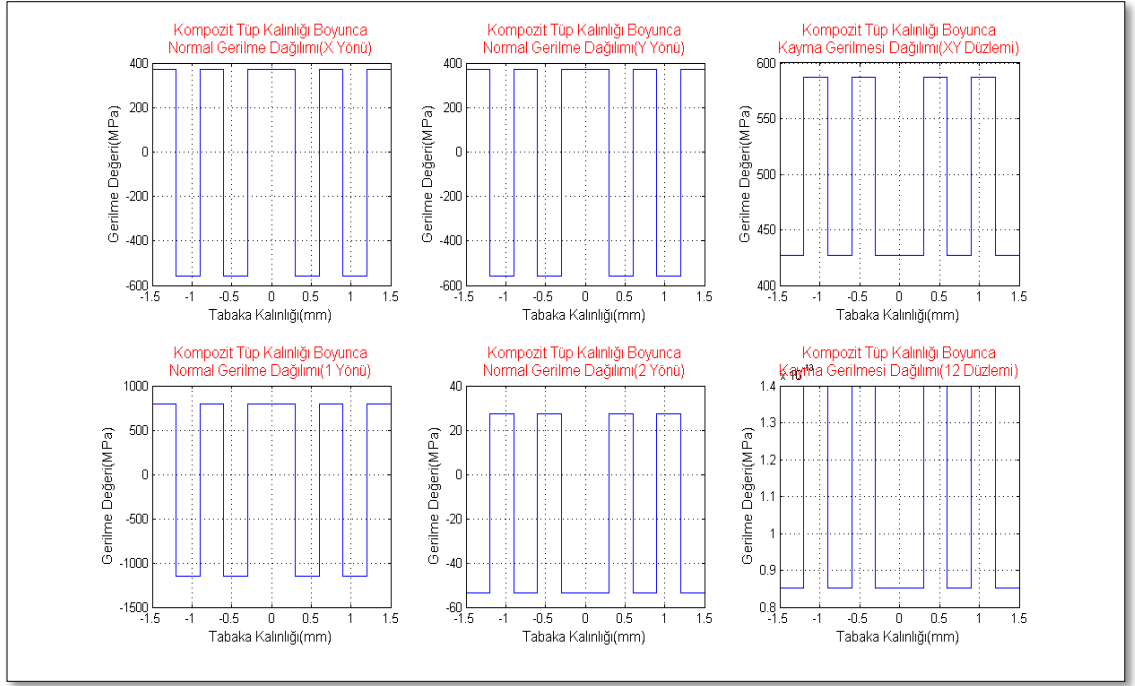
Boyu 1910 mm ve iç çapı 140 mm olan kompozit şaft için elde edilen düzlem içi kuvvetlerin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 2.4’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere on katmanlı model (B1) için elde edilen minimum dayanım oranı, kritik burkulma moment değeri ve serbest titreşim frekansı istenilen değerlerin altında kalmıştır. Minimum dayanım oranını 2.5 yapabilmek için katman sayısı 32 olarak belirlenmiştir ve B2 – B6 modellerinde istenilen değerlerin elde edildiği görülmektedir. Ayrıca A2 – A6 modelleri ile karşılaştırıldığında B2 – B6 modellerinde daha az sayıda katman kullanılması yeterli olmuştur.

Bununla birlikte B2 – B6 modellerinin kritik burkulma moment değerleri daha düşük olarak elde edilmiştir.

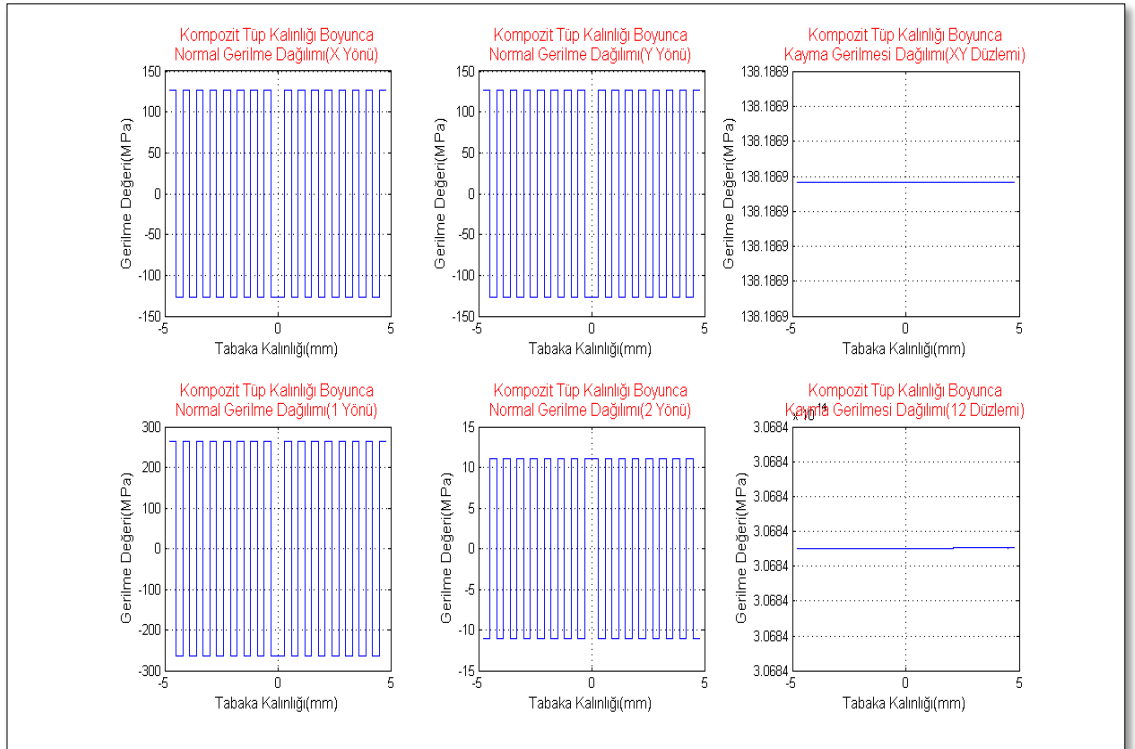
Çizelge 2. 4: Boyu 1910 mm İç Çapı 140 mm Olan Şaft Modelleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

Model Numarası	Katman sayısı	Katman kalınlığı (mm)	Oryantasyon	Minimum SR (Tsai-Wu)	Doğal frekans (Hz)	Kritik burkulma torku (Nm)
B1	10	0.3	$[(45/-45)_2/45]_s$	1.07	83.75	5376
B2	24	0.3	$[(45/-45)_6]_s$	2.46	86.47	48865
B3	24	0.3	$[30/-30/30/(45/-45)_4/45]_s$	2.50	105.38	55479
B4	24	0.3	$[0_3/(45/-45)_4/45]_s$	2.05	141.05	78547
B5	24	0.3	$[(30/-30)_3/(45/-45)_3]_s$	2.20	121.12	55605
B6	24	0.3	$[(0)_6/(45/-45)_3]_s$	1.42	179.70	81452

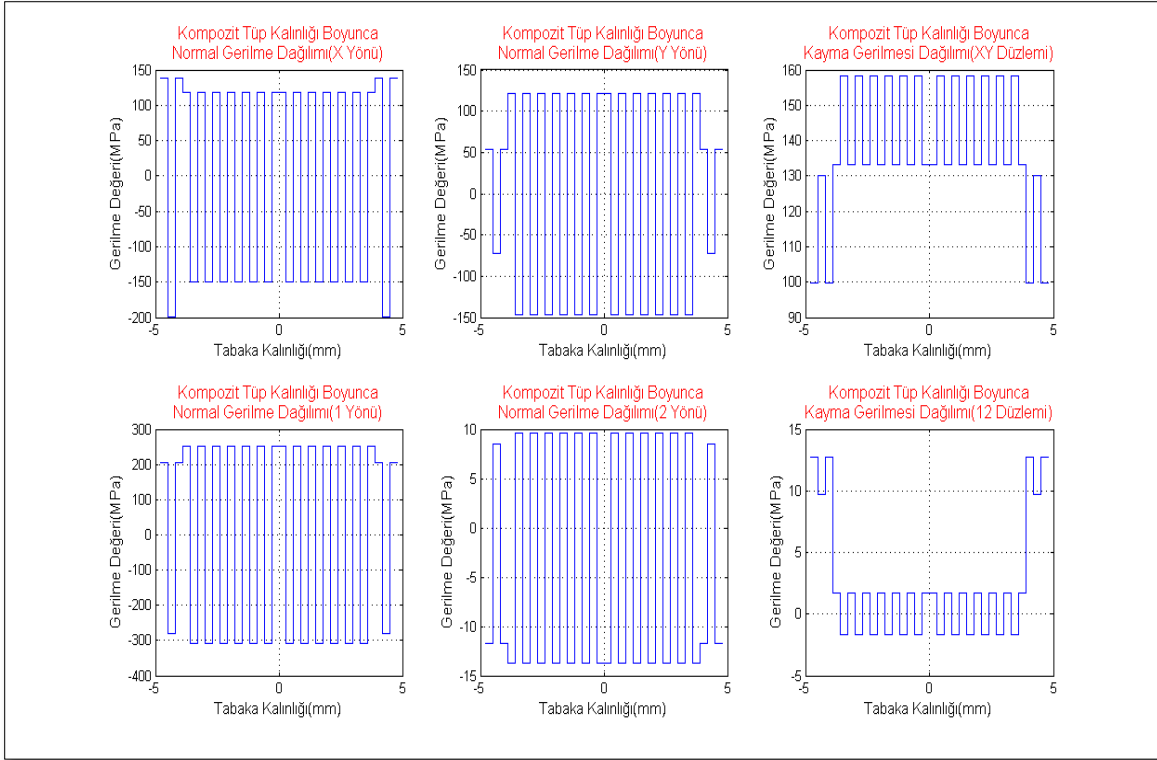
Tüm modeller için gerilme bileşenlerinin katman kalınlığı boyunca elde edilen dağılımları Şekil 2.12 – Şekil 2.22’de verilmiştir. Bu gerilme değeri grafit epoksi malzemenin mekanik değerleri baz alınarak her bir modelin cidar kalınlığının ortalama yarıçap değerinin yapının ortalama yarıçap değerine eşit olacak şekilde kabul edilerek hesaplanmıştır.



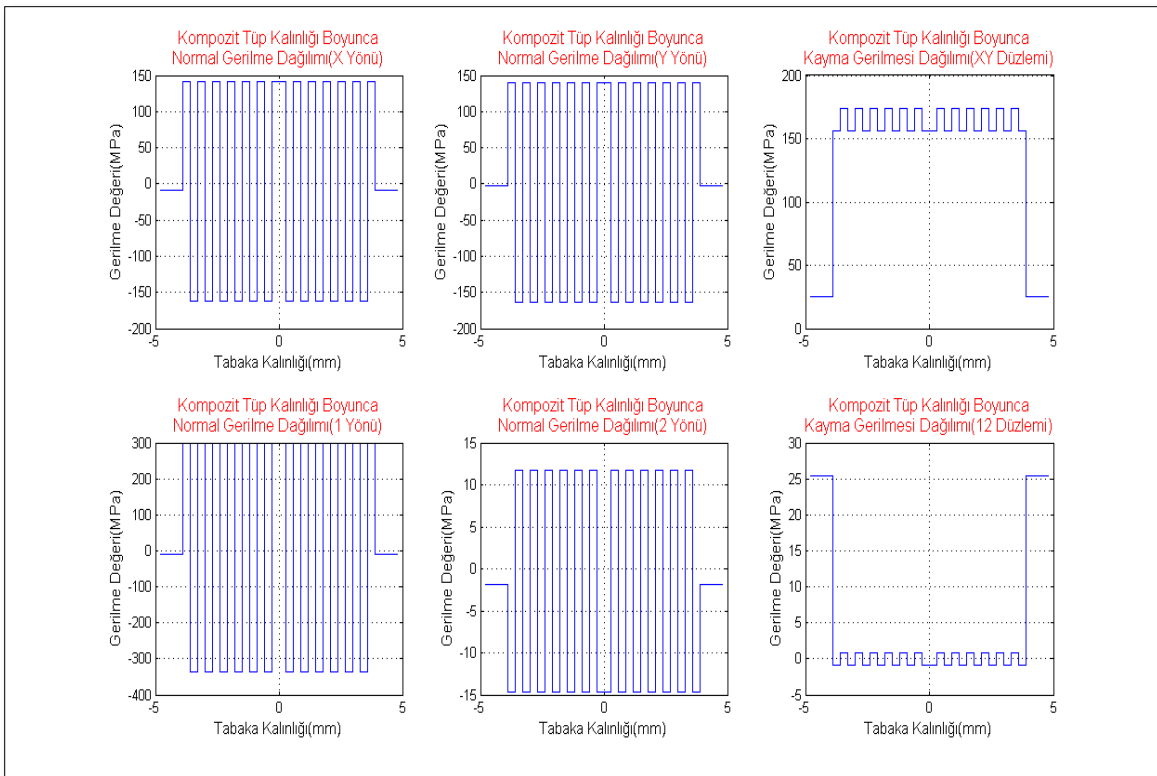
Şekil 2. 12: A1 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



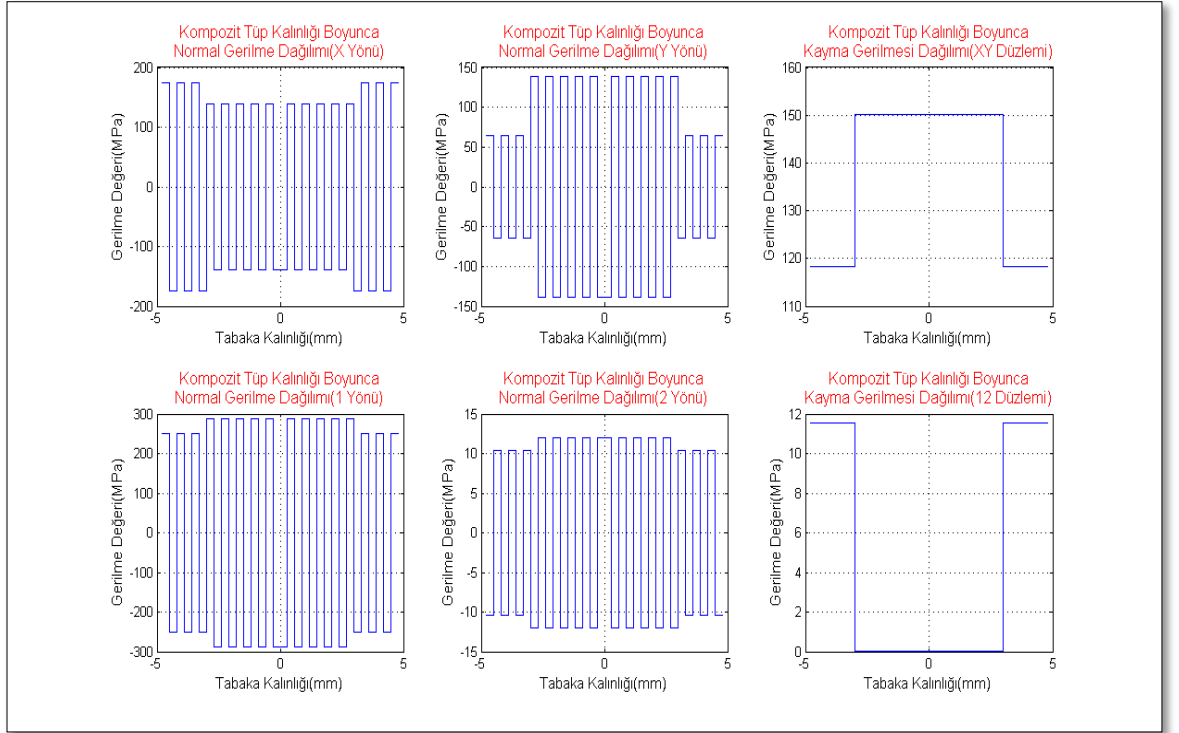
Şekil 2.13: A2 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



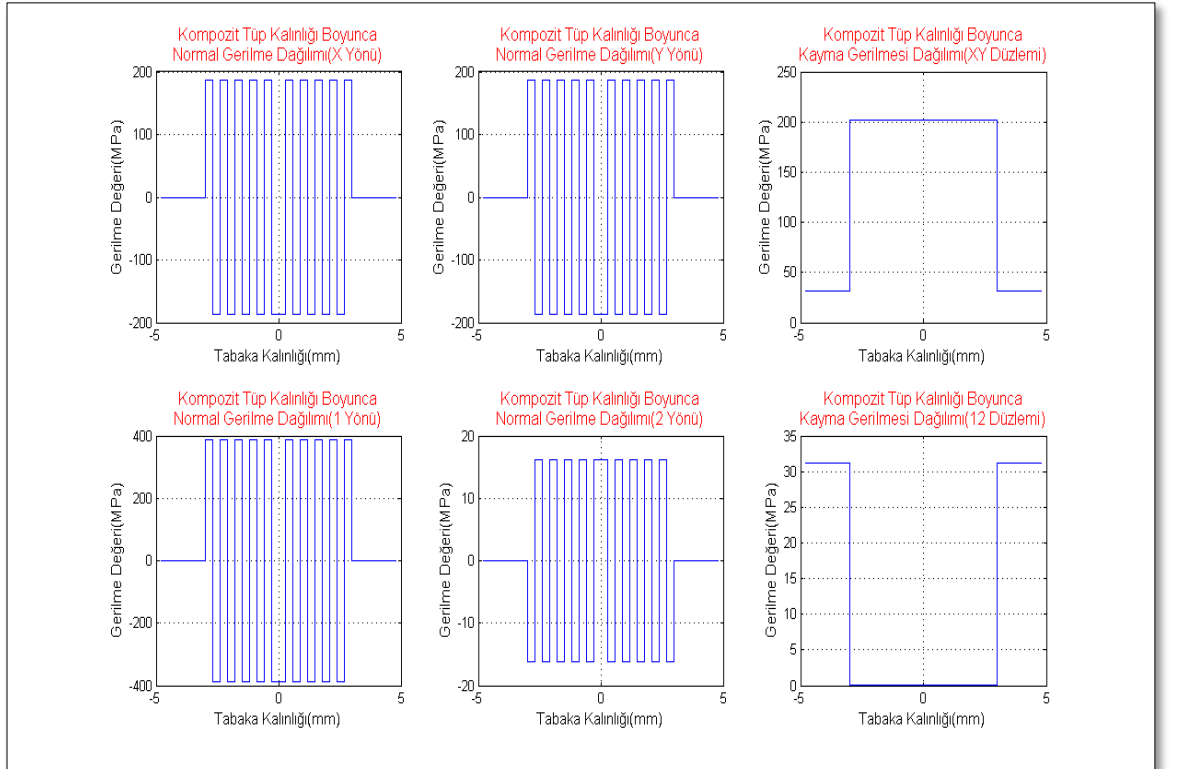
Şekil 2.14: A3 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



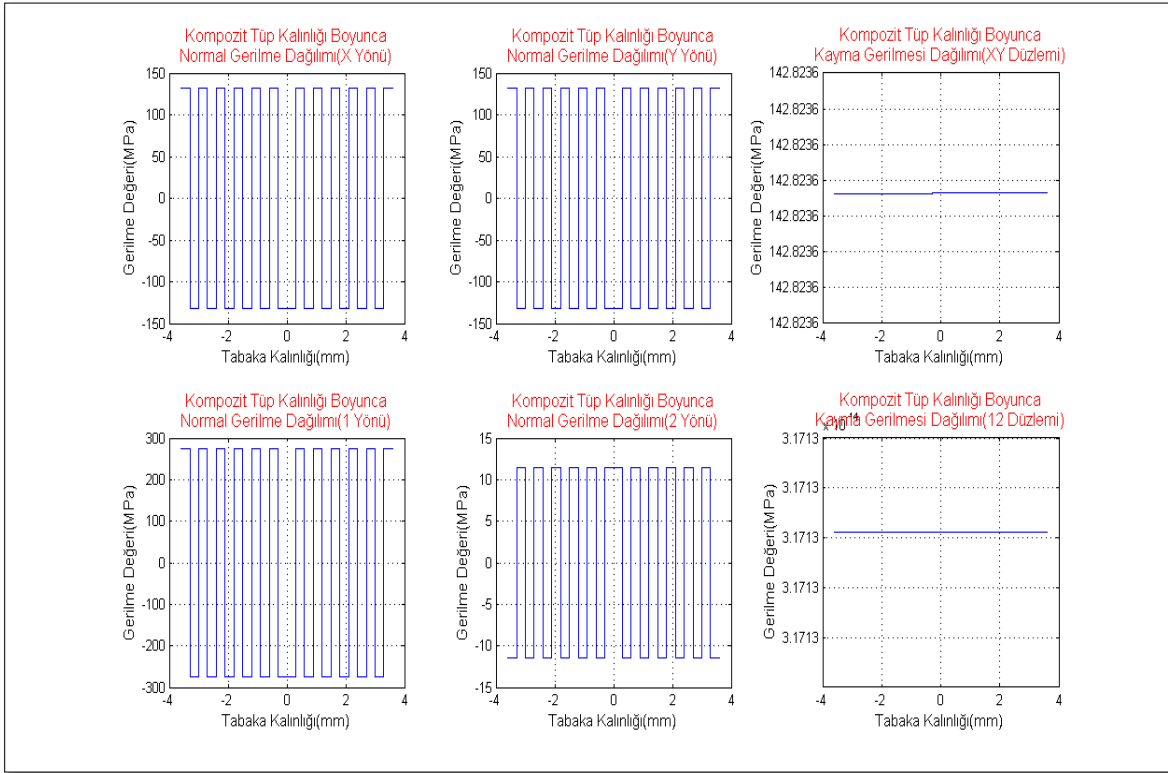
Şekil 2.15: A4 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



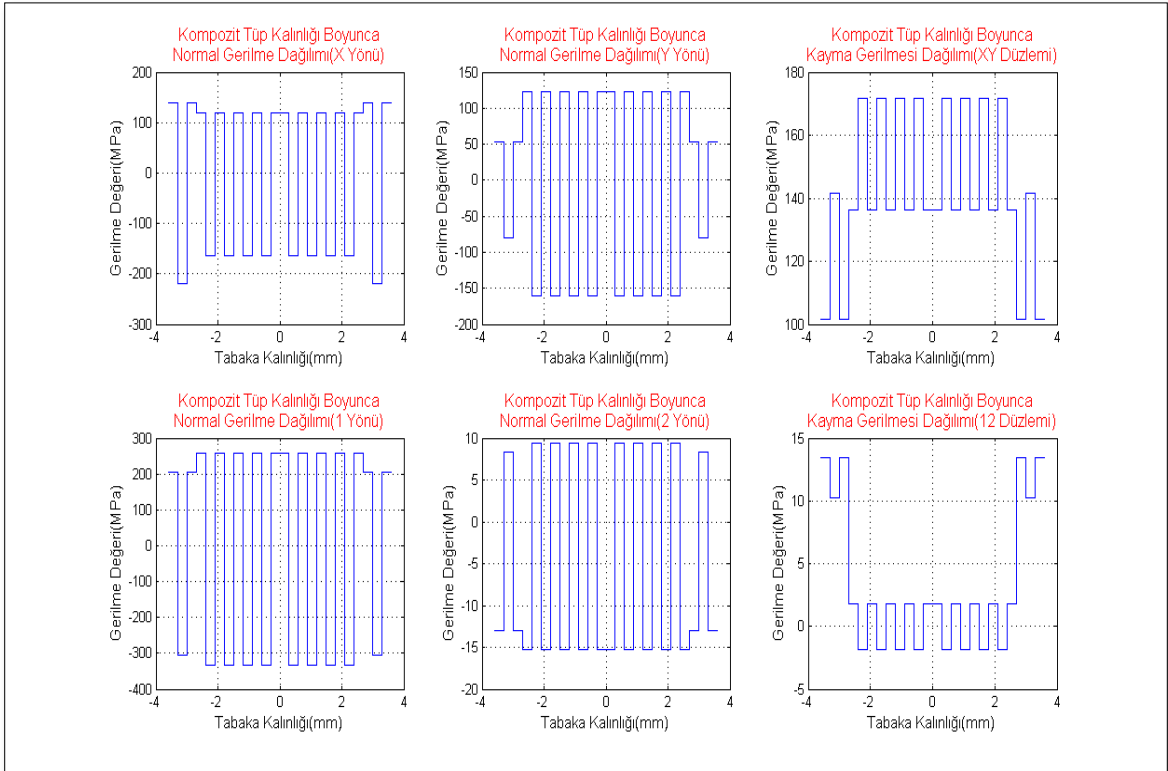
Şekil 2.16: A5 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



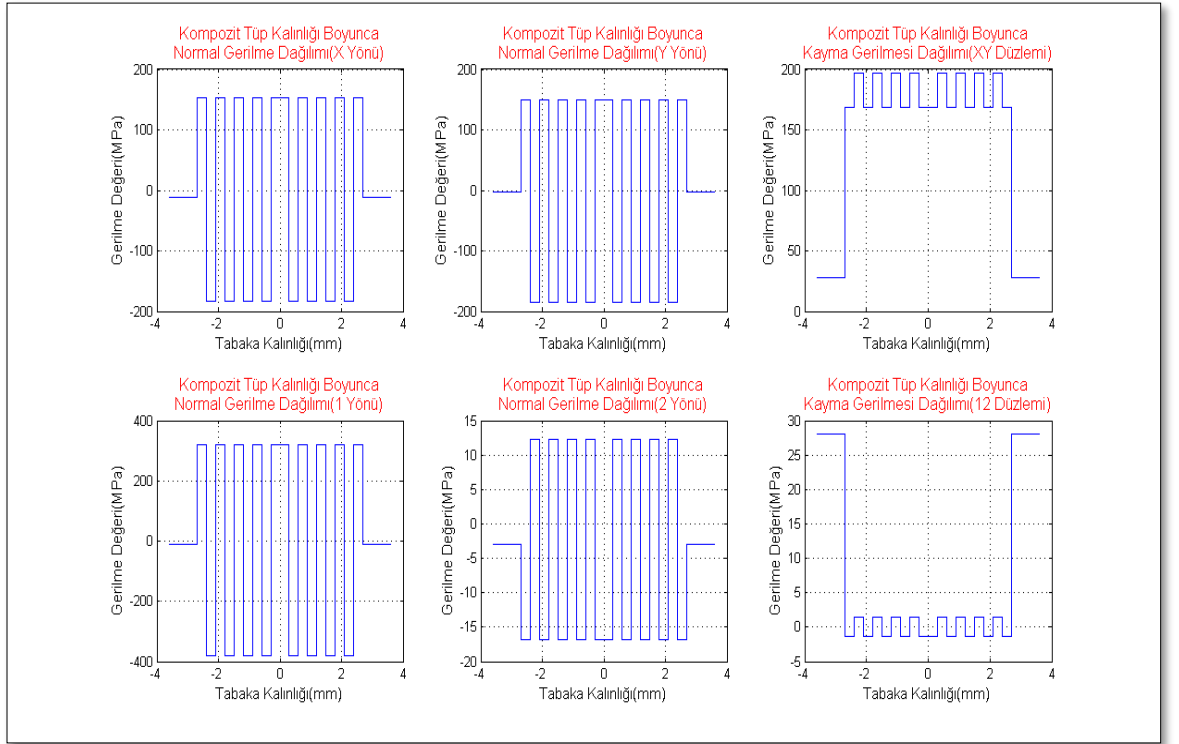
Şekil 2.17: A6 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



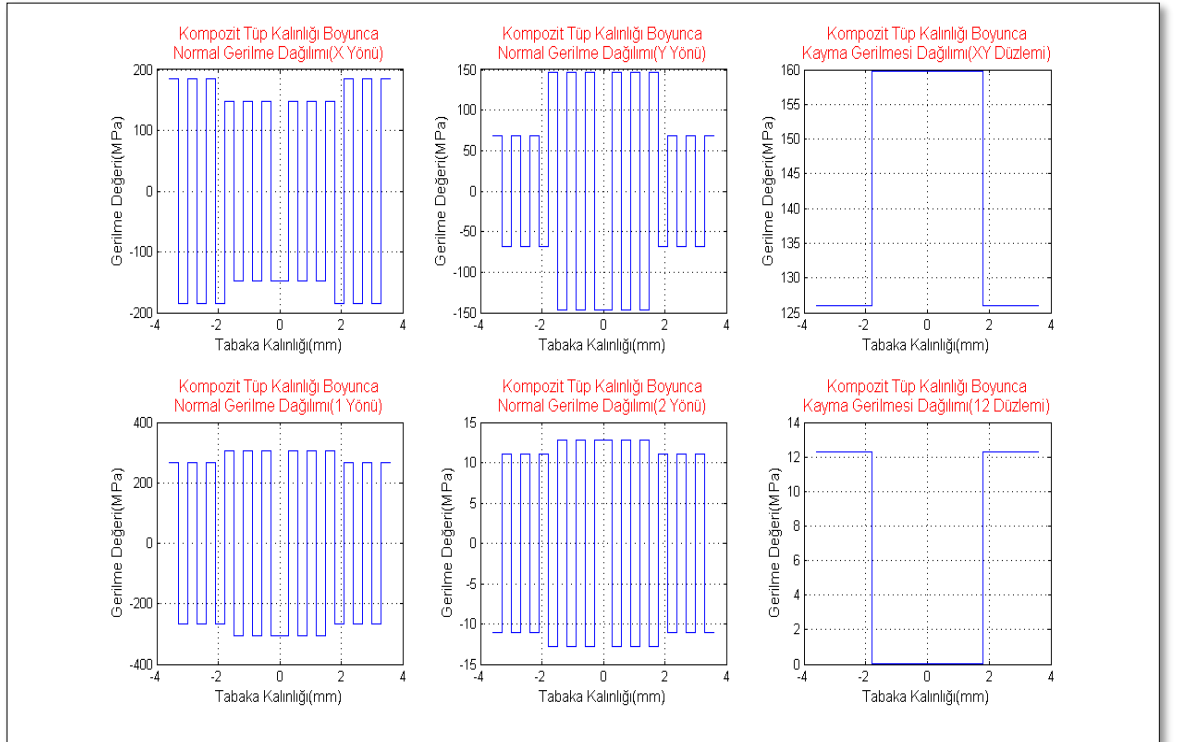
Şekil 2.18: B2 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



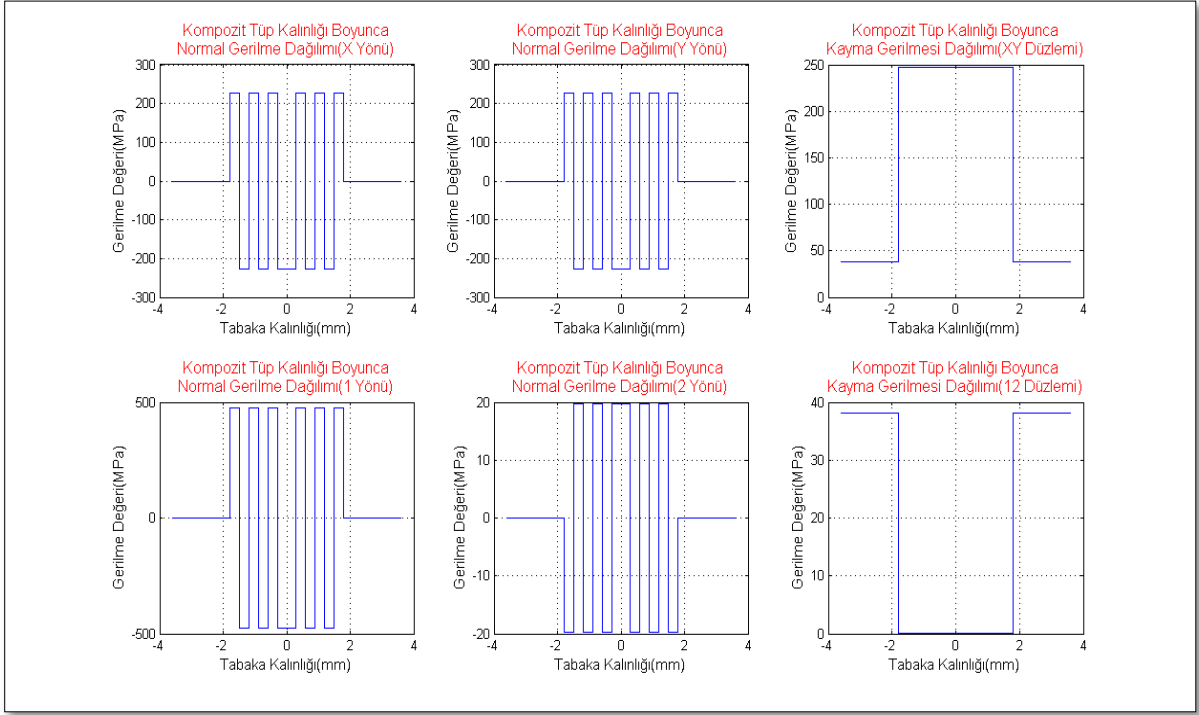
Şekil 2.19: B3 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



Şekil 2.20: B4 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



Şekil 2. 21: B5 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi grafiği



Şekil 2.22: B6 Modeline ait kalınlık boyunca gerilme bileşenleri değişimi

2.4 Analiz Sonuçlarının Güncellenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, bir önceki altı aylık dönemde kullanılan Grafit/Epoksi malzemesinin mekanik özellikleri yerine, şaft tüpünün üretileceği karbon/epoksi malzemesinin mekanik özellikleri kullanılarak malzeme güncellemesi yapılmıştır.

Kullanılacak olan karbon/epoksi malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde bir önceki bölümde yer alan test standartlarına da sadık kalınarak bir mandrel geometrisi belirlenmiş ve kupon testleri güncellenmiştir. Üretilecek olan şaft tüpünün analizi hatırlanacağı gibi iki bölümde toplanmıştır. Bunlardan birisi statik analiz ve bir diğeri şaft tüpünün modal testleri şeklindedir.

2.4.1 Mekanik analizlerin güncellenmesi ve sonuçlar

Mekanik analizlerin güncellenmesinde kullanılan malzeme değerleri 2. Bölümün sonunda yer alan çizelgelarda verildiği gibidir.

Bir önceki altı aylık çalışma döneminde, iki farklı tüp modeli ve bunlara bağlı teorik ve sonlu eleman tabanlı analiz sonuçları verilmişti. Bu modellerden, 120 mm iç çaplı

A modeli yerine mevcut malzeme sonuçları ve şaftın kullanılacağı araçta şaftın yerleştirileceği bölge ile ilgili geometrik kısıtları baz alınarak A modelinden daha büyük iç çapa sahip bir C modeli ortaya konulmuştur. C modelinin iç çapı 130 mm olarak belirlenmiştir. Böylelikle malzeme sonuçlarına göre güncellenen şaft modelleri ve elyaf oryantasyonları Çizelge 2.5'te görüldüğü şekilde oluşmuştur. Çalışmamızda şafta statik durumda uyguladığımız 35000 Nm'lik tork ve güvenlik katsayısı $n=2.5$ değerleri, CARGO ağır ticari araçla ilgili güncel bilgiler ışığında, yeni modeller ile birlikte, 25000 Nm'lik tork ve güvenlik katsayısı $n=2$ olarak güncellenmiştir.

Çizelge 2.5 : Güncel şaft modelleri ve elyaf oryantasyonları

Model Numarası	Katman Sayısı	Katman Kalınlığı (mm)	Oryantasyon
B1 (İlkel model)	10	0.3	$[(45/-45)_2/45]_s$
B2	58	0.3	$[(45/-45)_{14}/45]_s$
B3	58	0.3	$[30/-30/30/(45/-45)_{13}]_s$
B4	58	0.3	$[0_3/(45/-45)_{13}]_s$
B5	58	0.3	$[(30/-30)_3/(45/-45)_{11}/45]_s$
B6	58	0.3	$[0_6/(45/-45)_{11}/45]_s$
C1 (İlkel Model)	10	0.3	$[(45/-45)_2/45]_s$
C2	68	0.3	$[(45/-45)_{17}]_s$
C3	68	0.3	$[30/-30/30/(45/-45)_{15}/45]_s$
C4	68	0.3	$[0_3/(45/-45)_{15}/45]_s$
C5	68	0.3	$[(30/-30)_3/(45/-45)_{14}]_s$
C6	68	0.3	$[0_6/(45/-45)_{14}]_s$

Çizelge 2.5'te verilen sonuçlara göre bir C modeli ile ilgili Matlab sonuçları Şekil 2.23' ten Şekil 2.26 'ya kadar olan grafiklerde olduğu gibi oluşmuştur.

-----Genişlemesine Rijitlik Matrisi -A- -----			
1.0e+08 *			
4.0827	3.1465	0.1982	
3.1465	3.5645	0.1241	
0.1982	0.1241	3.1507	
-----Eğleştirme Rijitlik Matrisi -B- -----			
1.0e-09 *			
-0.2765	0.0655	-0.2183	
0.0655	-0.3747	-0.0327	
-0.2183	-0.0327	-0.0728	
-----Eğilme Rijitlik Matrisi -D- -----			
1.0e+04 *			
1.6113	1.0516	0.1439	
1.0516	1.1184	0.0733	
0.1439	0.0733	1.0538	

Şekil 2.23 : C3 Model ABD Matris Değerleri

----- GERİNİM DAĞILIMI (XYZ Eksenlerinde)-----			
eps_x	eps_y	gama_xy	
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 4			
-0.0002	0.0001	0.0022	
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 4			
-0.0002	0.0001	0.0022	

-----GERİLME DAĞILIMI (XYZ Eksenlerinde)-----			
sigma_x	sigma_y	tao_xy	
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1			
36.9166	12.6713	24.8314	
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1			
36.9166	12.6713	24.8314	
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2			
-46.6332	-15.4998	29.8002	
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2			
-46.6332	-15.4998	29.8002	
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3			
36.9166	12.6713	24.8314	
Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3			
36.9166	12.6713	24.8314	
Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 4			
30.3333	30.8932	33.9293	

Şekil 2.24 : C3 Model İlk Dört Tabaka Gerilme ve Gerinim Dağılımı (Global Eksen)

----- GERİNİM DAĞILIMI (Lokal eksenler-12)-----				-----GERİLME DAĞILIMI (Lokal eksenler-12)-----			
eps_1		eps_2		gama_12	sigma_1		sigma_2 tao_12
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1					Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 1		
0.0009	-0.0010	0.0013			52.3599	-2.7719	1.9172
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1					Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 1		
0.0009	-0.0010	0.0013			52.3599	-2.7719	1.9172
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2					Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 2		
-0.0011	0.0010	0.0009			-64.6576	2.5246	1.4190
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2					Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 2		
-0.0011	0.0010	0.0009			-64.6576	2.5246	1.4190
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3					Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 3		
0.0009	-0.0010	0.0013			52.3599	-2.7719	1.9172
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3					Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 3		
0.0009	-0.0010	0.0013			52.3599	-2.7719	1.9172
Gerinim Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 4					Gerilme Bileşenleri @ ÜST yüzey, katman 4		
0.0011	-0.0012	0.0002			64.5425	-3.3160	0.2800
Gerinim Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 4					Gerilme Bileşenleri @ ALT yüzey, katman 4		
0.0011	-0.0012	0.0002			64.5425	-3.3160	0.2800

Şekil 2.25 : C3 Model İlk Dört Tabaka Gerilme ve Gerinim Dağılımı (Lokal Eksen)

1. Tsai-Hill Kriteri
2. Hoffman Kriteri
3. Mises-Hencky Kriteri
Tsai-Wu H12 hesabı için bir kriter seçin [1-3] 3
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 1 4.7997
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 1 4.7997
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 2 2.2980
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 2 2.2980
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 3 4.7997
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 3 4.7997
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ALT Yüzey, katman 4 7.0109
Tsai-Wu Dayanım Oranı (SR) @ ÜST Yüzey, katman 4 7.0109

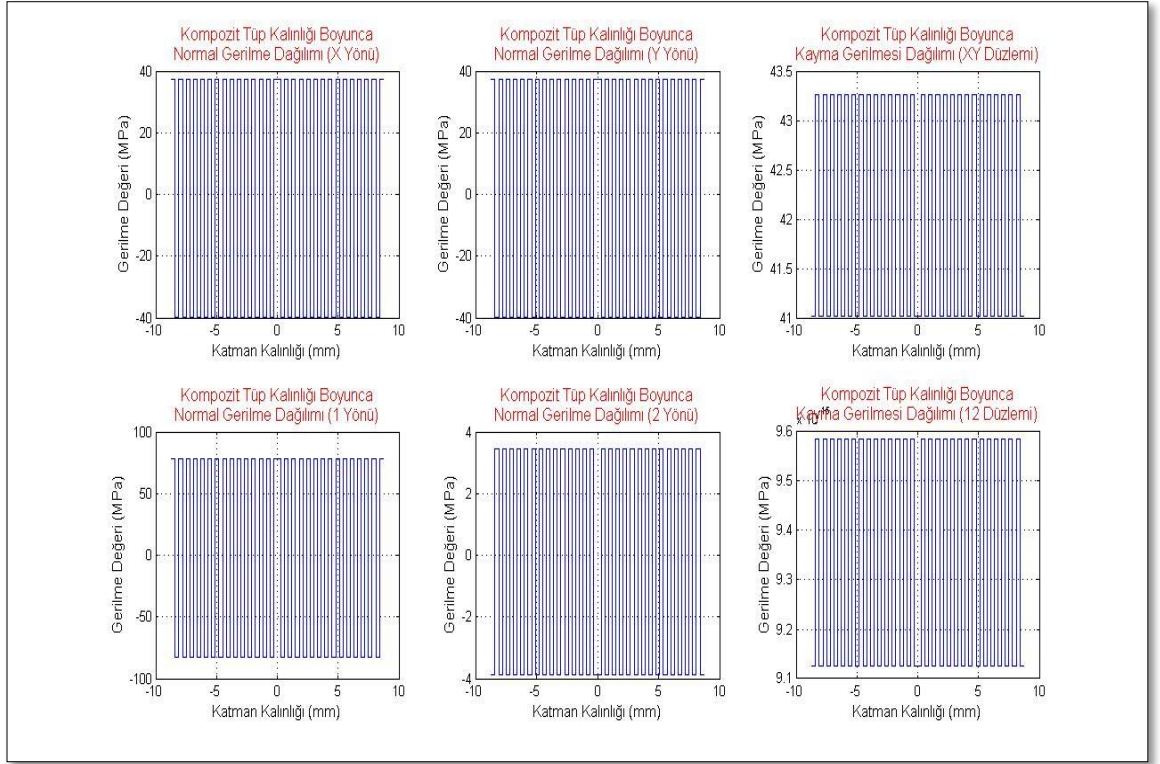
Şekil 2.26 : C3 Model İlk Dört Tabaka Tsai-Wu Hasar Oranı Dağılımı

Teorik sonuçlar, B ve C modelleri ve bir önceki bölümde, sonuçları verilen malzeme değerleri kullanılarak Matlab ortamında güncellenmiş ve Çizelge 2.6'daki Minimum SR, Eğilme doğal frekansı ve Kritik burkulma torku değerleri bulunmuştur.

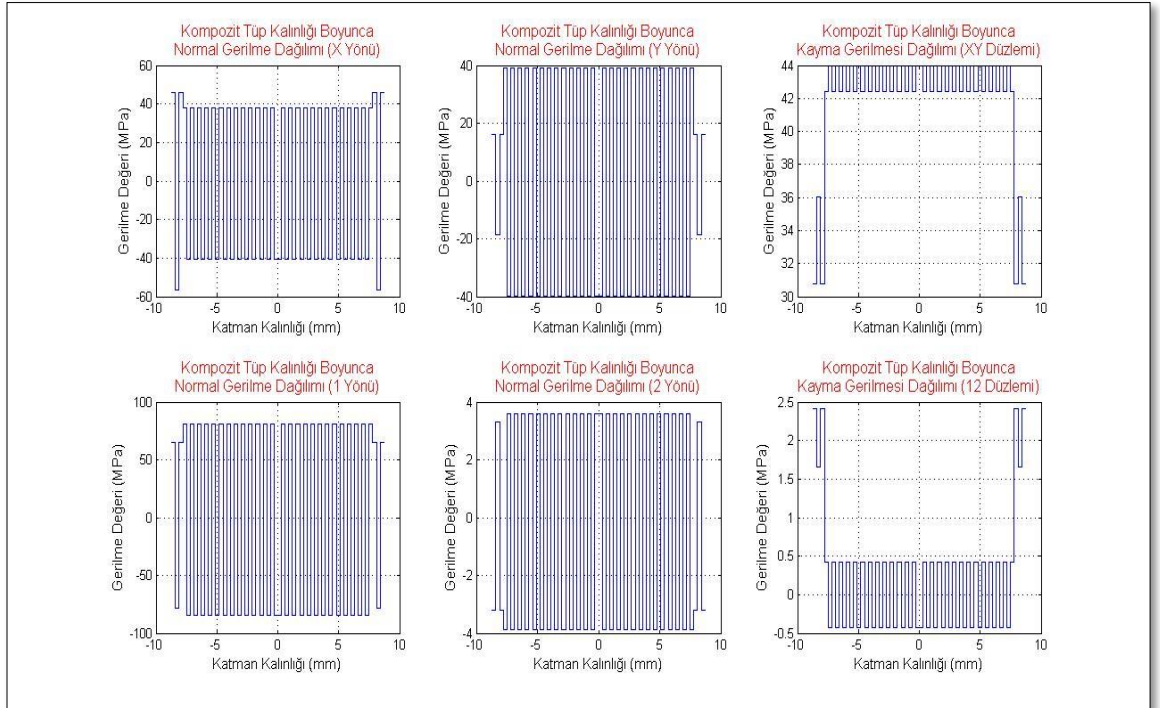
Çizelge 2.6 : Güncel Şaft Modelleri Matlab Genel Sonuçları

Model Numarası	Katman Sayısı	Oryantasyon	Minimum SR (Tsai-Wu)	Eğilme Doğal Frekans (Hz)	Kritik Burkulma Torku (Nm)
B1	10	$[(45/-45)_2/45]_s$	0.34	38.20	1118.23
B2	58	$[(45/-45)_{14}/45]_s$	2.25	42.34	95259.65
B3	58	$[30/-30/30/(45/-45)_{13}]_s$	2.11	48.86	112741.67
B4	58	$[0_3/(45/-45)_{13}]_s$	1.99	62.68	166546.56
B5	58	$[(30/-30)_3/(45/-45)_{11}/45]_s$	2.07	54.56	125019.44
B6	58	$[0_6/(45/-45)_{11}/45]_s$	1.83	77.86	209672.25
C1	10	$[(45/-45)_2/45]_s$	0.29	35.53	1078.42
C2	68	$[(45/-45)_{17}]_s$	2.35	40.58	138599.54
C3	68	$[30/-30/30/(45/-45)_{15}/45]_s$	2.30	45.97	160870.60
C4	68	$[0_3/(45/-45)_{15}/45]_s$	2.21	57.63	230037.02
C5	68	$[(30/-30)_3/(45/-45)_{14}]_s$	2.20	50.77	177448.82
C6	68	$[0_6/(45/-45)_{14}]_s$	1.98	70.66	289946.15

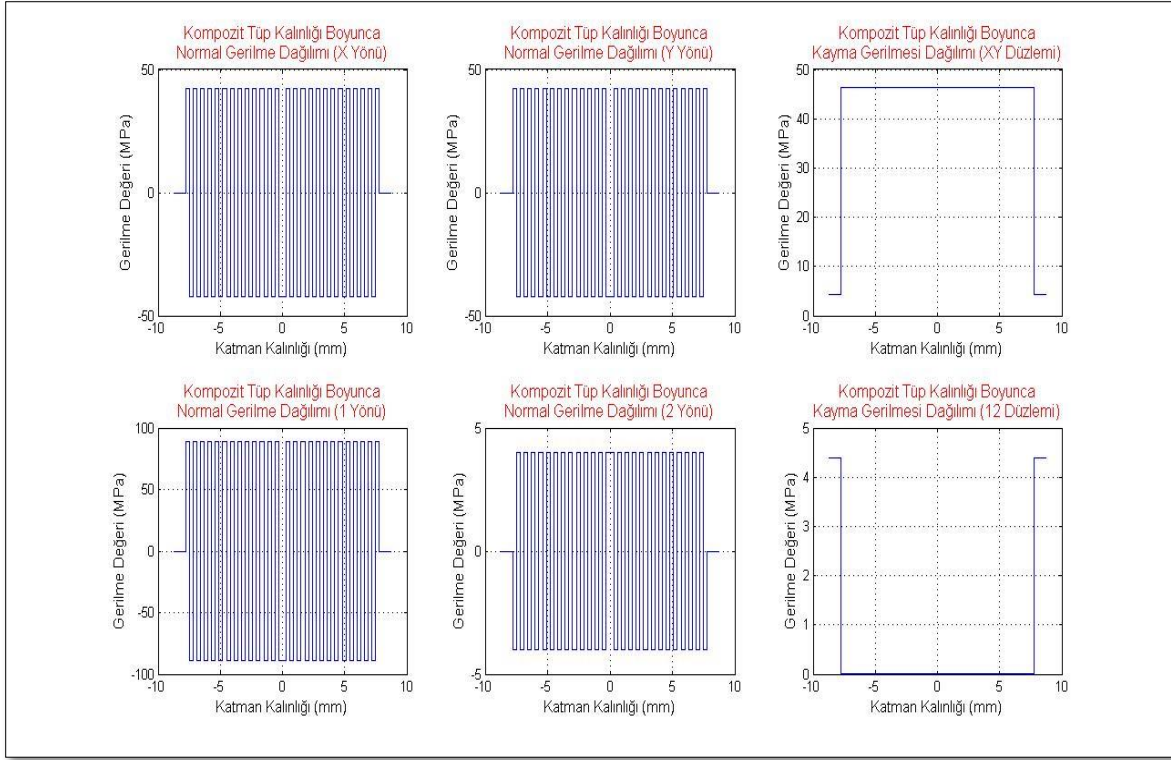
Çalışmamızın ilk altı aylık rapor döneminde kompozit katman teorisi Matlab uygulamasında, katmanların konumları sabitti ve bu değer katmanın iç yarıçap değerinde sabitti. İkinci altı aylık rapor dönemi süresinde, çalışmanın bu bölümünde kolmpozit malzeme numune testlerine göre güncellenmiştir. Buna göre, Şekil 2.27 ve Şekil 2.36 arasındaki grafiklerde görmüş olduğumuz gerilme dağılımı elde edildi. Bundan sonraki çalışma sürecinde, yeni malzeme değerlerine göre teorik sonuçlar referans alınacaktır. Aşağıdaki şekillerde kompozit tüp kalınlığı boyunca (dışarıdan içeriye doğru) gerilme bileşenleri görülmektedir.



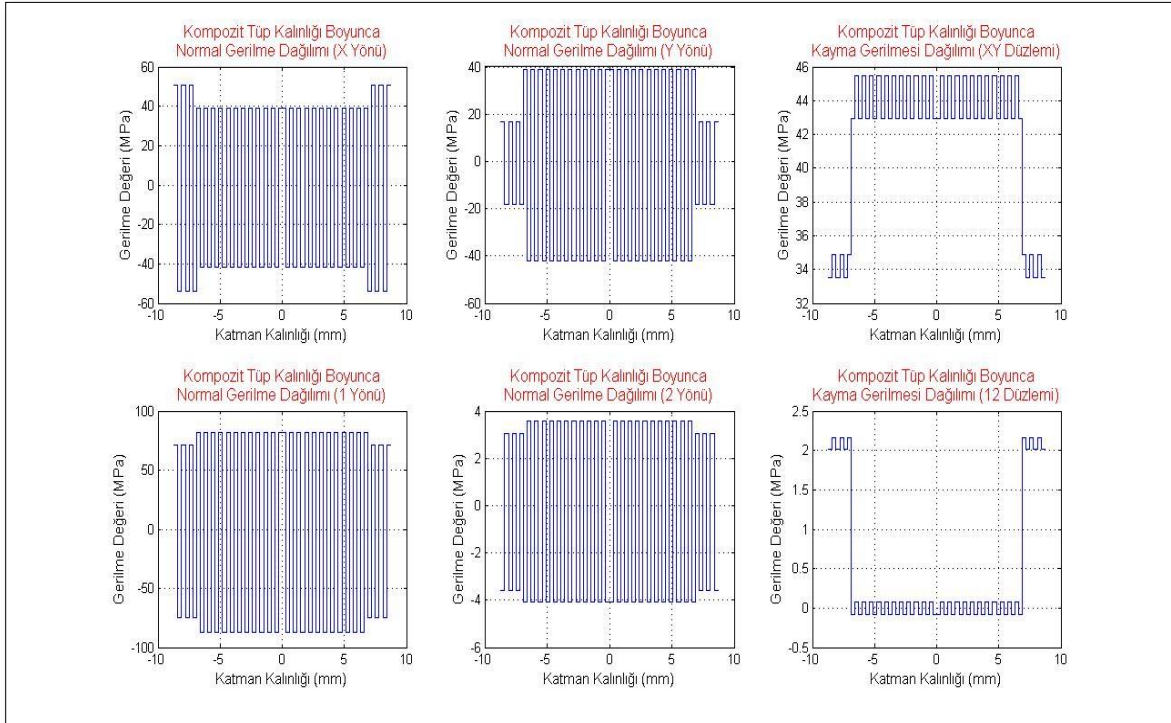
Şekil 2.27 : B2 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



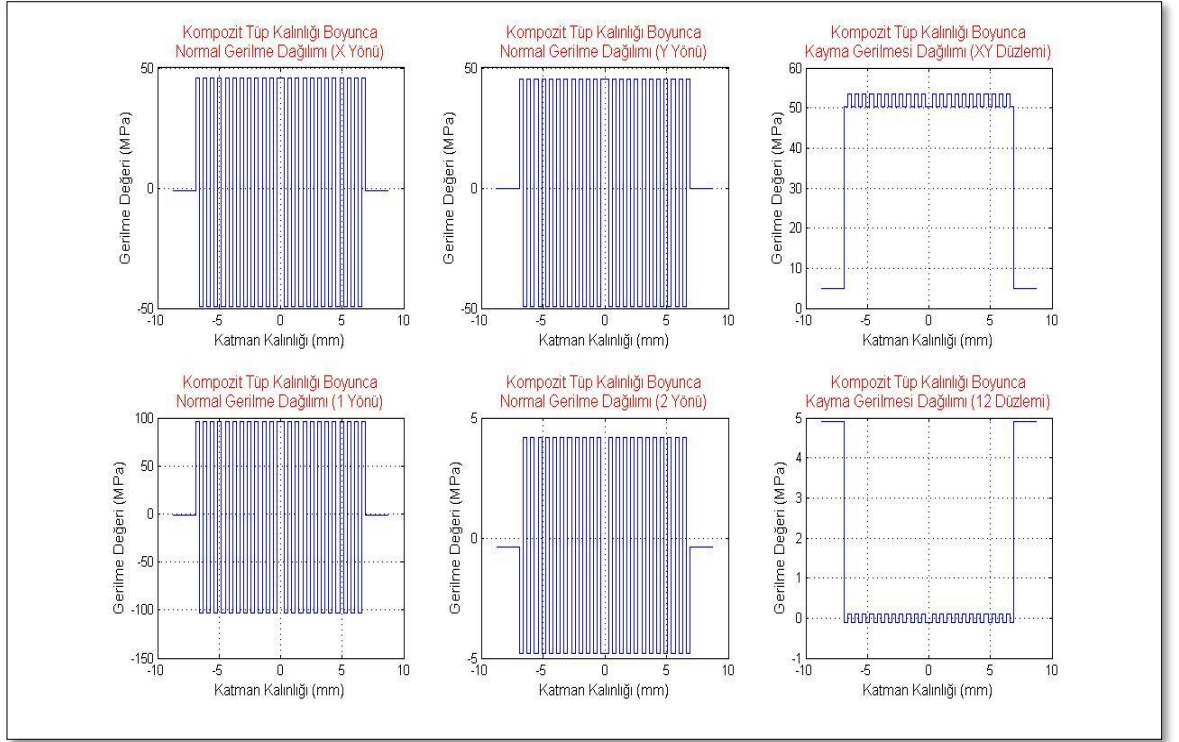
Şekil 2.28 : B3 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



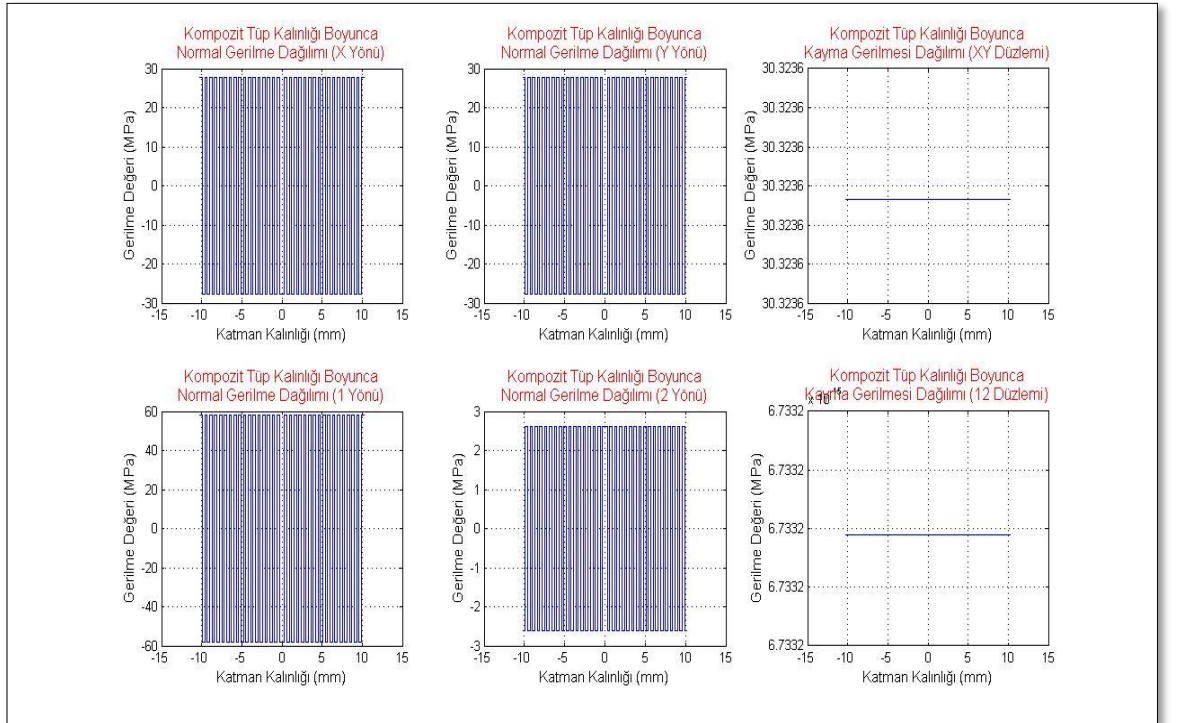
Şekil 2.29 : B4 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



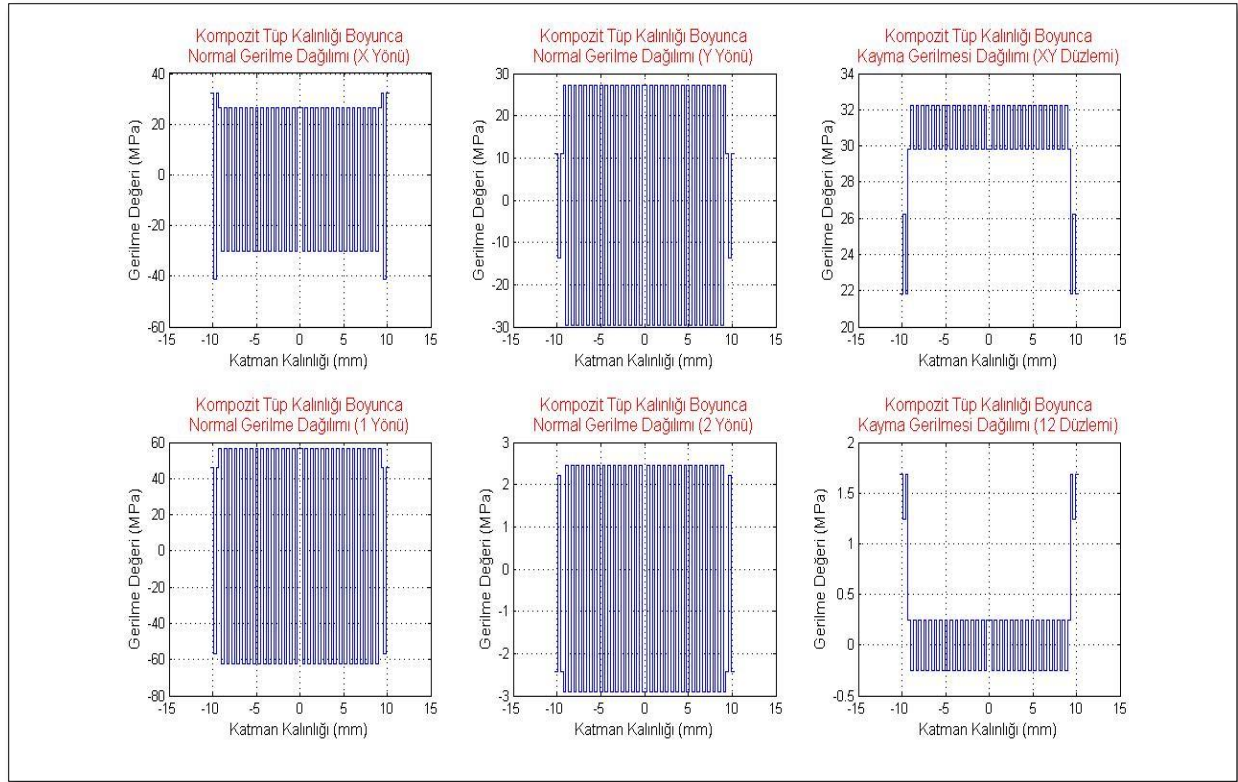
Şekil 2.30 : B5 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



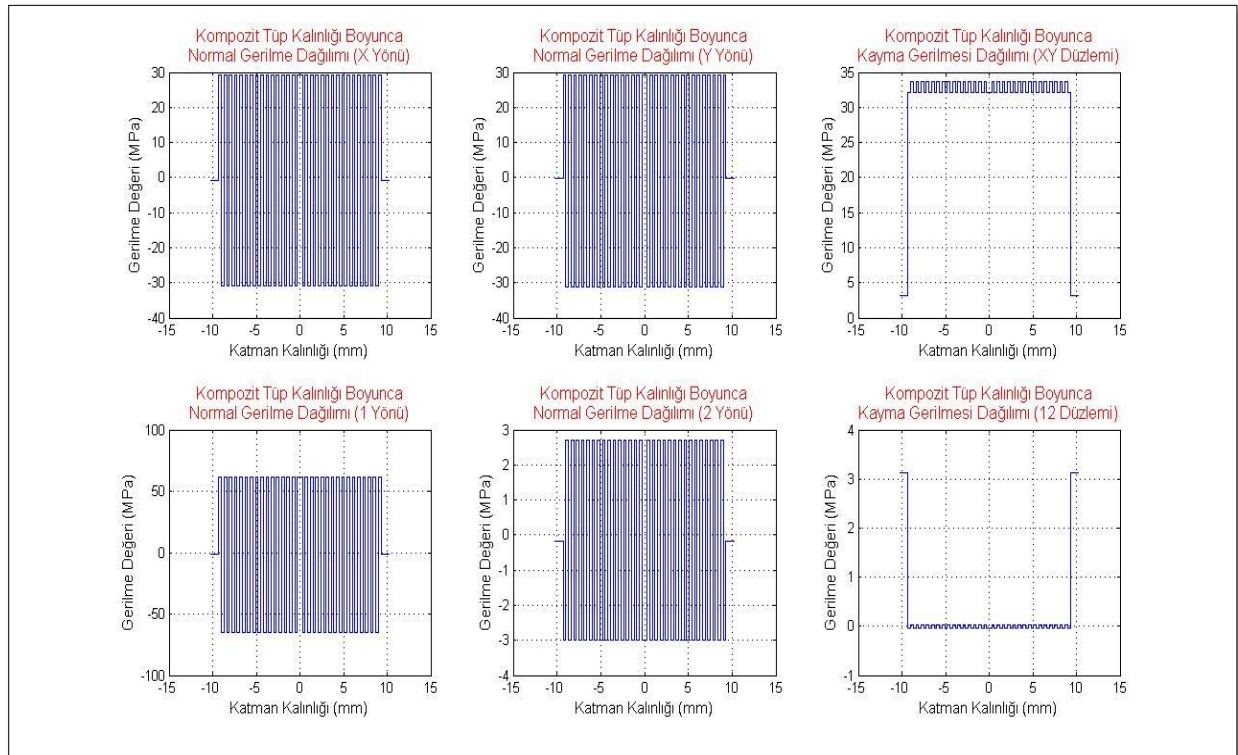
Şekil 2.31 : B6 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



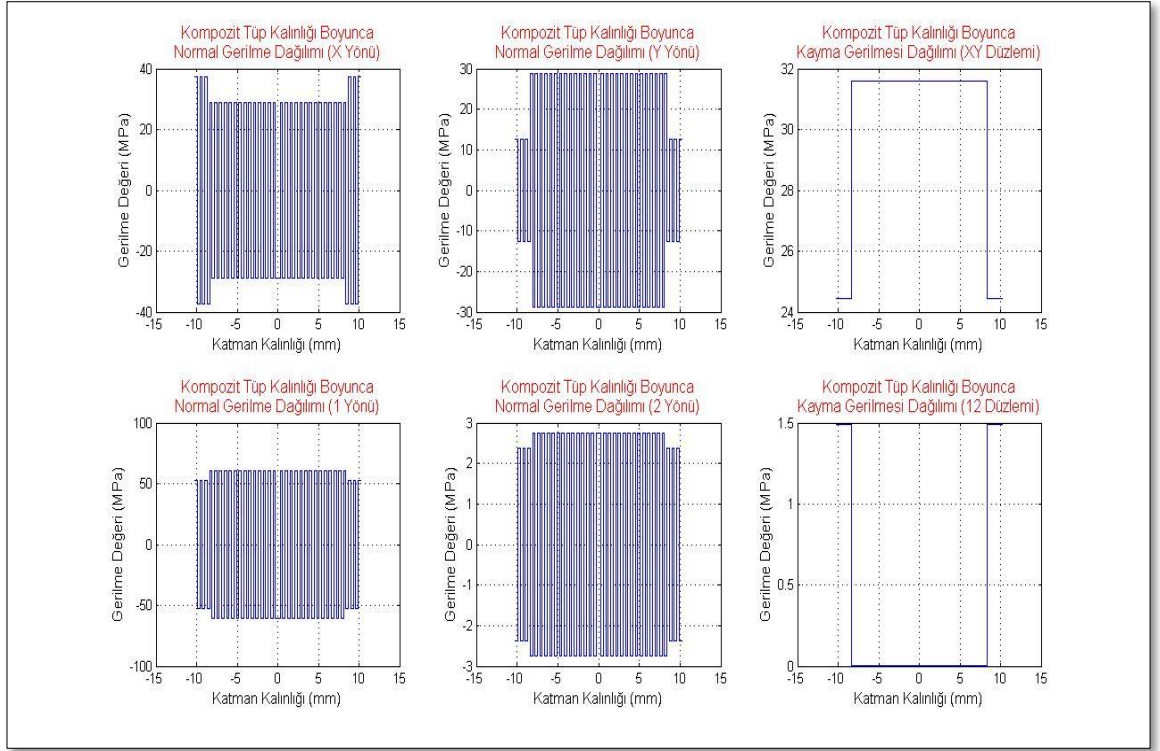
Şekil 2.32 : C2 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



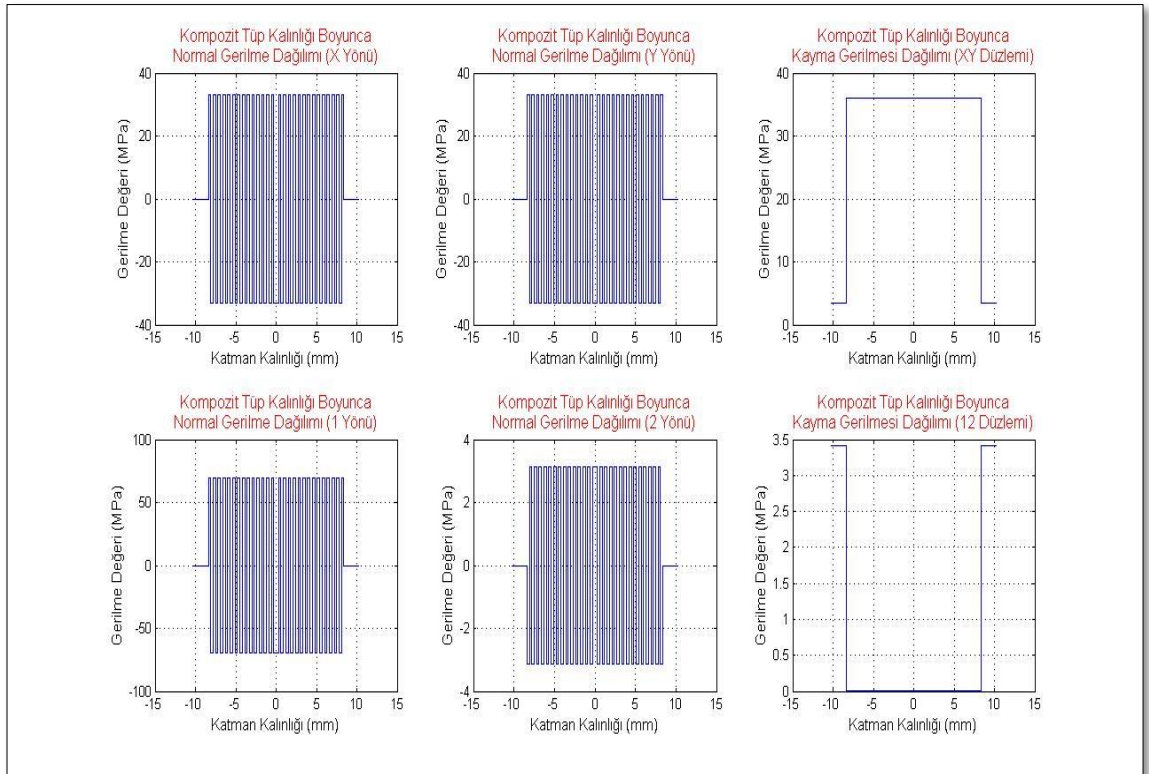
Şekil 2.33 : C3 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



Şekil 2.34 : C4 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



Şekil 2.35 : C5 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı



Şekil 2.36 : C6 Model Kalınlık Boyunca Gerilme Bileşenleri Dağılımı

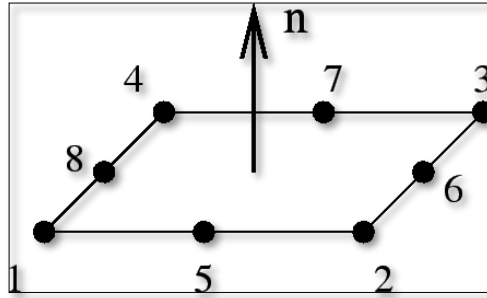
Analiz çalışmalarının son aşaması olarak, statik analiz sonuçlarını 140 mm iç çaplı kompozit tüp için güncellediğimizde, sırasıyla, 140 mm iç çaplı B ve 130 mm iç çaplı C modellerimizin sonuçları ilerleyen başlık altında belirtildiği gibidir.

3. KOMPOZİT TÜPÜN ABAQUS VE PATRAN/NATRAN ORTAMINDA SONLU ELEMAN MODELİ

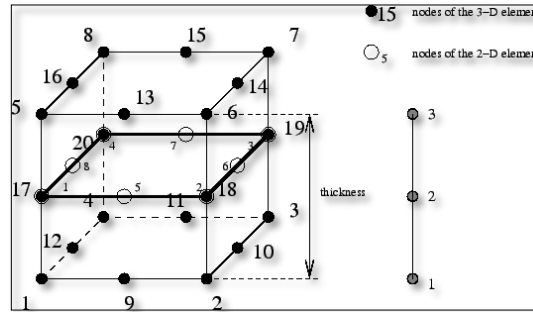
3.1 Sonlu Eleman Modeli ve Yakınsama Çalışmaları

3.1.1 Sonlu eleman modeli

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken S8R eleman tipi kullanılmasına karar verilmiştir. S8R elemanı 8 düğüm noktalı ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine sahip bir kabuk elemandır. Yüzey normali ile birlikte elemanın geometrisi ve kalınlık girdisi ile birlikte elemanın ABAQUS programında modellenme hali Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 ‘de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1 : S8R eleman geometrisi



Şekil 3.2 : Kalınlık girdisi ile birlikte elemanın modellenme şekli

S8R elemanının tercih edilme sebebi ikinci derece (quadratic) bir eleman olmasından dolayı çok daha az sayıda elemanla yakınsamanın sağlanabilmesi ve “curved

boundary” koşullarının birinci derece elemanlara göre daha iyi bir şekilde modellenebilmesidir. 120mm iç çaplı model için, boru kesit uzunluğu 377mm, boyu ise 1910mm’dir. Elemanların boy - en oranı 1 olacak şekilde düşündüğümüzde;

$$\frac{377}{R} = \frac{1910}{L}$$

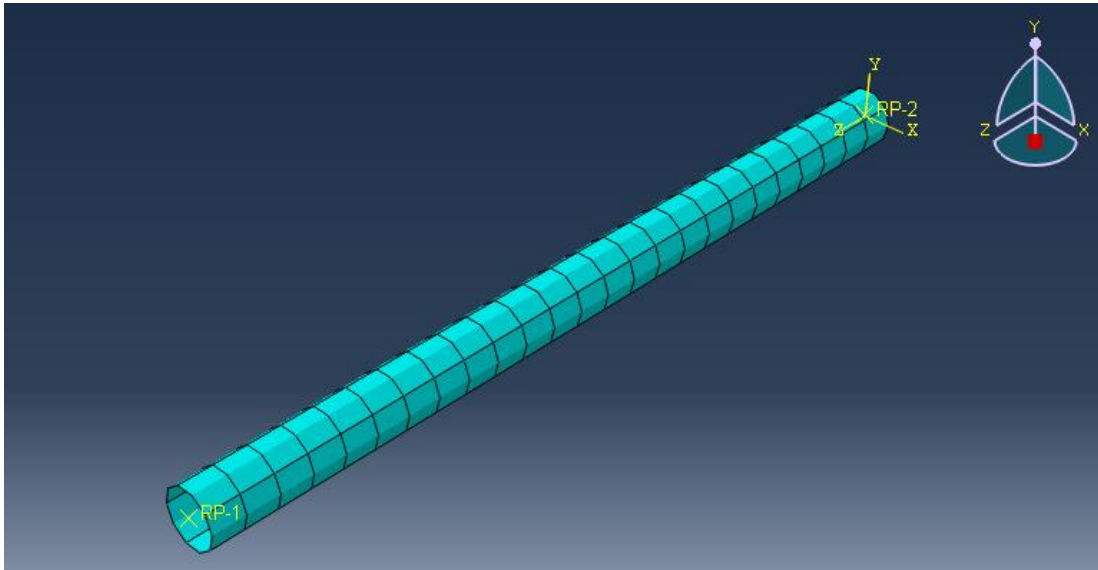
Burada; R: Çevresel yöndeki eleman sayısı

L: Tüp uzunluğu yönündeki eleman sayısıdır.

Yukarıdaki eşitlikten eleman sayısı oranımız $L/R \approx 5$ ’tir. Modelleme aşamasında şaft geometrisi çevresel yönde 20, uzunluk yönünde de 100 parçaya bölünerek toplamda 2000 elemanlı bir model oluşturulmuştur. Statik analizde şaftın bir ucu tüm serbestlik derecelerinde tutulurken diğer ucuna RBE3 rijit elemanları vasıtasıyla tork uygulanmıştır.

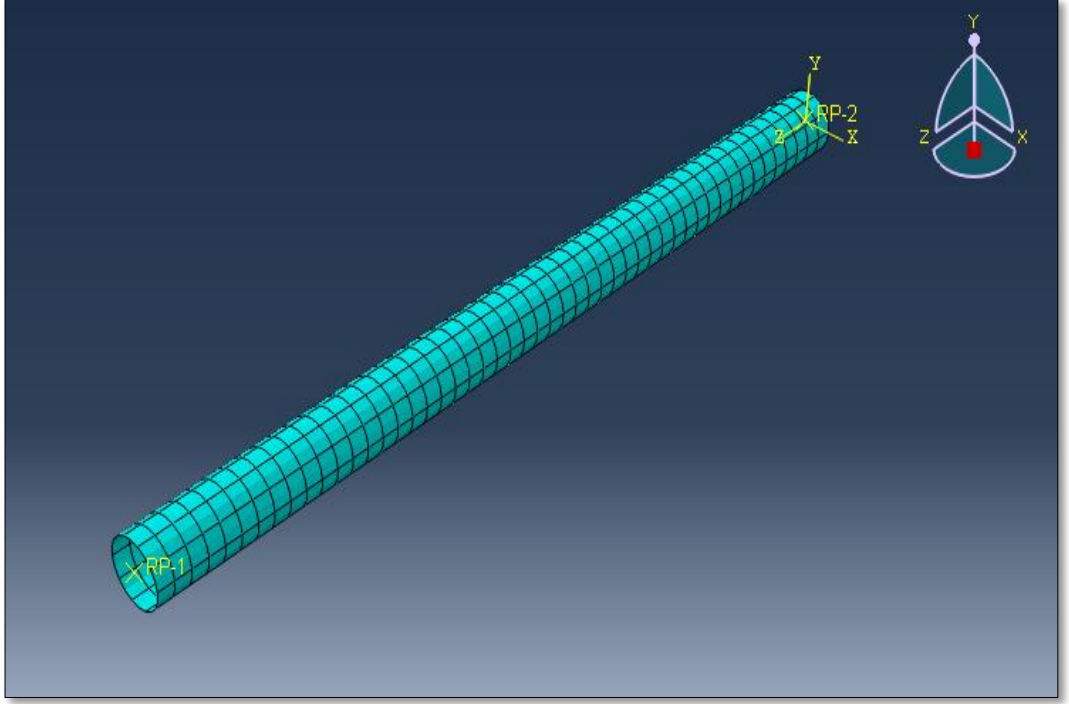
3.1.2 Statik analizde yakınsama çalışmaları

Bu bilgiler ışığında ilk eleman sayımız; $R=5$, $L=25$ olsun. Bunu 3 numaralı oryantasyonumuzda deneyelim. Kritik katman olan 28 numaralı katmanının üst yüzeyi için σ_{11} değerini okuyalım. Bu değeri seçmemizin nedeni hasar kriteri hesabında aktif rol oynayan en büyük gerilme bileşeni olmasıdır. İlk olarak 125 elemanlı modelimizin ağ yapısı Şekil 3.3 ‘teki gibidir.



Şekil 3.3 : 125 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı

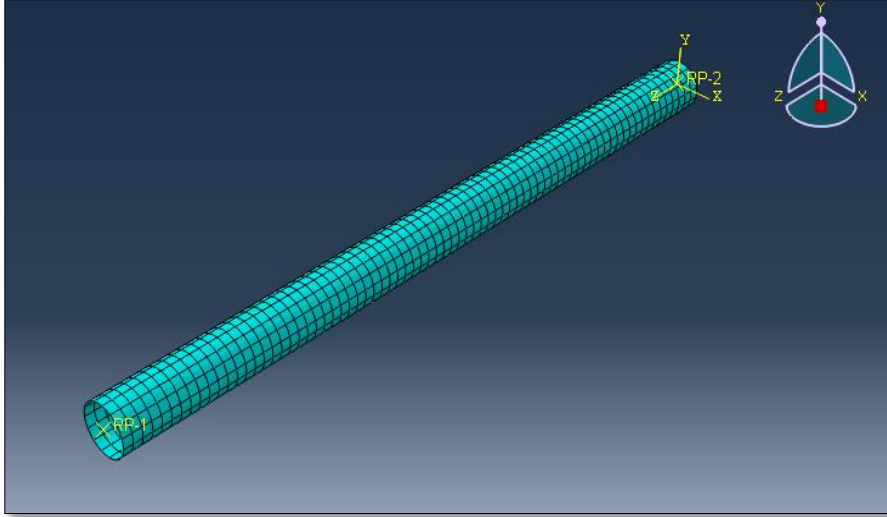
Yukarıda ağ yapısı verilen modelde $\sigma_{11} = -330.127$ MPa olarak okunmaktadır. İkinci modelimiz için eleman sayısını iki katına çıkararak aynı gerilme bileşeni için sonucu gözlemleyelim. R=10, L=50 olsun ve modelimizin diğer tüm özellikleri aynı olsun. İkinci yapı olarak 500 elemandan oluşan sonlu eleman modelimizin ağ yapısı Şekil 3.4'teki gibidir.



Şekil 3.4 : 500 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı

Yukarıda ağ yapısı verilen modelde $\sigma_{11} = -329.101$ MPa olarak okunmaktadır. Görüldüğü gibi, bir önceki ağ yapısı göz önünde bulundurulduğunda, bu modelde ilgilenen gerilme bileşeni, büyüklük olarak, yaklaşık 1 MPa daha küçük gerilme değerine sahiptir.

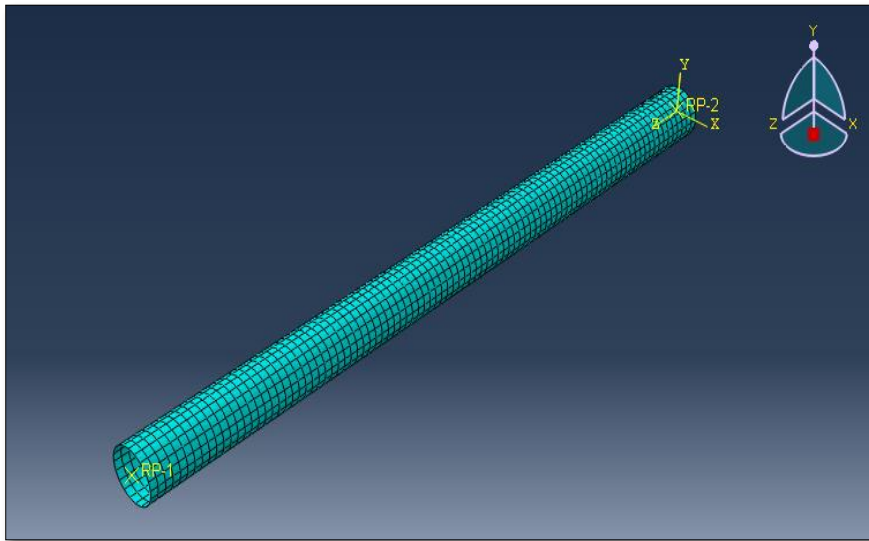
Üçüncü modelimiz için eleman sayısını birinci tasarıma göre üç katına çıkararak aynı gerilme bileşeni için sonucu gözlemleyelim. R=15, L=75 olsun ve modelimizin diğer tüm özellikleri aynı olsun. Üçüncü yapı olarak 1125 elemandan oluşan sonlu eleman modelimizin ağ yapısı şu şekildedir.



Şekil 3.5 : 1125 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı

Yukarıda ağ yapısı verilen modelde $\sigma_{11} = -329.116$ MPa olarak okunmaktadır. 500 elemandan oluşan model göz önünde bulundurulduğunda, ilgilenilen gerilme bileşenindeki değişim bu kez 0.014 MPa büyüklüğündedir.

Sonuç hızlı bir şekilde yakınsama göstermiştir. Fakat modelimizin az karmaşık olması daha fazla eleman kullanabilmemizi mümkün kılmaktadır. Bu durumda çevresel eleman sayısını ilk modele göre 4 katına çıkaralım ve boylamasına eleman sayımızı da yaklaşık dört katına çıkaralım. $R=20$, $L=100$ olsun ve modelimizin diğer tüm özellikleri aynı tutulsun. Burada, basit burulma mukavemet hali ile ilgilenildiğinden boylamasına eleman sayısının çok da fazla artırılmasına gerek yoktur. Dördüncü yapı olarak 2000 elemandan oluşan sonlu eleman modelimizin ağ yapısı şu şekildedir.



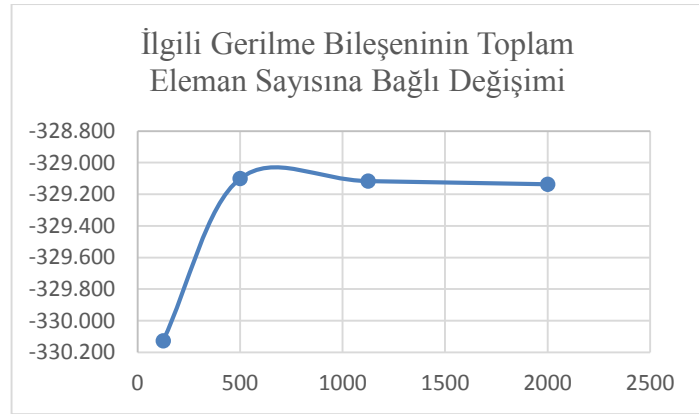
Şekil 3.6 : 2000 elemandan oluşan sonlu eleman modelin ağ yapısı

Yukarıda ağ yapısı verilen modelde $\sigma_{11} = -329.136$ MPa olarak okunmaktadır. Görüldüğü gibi eleman sayımız artırıldıkça yüzde bir basamağında değişim görülmektedir. Bu değişim bizim hesaplarımız için yeterince küçük bir değişim olduğundan eleman sayımız 1880 – 2000 mertebesinde yeterlidir. İlgili gerilme bileşeninin değişimini çizelge ile inceleyecek olursak Çizelge 3.1’deki sonuçlara ulaşmaktayız.

Çizelge 3.1 : Boyu 1910 mm İç Çapı 140 mm Olan Şaft Modelleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

Çevresel eleman sayısı (R)	Toplam eleman sayısı	Kritik katman (Katman 28) üst yüzeyi için σ_{11} değeri (MPa)
5	125	-330.12
10	500	-329.10
15	1125	-329.11
20	2000	-329.13

İlgili gerilme bileşeninin değişimini grafik yolu ile Şekil 3.7 ‘den inceleyebiliriz;



Şekil 3.7 : Eleman sayısına bağlı gerilme değişim

3.1.3 Serbest titreşim analizinde yakınsama çalışması

Statik analiz için uygulanan eleman sayısı değişiminin modal analizde nasıl bir değişim yarattığını incelemek için her bir modelde ilk beş eğilme frekanslarının değişimlerini çizelgeler üzerinden inceleyelim.

1. Model (R=5, L=25)

1	Mode	1: Value = 1.60712E+06 Freq = 201.76 (cycles/time)
2	Mode	2: Value = 1.60712E+06 Freq = 201.76 (cycles/time)
3	Mode	3: Value = 1.18159E+07 Freq = 547.08 (cycles/time)
4	Mode	4: Value = 1.18159E+07 Freq = 547.08 (cycles/time)
5	Mode	5: Value = 4.35481E+07 Freq = 1050.3 (cycles/time)

Şekil 3.8: 1. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı

2. Model (R=10, L=50)

1	Mode	1: Value = 1.61745E+06 Freq = 202.41 (cycles/time)
2	Mode	2: Value = 1.61745E+06 Freq = 202.41 (cycles/time)
3	Mode	3: Value = 1.19022E+07 Freq = 549.08 (cycles/time)
4	Mode	4: Value = 1.19022E+07 Freq = 549.08 (cycles/time)
5	Mode	5: Value = 4.39155E+07 Freq = 1054.7 (cycles/time)

Şekil 3.9: 2. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı

3. Model (R=15, L=75)

1	Mode	1: Value = 1.61803E+06 Freq = 202.45 (cycles/time)
2	Mode	2: Value = 1.61803E+06 Freq = 202.45 (cycles/time)
3	Mode	3: Value = 1.19070E+07 Freq = 549.19 (cycles/time)
4	Mode	4: Value = 1.19070E+07 Freq = 549.19 (cycles/time)
5	Mode	5: Value = 4.39359E+07 Freq = 1054.9 (cycles/time)

Şekil 3.10: 3. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı

4. Model (R=20, L=100)

1	Mode	1: Value = 1.61812E+06 Freq = 202.45 (cycles/time)
2	Mode	2: Value = 1.61812E+06 Freq = 202.45 (cycles/time)
3	Mode	3: Value = 1.19078E+07 Freq = 549.21 (cycles/time)
4	Mode	4: Value = 1.19078E+07 Freq = 549.21 (cycles/time)
5	Mode	5: Value = 4.39392E+07 Freq = 1055.0 (cycles/time)

Şekil 3.11: 4. Modele ait ilk 5 serbest titreşim frekansı

Çizelgelardan görüleceği gibi 1-3 modelleri arasındaki değişim eğimi son iki değişim eğrisi arasındakine göre oldukça fazladır ve 4. Model ile modal analiz için sonlu eleman modelimizdeki eleman sayımızın yeterliliğini görmekteyiz.

3.2 Statik Analiz Sonuçları

Analiz çalışmalarının son aşaması olarak, statik analiz sonuçlarını 140 mm iç çaplı kompozit tüp için güncellendiğinde sırasıyla, 140 mm iç çaplı B ve 130 mm iç çaplı C modellerinin sonuçları aşağıda belirtildiği gibidir.

3.2.1 B Modelleri sonuçları

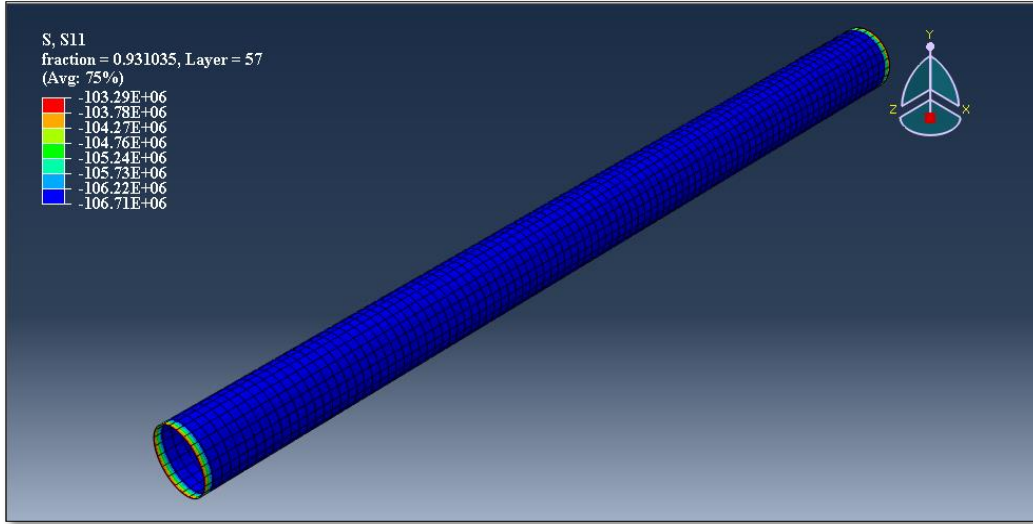
B2 modeli sonucu [(45/-45)₁₄/45]_s : Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 57 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.7992' tür. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 57 numaralı katman' daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.2'teki gibidir.

Çizelge 3.2 : B2 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

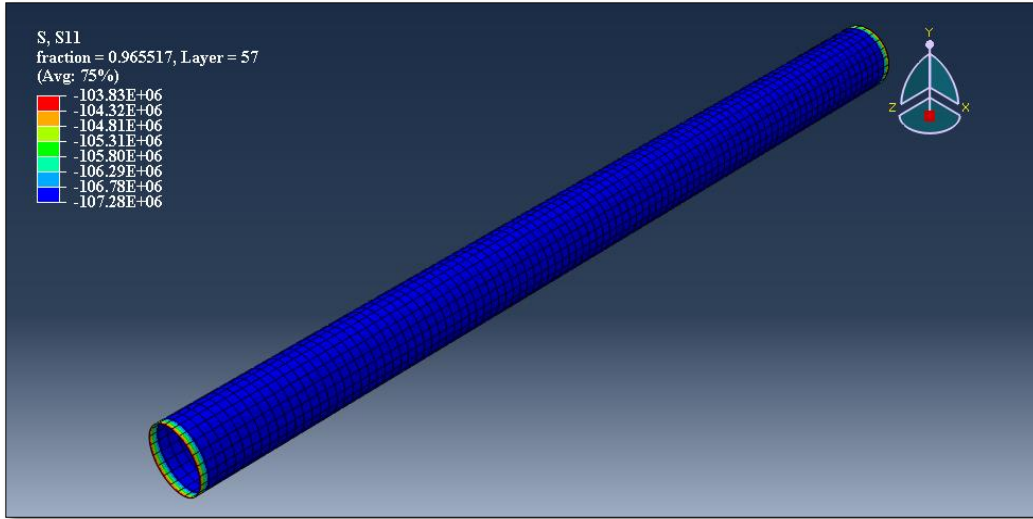
σ_{11} (MPa) Katman 57 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 57 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 57 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 57 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 57 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 57 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 57 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 57 Üst Yüzey
-106.37	106.94	4.47	4.50	0.007×10^{-3}	-0.009×10^{-3}	1.5255	1.5162

Çizelge 3.2'deki değerleri Matlab'te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri'ne göre Dayanım Oranı 'SR' değeri; 57. Katman alt yüzey için '1.53', 57. Katman üst yüzey için '1.52' olarak bulunmaktadır.

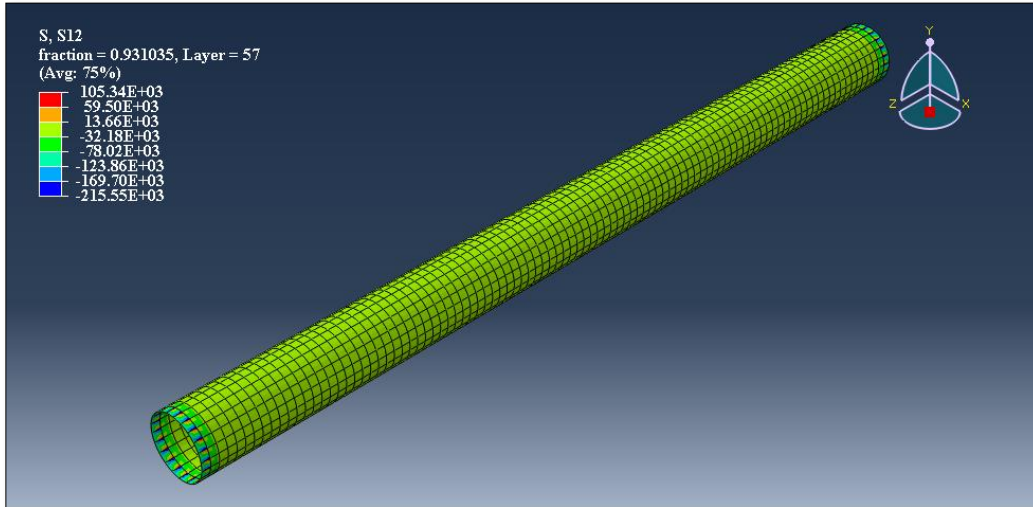
Aşağıda B2 modeline ait kompozit tüp boyunca gerilme bileşenleri dağılımları verilmiştir. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de sırasıyla kompozit tüpün kritik katmanının alt ve üst yüzeyinde oluşan σ_{11} (Elyaf doğrultusundaki bileşen) lokal gerilme dağılımları, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 'te sırasıyla kompozit tüpün kritik katmanının alt ve üst yüzeyinde oluşan σ_{22} (elyaf doğrultusuna dik yönteki bileşen) lokal gerilme dağılımları ve son olarak Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 'de sırasıyla kompozit tüpün kritik katmanının alt ve üst yüzeyinde oluşan τ_{12} lokal gerilme dağılımları görülmektedir.



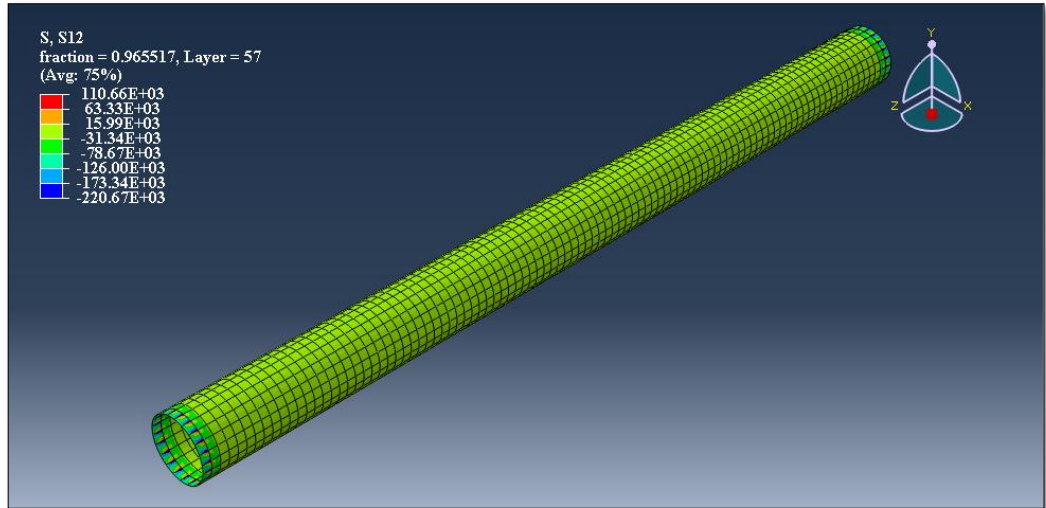
Şekil 3.12 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (57. Katman Alt Yüzey)



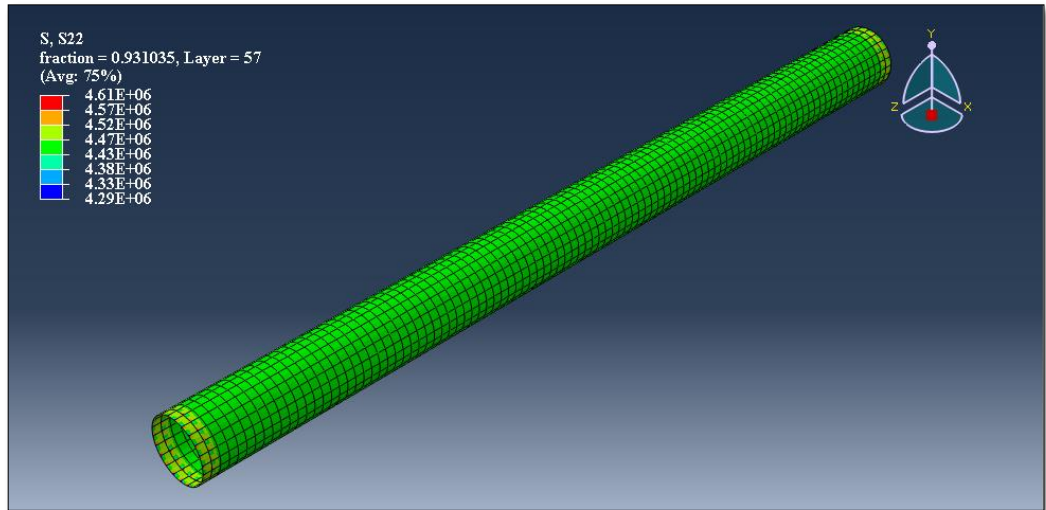
Şekil 3.13 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (57. Katman Üst Yüzey)



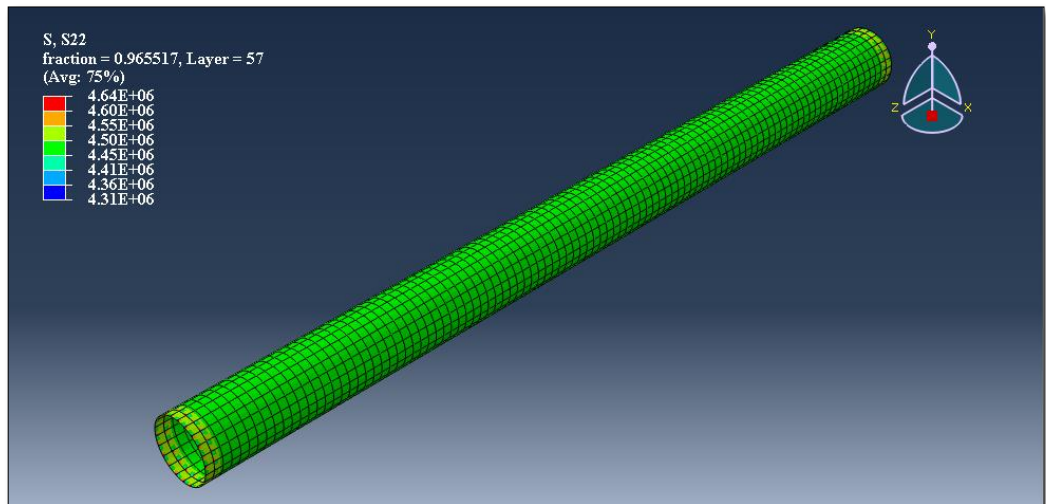
Şekil 3.14 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (57. Katman Alt Yüzey)



Şekil 3.15 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (57. Katman Üst Yüzey)



Şekil 3.16 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (57. Katman Alt Yüzey)



Şekil 3.17 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (57. Katman Üst Yüzey)

B3 modeli sonucu $[30/-30/30/(45/-45)_{13}]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 57 ve 54 numaralı katmanlarda minimumdur ve bu değerler sırasıyla 1.6025 ve 1.7763' tür. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 57 numaralı katman' daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.3'teki gibidir.

Çizelge 3.3 : B3 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman 57 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 57 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 57 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 57 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 57 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 57 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 57 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 57 Üst Yüzey
-98.86	-99.36	4.23	4.25	2.21	2.23	1.4392	1.4310

Çizelge 3.3' teki değerleri Matlab'te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri'ne göre Dayanım Oranı 'SR' değeri; 57. Katman alt yüzey için '1.44', 57. Katman üst yüzey için '1.43' olarak bulunmaktadır.

B4 modeli sonucu $[0_3/(45/-45)_{13}]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 54 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.6413' tür. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 54 numaralı katman' daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.4'teki gibidir.

Çizelge 3.4 : B4 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman 54(alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 54 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 54 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 54 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 54 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 54 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 54 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 54 Üst Yüzey
-112.93	-113.27	5.10	5.13	-0.009×10^{-3}	-0.01×10^{-3}	1.3815	1.3736

Çizelge 3.4' teki değerleri Matlab'te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri'ne göre Dayanım Oranı 'SR' değeri; 54. Katman alt yüzey için '1.38', 54. Katman üst yüzey için '1.37' olarak bulunmaktadır.

B5 modeli sonucu $[(30/-30)_3/(45/-45)_{11}/45]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 57 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.6578' dir. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 57 numaralı katman' daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.5'teki gibidir.

Çizelge 3.5 : B5 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman	σ_{11} (MPa) Katman	σ_{22} (MPa) Katman	σ_{22} (MPa) Katman	τ_{12} (MPa) Katman	τ_{12} (MPa) Katman	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 57 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 57 Üst Yüzey
57 (alt yüzey)	57 (üst yüzey)	57 (alt yüzey)	57 (üst yüzey)	57 (alt yüzey)	57 (üst yüzey)		
-96.35	-96.87	3.98	4.00	2.77	2.78	1.4049	1.3983

Çizelge 3.5’ teki değerleri Matlab’te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri’ne göre Dayanım Oranı ‘SR’ değeri; 57. Katman alt yüzey için ‘1.4’, 57. Katman üst yüzey için ‘1.4’ olarak bulunmaktadır. B6 modeli sonucu $[0_6/(45/-45)_{11}/45]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 51 ve 58 numaralı katmanlarda minimumdur ve bu değerler sırasıyla 1.5411 ve 1.5604’ tür. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 51 numaralı katman’ daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.6’daki gibidir.

Çizelge 3.6 : B6 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman	σ_{11} (MPa) Katman	σ_{22} (MPa) Katman	σ_{22} (MPa) Katman	τ_{12} (MPa) Katman	τ_{12} (MPa) Katman	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 51 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 51 Üst Yüzey
51 (alt yüzey)	51 (üst yüzey)	51 (alt yüzey)	51 (üst yüzey)	51 (alt yüzey)	51 (üst yüzey)		
-127.65	-128.35	5.30	5.33	120×10^{-3}	120×10^{-3}	1.2796	1.2725

Çizelge 3.6’ daki değerleri Matlab’te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri’ne göre Dayanım Oranı ‘SR’ değeri; 51. Katman alt yüzey için ‘1.28’, 51. Katman üst yüzey için ‘1.27’ olarak bulunmaktadır.

3.2.2 C modelleri analiz sonuçları

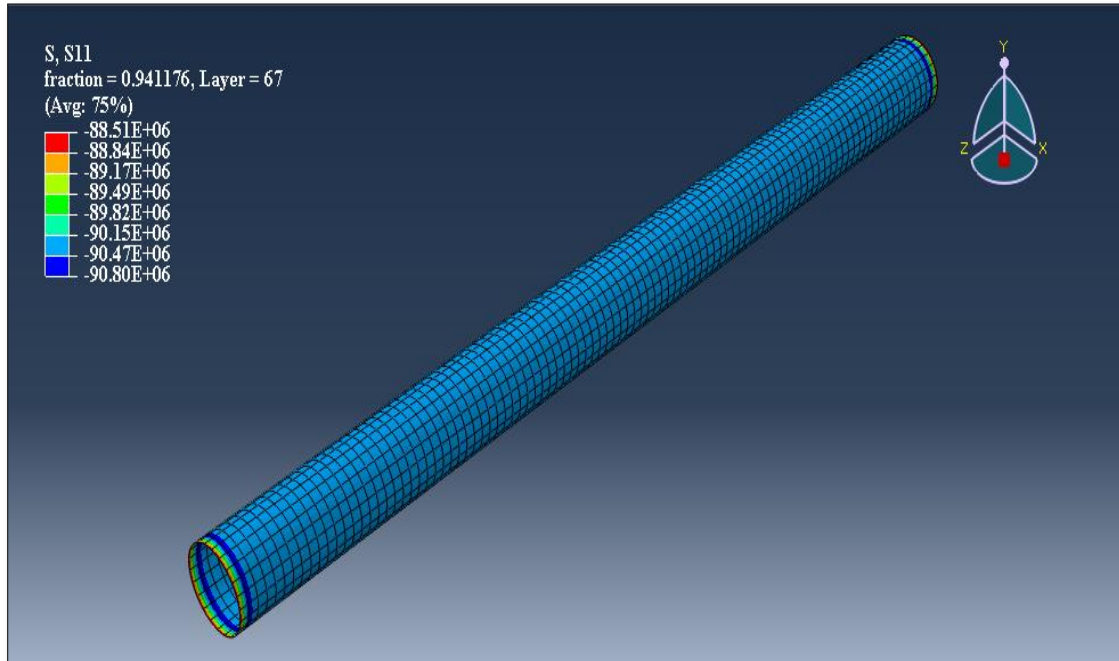
C2 modeli analiz sonucu $[(45/-45)_{17}]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 67 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.7865’ tir. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 67 numaralı katman’ daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.7’deki gibidir.

Çizelge 3.7 : C2 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

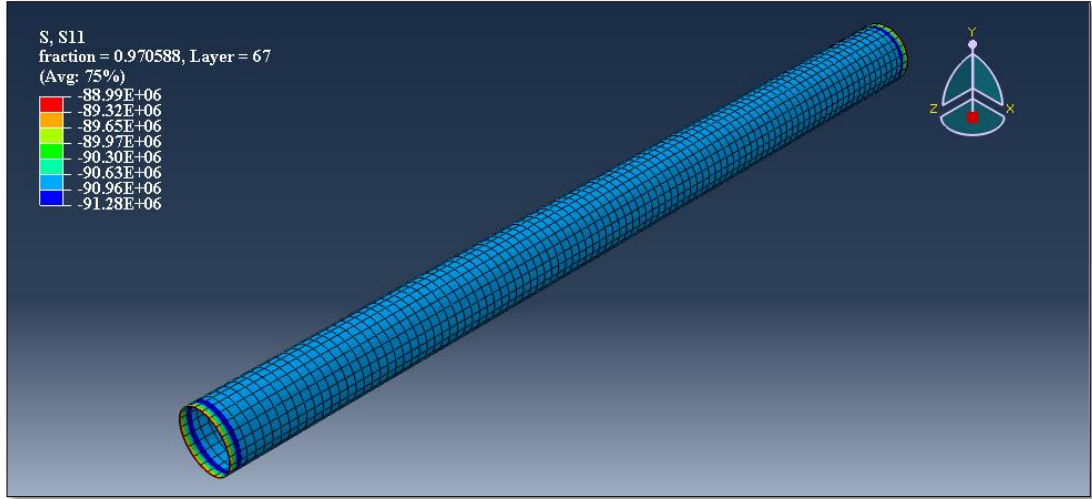
σ_{11} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 67 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 67 Üst Yüzey
-90.36	-90.85	4.09	4.11	-902×10^{-3}	-930×10^{-3}	1.7224	1.7137

Çizelge 3.7’ deki değerleri Matlab’te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri’ne göre Dayanım Oranı ‘SR’ değeri; 67. Katman alt yüzey için ‘1.72’, 67. Katman üst yüzey için ‘1.71’ olarak bulunmaktadır.

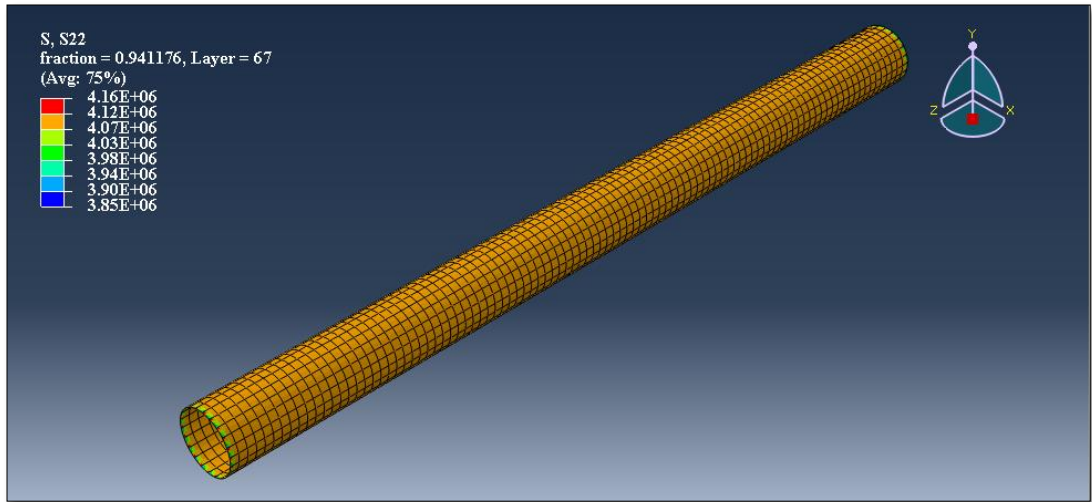
Aşağıda C2 modeline ait kompozit tüp boyunca gerilme bileşenleri dağılımları verilmiştir. Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da sırasıyla kompozit tüpün kritik katmanının alt ve üst yüzeyinde oluşan σ_{11} (Elyaf doğrultusundaki bileşen) lokal gerilme dağılımları, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de sırasıyla kompozit tüpün kritik katmanının alt ve üst yüzeyinde oluşan σ_{22} (Elyaf doğrultusuna dik yönteki bileşen) lokal gerilme dağılımları ve son olarak Şekil 3.22 ve Şekil 3.23 ‘te sırasıyla kompozit tüpün kritik katmanının alt ve üst yüzeyinde oluşan σ_{12} lokal gerilme dağılımları görülmektedir.



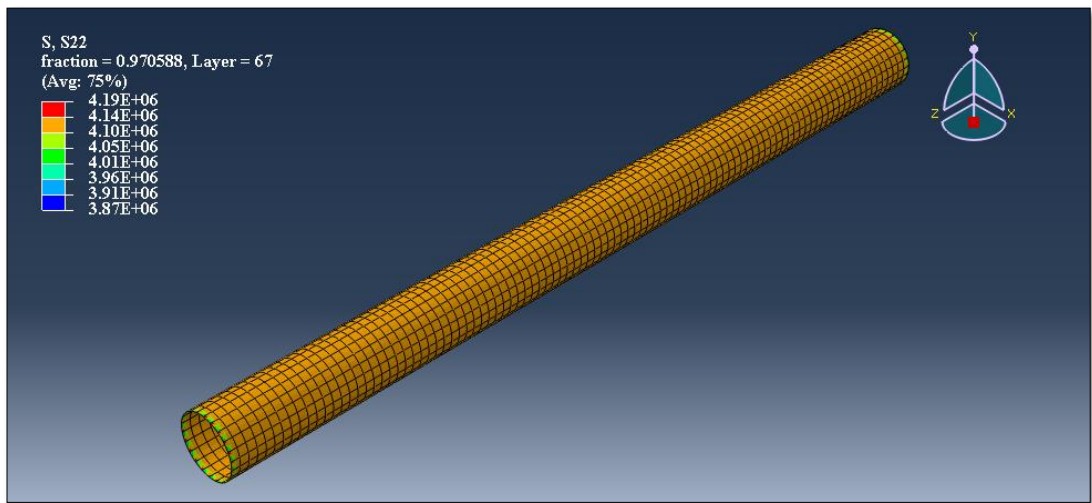
Şekil 3.18 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (67. Katman Alt Yüzey)



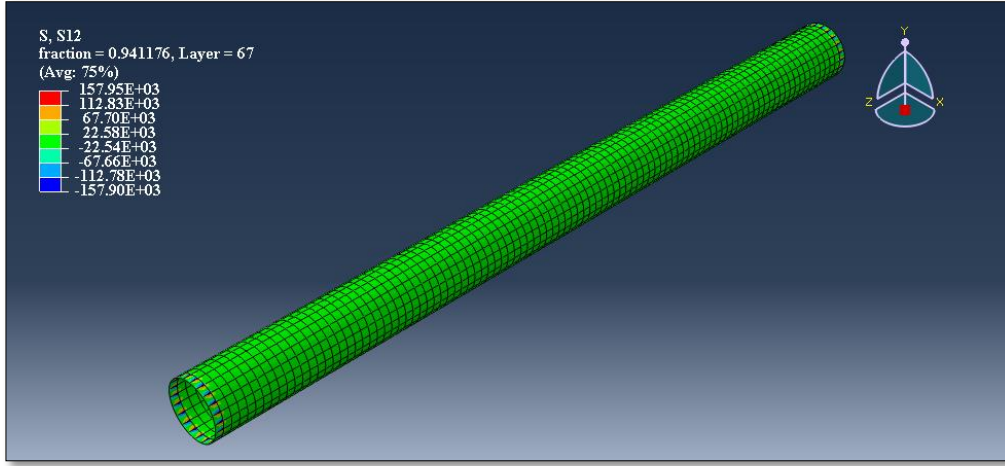
Şekil 3.19 : Tüp Boyunca σ_{11} dağılımı (67. Katman Üst Yüzey)



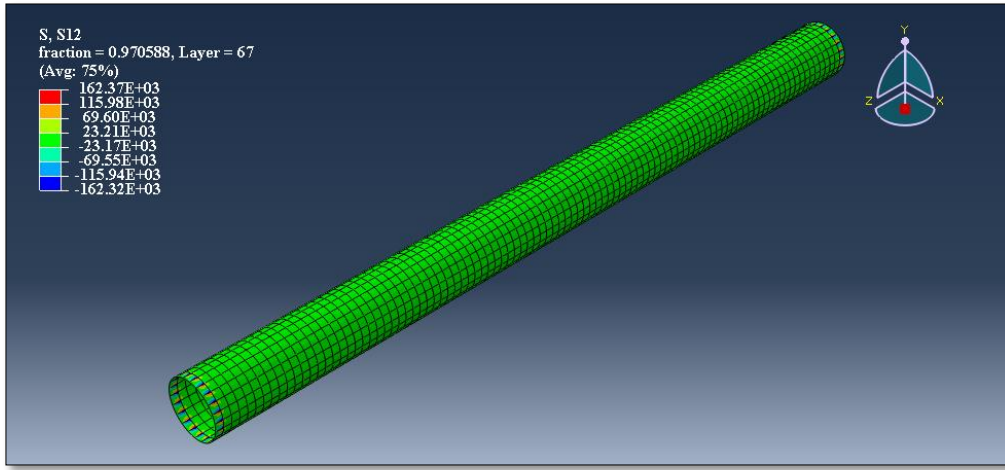
Şekil 3.20 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (67. Katman Alt Yüzey)



Şekil 3.21 : Tüp Boyunca σ_{22} dağılımı (67. Katman Üst Yüzey)



Şekil 3.22 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (67. Katman Alt Yüzey)



Şekil 3.23 : Tüp Boyunca τ_{12} dağılımı (67. Katman Üst Yüzey)

C3 modeli analiz sonucu $[30/-30/30/(45/-45)_{15}/45]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 67 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.7407' dir. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 67 numaralı katman' daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.8'deki gibidir.

Çizelge 3.8 : C3 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 67 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 67 Üst Yüzey
-86.89	-87.31	3.50	3.52	2.01	2.02	1.9101	1.9010

Çizelge 3.8'deki değerleri Matlab'te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri'ne göre Dayanım Oranı 'SR' değeri;

67. Katman alt yüzey için ‘1.91’, 67. Katman üst yüzey için ‘1.90’ olarak bulunmaktadır.

C4 modeli analiz sonucu $[0_3/(45/-45)_{15}/45]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 64 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.7178’ dir. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 64 numaralı katman’ daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.9’ daki gibidir.

Çizelge 3.9 : C4 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman 64 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 64 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 64 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 64 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 64 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 64 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 64 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 64 Üst Yüzey
-99.14	-99.67	4.21	4.24	47×10^{-3}	47×10^{-3}	1.6273	1.6171

Çizelge 3.9’ daki değerleri Matlab’ te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri’ ne göre Dayanım Oranı ‘SR’ değeri; 64. Katman alt yüzey için ‘1.63’, 64. Katman üst yüzey için ‘1.62’ olarak bulunmaktadır.

C5 modeli analiz sonucu $[(30/-30)_3/(45/-45)_{14}]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 67 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.6647’ dir. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 67 numaralı katman’ daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.10’ daki gibidir.

Çizelge 3.10 : C5 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 67 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 67 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 67 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 67 Üst Yüzey
-81.58	-82.02	3.70	3.71	2.33	2.34	1.6015	1.5952

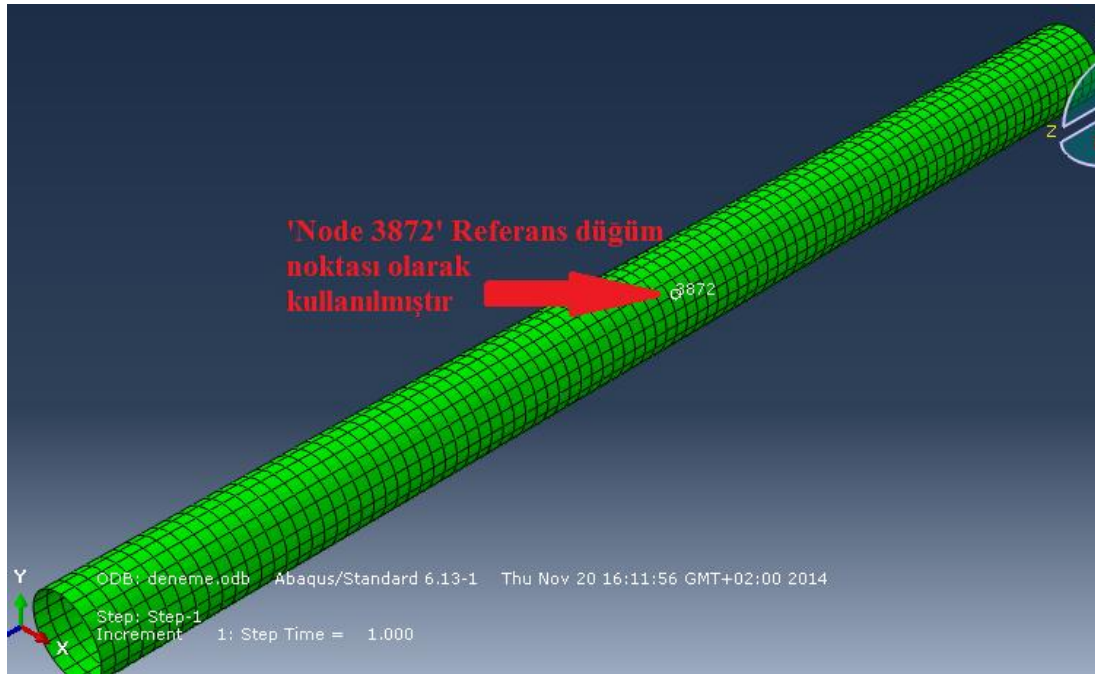
Çizelge 3.10’ daki değerleri Matlab’ te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri’ ne göre Dayanım Oranı ‘SR’ değeri; 67. Katman alt yüzey için ‘1.60’, 67. Katman üst yüzey için ‘1.60’ olarak bulunmaktadır.

C6 modeli analiz sonucu $[0_6/(45/-45)_{14}]_s$: Teorik hesaplara göre, bu modelde Tsai-Wu SR değeri 61 numaralı katmanda minimumdur ve bu değer 1.5847’ dir. Bu tasarımda sonlu eleman modelde kritik katman olan 61 numaralı katman’ daki gerilme bileşenleri Çizelge 3.11’ daki gibidir.

Çizelge 3.11 : C6 Modelinde Kritik Katmandaki Gerilme Bileşenleri ve Tsai-Wu Dayanım Oranı Değerleri

σ_{11} (MPa) Katman 61 (alt yüzey)	σ_{11} (MPa) Katman 61 (üst yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 61 (alt yüzey)	σ_{22} (MPa) Katman 61 (üst yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 61 (alt yüzey)	τ_{12} (MPa) Katman 61 (üst yüzey)	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 61 Alt Yüzey	Tsai-Wu SR(Dayanım Oranı) Katman 61 Üst Yüzey
-104.58	-105.16	4.74	4.76	-875e-3	-910e-3	1.4871	1.4800

Çizelge 3.11'deki değerleri Matlab'te lokal eksenlerdeki gerilme bileşenleri olarak girdiğimizde; Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Kriteri'ne göre Dayanım Oranı 'SR' değeri; 61. Katman alt yüzey için '1.49', 61. Katman üst yüzey için '1.48' olarak bulunmaktadır. Şekil 3.24 'te analizler yapılırken sonuçların okunduğu ortak referans node değeri görülmektedir.

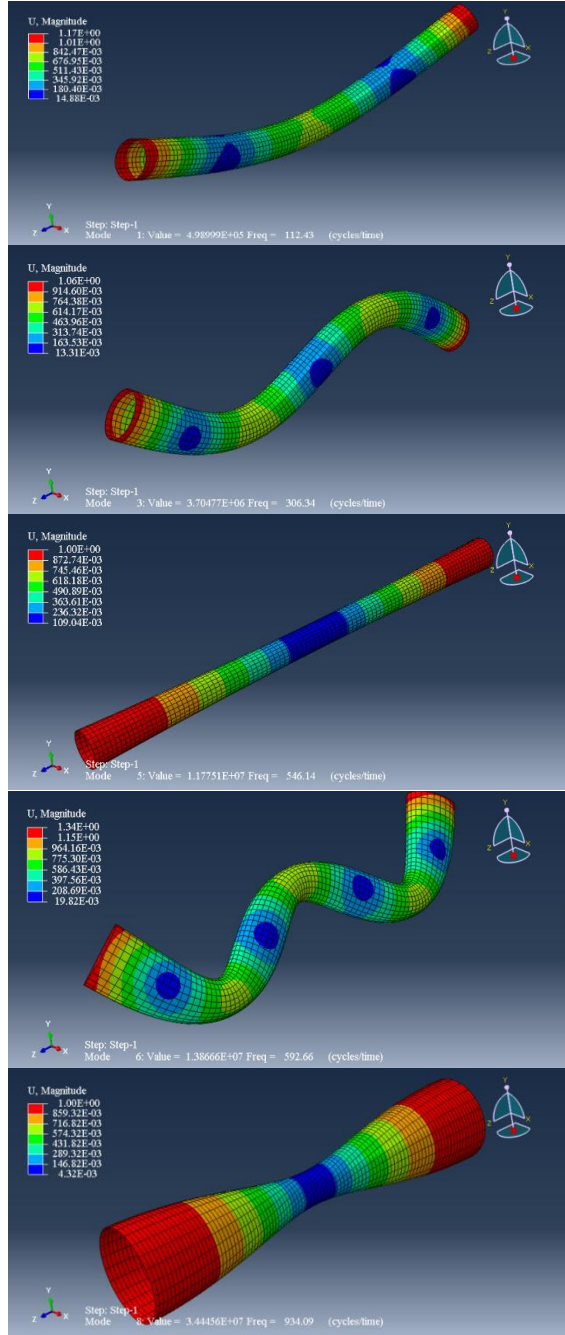


Şekil 3.24: Statik analiz sonuçlarının okunduğu düğüm noktası

3.3 Serbest Titreşim Analiz Sonuçları

3.3.1 B modeli modal analiz sonuçları

B2 Modeli : İlk 5 modu ve frekans değeri Şekil 3.25 'teki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.12 'deki gibidir.

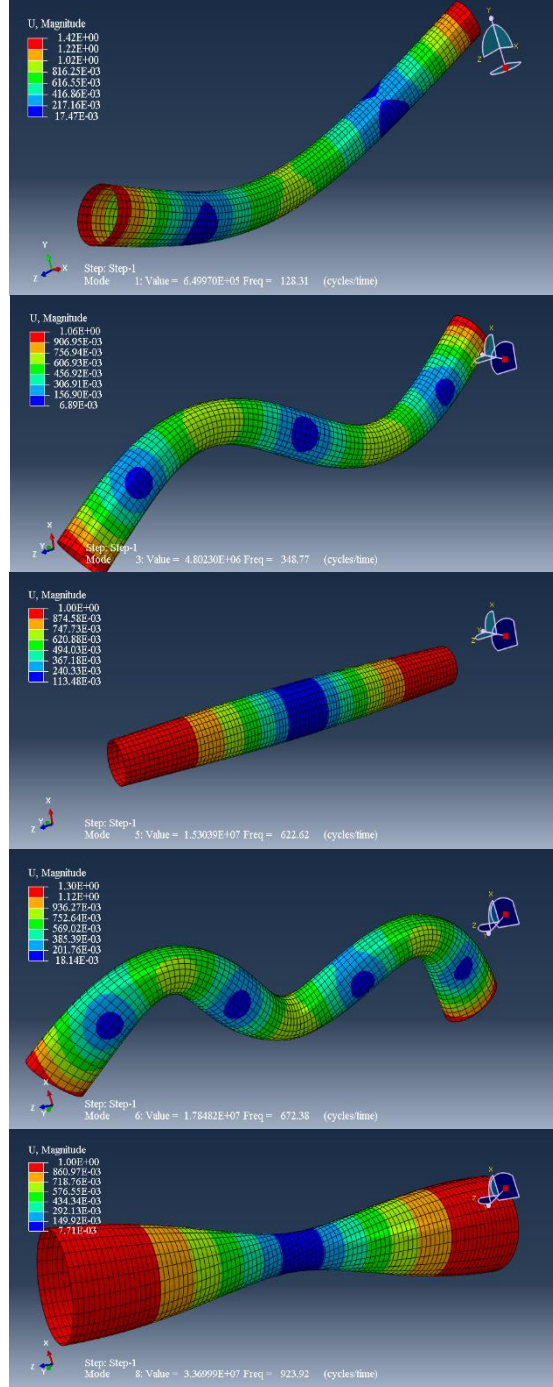


Şekil 3.25 : B2 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.12 : B2 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS(Hz)
1. Mod	112.43
2. Mod	306.34
3. Mod	546.14
4. Mod	592.66
5. Mod	934.09

B3 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.26 ‘daki gibidir. Mod Değerleri Çizelge 3.13 ‘teki gibidir.

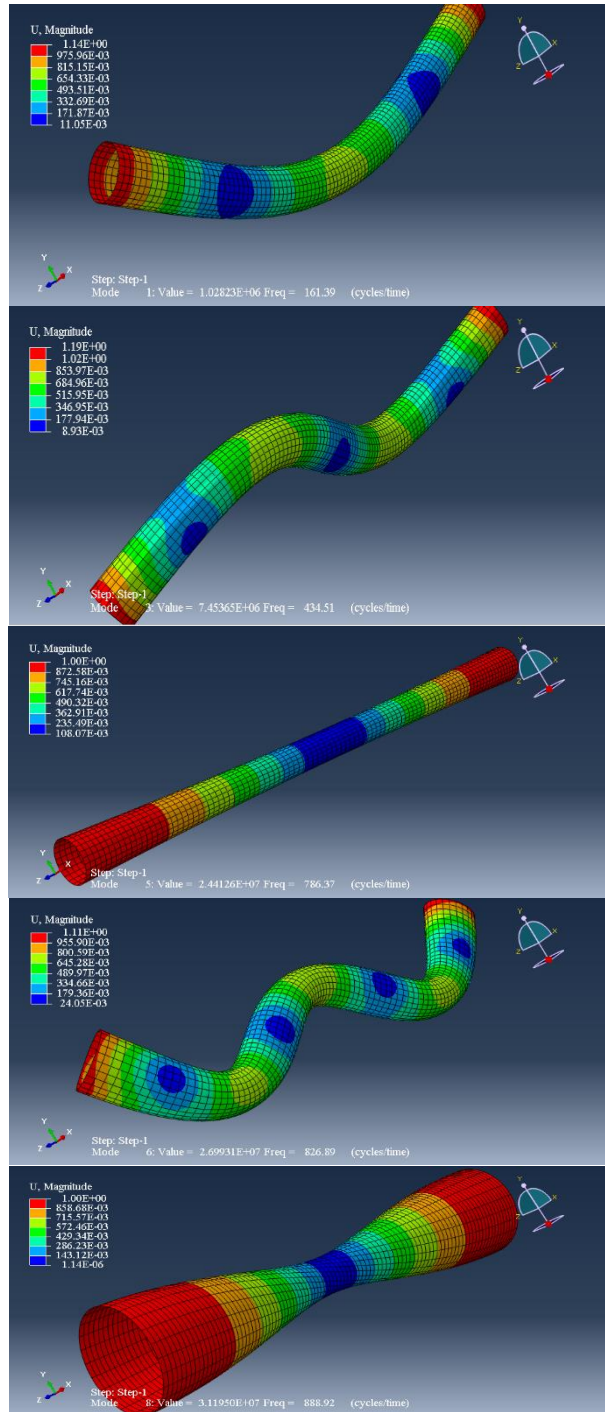


Şekil 3.26 : B3 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.13 : B3 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	128.31
2. Mod	348.77
3. Mod	622.62
4. Mod	672.38
5. Mod	923.98

B4 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.27 ‘deki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.14 ‘teki gibidir.

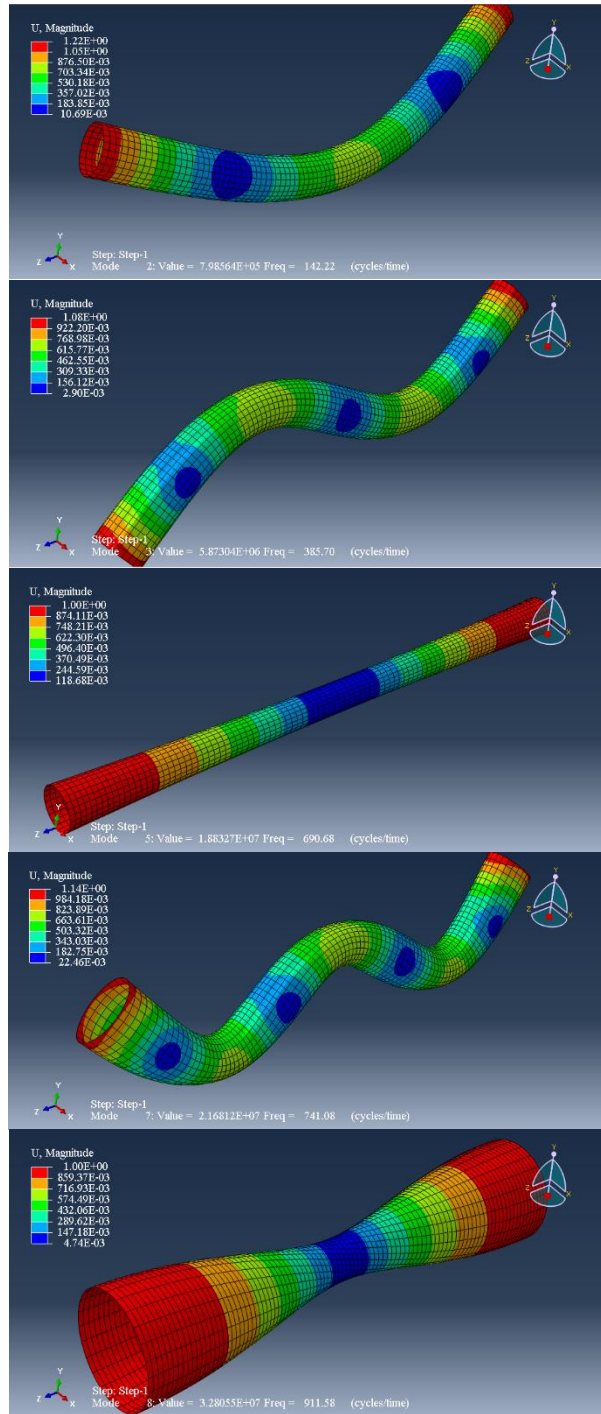


Şekil 3.27 : B4 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.14 : B4 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	161.39
2. Mod	434.51
3. Mod	786.37
4. Mod	826.89
5. Mod	888.92

B5 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.28 ‘deki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.15 ‘teki gibidir.

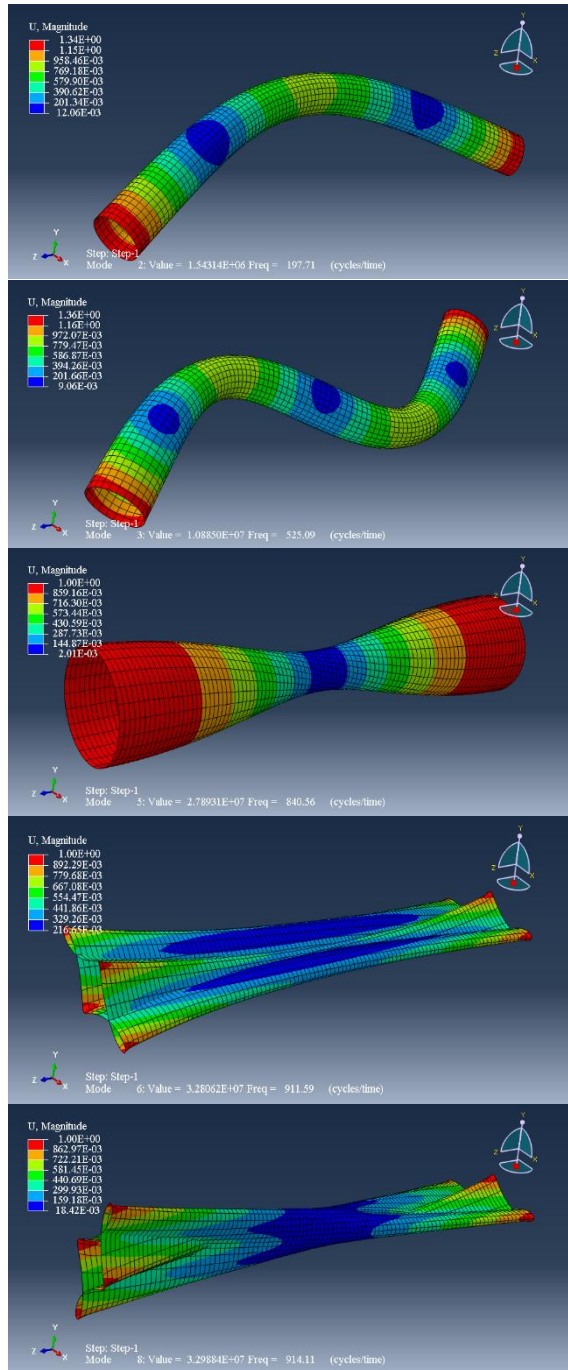


Şekil 3.28 : B5 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.15 : B5 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	142.22
2. Mod	385.70
3. Mod	690.68
4. Mod	741.08
5. Mod	911.58

B6 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.29'daki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.16 'daki gibidir.



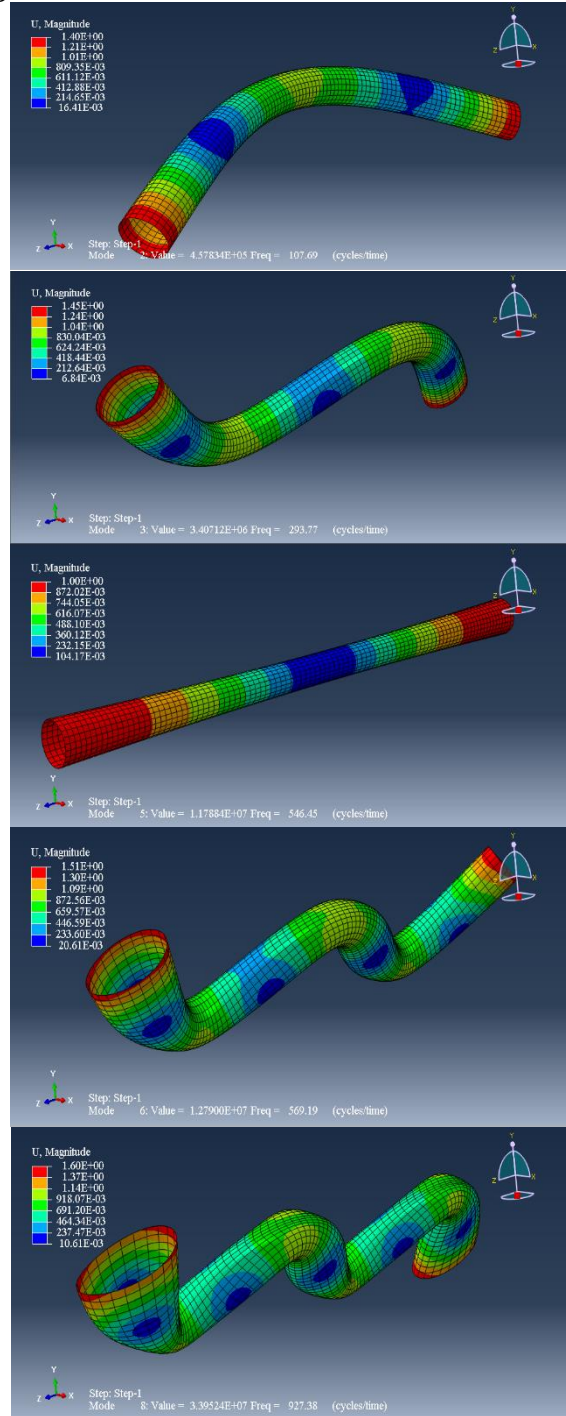
Şekil 3.29 : B6 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.16 : B6 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	197.71
2. Mod	525.09
3. Mod	840.56
4. Mod	911.59
5. Mod	914.11

3.3.2 C modeli modal analiz sonuçları

C2 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.30 ‘daki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.17 ‘deki gibidir.

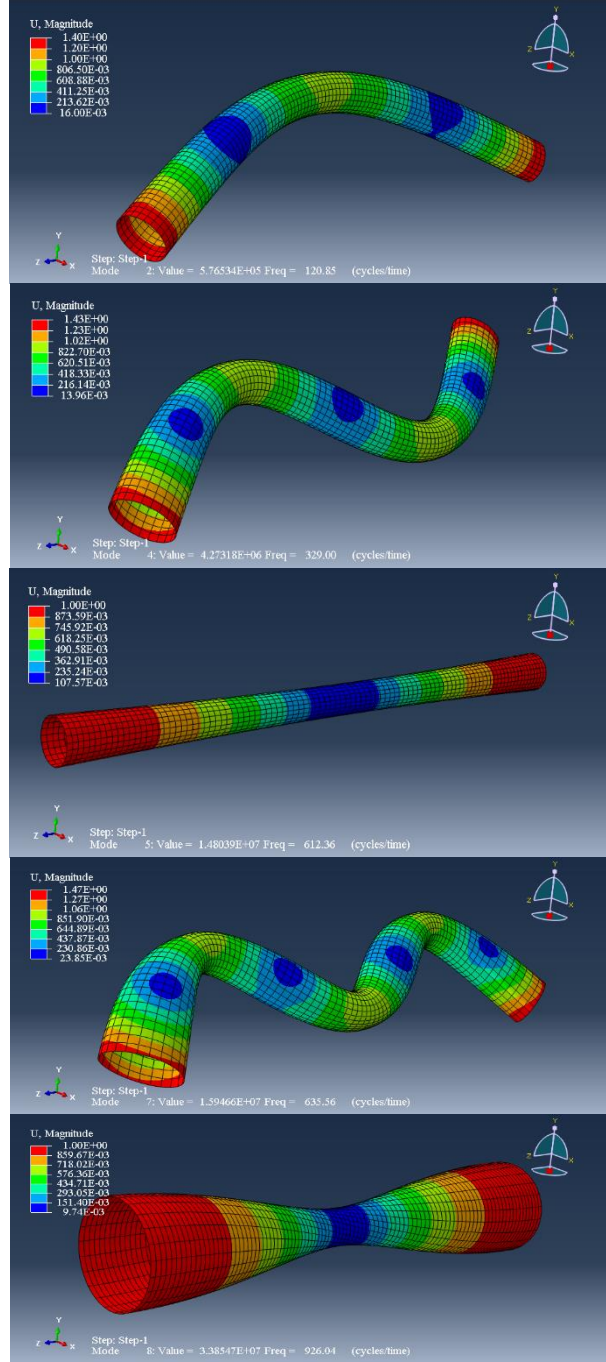


Şekil 3.30 : C2 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.17 : C2 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	107.69
2. Mod	293.77
3. Mod	546.45
4. Mod	569.19
5. Mod	927.38

C3 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.31 ‘deki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.18 ‘deki gibidir.

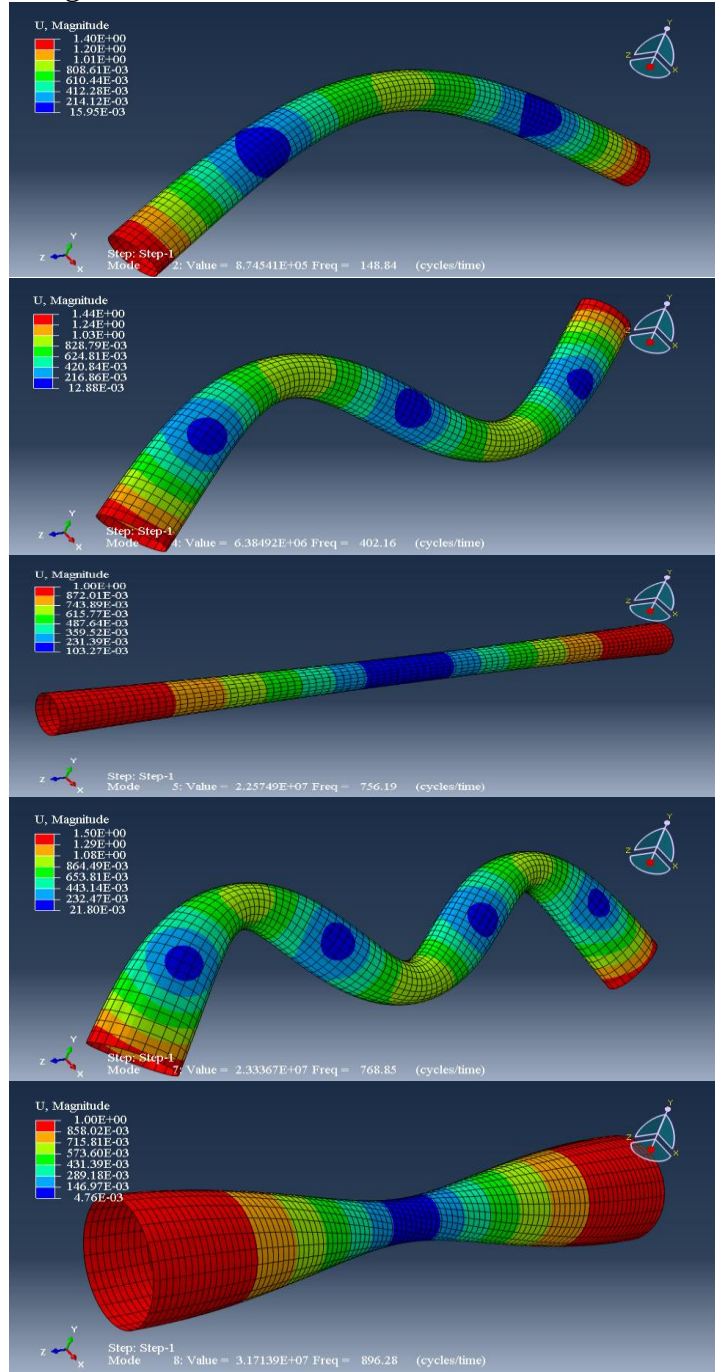


Şekil 3.31 : C3 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.18 : C3 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	120.85
2. Mod	329.00
3. Mod	612.36
4. Mod	635.56
5. Mod	926.04

C4 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.32 ‘deki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.19 ‘daki gibidir.

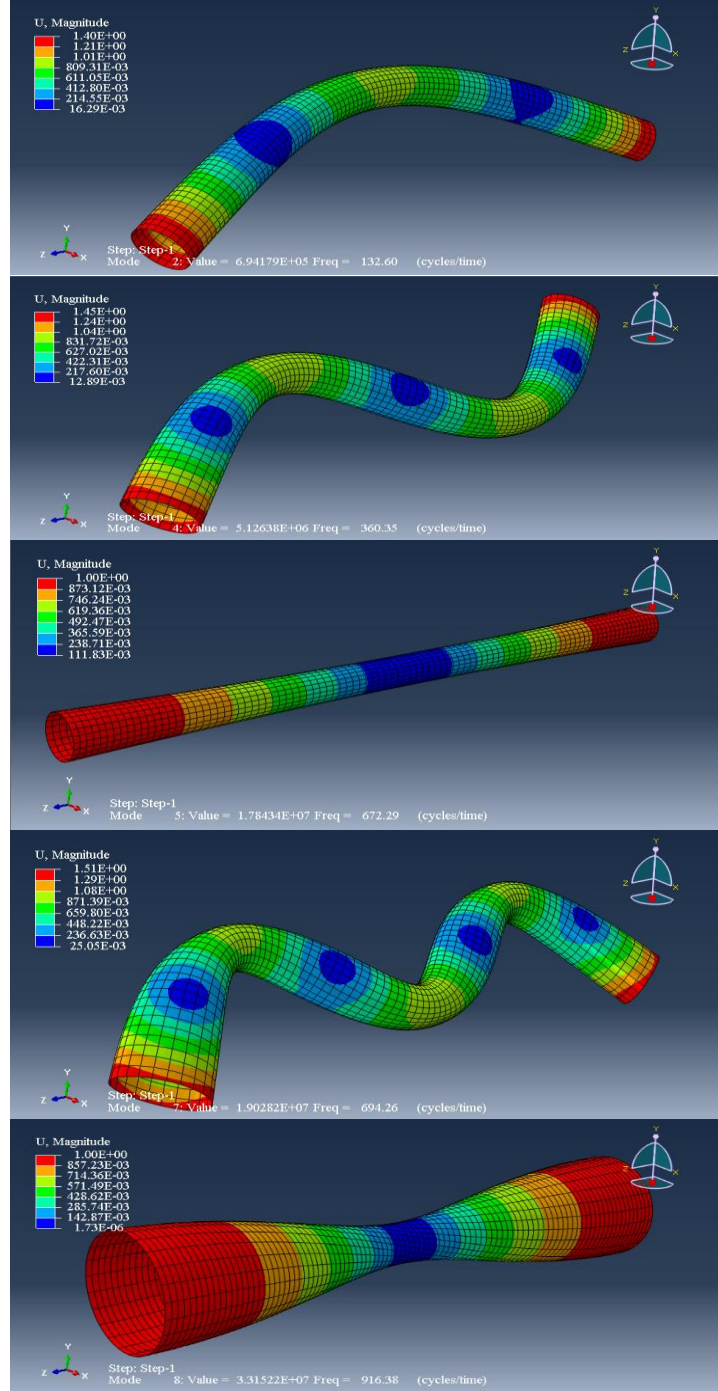


Şekil 3.32 : C4 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.19 : C4 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	148.84
2. Mod	402.16
3. Mod	756.19
4. Mod	768.85
5. Mod	896.28

C5 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.33 ‘teki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.20 ‘deki gibidir.

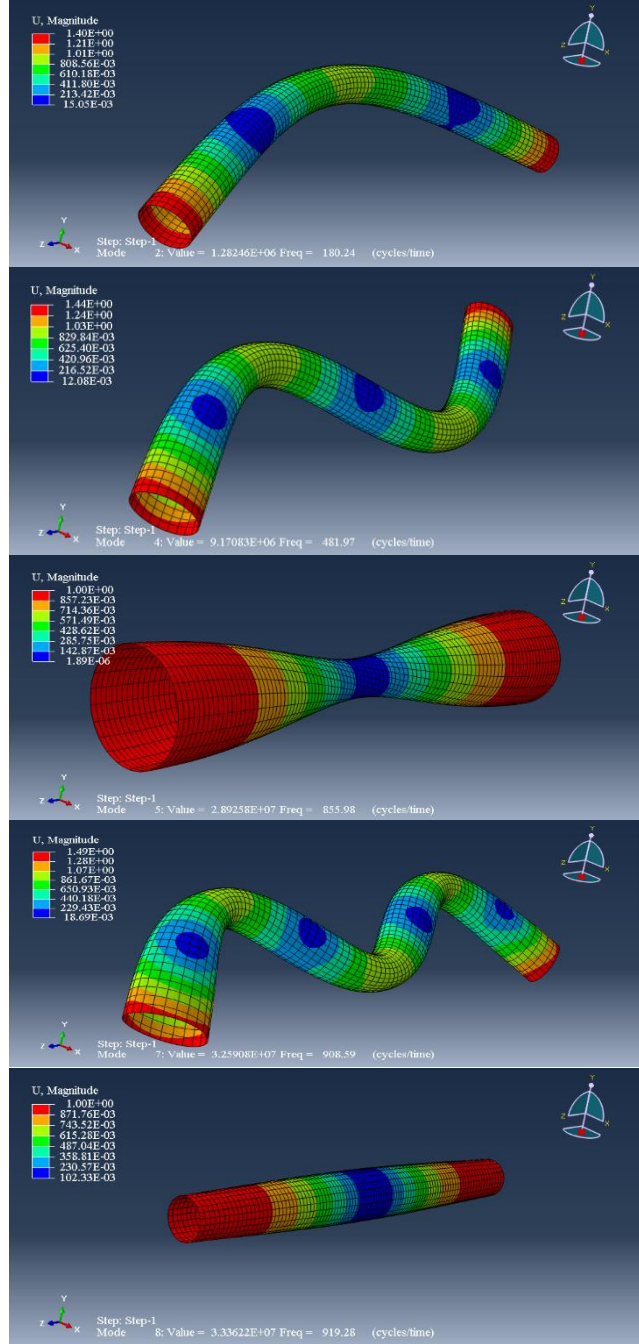


Şekil 3.33 : C5 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.20 : C5 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	132.60
2. Mod	360.35
3. Mod	672.29
4. Mod	694.26
5. Mod	916.38

C6 Modeli : İlk 5 mod şekli ve frekans değeri Şekil 3.34 ‘teki gibidir. Mod değerleri Çizelge 3.21 ‘deki gibidir.



Şekil 3.34 : C6 Modeli ilk 5 modu

Çizelge 3.21 : C6 modelinin ilk beş serbest titreşim frekans değeri çizelgesi

MOD	FREKANS (Hz)
1. Mod	180.24
2. Mod	481.97
3. Mod	855.98
4. Mod	908.59
5. Mod	919.28

4. KOMPOZİT TÜP KATMAN ORYANTASYON OPTİMİZASYONU

Çalışmanın bu bölümünde katman sıralaması ve oryantasyon açıları konusunda optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tsai-Wu ilk katman hasarı kriteri çalışmanın bu bölümünde yine hasar kriteri olarak belirlenmiştir. Buna ilave olarak, eğilme doğal frekansı ve kritik burkulma torku kompozit shaft tasarımı sürecinde, diğer önemli parametrelerdir. Katman sıralaması ve elyaf oryantasyonu Tsai-Wu ilk katman hasarı indeksi, doğal eğilme frekansı ve kritik burkulma torku değerlerini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte optimizasyon çalışmasında her bir katmanın kalınlığı sabit bir değişken olarak öngörülmüştür. Böylelikle tasarım parametreleri oryantasyon açısı yani θ ve katman sıralamasıdır. Burada amaç fonksiyonu olan üç nicelik yani, kritik burkulma torku, doğal eğilme frekansı ve Tsai-Wu ilk tabaka hasar indeksi'nin aynı anda maksimizasyonu hedeflenmiştir. Son olarak ise farklı katman sıralamaları göz önünde bulundurularak bir değerlendirme yapılmış ve çalışma sonuçlandırılmıştır.

4.1 Optimizasyon Çalışması ile İlgili Literatür Araştırması

Bir önceki bölümde açıklandığı gibi çalışma kompozit shaft tasarım süreci ile ilgili bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Benzer çalışma konularını incelediğimizde, literatürde optimizasyon hususunda lineer ve lineer olmayan yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli çalışmaların yürütüldüğünü görmekteyiz. Bunlar aynı zamanda 'stokastik' ve 'heuristik' yaklaşımlardır. Bu yöntemler arasında en çok tercih edilmiş olanlar genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyon metodlarıdır.

En popüler olan yöntemlerden biri olan genetik algoritmadır ve bu yöntem 'stochastic search' metoduna dayanmaktadır. Bahsedilen yöntemler esasında özelleşmemiş genel yöntemlerdir sürekli, süreksiz ya da 'türevlenemeyen' birçok problem türü üzerinde uygulama yapılmasına imkan sağlamaktadır. Buna ilaveten bu yöntemler lokal sonuçlar veren, sürekli değişken optimizasyon algoritmaları yöntemlerin aksine global optimum sonuçları vermektedir.

Genetik algoritma, biyolojik evrim ve Darwin'in doğal seçim teorisine kısmen paralellik göstermektedir. Bu yöntemde temel olarak hesaplamalar tasarım bağımsız değişkeni için uygun olabilecek ve rastgele seçilmiş bir tasarım kümesi ile başlatılır. Her bir tasarım bir uygunluk değerine sahiptir. Bu değerler kısıtsız problemler için amaç fonksiyonu ile kısıtlandırılmış problemler için ise sınır fonksiyonu ile belirlenmektedir. Bu terimlerin yanı sıra çeşitli terimler de bu yöntem dahilinde kullanılmaktadır. Örneğin, popülasyon, jenerasyon, kromozom, gen, 'design representation' [16].

Parçacık sürüsü optimizasyon metodunda, genetic algorithmandan farklı olarak, birçok biyolojik parameter ortadan kalkar ve parçacıkların popülasyonu olarak adlandırılan çözümlerle çalışır. Bu parçacıklar belirli bir formülasyona göre arama uzayında hareket ederler ve parçacık hareketlerine arama uzayındaki en iyi sonuç rehberlik etmektedir. En iyi konum bulunduğu tüm parçacıklar bu noktaya yönelme eğilimi gösterirler. Bu süreç birçok kez tekrarlanır ancak global optimum değerlerin bulunması garanti edilmez. İterasyon sayısının artırılması optimum yakınsama şansını artırmaktadır [17].

Bu tezde, grafit/epoksi malzemeden yapılmış bir kompozit şaft ile ilgilenilmiştir ve bu şaft ile ilgili bazı tasarım parametreleri Çizelge 4.1 'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kompozit Şaft Temel Parametreleri

İç Yarıçap (mm)	Uzunluk (mm)	Uygulanan Tork (Nm)	Katman Kalınlığı (mm)	Katman Sayısı
70	1910	35000	3	24

4.2 Hesaplama Sürecinde Kullanılan Teori

Hesaplamalarda tüm içerik teorik hesaplamalara dayanmaktadır. Bu teorik hesaplamalar; kompozit katman teorisi, Tsai-Wu ilk tabaka hasarı hesaplamaları ve son olarak parçacık sürüsü optimizasyonu hesaplamalarına dayanmaktadır.

İlk bölümde kompozit katman teorisi ile ilgili detaylar verilmişti. Bu hesaplamalara ait matlab programı ile hazırlanan akış diyagramı Şekil 4.1 'deki gibidir.



Şekil 4.1 : Kompozit Katman Teorisi Matlab Akış Diyagramı

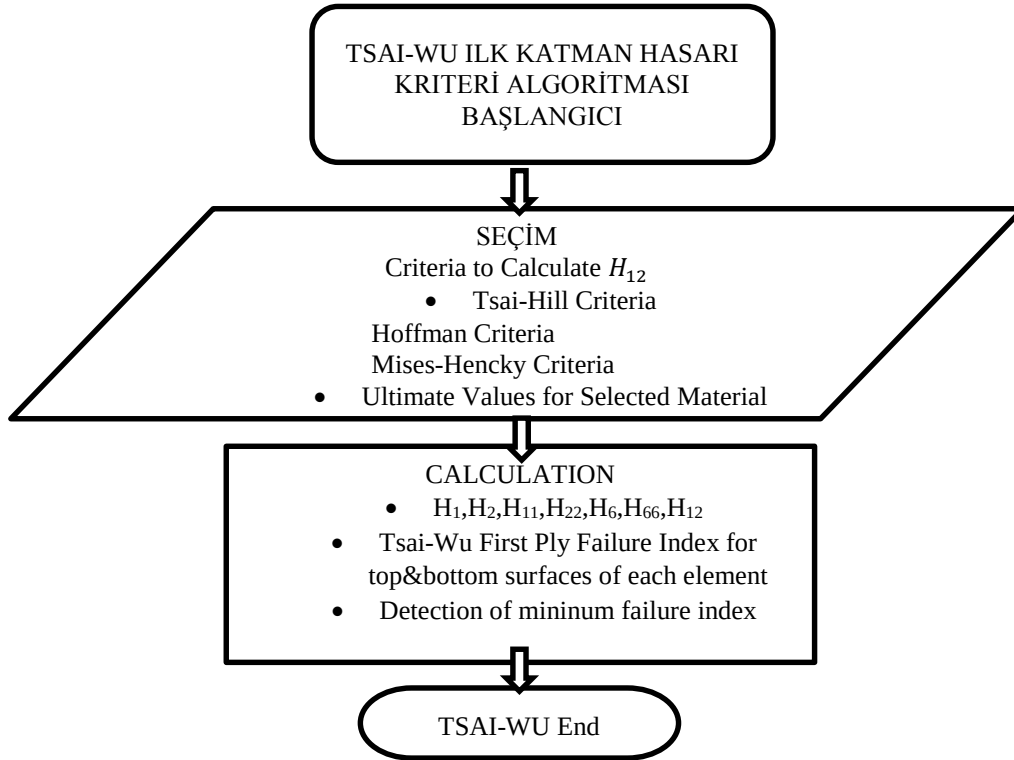
Şekil 4.1’de matlab’te oluşturulan kompozit katman teorisi akış diyagramı görülmektedir. Bu diyagram daha sonraki bölümlerde, özellikle parçacık sürüsü optimizasyonu konusunda referans olarak kullanılacaktır.

4.3 Tsai-Wu İlk Katman Hasarı Metodu Matlab Akış Diyagramı

İyi bir yapısal tasarım malzemelerin etkin ve güvenli kullanımlarını gerektirir, teorik veriler, yapının gerilme durumlarında hasar kriterlerini belirlemede aktif rol oynar. Ancak burda dikkat çekilmesi gereken duru hasar kriterlerinin deneyler vasıtasıyla doğrulanması gerektiğidir [2].

Bu tezde, hasar durumunu belirlemede, Tsai-Wu ilk katman hasarı kriteri kullanılmıştır. Tsai-Wu ilk tabaka hasarı kriterinin detayları daha önceki bölümlerde verilmiştir.

Verilmiş olan hesap prosdüründe matlab algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 4.2 ‘de verilmiştir. Bu diyagram parçacık sürüsü optimizasyonu uygulanırken öncelikli olarak kullanılmıştır.



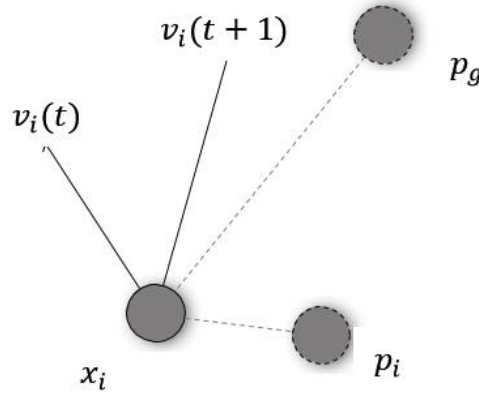
Şekil 4.2 : Tsai-Wu ilk tabaka hasarı matlab akış diyagramı

4.4 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve Matlab Akış Diyagramı

Parçacık sürüsü optimizasyonu, numerik problemlerin çözümleri için optimum veya optimuma yakın değerleri veren bir algoritmadır. PSO çeşitli optimizasyon problemlerinde kolaylıkla uygulanabilir ve seri bir şekilde ispatlaması yapılabilir.

PSO, Kennedy ve Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirilmiştir [9] ve sanal yaşamsal metodolojilerden ve evrimsel algoritmalarından esinlenilmiştir. Esasen, parçacık sürüsü optimizasyonu kuş, balık gibi sürülerden esinlenilmiştir ve bununla birlikte bu sürü tipleri bir tür evrimsel algoritmalara; genetik algoritma ve evrimsel

algoritmaya parçacık bazında benzerlik göstermektedir. Şekil 4.3 ‘te parçacıkların hız ve konum vektörlerinin ilk ve sonraki iterasyonda nasıl yayıldığı görülmektedir.



Şekil 4.3 : Konum ve Hız Vektörleri

PSO uygulamasında, her çözüm, arama uzayında bir parçacık anlamına gelmektedir. Her parçacık bir uygunluk değerine ve uygunluk fonksiyonu ile belirlenen ve parçacıklara yön veren bir hız bilgisine sahiptir. Parçacıklar, problemin çözüm uzayındaki optimum değere sahip olan parçacığı takip ederler.

PSO algoritması bir grup rastgele sayı oluşturularak başlatılır, en uygun değer seçilir. Her bir iterasyonda, her bir parçacık en iyi değere göre güncellenir. En büyük veya en küçük değerlerden birisi parçacık için en iyi uygunluk değeri olarak seçilir ve bu değer parçacığın ‘pbest’ yani en iyi değeri olarak seçilir. Bir diğer en iyi değer ise popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip değer olarak seçilir ve ‘gbest’ olarak adlandırılır.

N sayıda parçacık ve D sayıda parametre için, popülasyon matrisi şu şekilde ifade edilir,

$$x = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nD} \end{bmatrix}$$

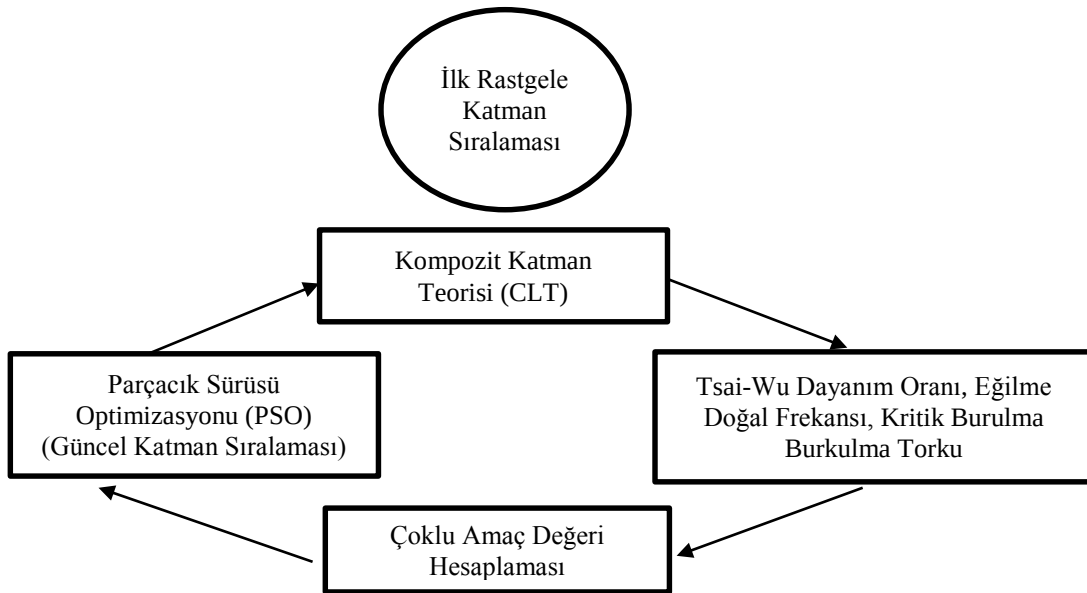
X matrisi bir i’nci parçacığı göstermektedir ve şu şekilde gösterilir, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, pbest ve gbest ise, $pbest_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$ ve $gbest_i = [p_1, p_2, \dots, p_D]$ olarak gösterilir. Hız vektörü her bir konumdaki değişim miktarını gösterir ve $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ şeklindedir. Bu iki en iyi değer belirlenmesinin ardından, parçacık konum ve hızını şu şekilde günceller,

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 rand_1^k (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 rand_2^k (gbest_i^k - x_i^k) \quad (4.1)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.2)$$

4.1 numaralı eşitlikteki ‘rand’ değeri 0,1 açık aralığında bir keyfi sayıyı ifade etmektedir. i parçacık numarasını, k iterasyon sayısını, c_1 ve c_2 parçacıkların pbest ve gbest en iyi değerleri için öğrenme faktörünü ifade etmektedir. c_1 parçacıkları kendisinin, c_2 ise diğer parçacıkların tecrübelerine dayanmaktadır. Öğrenme faktörlerinin küçük değerler seçilmesi, parçacıkların alacağı değerin hedef bölgesi civarında daha uzak noktalara ulaşmasını sağlarken aynı zamanda hedefe konuşlanma süresini artırmaktadır. Bu değerlerin büyük seçilmesi ise hedefe konuşlanma süresini azaltmakla birlikte hedef bölgeden sapmalara yol açabilmektedir. [\[http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php\]](http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php)

Şekil 4.4 hesaplama prosedürünün en genel halini göstermektedir, daha detaylı olan Şekil 4.5’te ise Matlab’teki PSO sürecinin detayları sunulmaktadır. Bu süreç, döngüsel olarak birbirinden bağımsız 3 farklı konseptten oluşmaktadır. Döngü katman yapısı ile ilgili bazı giriş bilgileri ışığında başlatılmaktadır.



Şekil 4.4 : Temel Hesaplama Süreci

4.5 Çoklu Optimizasyon Süreci

Tasarım açısından birden fazla amaç fonksiyonu olması durumunda literatürde bazı yaklaşımlar mevcuttur ve bu amaç fonksiyonlarına ait birden fazla farklı birim ve büyüklük söz konusu olabilmektedir. Bu durum fonksiyon değerlerinin birbirleriyle kıyaslanmasına engel olmaktadır. Böyle bir durumda yapılması gereken şey, bu değerleri aynı boyutta ya da boyutsuz olarak bir arada tutmayı gerektirmektedir. Bununla ilgili olarak bazı yöntemler var olmakla birlikte en seri ve basit çözüm üretebilecek olanı normalizasyon işlemi yapmaktan geçmektedir. Buna göre,

$$f_i^{norm} = \frac{f_i(x) - f_i^0}{f_i^{max} - f_i^0} \quad (4.3)$$

$f_i^{norm}(x)$ değeri 0 ile 1 arasında değişen bir sayıya eşittir. Burada elde edilen değer $f_i^{max}(x)$ ve $f_i^0(x)$ değerlerine dayanmaktadır.

12 numaralı denklem bize üç amaç fonksiyonun normalize edilmiş değerini vermektedir. Problemimizde ele alınan amaç fonksiyonlarının normalize edilmiş değerleri aşağıdaki çizelgede verilmektedir. Tsai-Wu ilk tabaka hasarı indeksi değerini hesaplarken [45/-45], katman sıralaması yapısı bize maksimum hasar indeksi değeri sağlamaktadır. Eğilme doğal frekansı ve kritik burkulma torku değeri için, normalizasyon değerleri (4.5) ve (4.6) numaralı eşitliklerden faydalanarak bulunabilir. Normalizasyon için, maksimum değerler Çizelge 4.2’de listelenmiştir. Çizelge 4.3’teki değerlere 0, 45, -45, 90 sarım açılı katmanlar kullanılarak ulaşılmıştır.

Çizelge 4.2 : Normalizasyon için kullanılacak maksimum değerler

	Tsai-Wu İlk Tabaka Hasar Oranı Değeri	Eğilme Doğal Frekansı (Hz)	Kritik Burulma Burkulma Torku (Nm)
Kabul Edilebilir Bağımsız Maksimum Değer	2.46	237.66	180296.44

4.6 Ağırlıklı Toplam Yöntemi

3 farklı amaç fonksiyonuna sahip olmamızdan dolayı, ağırlıklı toplam metodunu kullanmamız çözüm açısından kolaylık sağlayacaktır. (4.4) numaralı formülasyon çoklu görev optimizasyonu amacıyla en yoğun olarak kullanılan yöntemdir.

$$U = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (4.4)$$

Burada w , ağırlık vektörünü temsil etmektedir, $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ eşitliğini sağlamaktadır. Ayrıca $w > 0$ 'dır. Amaç fonksiyonlarının ağırlıkları bir problemde 0 olarak ele alınacak olması durumunda, zayıf 'Pareto optimal' noktalar oluşur. Ağırlık vektörü değeri doğrudan amaç fonksiyonunun değerine yansımaktadır. Bu durum ağırlıklı toplam metodunun sıradan yanlarından biridir. Eğer tüm ağırlık değerleri ihmal edilir ya da her birinin değeri 1 olarak düşünülecek olursa, ayrı ayrı tüm amaç fonksiyonları aynı etkiyi gösterecektir. Ağırlık değerleri iki farklı amaca hizmet etmektedir. Birincisi, problem çözümü öncesi probleme özgü özelliklerin etkisini görmek; ikincisi ise sistematik olarak w değişimi sonrası bir pareto optimal set oluşturmak. Çizelge 3 problemimizdeki amaç fonksiyonları için ağırlık değerlerini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında, Tsai-Wu hasar indeksi değeri, kompozit katman teorisi ve sonrasında hasar hesabı sürecine dayanmaktadır. Geri kalan iki amaç fonksiyonu ise belirli sınır koşulları altında basitleştirilmiş formülasyonlardır.

Burada eğilme doğal frekansı;

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_x I}{m L^4}} \quad (4.5)$$

Kritik burulma burkulma tork değeri;

$$T_c = (2\pi r_m^2 t)(0.272)(E_x E_y^3)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{t}{r_m}\right)^{3/2} \quad (4.6)$$

İle ifade edilmektedir. Ağırlık değerleri Çizelge 4.3 'te görülmektedir.

Çizelge 4.3 : Her bir amaç fonksiyonu için ağırlık değerleri

	Tsai-Wu İlk Tabaka Hasar İndeksi	Eğilme Doğal Frekansı	Kritik Burulma Burkulma Torku
Ağırlık Katsayısı	0.6	0.2	0.2

4.7 Problem Tanımı ve PSOA Uygulaması

Tezin bu bölümünde yer alan optimizasyon çalışması yalnızca katman sıralaması hususuyla ilgilidir ve çalışma öncesinde bazı tasarım değişkenlerinin değerleri çözümün güvenilirliği açısından uygun seçilmelidir. Problemimizde, katman sayısı ve katman kalınlığı değerleri sabit değişkenler olarak ele alınmıştır. Bu değişkenlerin sabit olarak değerlendirilmesinin sebebi ilgilenilen tasarımın üretim süreciyle ilgilidir ve bu bölümü takip eden bölümlerde bu husustaki detaylar verilmiştir.

4.8 Parçacık Sayısının Belirlenmesi

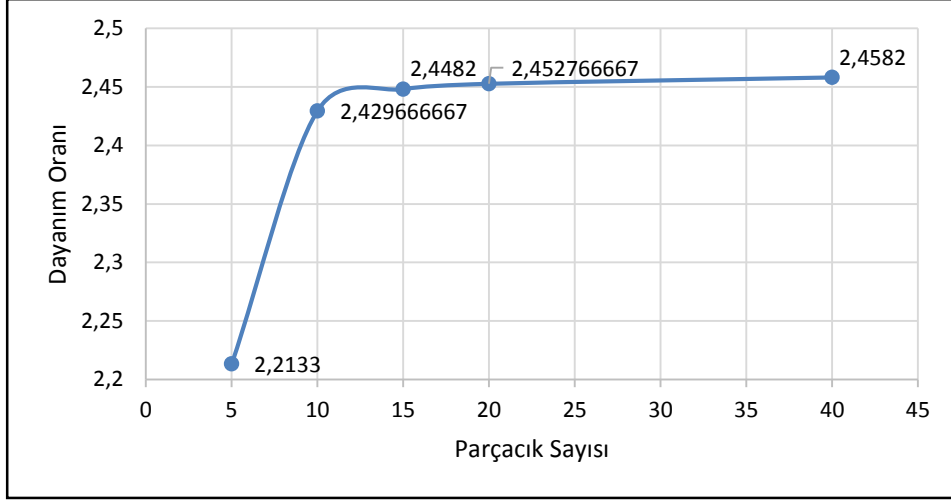
PSOA uygulamasında en önemli unsurların başında parçacık sayısı gelmektedir. Bu sayı problemin karmaşıklık durumuna göre artabilmekte ya da azalabilmektedir. 10-20 parçacık birçok problem tipi için yeterli gelmektedir ancak ilgilenen problem zorlaştıkça bu değer 100-200 'e ulaşabilmektedir. [10]

Çalışmamızda parçacık sayısı belirlenirken $[(\theta_i/-\theta_i)_6]_s$ katman diziliminden yola çıkılmıştır. Yani burada 6 farklı oryantasyon açısı söz konusudur ve amacımız 100 iterasyonla minimum olan Tsai-Wu ilk tabaka hasar indeksi değerini maksimize etmektir. Genel bir uygulama olduğundan öğrenme faktörü 0.2 olarak seçilmiştir. Çizelge 4.4' te parçacık sayısına bağlı olarak elde edilen Tsai-Wu ilk tabaka hasar indeksi değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.4 : Parçacık sayısı ve hasar indeksi değerleri

Parçacık Sayısı	Minimum Tsai-Wu İlk Tabaka Hasar İndeksi Değeri (Üç Deney Ortalaması)
5	2,2133
10	2.4297
15	2.4482
20	2.4528
40	2.4582

Şekil 4.5 'de parçacık sayısına bağlı hasar indeksi dağılım grafiği görülmektedir.



Şekil 4.5 : Parçacık sayısı ve hasar indeksi dağılımı

Şekil 4.5 ‘ten de görüldüğü gibi, 40 parçacık hesaplama sürecinin geri kalanını gerçekleştirmek için yeterlidir.

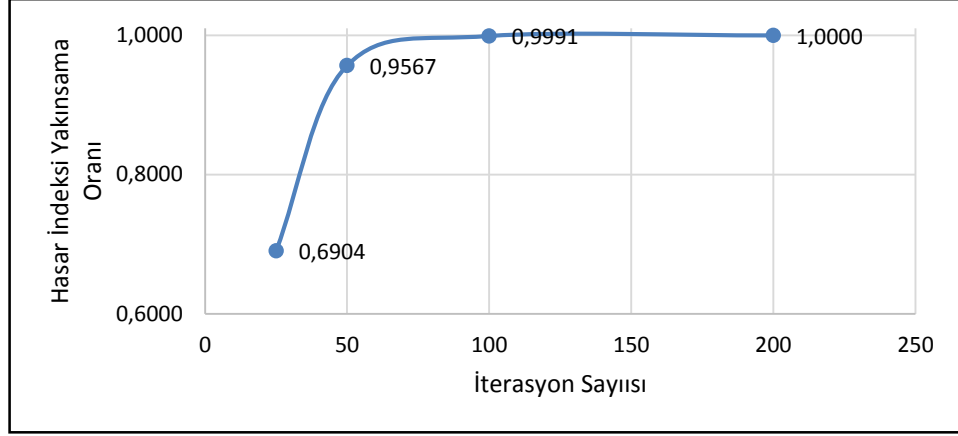
4.9 İterasyon Sayısının Belirlenmesi

İterasyon sayısı PSOA uygulaması için bir diğer önemli değişkendir ve hesaplama sürecinde parçacıkların yakınsama göstermesi açısından bu değişken önemli bir konuma sahiptir. Çizelge 4.5 iterasyon sayısı ve buna bağlı hasar indeksi değerini göstermektedir. Bu adımda hesaplama yapılırken parçacık sayısı 40 değerinde, öğrenme faktörü değerleri ise 0.1 sabit değeri olarak ele alınmıştır. Diğer değişkenlerin değerleri ise sabittir.

Çizelge 4.5 : İterasyon sayısı ve hasar oranı değerleri

İterasyon Sayısı	Minimum Tsai-Wu İlk Tabaka Hasar İndeksi Aralığı	Yakınsama Oranı
25	[2.0828 – 2.3923]	69%
50	[2.3991 – 2.4424]	96%
100	[2.4624 – 2.4633]	99%
200	[2.4626 – 2.4626]	100%

Çizelge 4.5 ’te yakınsama gösteren ve yakınsama göstermeyen hasar oranına bağlı iterasyon sayısı değerleri görülmektedir.



Şekil 4.6 : İterasyon sayısı ve yakınsama oranı dağılımı

Şekil 4.6 ‘da 200 iterasyon sayısının, hesaplama sürecinin devamının sağlanması için yeterli olduğu görülmektedir.

4.10 Farklı Katman Sıralamaları için Çözümler

Bu adımda, bilinen 3 farklı katman sıralaması için çözümler sunulmaktadır. Bunlar; simetrik, simetrik ve dengeli, rastgele katman dizilimleridir.

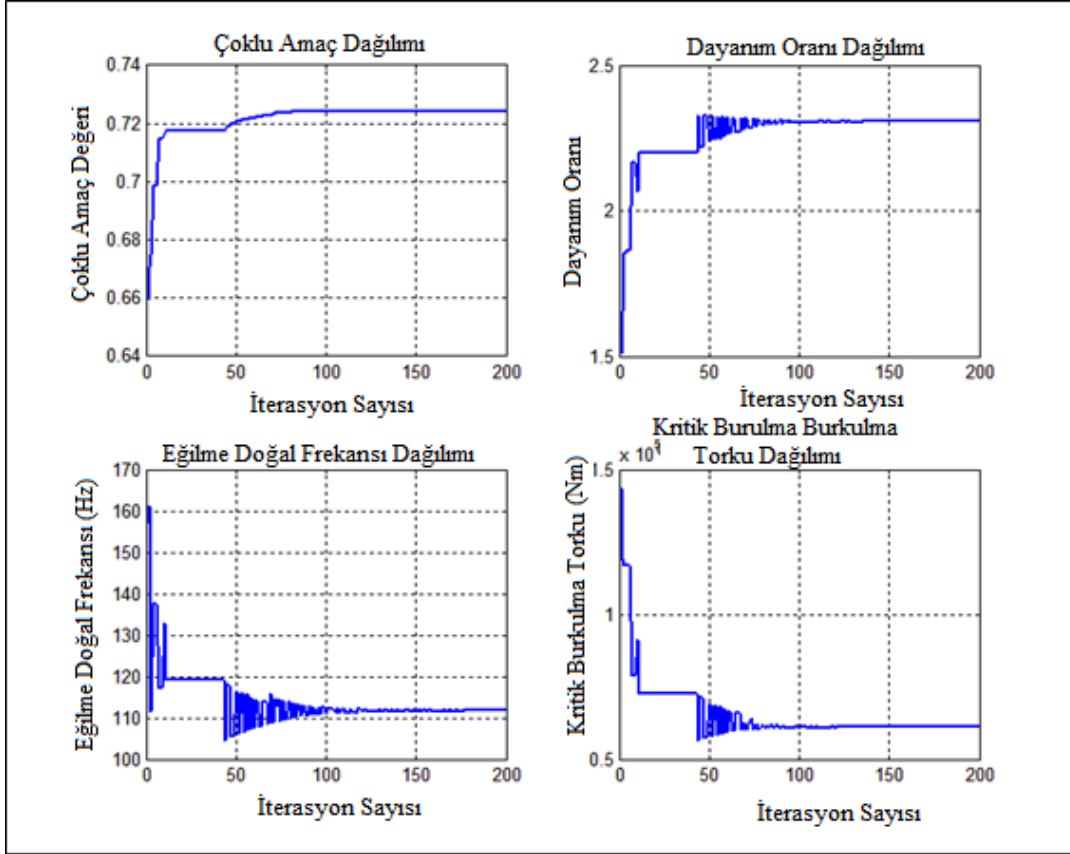
4.10.1 Simetrik Katman Sıralaması

Simetrik oryantasyona sahip bir katman sıralaması oluşturulan yapının yarı kesiti baz alındığında sarım açısı değerlerinin bir simetrik düzene sahip olmasını gerektirmektedir. Bu durum, $[\theta_1/\dots/\theta_{12}]_s$ yapısıyla ifade edilebilir ve 12 bağımsız değişkenin varolduğu görülmektedir. Matlab’ te oluşturulan kodda her bir rastgele değişken ilk olarak “randi([-90 90],1,1)” komutuyla atanmaktadır. Buna göre değişkenler ilk durumda -90 ile 90 arasında değişen bir tamsayı olacaktır. PSOA uygulaması sonucunda elde edilen değerler aşağıdaki çizelgedeki gibi oluşmaktadır. Çizelge 4.6 ‘da simetrik durum için matlab sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.6 : Simetrik durum için sonuçlar

Katman Sıralaması	$[47/45/34/26/30/-38/51/27/-26/-51/-28/-39]_s$
Çoklu Görev Değeri	0.7242
Optimize Edilmiş Tsai-Wu İlk Katman Hasar Oranı	2.31
Optimize Edilmiş Eğilme Doğal Frekansı (Hz)	111.7
Optimize Edilmiş Burulma Burkulma Torku (Nm)	61048

Çizelge 4.6 ‘da çoklu görev optimizasyonu için 0.7242 olarak görülmektedir. Bu sayı normalize edilmiş amaç fonksiyonları değerleri ile bunlara ait ağırlık değerlerinin çarpılarak birbirine eklenmesiyle ortaya çıkan değerdir. Şekil 4.7 ‘de iterasyon sayısına bağlı amaç fonksiyonu değerleri, simetrik durum için görülmektedir.



Şekil 4.7 : Simetrik Durum için Amaç Fonksiyonları Değerleri Dağılımı

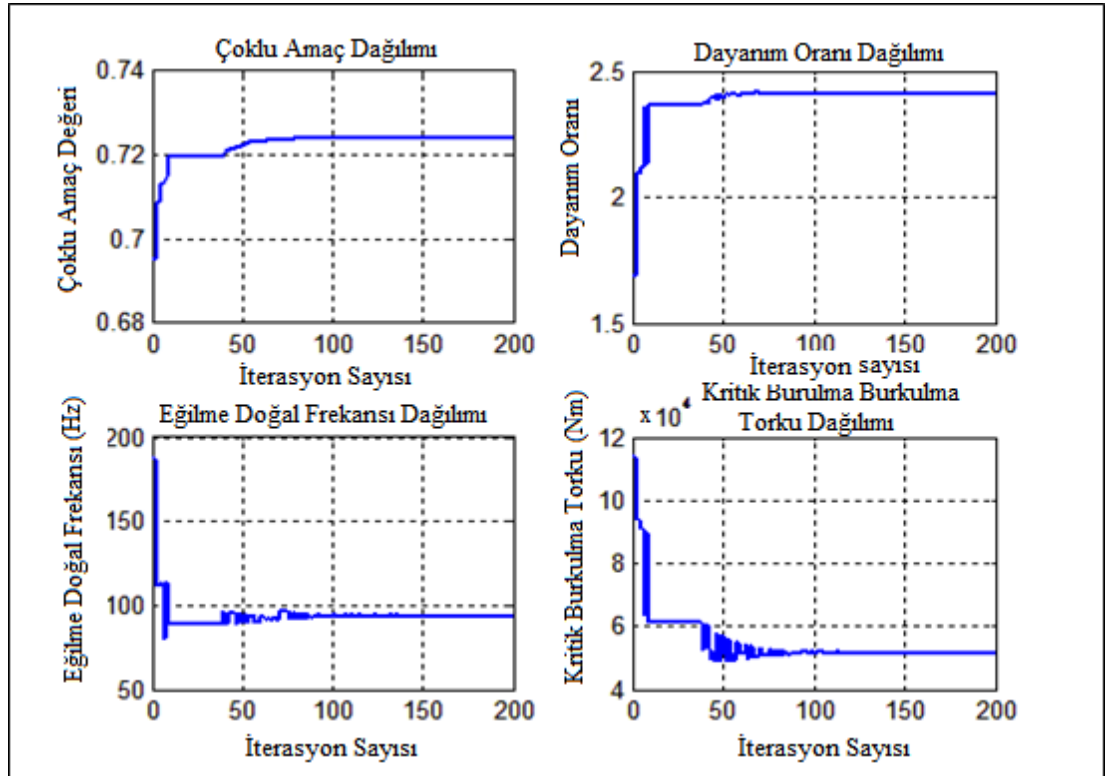
4.10.2 Simetrik ve Dengeli Katman Sıralaması

Simetrik ve dengeli oryantasyon orta katman baz alındığında oryantasyon açısı ve sayısı bakımından simetrik bir yapıya sahiptir. Bu durum $[\theta_1/-\theta_1 / \dots / \theta_6/-\theta_6]_s$ şeklinde ifade edilebilmektedir ve 6 bağımsız değişken gerektirmektedir. Bir önceki yapıda olduğu gibi bağımsız değişkenlerin ilk değerleri “randi([-90 90],1,1)” komutuyla atanmaktadır. PSOA süreci sonucu bu durum için alınan sonuçlar Çizelge 4.7 ‘de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Simetrik & dengeli durum için sonuçlar

Katman Sıralaması	$[-50/50/-39/39/40/-40/-45/45/-46/46/38/-38]_s$
Çoklu Görev Değeri	0.7240
Optimize Edilmiş Tsai-Wu İlk Katman Hasar Oranı	2.41
Optimize Edilmiş Eğilme Doğal Frekansı (Hz)	93.69
Optimize Edilmiş Burulma Burkulma Torku (Nm)	51511

Çizelge 4.7' yi incelediğimizde çoklu görev değeri Çizelge 4.5 ile kıyaslandığında değişim gözlenmemektedir. Ancak, katman sıralama türünün değiştirilmesi Tsai-Wu hasar indeksi değerini olumlu şekilde etkilediği görülmektedir. Şekil 4.8'de iterasyon sayısına bağlı değişim dağılımlarının simetrik ve dengeli dağılım için sonuçları görülmektedir.



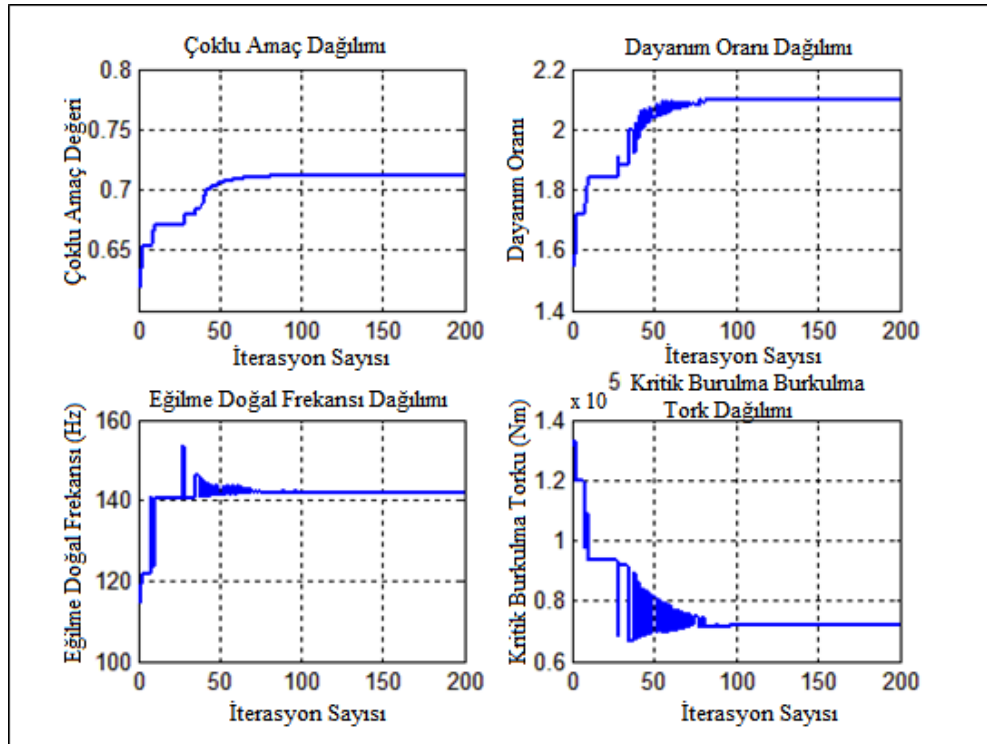
Şekil 4.8 : Simetrik & Dengeli Durum için Amaç Fonksiyonları Değerleri Dağılımı

4.10.3 Rastgele Katman Sıralaması

Rastgele oryantasyon durumunda, diğer iki katman sıralama türünün aksine orta kesitten bir simetri söz konusu değildir. Bu durumda katman sıralaması $[\theta_1/\theta_2/\dots/\theta_{23}/\theta_{24}]$ şeklindedir ve 24 bağımsız değişken gerektirmektedir. PSOA rastgele katman sıralaması uygulamasının sonuçları Çizelge 4.8 'de sunulmuştur. Çizelge 4.8'e bakacak olursak rastgele dağılım çok daha fazla bağımsız değişken içerdiğinden, Tsai-Wu hasar indeksi diğer katman sıralaması tiplerine göre daha düşük bir değere sahiptir. Şekil 4.9' da ise bu durumun iterasyon sayısına bağlı dağılımları sunulmuştur.

Çizelge 4.8 : Rastgele Katman Sıralaması Durumu İçin Sonuçlar

Katman Sıralaması	[60/-62/42/12/-20/42/-45/32/-26/44/24/38/-50/51/4/-51/47/-31/2/24/42/29/40/-26]
Çoklu Görev Değeri	0.7115
Optimize Edilmiş Tsai-Wu İlk Katman Hasar Oranı	2.10
Optimize Edilmiş Eğilme Doğal Frekansı (Hz)	142.03
Optimize Edilmiş Burulma Burkulma Torku (Nm)	71866



Şekil 4.9: Rastgele Durum için Amaç Fonksiyonları Değerleri Dağılımı

4.11 Optimizasyon Çalışmasına İlişkin Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Optimizasyon çalışması süresince, optimum katman sıralamasına ait oryantasyon değerlerine; geometrik, teorik ve üretimsel kısıtlar altında ulaşmayı amaçladık ve 3 farklı katman sıralamasına göre şaft sarım açılarımızın çoklu görev hususunda optimize edilmiş değerlerine ulaşmış olduk. PSOA uygulamasıyla elde edilen sonuçlar, herhangi bir amaç fonksiyonunun global maksimum değeri olduğunu garanti etmez. Ayrıca çoklu görev uygulamasıda da her bir amaç fonksiyonunun değişimine göre değerler kendini güncelleyecektir. Global ekstremum noktalara ulaşamamamızın temel nedenlerinden birisi çözüm metodunun doğasıyla, ikinci olarak ise kullanılması gereken bağımsız değişken sayısının fazla olmasıyla ilgilidir. Farklı katman sıralaması türlerinde birbirine yakın değerler elde edebilmemiz, ya da global optimum değerler elde etmemiz için bazı iyileştirmeler uygulanabilir. Örneğin, parçacık ve iterasyon sayısını artırarak öğrenme faktörünü düşürmek çözüm süresini artırmakla birlikte yine de global noktalara ulaşacağının garantisini vermemektedir.

Bu çalışmanın ilerki safhalarında, ağırlık minimizasyonu ve şaftın dinamik davranışın etkisi de görev fonksiyonlarına dahil edilebilir.

5. TEST KUPONU HAZIRLAMA METODLARI VE KULLANILAN TEST STANDARTI

5.1 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Test Standartı ve Elde Edilen Sonuçları

Mekanik özelliklerin belirlenmesinde ASTM D3039 standardı baz alınarak numuneler hazırlanmış ve test koşulları sağlanmıştır. Bu test metodu yüksek modüllü elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin düzlem içi gerilme özelliklerini belirlemede kullanılır. Burada kompozit malzemeler, dengeli ve simetrik yapıya sahip sürekli ve süreksiz elyaf takviyeli formdadır. [24]

Bu test metoduna göre; ince düz dikdörtgen en kesitli numuneler, mekanik test düzeneği tarafından tutturularak gerilme uygulanır buna eşzamalı olarak uygulanan kuvvetler kaydedilir. Malzemeye ait en yüksek dayanım değeri hasar öncesi uygulanan en büyük kuvvet ile belirlenmiş olur. Testte uygulanan mukavemet yönünde aşağıdaki özellikler de belirlenmiş olur:

- En yüksek çekme/basma/kesme dayanımı,
- En yüksek çekme/basma/kesme gerinimi,
- Malzemenin elastik modülü,
- Poisson oranı,
- Geçiş gerinimi.

Detayları verilen test standartı baz alınarak testler gerçekleştirildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir. Bu değerlerin bulunması süresince test numunelerine MTS test cihazı ile çekme testi uygulanarak, çekme gerilmesi üst limit değeri, basma gerilmesi üst limit değeri, kayma gerilmesi üst limit değeri saptanmıştır. Bununla birlikte test numunelerin bazılarında ise strain-gauge bağlanarak numunelerin çekme, basma ve kayma modül değerleri saptanmıştır.

Yapılan testler sonucunda nihai sonuçlar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Kompozit Numune Test Sonuçları

UD (0 ⁰) Çekme Dayanımı (MPa)	658.93
UD (0 ⁰) Basma Dayanımı (MPa)	330.03
UD (90 ⁰) Çekme Dayanımı (MPa)	11.52
UD (90 ⁰) Çekme Dayanımı (MPa)	41.84
UD (45 ⁰) Kayma Dayanımı (MPa)	8.29
UD (0 ⁰) Modülü (GPa)	61.132
UD (90 ⁰) Modülü (GPa)	3.887
UD (45 ⁰) Kayma Modülü (GPa)	1.489
Poisson Oranı	0.302

5.2 Yoğunluk Sonuçlarının Belirlenmesinde Kullanılan Test Standartı ve Elde Edilen Test Sonuçları

Numune yoğunluklarının belirlenmesinde ASTM D 792-08 standartı kullanılmıştır. Bu test metodu, çeşitli malzemelerin özgül yoğunluğunun ölçülmesinde ve tabaka, çubuk, tüp, veya kalıplı yapıdaki katı plastiklerin yoğunluklarının hesaplanmasında kullanılır. Öncelikle numunelerin atmosferik koşullardaki kütleleri hesaplanarak not edilir, ardından numuneler suya daldırılır. Su içerisindeki kütleler ve özgül ağırlık hesaplanır. [25]

Bir katının özgül ağırlığı ya da yoğunluğu, daha büyük örneklerinin ortalama yoğunluğunun saptanması amacıyla, çeşitli numunelerin uniformluk derecesine göre malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır.

Bu test metodunda, kütleleri 1 ile 50 mg arasında değişen numuneler, sudan daha hafif bir batırıcı yardımıyla suya batırılır. Numunelerin ıslatılmış olması gerekir aksi taktirde numuneler batırılamayabilir. Test numuneleri, tek parça ve test aparatına uygun bir şekil ve büyüklükte olmalıdır. Numunelerin hacimleri 1 cm³ ten daha küçük olmamalı, numune yüzeyleri köşeleri düzgün olmalıdır. Ayrıca numune kalınlıkları 1 gr kütleleri numune için en az 1 mm civarında olmalıdır. Bu durumda 1- 5 gr aralığında kütleyle sahip numuneler uygun görülmektedir. Numuneler oluşturulurken kesme işlemi esnasında basma kuvveti veya sürtünme ısısı gibi yoğunluğu etkileyecek faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. [25]

Eğilme doğal frekans değerleri, bahsedilen test standartı kullanılarak bulunan yoğunluk değeri hesaba katılarak güncellenmiştir. Yoğunluk değeri ile ilgili sonuçlar

Çizelge 5.2 'de verilmiştir. Burada, Suyun sıcaklığı 20.70 °C' de sabit olup, suyun yoğunluğu ise 998.06 kg/m³ olarak alınmıştır. Bununla birlikte, su içindeki sistem kütlesi 12.41 gr olarak ölçülmüştür.

Çizelge 5.2 : Yoğunluk Test Sonuçları

Numune Kodu	Kuru Oda Koşullarında Numune Kütlesi (gr)	Su İçindeki Kütle+Sistem (gr)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Numune Hacmi (cm ³)	Elyaf Hacim Oranı
D-1	1,93	12,79	1,24	1,55	12,44
D-2	1,84	12,80	1,27	1,45	16,24
D-3	1,78	12,78	1,26	1,41	15,19
D-4	1,64	12,76	1,27	1,29	16,62
D-5	1,75	12,77	1,26	1,39	14,65
D-6	1,93	12,76	1,22	1,58	8,66
D-7	1,83	12,75	1,23	1,49	9,73
D-8	2,10	12,77	1,20	1,74	6,33
Elyaf yoğunluğu, 1.79 gr/cm ³ , Matris yoğunluğu, 1.165 gr/cm ³			1,24	1,49	12,48

Çizelge 5.2 neticesinde, üretilen numuneleri yoğunluğu 1243.02 kg/m³ olarak bulunmuştur.

6. KOMPOZİT TÜP VE METAL MAFSAL BAĞLANTI YÖNTEMLERİ

Proje kapsamında gerçekleştirilecek olan önemli çalışmalardan biri de kompozit tüp ile metal mafsalları arasındaki bağlantı tipidir. Bu bölümde, incelenen numune kompozit şaftlardan da esinlenerek, bir sıkı geçme bağlantısı uygulaması ve Yapıştırma bağlantısı uygulaması yapılmıştır.

6.1 Sıkı Geçme Bağlantısı

Sıkı geçme uygulaması, millerin bağlantı kuracak elemanlarının üzerinde çıkıntı ve kama gibi uygulamalara ihtiyaç duymadan mafsallanmasını sağlamaktadır. Sıkı geçme uygulaması, elemanların üzerine gelen gerilmeler hesaplanırken, mil dışarıdan gelen basınç, göbeğe ise içeriden gelen basınç olarak model kurulabilir. Geçme çapına bağlı olarak, basınç ve geçme çapı arasındaki ilişki (6.1) formülünden yararlanarak hesaplanabilir. [26]

$$p = \frac{\delta}{\frac{d}{E_o} \left(\frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} + \nu_o \right) + \frac{d}{E_i} \left(\frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} - \nu_i \right)} \quad (6.1)$$

Burada; d, nominal çapı, d_i milin iç çapını(eğer varsa), d_o göbeğin dış çapını temsil etmektedir. E Young modül, ν ise Poisson oranıdır. o ve i sırasıyla dış eleman(göbek), iç eleman(mil) temsil etmektedir. δ terimi, mil ve göbek arasında çapsal geçme miktarını temsil etmektedir. Bu geçme miktarı milin dış çapı ile göbeğin iç çapı arasındaki farktan bulunur. [3]

$$\delta = d_{shaft} - d_{hub} \quad (6.2)$$

Gerilmenin teğetsel bileşenleri,

$$\sigma_{t,mil} = -p \frac{d^2 + d_i^2}{d^2 - d_i^2} \quad (6.3)$$

$$\sigma_{t,göbek} = p \frac{d_o^2 + d^2}{d_o^2 - d^2} \quad (6.4)$$

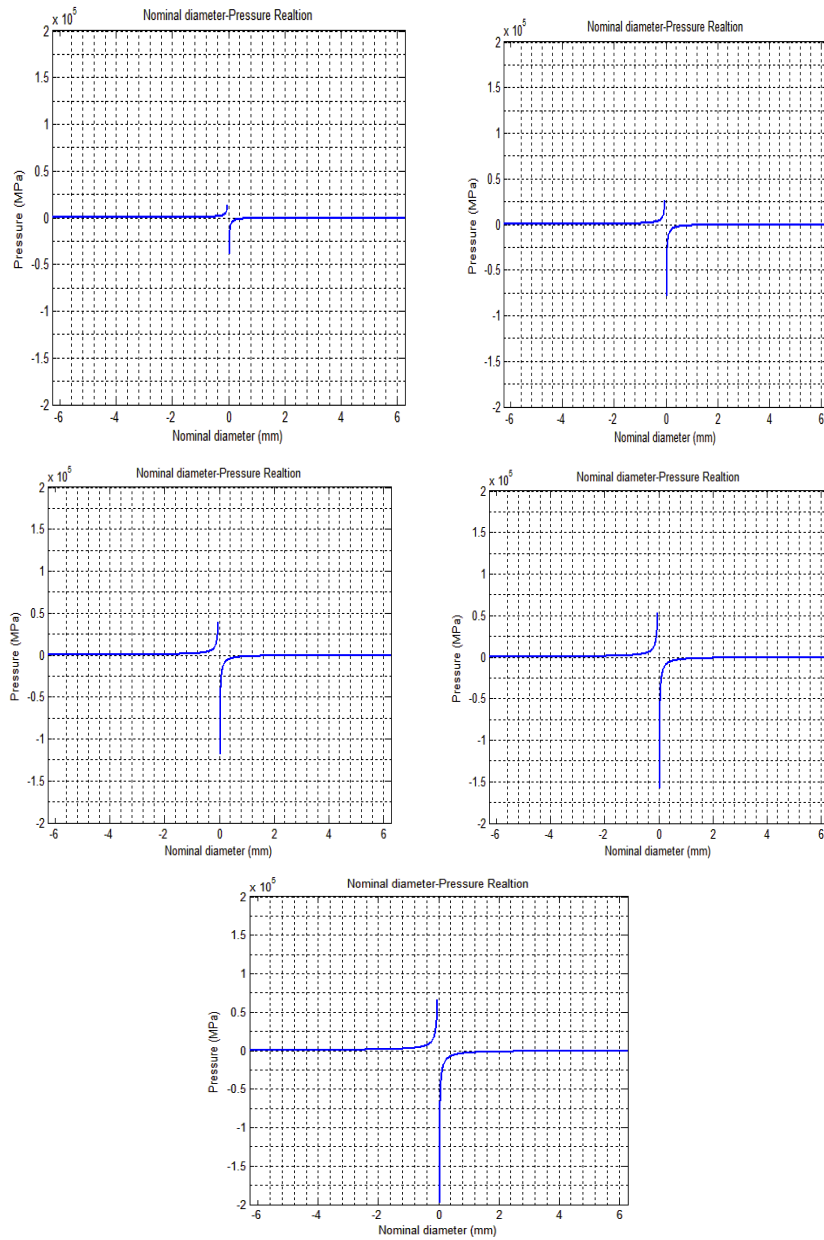
Gerilmenin radyal bileşenleri ise,

$$\sigma_{r,mil} = -p \quad (6.5)$$

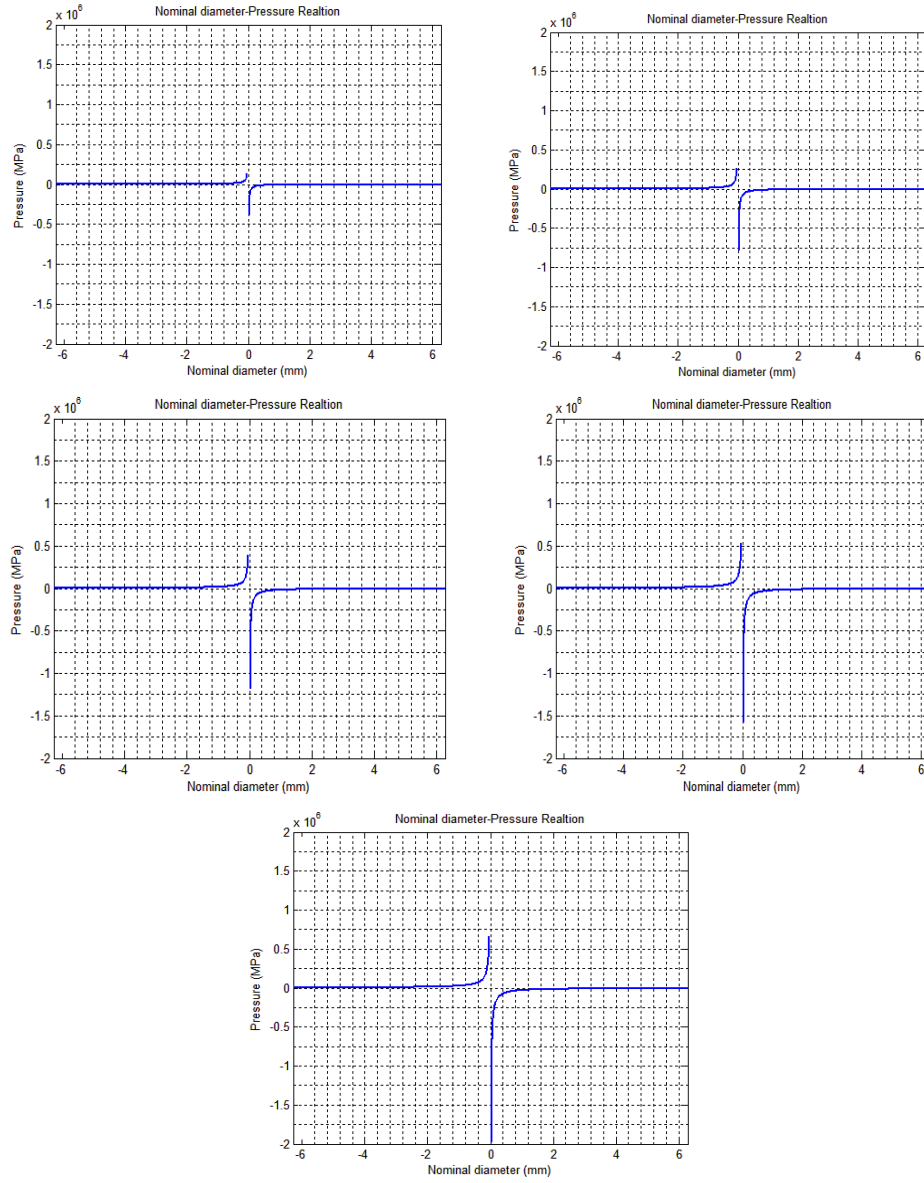
$$\sigma_{r,göbek} = -p \quad (6.6)$$

Geçme miktarına bağlı olarak kompozit tüp üzerinde ilgili bölgede bir basınç dağılımı elde edilmiş ve Matlab kullanılarak geçme miktarına bağlı olarak yüzeylerde oluşan basınç dağılımı elde edilmiştir.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 ‘de sırasıyla; 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 2, 3, 4 ve 5 mm’ lik geçme durumlarında mil-göbek, bizim problemimizde, şaft-çelik mafsalları arasındaki basınç dağılımlarını görmekteyiz.



Şekil 6.1 : 0.1-0.5mm arası Geçme Miktarı için Basınç Dağılımları

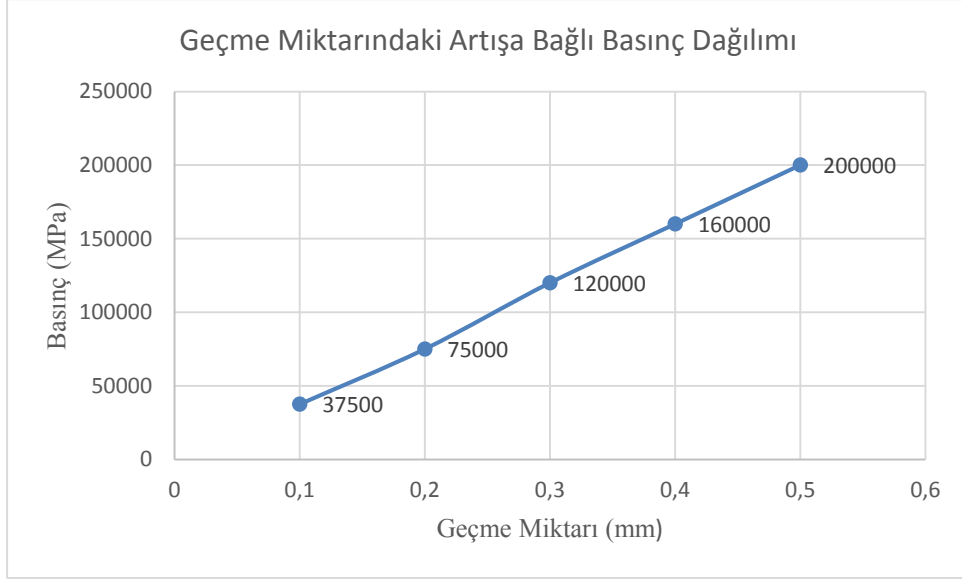


Şekil 6.2 : 1-5mm arası Geçme Miktarı için Basınç Dağılımları

Buna göre kompozit tüp üzerinde, geçme miktarına göre oluşan basınçlar Çizelge 6.1'deki gibi oluşmaktadır. Görüldüğü gibi çok küçük miktarda geçme miktarında dahi kompozit tüp üzerinde çok büyük bir basınç oluşmaktadır ve dolayısıyla çok büyük gerilme değerleri elde edilecektir. Geçme miktarına bağlı basınç dağılımı ise Şekil 6.3'deki gibidir.

Çizelge 6.1 : Geçme Miktarına Bağlı Basınç Dağılımı

Geçme Mesafesi (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	4	5
Basınç (MPa)	0.375 $\times 10^5$	0.75 $\times 10^5$	1.20 $\times 10^5$	1.60 $\times 10^5$	2 $\times 10^5$	3,75 $\times 10^5$	7.5 $\times 10^5$	12.0 $\times 10^5$	16.0 $\times 10^5$	20 $\times 10^5$



Şekil 6.3 : Geçme Miktarındaki Artışa Bağlı Basınç Dağılımı

Şekil 6.3’ te görüldüğü gibi geçme miktarı ve basınç arasında doğrusal bir ilişki vardır ve değerleri grafik üzerindeki ve Çizelge 6.1’ deki gibidir. Görüldüğü gibi sıkı geçme uygulamasında geçme miktarına bağlı olarak oluşan iç basınç değeri oldukça yüksektir. Buna göre, doğrudan geçme miktarına bağlı olarak uygulanacak moment yerine bir sürtünme momenti hesabı yaparak, bir sıkı geçme basınç değeri bulunacak ve ardından uygulanan tork ve iç basınç durumuna göre, bileşik mukavemet hali Abaqus modeli için Tsai- Wu hasar indeksi değeri hesaplanacaktır. Tüpün baş ve son kısımlarında 10 cm ‘lik bir sıkı geçme bölgesi olduğu düşünülmektedir.

$$T = \mu \pi p l \frac{d_i^2}{2} \quad (6.7)$$

(6.7) nolu formülden basınç değeri çekildiğinde;

$$p = \frac{2T}{\mu \pi l d_i^2} \quad (6.8)$$

Olarak bulunmaktadır

(6.8) formülünde; kompozit-metal sürtünme katsayısı, $\mu = 0.15$; Uygulanan değeri , $T=25000 \text{ Nm}$; Sıkı geçme boyu, $l=0.2 \text{ mm}$; iç çap değeri, $d_i=0.13\text{m}$ olarak alındığında, oluşan basınç değeri, $p = 62.8 \text{ MPa}$ olarak bulunmaktadır.

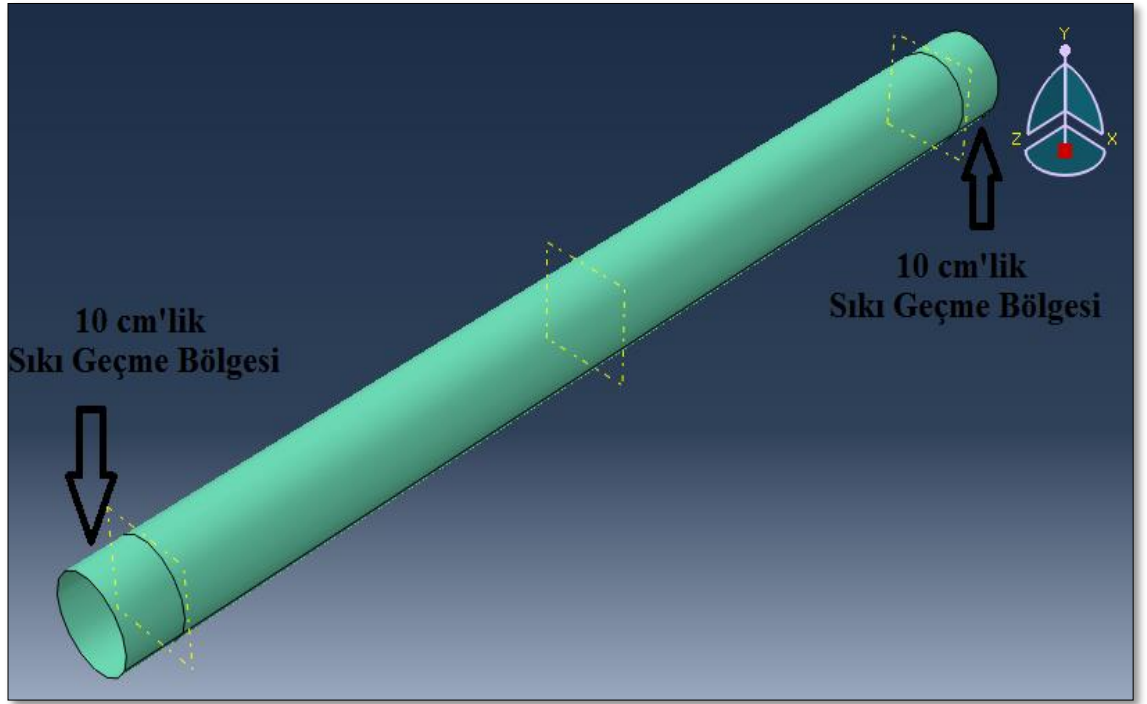
6.1.1 Sıkı geçme bağlantısı sonlu eleman uygulaması

Daha önceki bölümlerde yer alan statik analiz sonlu eleman modelinde kompozit tüp yalnızca burulma mukavemet haline maruz bırakılmıştı. Bu bölümde C2 sonlu eleman

model kullanılarak, burulma mukavemet haline ek olarak 10 cm' lik geçiş bölgesi durumunda, 62.8 Mpa 'lık i basınç uygulanması yapılmıştır.

Burada amaç, burulma ve basınç etkisi altındaki kompozit tüpün kritik bölgelerinde(10 cm lik geçme bölgesi) gerilme bileşenlerini ABAQUS 'te inceleyerek bir hasar indeksi belirlemek ve bu geçme bölgelerinde bir emniyet katsayısı kullanarak gerekli katman sayısını belirlemektir.

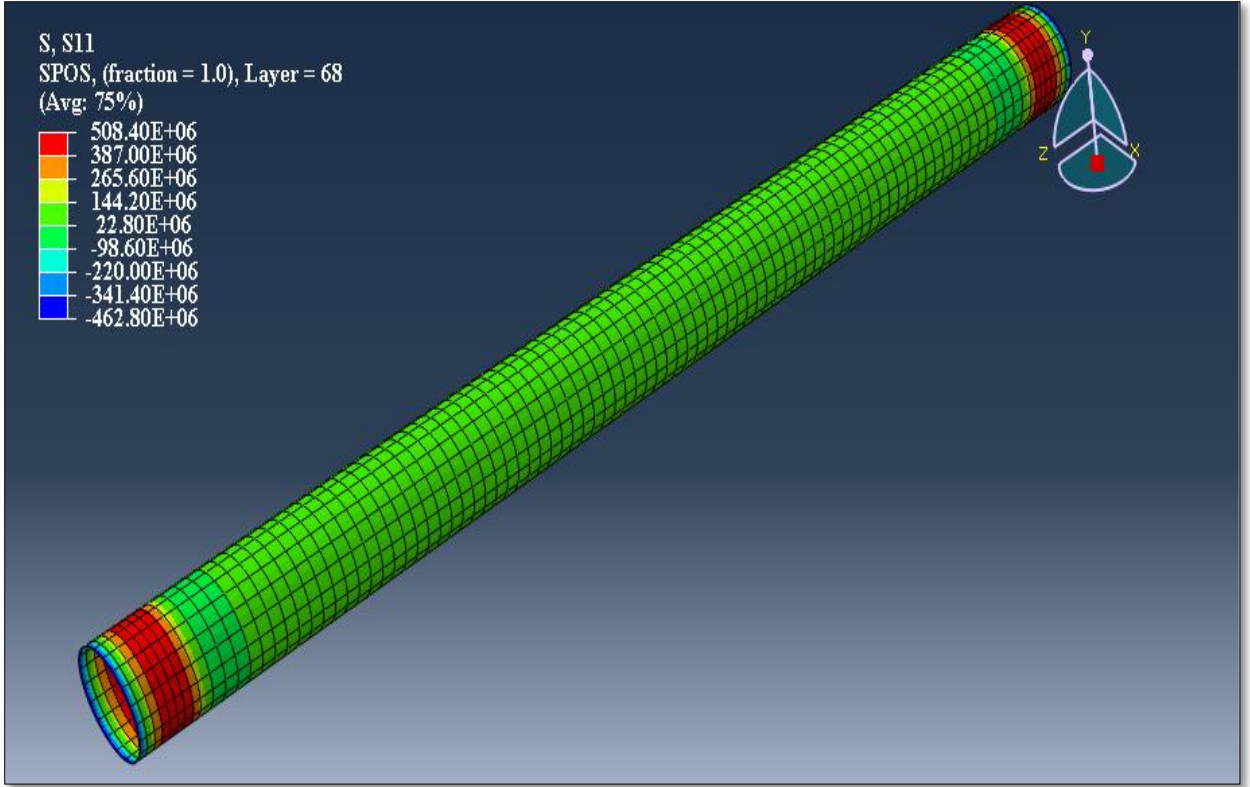
şekil 6.4'te sıkı geçme uygulaması için kullanılacak olan sonlu eleman modeli görülmektedir.



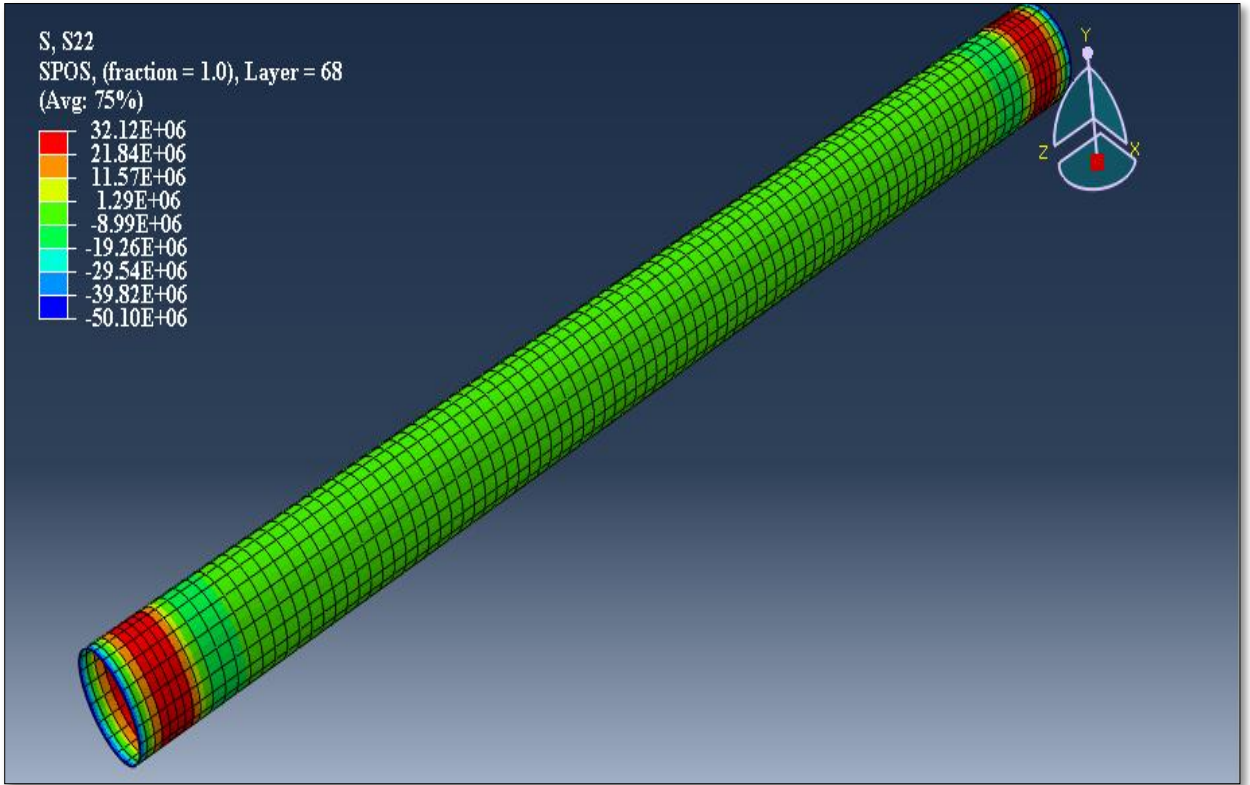
şekil 6.4 : Sıkı Geçme Uygulaması Abaqus Modeli

Analiz sonucu gerilme bileşenleri;

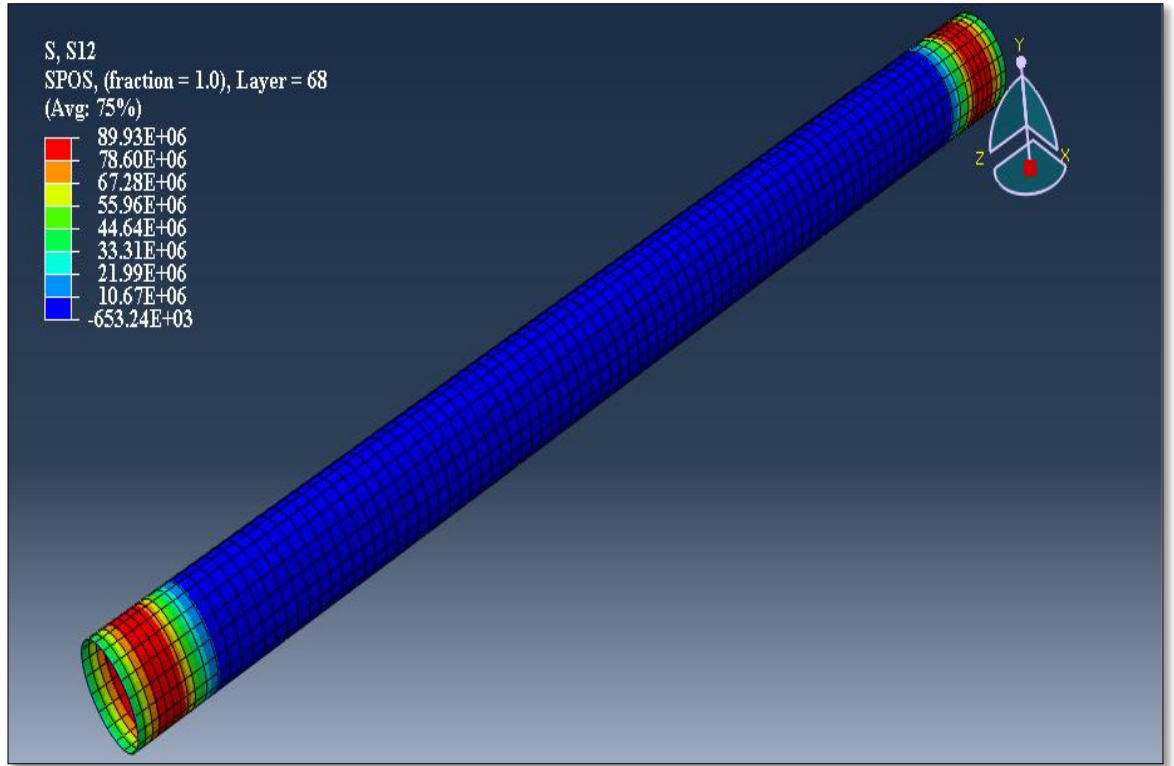
$\sigma_{11}=5.05 \times 10^8$ Pa, $\sigma_{22}=3.18 \times 10^7$ Pa, $\sigma_{12}=8.90 \times 10^7$ Pa olarak bulunmuştur. Buna göre şekil 6.5, şekil 6.6 ve şekil 6.7 'deki gerilme dağılımları oluşmuştur.



Şekil 6.5 : Tüp Boyunca σ_{11} Dağılımı (68. Tabaka Üst Yüzey)



Şekil 6.6 : Tüp Boyunca σ_{22} Dağılımı (68. Tabaka Üst Yüzey)

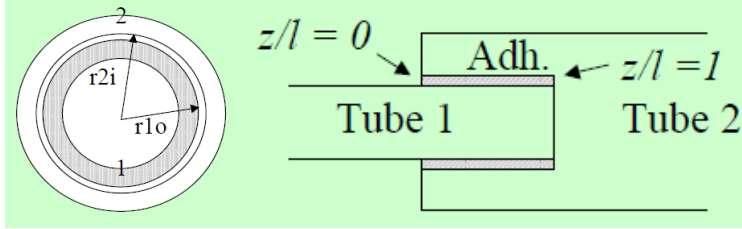


Şekil 6.7 : Tüp Boyunca σ_{12} Dağılımı (68. Tabaka Üst Yüzey)

Buna göre, elde edilen gerilme bileşenleri kullanıldığında, Tsai-Wu hasar indeksi değeri, 0.0873 olarak bulunmaktadır. Buna göre C₂ tasarımının uygulanan basınç altında yeterli dayanımı göstermesi için yaklaşık 11,45 kat daha dayanıklı olmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada kullanılan modelde, hasar katsayısının bu denli düşük çıkmasının nedeni, sıkı geçme uygulaması sebebiyle etkiyen basınç değerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yukarıda verilen formül 6.8 'den yaralanacak olduğumuzda uygulanan basınç değerini, diğer geometrik kısıtların tasarım açısından değiştirilemez olduğu kabulüyle ancak kompozit ve metal arasındaki sürtünme katsayısının değiştirilmesi ile mümkün olduğu görülmektedir. Ancak yine de 11.45 katlık bir oran yalnızca sürtünme katsayısı ile aşamayacak olduğundan, bu durum, kompozit tüpün sıkı geçme uygulamasını yetersiz kılmaktadır. Bununla birlikte sıkı geçmenin yanı sıra şekil bağının da oluşturulması durumunda bağlantı bölgesi gerekli torku taşıma kapasitesine sahip olabilecektir. Ancak bunun için ayrıca bir çalışma yapılması gerekmektedir.

6.2 Yapıştırma Bağlantısı

İç içe yapıştırılmış iki silindir arasındaki yapıştırıcıda oluşan kayma gerilmesi Şekil 6.8 'de belirtilmiştir.



Şekil 6.8 : İç İçe Yapıştırılmış İki Silindir

Belirli bir tork yükü altındaki iç içe geçirilmiş iki silindir arasındaki yapıştırıcıda oluşan kayma gerilmesi [26] :

$$\tau_a = \frac{T\alpha}{2\pi r_m^2} \left[\left(\frac{1 - \Psi(1 - \cosh \alpha l)}{\sinh \alpha l} \right) \cosh \alpha z - \Psi \sinh \alpha z \right] \quad (6.9)$$

T = İletilecek Tork

r_m = Yapıştırıcı dairenin ortalama yarıçapı

l = Toplam yapıştırma boyu

z = Yapışma bölgesi içerisindeki eksenel pozisyon

şeklinde ifade edilebilir. Burada:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\delta}{\Psi}}; \delta = \frac{2\pi r_m^2 r_{1o} G_a}{G_1 J_1 \eta}; \Psi = \frac{G_2 J_2 r_{1o}}{r_{2i} G_1 J_1 + r_{1o} G_2 J_2}; r_m = (r_{1o} + r_{2i})/2 \quad (6.10)$$

r_{1o} = İlk tüpün dış yarıçapı ; r_{2i} = İkinci tüpün iç yarıçapı

G_1 = İlk tüpün kesme modülü ; G_2 = İkinci tüpün kesme modülü ;

G_a = Yapıştırıcının kesme modülü

J_1 = İlk tüpün polar atalet momenti ; J_2 = İkinci tüpün polar atalet momenti

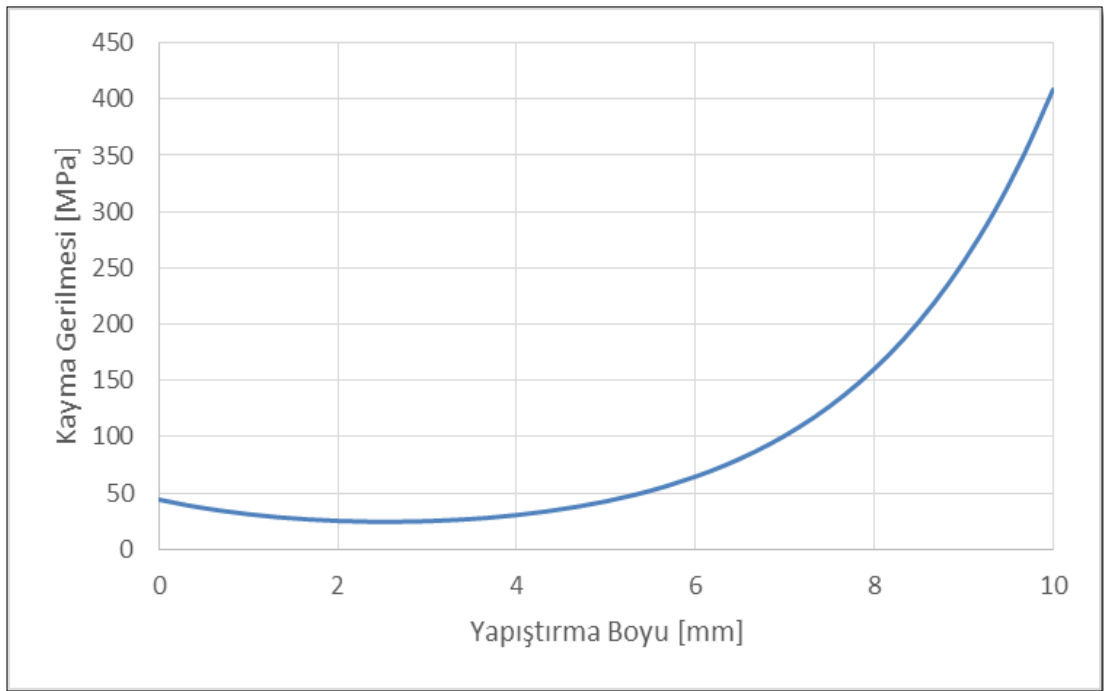
η = Yapıştırıcı kalınlığı

olup yapıştırıcıdaki ortalama kayma gerilmesi:

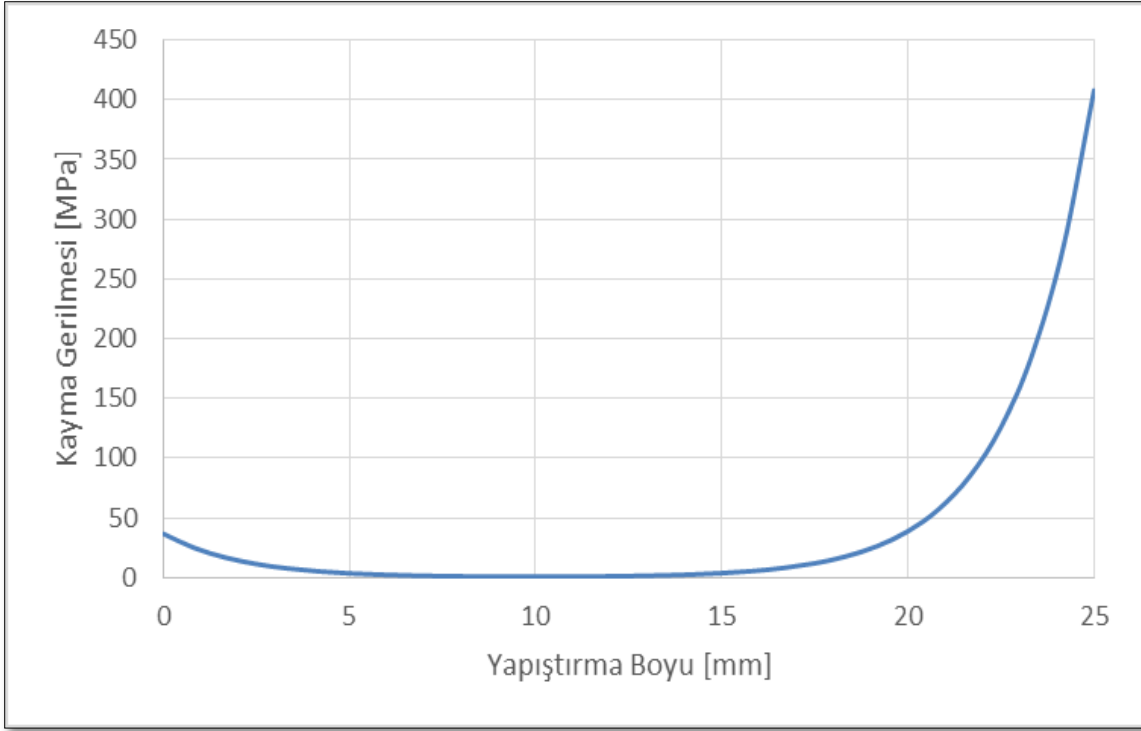
$$\tau_{mean} = \frac{T}{2\pi r_m^2 l} \quad (6.11)$$

olarak hesaplanabilir. Yukarıda verilmiş olan ifadelerle göre bir Excel çizelgesi oluşturulmuş ve uygulanan torka bağlı olarak yapıştırıcıda oluşan kayma gerilmesinin boru eksen boyunca değişimi elde edilmiştir.

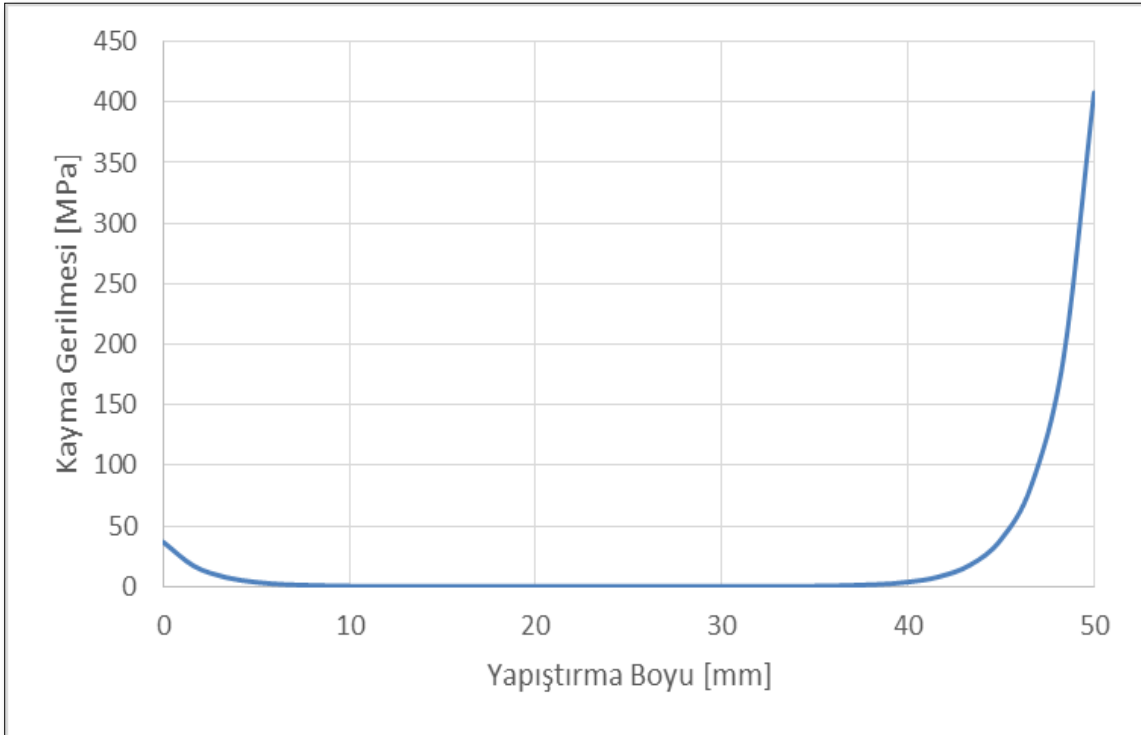
Şekil 6.9-12'den görüleceği üzere, yapışma uzunluğunun ortası civarında görece düzenli bir kayma gerilmesi dağılımı elde edilmesine karşın uç bölgelerde yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bağlantının tork iletme kapasitesini büyük oranda τ_{ort} belirlemektedir, ancak yapıştırma bağlantısının mukavemeti açısından gerilmenin yığıldığı uç bölgeleri değerlendirilmeli; bu uç bölgelerindeki maksimum kayma gerilmesi reçinenin kayma mukavemetinin altında olmalıdır.



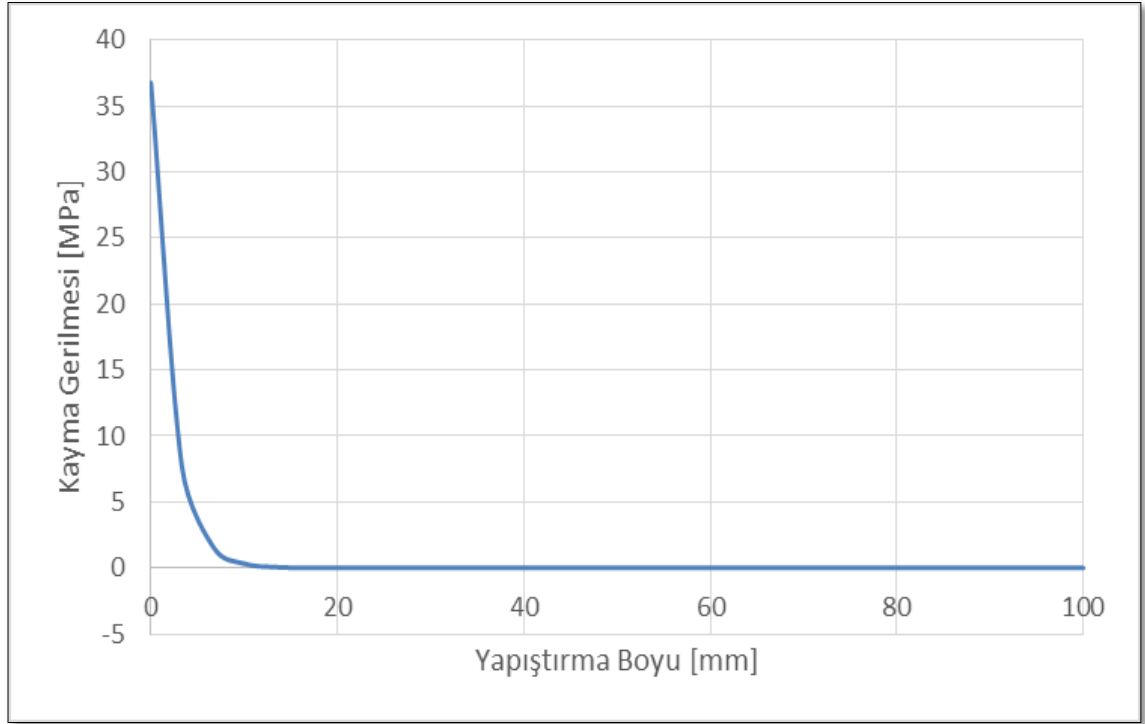
Şekil 6.9 : Kayma Gerilmesi Dağılımı (Yapıştırma boyu = 10 mm)



Şekil 6.10 : Kayma Gerilmesi Dağılımı (Yapıştırma boyu = 25 mm)

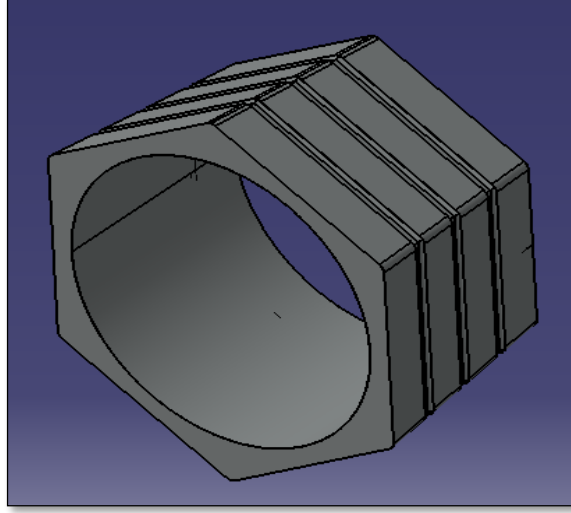


Şekil 6.11 : Kayma Gerilmesi Dağılımı (Yapıştırma boyu = 50 mm)



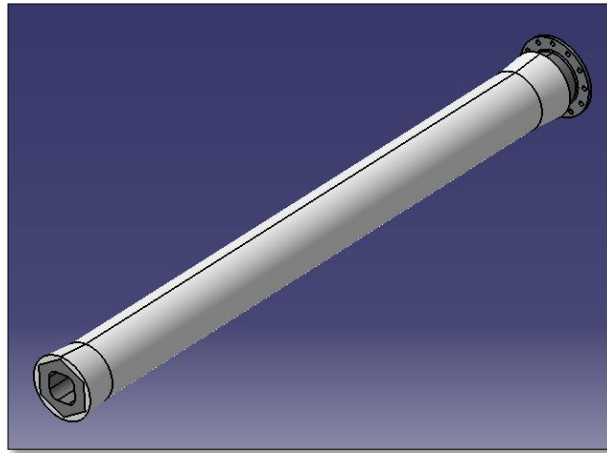
Şekil 6.12 : Kayma Gerilmesi Dağılımı (Yapıştırma boyu = 100 mm)

Bahsedildiği üzere yapıştırıcı olarak kompozit boru üretiminde kullandığımız reçine sistemi kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar temel olarak güvenli bir yapıştırma boyunun belirlenebilmesiyle ilgilidir. Yapıştırma boyu, tasarlanacak uç parçası geometrisini etkileyen temel unsurlardan biridir. Bunun yanında uç parçasının da şekil bağı ile bir miktar tork taşıyabilmesi için çokgen profile sahip olması; bununla birlikte kayma gerilmesinin yapıştırma uzunluğu boyunca dağılımını iyileştirmek ve yapışma alanını biraz olsun arttırmak amacıyla koniklik verilmiştir. Bunun yanında yapışma yüzeyi üzerine sarılacak elyafın oturmasını sağlayacak kanallar açılmıştır. İletmek istediğimiz tork değeri yüksek olduğundan parçanın tüm detayları buna göre şekillendirilmeye çalışılmış; yapıştırma, şekil bağı ve kanallar aracılığıyla iletilmek istenen torkun mümkün olabilecek en yüksek güvenlik katsayısıyla iletilmesi düşünülmüştür. Bahsi geçen uç parçası Şekil 6.13 'te görülmektedir.



Şekil 6.13 : Uç Bağlantısı için Düşünülen Eleman

Düzenek üzerinde testlere tabi tutulacak şaft ile araç üzerine takılacak şaftın aynı mafsalları kullanmasına gerek olmadığı değerlendirilmiştir. Mafsalları halihazırda seri üretilmekte olup denenmiş ve güvenilir parçalardır ancak şaftın düzenek üzerine bağlanabilmesi açısından pek de uygun değildir. Düzenek üzerinde uygulayacağımız 50000 Nm torkun kompozit borudan önce mafsalları hasara uğratması ihtimali de bulunmaktadır. Bu nedenle şaftın deney düzeneğine bağlanmasında mafsalları kullanılmamıştır. Düzenek bağlantısı açısından Şekil 6.9’da geometrisi verilen bağlantı elemanı bir uca flanşlı, diğer uca içinde dörtgen bir yuva bulunacak şekilde değiştirilmiştir. Tümleşik model böylelikle Şekil 6.14 ‘teki gibi oluşmaktadır.



Şekil 6.14 : Üzerindeki Bağlantı Elemanlarıyla Birlikte Kompozit Şaft

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle literatürdeki çalışmalar incelenmiş, birden fazla kompozit şaft tedarik edilmiş ve incelemesi gerçekleştirilmiştir. Burada imal edilecek kompozit şaft için hem statik hem de serbest titreşim analizleri gerçekleştirilerek iyileştirme çalışmaları yapılmış ve toplam onbeş adet (A2 – A6, B2 – B6, C2 – C6) şaft modeli elde edilmiştir. Bu modellere ait teorik ve analiz sonuçları öncelikle literatürde kullanılmakta olan malzeme değerleriyle, daha sonrasında ise gerçekleştirilen malzeme testleri sonuçlarına istinaden paylaşılmıştır.

Elde edilen teorik sonuçların ve analiz sonuçlarının birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmüştür. Çalışmanın devamında ise iki farklı metal-kompozit bağlantı yöntemi üzerinde durulmuş ve bağlantı yöntemlerinin eksileri ve artıları analiz sonuçları ile irdelenerek nihai bir bağlantı yöntemi kararlaştırılmıştır. Tez çalışmasında son olarak, katman yapıda oryantasyon açısı ve katmanlama düzeni bağımsız değişken kabul edilip, Parçacık Sürüsü Optimizasyon metodu baz alınarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda üç farklı katmanlama türünde, üç farklı amaç fonksiyonu baz alınarak farklı modellere ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Daugherty, R.L. (1981). Application of Composite Materials to Truck Components: Leaf Springs and Propeller Shafts for 5-Ton Truck, U.S. Army Tank-Automotive Command Research and Development Center, Teknik Rapor: DAAK 30-79-C-0146, Amerika Birleşik Devletleri.
- [2] Leslie, J.C., Truong, L., Leslie II, J.C., Blank, B. ve Frick, G. (1996). Composite Driveshafts: Technology and Exprience, Society of Automotive Engineers, Teknik Bildiri: 962209.
- [3] Rastogi, N. (2004). Design of Composite Driveshafts for Automotive Applications, Society of Automotive Engineers, Teknik Bildiri: 2004-01-0485, SAE 2004 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, Amerika Birleşik Devletleri.
- [4] Chowdhuri, M.A.K. ve Hossain, R.A. (2010). Design Analysis of an Automotive Composite Drive Shaft, International Journal of Engineering and Technology, 2(2): 45-48.
- [5] Mohammed, R.K., Paykani, A. ve Akbarzadeh, A. (2011). Design and Modal Analysis of Composite Drive Shaft for Automotive Application, International Journal of Engineering Science and Technology, 3(4): 2543-2549.
- [6] Abu Talip, A.R., Ali, A., Badie, M.A., Ceh Lah, N.A. ve Golestaneh, A.F. (2010). Developing a Hybrid Carbon/Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite Automotive Drive Shaft, Materials and Design, 31: 514-521.
- [7] Mutasher, S.A. (2009). Prediction of the Torsional Strength of the Hybrid Aluminum Composite Drive Shaft, Materials and Design, 30: 215-220.
- [8] Khalid, Y.A, Mutasher, S.A., Sahari, B.B. ve Hamouda, A.M.S. (2007). Bending Fatigue Behavior of Hybrid Aluminum Composite Drive Shafts, Materials and Design, 28: 329-334.
- [9] Lee, D.G., Kim, H.S., Kim, J.W. ve Kim, J.K. (2004). Design and Manufacture of an Automotive Hybrid Aluminum Composite Drive Shaft, Composite Structures, 63: 87-99.
- [10] S.T. Peters, J. Lowrie McLarty, "Filament Winding", Process Research, 2001
- [11] Larry J. Ashton, "Revisiting Cost Effective Filament-winding Technology," 44th International SAMPE Symposium (Long Beach, CA), May, 1999
- [12] Daniel N. Chappelar, Tak Aochi, and Robert J. Milligan, AD-A134577, Oct 1983
- [13] *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, West Conshohocken, PA

- [14] Yu. M. Tarnopol'skii and V.L. Kulakov in *Handbook of Composites*, 2nd ed., S.T. Peters, Ed., Chapman and Hall, London, 1998
- [15] S.T. Peters, W.D. Humphrey, and R.F. Foral, *Filament Winding, Composite Structure Fabrication*, SAMPE Publishers, Covina, CA, 1999
- [16] Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", Elsevier Academic Press, California, USA, 2004
- [17] Autar K. Kaw, "Mechanics of Composite Materials", CRC Press, USA, 2006
- [18] K. Manjunath and T. Rangaswamy, "Ply Stacking Sequence Optimization of Composite Driveshaft Using Particle Swarm Optimization Algorithm", *Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim.*, 5, A16 2014
- [19] D. Jebakani and T. Paul Robert, "Particle Swarm Optimization for RBDO of Composite Drive Shaft", *EuroJournals Publishing*, 2011
- [20] H. Ghasphochi Barg and M.H.Sadr, "Stacking Sequence Optimization of Composite Plates for Maximum Fundamental Frequency Using Particle Swarm Optimization Algorithm", *Springer Science+Business Media B.V., Netherlands, Volume 47, Issue 3*, pp 719-730, 2011
- [21] H. Li and K. Chandrashekara, "Particle Swarm-Based Structural Optimization of Laminated Composite Hydrokinetic Turbine Blades", *Engineering Optimization*, USA, 2014
- [22] P. Kere and J. Koski, "Multicriterion Optimization of Composite Laminates for Maximum Failure Margins with an Interactive Descent Algorithm", *Springer-Verlag, Berlin Hiedelberg*, 2002
- [23] K. Lakshmi and A. Rama Moham Rao, "Optimal Design of Laminate Composite Isogrid With Dynamically Reconfigurable Quantum PSO", *Springer-Verlag, Berlin Hiedelberg*, 2013
- [24] J.Kennedy and R.C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", in *International Proceedings of the IEEE international Conference on neural networks*, pp.1942-1948, 1995
- [25] Eberhart, R. C. and Shi, Y., "Particle swarm optimization: developments, applications and resources", *Proc. congress on evolutionary computation 2001 IEEE service center, Piscataway, NJ., Seoul, Korea., 2001.*
- [26] [1] ASTM International, D3039/D3039M-14, "Standart Test Method for Tensile Properties of Polimer Matrix Composite Materials", *Amerika Birleşik Devletleri*, 2014
- [27] [2] ASTM International, D 792-08, "Standart Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement", *Amerika Birleşik Devletleri*, 2008

- [28] [3] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design”, Dokuzuncu Baskı, McGraw-Hill, New York, Amerika Birleşik Devletleri, 2011
- [29] [4] Naveen Rastogi, “Design of Composite Driveshafts for Automotive Applications”, SAE Technical Paper, 2004-01-0485

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : ERDEM OK
Doğum Tarihi ve Yeri : 04.06.1989/ Bakırköy
E-posta : okerd@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011-2012 yılları arasında Altınay Robotik A.Ş. firmasıyla 3 serbestlik dereceli simülatör platformu tasarımı tamamladı
- 2014 2015 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde SAN-TEZ projesinde yer aldı.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- E.Ok and Halit S. Turkmen, 'Multi Objective timization of a Composite Drive Shaft Using Particle Swarm Algorithm', CC2015, Prague, 2015