

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**YÜKSEK SICAKLIĞA VE DİNAMİK İÇ BASINCA MARUZ KOMPOZİT
DESTEKLİ BORU TASARIMI**

Ercan DEĞİRMENCİ

ARALIK 2010

Makine Anabilim Dalında Ercan DEĞİRMENCİ tarafından hazırlanan YÜKSEK SICAKLIĞA VE DİNAMİK İÇ BASINCA MARUZ KOMPOZİT DESTEKLİ BORU TASARIMI adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Doktora Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Veli ÇELİK

Üye (Danışman) : Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Üye : Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

Üye : Doç. Dr. Necip CAMUŞCU

Üye : Doç. Dr. Alaattin AKTAŞ

24 Aralık 2010

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

Prof. Dr. İhsan ULUER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIĞA VE DİNAMİK İÇ BASINCA MARUZ KOMPOZİT DESTEKLİ BORU TASARIMI

DEĞİRMENCİ, Ercan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Aralık 2010, 99 sayfa

Sunulan tez çalışması ile, yüksek iç basınç ve sıcaklığa maruz hafif silahlarda namluların kompozit destekli olarak tasarlanması ve üretim yöntemlerinin belirlenerek prototip üretimin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Hafifletilmesi istenen 7.62 mm kalibreli mevcut namlunun kullanım şartlarına göre iç balistik modeli için ideal gaz karışım kuralı ve Vallier Heydenreich yöntemi kullanılmıştır. Ardışık ve tek atış durumları için ısınma ve gerilme durumları ABAQUS® Sonlu Eleman Paket programında hesaplanmış, deney verileri ile karşılaştırılarak kompozit malzeme seçimi yapılmıştır. Ayrıca tek atış durumu için namlunun ısınma ve gerilme durumu analitik olarak hesaplanmıştır. Kompozit malzeme kullanılarak üretilecek namlunun çelik iç gömleğinin et kalınlığının %60 yük taşıma durumu için boyutlandırması sonlu eleman programında yapılmıştır. Kompozit namlu tasarımında kompozit katman düzeni (90/±45/90) ile yapılan analizler neticesinde bulunan maksimum dayanım basıncının mevcut et kalınlık değerinde namluya tesir eden %40 yükü taşıyabilecek şekilde belirlenmiştir. Sonlu eleman programında kompozit destekli namlunun termal, termomekanik ve serbest titreşim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Tasarımdan belirlenen parametreler ışığında üretilen kompozit destekli namluyla test atışları gerçekleştirilerek namlu yüzeyi üzerinden sıcaklık verileri alınmıştır. Kompozit destekli namlunun deney ve sonlu eleman verilerinin karşılaştırılması sonucunda modelleme doğrulanmış ve orijinal namludan istenen -40 °C ve +63 °C sıcaklık performans ile 800 m. dağılım hassasiyetleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif silah, Namlu, İç Balistik, Kompozit, Termomekanik.

ABSTRACT

DESIGN OF A COMPOSITE TUBE UNDER HIGH TEMPERATURE AND DYNAMIC PRESSURE LOADING

DEĞİRMENCİ, Ercan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. M. Hüsnü DİRİKOLU

December 2010, 99 pages

This study aims at designing, prototype manufacturing and testing of a light arm-gun barrel with the aid of a composite material. The steel part of the dual wall barrel will be reduced in thickness in such an amount that it will resist about %60 of the total internal load and the rest will be resisted by the composite material wrapped around the steel barrel. The design of the steel part will be based on von-Mises theory. On the other end, the design of the composite part will start with initially determined parameters, such as winding angles, number of plies, and ply thicknesses from the Lamination Theory for various combinations of fiber/matrix materials. The final realization of the composite part including the varying pressure and temperature effects will be done using the ABAQUS® finite element program. In the last stage of the analysis, the dual wall composite barrel will be analyzed. The design has been verified by experimental studies after prototype manufacturing.

Key Words: Light gun, Barrel, Internal Ballistics, Composite Material, Thermomechanics.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmanın her aşamasında sabrı, tecrübesi ve bilgisiyle bana yön veren tez yöneticisi saygıdeğer hocam, Doç. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU'ya çok teşekkür ederim. Değerli desteklerini sakınmayan Mühendislik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Veli ÇELİK'e, Makine Mühendisliği Bölümündeki hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar süresince kıymetli desteklerini esirgemeyen MKEK Genel Müdürü Sayın Tümgeneral (E) Ünal ÖNSİPAHİOĞLU'na, MKE Mühimmat Fabrikası Müdürü Sayın Sait Altıntaş'a ve çalışanlarına, MKE Silah Fabrikası Müdürü Sayın Kamil Altınkaya'ya ve çalışanlarına, MKE Barut Fabrikası Müdürü Sayın Osman Büyükköprü'ye ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Doktoraya başlamamı teşvik eden Y.Müh.Alb. Tefik ZENGİN'e ve Tankçı Alb. A. Hamdi SULUÇAY'a da teşekkürü borç bilirim. Desteklerini esirgemeyen Y.Müh. Onur Güngör'e, Dr. Müh. Barış Kalaycıoğlu'na, Y.Müh. Halis Bilen'e ve teşvik ve desteğini veren isimlerini yazamadığım diğer dost ve arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Hayatta edindiğim başarıların zeminini hazırlayan rahmetli babama ve değerli anneme, en zor günlerimde her zaman yanımda olan, sevgili eşim Berna, kızım Damla ve oğullarım Uğur ve Birol'a da sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yüksek Basınç ve Sıcaklık Uygulaması İçin Boru Konstrüksiyonları	5
1.2. Kompozit Malzemeler	6
1.3. Kompozit Destekli Boru İmalatı.....	7
1.4. Bilgisayar Destekli Mühendislik Simülasyonu	9
1.5. Literatür Çalışmaları	12
1.6. Tezin Amaç ve Kapsamı	20
2. TEORİK ÇALIŞMALAR	21
2.1. Giriş.....	21
2.2. Merminin Namlu İçindeki Hareketi Boyunca Basınç, Hız ve Zaman Eğrilerinin Karakteristikleri.....	23
2.3. Çelik Gömleğin Tasarımı	28
2.4. Atış Esnasında Isı Transferinin Analitik Hesabı.....	29
2.5. Sevk Barutunun Termomekanik Özelliklerinin İncelenmesi	33
2.6. Atış Esnasında Namlu Mukavemetinin Analitik Hesabı.....	40

2.7. Namlunun Termal ve Termomekanik Zorlamalar Altında	
Nümerik Yöntemle İncelenmesi	46
2.7.1. Atışlı Test Prosedürlerinin Abaqus® Paket Programına Tanımlanması	49
2.7.2. Sınır Şartlarının ve Basınç Yüklemelerinin Tanımlanması	51
2.7.3. Nümerik Çözünün Elde Edilmesi	53
2.7.3.1. Orijinal Çelik Namlunun Termal ve Termomekanik Analizi.....	53
2.7.3.2. İnceltilmiş Et Kalınlıklı Çelik Namlunun Termal ve	
Termomekanik Analizi.....	58
2.7.3.1. Kompozit Namlunun Termal ve Termomekanik Analizi	60
2.8. Serbest Titreşim Analiziyle Doğal Frekans Tayini	65
2.8.1. Orijinal Namlunun Serbest Titreşim Analiziyle Doğal Frekans Tayini	66
2.8.2. İnceltilmiş Et Kalınlıklı Namlunun Serbest Titreşim Analiziyle	
Doğal Frekans Tayini.....	66
2.8.3. Kompozit Destekli Namlunun Serbest Titreşim Analiziyle	
Doğal Frekans Tayini	67
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	68
3.1. Deney Ekipmanları	68
3.2. Deney Düzenekleri.....	71
3.3. Verilerin Toplanması	74
4. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE TARTIŞMA	76
4.1. Orijinal Namlunun Termomekanik Analizi ile	
Deney Neticelerinin Karşılaştırılması	76
4.2. Kompozit Namlunun Termomekanik Analizi ile	
Deney Neticelerinin Karşılaştırılması	78
4.3. Orijinal ve Kompozit Namlunun Termomekanik Analizi ile	
Deney Neticelerinin Karşılaştırılması	80
4.4. Orijinal ve Kompozit Destekli Namlunun Geometrik Karşılaştırılması	82
4.5. Orijinal ve Kompozit Destekli Namluların	
Doğal Frekanslarının Karşılaştırılması.....	84
4.6. Kompozit Destekli Namluların İncelenmesi	86

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	89
EKLER.....	95
EK.1.	96
EK.2.	97
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	Sayfa
1.1. Kompozit malzemenin kesit görünüşü.	2
1.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	4
1.3. Metal Astarlı Kompozit Boru: 1) Metal astar ve 2) Yüksek mukavemetli kompozit tabaka.	5
1.4. Polimer Astarlı Kompozit Boru: 1) Polimer astar ve 2) Yüksek mukavemetli kompozit tabaka.	5
1.5. (a) Helisel Sarım,(b).Teğetsel Sarım CNC Flaman sarım makinesi ile sarım.	8
2.1. Namlu.	21
2.2. Namlu eksenini boyunca basınç değişimi.	26
2.3. Zamana bağlı hız değişimi.	27
2.4. Namlu eksenini boyunca hız değişimi.	27
2.5. Namlu çeliğinin dövme öncesi gerilme gerinim eğrileri.	29
2.6. Namlu çeliğinin dövme sonrası gerilme gerinim eğrileri.	29
2.7. Namlunun kesit görünüşü.	30
2.8. Transandantal denklemin 22 terim alındığındaki görünüşü.	32
2.9. Genel çözümde sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi.	33
2.10. Namlu eksenini boyunca gaz karışım sıcaklığı.	34
2.11. Gaz karışım yoğunluğunun namlu eksenini boyunca değişimi.	36
2.12. Dinamik vizkozitenin sıcaklığa bağlı değişimi.	36
2.13. Genleşme hızının namlu boyunca değişimi.	37
2.14. Reynolds sayısının namlu eksenini boyunca değişimi.	38
2.15. Prandtl sayısının sıcaklığa göre değişimi.	38

2.16. Isı iletim katsayısının sıcaklığa göre değişimi.	39
2.17. Ortalama ısı taşınım katsayısının namlu eksenı boyunca değışimi.	40
2.18. İç basınç etkisi altında kalın cidarlı silindirin gerilme durumu.	41
2.19. İç basınç etkisi altında kalın cidarlı silindir.	42
2.20. a) Çelik namlu mukavemet hesabı, b) Çelik namlu kütle hesabı.	44
2.21. a) Basıncın %60 oranında çelik namlu tarafından taşınması durumunda mukavemet hesabı, b) %60 yüklü namlu için kütle hesabı.	45
2.22. 6.9 mm et kalınlıklı orijinal namlunun %100 ve 3.6 et kalınlıklı çelik gömleğın %60 yüklemeleri için basınç dağılımı ve emniyet katsayısı.	46
2.23. Abaqus® sonlu eleman programında orijinal namlunun yarım modeli.	47
2.24. Et kalınlığı inceltilmiş kompozit uygulanacak namlunun Abaqus programında yarım modeli.	47
2.25. $90^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ Kompozit katman düzeni.	49
2.26 Abaqus® programında sınır şartlarının tanımlanması.	51
2.27. Abaqus® programında yüklemelerin tanımlanması.	51
2.28. Abaqus® sonlu eleman programında orijinal namlunun ağ modeli.	52
2.29. Abaqus® sonlu eleman programında inceltilmiş namlunun ağ modeli.	52
2.30. Abaqus® sonlu eleman programında kompozit namlunun ağ modeli.	53
2.31. Orijinal namlunun termal analizi. (1. Atış)	54
2.32. Orijinal namlunun termal analizi. (10. Atış sonrası bekleme)	54
2.33. Orijinal namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu dış yüzeye yerleştiren izleyici problemlerin zamana bağılı sıcaklık değışimi.	55
2.34 Orijinal namlunun termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri (1. Atış)	55
2.35. Orijinal namlunun termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri.	56
2.36. Orijinal namlunun termomekanik analizinde dış yüzeyinin	

von Mises gerilmeleri.	56
2.37. Orijinal namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu yere yerleştirilen izleyici problemlerin 100 saniye sürecinde zamana bağlı termal sıcaklık değişimi.	57
2.38. Orijinal namlunun Termomekanik analizinde namlu içine ve dışına yerleştirilen problemlerin sıcaklık-zaman grafiği.	58
2.39. İnceltirilmiş namlunun termal analizi. (1.Atış)	58
2.40. İnceltirilmiş namlunun termal analizi. (10. Atış)	59
2.41. Namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu dış yüzeye yerleştirilen izleyici problemlerin zamana bağlı sıcaklık değişimi.	59
2.42. İnceltirilmiş namlunun termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri (1. Atış)	60
2.43. İnceltirilmiş namlunun termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri.	60
2.44. Kompozit destekli namlunun termomekanik analizi sıcaklık verileri (1. atış).	61
2.45. Kompozit destekli namlunun termomekanik analizi sıcaklık verileri (10. atış).	61
2.46. Namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu dış yüzeye yerleştirilen izleyici problemlerin zamana bağlı sıcaklık değişimi.	62
2.47. Kompozit destekli namlunun termomekanik analizinden von Mises gerilmeleri. (1. Atış)	62
2.48. . Kompozit destekli namlunun içinin termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri.	63
2.49. Çelik kompozit ara yüzeyin termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri.	63
2.50. Kompozit namlunun dışının termomekanik analizinde von Mises gerilmeleri.	64
2.51. Kompozit namlunun dışının termomekanik analizinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.	64

2.52. Namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu yere yerleştirilen izleyici problemlerin 300 saniye sürecinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.	65
2.53. Orijinal namlunun doğal frekans analizi.	66
2.54. İnceltilmiş et kalınlıklı namlunun doğal frekans analizi.	67
2.55. Kompozit destekli namlunun doğal frekans analizi.	67
3.1. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan cihaz.	68
3.2. Gerinim ölçümlerinde kullanılan cihaz.	69
3.3. CNC Flaman sarım tezgahı.	69
3.4. Optik büyütme cihazı.	70
3.5. X Ray cihazı.	70
3.6. Sıcaklık ölçümü için orijinal namlunun test cihazına bağlanması.	71
3.7. Gerinim pullarının orijinal namluya yapıştırılması.	72
3.8. Sıcaklık ölçümü için kompozit destekli namlunun test cihazına bağlanması.	72
3.9. Sıcaklık ölçümü için kompozit namlunun test cihazına bağlanması.	72
3.10. Orijinal namlunun 24 parçaya ayrılmış durumu.	73
3.11. Karbon/Epoksi sarım işlemi.	73
3.12. Atışlı testlerde orijinal namluda ölçülen zamana bağlı sıcaklıklar.	75
3.13. Basıncın en yüksek olduğu yerde kompozit namluda ölçülen sıcaklığın zamana bağlı değişimi.	75
4.1. Orijinal namluda deneysel ve nümerik hesaplanan sıcaklık verilerin karşılaştırılması.	77
4.2. Orijinal namluda basıncın en yüksek olduğu dış yüzeyindeki bir noktada analitik, nümerik ve sonlu eleman programında hesaplanan servis gerilmeleri.	78
4.3. Kompozit destekli namluda deneysel ve nümerik hesaplanan sıcaklık verilerin karşılaştırılması.	79

4.4. Orijinal ve Kompozit destekli namluda deneysel ve nümerik hesaplanan sıcaklık verilerin karşılaştırılması.	80
4.5. Kompozit destekli ve orjinal namlularda basıncın en yüksek olduğu dış yüzeyindeki bir noktanın sonlu eleman programında hesaplanan servis gerilmeleri.	81
4.6. Kompozit uygulanacak namlu	82
4.7. Kompozit uygulaması yapılmış namlu	82
4.8. Kompozit destekli namlunun 100 büyütme görünüşü	85
4.9. Kompozit destekli namlunun atışlardan önceki X ray görüntüsü	86
4.10. Kompozit destekli namlunun atışlardan sonraki X ray görüntüsü	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	Sayfa
2.1. $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\varphi(\eta)$, $\pi(\eta)$, $\tau(\eta)$ faktörlerinin basınç oranına bağlı değerleri	24
2.2. $\psi(\lambda)$, $\varphi(\lambda)$, $\delta(\lambda)$ değerlerinin $\lambda = \frac{x}{x_1}$ 'e bağlı değerleri.....	25
2.3. İncelenen namlunun balistik özellikleri.	26
2.4. Namlu çeliğinin dövme öncesi mekanik özellikleri.....	28
2.5. Namlu çeliğinin dövme sonrası mekanik özellikleri.....	28
2.6. Kompozit malzemenin termomekanik özellikleri.....	48
2.7. Test atışı yapılarak tespit edilen atışlar arası bekleme süreleri.....	50
2.8. Barutun yanması sonucu oluşan gazların namlu boyunca termokimyasal özellikleri.....	50
3.1. Orijinal namlunun deney verilerinden elde edilen gerinimler ve hesaplanan gerilmeler.	74
4.1. Namlunun kompozit uygulanarak hafifletme oranı	83
4.2. Doğal frekansların mukayesesi.....	84

SİMGELER DİZİNİ

η	Basınç oranı
P_m	Ortalama basınç (MPa)
P_{max}	Maksimum basınç (MPa)
P_e	Namlu çıkış basıncı (MPa)
P_A	Atmosfer basıncı (MPa)
P_2	Namlu içi basıncı (MPa)
P_i	İç basınç (MPa)
m_m	mermi kütlesi (kg)
m_b	barut kütlesi (kg)
g	Yerçekim ivmesi (9.81 m/s ²)
x_e	Namlu boyu (m)
x_1	Merminin namlu içindeki konumu (m)
A	Mermi kesit alanı (m ²)
v_0	Mermi ilk hızı (m/s)
v_g	Genleşen gazların hızı (m/s)
t	Zaman (s)
t_1	Mermi konumunun zamanı (s)
λ_t	Namlu boy oranı
k	Isı iletim katsayısı (W/m ⁰ C)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m ² °C)
H	h/k oranı

T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
T_A	Atmosfer şartlarında gaz karışımı sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_b	Namlu içindeki gazların sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ay}	İç yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_{by}	Dış yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
a	İç yarıçap (m)
b	Dış yarıçap (m)
d	Namlu iç çapı (m)
H_0, H_1, J_0, J_1	Bessel fonksiyonu katsayıları
V_A	Deney şartlarında gaz hacmi (lt)
V_2	Genleşmiş gaz hacmi (lt)
V_1	Gazların ilk hacmi (lt)
V_0	Atmosfer şartlarında gaz karışımı hacmi (lt)
Q_{sb}	Sabit basınçta gaz karışımı enerjisi (Kcal)
Q	Gaz karışımının toplam enerjisi (Kcal)
R_u	İdeal gaz sabiti ($\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$)
R_m	Gaz karışımı gaz sabiti ($\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$)
M_T	Toplam gaz kütlesi (kg/Kmol)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
μ_m	Dinamik vizkozite (kg/ms)
Re	Reynolds sayısı
Pr	Prandtl sayısı
Nu_D	Nusselt sayısı
α	Helis açısı
r_i	Yarıçap (mm)

σ_t	Teğetsel gerilme (MPa)
σ_r	Radyal gerilme (MPa)
σ_l	Eksenel gerilme (MPa)
σ_s	Servis gerilmesi (MPa)
t_f	Kompozit sarım kalınlığı (mm)

KISALTMALAR

PEEK	Polyether Ether Ketone
PI	Polyamide
PPS	Polyphenylene sulfine
CNC	Computer Numerical Control
SEM	Sonlu Eleman Metodu
AE	Akustik emisyon

1. GİRİŞ

Boru, bir yerden başka bir yere belli sıcaklık ve basınçta katı, sıvı veya gaz aktarmaya yarayan, içi boş, uçları açık, uzun silindir olarak tanımlanabilir. Borular endüstrinin hemen her alanında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek basınç ve sıcaklık altında kullanılan borulara ise özellikle nükleer, termik ve hidrolik santrallerde, havacılık, uzay, otomotiv ve savunma teknolojileri gibi alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür boruların farklı türde konstrüksiyonları arasında, tümü kompozit veya kompozit destekli olanları son zamanlarda hafiflik, mukavemet ve kullanım ömrü açısından dikkate alınmaya değer bulunmuştur.

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirerek elde edilen kompozit malzemenin kavramsal olarak ortaya atılması ve konunun bir mühendislik konusu olarak ele alınması ancak 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir. Kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet (kopma dayanımı/yoğunluk) ve yüksek özgül rijitlik (elastisite modülü/yoğunluk) değerlerine sahip olmaları yanında, düşük ısı genleşme katsayısına ve iyi derecede titreşim sönümleme karakterine sahip olmaları bakımından da metallere göre önemli avantaj sağlamaktadır. Genel bir karşılaştırma yapmak gerekirse; APC-1.0 karbon/epoksi, AISI 4340 çeliğine göre 5 kat daha fazla özgül mukavemete sahiptir (1).

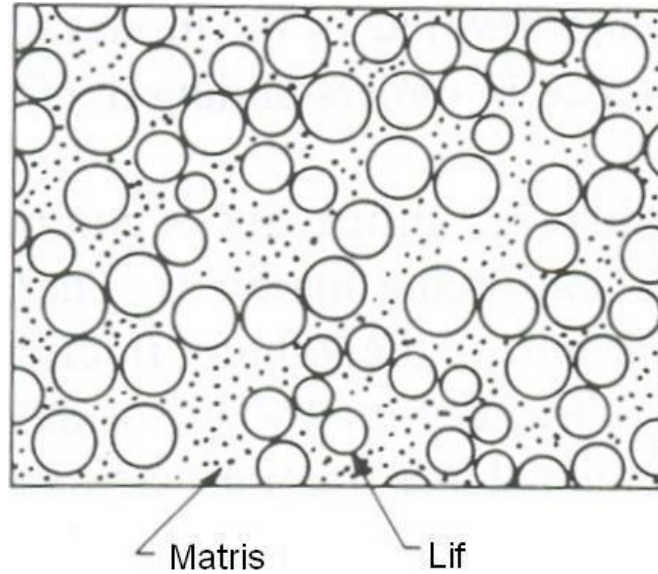
Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir takviye malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde de hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, takviye malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzemesi ise; plastik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

plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.

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

Kompozit malzeme kullanımındaki artış, ürün performansını göz ardı etmedeki artış ve evrensel pazardaki hafif malzeme rekabetinin artması sebeplerinden kaynaklanmaktadır. Tüm malzemelerin arasında, kompozit malzemeler, çok sık kullanılan elik ve alüminyum gibi malzemelerin yerini alma potansiyeline sahiptirler ve çoğu zaman daha iyi performans gösterirler. Kompozit malzemelerin, çeliğin yerini almasıyla %60-80, alüminyumun yerini almasında ise %20-50 ağırlıktan kazanım mümkün olacaktır. Bu ağırlık kazançları, enerjinin giderek artan bir sorun haline geldiği çağımızda önemli tasarruflar sağlamaktadır.

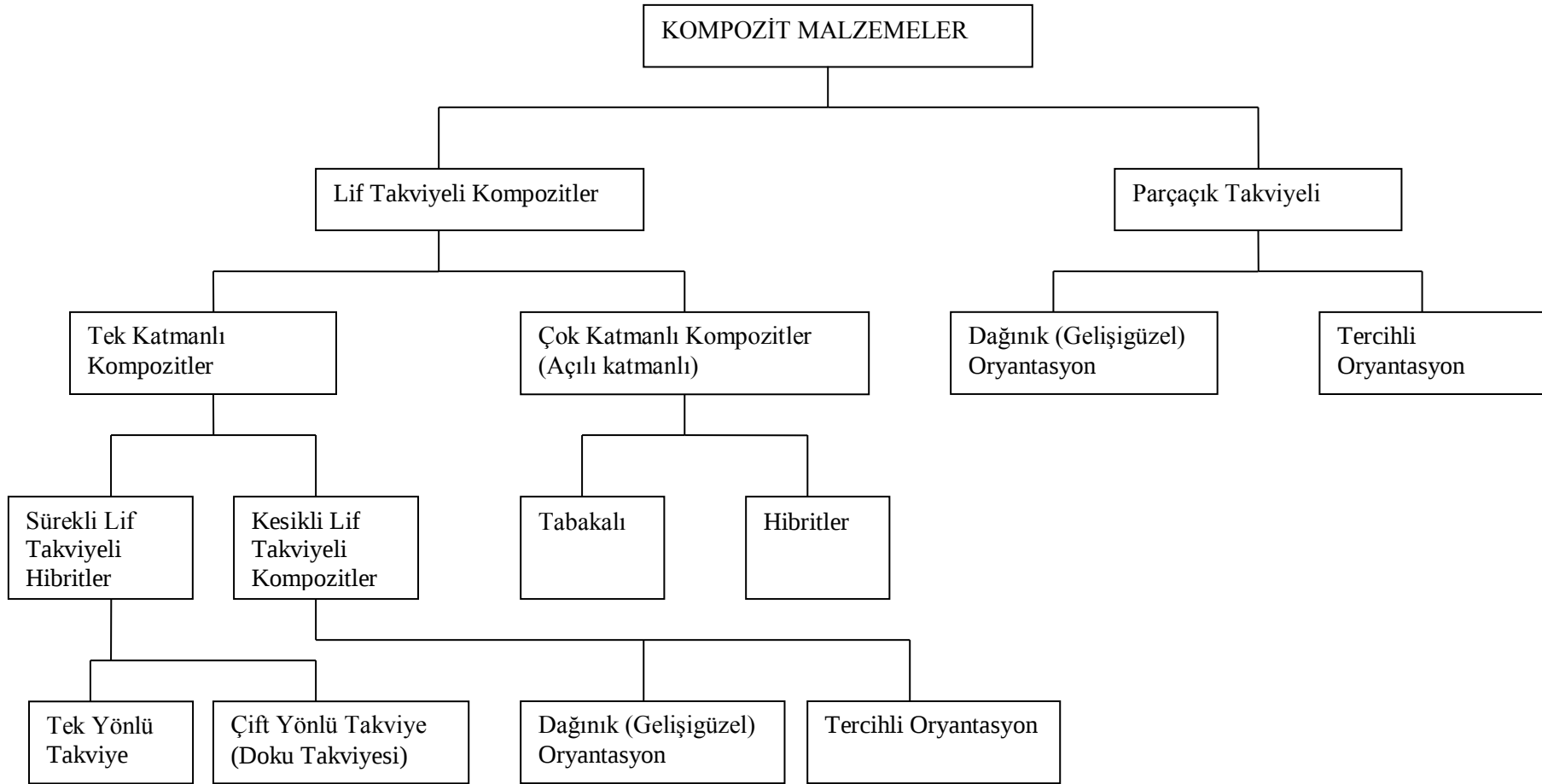
Kompozit bir plakanın kesit görünüşüne baktığımızda liflerin ve matris malzemenin durumu şekil 1.1'deki gibidir.



şekil 1.1. Kompozit malzemenin kesit görünüşü (1).

Kompozit malzemelerin yapısı incelendiğinde, ortak bir dayanım mekanizması olduğu görülür. Takviye malzemesinin geometrisi kompozitin dayanımını etkiler. Bu nedenle kompozit malzemeleri, örnek takviye biriminin geometrisi göz önüne alınarak sınıflandırmak uygundur. Bu şekilde yapılan sınıflandırma Şekil 1.2’de görülmektedir (2).

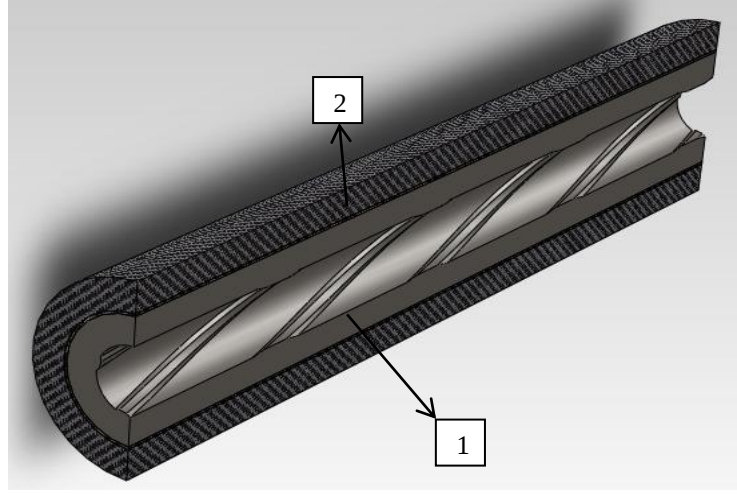
Kompozit malzemelerin metallere göre önemli avantajlarının bulunmasının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Kompozit malzemeler metallere göre çok daha kırılgan (gevrek) bir yapıya sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı plastik deformasyon meydana gelmez. Dolayısıyla kompozit yapıların kırılması anlık olabilir. Metaller ise sünek yapıya sahip olduklarından, yükleme altında plastik deformasyon meydana gelebilir. Metallerdeki kırılma olayı belli süreçleri gerektirdiği için kırılmadan önce gerekli önlemlerin alınma şansı vardır. Bu duruma ek olarak kompozit malzemelerin, gerilme yığılma dramlarındaki davranışları da metallere oranla çok daha farklıdır. Bunun sebebi kompozit malzemelerin anizotropik ve kırılgan olmalarıdır. Yukarıda belirtilen durumlardan dolayı kompozit yapıların tasarımı metallerden oluşan yapıların tasarımına göre oldukça karmaşıktır ve detaylı çalışma gerektirmektedir (3).



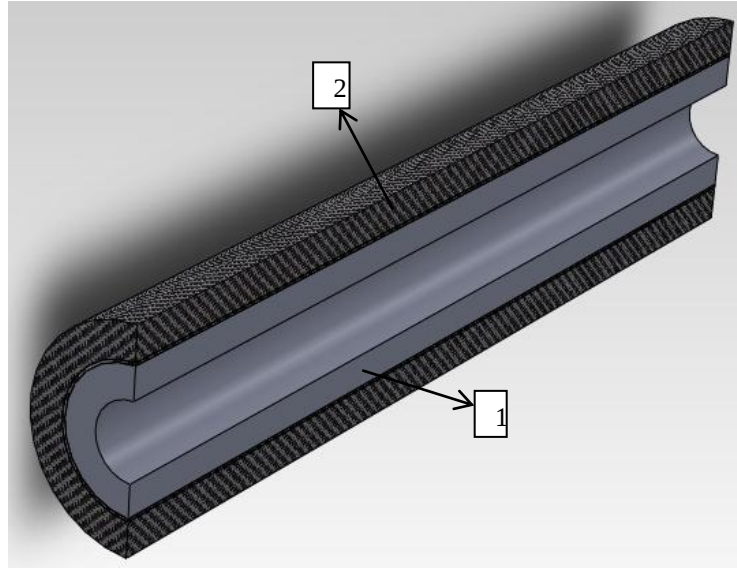
Şekil 1.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (2).

1.1. Yüksek Basınç ve Sıcaklık Uygulaması İçin Boru Konstrüksiyonları

Tamamı çelik olan boru konstrüksiyonu hali hazırda kullanılmaktadır. Tümü kompozit, içi metal dışı kompozit (Şekil 1.3) veya içi polimer dışı kompozit (Şekil 1.4) konstrüksiyonları son zamanlarda hafiflik, mukavemet ve kullanım ömrü açısından dikkate değer bulunmaktadır.



Şekil 1.3. Metal Astarlı Kompozit Boru: 1) Metal astar ve 2) Yüksek mukavemetli kompozit tabaka.



Şekil 1.4. Polimer Astarlı Kompozit Boru: 1) Polimer astar ve 2) Yüksek mukavemetli kompozit tabaka.

1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler takviye (elyaf) ve reçine malzeme olarak da bilinen iki veya daha fazla malzemenin makroskopik yapıda birleştirilmesinden meydana gelir ve birleşen malzemelerin özelliklerinden farklı bir özellik kazandırır.

Elyaf malzemesi, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini belirleyen bileşenidir. Elyaf malzemesinin tipi, elyafın reçine malzemesiyle hacimsel oranı, sarım açısı ve kompozit malzemenin elyafa göre yapılış şekli kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini doğrudan etkiler. Endüstride karbon elyaf, cam elyaf ve Kevlar® elyafı en çok bilinen elyaflardır. Cam elyafı diğer elyaflar arasında en ucuz olan buna mukabil sanayide en sık kullanılan elyaftır. Dayanımı ve rijitliği iyi olmakla birlikte darbelere karşı direnci çok iyi değildir. Karbon elyafı dayanımı ve katılığı diğer elyaflar içerisinde en yüksek olan elyaftır. Yorulma yüklerine karşı dayanımı oldukça yüksek fakat darbeli yüklere karşı dayanımı azdır. Isıl genleşme katsayısı düşüktür. Karbon elyafı diğer elyaflar arasında en pahalı elyaftır. Aramid olarak da bilinen Kevlar49® elyafı yüksek dayanıma ve düşük yoğunluğa sahiptir. Darbe yüklerine ve sıcaklığa karşı dayanımı yüksek olmakla beraber düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir. Ayrıca Kevlar49® elyafının maliyeti Karbon elyafına göre oldukça uygundur.

Matris malzemesi, plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerinde önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir diğer amacı da elyaf malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü elyaflar arasında homojen olarak dağıtmaktır. Sanayide matris malzemesi olarak polimerler, metaller ve seramikler kullanılmaktadır. Bunların içinde polimerler modern kompozitlerde sorunsuz olarak en çok kullanılan reçine malzemeleridir. Polimerler yapı ve davranışlarına göre kendi içinde Termosetler ve Termoplastik olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar (4).

Termoset reçineler kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyetlerinden dolayı en çok tercih edilen reçine türüdür. Termoset reçineler düşük viskoziteye sahiptirler. Bu

durum elyaflar ile kusursuz birleşme ve yüksek hızlarda işlem yapabilmeyi sağlar. En iyi bilinen termoset reçineler poliyester, vinil ester, epoksi ve phenoliktir. Termosetler içerisinde epoksiler uygun mekanik özellikleri ve çevre şartlarına karşı dayanımlarından dolayı en çok tercih edilen reçine malzemesidir. Epoksiler fırınlama sonrası diğer reçinelerden daha az çekerler ve ısı ve sudan daha az etkilenirler.

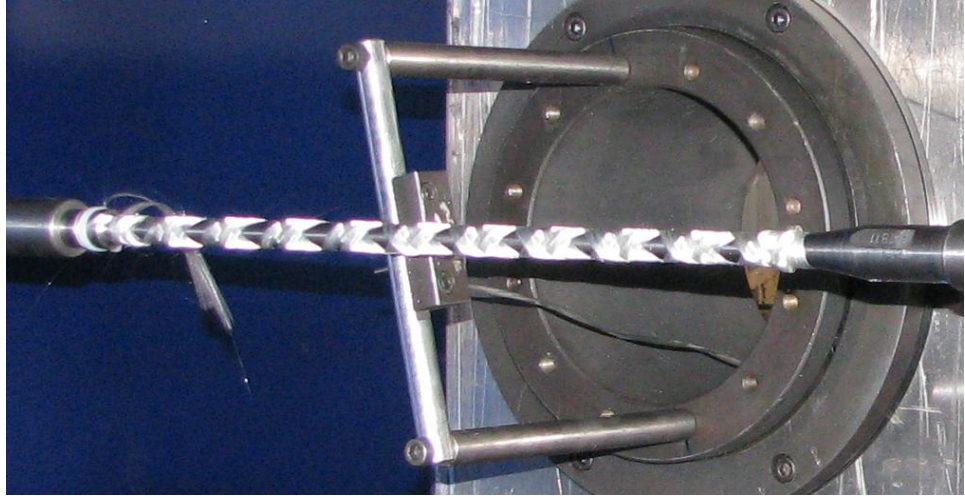
Termoplastik reçineler yüksek çekme dayanımına ve yüksek uzama kabiliyetine sahiptir. En iyi bilinen termoplastik reçineler polyamid (PI), polyether ether ketone (PEEK) ve polyphenylene sulfone (PPS) dir. Termoplastik kompozit malzemelerin uygulanması esnasında reçine malzemesinde herhangi bir kimyasal değişim olmaz. Ancak reçine malzemesi uygulama esnasında ısıtılarak sert halden yumuşak hale getirilir ve bu sayede kolay bir uygulama gerçekleştirilir. İşlem bittikten sonra reçine malzemesi eski sert halini alır. Termoplastikler işlem sırasında yüksek viskositeye sahiptirler. Bu durum onların işlemlerini zorlaştırır. Termoplastik reçinelerin diğer reçinelere göre üstün olan önemli bir özelliği ısıl kabiliyetleridir. Bu reçineler içinde PEEK'in yumuşama sıcaklığı 350 °C kadar çıkmakta ve 450 °C'ye kadar kullanışlılığını kaybetmemektedir. Bu yüzden sıcaklığın etkili olduğu yapılarda termoplastik reçineli kompozit malzemeler termoset reçineli kompozit malzemelere üstünlük sağlamaktadır (5).

1.3. Kompozit Destekli Boru İmalatı

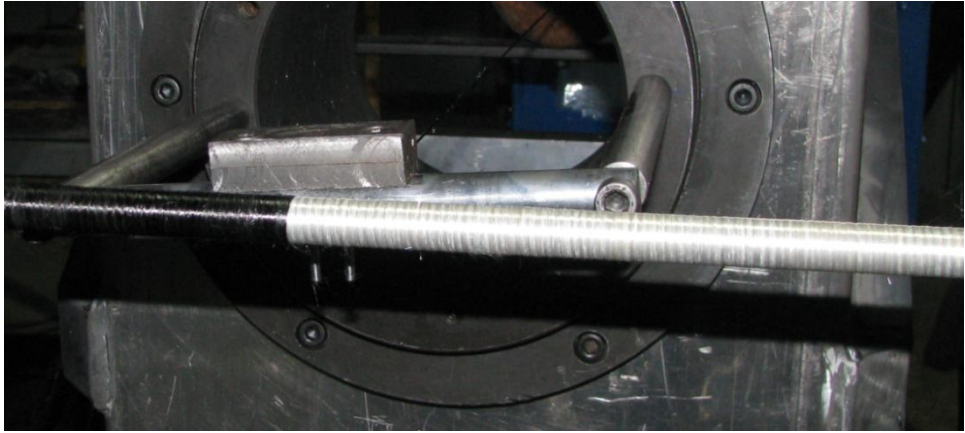
Filaman sarım tekniği silindirik geometrilerin kompozit olarak üretiminde kullanılan ve bilinen en verimli yöntemlerden biridir. Günümüzde filaman sarım tekniği depolama tankları, uçak, helikopter, yel değirmeni palleri, roket boruları, namlu, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, burulma çubukları, pinömatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (6).

Tasarımları özel olarak yapılmış sargı makineleriyle kafa ve malafa dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan desenlerin bütün malafayı kaplaması halinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı

veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açısı malafa eksenini ile malafaya dik doğrultu arasındaki açı olup 4 ve üzeri eksene sahip CNC Flaman Sarım Tezgâhlarında 15° ile 90° ve arasındaki açılarda sarım gerçekleştirilebilmektedir. Flaman sarım tezgâhlarında (Şekil 1.5) temel yaklaşım malafa dönerken elyaf besleme kafası ileri geri hareket eder. Malafa dönüş hızı ile kafa hızı ayarlanarak istenilen sarım açısı elde edilir. Elyaf bantları birbirine bitişik olarak sarılır ve bir katman artı ve bir katmanda eksi iki ayrı kattan meydana gelir.



(a) Helisel sarım.



(b) Teğetsel sarım.

Şekil 1.5. (a) ve (b). CNC Flaman sarım makinesi ile sarım.

Teğetsel sarım veya çevresel sarımda, sarım açısı 90° ye çok yakın olduğundan malafanın her devri sonunda araba bir bant genişliği (hatve) kadar ilerler. Araba hareketini tamamladığında malafa yüzeyi elyafı ile kaplanarak tek kat meydana gelir.

Sarım parametreleri basit makinelerde deneme yanılma yöntemi ile ayarlanır. Bilgisayar destekli makinelerde ise parametreler hesaplanarak bilgisayara girilir. Başarılı bir sarım için, elyaf gerilimi, reçine malzemesi yüzdesi, bant genişliği ve katman kalınlığı önemli parametrelerdir. Ayrıca en uygun mekanik özelliklerin, mamulün homojenliğinin sağlanması ve elyaf hasarının önlenmesi için gereken özen gösterilmelidir. Aşınma ve hasarı önlemek için kuru elyaf demeti reçine içine girinceye kadar gerilme asgari düzeyde tutulmalıdır. Reçine banyosundan sonra gerilme değeri sarım düzeyine çıkarılır. Hassas bir sarım için, düzgün bir sarımın yanında bant özelliklerinin iyi kontrolü yani bant kesitinin homojen ve istenen boyutlarda olması gerekir. Uniform bir bant ile sadece mukavemet artmaz ayrıca sabit bir kalınlıkta sağlanabilir. Birim kat kalınlığı, belirli bir bant yoğunluğu (uç sayısı/genişlik) ve elyaf yüzdesi ile hesaplanır. Katman kalınlığı, genellikle üretici firmalarca hazırlanmış grafiklerden belirlenir. Bant yoğunluğu ve elyaf/reçine oranının dışında, boşluk miktarı ve malafa üzerindeki sıkışmada ortalama katman kalınlığını etkiler. Sarım hızı, tezgâh ve malzeme tipine göre büyük ölçüde değişmektedir. 100 m/dak. kadar sarım hızı olumlu sonuç vermektedir. Hassas sarım için daha düşük hızlar (15~30 m/dak) kullanılmaktadır.

1.4. Bilgisayar Destekli Mühendislik Simülasyonu

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin, daha basit ve kısa zamanda çözmek için bu problemlere eşdeğer ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözüme gidilmesi sonlu eleman metodunun (SEM) temelindeki fikirdir. Genellikle, basitleştirmeye gidilmesi sonucunda doğru sonuç yerine, yaklaşık bir sonuç bulunmaktadır. Günümüzde, SEM'in bilgisayarlarda uygulanması sonucunda hemen her problem için yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir. SEM'de, çözüm bölgesi çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsi çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerinin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır (7).

Günümüzde, SEM uygulamaları için birçok yazılım geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları, ANSYS®, NASTRAN&PATRAN®, ABAQUS® vs. dir. Bazı SEM

yazılımları kendi bünyesinde modelleme paketleri bulundurmasına karşı çoğunlukla karmaşık geometrilerin modellenmesi uzun zaman almakta ve bazen hiç yapılamamaktadır. Bundan dolayı, iki ve üç boyutlu problemlerin modellenebilmesi amacıyla çeşitli paket programlar hazırlanmıştır. Bunlar arasında Catia®, Pro/Engineer®, Solidworks®, AutoCAD® vs. programları en çok bilinenleridir (8).

Bu tez çalışması için en uygun program olarak ABAQUS® seçilmiştir. Bunun sebebi ABAQUS®'nin tasarım kısmının basınç ve sıcaklık yüklemelerinin aynı anda ve değişken olarak uygulanarak iteratif problem çözüm yapabilmesi ve bunun yanısıra kullanıcı dostu olmasıdır. ABAQUS® başlatıldığında Şekil 1.6'da görülen ana pencere ekrana gelir. Bu programın birkaç özelliği bilinmelidir. Öncelikle, ABAQUS®/CAE görsel bir şekilde bir problemin modellenerek analiz edebilmeyi sağlaması yanında bir de komut yazılarak çözüme verilmesi olanağını sunmaktadır. Örneğin, eğer problemin geometrisinin koordinatları, sınır şartları vs. biliniyorsa, o halde bu problem kolaylıkla herhangi bir metin editöründe programın kendine has komutlarıyla yazılarak analize verilebilir. Aksi halde, eğer problemin geometrisi karmaşık, sınır değerlerinin yerleri ancak modelin oluşturulmasıyla tespit edilebiliyorsa, bu durumda program ara yüzünü çalıştırılarak problem baştan modellenmeli ve analiz edilmelidir.

Sonlu elemanlar çözümlerlerinin en büyük faydalarından birisi de daha ön tasarım aşamasında iken farklı tasarım yaklaşımlarının veya kavramlarının değerlendirilmesine olanak tanımasıdır. Tasarımdaki temas, malzeme doğrusalsızlığı gibi etkilerin anlaşılması, ürün geliştirme sürecinin hayati aşamalarından biridir. Üretim sürecindeki %5'lik küçük bir iyileştirme olumlu mali geri dönüşü olmaktadır.

Sonlu eleman yazılımları yüksek performanslı, güvenilir, kaliteli, daha gerçekçi modelleri oluşturmaya ve çözmeye imkan verebilmelidir. Abaqus' un dört ana çekirdek yazılımı vardır: Abaqus/Standard, Abaqus®/Explicit, Abaqus®/CFD ve Abaqus®/CAE.

Abaqus®/Standard; statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bunların birbirlerine etkileşimleri (çift-etkili) çözümlerleri için geliştirilmiş kapalı (implicit) sonlu

elemanlar çözücüsüdür. Abaqus/Standard ayrıca plastik enjeksiyon kalıp çözümlemeleri için bazı yazılımlarla sonuç alış verişi yapabilmektedir.

Abaqus®/Explicit, zamana bağlı dinamik ve quasi-statik problemlerin modellenmesi ve çözümlenmesi için geliştirilmiştir. Açık (explicit) bir sonlu eleman çözücüsüdür. Düşürme testi benzetimleri, çarpışma, ürün benzetimleri ve temas modelleme kabiliyetine sahiptir.

Abaqus®/CFD, hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsüdür. Abaqus/CAE ile entegre çalışmakta olup Ön/Son (Pre&Post) özellikleri Abaqus®/CAE tarafından desteklenmektedir. Abaqus®/CFD ile, doğrusal olmayan ısı-akış ve yapısal-akış problemleri gibi bir çok uygulamaların benzetimi mümkündür.

Yukarıda bahsedilen Abaqus çözücülerini için tümünden bir kullanıcı ara yüzü ortamı sağlar. Günümüz kullanıcı ve bilgisayar ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilmiş bir sonlu elemanlar Ön/Son (Pre&Post) yazılımıdır. Diğer çağdaş CAD yazılımlarında olduğu gibi unsur tabanlı değiştirgeçli (parametrik) modelleme kabiliyetine sahiptir. Doğrudan ve dolaylı yollardan dışarıdan geometri okunabilmekte ve sadeleştirilebilmektedir (defeaturing). Abaqus çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi veya son işlemi Abaqus®/CAE ile yapılmaktadır. Çok büyük çözüm dosyaları (>3Gb), pahalı grafik kartlarını ihtiyaç duyulmadan çok hızlı bir şekilde okunabilmekte, model rahatlıkla döndürülebilmektedir.

1.5. Literatür Çalışmaları

Literatür araştırmalarında kompozit boru tasarımı ve analizleriyle ilgili hem deneysel hem de teorik birçok akademik çalışmaya rastlanmıştır. Araştırmaların çoğunda kompozit boruların iyileştirilmesine yönelik deneysel ve teorik çalışmalara yer verilmiştir. Yük durumuna göre üretim parametrelerinin belirlenmesi ve malzeme özelliklerinin boru tasarım parametrelerine etkisi çalışmalarda yer almasının yanı sıra, sarım açılarının basınç altındaki boruların dayanımına etkisi incelenmiş ve bu konuya yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Özellikle 2000 yılından itibaren, yüksek hareket kabiliyeti isteyen muharebe stratejilerinden dolayı, hafif silah teknolojilerinde kompozitlerin kullanılma imkânları araştırılmaya başlanmıştır. Bu araştırmalarda hafif kompozit zırh ve 120 mm kalibreye kadar kompozit namlu konuları başı çekmektedir. Bilimsel literatürde genelde kompozit tüp (veya boru) olarak adlandırılan namlular üzerinde yapılan çalışmalar aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

Önder, tabakalı ince cidarlı E-Cam/Epoksi kompozit tankların maksimum patlama basıncındaki optimum tabaka açılarını araştırmıştır. Çalışmada filaman sarımlı kompozit borular üzerindeki sarım açılarının etkileri ele alınmıştır. Kompozit tüpte oluşan hasarı belirlemek için nümerik çözüm yöntemi Lekhnitskii teorisi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemle hasar basıncı aynı ısı etkisi ile değişik açılı oryantasyonlarında hesaplanmıştır. Tsai-Wu hasar kriteri tabakalarda oluşan hasarın kontrolünde uygulanmaktadır. İçten basınca maruz helisel açıda sarımlı kompozit borularda optimum sarım açısının 55° civarında olduğunu, tek açıda sarımlı kompozit borularda ise bu değerin 90° olduğunu tespit etmiştir (9).

Balya ve Parnas, kombine yükler altındaki filaman sargı tüplerin tasarım ve analiz yapmıştır. Filaman sargı tüplerin çeşitli kombine yükler altındaki davranışının incelenmesi için SEM tekniği kullanılmıştır. Filaman sargı tüpler, SEM tekniği kullanılarak tabakalı ortotrop tüpler olarak modellenmiştir. Tabakalı tüpler üzerinde değişik yüklemeler için çeşitli analizler yapılmış ve tasarım için gerekli veriler elde

edilmiştir. Sarım açısı, ortotropluk seviyesi ve yükler arasındaki oran özellikle dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçların optimum sarım açısı, yükler arasındaki optimum oran, ortotropluk seviyesi vb. açılardan literatürde belirtilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, sonlu eleman modelinin değişkenleri, hata kaynakları ve modelleme sırasında yapılan varsayımlar da tartışılmıştır. Sonuç olarak kombine yükler altındaki filaman sargı tüplerin tasarımına yönelik, her bir katmanda oluşan eksenel ve teğetsel gerilmeler, katman hasar durumları verilmiştir (10).

Rhee ve arkadaşları, 1 Bar ve 3000 Bar arasında değişen hidrostatik basınçlar altında çok katmanlı karbon/epoksi kompozitlerinin delaminasyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Basmada delaminasyon tokluğunun (G_c) hidrostatik basınçlar etkisinde 2.11 kJ/m^2 'den 3.04 kJ/m^2 'ye (%44) yükseldiğini belirlemişlerdir (11).

Amerikan ordusuna ait Benet laboratuvarında çalışan A. Littlefield vd. 889 kg'lık kütleye, 5460 mm'lik uzunluğa ve 120 mm'lik kalibreye sahip tank topu namlusundan 56.4 kg'lık çeliği tornalayıp, yerine benzer performansı sağlayan 11.3 kg'lık Karbon/PEEK (polietereterketon) kompozit malzemeyi sararak geliştirmiş ve eşdeğeri çelik namludan böylece 45.4'kg'lık kütle azaltımı gerçekleştirmişlerdir. 2006 yılında basılan bu bilimsel makalelerinde yazarlar, tasarım sürecinde aşılın problemleri irdelemişlerdir (12).

Underwood, 2007 yılındaki Benet laboratuvarındaki çalışmalarında tantalyum, krom ve seramik kaplamaların namluların termomekanik çatlak ve aşınma davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir (13).

Chen, çok katmanlı metalik namlularda ısı analizini mekanik deformasyonları ihmal ederek yapmıştır (14).

Katz ve Emerson, iki farklı araştırma grubu olarak 2006 yılı A.B.D. ordusu destekli çalışmalarında, hibrit CMM/MMC kompozitlerinin 5.56 mm kalibreli namlularda kullanımını araştırmışlardır. Araştırmalarında bu tür namlular üzerinde M. Grujicic vd.'nin yaptığı güvenilirlik analizini uygulamışlardır (15,16,17).

Chen, 2008 yılında yayınlanan çalışmalarında şekil hafızalı malzeme destekli Kevlar/Epoksi kompozit borularda otofretaj'ın etkisini analiz etmiştir. Şekil hafızalı malzeme katkısının borunun yapısında istenilen oranda otofretaj etkisi oluşturabileceği ifade edilmiştir (18).

Zhou vd., 2009 yılı çalışmalarında hareketli basınç yüklemesi altındaki kompozit boruların titreşim analizini analitik ve sonlu eleman metoduyla gerçekleştirmiştir (19).

Kam, kompozit basınç tanklarının dayanımını farklı katman düzenleri için analitik ve deneysel olarak incelemiş ve basınç tankının hasara uğramasında ilk katman hasarının etken olduğunu varsaymıştır. Teorik analizlerde ilk katman hasarına yönelik patlama basıncı sonuçları deneysel olarak elde edilen patlama basıncı sonuçlarının oldukça aşağısında kaldığı görülmüştür. Bundan dolayı ilk katman hasar teorisinin kompozit tankların tasarımı için uygun bir teori olduğu ortaya konulmuştur (20).

Lifshitz, metal astarlı kompozit sargılı basınç tankının iç basınçtan dolayı cidarında oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerini çeşitli katman düzenlerinde ve çeşitli kompozit malzemelerine göre hesaplamıştır. Ayrıca teorik çalışmaları deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Analizlerde son katman hasar teorisinden faydalanmışlar ve Tsai Wu hasar kriterini kullanmışlardır. Analizler neticesinde helis sarım açısının düşürülmesinin tankın patlama basıncına olumlu yönde etki yaptığını bulmuşlardır. Teorik çalışmalarla elde edilen maksimum patlama basıncı değerlerli deneysel analizler neticesinde bulunan değerlerle uyumluluk göstermiştir. Kompozit basınç tankının teorik çalışmalarında tankın sadece silindirik kısmı dikkate alınmıştır (21).

Fukunaga, roket motorlarında kullanılan helisel kompozit sargılı basınç tankının küresel kısımlarının optimum tasarımını membran teorisi ve ağ analizi yardımıyla gerçekleştirmiştir. Hasar kriteri olarak kompozitle ait hasar kriterinden yararlanılmıştır. Farklı teorilerle elde edilen analiz neticeleri karşılaştırılmıştır (22).

Xia, çok katmanlı flaman sargılı kompozit boruların iç basınç altında farklı sarım düzenlerinde cidarlarında oluşan eksenel ve teğetsel gerilmeler ile şekil değiştirmeleri incelemiştir. Uygulanan iç basınca karşı iki farklı helis açısı temelinde oluşturulan farklı cidar düzenlerindeki gerilme durumuna göre en iyi katman düzeninin belirlenmesi için karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca analizlerde aynı katman düzeninde ve yüklemde eksenel ve teğetsel gerilmeler arasındaki değişimde incelenmiştir. Oldukça ince cidarlı boruların cidarı boyunca oluşan teğetsel ve eksenel gerilme oranı sabittir (23).

Chang, kompozit basınç tanklarının ilk katman hasarına göre deneysel ve teorik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizlerde farklı kompozit malzeme özellikleri kullanmış ve simetrik plaka düzeni esas almıştır. Tank çeper kalınlığının, tank yarıçapıyla olan değişimini ve farklı katman sayılarının iç basınca etkisini incelemiştir. Maksimum rijitlik için simetrik katman düzeninde $[\theta/-\theta/\dots]_s$ optimum açı oryantasyonu araştırılmıştır. Kompozit basınç tankının ilk katman hasar yükü akustik emisyon AMS3 (AE) sistemi kullanılarak bulunmuştur. Deneysel sonuçların irdelenmesi sonucunda ilk katman hasar teorisinin kompozit tank tasarımında verimli sonuçlar verdiği bulunmuştur (24).

Velosa, yeni kuşak kompozit basınç tankı tasarımına yönelik çalışmalar yapmıştır. Tank termoplastik malzemeden yapılmış astar ve tamamı E cam/epoksi ile sarılmış kompozitten meydana gelmiştir. Abaqus® 6.5.1 sonlu eleman programında maksimum patlama basıncı kapasitesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Hasar kriteri olarak Tsai Wu ve Von Mises'ten yararlanılmıştır. Uygulanan basınç altında kompozit katmanlarda oluşan hasar durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca teorik olarak tasarımı yapılan tankın deneysel olarak üretimi gerçekleştirilmiş ve patlama testine tabi tutulmuştur. Çalışma neticesinde SEM analizinin kompozit tank tasarımında olumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır. Katmanlarda oluşan gerilmelere bakıldığında teğetsel eksenel gerilmelere göre, kayma gerilmelerinin kompozit basınç tankını hasar uğratan gerilmeler olmadığı anlaşılmıştır (25).

Antunes, çelik astarlı ve E cam elyaf / termoplastik reçineli kompozit gaz tankının sonlu eleman analizini gerçekleştirmiştir. Analizde katman düzenini modellerken

elik ve kompozit malzemeyi kabuk yapıda birlikte incelemişlerdir. Hasar kriteri olarak Tsai Wu ve von Mises hasar kriterlerinden yararlanılmıştır. Uygulanan basınç altında elik cidarında ve kompozit katmanlarda oluşan hasar durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca kompozit tankın prototipi üretilmiş ve tasarımı yapılan tankın maksimum patlama basıncı değeri ile prototip tankın patlama basıncı değerleri karşılaştırılmıştır (26).

Roy, kalın kompozit silindirler için basit ve verimli bir dizayn metodu incelemiştir. Gerilme analizi, genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirme durumundaki silindirleri göz önünde bulundurarak 3 boyutlu elastisiteye dayanmaktadır. İ ve dış basınç ve eksenel yüke maruz kalan, her iki ucu açık silindirler (borular) ve kapalı silindirler (basıncılı kaplar) için analiz yöntemi verilmiştir. Silindirlerin hasarı, 3 boyutlu bir kuadratik hasar kriteri kullanılarak önceden belirlenmiştir. Hem ince hem de kalın silindirler için, patlama basınçlarını hesaplamak amacıyla indirgenmiş bir model kullanılmıştır ve hesaplanan patlama basınçları, elde edilen deneysel sonuçlar ile çok iyi uyum göstermektedir. Optimum durumdaki çok tabakalı silindirlerde, 3 boyutlu kuadratik kriter en uygun tabaka sıralamasını çok kolay bir şekilde elde etmeye bir imkan tanımaktadır. Tabaka sıralamasının, özellikle kalın silindirlerde, çok kritik olduğu bulunmuştur. Buna ilave olarak, aynı zamanda iten basına maruz çok tabakalı kapalı silindirlerin dizayn parametreleri ve verimli bir şekilde kullanılabileceği malzeme üzerine çalışılmıştır (27).

Sayman, hidrotermal yüklemeler altındaki ince veya kalın çok tabakalı kompozit silindirler için genel bir gerilme analizi metodu geliştirmiştir. Tabakalar $(0/90)_2$, $(30/-30)_2$, $(45/-45)_2$ ve $(60/-60)_2$ elyaf açıları için simetrik veya antisimetrik olarak yönlendirilmişlerdir. Analizler, borunun uçlarının açık kapalı olduğu sınır şartı ile düzlem gerilme durumu dikkate alınarak yapılmıştır. Termal yüklemeler için ise homojen ve parabolik sıcaklık dağılımları seçilmiştir. Bütün integrasyon sabitleri tabakaların normali yönündeki radyal gerilme ve şekil değiştirmelerden bulunmuştur. Hidrotermal zellikler ve diğer mekanik özellikler bir cam elyafı-epoksi kompozit tabaka üzerinde tespit edilmiştir. ANSYS sonlu eleman paket programı vasıtası ile elde edilen sonlu eleman zmleri, bazı analitik sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında uyum olduğu tespit edilmiştir (28).

Kamat, alüminyum astarlı karbon elyaf/epoksi reçineli kompozit sargılı basınç tankının sonlu eleman analizi Genoa Cobstran programında gerçekleştirmiştir. Çalışmada tankın uç kısımlarının küresel, eliptik ve geodezik geometrilerde olmasının tankın dayanıma etkisi incelenmiştir. Analizlerde tankın kritik bölgesinin geçiş bölgesi olduğu ve kompozit yapının ilk hasarlarının ardından bütünün hasara uğramasının bu bölgede olduğu saptanmıştır (29).

Akçay, iç basınç ve uniform termal yükler altında çok katmanlı flaman sargılı kompozit boruların düzlem gerilme durumu için analitik olarak hasar analizleri gerçekleştirmiştir. Analizlerde farklı konfigürasyonlarda simetrik ve anti simetrik katman düzenlerinin basınç tankının dayanımına yönelik etkileri incelemiştir. Kompozit malzeme olarak E cam/epoksi malzemesi kullanılmıştır. Analiz sonucunda basınç tankında artan sıcaklığın elyaf açısı oryantasyonuna göre patlama basıncı eğrileri elde edilmiştir. Kompozit basınç tankında sıcaklık arttırıldığında hasara neden olan patlama basıncının düştüğü olduğu görülmüştür(30).

Bakaiyan, kompozit basınç tankları için en iyi helis açısı olarak literatürde bilinen $\pm 55^\circ$ helis açısına sahip (+55/-55/+55/-55) iç basınç ve termal yükler altında ki kompozit borularda analitik olarak hasar analizleri gerçekleştirmiştir. Tsai Hill hasar kriteri kullanılarak yapılan analizlerde ± 55 helis katmanına sırasıyla ± 30 ve ± 35 'ye sahip yeni bir helis katmanın eklenmesi sonucunda (+55/-55/+35/-35) önceki haline göre tankın gerilme durumu karşılaştırılmıştır. Ayrıca helisel ve teğetsel sarıma sahip kompozit basınç tankı (+35/-35/+90/-90) için yukarıdaki analizler tekrarlanmış ve (+55/-55/+55/-55) sarım düzenine sahip tanka ait analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlarda tank yarıçapının cidar kalınlığına göre değişimi karşılaştırılması yapılan düzenlerin performansını etkilediği görülmüştür (31).

Gemia, iç basınç altındaki kompozit sargılı basınç borularının yorulma hasar durumunu incelenmiştir. Kompozit sargılı basınç tankı E cam elyaf/epoksi reçineden üretilmiş olup $\pm 75^\circ$ helisel sarımlı 4 katmandan meydana gelmiştir. Yorulma testleri 0.42 Hz frekans da, boru dayanımının %30'u ile %70' arasında ki yüklerde ASTM D-2992 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Hasar ilerlemesi olarak örneğin sızıntı ve

son hasar olan parçalanma testler sonucunda gözlenmiş olup, dayanım ve ömür diyagramları elde edilmiştir (32).

Choi, Ansys® sonlu eleman programında geliştirdiği yeni bir ara yüz programı ile çelik astarlı ve E Cam elyaf/epoksi reçineli teğetsel kompozit sargılı sıkıştırılmış doğalgaz depomla tankının tasarımın gerçekleştirmiştir. Farklı basınçlarda tank cidarında oluşan aksenel ve teğetsel gerilmeleri elde etmişlerdir. Ayrıca tasarladıkları tankın prototipini üreterek patlama deneyi gerçekleştirmişler ve çıkan sonuçları karşılaştırmışlardır (33).

Pavlovski, sıkıştırılmış doğal gaz tank imalatında karbon ve cam elyaf sarma yöntemine alternatif olarak cam elyafden daha iyi mekanik özelliklere sahip ve karbon elyafden daha ucuz olan Basalt elyaf sarma yöntemini kullanmıştır. Basalt elyaf malzemesinin bulunabilirliği esas problemi teşkil etmiştir (34).

Cherevatsky, tarafından çift fazlı (gaz/sıvı) akışkan depolamak için kullanılacak ince cidarlı metal tankın etrafına helisel sarım yöntemiyle yeni bir kompozit tank tasarımı önermiştir. Bu tasarımda kullanılan ince cidarlı metal sargı, döküm yoluyla üretilmiştir (35).

Djehiche, ise Helisel sarım yöntemi ile üretilen basınçlı kompozit tank çeşidinden biri olan katı yakıtlı roket motoruna etkiyen gerilmeleri ve tankın patlama basıncını, doğrusal olmayan SEM kullanarak incelemiştir. Malzeme performansı ve geometrik düzgünlüğün haznenin yükleme kapasitesine olan etkisini de araştırmıştır (36).

Helis sarma yöntemi ile üretilen kompozit basınçlı tanklar uzay teknolojisinde basınçlı gaz depolamak için de kullanılmaktadır. Walter uzay araçlarında Helyum depolamak için Titanyum iç gömleğin etrafına kompozit malzemedan helisel sarım yöntemiyle çift cidarlı basınçlı tank tasarımı; başka bir çalışmalarında ise uzay araçlarında Xenon depolamak için konik çift cidarlı titanyum basınçlı tank tasarımı ve imalatını yapmıştır. Tankın analizi için lineer olmayan malzeme ve büyük şekil değiştirme modelleme yaklaşımları kullanılmıştır (37,38).

Parnas, kalın cidarlı elyaf takviyeli kompozit basınç tanklarının değişik yükleme durumları için klasik katman teorisi kullanılarak düzlem gerinim durumunda tasarım analizleri gerçekleştirmiştir. Farklı yüklemelerde kompozit basınç tankının sarım açısına yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca ince cidar ve kalın cidarlı tank geometrisine ait teorik sonuçlar benzer olarak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Teorik sonuçlar neticesinde i basınç yüklemesinde en iyi sarım açısı olarak 52.1° ve 54.2° aılar elde edilmiştir. Bulunan optimum sarım aı aralığı ağ analizi ile elde edilmiş 54.74° sarım açısı ile uyum göstermiştir (39).

Yukarıda 2000 yılı ve sonrasını kapsayan bilimsel literatüre bakıldığında, kompozit namı teknolojisini konusunun yeni ve stratejik öneme sahip olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır.

Kompozit boru tasarımına yönelik birçok analitik ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve bazı çalışmalarda deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler ilk katman hasarına yönelik olup hasar kriteri olarak Tsai Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Analizlerde optimum sarım açısı ve en iyi kompozit katman oryantasyonuna yönelik hesaplamalar yapılmıştır.

1.6. Tezin Amaç ve Kapsamı

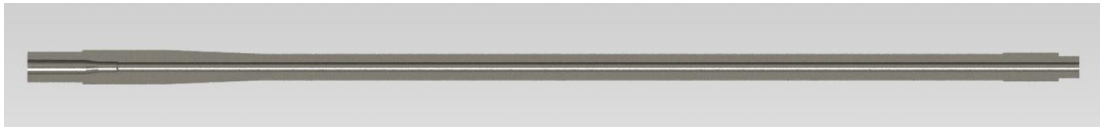
Bu tez çalışması, yüksek sıcaklığa ve dinamik iç basınca dayanıklı hafif silah borularının kompozit destekli olarak üretilebilmesindeki dar boğazlar araştırılacaktır. Bu tür boruların kullanımının azami sınırını teşkil edebilecek uygulama alanı silah namlularıdır. Kompozit malzeme desteğiyle üretilecek mevcut namlunun, servis anındaki durumları sonlu eleman yöntemiyle Abaqus® programında modellenerek, simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Mevcut namlularla atışlı testler gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneysel sıcaklık ve gerilme değerleri Abaqus verileri ile karşılaştırılarak modelin geçerliliği teyit edilmiştir. Daha sonra hafifletme oranına göre modelleme çalışmaları yapılarak çelik malzeme et kalınlığı tespit edilmiştir. Ardından kompozit malzeme seçimi, sarım açıları ve sarım kalınlığı belirlenmiştir. Kompozit namlu hesaplanan verilere göre üretilmiş ve test edilerek simülasyon verileri ile mukayese edilmiştir.

Yüksek sıcaklık ve iç basınç etkisi altındaki 7.62 mm kalibreli hafif silah namlusunun kompozit destekli olarak tasarlanmasını, üretim tekniklerinin belirlenmesini, prototip üretimin gerçekleştirilmesi, test edilmesi ve mevcut sistemlerle karşılaştırılarak yeni bir üretim yöntemi yeteneğinin kazanılması amaçlanmıştır. Bu çalışma; 7.62 mm kalibreli bir namlunun karbon/epoksi kompozit malzeme destekli tasarımı, prototip üretimi ve deneylerle test edilmesiyle sınırlandırılmıştır.

2. TEORİK ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş.

Mühendislik uygulamaları arasında en karmaşık ve en azami yüklemelere maruz boru konstrüksiyonu namlulardır. Namlu, değişken çok yüksek basınç ve sıcaklığa maruz bir boru olarak düşünülebilir. Örneği Şekil 2.1’de gösterilen namlu, barutun yerleştirilmesi ve yanması için gerekli yanma odası hacmine, merminin dönerek kararlılık kazanması için gerekli yiv-set’lere ve barut gazı enerjisinin mermiye aktarıldığı bir silindirik boya sahiptir (41,42). Konvansiyonel silahlarla hedefe gönderilen mermi, enerjisini namlu içinde almaktadır. Namlunun mukavemet özellikleri sevk barutunun yüksek enerjili olması isteğindeki en önemli kısıtlamalardan birisidir(42-44). Sadece Cr-Mo-V esaslı alaşım, çelik malzemelerle bu mukavemet şartının sağlanması, namlunun et kalınlığının ve dolayısıyla ağırlığının artmasına neden olacağından, kompozit malzeme destekli konstrüksiyonların değerlendirmeye alınması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Silah namlularında kompozit malzeme kullanılması; daha uzun yorulma ömrü, çeşitli yaklaşımlarla (soğutma kanalları, ısı iletim katsayısı yüksek reçine ve elyaf malzemeleri, helis sarım açısı manipülasyonu vb.) elde edilebilecek iyileştirilmiş ısı iletimi, silah sisteminin hafifliği, namlunun daha kararlı olması ve atış hassasiyetinin artması gibi avantajlar sağlayabilecektir. Kompozit malzemeden üretilcek namlunun tasarımında, hali hazırda kullanılan çelik malzeme belirli bir oranda yük taşıyacak şekilde daha az kalınlıkta kullanılacak ve geriye kalan yük ise çelik malzeme üzerine sarılacak elyaf/reçine oransal seçimi yapılmış kompozit malzeme tarafından taşınması sağlanacaktır. Kompozit destekli namlu tasarımında malzeme ömrü süresince çalışma şartlarındaki yüksek basınç ve sıcaklığa dayanıklı ve ağırlık kazancının da en az % 30 olacak şekilde tasarımı hedeflenmiştir.



Şekil 2.1. Namlu.

Günümüz endüstrisinde kompozit malzemelerde yükü taşıyan takviye yapı için karbon elyafı, kevlar® elyafı veya cam elyaf gibi malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemede, elyafları bir arada tutan ve kompozitin geometrisini belirleyen matris (reçine) malzemesidir. Reçine malzemesi olarak kolay ve uygun maliyette temin edilebilen, diğer malzemelere oranla düşük büzülme hızı, düşük buharlaşma miktarı ve düşük viskozite özelliğine sahip olan termoset veya termoplastik bir reçine malzemesi kullanılacaktır. Kompozit kısmın sarılmasında Flaman sargı metodu kullanılacaktır. Kompozitle sarım işlemi borunun metal astarının konstrüktif özellikleri dikkate alınarak yapılacaktır. Kompozit borunun çelik olan gömleği halen kullanılan üretim bilgi paketi ve kalite kontrol yöntemlerine göre yapılacak ve borunun inceltirme işlemi ise bu halde iken yapılacaktır.

Kompozit malzemelerin seçimi yapıldıktan sonra Netting (Ağ) ve Laminasyon (Katman) teorileri yardımıyla borunun tasarım parametreleri belirlenmiş ve bu veriler ışığında Abaqus® Sonlu Eleman Programında basınçlı boru sayısal olarak modellenecektir. Dinamik iç basınç yüklemesi nedeniyle kompozit namlunun basınç darbelerine ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıda tasarlanması, kompozit-çelik ara yüzeyindeki ayrılmaların olmayacağı ve çatlaklara karşı direncin artırılması gibi değişken parametreler tasarım kısıtları arasında yer alacaktır. Entegre edilen çift cidarlı kompozit namlunun tekrar analizi yapılarak prototip imalat aşamasına geçilecektir. Namlunun çelik kısmı MKE Kurumunda halen kullanılan üretim bilgi paketine göre önce beş adet mevcut geometride üretilecektir. Daha sonra tasarımda belirlenmiş olan et kalınlığına ve yüzey pürüzlülüğüne uygun olarak talaşlı üretimle namlunun inceltmesi gerçekleştirilmiştir. Bu talaşlı işlemede namlunun kalite kontrolleri yine mevcut bilgi paketlerine göre yapılacaktır. Çelik malzeme üzerine kompozit malzemenin uygulaması işlemi, savunma sanayine çalışan firmalarda yaptırılacaktır. Kompozit malzemenin namlu yüzeyinden sıyırılmaması, kompozit kısmın ısınmasının geciktirilmesi için ara yüzeye geçiş malzemesi kullanılacaktır. Kompozit malzemedan üretilmiş namlunun ölçü kontrolleri yapılarak uygunluğu doğrulanacaktır.

2.2. Merminin Namlu İçindeki Hareketi Boyunca Basınç, Hız ve Zaman Eğrilerinin Karakteristikleri

Vallier Heydenreich (45) bir silahta bilinen mermi ağırlığı, silah çapı, ilk hız, sevk barutu ağırlığı, basınç oranı ve namlu içinde toplam mermi yolu parametrelerine göre gaz basıncının maksimum olduğu andaki mermi yolunu, hızı, zamanı ve namlu ağzındaki basınç ile toplam mermi yolu için geçen zamanı hesaplamak üzere bazı deneye dayalı formülleri basınç oranına (η) bağlı olarak tespit etmiştir.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (2.1)$$

$$P_m = \left(\frac{m_m + 0.5m_b}{2gx_e A} \right) v_0^2 \quad (2.2)$$

$\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\phi(\eta)$, $\pi(\eta)$, $\tau(\eta)$ boyutsuz faktörler ve η basınç oranı olmak üzere, değerleri Çizelge 2.1 'de verilen bu faktörlere göre:

Gaz basıncının maksimum olduğu anda merminin namlu içinde almış olduğu yol;

$$x_1 = x_e \Sigma(\eta) \quad (2.3)$$

Gaz basıncının maksimum olduğu anda ilk hareketten itibaren geçen zaman;

$$t_1 = \left(\frac{2x_e}{v_0} \right) \Theta(\eta) \quad (2.4)$$

Gaz basıncının maksimum olduğu anda mermi hızı;

$$v_1 = v_0 \Phi(\eta) \quad (2.5)$$

Namlu ağzındaki gaz basıncı;

$$P_e = P_m \cdot \pi(\eta) \quad (2.6)$$

Namlu içindeki toplam mermi yolu için geçen zaman;

$$t_e = \left(\frac{2x_e}{v_0}\right) \tau(\eta) \quad (2.7)$$

Çizelge 2.1. $\Sigma(\eta)$, $\Theta(\eta)$, $\varphi(\eta)$, $\pi(\eta)$, $\tau(\eta)$ faktörlerinin basınç oranına bağlı değerleri (45).

η	$\Sigma(\eta)$	$\Theta(\eta)$	$\varphi(\eta)$	$\pi(\eta)$	$\tau(\eta)$
0.20	0.0262	0.150	0.322	0.274	0.744
0.25	0.0360	0.196	0.337	0.306	0.792
0.30	0.0471	0.246	0.352	0.338	0.842
0.35	0.0597	0.300	0.367	0.368	0.893
0.40	0.0740	0.358	0.383	0.400	0.946
0.45	0.0903	0.420	0.399	0.432	1.000
0.50	0.1090	0.487	0.416	0.465	1.056
0.55	0.132	0.560	0.435	0.501	1.116
0.60	0.160	0.642	0.457	0.541	1.180
0.65	0.192	0.734	0.482	0.585	1.249
0.70	0.231	0.835	0.511	0.635	1.322
0.75	0.283	0.958	0.546	0.697	1.406
0.80	0.360	1.115	0.592	0.779	1.507

Hesaplanan bu x_1 , v_1 , t_1 değerlerinden ve $P_{\max}$ değerinden yararlanarak verilen bir x namlu boyu için $\lambda_t = x / x_1$ oranını kullanmak şartıyla gaz basıncını, hızı ve zamanı aşağıdaki formüller ve Çizelge 2.2 yardımıyla hesaplayabiliriz.

$$P = P_{\max} \cdot \psi(\lambda) \quad (2.8)$$

$$v = v_1 \cdot \varphi(\lambda) \quad (2.9)$$

$$t = t_1 \cdot \delta(\lambda) \quad (2.10)$$

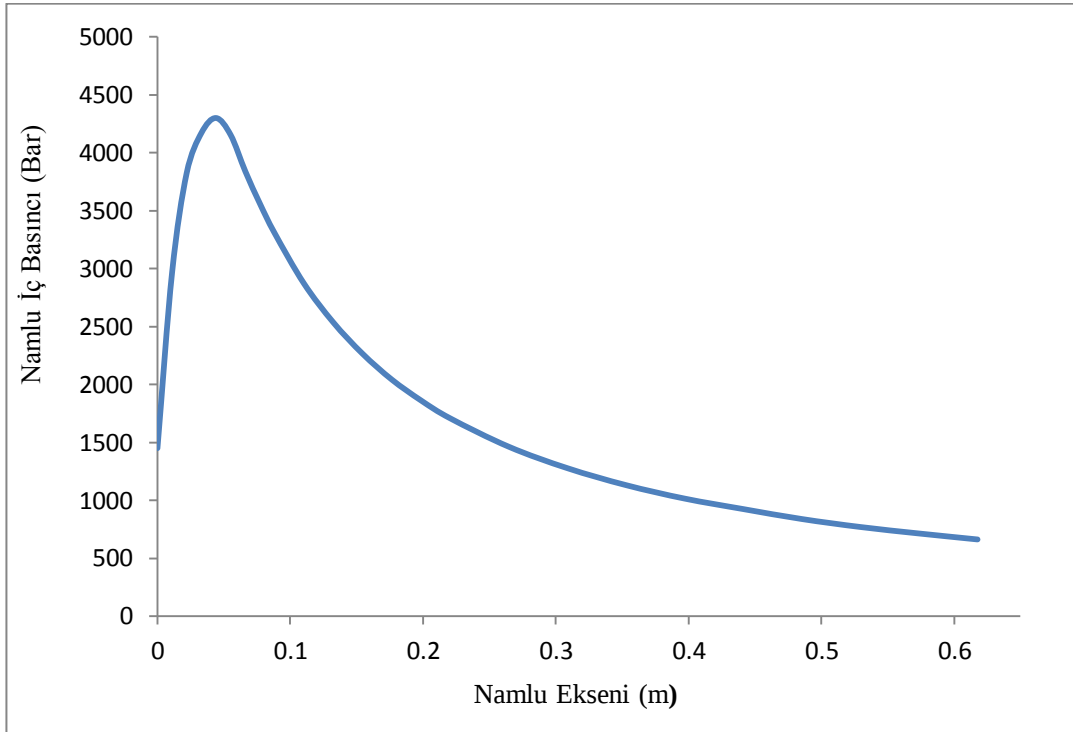
Çizelge 2.2. $\psi(\lambda)$, $\phi(\lambda)$, $\delta(\lambda)$ değerlerinin $\lambda_t = \frac{x}{x_1}$ 'e bağlı değerleri (45).

$\lambda = \frac{x}{x_1}$	$\psi(\lambda)$	$\phi(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
0.25	0.690	0.375	0.689
0.50	0.890	0.624	0.830
0.75	0.970	0.828	0.924
1.00	1.000	1.000	1.000
1.25	0.966	1.145	1.063
1.50	0.893	1.268	1.119
1.75	0.828	1.372	1.170
2.00	0.769	1.460	1.218
2.5	0.668	1.609	1.306
3.0	0.590	1.726	1.387
3.5	0.527	1.824	1.463
4.0	0.475	1.909	1.536
4.5	0.433	1.981	1.606
5.0	0.397	2.046	1.672
6	0.340	2.158	1.801
7	0.297	2.250	1.923
8	0.263	2.328	2.042
9	0.236	2.395	2.126
10	0.274	2.453	2.267
20	0.108	2.812	3.286
25	0.860	2.921	3.758
30	0.710	3.004	4.214
35	0.600	3.070	4.659
40	0.520	3.132	5.095
45	0.460	3.182	5.523
50	0.041	3.220	5.946
75	0.027	3.373	7.995
100	0.20	3.480	9.966

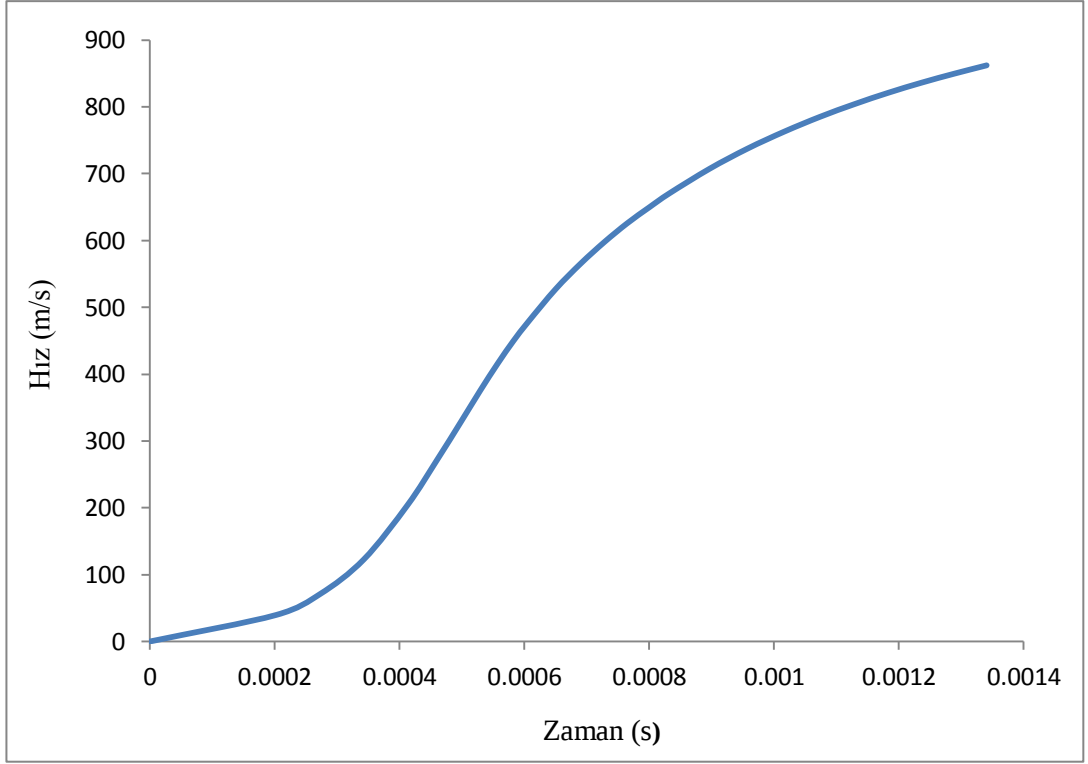
Bu çalışmada kompozit malzeme kullanılarak tasarlanması hedeflenen silah namlusunun ve bu namluda kullanılan fişegin özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir. Yukarıda verilen Vallier Heydenreich metodu parametrik hale getirilmiştir. İncelenen namlu ve fişek özellikleri için namlu ekseni boyunca değişen basınç eğrisi Şekil 2.2’de, hız zaman eğrisi Şekil 2.3’te ve namlu ekseni boyunca hız değişimi ise Şekil 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.3. İncelenen namlunun balistik özellikleri.

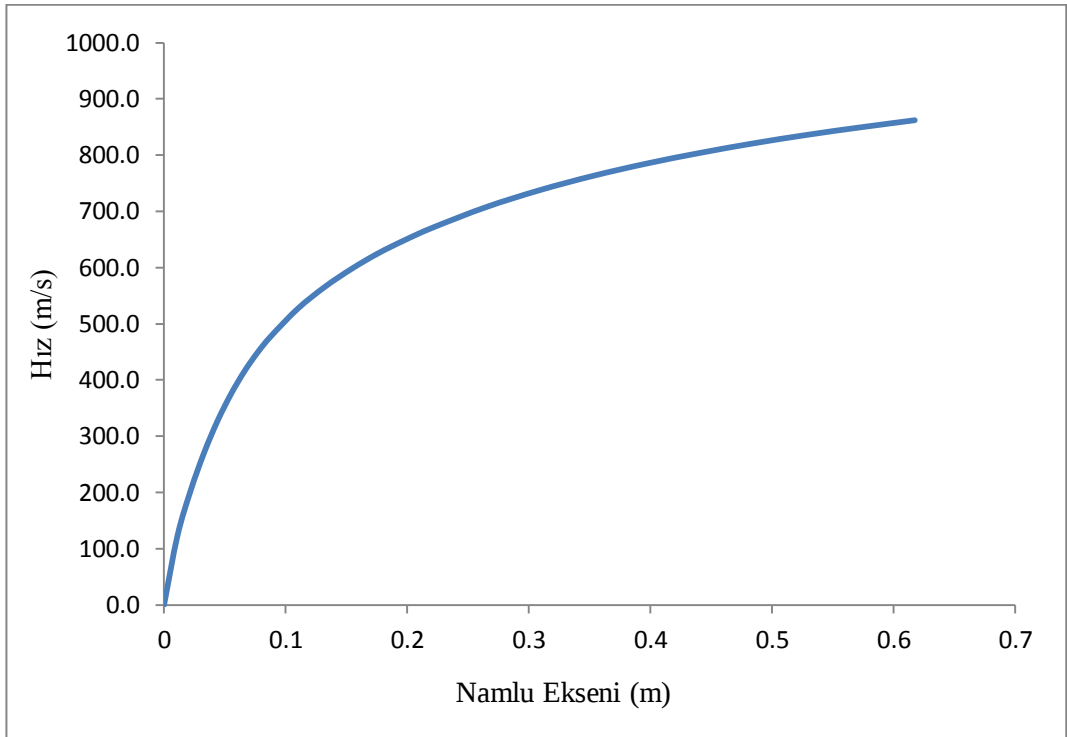
Basınç Oranı (η)		0.39
Mermi Ağırlığı	(kg)	0.011
Sevk Barutu Ağırlığı	(kg)	0.003
Namlu Boyu (yiv-set)	(m)	0.61
Namlu Çapı	(cm)	0.762
İlk Hız	(m/s)	860
Maksimum Basınç	(kg/cm ²)	4300



Şekil 2.2. Namlu ekseni boyunca basınç değişimi.



Şekil 2.3. Zamana bağlı hız değişimi.



Şekil 2.4. Namlu eksenine boyunca hız değişimi.

2.3. Çelik Gömleğin Tasarımı

Hedef balistiğindeki etkinin oluşturulabilmesi için fişğin namlu ağzında istenen öteleme ve açısal hıza sahip olması gerekir. Mermi namluyu terk ettikten sonra enerji almadığından bu enerjiyi yalnızca namlu içinde almaktadır. Namlu boyunca merminin hareketini sağlayan barut gazlarının basınç, hız, yol ve zaman değişkenlerini gösteren grafik Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilmektedir. Dinamik iç basıncın namlu boyunca dağılımı, fişğin namlu içindeki seyahat süresi ve hızı gibi iç balistik değişkenleri hesaplamalarda yukarıda anlatılan Vallier-Heydenreich yöntemi referans alınmıştır.

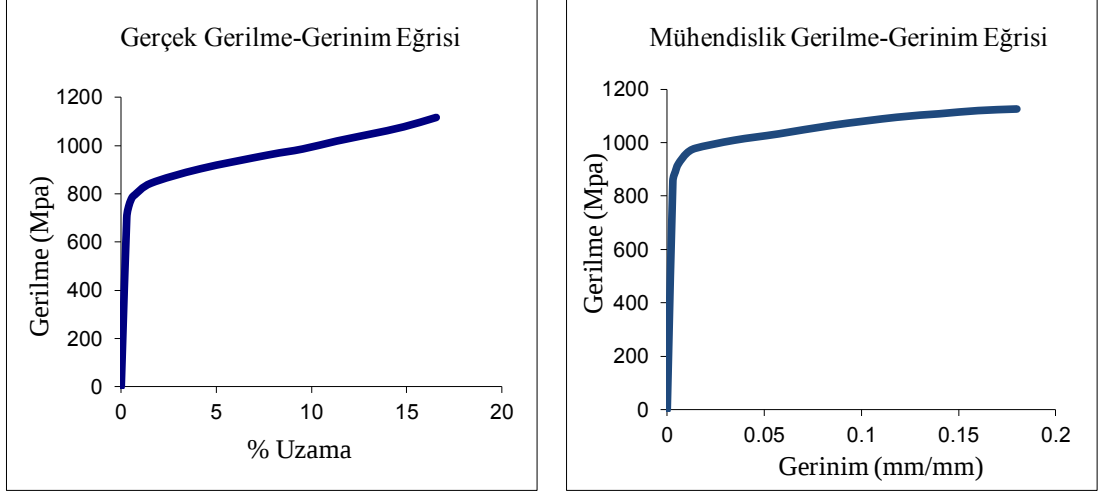
Halen kullanılan namlu malzemesinin incelemesi yapılarak güvenlik katsayıları ve montaj için yapılmış şekil değişiklikleri incelenecek ve SolidWorks® paket programında namlu halen kullanılan şekliyle parametrik olarak modellenmiştir. Namlu çeliğinin dövme öncesi mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te, dövme sonrası mekanik özellikleri ise Çizelge 2.5'de verilmiştir. Ayrıca namlu malzemesinin gerçek ve mühendislik gerilme-gerinim değerleri dövme öncesi ve dövme sonrası olarak da incelenmiştir (Şekil 2.5. ve 2.6.)

Çizelge 2.4. Namlu çeliğinin dövme öncesi mekanik özellikleri.

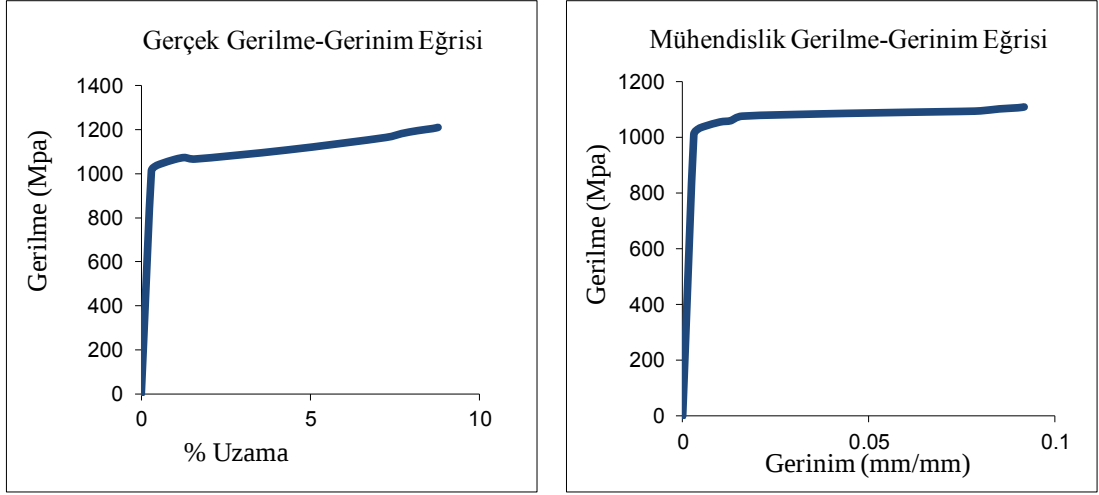
Çekme dayanımı	950 MPa	Kopma uzaması	%18
Akma dayanımı	780 MPa	Sertlik	290 HB
Elastisite modülü	208 GPa	Yoğunluk	7850 kg/m ³

Çizelge 2.5. Namlu çeliğinin dövme sonrası mekanik özellikleri

Çekme dayanımı	1109 MPa	Kopma uzaması	%9
Akma dayanımı	1010 MPa	Sertlik	330 HB
Elastisite modülü	238 GPa	Yoğunluk	7850 kg/m ³



Şekil 2.5. Namlu çeliğinin dövme öncesi gerilme gerinim eğrileri.



Şekil 2.6. Namlu çeliğinin dövme sonrası gerilme gerinim eğrileri.

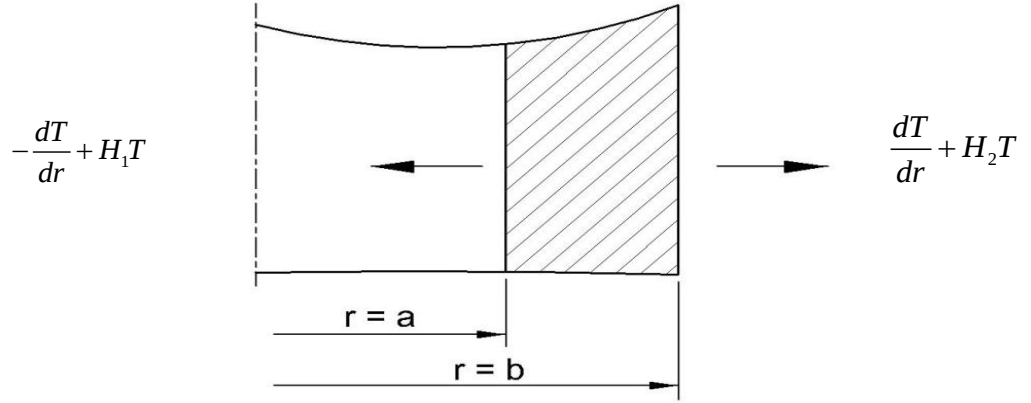
2.4. Atış Esnasında Isı Transferinin Analitik Hesabı

Namlu içindeki fişğin ateşleme zinciri, kapsüle silah iğnesinin çarpması ile başlar, kapsülün patlaması ile de sevk barutu yanar. Sevk barutunun yanmasından ortaya çıkan gazlar merminin namluyu terk etmesine kadar geçen sürede mermiye öteleme ve dönme enerjisi verir. Bu ateşleme zincirinin gerçekleşme süresi incelenen fişek için yaklaşık olarak 0.00134 saniye kadardır. Kompozit malzeme kullanılarak üretilen namlunun çalışma şartlarında karşılaşılabilecek sorunlardan biri de ısınma sorunudur. Bu nedenle atış esnasında namlunun sıcaklık dağılımı önem arz etmektedir.

Silindirik koordinat sisteminde ısı iletim eşitliği genel ifadesi (2.11.)’de verilmiştir. Açısal simetri mevcut ve silindirin boyu sonsuz uzunlukta olduğu kabul edilirse, (2.11) eşitliği (2.12) ifadesiyle temsil edilebilir (46,47).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \delta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.12)$$



Şekil 2.7. Namlunun kesit görünüşü.

Sınır Şartları Şekil 2.7’den,

$$r = a \Rightarrow -\frac{dT}{dr} + H_1 T = 0 \quad \text{ve} \quad r = b \Rightarrow \frac{dT}{dr} + H_2 T = 0 \quad (2.13)$$

Başlangıç şartları,

$$r = a \Rightarrow T = T_{ay} \quad \text{ve} \quad r = b \Rightarrow T = T_{by} \quad (2.14)$$

(2.12) denklemini değişkenlerine ayırma yöntemine göre çözülecek olursa:

$$T(r,t) = R(r)\Gamma(t) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda^2 \quad \text{olsun} \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda^2 \quad \Rightarrow \quad \text{çözüm} \quad \Gamma = e^{-\lambda^2 \alpha t} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = -\lambda^2 \quad \Rightarrow \quad \text{çözüm} \quad R = AJ_0(\lambda r) + BY_0(\lambda r) \quad (2.18)$$

Genel çözüm,

$$T(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[e^{-\lambda_n^2 \alpha t} (A_n J_0(\lambda_n r) + B_n Y_0(\lambda_n r)) \right] \quad (2.19)$$

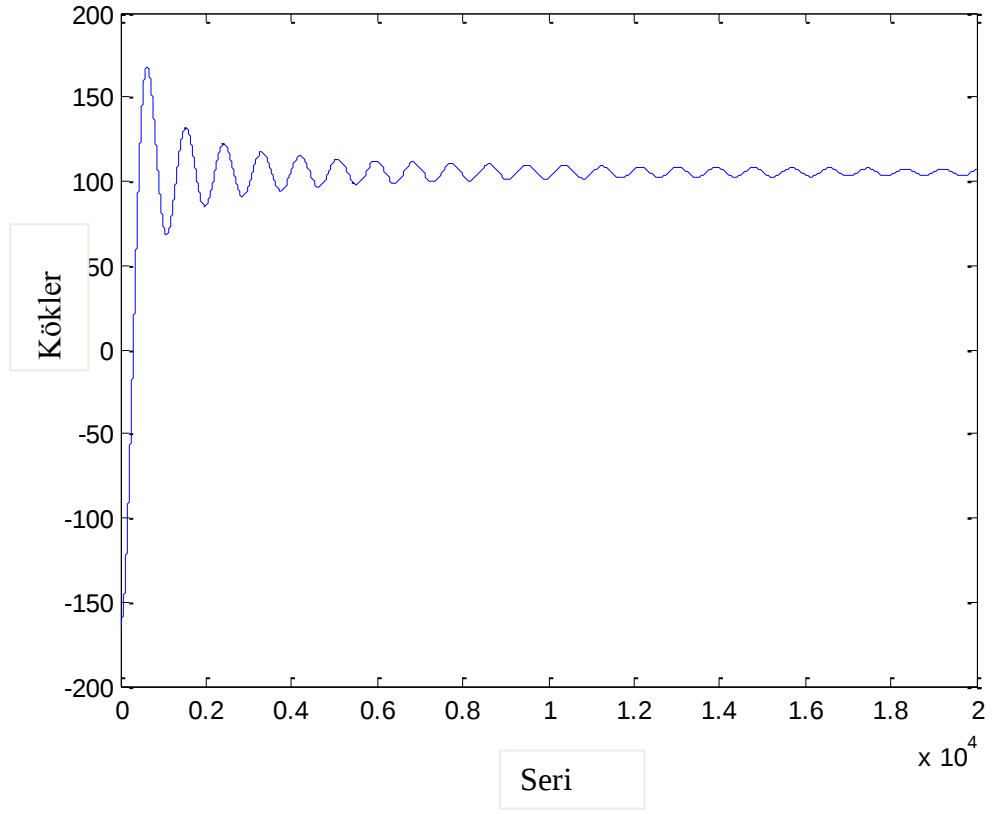
A_n, B_n ve λ_n katsayılarını sınır ve başlangıç şartlarından çözümlürse,

$$A = -(\lambda Y_1(\lambda a) + \lambda Y_1(\lambda b) + H_1 Y_0(\lambda a) - H_2 Y_0(\lambda b)) \quad (2.20)$$

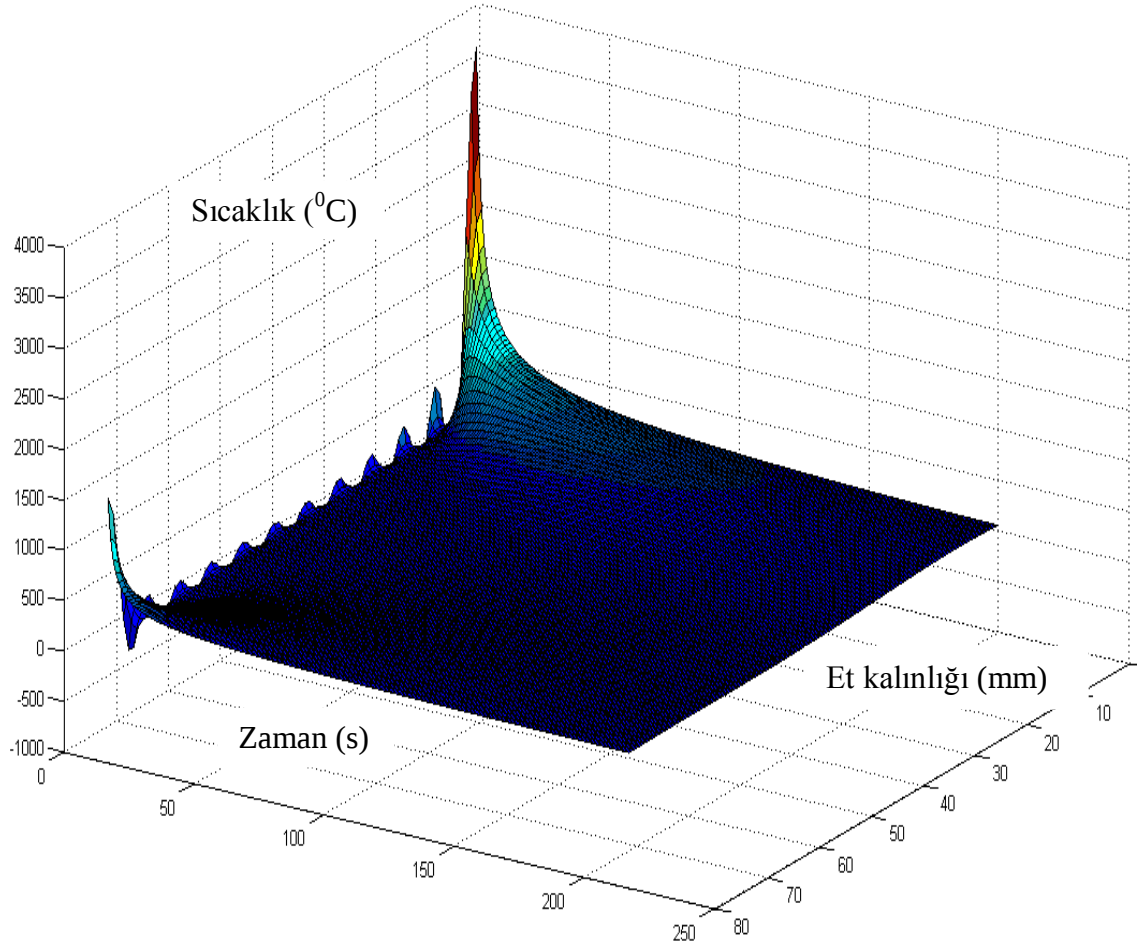
$$B = \lambda J_1(\lambda a) + \lambda J_1(\lambda b) + H_1 J_0(\lambda a) - H_2 J_0(\lambda a) \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} & [J_0(\lambda b) - J_0(\lambda a)] [\lambda Y_1(\lambda a) + \lambda Y_1(\lambda b) + H_1 Y_0(\lambda a) - H_2 Y_0(\lambda b)] + \\ & [Y_0(\lambda a) - Y_0(\lambda b)] [\lambda J_1(\lambda a) + \lambda J_1(\lambda b) + H_1 J_0(\lambda a) - H_2 J_0(\lambda a)] = T_{ay} - T_{by} \end{aligned} \quad (2.22)$$

(2.22) Transandantal denkleminin (λ) kökleri Matlab® programında bulunup, 22 terim için seriye açılarak A_n ve B_n katsayıları bulunabilir (Şekil 2.8). Transandantal denklemin genel çözümünde tek atış için sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Transandantal denklemin 22 terim alındığındaki görünüşü.



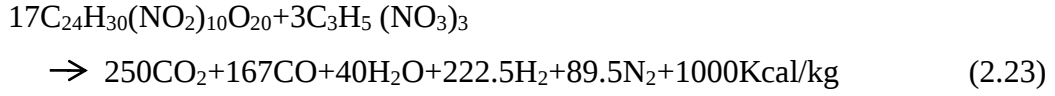
Şekil 2.9. Genel çözümde sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi.

2.5. Sevk Barutunun Termomekanik Özelliklerinin İncelenmesi.

Bu alt bölümde; nitroselüloz ve nitrogliserinli sevk barutunun namlu içinde yanması esnasında oluşan sıcaklık ile barut gazlarının ısı taşınım katsayısının bilinen basınç profiline göre namlu boyunca değişiminin hesaplanmasını kapsamaktadır.

Hesaplamalarda; ideal gaz karışımı, yanmanın tamamen ekzotermik olduğu, yanma ürünleri dışında ara ürünlerin oluşmadığı, yanma hızının doğrusal olduğu, gaz karışımının sıkıştırılabilir olduğu, sıkıştırma oranının 1.34 olduğu ve gaz akış kanal çapının 0.0078 m olduğu kabul edilmiştir.

Sevk barutunun yanma denklemi (2.23)'te verilmiştir.



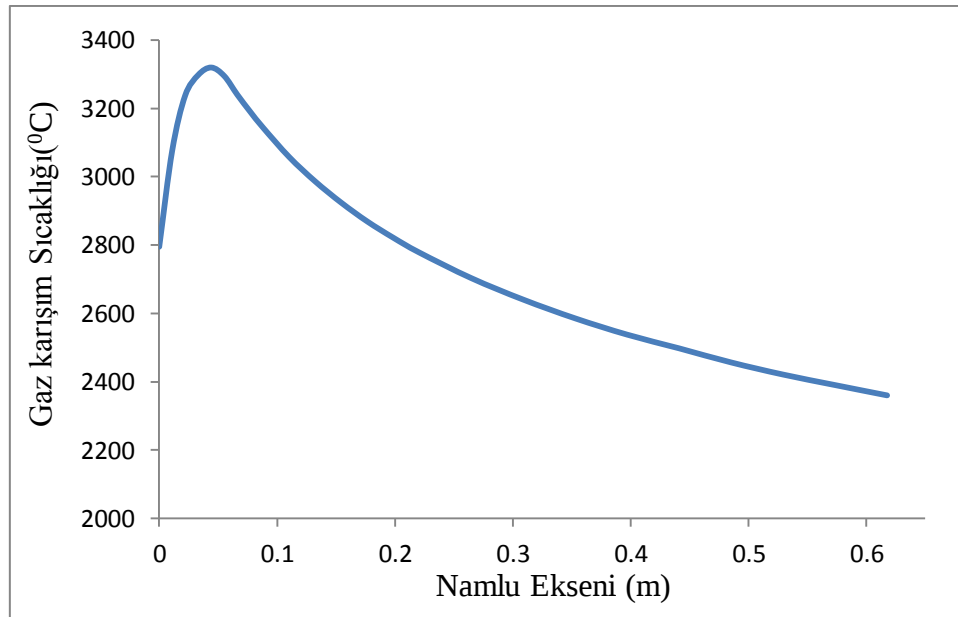
Sevk barutunun 20 °C sıcaklık ve atmosferik şartlarda yanması neticesinde, gaz karışımının hacmi (2.24), sıcaklığı (2.25) ve enerjisi (2.26) ifadelerinden hesaplanabilir (48).

$$V_A = \frac{\left[22.4m_p \left(1 + \frac{T_o}{273} \right) \right]}{m_g} \quad (2.24)$$

$$T_A = \left(1 + \frac{T_o}{273} \right) \frac{V_A}{V_0} \quad (2.25)$$

$$Q = Q_{sb} + P_A(V_2 - V_1) \quad (2.26)$$

Sevk barutunun atmosferik şartlarda ve 20 °C sıcaklıkta yanması neticesinde oluşan ürünlerin hacmi 956 lt., enerjisi 1.000 Kcal/Kg ve sıcaklığı da 797 °C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.10. Namlu eksenini boyunca gaz karışım sıcaklığı.

Barut gazlarının namlu içinde yanması süresince sıcaklık ve ısı taşınım katsayısının bilinmesi ile gerek fasıllı gerekse de ardışık atışlarda namluya tesir eden termomekanik yüklemelerin hesabının yapılabilmesine olanak sağlayabilmektedir. Sevk barutunun yanmasıyla oluşan sıcaklığın tespit edilebilmesi için atmosfer şartlarında yanan barutun sıcaklığına, gaz karışımı sıkıştırma oranına ve basınç değişimine ihtiyaç duyulmaktadır. (2.27) ifadesi ile namlu eksenini boyunca sevk barutu sıcaklığı hesaplanarak Şekil 2.10’da verilmiştir (48).

$$T_b = \frac{T_A}{\left(\frac{P_A}{P_2}\right)^{k-1/k}} \quad (2.27)$$

Reynolds sayısının tespit edilebilmesi için gaz karışımının yoğunluğunun, dinamik vizkozitesinin, akışın gerçekleştiği kanalın çapının ve gaz genleşme hızının bilinmesi gereklidir.

$$R_m = \frac{R_u}{M_T} = \frac{8314 \frac{m^2}{s^2 K}}{M_T \frac{kg}{kmol}} \quad (2.28)$$

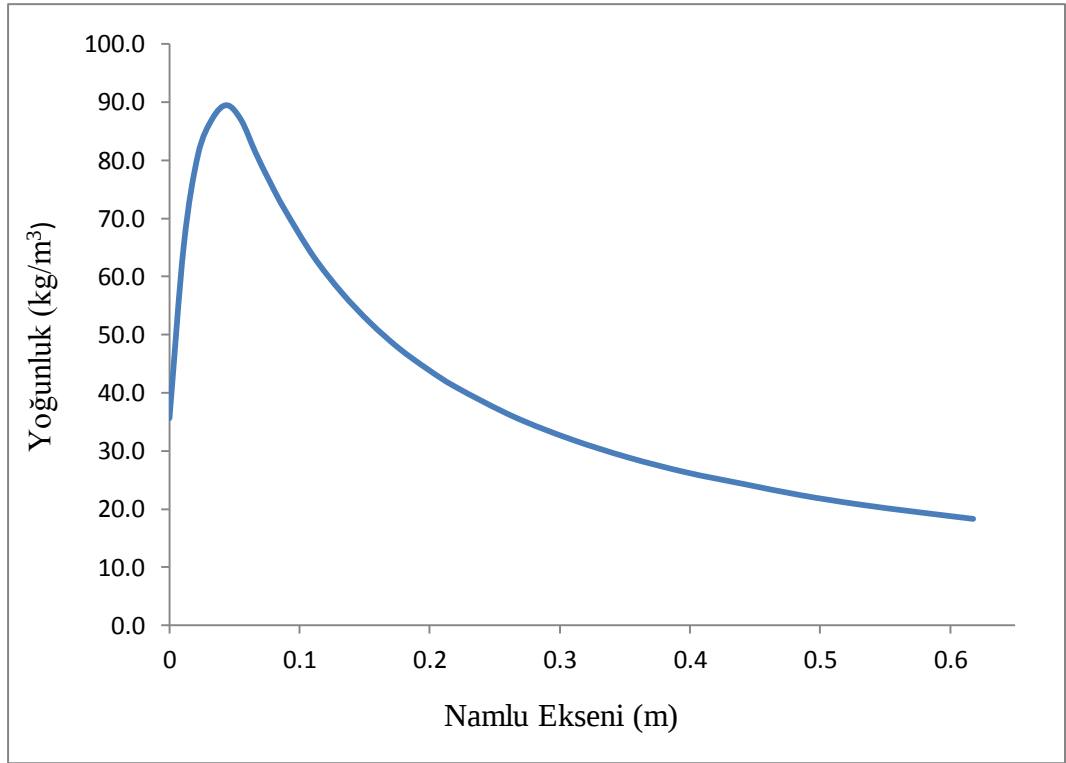
Gaz karışımının ortalama özgül gaz sabiti (2.28) ifadesinden $1391 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$ bulunmuştur.

$$\rho = \frac{P_2}{R_m T_b} \quad (2.29)$$

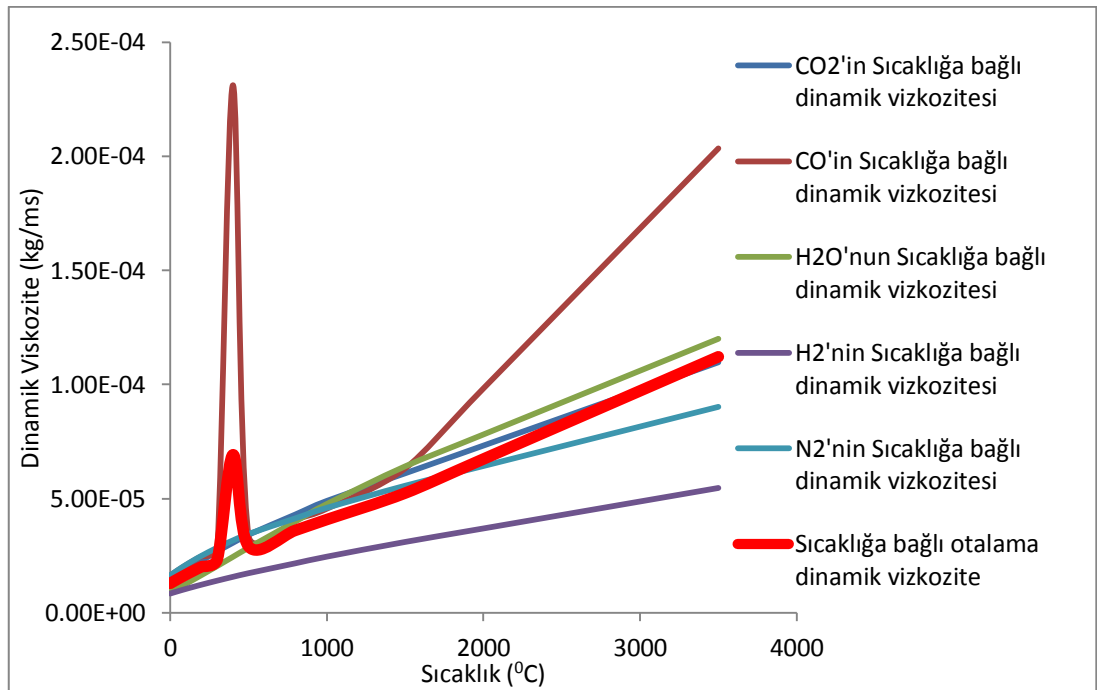
Gaz karışım yoğunluğunun basınca bağlı olarak değişimi (2.29) ifadesinden hesaplanan değerler Şekil 2.11’de verilmiştir.

Dinamik vizkozite sıcaklık değişimi boyunca yine gaz karışım oranlarına göre (2.30) ifadesinden hesaplanmıştır.

$$\mu_m = \frac{250\mu_{CO_2} + 167\mu_{CO} + 40\mu_{H_2O} + 222.5\mu_{H_2} + 98.5\mu_{N_2}}{769} \quad (2.30)$$



Şekil 2.11. Gaz karışım yoğunluğunun namlu eksenini boyunca değişimi.



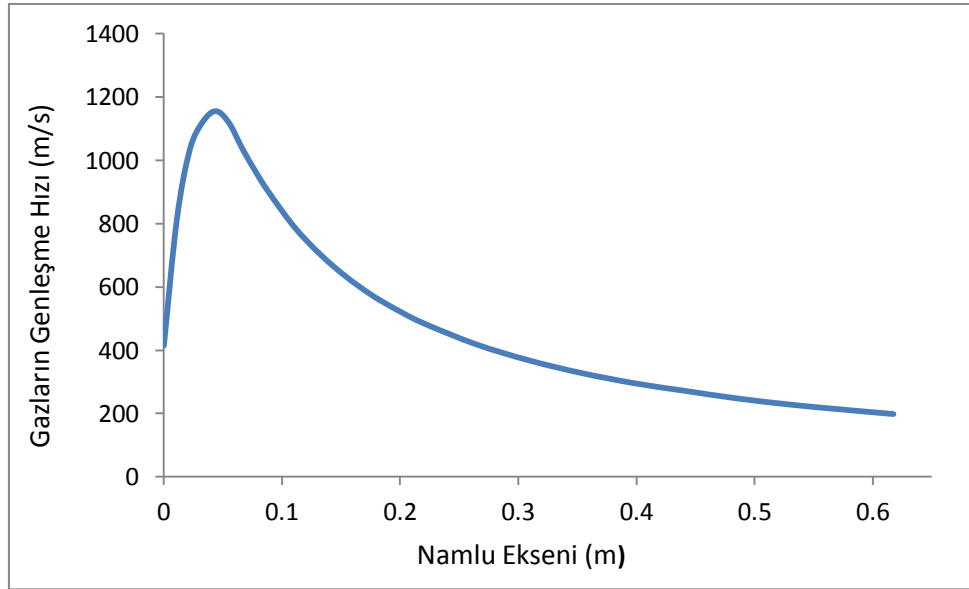
Şekil 2.12. Dinamik viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimi(48).

Gaz karışımının sıkışarak yayılma ifadesi Vieille Yanma ifadesine göre sıcaklığın ve basıncın bir fonksiyonu olarak değişmektedir (41-45). Gaz karışımının basınç etkisiyle sıkışarak yayılma hızı deneysel olarak çeşitli gazlar için tespit edilmiştir. c sabit kat sayısının ve n basınç üssünün değişimi sevk barutuna bağlı olarak değişmektedir. Sevk barutu enerjisi arttıkça c katsayısı 0.00086'ya, n basınç üssü ise 0.86'ya yaklaşmaktadır. İncelenen sevk barutu için c katsayısı 0.000548 ve n basınç üssü ise 0.775 olarak alınmıştır (Şekil 2.13).

$$v_g = cTP^n \quad (2.31)$$

$$0.0002 \leq c \leq 0.00086 \quad (2.32)$$

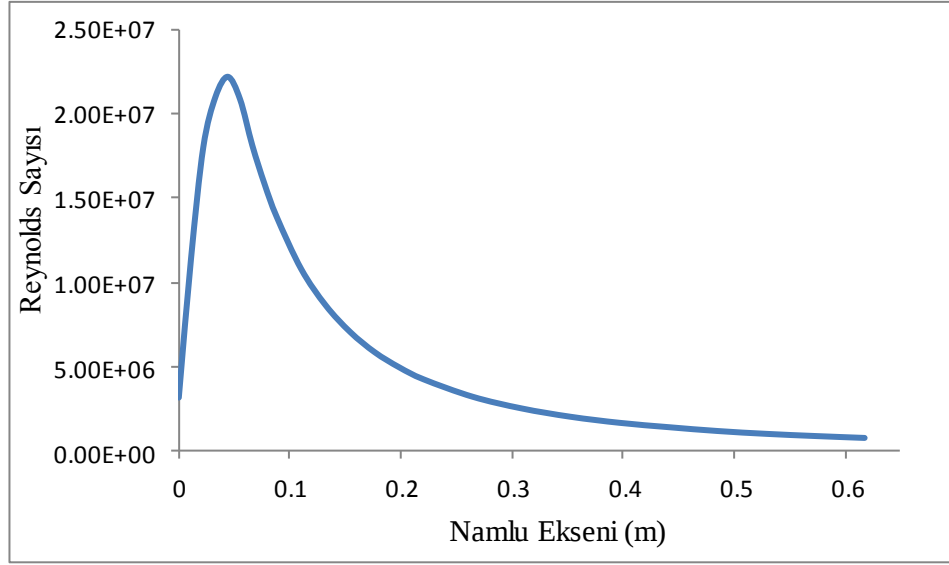
$$0.6 \leq n \leq 0.86 \quad (2.33)$$



Şekil 2.13. Genleşme hızının namlu eksenine boyuna değişimi.

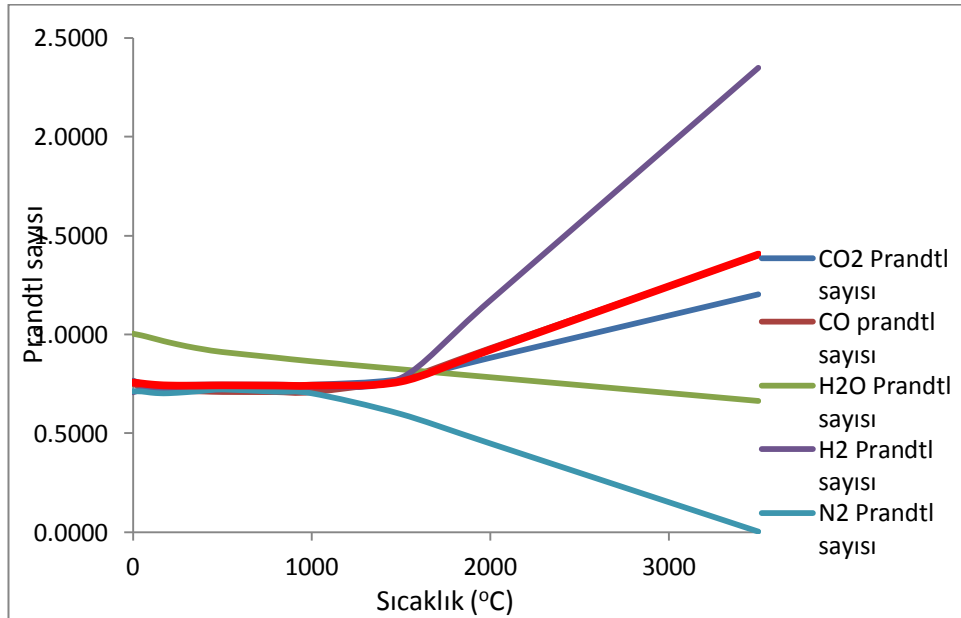
Yukarıda hesaplanan verilere göre Reynolds sayısı hesaplanabilir. Reynolds sayısının (Şekil 2.14) oldukça büyük çıkması türbülanslı akışın olduğunu göstermektedir. Ayrıca merminin harekete başladığı anda bile tam gelişmiş akış görülmektedir.

$$Re = \frac{\rho v_g d}{\mu_m} \quad (2.34)$$



Şekil 2.14. Reynolds sayısının namlu eksenini boyunca değişimi.

Gaz karışımının ortalama Prandtl sayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 2.15’de verilmiştir (48).



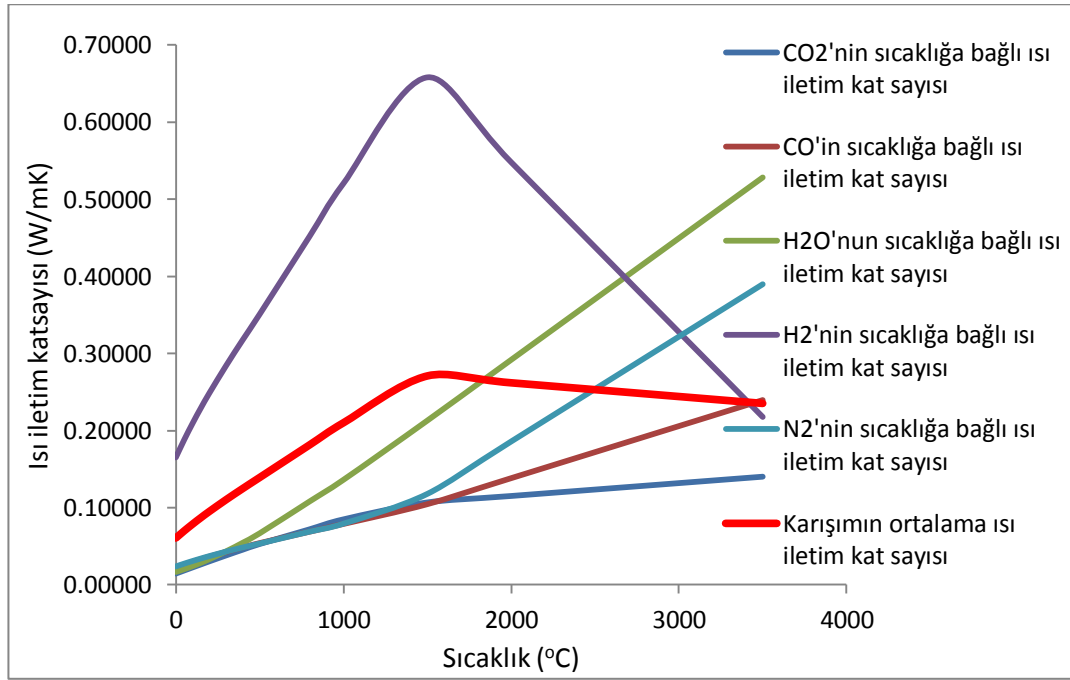
Şekil 2.15. Prandtl sayısının sıcaklığa göre değişimi (46).

Türbülanslı akışlar için Nusselt sayısı değerinin bilinmesi ısı taşınım kat sayısının bulunmasında kullanılacaktır (48).

$$\begin{aligned} Re_D &\geq 10.000 \\ (L/D) &\geq 10 \end{aligned} \quad (2.35)$$

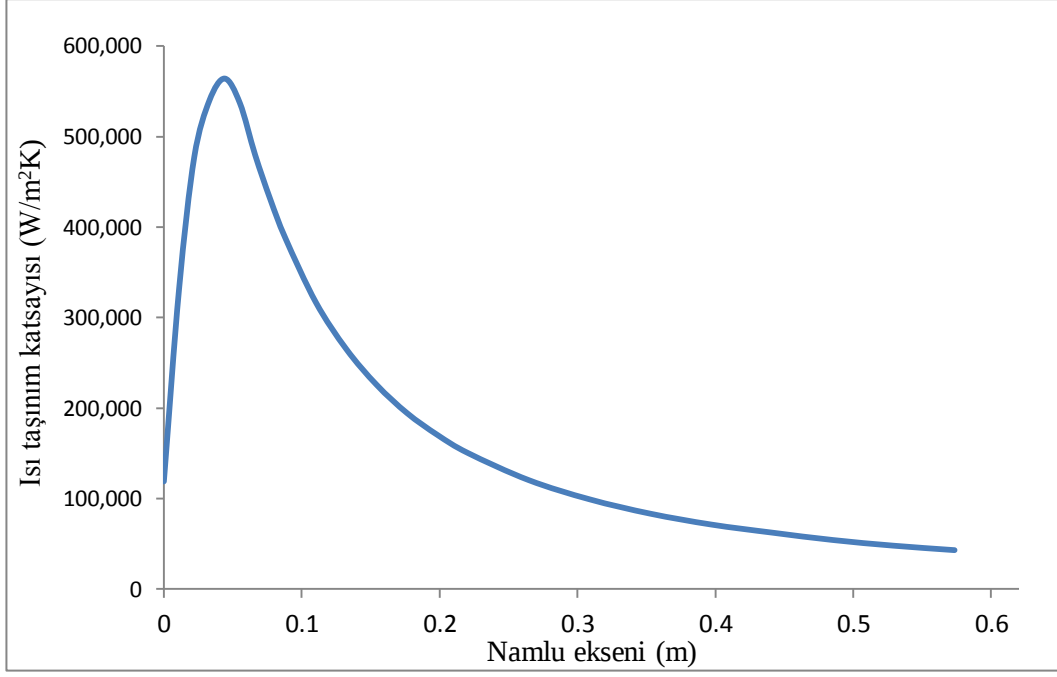
$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.3} \quad (2.36)$$

Nusselt sayısı gaz akış kanal çapı, ısı taşınım ve ısı iletim katsayısının fonksiyonudur. Kanal çapı 0.0078 m olarak alınmıştır. Isı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 2.16.'da verilmiştir. Bilinen Nusselt sayısından gaz karışımı için namlu eksen boyunca ortalama ısı taşınım katsayısı hesaplanarak Şekil 2.17'de verilmiştir.



Şekil 2.16.. Isı iletim katsayısının sıcaklığa göre değişimi (48).

$$h = \frac{Nu_D k}{d} \quad (2.37)$$



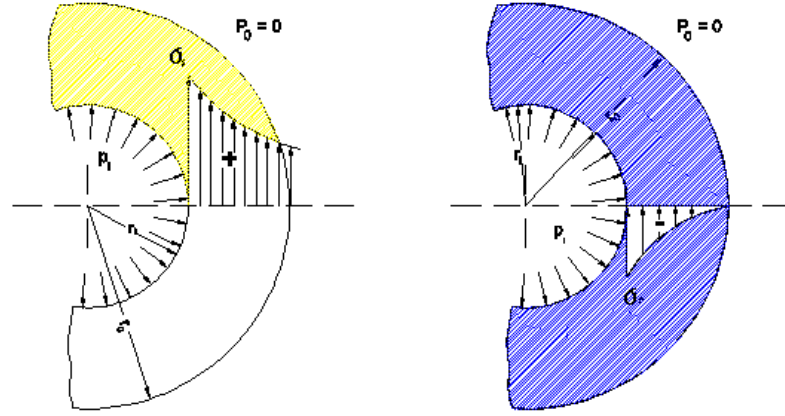
Şekil 2.17. Ortalama ısı taşınım katsayısının namlu eksenini boyunca değişimi.

2.6. Atış Esnasında Namlu Mukavemetinin Analitik Hesabı

Mevcut çelik namlunun geometrik ve mukavemet özellikleri incelenerek, geometrik özellikleri ile kompozit malzeme uygulama yapılabilecek kısmı tespit edilecektir. Mukavemet açısından et kalınlık oranları ve emniyet katsayıları hesaplanacaktır.

Bir silindirin et kalınlığının ortalama yarıçapa oranı 0.1'den küçük olduğu durumlarda kalın cidarlı hal durumu söz konusu olur. İnce cidarlı silindirlerde kabul edilen gerilmelerin et kalınlığı boyunca sabit kalması şartı bu durum için geçerli olmaz. Birim eleman üzerinde yarıçap doğrultusunda denge denklemi yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir (49).

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi t - \sigma_r d\varphi t - 2\sigma_t(d\varphi/2)dr t = 0 \quad (2.38)$$



Şekil 2.18. İç basınç etkisi altında kalın cidarlı silindirin gerilme durumu.

İkinci dereceden terimler ihmal edilerek denklem yeniden düzenlenirse,

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_t) = 0 \quad (2.39)$$

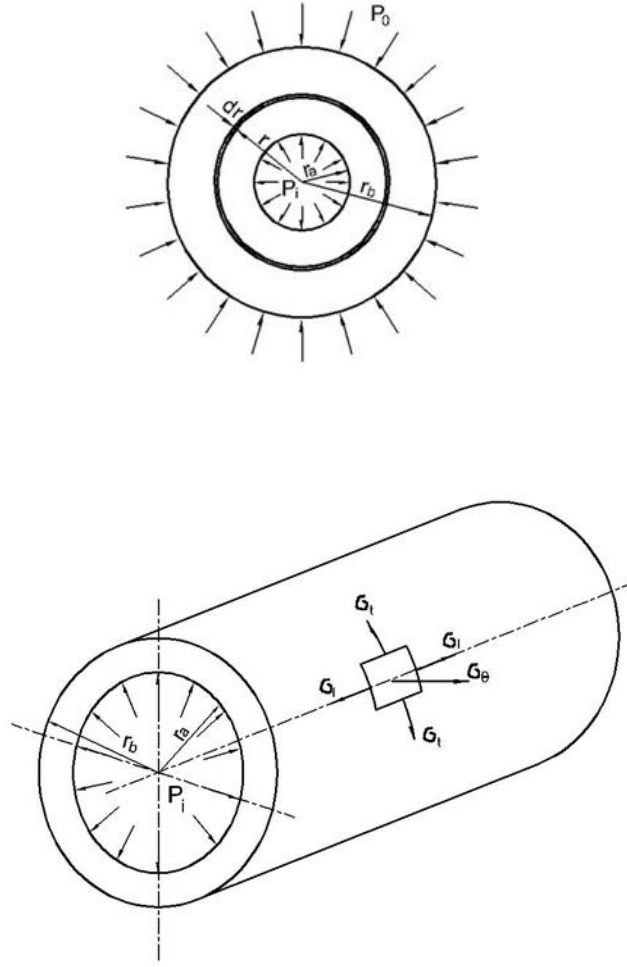
bulunur. Kalın cidarlı açısal simetriye sahip silindirin iç basınca maruz kalmaları durumu göz önüne alındığında aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\sigma_{r\max} = \frac{r_i^2 P_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_i^2}\right) \quad (2.40)$$

$$\sigma_{t\max} = \frac{r_i^2 P_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r_i^2}\right) \quad (2.41)$$

$$\sigma_{l\max} = \frac{r_i^2 P_i}{r_0^2 - r_i^2} \quad (2.42)$$

$$\sigma_s = 0.707 * \sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad (2.43)$$



Şekil 2.19. İç basınç etkisi altında kalın cidarlı silindir.

Hafifletmenin dayandırıldığı temel parametreler, namlunun atış sırasında içinde meydana gelen basınç, sıcaklık ve serbest titreşim parametreleridir. Çelik namluya etki eden barut gazlarının etkisini çelik malzemeden imal edilen namlunun karşılayabilmesi gerekmektedir. 20 °C'deki çelik malzemesinin dövme öncesi akma mukavemetinin 790 MPa ve dövme sonrası akma mukavemetinin ise 1010 MPa olduğu deney yapılarak tespit edilmiştir. Yapılacak hesaplamalarda sıcaklık etkisini hesaba katmak üzere, söz konusu malzemenin 200 °C'deki akma mukavemeti yaklaşık 930 MPa olacağı bulunmuştur. Ayrıca, çelik namlunun ilk 84 mm'lik kısmında en fazla 4300 Bar düzeyinde yüksek basınç söz konusu olduğundan bu 84 mm'lik kısımda kompozit uygulamasının yapılmasının uygun olmayacağı düşünülmüştür.

Vallier Heydenreich yöntemine göre namlu boyunca basınç değişimi incelenmiştir. Mevcut çelik namlunun kalın cidarlı açısı simetriye sahip silindir formu kabul edilerek mukavemet ve kütle hesaplamaları yapılmış ve Şekil 2.20’de gösterilmektedir. Kompozit malzeme uygulaması yapılabilecek 10.8 mm yarıçaptaki kısmın başlangıcından 467.5 mm’lik kısma kadar olan bölgenin et kalınlık oranının 0.57, emniyet katsayısının da 1.53 ile 6.48 arasında değiştiği görülmektedir. Basıncın 4300 Bar olduğu en yüksek bölgede ise çelik namlunun emniyet katsayısının 1.02-1.44 aralığında olduğu da görülmüştür. Ayrıca Şekil 2.20b’de kütle hesaplamasında namlunun 1808 gr olduğu görülmüştür.

Kalın cidarlı silindir şartı sağlanacak şekilde kompozit uygulama bölgesinin dış çapı 15 mm, et kalınlığı 3.6 mm, emniyet katsayısı 1.28’den az olmayacak şekilde ve namluya etki eden basıncın %60’ını çelik gömlek taşıması durumu için kütlenin 1101.7 gr olduğu hesaplamalarda görülmüş ve hesaplamalar Şekil 2.21’de verilmiştir. Dolayısıyla 1.808 gr olan namlu 1101.7 gr’a hafifletileceği ve bunun üzerine ise kompozit yaklaşık 128 gr kompozit uygulanabileceği varsayıldığında yükün %60 uygulanması durumunda namlunun 1230 gr olacağı tahmin edilmektedir. Durum genel değerlendirildiğinde ise namlu toplamda teorik olarak yaklaşık %32 hafifletilebileceği neticesine ulaşılabilmektedir.

	Dış Yarıçap (mm)	İç Yarıçap (mm)	Namlu İç Basınç (Mpa)	Teğetsel Gerilme (Mpa)	Radial Gerilme (Mpa)	Eksenel Gerilme (Mpa)	Servis Gerilmesi Namlu İç (Mpa)	Servis Gerilmesi Namlu Dışı (Mpa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Emniyet Kat Sayısı	Boy (mm)	Et Kalınlığı	Kalın Cıdarlık Oranı, a/t
Düz Kısım	14.00	6.02	430.0	625.1	-430.00	97.54	913.7	582.5	930.0	1.02	1.00	8.0	0.8
	14.00	5.96	430.0	620.3	-430.00	95.16	909.6	578.6	930.0	1.02	10.00	8.0	0.7
	14.00	5.93	430.0	618.0	-430.00	93.99	907.6	576.8	930.0	1.02	15.00	8.1	0.7
	14.00	5.90	430.0	615.7	-430.00	92.83	905.6	574.9	930.0	1.03	20.00	8.1	0.7
	14.00	5.87	430.0	613.4	-430.00	91.68	903.6	573.0	930.0	1.03	25.00	8.1	0.7
	14.00	5.84	430.0	611.1	-430.00	90.54	901.6	571.2	930.0	1.03	30.00	8.2	0.7
	14.00	5.80	430.0	608.2	-430.00	89.09	899.1	568.9	930.0	1.03	36.40	8.2	0.7
	14.00	5.40	430.0	580.3	-430.00	75.15	875.0	546.6	930.0	1.06	38.00	8.6	0.6
	14.00	4.90	430.0	550.1	-430.00	60.03	848.8	522.6	930.0	1.10	40.00	9.1	0.5
	14.00	4.40	430.0	524.3	-430.00	47.13	826.4	502.4	930.0	1.13	42.00	9.6	0.5
Konik Kısım	14.00	4.40	430.0	524.3	-430.00	47.13	826.4	502.4	930.0	1.13	50.00	9.6	0.5
	14.00	3.90	430.0	502.4	-430.00	36.18	807.4	485.3	930.0	1.15	52.00	10.1	0.4
	14.00	3.90	430.0	502.4	-430.00	36.18	807.4	485.3	930.0	1.15	86.50	10.1	0.4
	13.91	3.90	430.0	503.3	-430.00	36.66	808.3	486.0	930.0	1.15	88.23	10.0	0.4
	13.37	3.90	430.0	510.0	-430.00	39.98	814.0	491.2	930.0	1.14	99.26	9.5	0.4
	12.83	3.90	415.4	500.0	-415.38	42.30	792.7	480.2	930.0	1.17	110.29	8.9	0.4
	11.74	3.90	384.0	479.2	-383.99	47.60	747.5	457.3	930.0	1.24	121.31	7.8	0.5
	11.27	3.90	354.0	450.4	-354.00	48.18	696.6	428.3	930.0	1.34	132.34	7.4	0.5
	11.00	3.90	326.0	419.7	-326.00	46.87	645.8	398.4	930.0	1.44	142.00	7.1	0.5
	10.80	3.90	306.0	397.8	-306.0	45.9	609.5	376.9	930	1.53	147.50	6.90	0.57
Düz kısım	10.80	3.90	292.0	379.6	-292.0	43.8	581.6	359.7	930	1.60	154.40	6.90	0.57
	10.80	3.90	253.7	329.8	-253.7	38.0	505.3	312.5	930	1.84	176.46	6.90	0.57
	10.80	3.90	226.6	294.6	-226.6	34.0	451.4	279.1	930	2.06	198.51	6.90	0.57
	10.80	3.90	204.3	265.5	-204.3	30.6	406.8	251.6	930	2.29	220.57	6.90	0.57
	10.80	3.90	186.2	242.0	-186.2	27.9	370.8	229.3	930	2.51	242.63	6.90	0.57
	10.80	3.90	170.7	221.9	-170.7	25.6	340.0	210.3	930	2.74	264.69	6.90	0.57
	10.80	3.90	146.2	190.0	-146.2	21.9	291.2	180.1	930	3.19	308.80	6.90	0.57
	10.80	3.90	127.7	166.0	-127.7	19.2	254.4	157.3	930	3.66	352.92	6.90	0.57
	10.80	3.90	113.1	147.0	-113.1	17.0	225.3	139.3	930	4.13	397.03	6.90	0.57
	10.80	3.90	101.5	131.9	-101.5	15.2	202.1	125.0	930	4.60	441.14	6.90	0.57
	10.80	3.90	92.5	120.2	-92.5	13.9	184.1	113.9	930	5.05	485.26	6.90	0.57
	10.80	3.90	83.9	109.0	-83.9	12.6	167.0	103.3	930	5.57	529.37	6.90	0.57
	10.80	3.90	77.0	100.1	-77.0	11.5	153.3	94.8	930	6.07	573.49	6.90	0.57
	10.80	3.90	72.0	93.6	-72.0	10.8	143.4	88.7	930	6.48	615.00	6.90	0.57
Uç Kısım	11.70	3.90	71.4	89.2	-71.38	8.92	139.1	85.1	930.0	6.69	617.60	7.8	0.5
	11.70	3.90	66.2	82.8	-66.22	8.28	129.0	79.0	930.0	7.21	660.00	7.8	0.5

(a)

Atım Yatağı			Konik öncesi			Konik kısım (orta kısım)			Düz Kısım			Namlu ucu		
İç çap	mm	11	İç çap	mm	7.8	İç çap	mm	7.8	İç çap	mm	7.8	İç çap	mm	7.8
Dış çap	mm	28	Dış çap	mm	28	Dış çap	mm	21.6	Dış çap	mm	21	Dış çap	mm	24
Kö boy	mm	52	Kö boy	mm	34.5	Kö boy	mm	61	Kö boy	mm	465	Kö boy	mm	45
Yoğunluk	kg/m3	7850	Yoğunluk	kg/m3	7850	Yoğunluk	kg/m3	7850	Yoğunluk	kg/m3	7850	Yoğunluk	kg/m3	7850
Hacim	2.71E-05 m3		Hacim	1.96E-05 m3		Hacim	3E-05 m3		Hacim	0.0001 m3		Hacim	2E-05 m3	
Kütle	212.4497 gr		Kütle	153.7421 gr		Kütle	209.61 gr		Kütle	1089.3 gr		Kütle	142.85 gr	
Namlu Toplam Kütles		1808 gr												

(b)

Şekil 2.20. a) Çelik namlu mukavemet hesabı, b) Çelik namlu kütle hesabı.

	Dış Yançap (mm)	İç Yançap (mm)	Namlu İç Basınç (Mpa)	Teğetsel Gerilme (Mpa)	Radial Gerilme (Mpa)	Eksenel Gerilme (Mpa)	Servis Gerilmesi Namlu İç (Mpa)	Servis Gerilmesi Namlu Dışı (Mpa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Emniyet Kat Sayısı	Boy (mm)	Et Kalınlığı	Kalın Cıdarlık Oranı, a/t
Düz Kısım	14.00	6.02	430.0	625.09	-430.00	97.5	913.73	582.47	930.00	1.0	1.00	7.98	0.8
	14.00	5.96	430.0	620.32	-430.00	95.2	909.61	578.64	930.00	1.0	10.00	8.04	0.7
	14.00	5.93	430.0	617.98	-430.00	94.0	907.58	576.76	930.00	1.0	15.00	8.07	0.7
	14.00	5.90	430.0	615.65	-430.00	92.8	905.56	574.89	930.00	1.0	20.00	8.10	0.7
	14.00	5.87	430.0	613.35	-430.00	91.7	903.57	573.04	930.00	1.0	25.00	8.13	0.7
	14.00	5.84	430.0	611.07	-430.00	90.5	901.59	571.21	930.00	1.0	30.00	8.16	0.7
	14.00	5.80	430.0	608.18	-430.00	89.1	899.09	568.89	930.00	1.0	36.40	8.20	0.7
	14.00	5.40	430.0	580.31	-430.00	75.2	874.95	546.62	930.00	1.1	38.00	8.60	0.6
	14.00	4.90	430.0	550.06	-430.00	60.0	848.75	522.63	930.00	1.1	40.00	9.10	0.5
	14.00	4.40	430.0	524.26	-430.00	47.1	826.41	502.35	930.00	1.1	42.00	9.60	0.5
	14.00	4.40	430.0	524.26	-430.00	47.1	826.41	502.35	930.00	1.1	50.00	9.60	0.5
	14.00	3.90	430.0	502.35	-430.00	36.2	807.44	485.28	930.00	1.2	52.00	10.10	0.4
	14.00	3.90	430.0	502.35	-430.00	36.2	807.44	485.28	930.00	1.2	86.50	10.10	0.4
	13.91	3.90	430.0	503.32	-430.00	36.7	808.28	486.02	930.00	1.2	88.23	10.01	0.4
Konik Kısım	13.37	3.90	430.0	509.96	-430.00	40.0	814.03	491.19	930.00	1.1	99.26	9.47	0.4
	12.83	3.90	415.4	499.97	-415.38	42.3	792.72	480.22	930.00	1.2	110.29	8.93	0.4
	11.74	3.90	384.0	479.20	-383.99	47.6	747.54	457.26	930.00	1.2	121.31	7.84	0.5
	11.27	3.90	354.0	450.36	-354.00	48.2	696.60	428.31	930.00	1.3	132.34	7.37	0.5
	11.00	3.90	326.0	419.74	-326.00	46.9	645.83	398.38	930.00	1.4	142.00	7.10	0.5
Düz kısım	7.50	3.90	306.0	532.8	-306.0	113.4	726.4	291.68	930	1.28	147.50	3.60	1.08
	7.50	3.90	292.0	508.4	-292.0	108.2	693.2	278.34	930	1.34	154.40	3.60	1.08
	7.50	3.90	253.7	441.7	-253.7	94.0	602.3	241.83	930	1.54	176.46	3.60	1.08
	7.50	3.90	226.6	394.6	-226.6	84.0	538.0	216.01	930	1.73	198.51	3.60	1.08
	7.50	3.90	204.3	355.6	-204.3	75.7	484.9	194.69	930	1.92	220.57	3.60	1.08
	7.50	3.90	186.2	324.2	-186.2	69.0	442.0	177.48	930	2.10	242.63	3.60	1.08
	7.50	3.90	170.7	297.2	-170.7	63.3	405.3	162.72	930	2.29	264.69	3.60	1.08
	7.50	3.90	146.2	254.6	-146.2	54.2	347.1	139.36	930	2.68	308.80	3.60	1.08
	7.50	3.90	127.7	222.4	-127.7	47.3	303.2	121.73	930	3.07	352.92	3.60	1.08
	7.50	3.90	113.1	196.9	-113.1	41.9	268.5	107.80	930	3.46	397.03	3.60	1.08
	7.50	3.90	101.5	176.7	-101.5	37.6	240.9	96.73	930	3.86	441.14	3.60	1.08
	7.50	3.90	92.5	161.0	-92.5	34.3	219.5	88.12	930	4.24	485.26	3.60	1.08
	7.50	3.90	83.9	146.0	-83.9	31.1	199.1	79.93	930	4.67	529.37	3.60	1.08
	7.50	3.90	77.0	134.0	-77.0	28.5	182.7	73.37	930	5.09	573.49	3.60	1.08
	7.50	3.90	72.0	125.4	-72.0	26.7	170.9	68.63	930	5.44	615.00	3.60	1.08
Uç Kısım	11.70	3.90	71.4	89.23	-71.38	8.9	139.09	85.12	930.00	6.7	617.60	7.80	0.5
	11.70	3.90	66.2	82.78	-66.22	8.3	129.03	78.96	930.00	7.2	660.00	7.80	0.5

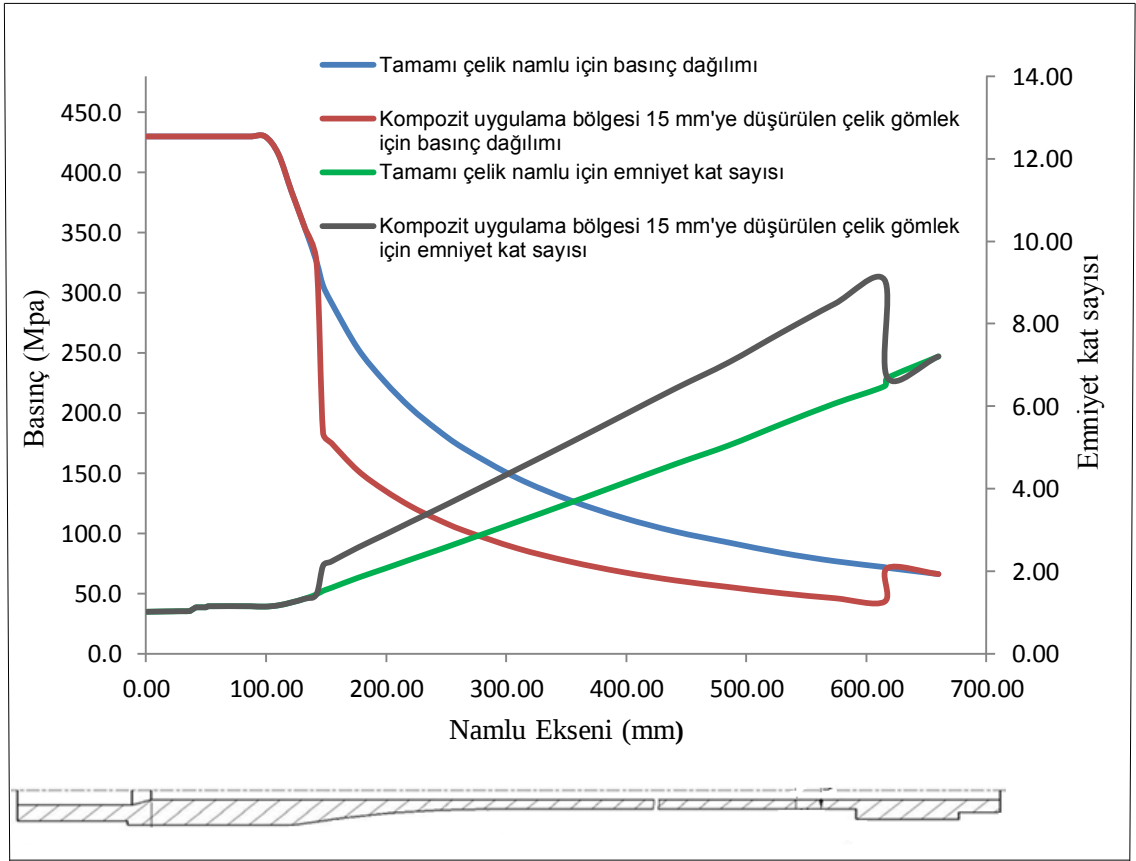
(a)

Atım Yatağı			Konik öncesi			Konik kısım (orta kısım)			Düz Kısım			Namlu ucu		
İç çap	mm	11	İç çap	mm	7.8	İç çap	mm	7.8	İç çap	mm	7.8	İç çap	mm	7.8
dış çap	mm	28	dış çap	mm	28	D, dış çap	mm	28	dış çap	mm	15	dış çap	mm	24
kö boy	mm	52	kö boy	mm	34.5	k boy	mm	61	ks boy	mm	465	ks boy	mm	45
yoğunluk	kg/m3	7850	yoğunluk	kg/m3	7850	yoğunluk	kg/m3	7850	yoğunluk	kg/m3	7850	yoğunluk	kg/m3	7850
Hacim	2.71E-05	m3	Hacim	1.96E-05	m3	Hacim	2E-05	m3	Hacim	6E-05	m3	Hacim	2E-05	m3
Kütle	212.4497	gr	Kütle	153.7421	gr	Kütle	122.25	gr	Kütle	470.39	gr	Kütle	142.85	gr
Çelik Namlu Toplam Kütle =			1101.7 gr											
Çelik+Kompozit Toplam Kütle =			1242.9 gr			Talaş = 706.29 gr			Hafifletme Oranı = %			31.252		

(b)

Şekil 2.21. a) Basıncın %60 oranında çelik namlu tarafından taşınması durumunda mukavemet hesabı, **b)** %60 yüklü namlu için kütle hesabı.

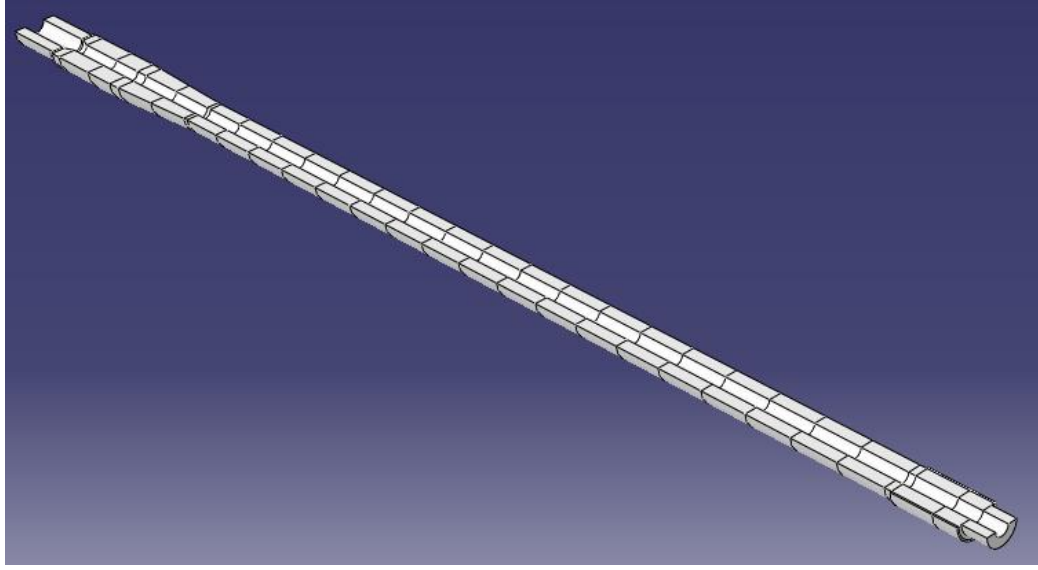
Çelik namlunun atım yatağından 142 mm ilerisine ve 467.50 mm'lik bölgeye kompozit malzeme uygulaması yapılacağı kısımda yükün tamamını çelik malzeme ve yükün %60'ını çapı 15 mm et kalınlığı 3.6 mm olan çelik malzeme karşılaması durumları için hesaplanan mukavemet değerleri Şekil 2.22'de verilmiştir.



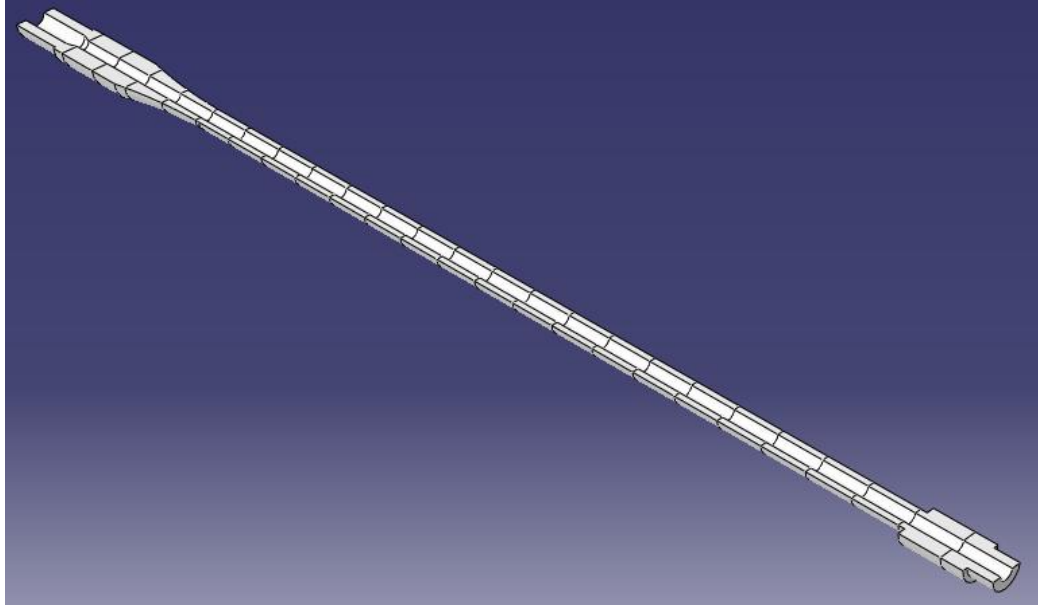
Şekil 2.22. 6.9 mm et kalınlıklı orjinal namlunun %100 ve 3.6 et kalınlıklı çelik gömleğin %60 yüklemeleri için basınç dağılımı ve emniyet kat sayısı.

2.7. Namlunun Termal ve Temomekanik Zorlamalar Altında Nümerik Yöntemle İncelenmesi

Silah namlusunun geometrisi (iç çapı 7.8 mm alınmıştır) nümerik analizlerde kullanılmak üzere Abaqus® programında Şekil 2.23'te yiv-set olmadan modellenmiştir. Basıncın %60'ını taşıyan model için kompozit uygulama bölgesinin et kalınlığı 3.6 mm olarak Şekil 2.24'te boyutlandırılmıştır.



Şekil 2.23. Abaqus® sonlu eleman programında orjinal namlunun yarım modeli.



Şekil 2.24. Et kalınlığı inceltilmiş kompozit uygulanacak namlunun Abaqus® programında yarım modeli.

Tez çalışmasına başlandığında atışlı testlerde namlunun ısınma değerleri bilinemediğinden 400 °C'ye kadar dayanabilen termoplastik kompoziti kullanılacak şekilde çalışmalar yürütülmüştür. Ancak orjinal namluyla 10 atımlık deney yapılarak J tipi termokupollarla yapılan ölçümlerde basıncın en yüksek olduğu bölgede ölçülen azami sıcaklığın 104.2 °C olduğu ölçülmüştür. Diğer taraftan da nümerik yöntemle hesaplanan sıcaklık değerinin de 113.2 °C olduğu analizlerden bulunmuştur. Yapılan

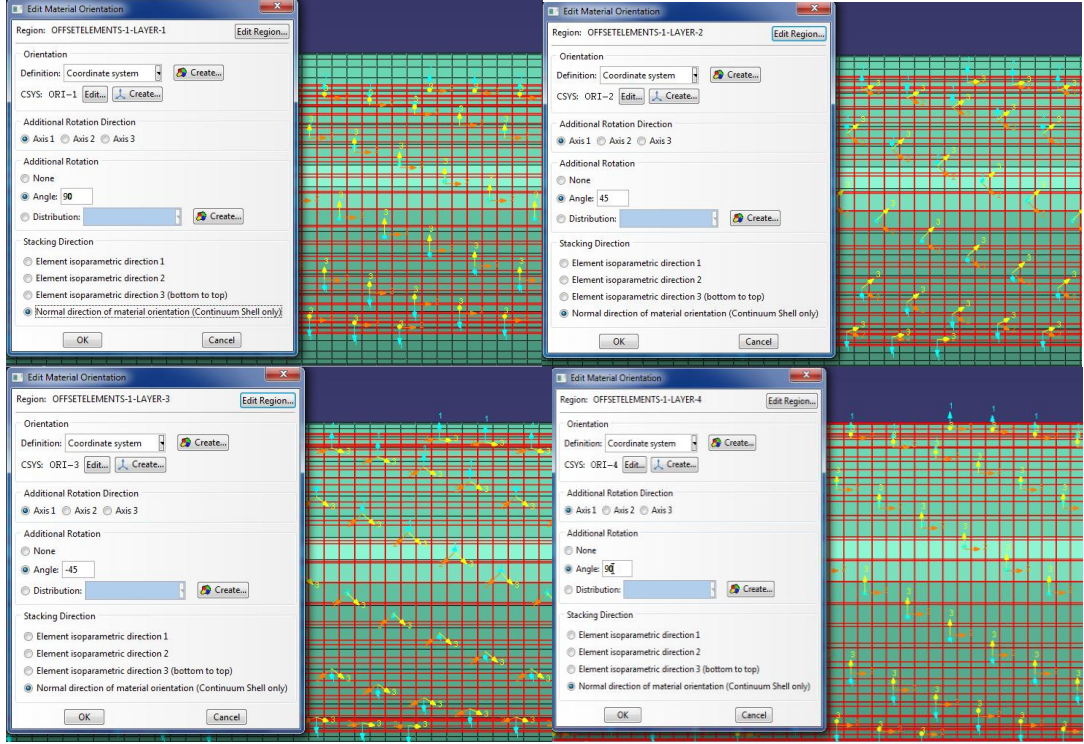
deneysel ve nümerik hesaplamaların neticesinde 175 °C'ye dayanabilen benzer termomekanik özelliklere sahip termoset kompozitin de kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Kompozitin elyaf malzemesi yük taşıyan ana kompozit malzemedir. Bunun yanında, yük taşımayan Termoplastik veya Termoset reçine malzemesidir. Bu çalışmada Karbon/Epoxy: AS4/3501-6 termoset esaslı karbon kompoziti kullanılacak olup, termomekanik özellikleri Çizelge 2.6'da verilmektedir (50).

Kompozit destekli namlunun nihai boyutları: Şekil 2.25'de örneği gösterilen ön Abaqus® sonlu eleman analizlerinden, Karbon/Epoxy: AS4/3501-6 kompozit kısmın %40 yük taşıma şartında ve Tsai-Wu kriteri ile Son Katman Hasar Teorisine göre belirlenen 90°/±45°/90° kompozit katman konfigürasyonunda, çelik kısmın dış boyutlarını aşmayacağı hesaplanmıştır (50,51).

Çizelge 2.6. Kompozit malzemenin Termomekanik özellikleri (5).

Malzeme özellikleri	% 30 S Cam/PEEK	Karbon/Epoxy: AS4/3501-6
E_{11} (GPa)	6.9	138
E_{22} (GPa)	6.9	10.3
G_{12} (GPa)		7.2
ν_{12}		0.27
S_{1T} (MPa)	124	1830
S_{1C} (MPa)	179	1096
S_{2T} (MPa)	193	57
S_{12} (MPa)	96	71
α_{11} (1E-6/°C)	21.6	-0.9
α_{22} (1E-6/°C)		27
ρ (gr/cm ³)	1.54	1.58
k (W/m.K)	$k_x=0.42$	$k_x=15.7$ $k_y=k_z=0.687$
c (J/kg°K)		887
h (W/m ² K)		85



Şekil 2.25. $90^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ Kompozit katman düzeni.

2.7.1. Atışlı Test Prosedürlerinin Abaqus® Paket Programına Tanımlanması

Abaqus® programına atış prosesi iki ana adım olarak tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki 1.34 milisaniyede gerçekleşen merminin namlu içinde seyahat ve namluyu terk etmesi olayıdır. Diğeri ise her bir atış için farklı olan ve test atışı yapılarak tespit edilen iki atış arasındaki bekleme zamanıdır. Ardışık 10 atış yapılması ve her bir atış ve bekleme zamanlarındaki (bkz. Çizelge.2.7) sıcaklık kalıntılarının diğer adımlara aktarılabilecek şekilde programlama yapılmıştır. Çizelge.2.8’de ise atış anında ve atış işlemi bittikten sonra gerçekleşen ve Bölüm 2.5’te incelenen barut gazların termokimyasal özellikleri verilmiştir. Bu özellikler Abaqus® paket programına tanımlanmıştır.

Çizelge 2.7. Test atışı yapılarak tespit edilen atışlar arası bekleme süreleri.

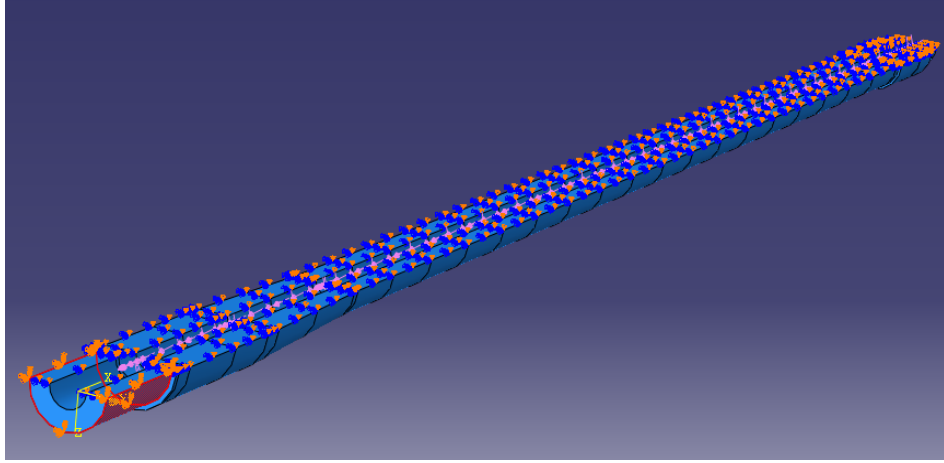
Atış Sayısı	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bekleme Zamanı (s)	0	1	1.5	1.1	1.1	1	1.2	1.1	1.1	1	-

Çizelge 2.8. Barutun yanması sonucu oluşan gazların namlu boyunca termokimyasal özellikleri.

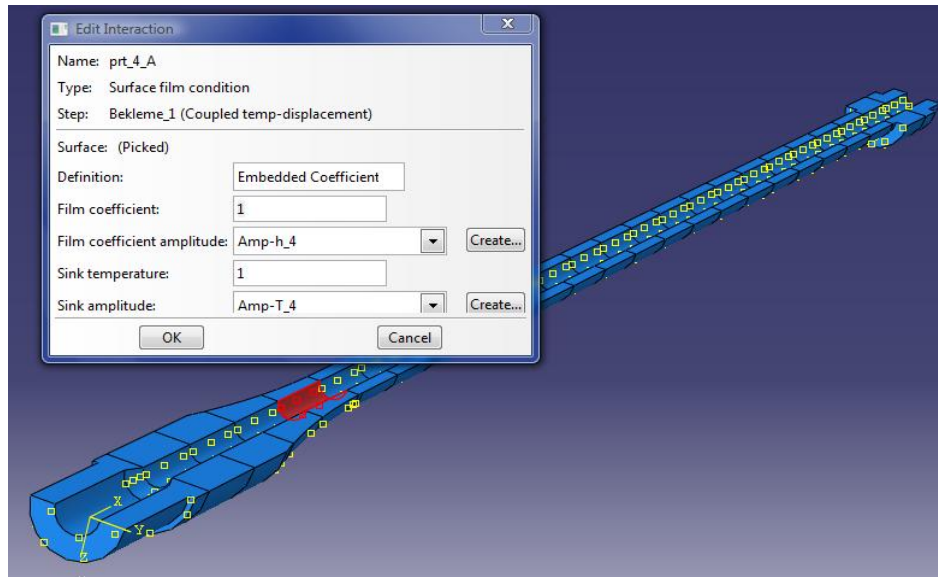
Sıra No	x (m)	P (kPa)	T (OC)	Yoğunluk (kg/m ³)	Re	Nu	h (W/m ² K)	v (m/s)	t (s)	vg (m/s)
1	0.000	1450	2,687	35.6	3,175,285	4,054	32000	0	0.000000	415
2	0.011	2967	3,028	65.4	11,435,529	11,299	119022	123	0.000343	815
3	0.022	3827	3,160	81.1	18,028,669	16,263	331746	205	0.000413	1036
4	0.033	4171	3,206	87.2	21,028,557	18,395	477498	271	0.000460	1123
5	0.044	4300	3,222	89.5	22,205,606	19,214	540068	328	0.000498	1156
6	0.055	4154	3,203	86.9	20,873,752	18,286	564119	375	0.000530	1119
7	0.066	3840	3,162	81.3	18,137,489	16,342	536885	416	0.000557	1039
8	0.077	3560	3,122	76.3	15,844,605	14,667	479802	450	0.000583	967
9	0.088	3307	3,084	71.6	13,882,357	13,195	430631	479	0.000607	902
10	0.110	2872	3,012	63.6	10,791,517	10,787	387410	527	0.000651	790
11	0.132	2537	2,950	57.2	8,641,935	9,031	316714	566	0.000691	703
12	0.154	2266	2,895	52.0	7,060,944	7,683	265149	598	0.000729	632
13	0.176	2043	2,845	47.6	5,863,077	6,621	225575	626	0.000765	573
14	0.199	1862	2,802	44.0	4,967,849	5,799	194402	649	0.000800	525
15	0.221	1707	2,761	40.9	4,252,974	5,121	170269	671	0.000833	484
16	0.265	1462	2,691	35.9	3,222,487	4,102	150368	707	0.000897	418
17	0.309	1277	2,631	32.0	2,529,567	3,380	120435	737	0.000958	368
18	0.353	1131	2,578	28.9	2,034,642	2,839	99229	763	0.001017	328
19	0.397	1015	2,532	26.3	1,675,818	2,431	83366	785	0.001074	297
20	0.441	925	2,492	24.3	1,418,155	2,127	71381	804	0.001129	272
21	0.485	839	2,452	22.4	1,190,563	1,849	62457	821	0.001184	248
22	0.529	770	2,417	20.8	1,021,243	1,636	54300	836	0.001237	229
23	0.573	714	2,387	19.5	892,172	1,468	48029	850	0.001289	213
24	0.620	662	2,357	18.3	779,910	1,468	43108	862	0.001341	198

2.7.2. Sınır Şartlarının ve Basınç Yüklemelerinin Tanımlanması

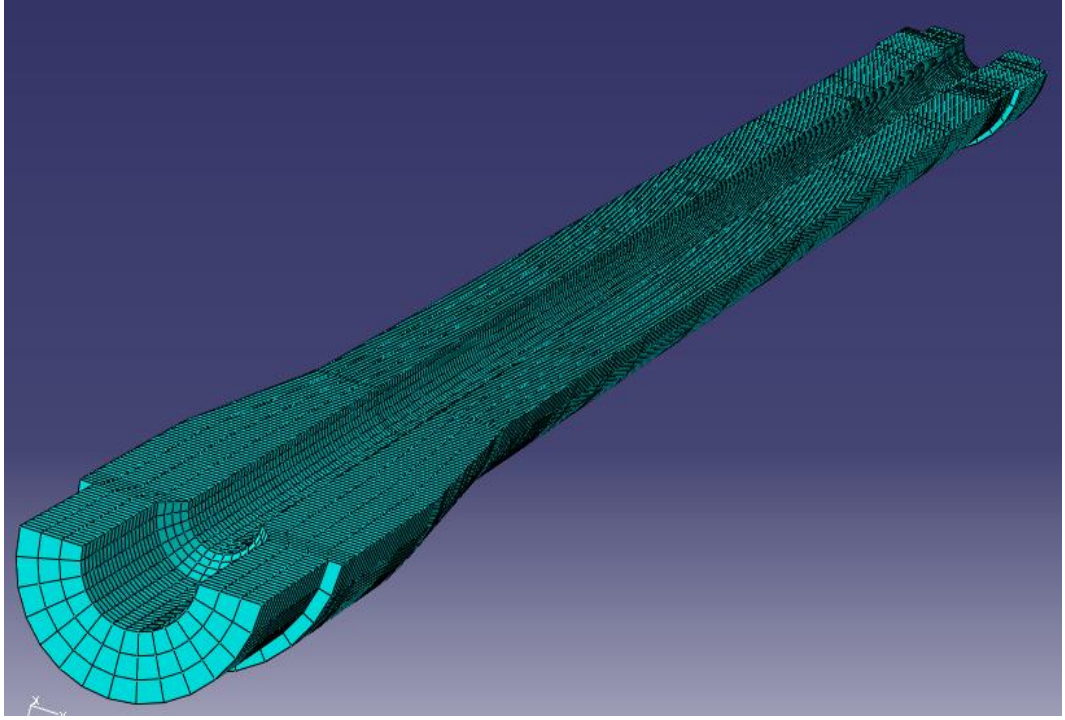
Namlu kullanıldığı silaha montajı yapıldığı yerden ankastre olarak bağlanmıştır. Ayrıca çözümün kolay olması için yarım olarak modellenen namluya simetri eksenini tanımlanmıştır. 24 Parçaya bölünmüş namlunun her bir kesitine hesaplanan basınç yüklemesi yapılmış ve yerçekimi uygulanmıştır. Yüklemeleri tamamlanan model 29010 düğüm ve 21574 elemandan oluşacak şekilde ağ edilmiştir. Basıncın %60'ını taşıyacak çelik gömlek modeli de 79764 düğüm ve 61402 elemandan oluşacak şekilde ağ edilmiştir. Kompozit destekli namlu modeli ise 128708 düğüm ve 108130 elemandan oluşacak şekilde ağ edilmiştir. (Şekil 2.27 – 2.31).



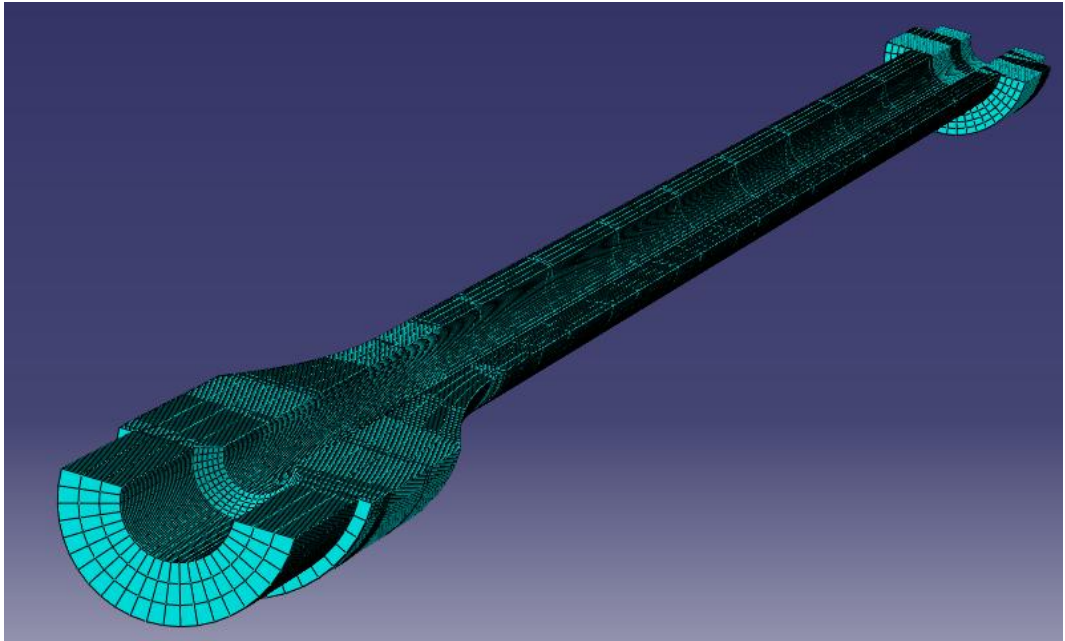
Şekil 2.26. Abaqus® programında sınır şartlarının tanımlanması.



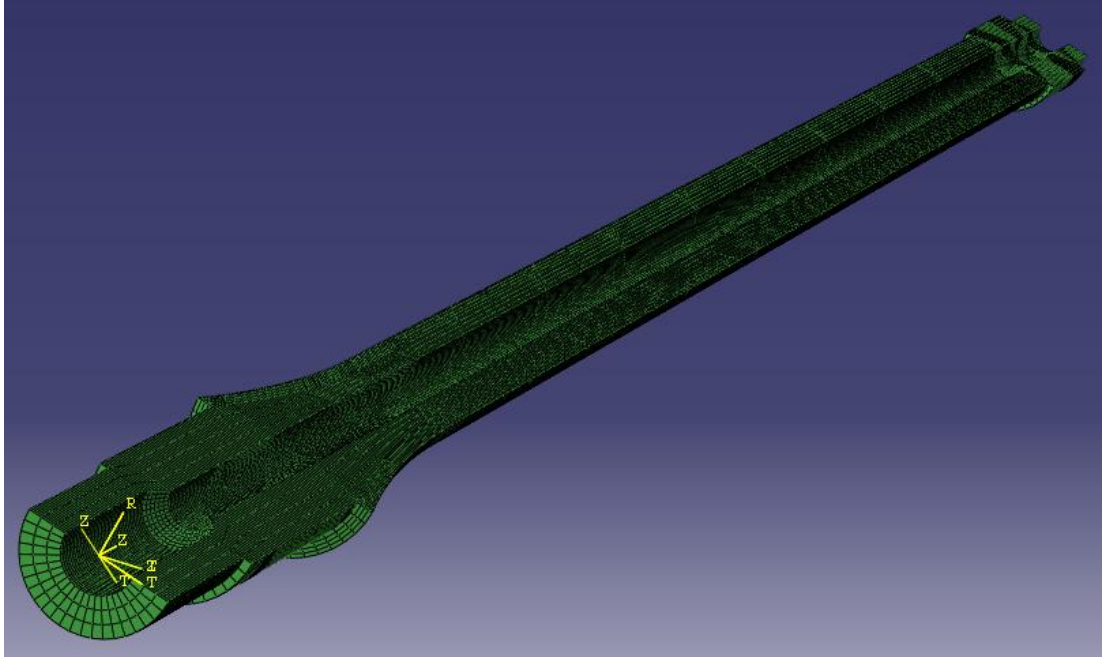
Şekil 2.27. Abaqus® programında yüklemelerin tanımlanması.



Şekil 2.28. Abaqus® sonlu eleman programında orjinal namlunun ağ modeli.



Şekil 2.29. Abaqus®sonlu eleman programında inceltilmiş namlunun ağ modeli.

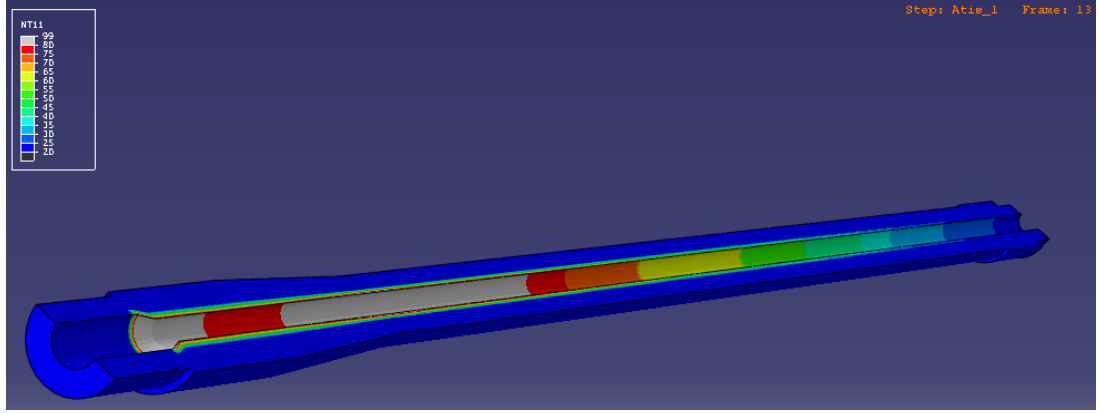


Şekil 2.30. Abaqus® sonlu eleman programında kompozit namlunun ağ modeli.

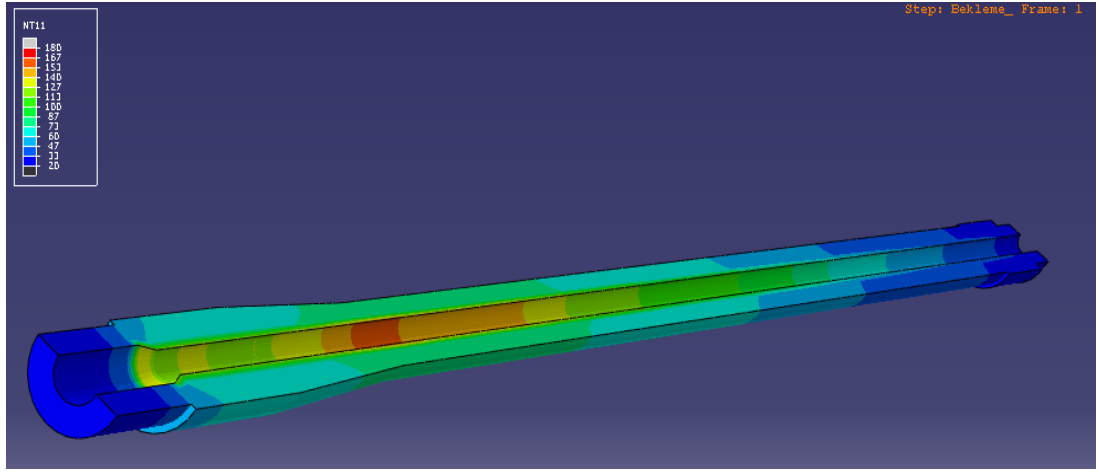
2.7.3. Nümerik Çözümün Elde Edilmesi

2.7.3.1. Orjinal Çelik Namlunun Termal ve Termomekanik Analizi

Modelin çözümü termal ve termomekanik olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Her iki çözümde de eleman tipleri hariç diğer tüm özellikler aynı kullanılmıştır. Namlunun termal analizinde birinci atış esnasında mermi namlu içinde hareket ederken en yüksek sıcaklık değeri basıncın en yüksek olduğu yerde olduğu görülmektedir (Şekil 2.32). Atışlı testlerin simülasyonunda 10. atışta namlu iç çeper ve dış çeper sıcaklıklarının basıncın en fazla olduğu yerde en yüksek değerleri aldığı görülmektedir (Şekil 2.33).

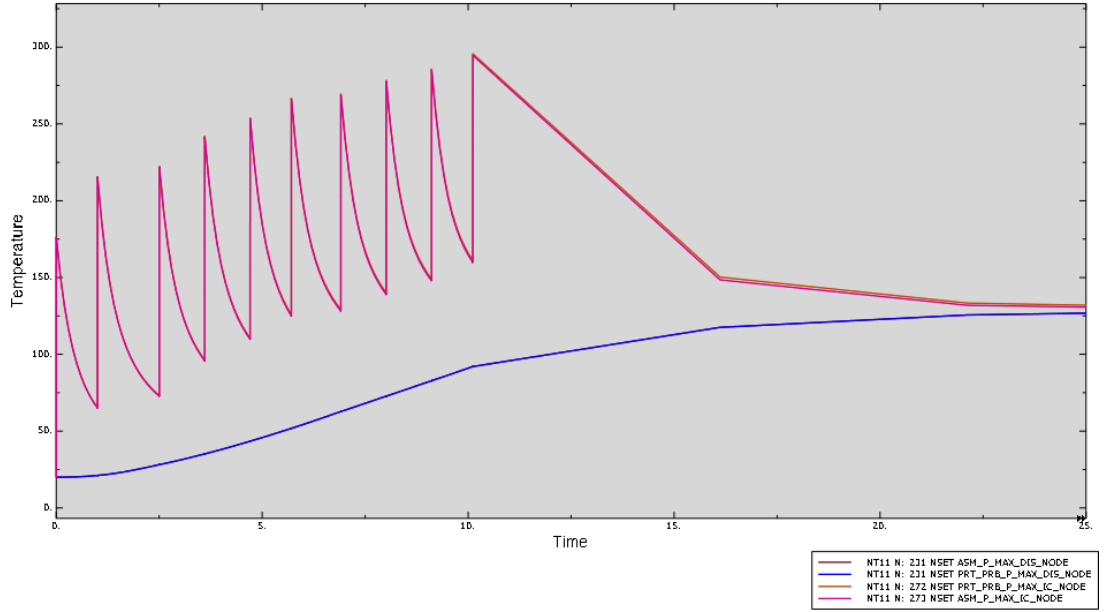


Şekil 2.31. Orijinal namlunun termal analizi. (1.Atış).



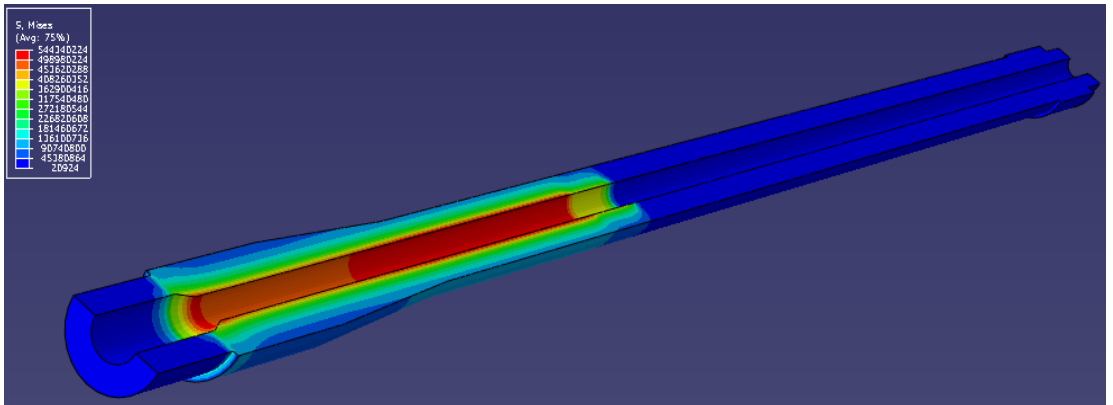
Şekil 2.32. Orijinal namlunun termal analizi. (10. Atış sonrası bekleme).

Gerçekleştirilen termal analizde basıncın en yüksek olduğu bölge ve yakınlarına tanımlanan izleyici problemlerin ve basıncın en yüksek olduğu dış çepere tanımlanan izleyici probu kaydettiği sıcaklık dağılım Şekli 2.33'te verilmiştir. İç çeper sıcaklığı atış esnasında ani olarak yükseldiği ve atış biter bitmez de sıcaklığın düştüğü görülmektedir. Dış çeper sıcaklığı ise belli bir eğimle yükselmektedir. Atış bittikten belli bir süre iç çeper sıcaklığı azalırken dış çeper sıcaklığı artmakta ve daha sonra iç ve dış çeper sıcaklıkları eşit olmakta ardından da dış ve iç çeper sıcaklıkları birlikte düşmektedir.

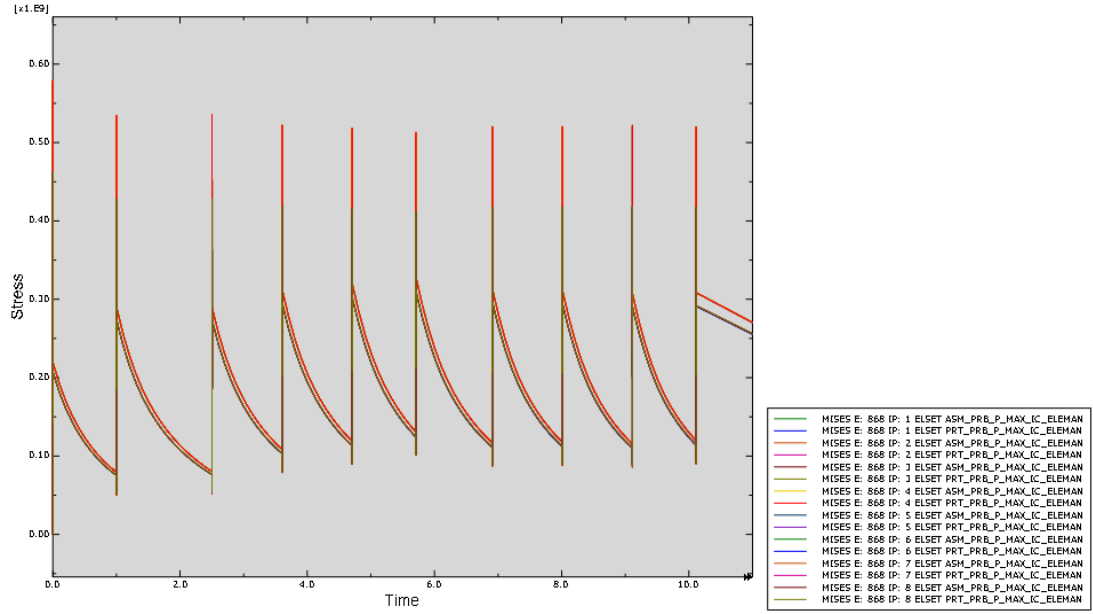


Şekil 2.33. Orijinal namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu iç ve dış yüzeye yerleştirilen izleyici problemlerin zamana bağlı sıcaklık değişimi.

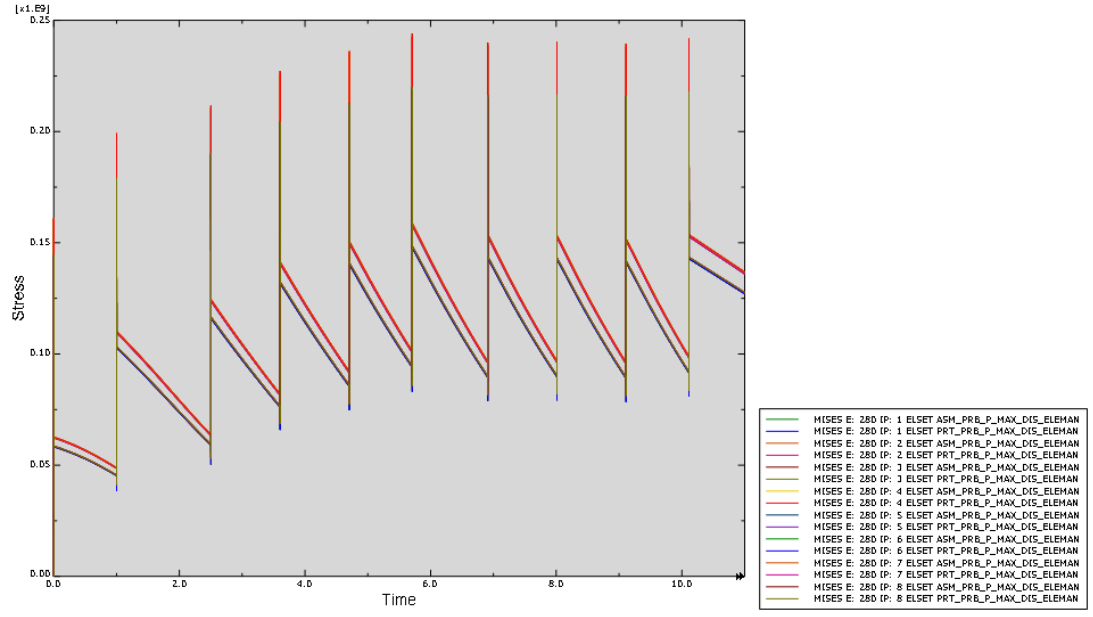
Termomekanik analizinde namlu iç ve dış çeper sıcaklıkları termal analizle yaklaşık olduğu görülmüştür (Şekil 2.33. ve Şekil 2.38). İncelenen namlu ile kullanılan fişegın en yüksek çalışma basınç değeri 4300 bar olarak üretici firmadan alınmıştır. Normal çalışma basıncı için basıncın en yüksek olduğu yerde namlunun içinde 510-580 MPa, namlunun dışında ise 160-245 MPa servis gerilmeleri hesaplanmıştır (Şekil 2.34 - 2.36).



Şekil 2.34. Orijinal namlunun termomekanik von Mises gerilmeleri (1. Atış).

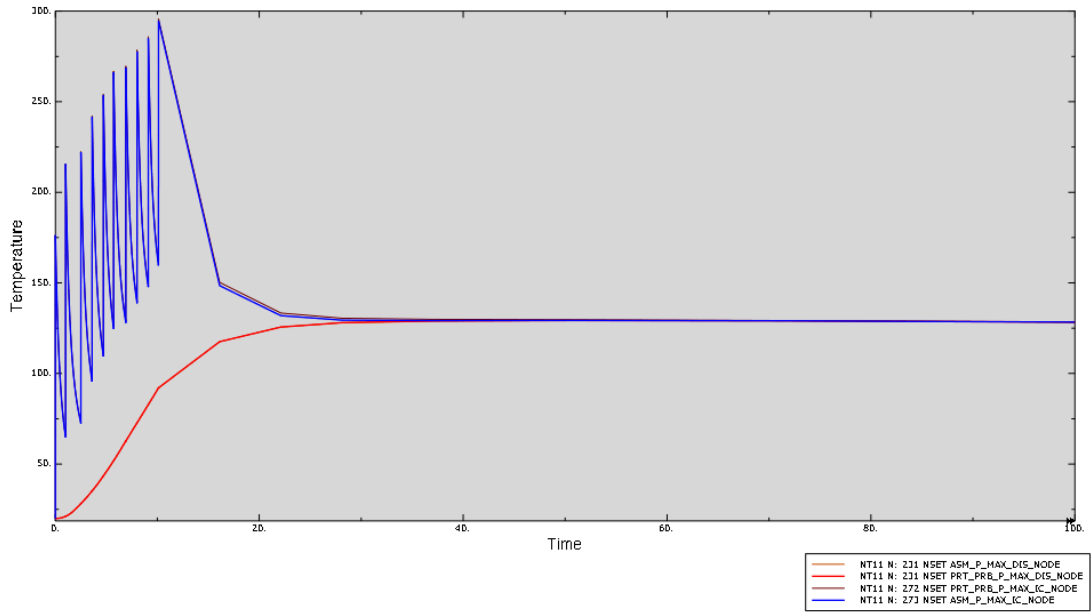


Şekil 2.35. Orijinal namlunun iç yüzey termomekanik von Mises gerilme değişimi.



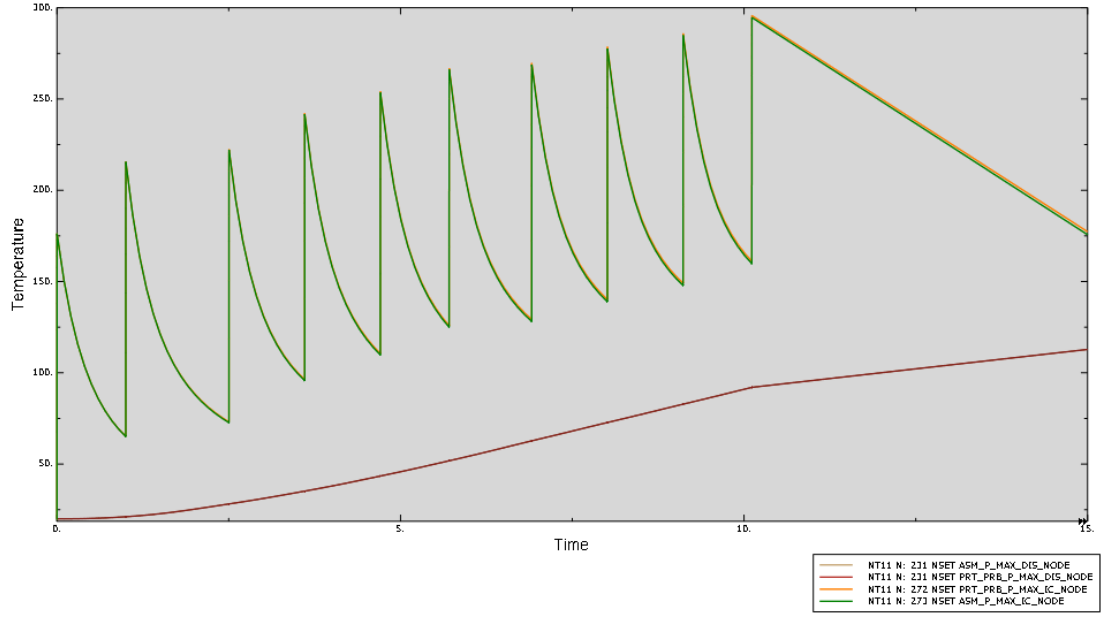
Şekil 2.36. Orijinal namlunun dış yüzeyinin termomekanik von Mises gerilmeleri.

Simülasyonda 10 atış için gerçekleşme süresi yaklaşık 12 saniye kadardır. Atış sonrasında namlunun 100 saniye sonraki soğuma durumu için analiz de yapılmıştır (Şekil 2.37).



Şekil 2.37. Orijinal namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu yere yerleştirilen izleyici problemlerin 100 saniye sürecinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.

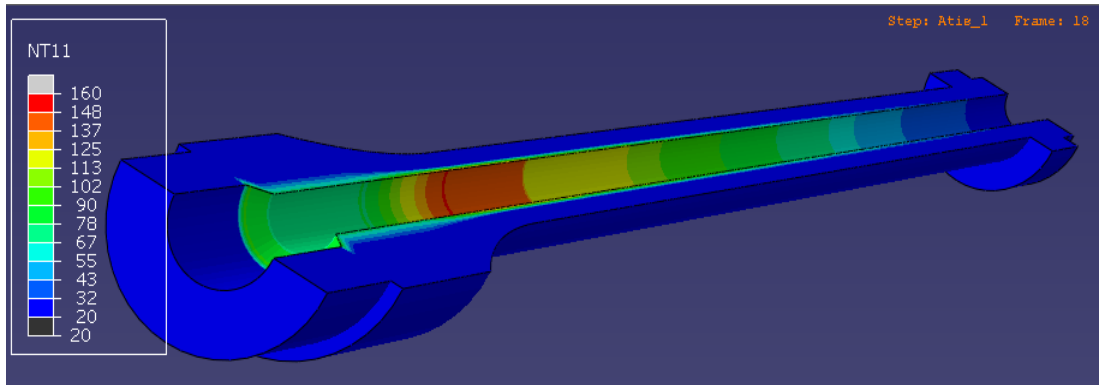
Termomekanik analizde basıncın yüksek olduğu namlu iç ve dış yüzeyine yerleştirilen izleyici problemlerin sıcaklık dağılımı incelendiğinde ilk üç atışta dış çeperin sıcaklığa tepkisinin az olduğu görülmektedir. Atış bittikten sonra iç çeper sıcaklığının atış arası bekleme zamanlarına sıcaklığına göre daha geç soğuduğu analizden görülmektedir (Şekil 2.37). Bunun nedeni atış bittikten sonra bekleme süresi için çözüm adımının fazla olmasıdır. Çözüm adımı atışlar arası 10^{-5} s., atışlarda 10^{-10} s. ve atış sonrası beklemede ise 1 saniyedir. Çözüm için adım arttıkça çözüm süresi oldukça fazla artmaktadır. Aynı şekilde atışlar esnasında sıcaklığın yükseldiği noktalar adım sayısı artırılması durumunda daha hassas çözüm elde edilebilir. Bu analiz için çözüm süresi ve hassasiyeti için alınan adım değerlerin yeterli olduğu kabul edilmiştir.



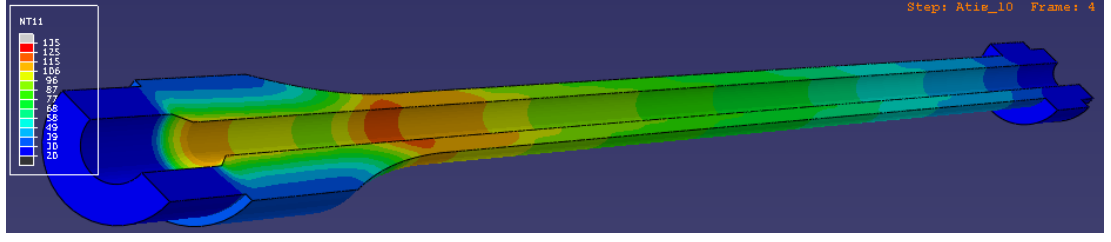
Şekil 2.38. Orijinal Namlunun termomekanik analizinde namlu içine ve dışına yerleştirilen problemlerin sıcaklık-zaman grafiği.

2.7.3.2. İnceltilmiş Et Kalınlıklı Çelik Namlunun Termal ve Termomekanik Analizi.

Bu modelin çözümü de termal ve termomekanik olmak üzere iki çeşit yapılmıştır. Her iki çözümde de eleman tipleri hariç diğer tüm özellikler aynı kullanılmıştır. İnceltilmiş et kalınlığı 3.6 mm olan namlunun simülasyonunda da yine basıncın en yüksek olduğu yerde ısınmanın fazla olduğu ve malzemenin ısıya karşı hassasiyeti arttığı görülmüştür (Şekil 2.39 ve Şekil 2.40).

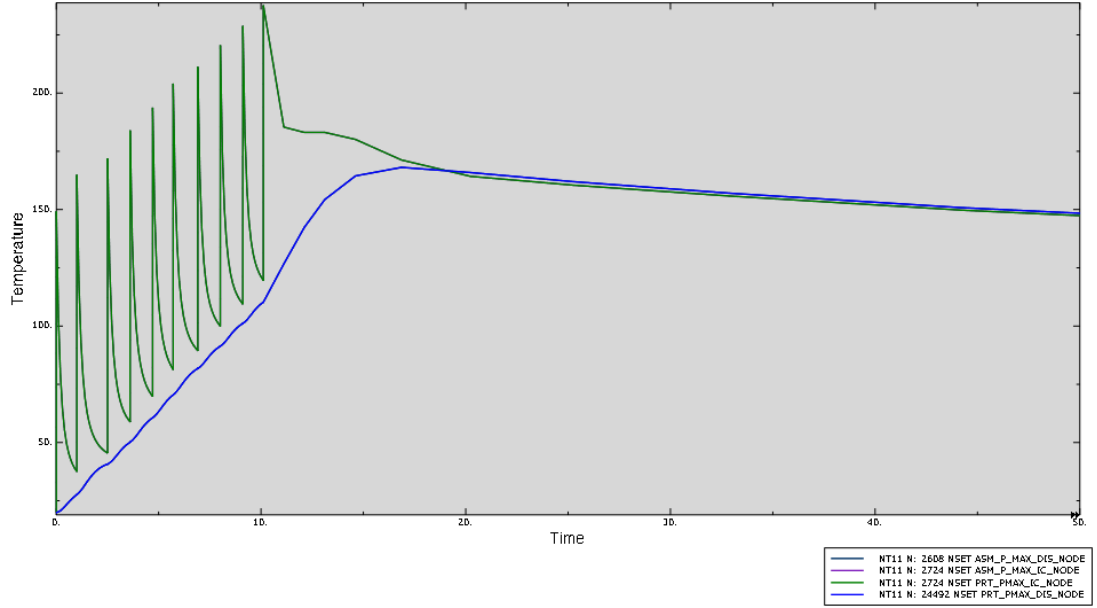


Şekil 2.39. İnceltilmiş namlunun termal analizi. (1.Atış).



Şekil 2.40. İnceltilmiş namlunun termal analizi. (10. atış).

İnceltilmiş namlu için gerçekleştirilen simülasyonda, sıcaklığın dış çepere daha kısa sürede ulaştığı görülmüştür. Dış çeper sıcaklığı atış esnasında ısınması ve atış arası beklemede ise ısınmanın azaldığı olarak görülmektedir. Atış işlemi tamamlandıktan sonra dış çeper sıcaklığında belirgin olarak sıcaklığın arttığı da görülmektedir. İnceltilmiş namlu ile basıncı düşürülmüş fişeklerle atış yapılmış ancak emniyet konusunda zafiyet oluşabileceğinden sıcaklık ölçümü yapılarak bu analiz deneyle doğrulanamamıştır (Şekil 2.41).



Şekil 2.41. İnceltilmiş namlunun içine ve basıncın en yüksek olduğu dış yüzeye yerleştirilen izleyici problemlerin zamana bağlı sıcaklık değişimi.

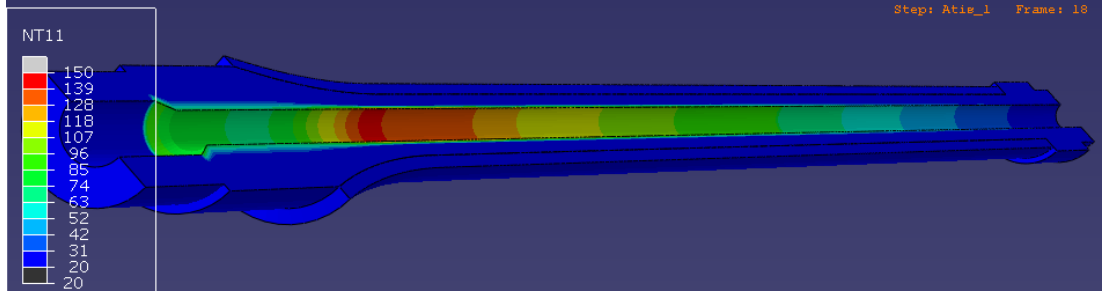
3D visualization of the von Mises stress distribution on the shaft of a propeller. The shaft is shown in a perspective view, with the highest stress (red) concentrated in the central section. A color scale legend on the left indicates stress values from 19595 to 833419648.

[illegible]

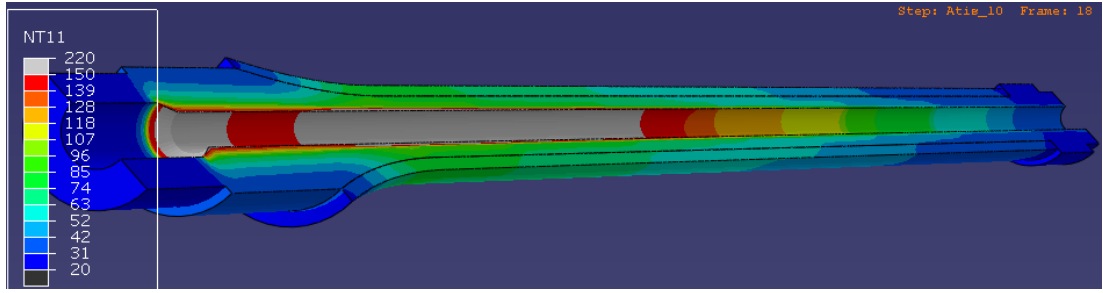
2.7.3.3. Kompozit Namlunun Termal ve Termomekanik Analizi

60

simülasyonunda da yine basıncın en yüksek olduğu yerde ısınmanın fazla olduğu ve malzemenin ısıya karşı hassasiyetinin orijinal namlunun değerlerine yakın olduğu görülmüştür (Şekil 2.44, Şekil 2.45. ve Şekil 2.46).

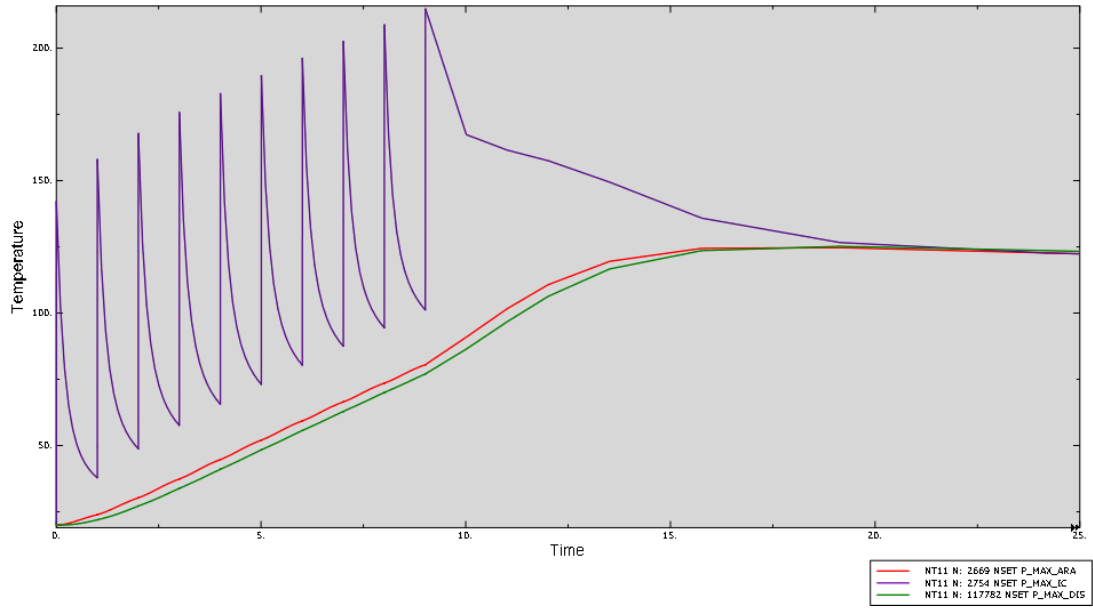


Şekil 2.44. Kompozit destekli namlunun termomekanik analizi sıcaklık verileri
(1. atış).



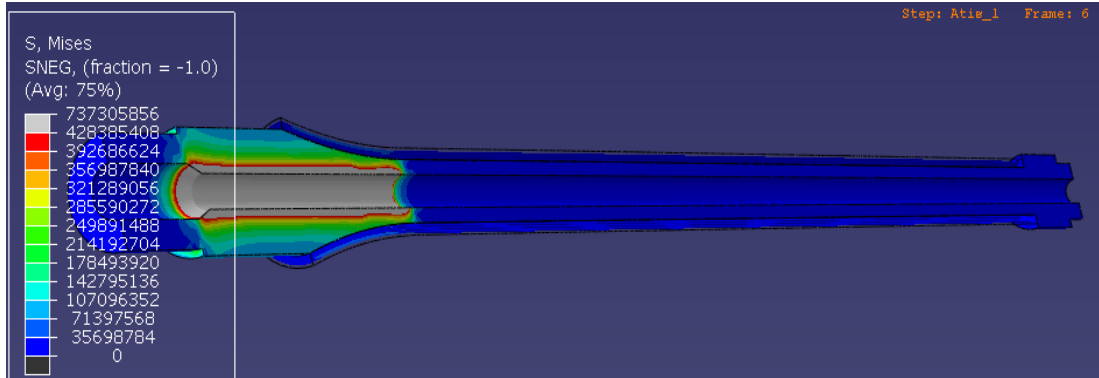
Şekil 2.45. Kompozit destekli namlunun termomekanik analizi sıcaklık verileri
(10. atış).

Termal simülasyonda, atışlarda dış çepere sıcaklık orijinal modelinkine yakın sürede ulaştığı görülmektedir. Modelde çelik ile kompozit arasındaki, iç çeperdeki ve dış çeperdeki problemlerin ölçtüğü sıcaklıklarda, iç ve dış çeperlerin orijinal namlu sıcaklığı ile yakın olduğu görülmektedir. Dış çeperin sıcaklığa tepkisinde gecikme olduğu da tespit edilmiştir. Çelik ile kompozit malzeme arasındaki sıcaklık ise dış çeperden daha yüksek ve atışlarda ısıya karşı daha hassas olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kompozit malzemenin ısı iletim katsayısının çelikten daha düşük olmasıdır. Atış bittikten belli bir süre iç çeper sıcaklığı azalırken dış çeper sıcaklığı artmakta ve daha sonra iç ve dış çeper sıcaklıkları eşit olmakta ardından da dış ve iç çeper sıcaklıkları birlikte düşmektedir (Şekil 2.46).

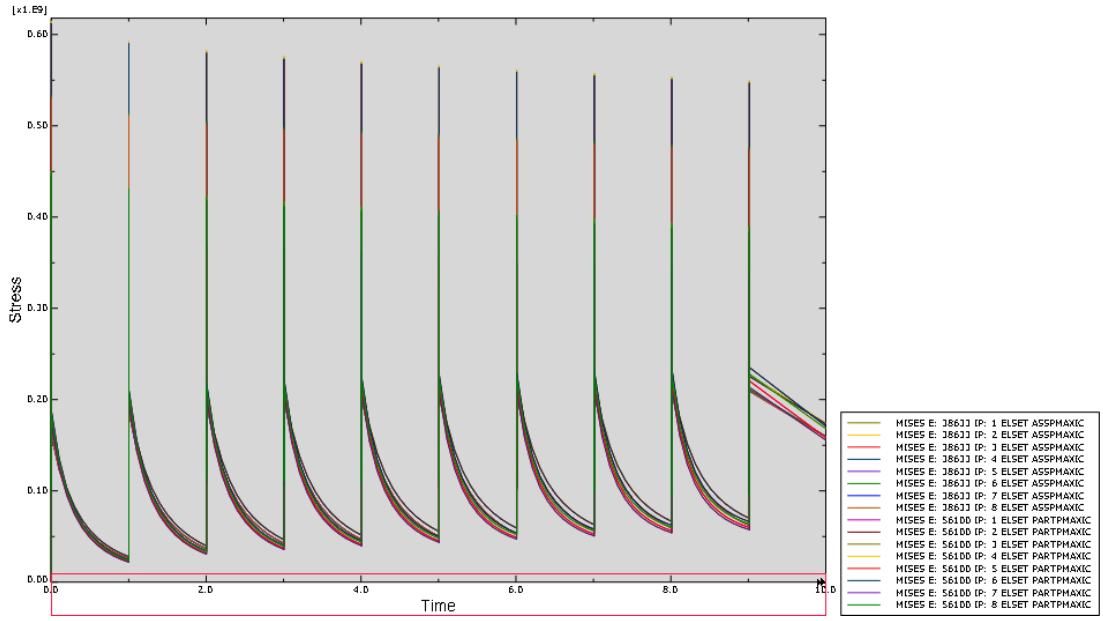


Şekil 2.46. Kompozit destekli namlu içine ve basıncın en yüksek olduğu dış yüzeye yerleştirilen izleyici problemlerin zamana bağlı sıcaklık değişimi.

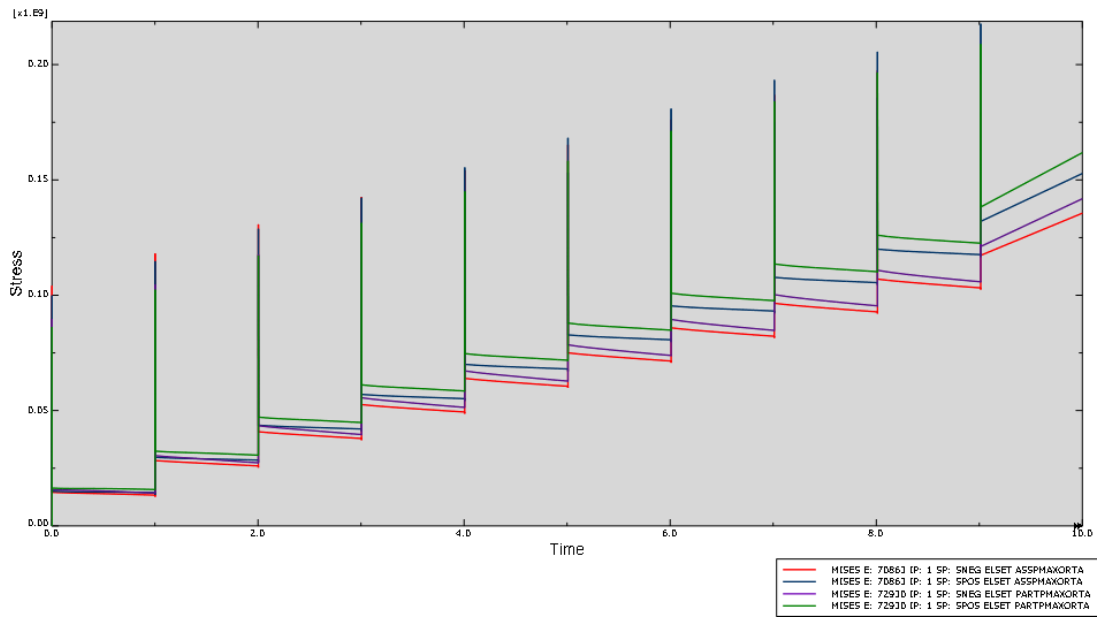
Von Mises gerilmeleri termomekanik analizde incelendiğinde iç çeperde 740 MPa'a kadar yükseldiği görülmüştür. Basıncın yüksek olduğu konumda von Mises gerilmeleri dış çeperde 160 MPa'a ara yüzeyde ise 210 MPa'a çıktığı görülmüştür (Şekil 2.47 - 2.50).



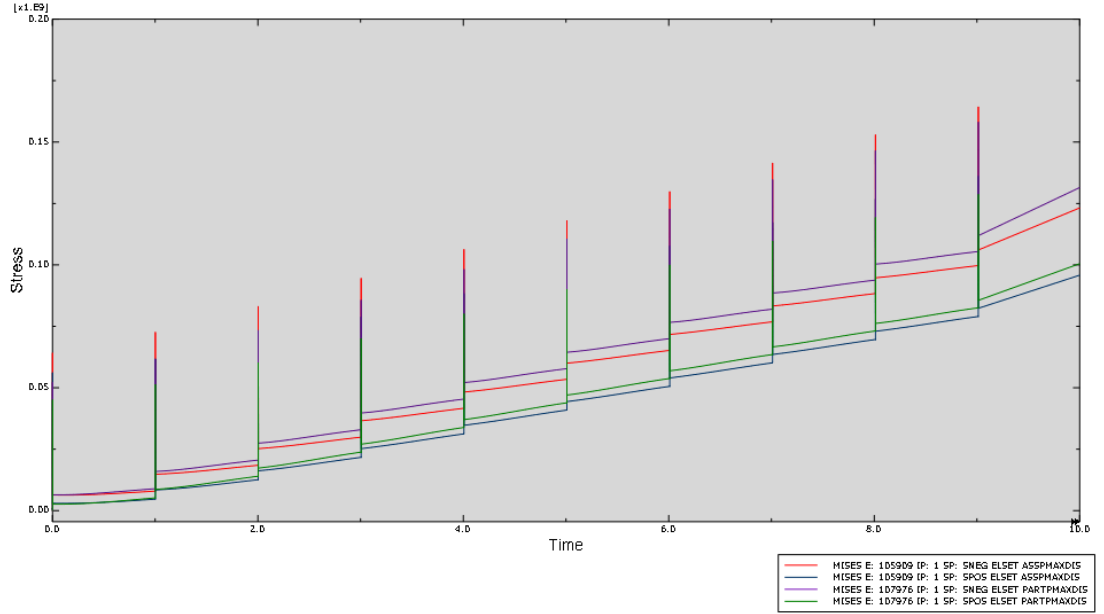
Şekil 2.47. Kompozit destekli namlunun termomekanik von Mises gerilmeleri (1. Atış).



Şekil 2.48. Kompozit destekli namlu içinin termomekanik von Mises gerilmeleri.

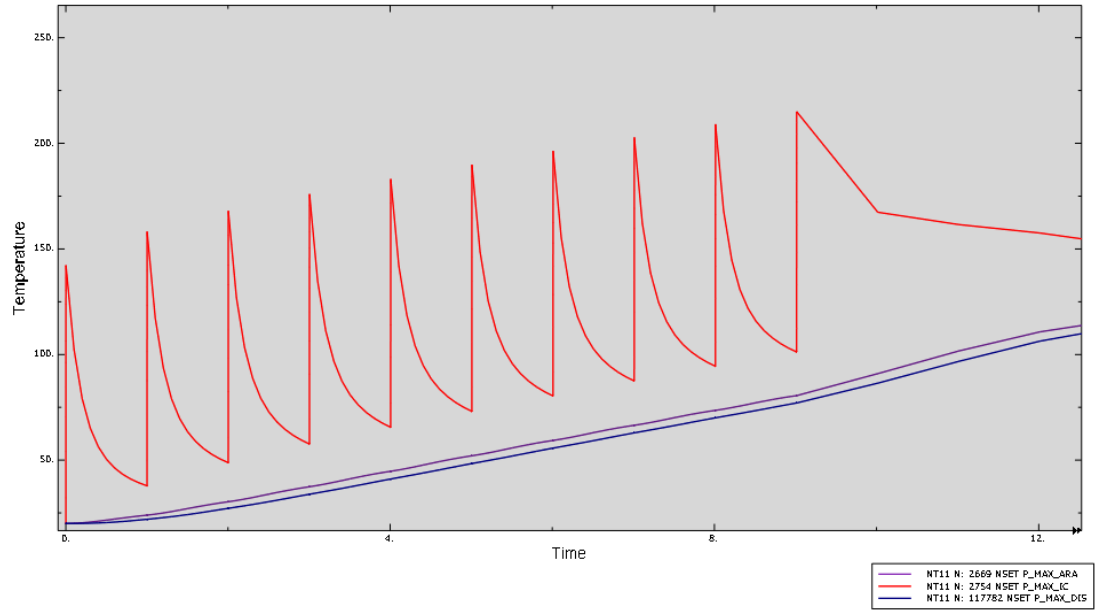


Şekil 2.49. Çelik-kompozit ara yüzeyin termomekanik von Mises gerilmeleri.



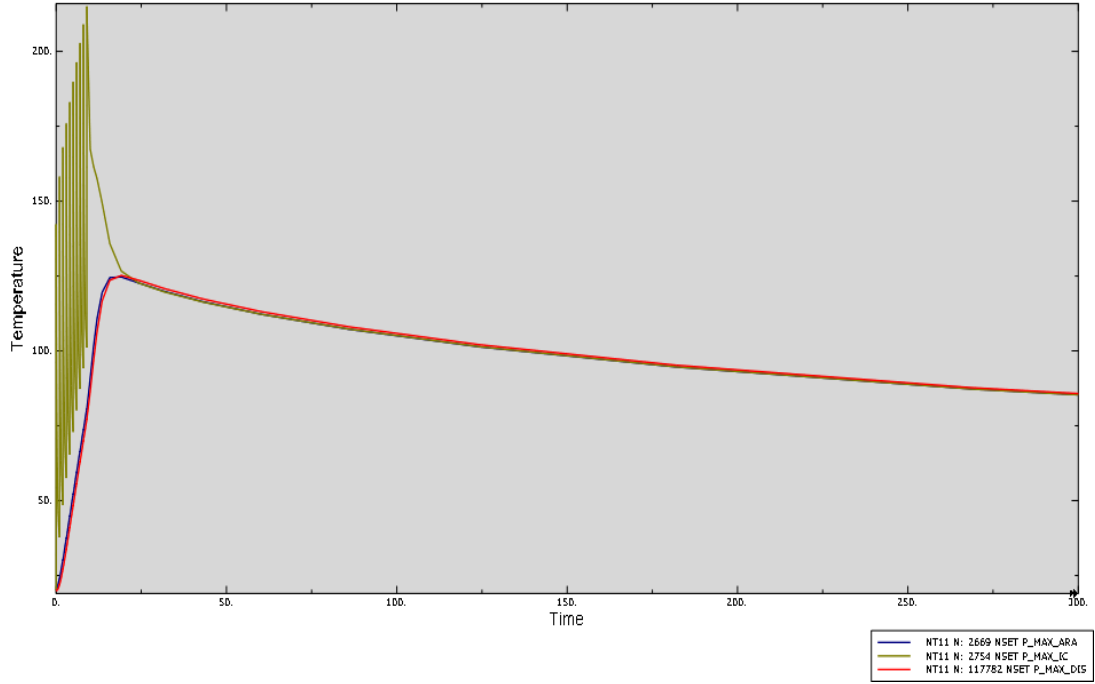
Şekil 2.50. Kompozit destekli namlunun dış termomekanik von Mises gerilmeleri.

Simülasyonda 10 atış için gerçekleşme süresi yaklaşık 12 saniye kadardır. Atış sonrasında namlunun 300 saniye sonraki soğuma durumu için analiz de yapılmıştır. Kompozit ara katman ile dış yüzey arasında sıcaklık farkı analizde açıkça görülmektedir (Şekil 2.51).



Şekil 2.51. Kompozit destekli namlunun dışının termomekanik analizinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.

Atış işlemleri ve atış bittikten sonraki simülasyon süresi yaklaşık 312 saniye olarak yapılmıştır. Bu sürenin yaklaşık 12 saniyesi atış ve 300 saniyesi ise bekleme prosesidir. Kompozit destekli namlunun içinin, ara katmanının ve dış yüzeyinin sıcaklık değişimi Şekil 2.52’de verilmiştir.



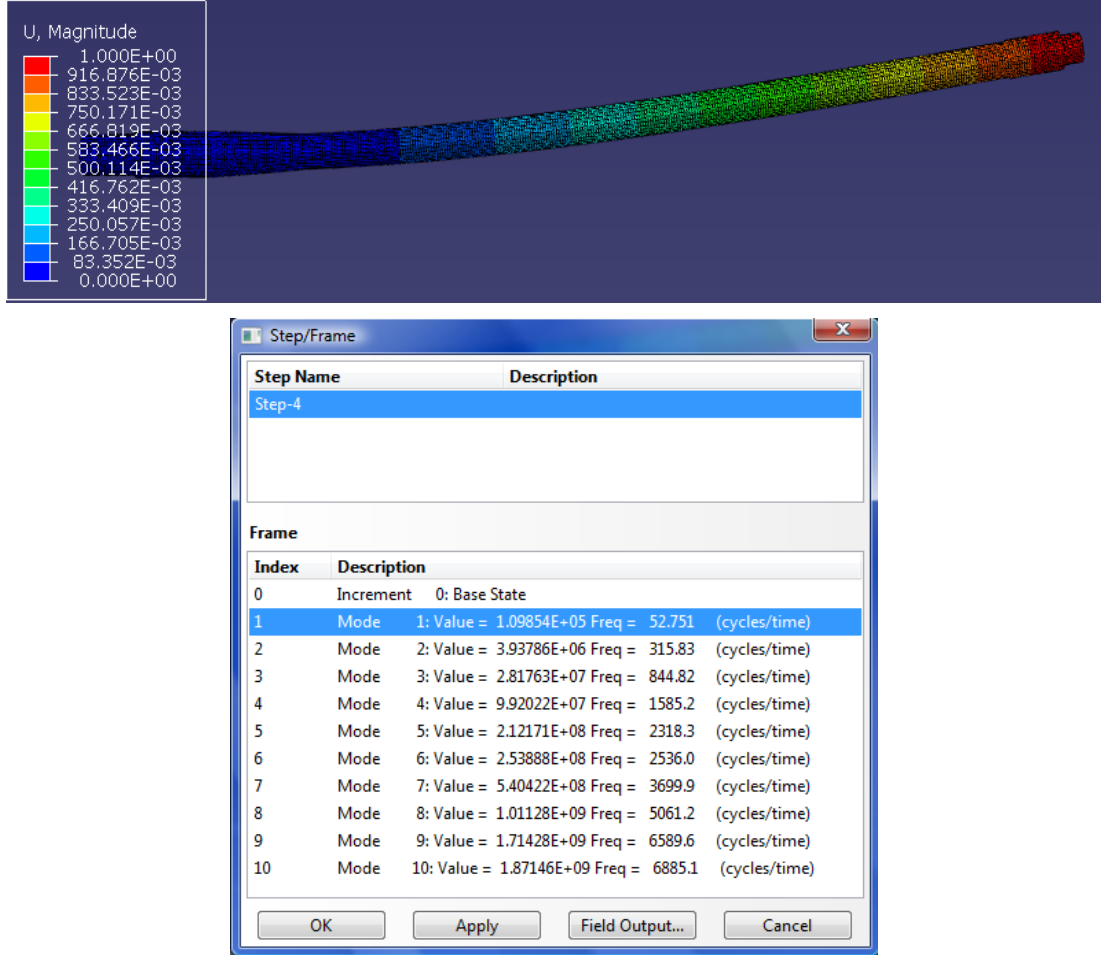
Şekil 2.52. Kompozit destekli namlunun içine ve basıncın en yüksek olduğu yere yerleştirilen izleyici problemlerin 300 saniye sürecinde zamana bağlı sıcaklık değişimi.

2.8. Serbest Titreşim Analiziyle Doğal Frekans Tayini

Orijinal ve kompozit destekli namluların serbest titreşim frekanslarının bilinmesi tasarım kriterlerinin vazgeçilmez özelliklerindendir. Kompozit destekli tasarlanan namlunun atış performans fonksiyonlarını karşılayabilmesi için doğal frekansının, en az orijinal namlu doğal frekans değeri kadar olması gerekmektedir.

2.8.1. Orijinal Namlunun Serbest Titreşim Analiziyle Doğal Frekans Tayini

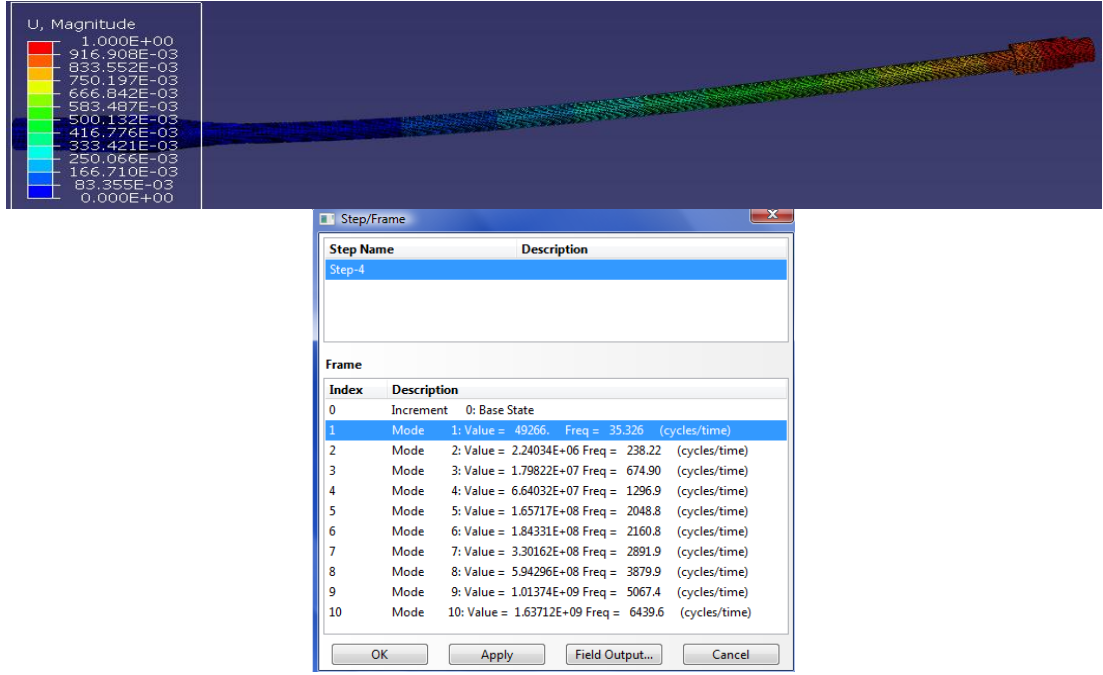
Orijinal namlunun doğal frekans analizinde birinci mod 52.7 Hz. ve ikinci mod 315.8 Hz. olduğu görülmüştür. Diğer mod analizleri ise Şekil 2.53’de görülmektedir.



Şekil 2.53. Orijinal namlunun doğal frekans analizi.

2.8.2. İnceltilmiş Et Kalınlıklı Namlunun Serbest Titreşim Analiziyle Doğal Frekans Tayini

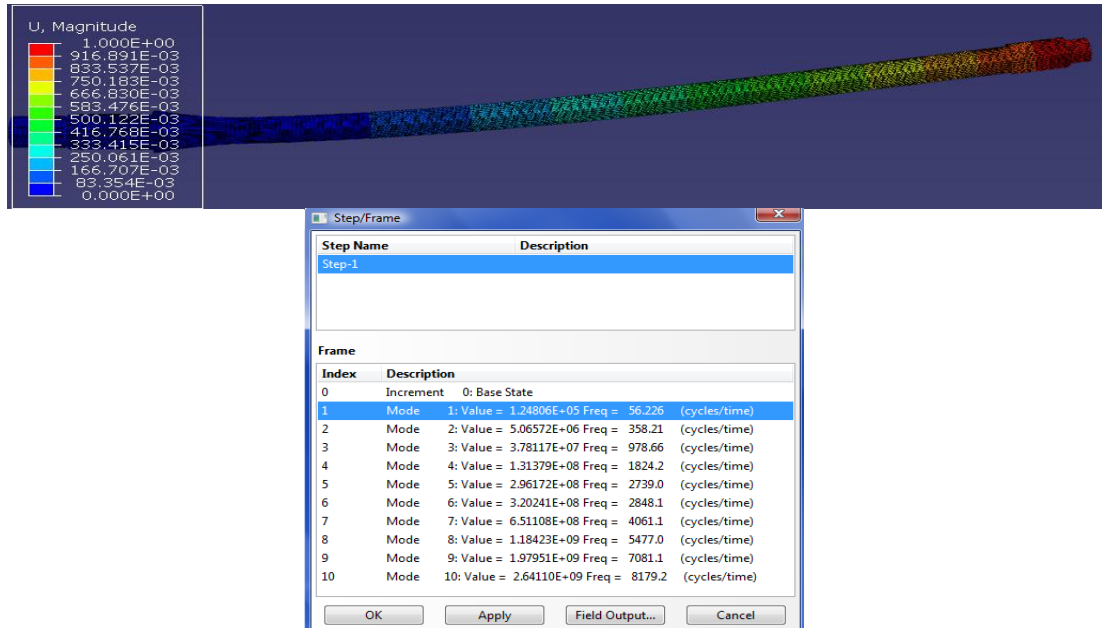
İnceltilmiş et kalınlıklı namlunun doğal frekans analizinde birinci mod 35.3 Hz. ve ikinci mod 238.2 Hz. olduğu görülmüştür. Diğer modlar ve analiz ise Şekil 2.54.’de görülmektedir.



Şekil 2.54. İnceltilmiş et kalınlıklı namlunun doğal frekans analizi.

2.8.3. Kompozit Destekli Namlunun Serbest Titreşim Analiziyle Doğal Frekans Tayini

Kompozit destekli namlunun doğal frekans analizinde birinci 56.2 Hz ve ikinci mod 358.2 Hz. olduğu görülmüştür. Diğer modlar ve analiz ise Şekil 2.55.'de görülmektedir.

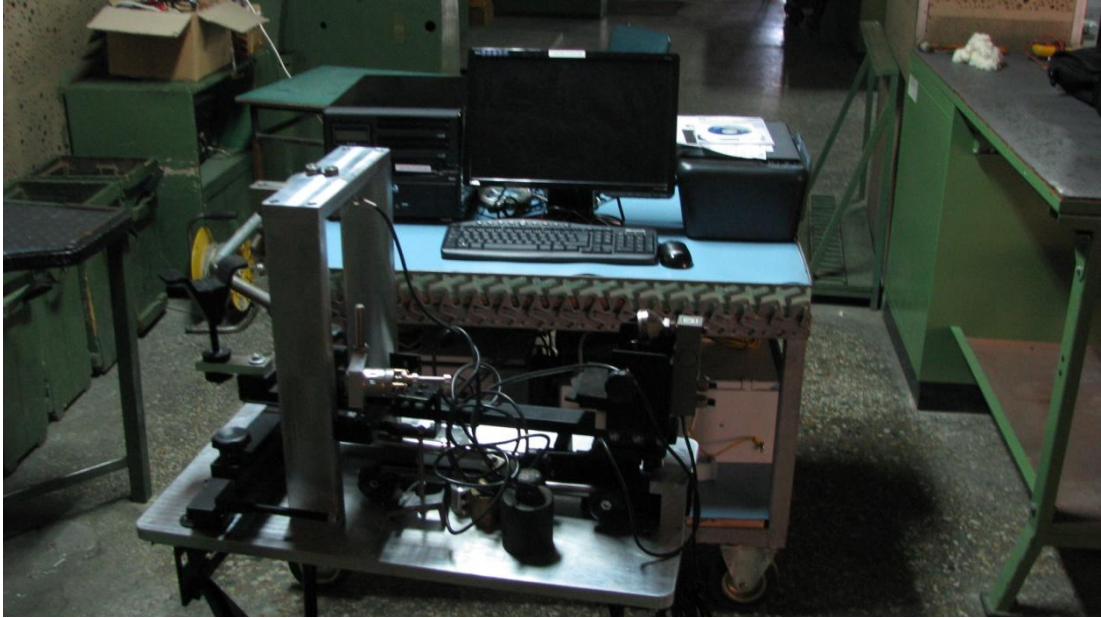


Şekil 2.55. Kompozit destekli namlunun doğal frekans analizi.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Deney Ekipmanları

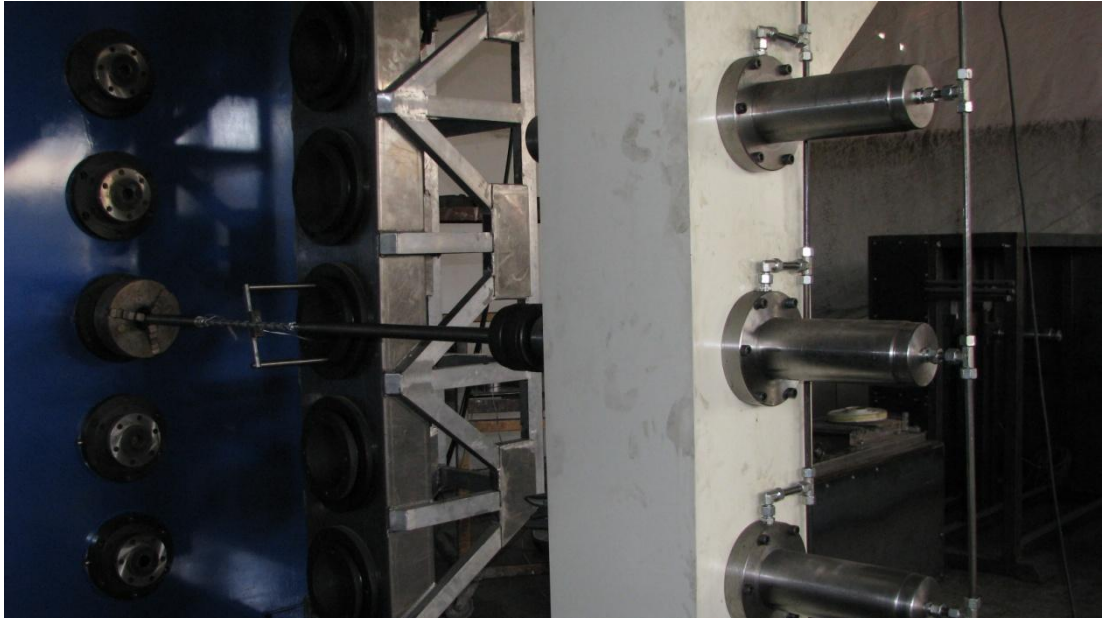
Orijinal namlunun ve kompozit namlunun deneysel çalışmalarında iki çeşit test cihazı ve flaman sarım tezgâhı kullanılmıştır. Namlu yüzeyinden sıcaklık ölçümü almak için kullanılacak cihaz Şekil 3.1’de, gerinim ölçümlerinde kullanılacak cihaz ise Şekil 3.2.’de görülmektedir. Flaman sarım işleminde kullanılacak tezgah Şekil 3.3’tedir. Carl Zeiss marka optik büyütme ve karşılaştırma cihazı Şekil 3.4.’de, 1959 model General Electric marka X ray cihazı ise Şekil 3.5.’de görülmektedir.



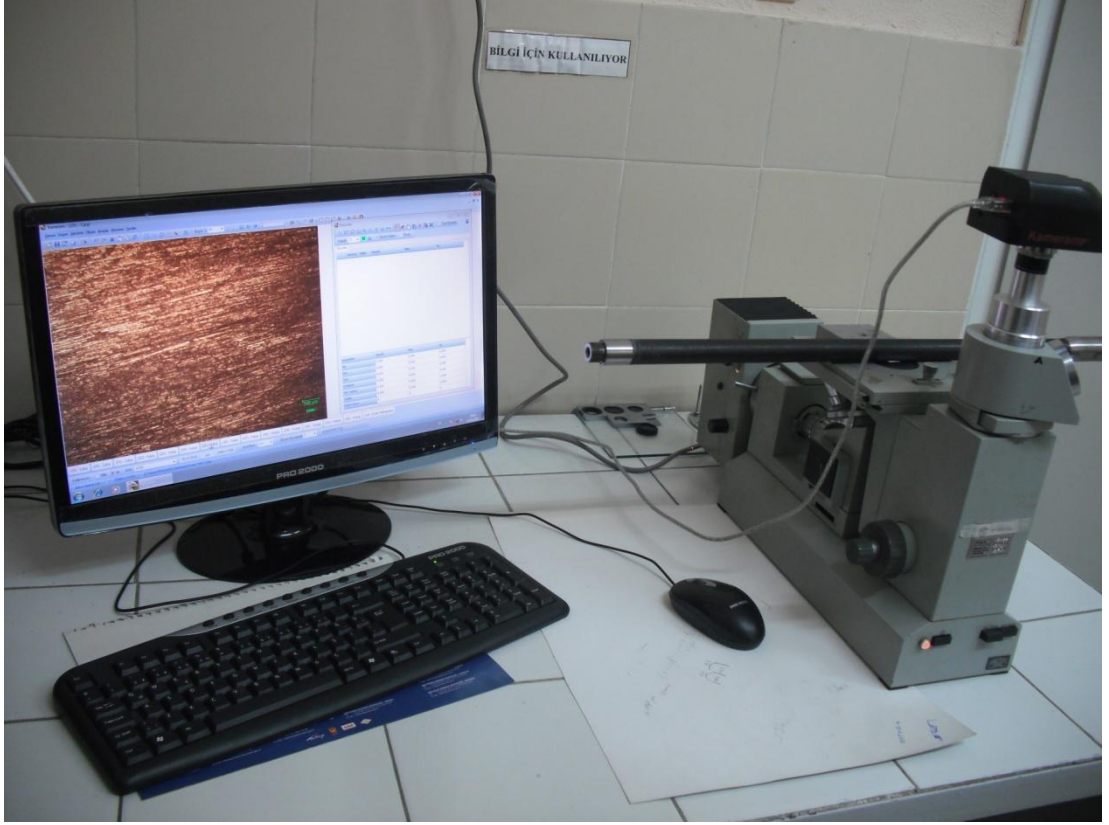
Şekil 3.1. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan cihaz.



Şekil 3.2. Gerinim ölçümlerinde kullanılan cihaz.



Şekil 3.3. CNC Flaman sarım tezgahı.



Şekil 3.4. Optik büyütme cihazı.

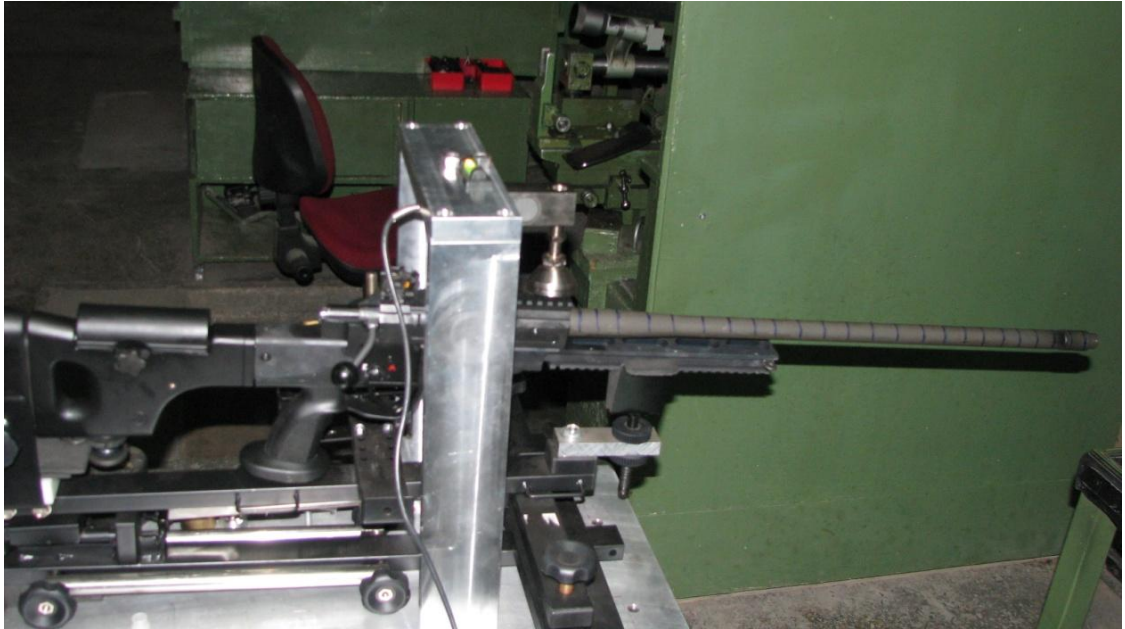


Şekil 3.5. X Ray cihazı.

3.2. Deney Düzenekleri.

Teorik çalışmalarda hesaplanan değerler namlunun yiv-set bölgesi 24 eşit parçaya bölünerek yapılmıştı. Deneysel verilerde de namluya bağlanan termokupol ve gerinim pulları namluyu 24 eşit aralığa denk gelecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Veri toplama cihazının 8 kanalı termokupol ve 8 kanalı da gerinim pulu verilerini alacak şekilde tasarlanmıştır. Gerinim pulları milisaniye mertebesinde veri almaktadır. Termokupol ve gerinim pulları ile aynı anda veri alması özellikle sıcaklık verilerinin boyutunu oldukça fazla arttırmaktadırlar. Bu nedenle atışlarda alınan veriler gerinim pulları için ayrı, sıcaklıklar için de ayrı alınmıştır.

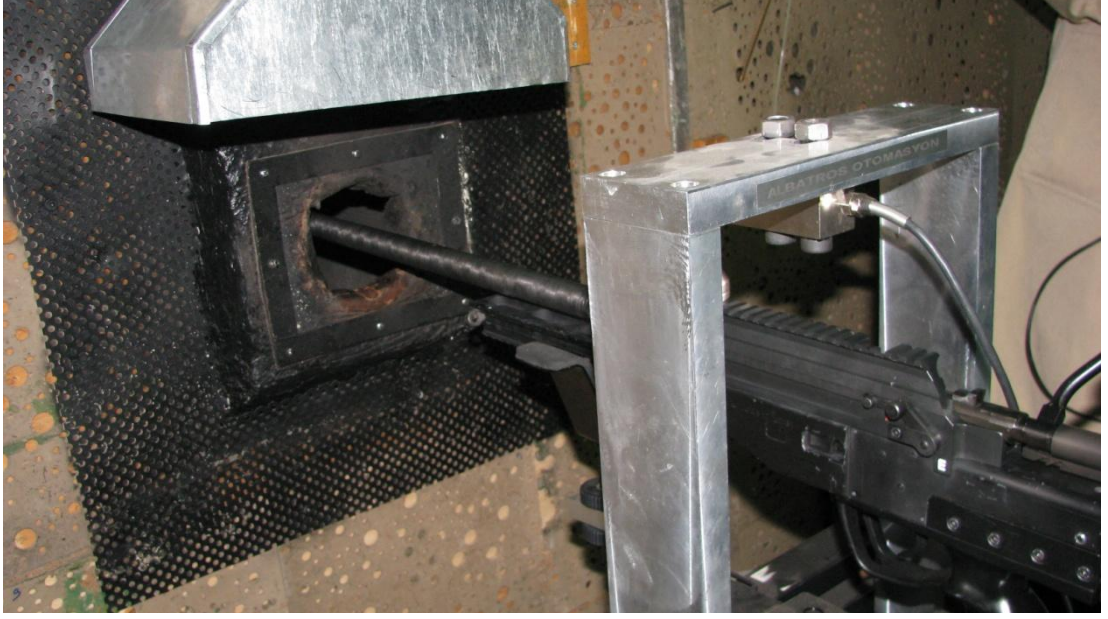
şekil 3.1 ve şekil 3.2’de verilen test düzeneği ve bağlama aparatları yardımı ile test atışları gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı yaklaşık 20  C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık  l m  için orijinal namlunun test cihazına bağlanmış durumu şekil 3.6’da verilmiştir. Orijinal namludan gerinim ölçmek için namluya yapıştırılan gerinim pullarının durumu ise şekil 3.7’te gösterilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen kompozit namlunun sıcaklık ölçümü için test aparatına bağlanmış hali ise şekil 3.8 ve 3.9’da verilmiştir. Orijinal namlunun 24 parçaya ayrılmış durumu şekil 3.10’da verilmiştir.



şekil 3.6. Sıcaklık  l m  için orijinal namlunun test cihazına bağlanması.



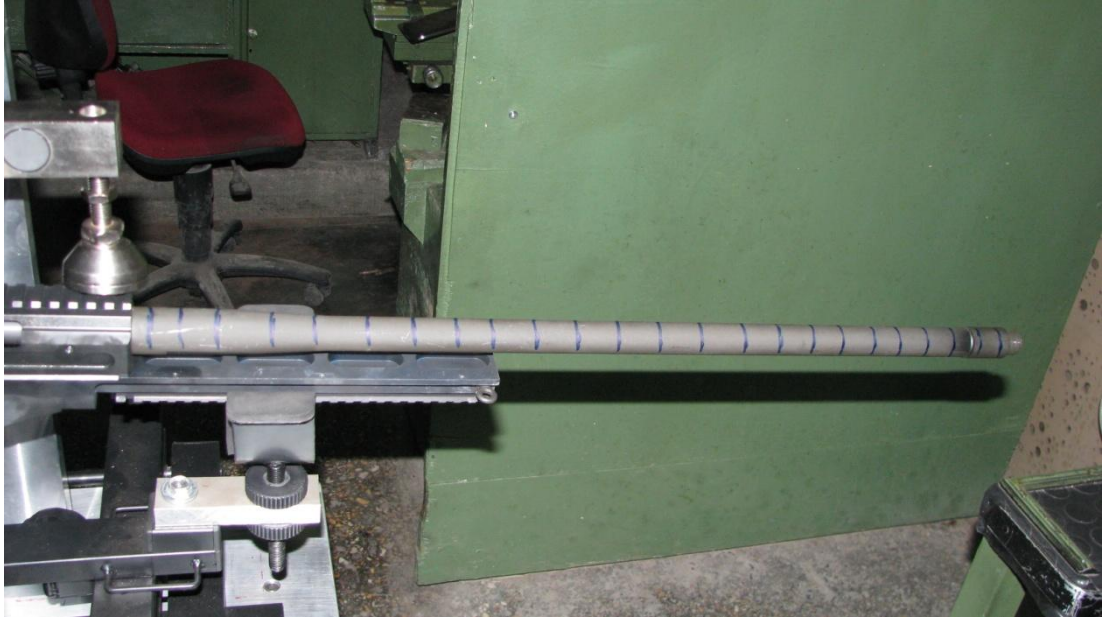
Şekil 3.7. Gerinim pullarının orijinal namluya yapıştırılması.



Şekil 3.8. Sıcaklık ölçümü için kompozit desteklinamlunun test cihazına bağlanması.



Şekil 3.9. Sıcaklık ölçümü için kompozit namlunun test cihazına bağlanması.



Şekil 3.10. Orijinal namlunun 24 parçaya ayrılmış durumu.

Et kalınlığı inceltilmiş namlunun CNC Flaman sarma tezgahında sarımı Şekil 3.11’de görülmektedir.



Şekil 3.11. Karbon/Epoksi sarım işlemi.

3.3. Verilerin Toplanması.

Termokupollarla alınan sıcaklıklarda bir şarjör ile mümkün olduğunca seri atılmaya çalışılmıştır. Alınan verileri mukayese edebilmek için ayrıca seyyar termometre de kullanılmıştır. Gerek sıcaklık ve gerekse de gerinim ölçümlerinde sağlıklı veriler toplandığı kanaati oluşuncaya kadar atışlı testler tekrarlanmıştır. Atışlarda namlunun ısınmasının ardından bir sonraki atışa geçmeden önce namlu soğutulmuş ve ortam sıcaklığına geldiği seyyar termometre ile teyit edilmiştir.

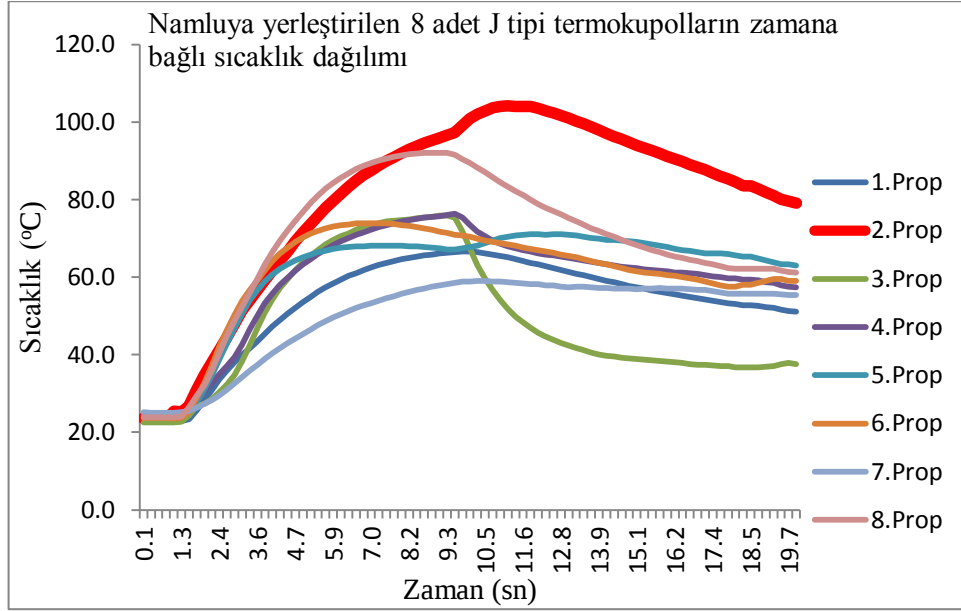
Namlunun orijinal hali ve %60 yükü taşıyacak şekilde inceltilmiş olmak üzere iki model üzerinde teorik çalışmalar yapılmıştır. Deney verileri ise mevcut orijinal namludan sıcaklık ve gerinim verileri alınarak, kompozit malzeme kullanılarak üretilen namluda ise sıcaklık verileri alınmıştır.

Çizelge 3.1. Orijinal namlunun deney verilerinden elde edilen gerinimler ve hesaplanan gerilmeler.

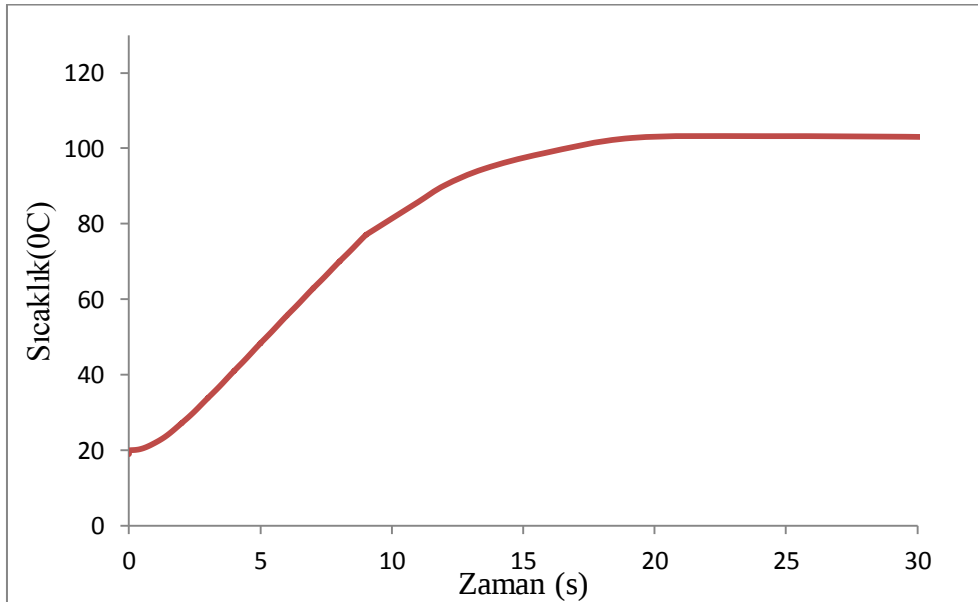
Ölçülen gerinim (10-6)	Elastisite Modülü (Gpa)	ν	ϵ_1	ϵ_2	$\sigma_{x_{max}}$	$\sigma_{y_{max}}$	σ_s
798.3	230	0.3	798.3	-798.3	141.2	-141.2	244.6
684.5	230	0.3	684.5	-684.5	121.1	-121.1	209.7
901.2	230	0.3	901.2	-901.2	159.4	-159.4	276.2
685.5	230	0.3	685.5	-685.5	121.3	-121.3	210.1
872.3	230	0.3	872.3	-872.3	154.3	-154.3	267.3
895.2	230	0.3	895.2	-895.2	158.4	-158.4	274.3
882.3	230	0.3	882.3	-882.3	156.1	-156.1	270.4
846.4	230	0.3	846.4	-846.4	149.8	-149.8	259.4
696.4	230	0.3	696.4	-696.4	123.2	-123.2	213.4
871.8	230	0.3	871.8	-871.8	154.2	-154.2	267.2
846.6	230	0.3	846.6	-846.6	149.8	-149.8	259.4
1055.4	230	0.3	1055.4	-1055.4	186.7	-186.7	323.4

Mevcut namluya 8 adet J tipi termokupol kullanılmıştır. Termokupollar namlu yüzeyine yapıştırılmıştır (Şekil 3.7). Özellikle 2. Termokupolun basıncın en yüksek olduğu yere montajında titiz davranılmıştır. Mevcut silah ile ardışık olarak bir şarjör (10 adet) fişek atılmışı zaman tutularak yapılmıştır. Sağlıklı veriler alınincaya kadar

atışlı testlere devam edilmiş elde edilen sıcaklık değişkenleri her bir prob için Şekil 3.12’de verilmiştir. Orijinal namlu ile gerçekleştirilen deney şartları kompozit namluyla da aynı olacak şekilde testler gerçekleştirilmiş ve değerler de Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Atışlı testlerde orijinal namluda ölçülen zamana bağlı sıcaklıklar.



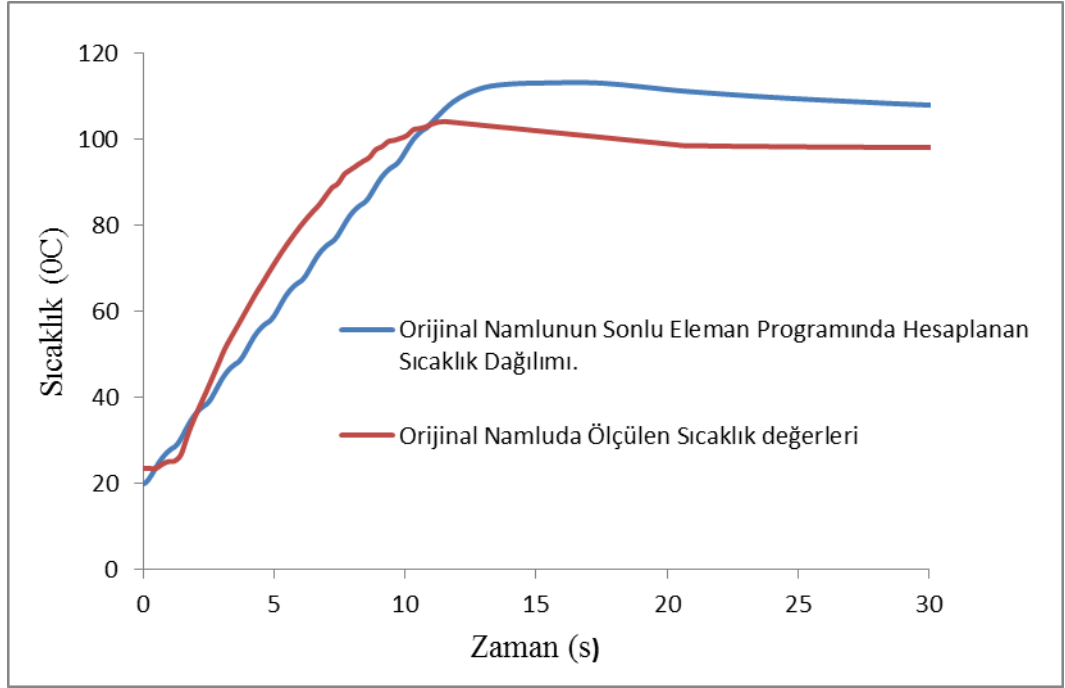
Şekil 3.13. Basıncın en yüksek olduğu yerde kompozit namluda ölçülen sıcaklığın zamana bağlı değişimi.

4. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE TARTIŞMA

Bu bölümde: (i) orijinal namlunun analitik, nümerik ve deneysel olarak, (ii) %60 yükü taşıyacak şekilde inceltilmiş çelik gömleğin nümerik olarak ve (iii) imal edilen kompozit namlunun nümerik ve deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Deney şartlarının mümkün olduğunca birbirlerine yakın olması için özen gösterilmiştir.

4.1. Orijinal Namlunun Termomekanik Analizi ile Deney Neticelerinin Karşılaştırılması

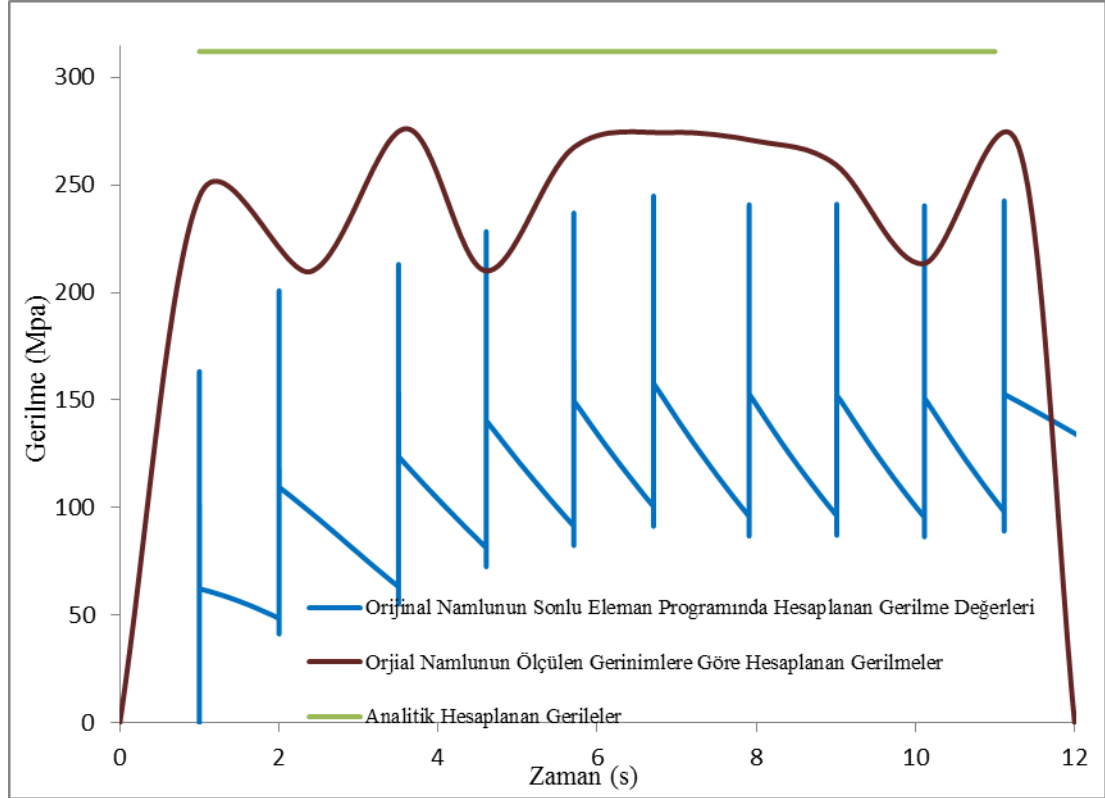
Abaqus paket programında gerçekleştirilen termal ve termomekanik analizlerde sıcaklık farkının çok az olduğu görülmüştür (Şekil 2.34 ve Şekil 2.39). Analizde her bir atış için atış üresi 1.34 ms., atışlar arası bekleme süresi ise Çizelge 2.7’de verildiği gibi tanımlanmıştır. Termomekanik analizde basıncın en yüksek olduğu dış yüzeydeki izleyici probun atışlara bağlı olarak sıcaklık değişimi Şekil 2.39’da verilmiştir. Orijinal namlu test aparatına bağlanarak (Şekil 3.4), Çizelge 2.7’de belirtilen bekleme sürelerinde yapılan atışlarda, sıcaklıklar termokupollar ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Analiz ve deneylerde 10 adet atış için işlemler yapılmıştır. Veriler Excel paket programına alınarak grafik haline getirilmiştir (Şekil.4.1). Veriler incelendiğinde deneysel verilerde ölçülen en yüksek sıcaklık 104.2 °C, nümerik çözümde hesaplanan en yüksek sıcaklık ise 113.2 °C olmuştur. Sonlu eleman programında elde edilen netice deneysel verilerin en yüksek değerinden %8.6 fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda sonlu eleman modelinin termal veriler için doğru model oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca termokupollarda algılama gecikmeleri olduğu da gözlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Orijinal namluda deneysel ve nümerik hesaplanan sıcaklık verilerin karşılaştırılması.

Abaqus paket programında namlunun içine ve dışına yerleştirilen problemler ile gerilmeler izlenebilmektedir (Şekil 2.34,36-39, Şekil 2.42,44,47 ve Şekil 2.49-53). Deneylerde namlu yüzeyine yapıştırılan gerinim pullarından ölçülen gerinim değerleriyle gerilmeler hesaplanabilmektedir (Şekil 3.5). Deneylerde alınan gerinim verilerinin oldukça geniş aralıklara dağıldığı görülmüştür. Veri aralığının en yoğun olduğu bölgedeki en büyük değerler örnek olarak alınarak değerlendirilmiştir. Bu gerinim değerleri kullanılarak düzlemsel gerilme durumu için servis gerilmesi hesaplanmıştır (Çizelge 3.1). Ayrıca analitik olarak hesaplanan dış çeperdeki servis gerilmesi grafik haline getirilmiştir (Şekil 2.20). Deneylerden alınan verilerle, nümerik ve analitik hesaplanan servis gerilmeleri Şekil 4.2’de aynı grafikte sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, analitik yöntemle hesaplama sonuçlarının deneysel verilerden % 24 fazla, nümerik hesaplama deneysel verilerden ortalama % 7 az olduğu görülmüştür. Bunun nedenlerinden biri nümerik çözümde yüklemelerin anlık olmasıdır. Analitik çözüm yönteminde ise basıncın quazistatik yükleme olmasıdır. Deney verilerindeki sapma ise deney esnasındaki bozucu etkenlerdir. Bu verilerden deneysel ve nümerik çözümlerin birbirine yakın çıktığı ve sonlu eleman

programında yapılan modelin mekanik analizde de doğru olarak kabul edilebileceği sonucunu vermiştir. Termomekanik analizlerde elde edilen sonuçların deney verilerine yakın olması belli yaklaşımlarla kompozit tasarımında da çelik gömlek tasarımı için doğru olacağını kabul edebiliriz.

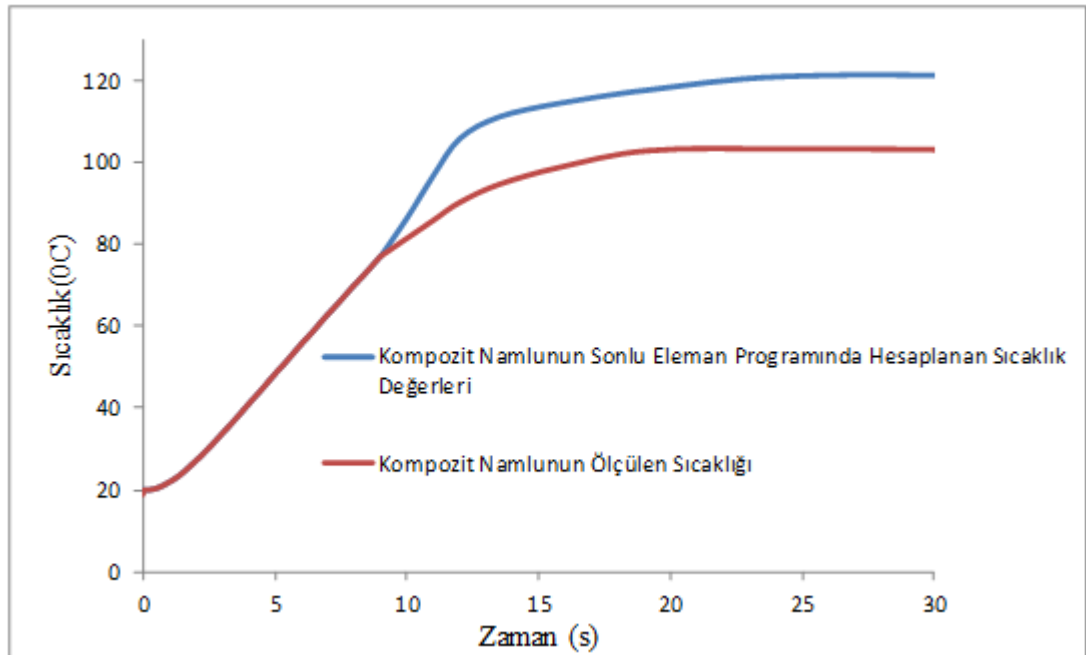


Şekil 4.2. Orijinal namluda basıncın en yüksek olduğu dış yüzeyindeki bir noktada analitik, nümerik ve sonlu eleman programında hesaplanan servis gerilmeleri.

4.2. Kompozit Namlunun Termomekanik Analizi ile Deney Neticelerinin Karşılaştırılması

Kompozit namlunun termomekanik analizinde de alınan sıcaklık verileri farkının çok Şekil 2.47 ve Şekil 2.52’de verilmiştir. Kompozit namlunun analizinde de her bir atış için atış süresi 1.34 ms. ve atışlar arası bekleme süresi ise Çizelge 2.7’deki veriler kullanılmıştır. Termomekanik analizde basıncın en yüksek olduğu dış yüzeydeki

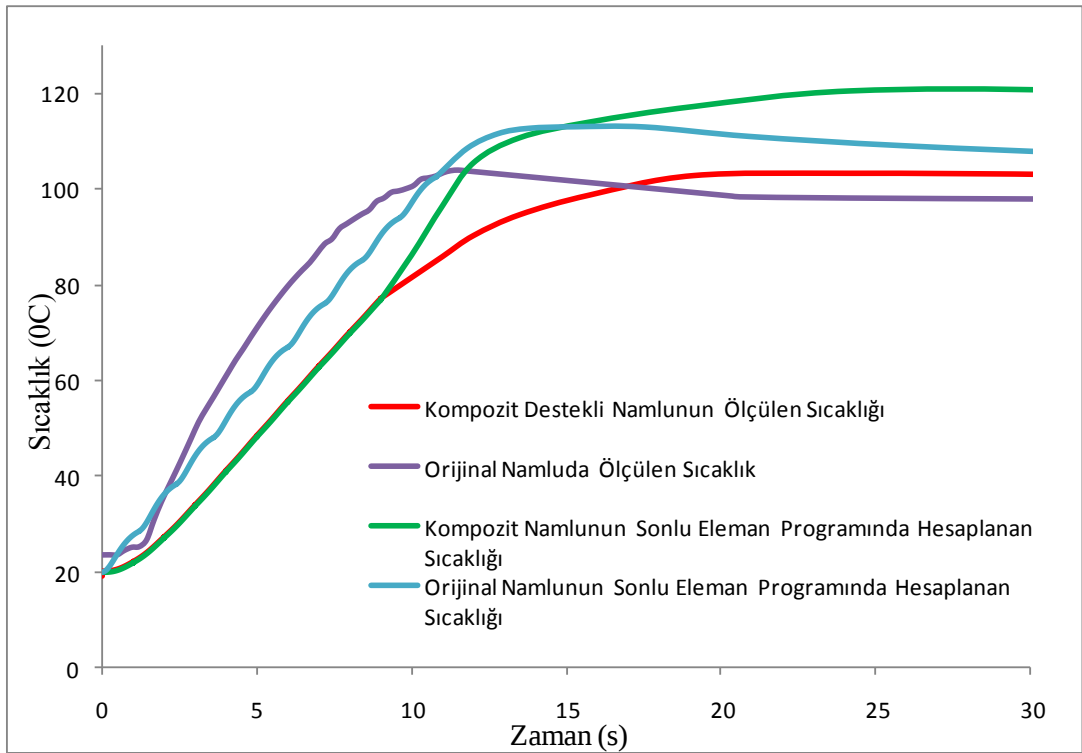
izleyici probun atışlara bağlı olarak sıcaklık değişimi Şekil 2.47.'de verilmiştir. Kompozit namlu test aparatına bağlanarak (Şekil 3.6.), Çizelge 2.7'deki bekleme şartlarını sağlayacak şekilde atışlı testler yapılmış ve sıcaklıklar termokupollar ile ölçülerek kaydedilmiştir. Analiz ve deneylerde 10 adet atış için işlemler yapılmıştır. Veriler Excel paket programına alınarak grafik haline getirilmiştir (Şekil.4.3). Veriler incelendiğinde deneysel verilerde ölçülen en yüksek sıcaklık 103.2°C , nümerik çözümde hesaplanan en yüksek sıcaklık ise 120.8°C olmuştur. Sonlu eleman programında elde edilen netice deneysel verilerin en yüksek değerinden %17 fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum için sonlu eleman modelinin termal veriler için doğru model oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca termokupollarda algılama gecikmeleri olduğu da gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Kompozit destekli namluda deneysel ve nümerik hesaplanan sıcaklık verilerin karşılaştırılması.

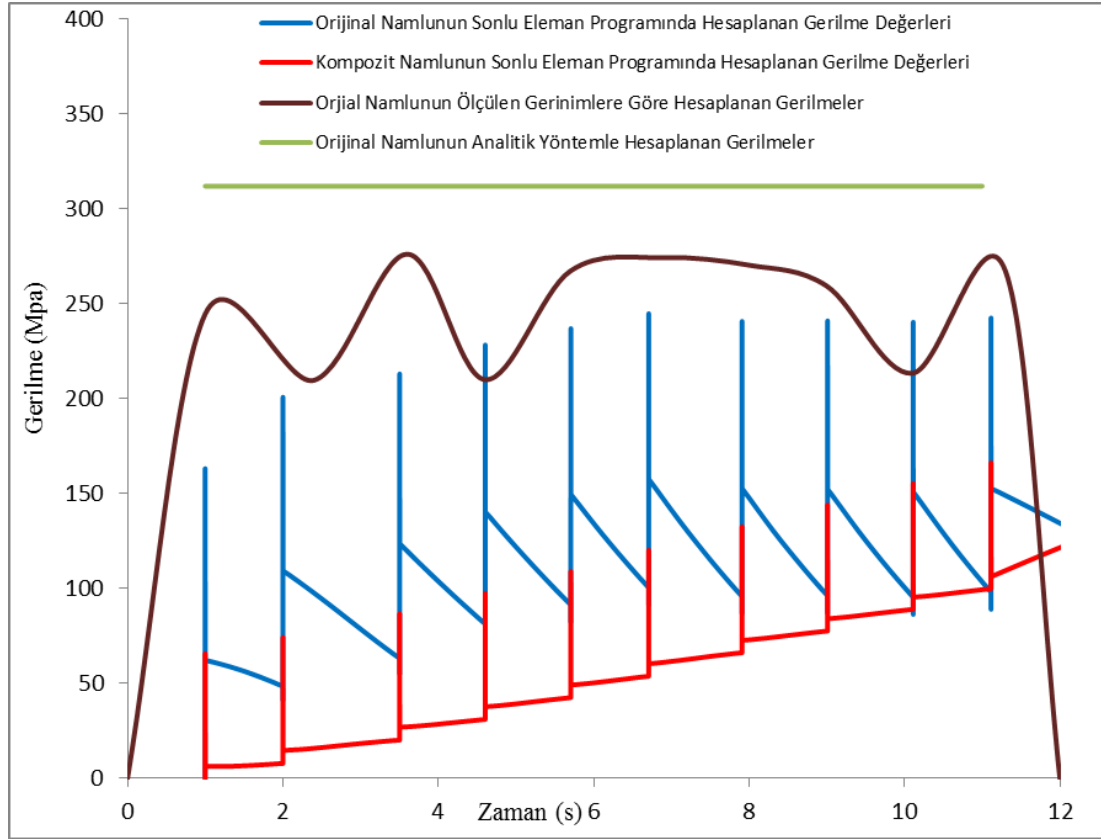
4.3. Orijinal ve Kompozit destekli Namlunun Termomekanik Analizi ile Deney Neticelerinin Karşılaştırılması

Yukarıdaki 4.2 ve 4.3 başlıklarında orijinal ve Kompozit destekli namluların termal ve mekanik analizleri anlatıldı. Karşılaştırmanın daha iyi yorumlanabilmesi için ölçülebilen ve analiz edilen termal ve gerilme değerleri karşılaştırılacaktır. Şekil 4.4’de orijinal ve Kompozit destekli namlularda ölçülen ve analiz edilen sıcaklıklar verilmiştir. Veriler incelendiğinde orijinal ve Kompozit destekli namlunun ölçülen sıcaklıklarının birbirlerine paralellik gösterdiği izlenmektedir. Diğer taraftan da hesaplanan değerlerde de paralellik görülmektedir. Orijinal namlunun hesaplanan ve ölçülen sıcaklıkları arasında en fazla %8.6 sapma olduğu saptanmıştır. Kompozit destekli namlunun hesaplanan ve ölçülen sıcaklıkları arasında en fazla %17 sapma olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4. Orijinal ve Kompozit destekli namluda deneysel ve nümerik hesaplanan sıcaklık verilerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.5.'de orijinal ve kompozit destekli namluda analiz edilen servis gerilmeleri verilmiştir. Veriler incelendiğinde orijinal namlunun hesaplanan gerilmeleri 160-245 MPa, kompozit namlunun ise 60-160 MPa aralığında olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Kompozit destekli ve orijinal namlularda basıncın en yüksek olduğu dış yüzeyindeki bir noktanın sonlu eleman programında hesaplanan servis gerilmeleri.

Deney verileri ile nümerik çözümdeki farklı neticelerin neden kaynaklandığı incelendiğinde birçok nedeni olabileceği olasılıklar dâhilindedir. J tipi termokupollardaki algılama gecikmeleri sapmaların en önemli nedeni olabileceği düşünülmektedir. Termokupolun sıcaklığı algılama süresi uzadıkça yüzeyde de soğuma olmaktadır. Bu da sıcaklığın ölçümünün düşük değer okunmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan termokupol namlu yüzeyine tam olarak yapıştırılamamaktadır. Bu da yüzeydeki sıcaklığı hissetme hassasiyetini düşürmektedir. Deneysel verilerden ölçülen gerinimlerden hesaplanan servis gerilmeleri ile nümerik çözümde elde edilen servis gerilmeleri arasında fazla fark olmadığı görülmüştür.

Sapma deney verilerindeki ölçüm belirsizlikleri ve nümerik çözümdeki kabullerden kaynaklanmaktadır. Analitik çözümün farklı olmasının nedenleri ise, yüklemeler yapılırken namlu 24 parçaya ayrılarak yapılmıştı, bu durum analitik çözümde belli bölgeye yoğunlaşmakta ve statik yük durumu söz konusu olmaktadır. Nümerik çözümde ise iterasyon yapmaktadır. Ayrıca anlık basınç yüklemeleri söz konusu olduğundan analitik çözümde bu anlık olaylar incelenememektedir. Deneylerde elde edilen verilerin ortalaması 256.3 MPa, nümerik çözümde elde edilen verilerin ortalaması 236.7 MPa ve analitik yöntemle elde edilen veri ise 359.7 MPa'dır. Deney verilerinin ortalamasına göre nümerik verilerin sapması -%8, deney verilerinin ortalamasının göre analitik çözümün sapması ise %28'dir.

4.4. Orijinal ve Kompozit Namlunun Geometrik Karşılaştırılması

Orijinal namlu kompozit uygulama yapılabilmesi için inceltilmiş durumu Şekil 4.6'da kompozit hali ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Analizlere, imalat tekniklerine ve konstrüktif kısıtlamalara göre namlunun hangi bölgelerinden talaş alınacağı tespit edilmiştir. Kompozit uygulaması yapılacak namlu tartıldığında 1808 gr olarak tartılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre kompozit namlu ağırlığı 1230 gr olması gerekirken, imalatı yapılan namlu 1186 gr olmuştur. Aradaki fark imalat toleransları ve kompozit malzemenin hesaplanan ve gerçekleşen yoğunluk farklarından kaynaklanmaktadır. Kompozit malzeme kullanılarak imal edilen namlu, orijinal durumundan % 34 daha hafif olduğu ölçülmüştür.



Şekil 4.6. Kompozit uygulanacak namlu.



Şekil 4.7. Kompozit uygulaması yapılmış namlu.

Çizelge 4.1. Namlunun kompozit uygulanarak hafifletme oranı.

	Kütleler (gr)				
	Namlu ucu	Düz Kısım	Konik Kısım	Düz Kısım	Toplam
Çelik Namlu Kütlesi	142.8	1089.3	209.6	366.2	1808
Kompozit Uygulama İçin Hafifletilmiş Çelik Namlu Kütlesi	129.6	470.4	122.3	366.2	1088.5
Kütle kazanç miktarı		619	87.3		706.3
Kaplanacak Kompozit Kütlesi		124	17.5		141.5
Kompozit Uygulanmış Namlu Kütlesi	129.6	594.4	139.8	366.2	1230
İmal Edilen Kompozit Namlu Kütlesi					1186
Kazanç (gr)					622
Kazanç Hesaplanan(%)					32
Kazanç Gerçek(%)					34

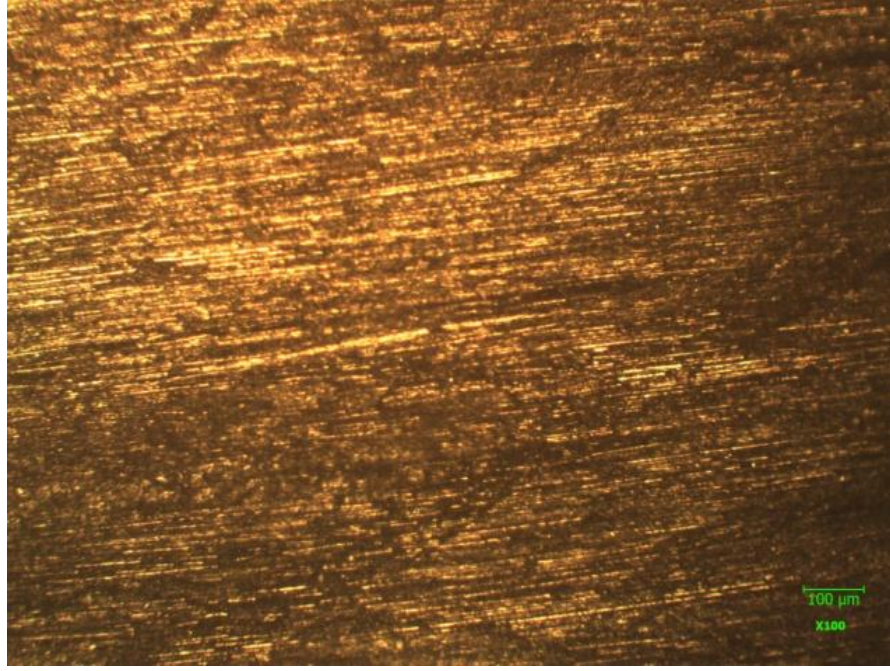
4.5. Orijinal ve Kompozit Destekli Namluların Doğal Frekanslarının Karşılaştırılması

Orijinal, inceltirilmiş et kalınlıklı ve kompozit destekli namluların doğal frekansları ilk 10 mod için Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Kompozit destekli namlunun doğal frekans modlarının orijinal namludan yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum atış hassasiyeti yönünden kompozit destekli namlunun daha hassas atış yapacağı sonucunu da ortaya çıkarmaktadır. Nihayet 800 m. atışlı testlerde orijinal namluyla yaklaşık 18 cm dağılım gerçekleşirken, kompozit destekli namlunun ise yaklaşık 15 cm dağılım gerçekleştiği atışlı testlerle tespit edilmiştir.

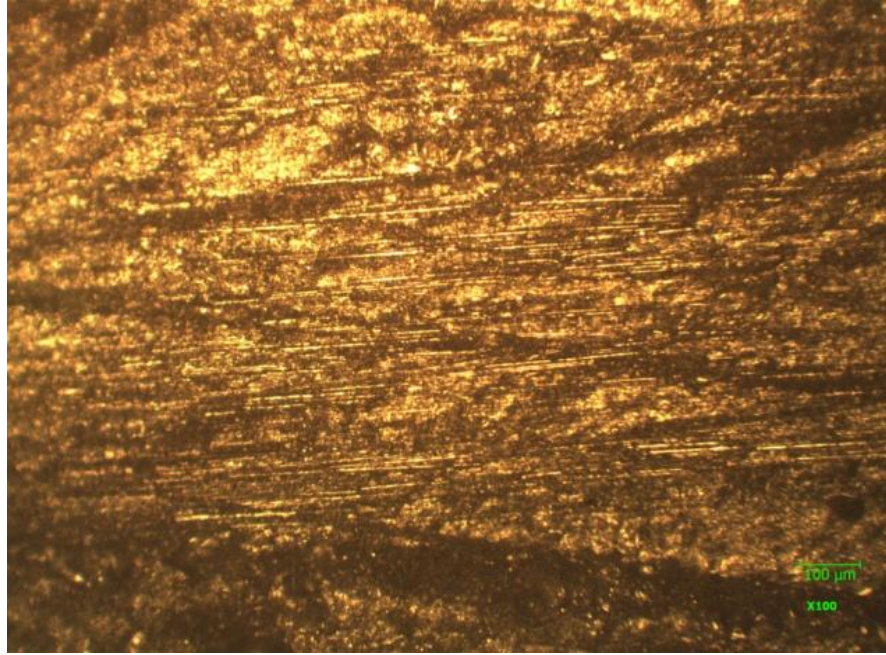
Çizelge 4.2. Doğal frekansların mukayesesi.

Frekans Modları	İnceltirilmiş et kalınlıklı namlu Frekans (Çevrim/Zaman)	Orijinal namlu Frekans (Çevrim/Zaman)	Kompozit destekli namlu Frekans (Çevrim/Zaman)
1	35.3	52.7	56.2
2	238.2	315.8	358.2
3	674.9	844.8	978.6
4	1296.9	1585.2	1824.2
5	2048.8	2318.3	2739.0
6	2160.8	2536.0	2848.1
7	2891.9	3699.9	4061.1
8	3879.9	5061.2	5477.0
9	5067.4	6589.6	7081.1
10	6439.6	6885.1	8179.2

Kompozit destekli üretilen namlunun atışlı testlerden sonra 100 büyütme cihazla çekilen görüntüleri Şekil 4.8.'de verilmiştir.



(a)

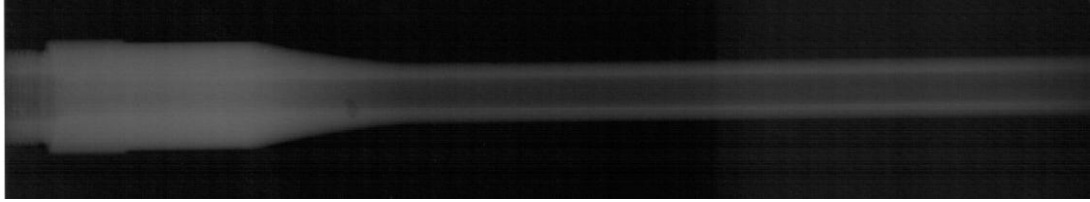


(b)

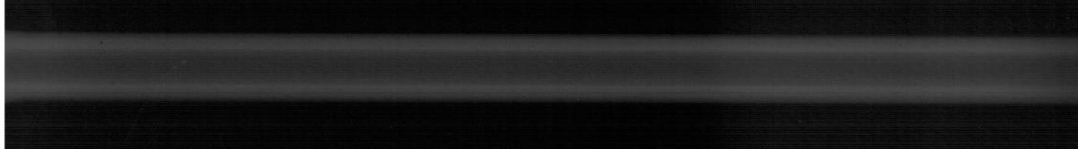
Şekil 4.8. Kompozit destekli namlunun 100 büyütmeli görünüşü.

4.6. Kompozit Destekli Namluların İncelenmesi

Kompozit destekli üretilen namlunun atışlı testlerden önce X ray cihazı ile çekilen röntgen görüntüleri Şekil 3.12. (a) ve (b)'de verilmiştir. Ardından da 1.000 atış yapıldıktan sonra X ray cihazı ile çekilen röntgen görüntüleri Şekil 2.13. (a) ve (b)'de verilmiştir. X Ray cihazı General Electric marka ve 1959 modeldir. Görüntüler Radyografi R2 sertifikalı uzman tarafından yapılan incelemelerde namluda süreksizlik görülmemiştir.

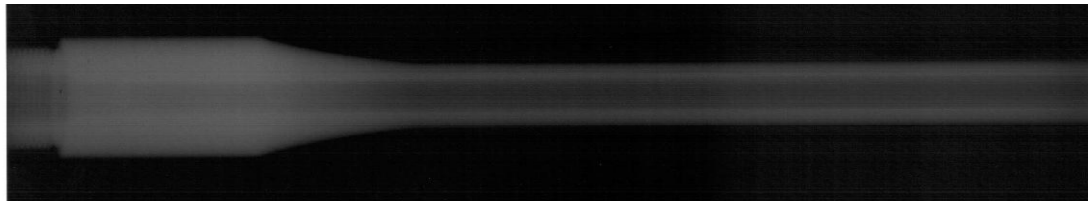


(a)

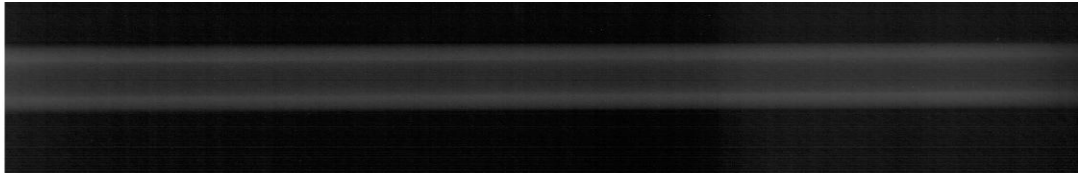


(b)

Şekil 4.9. Kompozit destekli namlunun atışlardan önceki X ray görüntüsü.



(a)



(b)

Şekil 4.10. Kompozit destekli namlunun atışlardan sonraki X ray görüntüsü.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek iç basınç ve sıcaklığa maruz kalan 7.62 mm kalibreli hafif silahlarda namluların kompozit destekli olarak tasarlanması, üretim yöntemlerinin belirlenerek prototip üretimin gerçekleştirilmesi neticesinde, amaca uygun kompozit destekli namlu üretim yeteneği kazanılmıştır.

Yapılan çalışmanın ilk aşamasında literatür araştırması ve hafifletilmesi hedeflenen mevcut namlunun teknik bilgi paketi ayrıntılı incelenmiştir. Namlulu silahların iç balistik modelleri teorik olarak incelenmiş ve özellikle ardışık atışlarda namlunun yüksek sıcaklıklarda ısınma durumunun hesaplanabilmesi için sevk barutunun ısı taşınım katsayısı ideal gaz karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Namlu içindeki gaz basınç dağılımı ise Vallier Heydenreich yöntemine göre hesaplanarak modellenmiştir. Hesaplanan ısı taşınım katsayısı ve basınç dağılımına göre namlunun ardışık ve tek atış durumları için termal ve gerilme durumları ABAQUS® SEM paket programında hesaplanmıştır. Tek atış durumu için namlunun ısınma ve gerilme durumu analitik olarak da hesaplanmıştır. Namlunun ısınma durumunda analitik olarak elde edilen fonksiyon MATLAB® programında çözülmüştür. Orijinal namlu üzerine bağlanan termokupol ve gerinim ölçer pullar yardımı ile ardışık atış durumu için sıcaklık ve gerinim değerleri ölçülmüştür. Nümerik yöntemle elde edilen veriler ile deneysel veriler karşılaştırılarak modelin doğruluğu teyit edilmiştir. Deneyler ve hesaplanan değerlerden kullanılacak kompozit malzeme seçimi yapılmıştır. Kompozit malzeme kullanılarak üretilecek namlunun çelik iç gömleğinin et kalınlığının %60 yük taşıma durumu için boyutlandırma sonlu eleman programında yapılmıştır. 6.9 mm et kalınlıklı mevcut namlu, hesaplanan 3.6 mm et kalınlığına talaşlı üretim yöntemi inceltiştir. % 60 yük taşıma şartı için, basıncı azaltılmış fişeklerle test atışları yapılarak çelik gömleğin emniyetli olduğu teyit edilmiştir. İnceltirilmiş et kalınlıklı çelik gömleğe hesaplanan aç ve katman kalınlıklarında kompozit uygulaması yapılmıştır. Üretilen kompozit namluyla test atışları gerçekleştirilerek namlu yüzeyi üzerinden sıcaklık verileri alınmıştır. Sonlu eleman programında kompozit namlunun simülasyonu gerçekleştirilerek, kompozit namlunun deney ve sonlu eleman verileri karşılaştırılmıştır.

Kullanılan orijinal namlunun, inceltirilmiş et kalınlıklı namlunun ve kompozit destekli namlunun ABAQUS SEM programında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modellemede dikkat çeken en önemli noktalar; sevk barutu yanma gazlarının ısı taşınım katsayısı ve basınç değişiminin uygun şekilde modellendiği, kompozit katmanın eleman koordinat sisteminin uygun şekilde yönlendirilmiş olmasıdır. Bu sayede orijinal ve kompozit namluların deney ve hesaplanan veriler birbirine yakın çıkmıştır. Gerçekleştirilen bu model ile farklı çaptaki namlulara da uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

Orijinal ve kompozit malzeme kullanılarak üretilen namluların analitik, nümerik ve deneysel sonuçları karşılaştırıldığında özellikle nümerik ve deneysel sonuçların birbirini yakınsadığı grlmştir.

Kompozit destekli namlu tasarımında kompozit katman düzeni ($90/\pm 45/90$) ile yapılan analizler neticesinde bulunan maksimum dayanım basıncının mevcut et kalınlığı değerinde namluya tesir eden %40 yükü taşıyabildiği grlmştir.

Titreşim analizinden kompozit destekli namlunun daha kararlı olduğu belirlenmiş olup, bunun pratiğe yansıması 800 m dağılım atışlarında orijinal namluya göre daha fazla hassasiyet elde edilebilmesi olmuştur.

İmalatı gerçekleştirilen kompozit destekli namlu ile orijinal namlunun deney ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında modellemenin %83 yaklaşıklıkla doğru olduğu grlmştir. 1808 gr olan tamamı elik namluyla aynı çalışma şartlarında ve en az orijinal namlu performansını gösterdiği test atışları ile teyit edilen 1186 gr olan kompozit namlu %34 daha hafif imal edilebilmiştir.

KAYNAKLAR

- (1) Agarwall, B.D., Broutman L.J., Analysis and Performance of Fiber Composites., John Wiley & Sons, New York 1980.
- (2) Ronald F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- (3) Mallick, P. K. ,Fiber –Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Marcel Dekker Inc. , NY and Basel, 1988
- (4) Mark, E. Tuttle, Structural Analysis of polymeric composite Materails, Marcel Dekker, 2003
- (5) Kalaycıoğlu, B., Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Basınç Tankı Tasarımı, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2010
- (6) Tarakçıoğlu, N., Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız Filaman Sarma Cam-Epoksi Borularda Sarım Açısının Malzeme Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1992
- (7) Demirsöz, R., Asansör Kılavuz Rayların Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,2005
- (8) Can, Ö., Kaya, A.Örneklerle Abaqus’a Giriş, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2007
- (9). Önder, A., First Failure Pressure of Composite Pressure Vessels, M.Sc. Thesis, Dokuz Eylül University, February 2007.
- (10). Balya, B., Design and Analysis of Filament Wound Composite Tubes, M. Sc. Thesis, METU, December 2004.

- (11). Rhee, K.Y., Oh, H.S., and Jang, S.H., Delamination Characteristics of Multi-Directional Carbon Fiber/Epoxy Composites Under High Pressure, *Polymer Composites*, V22, N6, p793-802, 2001.
- (12). Littlefield, Hyland, A., Andalora E., Klein, A., Langone, N.R., and Becker, R., Carbon Fiber/Thermoplastic Overwrapped Gun Tube, *Materials and Manufacturing Processes*, V21, p573-578, 2006.
- (13). Underwood, J.H., Vigilante, G.N., and Mulligan, C.P., Review of Thermo-Mechanical Cracking and Wear Mechanisms in Large Caliber Guns, *Wear*, V263, p1616-1621, 2007.
- (14). Chen, T.C., Liu, C.C., Jang, H.Y., and Tuan, P.C., Inverse Estimation of Heat Flux and Temperature in Multi-Layer Gun Barrels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, V50, p2060-2068, 2007.
- (15). Katz, R.N., Bracamonte, L.A., Withers, J.C., and Chaudhury, S., Hybrid Ceramic Matrix/Metal Matrix Composite Gun Barrels, *Materials and Manufacturing Processes*, V21, p579-583, 2006.
- (16). Emerson, R., Carter, R., and Tzeng, J., Press-Fit Sheating for Ceramic Gun Liners, *Materials and Manufacturing Processes*, V21, p597-601, 2006.
- (17). Grujicic, R., Delong, J.R., and Derosset, W.S., Reliability Analysis of Hybrid Ceramic/Steel Gun Barrels, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, V26, p405-420, 2003.
- (18). Chen, H.W., Sun, H.K., and Liu, T.C., Autofrettage Analysis of a Fibre-Reinforced Composite Tube Structure Incorporated with a SMA, *Composite Structures*, Doi 2008.11.0.005.
- (19). Zhou, J., Deng, Z., Liu, T., and Hou, X., Elastic Structural Response of Prismatic Metal Sandwich Tubes to Internal Moving Pressure Loading, *Int. J. Solids and Structures*, 2009.01.017.

- (20) Kam, T. Y., Liu, Y. W. & Lee, E. T., "First-ply failure strength of laminated composite pressure vessels" *Composite Structures* Vol. 38, No. 1-4, pp. 65-70, 1997
- (21) Lifshitz, J. M., Dayan, H., "Filament-wound pressure vessel with thick metal liner" *Composite Structures*, 32 (1995) 313–323
- (22) Hisao Fukunaga and Masuji Uemura, "Optimum Design of Helically Wound Composite Pressure Vessels" *Composite Structures* 1 (1983) 31-49
- (23) Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure, *Composite Structures* 53 (2001) 483-491
- (24) Chang, R.R., Experimental and theoretical analyses of first-ply failure of laminated composite pressure vessels, *Composite Structures* 49 (2000) 237-243
- (25) Velosa, J. C., Nunes, J. P., Antunes, P. J., Silva, J. F., Marques, A. T., Development of a New Generation of Filament Wound Composite Pressure Cylinders, *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Vol.19, 1/2, 2007
- (26) Antunes, P. J., Dias, G. R., Nunes, J. P. and F. Van Hattum, W. J., Finite Element modeling of Thermoplastic Matrix Composite Gas Cylinders *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 21, 411, 2008
- (27) Roy, A. K. and Tsai, S. W., Design of Thick Composite Cylinders, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 110, 255-62, (1988).
- (28) Sayman, O. Analysis of multi-layered composite cylinders under hygrothermal loading. *Composites: Part A*, 36, 923-33, (2005).
- (29) Kamat, S., Su, X., Forsyth, B.S., Keddy, C., Chamis, C., Flament Winding Simulation of a Composite Overwrapped Pressure Vessel, *SAMPE Sempozyum* 2001

- (30) Akçay, I. H., Kaynak, I., Analysis of Multilayered Composite Cylinders under Thermal Loading, J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 24, No. 11, 2005
- (31) Bakaiyan, H., Hosseini, H., Ameri, E., Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Combined Internal Pressure and Thermo mechanical Loading with Thermal Variation, Composite Structures, 88, 532-541, 2008
- (32) Gemia, L., Tarakçioğlu, N., Akdemir, A. ve Şahin, Ö. S., Progressive Fatigue Failure Behavior Of Glass/Epoxy (± 75)₂ Filament-Wound Pipes Under Pure Internal Pressure, Materials & Design, Vol. 30, 4293-4298, 2009
- (33) Choi, J.C., Jung, S.Y., ve Kim, C., Development Of An Automated Design System Of A CNG Composite Vessel Using A Steel Liner Manufactured Using The DDI Process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 24, 781-788, 2004
- (34) Pavlovski, D., Mislavsky, B. ve Antonov, A., CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, Reinforced Plastics, Sayfa: 36-38, 2007.
- (35) Cherevatsky, S., Cherevatsky, A., Dayan, H. ve Stepanov, A., New Design of Composite/Metal Gas Storage Vessels and Propellant Tanks, AIAA 2004-3508.
- (36) Djehiche B., Eddahbi M., Sun X.-K., Du S.-Y. ve Wang G.-D., Bursting problem of filament wound composite pressure vessels, The International Journal of Pressure Vessels and Piping, Cilt: 76, No:1, Sayfa: 55-59(5) 1999.
- (37) Walter H. Tam, Paul S. Griffin ve Arthur C. Jackson, Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Pressurant Tank Assembly, AIAA 2002-4349.
- (38) Walter H. Tarn, Ian A. Ballinger, Jerry Kuo, William D. Lay, Stephen F. McCleskey, Pedro Morales, Zachary R. Taylor ve Sheldon J. Epstein, "Design

and Manufacture of a Composite Overwrapped Xenon Conical Pressure Vessel, AIAA 96-2752.

(39) Parnas L. ve Katirci N., Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions, Composite Structures, 58, 1, Sayfa: 83-95, 2002.

(40). Emerson, R., Carter, R., and Tzeng, J., Press-Fit Sheating for Ceramic Gun Liners, Materials and Manufacturing Processes, V21, p597-601, 2006.

(41) Farrar, C.L., and Leeming, D.W., Military Ballistics A Basic Manual, Royal Military College of Science, Shrivenham , UK, 1-68,(1983)

(42) Handbook on Weaponry, 2nd Edition, Rheinmetall, 5-450, (1982)

(43) Krier and Summerfileld, Interior Ballistics of Gun, American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 140-210, (1979)

(44) Leeming, D.W., Ballistics Group, Royal Military College of Science, Shrivenham, UK, 1-95, (1996)

(45) Değirmenci, E., Namlulu Silahların İç Balistiğine; Termodinamik, Termokimyasal ve Hareket Denklemlerinin Uygulanması ve Sonuçların Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005

(46).Özışık, M.N., Heat Conductin, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition New York, 1992

(47).Arpacı, V.S., Conductin Heat Transfer, Addison-Wesley Publishing Co. California, 1966

(48) Çengel, Y. A., Heat Transfer: A Practical Approach , 2nd ed., McGraw-Hill, 2003. ISBN 0072458933 (Last update: May 2005)

(49). Bakioğlu, M., Cisimlerin Mukavemeti, Beta Yayınları, İstanbul (2001)

(50) Guerrero, M.A., Betegon, C., Belzunce, J., Fracture Analysis Of A Pressure Vessel Made Of High Strength Steel, (HSS) Engineering Failure Analysis Cilt:15, Sayfa:208–219, 2008.

(49) Ronald, F.G., Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

(51) Tsai, S.W., Composite Design, Think Composites, USA, 1987)

EKLER

EK-1 Transdantal Denklemin 22 terim için kökleri

```
%%% “Transdantal denklem”
clear;
b(20000)=0;
i=0;
for a=1:1:20000
    i=i+1;
    b(i)=(besselj(0,.011*a)-besselj(0,.0039*a))...
    *(a*bessely(1,.0039*a)+a*bessely(1,.011*a)+250*bessely(0,.0039*a)-
    .5*bessely(0,.011*a))...
    +(bessely(0,.0039*a)-bessely(0,.011*a))...
    *(a*besselj(1,.0039*a)+a*besselj(1,.011*a)+250*besselj(0,.0039*a)-
    .5*besselj(0,.011*a));
end
```

EK-2 Transandantal Denklemin 22 terim için çözümü

%%%22 değer için genel çözüm''

clear;

b(20000)=0;

i=0;

for a=1:1:20000

 i=i+1;

 b(i)=(besselj(0,.011*a)-besselj(0,.0039*a))...

 *(a*bessely(1,.0039*a)+a*bessely(1,.011*a)+250*bessely(0,.0039*a)-

 .5*bessely(0,.011*a))...

 +(bessely(0,.0039*a)-bessely(0,.011*a))...

 *(a*besselj(1,.0039*a)+a*besselj(1,.011*a)+250*besselj(0,.0039*a)-

 .5*besselj(0,.011*a));

end

plot(b);

c(1)=430;

c(2)=880;

c(3)=1325;

c(4)=1760;

c(5)=2208;

c(6)=2655;

c(7)=3092;

c(8)=3545;

c(9)=3975;

c(10)=4430;

c(11)=4860;

c(12)=5315;

c(13)=5744;

c(14)=6205;

c(15)=6630;

c(16)=7090;

c(17)=7510;

c(18)=7975;

c(19)=8395;

c(20)=8860;

c(21)=9280;

c(22)=9748;

i=0;

t=zeros(201,72);

for t1=0:.1:20

 i=i+1;

 j=0;

```

for r=.0039:.0001:.011
j=j+1;
for n=1:22
t(i,j)=t(i,j)+exp(-c(n)*c(n)*.001093*t1)...
*(-
(besselj(0,c(n)*r)*(c(n)*bessely(1,.0039*c(n))+250*bessely(0,.0039*c(n))+c(n)*bes
sely(1,.011*c(n))-.25*bessely(0,.011*c(n))))...
+(bessely(0,c(n)*r)*(c(n)*besselj(1,.0039*c(n))+250*besselj(0,.0039*c(n))+c(n)*bes
selj(1,.011*c(n))-.25*besselj(0,.011*c(n)))));

end
end
end

```

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Erzurum’da doğdu. 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı, 1993 yılında ise Türk Silahlı Kuvvetlerine katıldı. 1997’de lisans eğitiminden mezun olarak makine mühendisi unvanını aldı. 1997-2005 yıllarına kadar 3 ncü Ana Bakım Merkezi Komutanlığı’nda çeşitli birimlerde görev aldı. Halen Kırıkkale ilinde M.S.B. Kalite Güvence ve Ekip Müdürü olarak görev yapmaktadır. Evli ve üç çocuk babasıdır.