

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**KOMPOZİT MALZEME İLE DESTEKLENEREK HAFİFLETİLMİŞ,
EKSENEL KONUMA GÖRE DEĞİŞKEN İÇ YÜKLERE DAYANIKLI
ÇELİK BORU TASARIMI**

Onur GÜNGÖR

EYLÜL 2016

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Onur GÜNGÖR tarafından hazırlanan “KOMPOZİT MALZEME İLE DESTEKLENEREK HAFİFLETİLMİŞ, EKSENEL KONUMA GÖRE DEĞİŞKEN İÇ YÜKLERE DAYANIKLI ÇELİK BORU TASARIMI” adlı Doktora Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı Başkanı

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

Prof. Dr. Veli ÇELİK
Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Nizami AKTÜRK _____

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Veli ÇELİK _____

Üye : Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU _____

Üye : Y. Doç. Dr. Barış KALAYCIOĞLU _____

Üye : Y. Doç. Dr. M. Fatih ÖKTEM _____

...../...../.....

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

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

ÖZET

KOMPOZİT MALZEME İLE DESTEKLENEREK HAFİFLETİLMİŞ, EKSENEL KONUMA GÖRE DEĞİŞKEN İÇ YÜKLERE DAYANIKLI ÇELİK BORU TASARIMI

GÜNGÖR, Onur

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi

Danışman: Prof. Dr. Veli ÇELİK

Eylül 2016, 193 sayfa

Silah Sistemlerinin hafifletilerek lojistik açıdan taşınabilirliğinin kolaylaştırılması ile savaş alanında üstünlük sağlanması yakın tarihimizde önem kazanan bir konudur. Genel manada Namlu, mühimmata ilk enerjinin ve dönünün, barut ve yiv-set ile kazandırıldığı silah sistemlerinin en önemli unsurudur. Günümüz malzeme ve tasarım teknolojilerindeki gelişmeler namludan daha uzun ömür, daha yüksek basınçlara dayanma, gelişmiş ısı transferi özellikleri ile beraber hafifletme taleplerini gerçekleştirilebilir birer hedef olarak görmeyi mümkün kılmaktadır.

Bu Doktora çalışmasının temel hedefi; 105 mm çapta ve mevcut askeri şartnamelere uygun performansta görev ifa edebilecek Karbon elyaf – Epoksi – Çelik Hibrit kompozit malzemeli daha hafif bir obüs namlunun tasarlanmasıdır.

Çalışma üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; namlu kesitinin çelik kısmı üzerinde yük taşıma kapasitesinin artırılması amacıyla uygulanan otofretaj kalıntı gerilme oluşturma işleminin detaylı incelenmesi, analitik ve nümerik otofretaj eniyilemesinin gerçekleştirilmesi ve deneysel ölçümlerle doğrulanması şeklindedir.

İkinci bölümde; namlu kesitinin çelik kısmının nihai cidar kalınlığının en aza indirilebilmesi için analitik ve nümerik topoloji eniyilemelerinin yapılması şeklindedir. Belirlenen cidar kalınlığı değerleri için namlu iç balistiğine uygun dinamik bir nümerik model oluşturulmuştur.

Üçüncü ve son bölümde; namlu kesitinin Karbon-Epoksi kısmının entegrasyonu çalışmaları hem nümerik hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Hibrit kompozit malzemeli namlu taslağının hali hazırda kullanılmakta olan tümü çelik namluya göre aynı performans koşullarında %22.7 hafifleme sağladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kompozit destekli namlu, otofretaj, kalıntı gerilme, hafifletme eniyilemesi.

ABSTRACT

DESIGN OF REDUCED WEIGHT STEEL PIPE SUPPORTED BY A COMPOSITE MATERIAL RESISTANT TO INTERNAL LOADS VARYING BY AXIAL POSITION

GÜNGÖR, Onur

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Ph.D. Dissertation

Supervisor: Prof. Dr. Veli ÇELİK

September 2016, 193 pages

Developing lightweight weapons has been becoming one of the complementary issue to meet logistics needs in order to outmaneuver in a war zone in recent history. The ammunition is energized and spin by the propellant and sets-grooves in the gun barrel which is the most important element of the gun system. Today's technological improvements allows the targets of longer barrel life, upgraded operating and design pressures for gun systems, ammunitions and gun barrels to reach extended ranges, improved heat transfer specifications and lighter weight gun systems to be realized.

The main aim of the study is to design a 105 mm reduced weight howitzer gun barrel with a carbon fiber – epoxy hybrid composite material and steel is able to serve according to pertinent military technical specification.

The study contains three individual sections.

First section contains detailed research of applied autofrettage on the tube in order to maximize the load carrying capacity of the steel cross section, implementation the optimization of autofrettage analytically and numerically and verification by using experimental results.

Second section contains realization the analytical and numerical topology optimizations in order to minimize the final wall thickness of the steel part of the gun barrel cross section. For evaluation of the determined wall thickness values, a dynamical numerical model has been constructed.

The third and last section contains the carbon – epoxy part of the gun barrel section integration efforts has been actualized numerically and experimentally.

Weight of the gun barrel template with hybrid composite material compared to original whole steel gun barrel template could be reduced %22.7 under the same performance conditions.

Keywords: Composite wrapped gun barrel, autofrettage, residual stress, weight optimization.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her safhasında, her konuda desteğini esirgemeyen ve önümü açan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Veli ÇELİK'e,

Çalışanı olduğum kurumum Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu'nda görevli Mühimmat Fabrikası Müdürlüğü'nden Sayın Sait ALTINTAŐ ve Sayın Çağatay ÖNCEL'e,

İşyerindeki yoğun iş temposunun yanı sıra, evde gerçekteştirdiğim ek çalışmalarımnda beni motive eden, sabır ve sevgileri ile bana destek olan sevgili kızım Yağmur, eşim İnci, annem Nefize ve babam Hasan GÜNGÖR'e

Projeyi (0504.STZ.2013-2 – “Ağır Silah Sistemlerinde Kompozit Destekli Namlu ve Geri Tepme Mekanizmasının Geliştirilmesi”) desteklenmeye layık bularak bu teknolojinin ölkemizde ağır silah namlularında uygulanmasının ve bu konuda birikimlerin oluşmasının yolunu açan Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve projede katkısı bulunan çalışan, danışman ve San-Tez komisyon üyelerine minnettarlıklarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	13
2.1. BİRİNCİ BÖLÜM: Otofretaj Eniyilemesi	14
2.2. İKİNCİ BÖLÜM: Analitik Tam Ağırlık ve Nümerik Ağırlık Topoloji Eniyilemesi	63
2.3. ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: Kompozit Destek Uygulaması	79
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	93
3.1. BİRİNCİ BÖLÜM: Otofretaj Eniyilemesi	93
3.2. İKİNCİ BÖLÜM: Analitik Tam Ağırlık ve Nümerik Ağırlık Topoloji Eniyilemesi	109
3.3. ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: Kompozit Destek Uygulaması	135
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	140
4.1. SONUÇLAR	140
4.2. ÖNERİLER.....	145
KAYNAKLAR	146
EKLER	152
ÖZGEÇMİŞ	178

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Şahi Topu.....	1
1.2. Kompozit malzeme ile desteklenmiş bir namlu [2].	3
2.1. Hidrolik otofretaj şeması, Açık ve Kapalı Uç [3].	15
2.2. Mandrel şekli [3].	16
2.3. Mekanik otofretaj uygulama şekilleri [3].	17
2.4. Elastik-Doğrusal Plastik Malzeme Modeli Gerilme-Gerinim Eğrisi.	18
2.5. İkili Doğrusal (<i>İng.</i> bilinear) Kinematik Pekleşme Modeli Gerilme-Gerinim Eğrisi.	19
2.6. Tek Yönde Çekme Deneyi Gerilme-Gerinim Eğrisi.	20
2.7. Polar koordinatlarda silindirik birim eleman.	21
2.8. Birim eleman gerilme durumu.	22
2.9. Noktaların yerdeğiştirmesi.	23
2.10. Silindire yük uygulanması.	25
2.11. Otofretaj esnasında mandrel ve silindir.	27
2.12. Otofretaj ve çelik namlu taslağı gösterimi.	39
2.13. Otofretaj taslağı bölümleri.	39
2.14. Otofretaj işleminin şematik gösterimi.	41
2.15. Namlu çeliğı tek ekseninde çekme deneyi sonuç eğrileri.	43
2.16. Namlu Malzemesi Numune 2'nin Mühendislik ve Gerçek gerinim- gerilme eğrileri.	43
2.17. Farklı % arakesit oranları için ölçülendirilmiş ¼ kesit nümerik model..	45
2.18. Otofretaj eniyilemesi için nümerik hesaplama modeli ağ yapısı.	46
2.19. Veri toplama için algılayıcı yerleştirilmesi.	47
2.20. Namlu çeliğı temini.	48
2.21. Namlu otofretaj taslağı dövme işleminin sonrası görüntüsü.	49
2.22. Dövme işleminin sonrası iç deliğı delinmiş ve dış ölçüleri ısı işlem için hazırlanmış namlu otofretaj taslağı.	49
2.23. Isıl işlem öncesi namlu otofretaj taslağı yandan görüntüsü.	50
2.24. Üç kademeli işlenmiş hâlihazırda kullanılan namlu otofretaj taslağı ölçüleri.	50

2.25. Proje kapsamında belirlenmiş tek kademeli namlu otofretaj taslağı ölçüleri.	51
2.26. Otofretaj tezgâhına bağlantı yerleri işlenmiş ve diğer ölçülerine işlenecek namlu otofretaj taslağı.	51
2.27. Otofretaj tezgâhına bağlantı yerleri ve diğer ölçülerine işlenerek otofretaj işlemine hazırlanmış otofretaj taslağı (Namlu ağız tarafı).	52
2.28. Otofretaj tezgâhına bağlantı yerleri ve diğer ölçülerine işlenerek otofretaj işlemine hazırlanmış otofretaj taslağı (Hazne-Tezgâha bağlantı tarafı).	52
2.29. Mekanik otofretaj tezgâhı genel görüntüsü (Solda) ve namlu otofretaj taslağı tezgâh bağlantı mekanizması (Sağda).....	53
2.30. Yağ kalıntılarında temizlenmekte olan namlu otofretaj taslağı.	53
2.31. Fosfatlaması yapılmış namlu otofretaj taslağı.	54
2.32. Yağlaması yapılmakta olan namlu otofretaj taslağı.	54
2.33. Mandrel yerleştirilmesi.	55
2.34. Tezgâh bağlantılarının gerçekleştirilmesi.	55
2.35. Mekanik (<i>İng.</i> swage) otofretaj işleminin tamamlanması.....	56
2.36. Abaqus ¼ kesit hesaplama modeli.	58
2.37. Model ağ yapısı.....	59
2.38. Otofretaj esnasında oluşan gerilmelerin gösterimi.	59
2.39. Otofretaj taslağı, iç ve dışarı çaplardan çıkartılacak talaş kısımları ve namlu cidarının gösterilmesi.	62
2.40. Tipik namlu iç balistiği basınç-yol grafiğı [44].	66
2.41. Namlu İç Balistik Eğrileri ve Namlu üzerindeki konumları.	67
2.42. Geleneksel tasarım ve Topoloji Eniyilemesi uygulanmış tasarım.....	70
2.43. Yük ve sınır şartları gösterilmiş tasarım uzayı soyut modeli.....	71
2.44. Topoloji Eniyileme modeli sınır şartları ve yükleme durumu.	72
2.45. Eksene göre değişen namlu yükleri ve mermi hareketi.....	75
2.46. Orijinal ölçülerdeki namlunun ön gerilmeli başlangıç ve en fazla yük durumu anındaki Von Mises gerilme değerleri.	77
2.47. Namlu üzerinde gerinim ölçerlerin yerleştirilmesi.	79
2.48. Kompozit sarım bölümleri ve bölümlerdeki çelik ve kompozit katman kalınlıkları.....	85

2.49. Fiber Sarım Yönlere	87
2.50. Keskin Nişancı Tüfeği'ne gerinim ölçer (<i>İng.</i> Strain gauge) uygulanması.	89
2.51. Hazneden başlayarak ilk 160 mm'lik bölüme uygulanmış gerinim ölçerler (Kompozit Sarılmış namlu).....	90
2.52. Kompozit sarılmış (A) namlusu ölçüm kıyaslamaları için oluşturulmuş model.....	91
2.53. Hafif Silah Namlusu çelik malzeme özellikleri.	91
3.1. Otofretaj eniyilemesi (Analitik).....	93
3.2. Elastik- Doğrusal Plastik Malzeme Modeli ile Otofretaj Eniyilemesi Hesabı.....	94
3.3. Elastik- Doğrusal olmayan Plastik Malzeme Modeli ile Otofretaj Eniyilemesi Hesabı.....	95
3.4. Analitik/Nümerik hesap kıyaslama.	96
3.5. Radyal gerilme (3 farklı model ile gerçekleştirilmiş analitik hesaplamalar).....	98
3.6. Çevresel gerilme (3 farklı model ile gerçekleştirilmiş analitik hesaplamalar).....	98
3.7. Abaqus ¼ kesit modelinde hesaplanan kalıntı radyal gerilme değerleri ve analitik hesaplama kıyaslama.	99
3.8. Abaqus ¼ kesit modelinde hesaplanan kalıntı çevresel gerilme değerleri ve analitik hesaplama kıyaslama.	100
3.9. Farklı Yöntemlerle Hesaplanmış Kalıntı Radyal Gerilmeler.	101
3.10. Farklı Yöntemlerle Hesaplanmış Kalıntı Çevresel Gerilmeler.	102
3.11. Arakesit miktarına göre iç çap plastik genişleme miktarları.....	106
3.12. Arakesit miktarına göre dış çap plastik genişleme miktarları.....	107
3.13. Arakesit(δ)-Cidar kalınlığı oranına göre değişen iç ve dış genişleme miktarları.....	108
3.14. Otofretaj uygulanması sonrası kalıntı gerilmeler ve sonrasında iç ve dış çaptan tornalama uygulandığı durumdaki gerilmelerin kıyaslanması.	109

3.15. Otofretaj uygulanmış, talaş kaldırılmış ve Servis basıncı uygulanmış namlu taslağı için gerilme dağılımı.	110
3.16. Farklı Emniyet Katsayıları için önerilen Analitik Yaklaşım ile hesaplanmış namlu dış yarıçap ölçüleri ve Emniyet Katsayısı değerleri	111
3.17. Farklı güvenlik katsayıları için analitik olarak hesaplanmış namlu ölçüleri.	112
3.18. Namlu boyunca Analitik Hesaplama ile tespit edilmiş dış yarıçap ve güvenlik katsayısı değişimi ve yakınsaması	113
3.19. Ağırlıkça eniyilenmiş dörtte bir simetrik model.	114
3.20. Ağırlıkça eniyilenmiş yarım simetrik model.	115
3.21. Çelik namlu bölümleri (sol taraf hazne-sağ taraf namlu ucu).	116
3.22. İlk bölüm orijinal, Analitik Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilenmiş Dış çap çizgileri	116
3.23. Orta bölüm orijinal, Analitik Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilenmiş Dış çap çizgileri	117
3.24. Son bölüm orijinal, Analitik Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilenmiş Dış çap çizgileri	117
3.25. Otofretaj ile kalıntı gerilme oluşturulmuş ve talaşlı imalattan sonra kalan ön gerilmeleri ile namlular.	118
3.26. Merminin namlu içerisinde zamana bağlı aldığı yol.....	119
3.27. Merminin namlu içerisinde zamana bağlı hız değişimi.	120
3.28. Merminin aldığı yol ve yola göre uygulanan basınç değişimi.	120
3.29. G1A2-I-K-M1-5BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.....	122
3.30. G1A2-I-K-M1-5BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.	122
3.31. G1A3-I-K-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.....	123
3.32. G1A3-I-K-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.	123
3.33. G1A4-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.....	124

3.34. G1A4-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.	124
3.35. G1A5-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.....	125
3.36. G1A5-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.	125
3.37. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi	126
3.38. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi	126
3.39. G1A7-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R02 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.....	127
3.40. G1A7-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R02 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.	127
3.41. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R02 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi	128
3.42. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R02 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi	128
3.43. Koordinat sisteminde normal ve kayma gerilmeleri (solda) ve Asal gerilmeler (sağda).....	129
3.44. Eski ve yeni ölçülerdeki çelik namlunun kalıntı gerilme durumları.....	133
3.45. Namluların en fazla gerilme ve emniyet katsayısı açısından karşılaştırılması.	134
3.46. Kompozit Malzeme ile desteklenmiş ve desteklenmemiş ölçüleri eniyilenmiş namluların en yüksek gerilme değerlerinin karşılaştırılması	135
3.47. Tek atım esnasındaki hesap ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.	137
3.48. Basıncın en yüksek olduğu yerde kompozit namluda ölçülen sıcaklığın zamana bağlı değişimi.....	138
3.49. Birden fazla atım için yakın noktadaki dış çap değişim eğilimi.	139
3.50. Kompozit Destekli Keskin Nişancı Silah Namlusu Gerilme Dağılımı (100 °C).....	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Otofretaj taslağı ölçüleri.	40
2.2. Malzeme özellik tablosu.	42
2.3. Kompozit malzemelerin yapısal sınıflaması	82
2.4. Kullanılan Kompozit Malzemeler ve her yönde değişen özellikleri	84
2.5. Bölümler ve Katman detayları	86
3.1. Fabrika tarafından uygulanan üç bölge otofretaj kontrol değerleri.	103
3.2. Namlu Numarası:10 (Otofretaj öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları) - ÖLÇÜM.	103
3.3. Namlu Numarası:4 (Otofretaj öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları) - ÖLÇÜM.	104
3.4. Çap genişleterek eski otofretaj ölçülerinde hesaplama sonuçları - HESAP.	104
3.5. Yeni otofretaj ölçülerinde gerçekleştirilmiş otofretaj işlemi-ÖLÇÜM. ...	105
3.6. Yeni otofretaj ölçülerinde çap genişletme yöntemi ile gerçekleştirilmiş otofretaj hesaplama işlemi - HESAP	105
3.7. Yeni otofretaj ölçülerinde mandrel geçirme yöntemi ile gerçekleştirilmiş otofretaj hesaplama işlemi - HESAP	106
3.8. Atışlı test kısaltma tablosu.	121
3.9. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.29., Şekil 3.30.).	123
3.10. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.31., Şekil 3.32.).	124
3.11. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.33., Şekil 3.34.).	125
3.12. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.35.,Şekil 3.36.)	126
3.13. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.37., Şekil 3.38.)	127
3.14. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.39., Şekil 3.40.)	128
3.15. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.41., Şekil 3.42.)	129
3.16. ÖLÇÜM ve HESAPLAMA Sonuçları	130
3.17. Düzeltilmiş ÖLÇÜM ve HESAPLAMA Sonuçları	131
3.18 Farklı Güvenlik Katsayı Değerleri için Çelik Kısımın Hafifleme Miktarları.....	132

SİMGELER DİZİNİ

a : iç yarıçap (mm),

b : dış yarıçap (mm),

c : elastik-plastik geçiş yarıçapı (mm),

C : bası(*Ing.* compression),

e : elastik,

E_n : namlu malzemesi elastik modülü (GPa),

E_m : mandrel malzemesi elastik modülü (GPa),

F_r : radyal yönde kuvvet,

G : namlu malzemesi kayma modülü (GPa),

H : namlu malzemesi tanjant modülü (GPa),

L : boy (mm),

M : kütle (kg),

m : mandrel,

n : namlu,

p : plastik,

P_i : iç çapa uygulanan basınç (MPa),

P_d : dış çapa uygulanan basınç (MPa),

\dot{P} : otofretaj basıncı,

\ddot{P} : servis basıncı,

ΔP = basınç değişimi,

r : yarıçap (değişken) (mm),

R : kalıntı,

r_m : mandrel yarıçapı (mm),

r/b =yarı(çap) oranı (-),

$servis$:servis durumu,

$talaş$:talaş kaldırma uygulanmış (iç ise iç talaş, dış ise dış talaş),

S = güvenlik katsayısı,

T = çeki (*İng.* tension),

v = boşluk (*İng.* void),

$W = b/a$ (): dış/iç yarıçap oranı,

δ : namlu-mandrel arayüz ölçüsü (mm) ($\delta = r_m - a$),

μ : sürtünme katsayısı (-),

ν_n : namlu malz. poisson oranı (-),

ν_m :mandrel malz. poisson oranı (-),

σ_y : namlu malzemesinin akma Mukavemeti değeri (MPa),

$\sigma_{r,\theta,z}^{Rp}$: radyal, çevresel (teğetsel, hoop) veya aksenal plastik bölge gerilme değeri (MPa),

$\sigma_{r,\theta,z}^{Re}$: radyal, çevresel (teğetsel, hoop) veya aksenal elastik bölge gerilme değeri (MPa),

$\varepsilon_{r,\theta,z}^p$: radyal, çevresel (teğetsel, hoop) veya aksenal plastik bölge gerinim değeri (MPa),

$\varepsilon_{r,\theta,z}^e$: radyal, çevresel (teğetsel, hoop) veya aksenal elastik bölge gerinim değeri (MPa),

τ = kesme gerilmesi (MPa),

$()_{r=a}$: a yarıçapı için parantez içerisindeki parametrenin aldığı değeri,

1. GİRİŞ

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Sağlamlık ve hafiflik bir silahın etkinliğini artırmak için vazgeçilmez unsurlardır. Silah Sistemlerinin hafifletilerek lojistik açıdan taşınabilirliğinin kolaylaştırılması ile savaş alanında üstünlük sağlanması yakın tarihimizde önem kazanan bir konudur.

Namlu, mühimmata hareket enerjisinin ve istendiği taktirde dönünün, barut ve yiv-setler ile kazandırıldığı Silah Sistemlerinin en önemli unsurudur.

O kadar önemlidir ki; Fatih Sultan Mehmet, çizimlerini bizzat kendisinin yaptığı Şahi Top Namlularını kullanmış ve İstanbul'daki Bizans Surlarını yıkarak fethi gerçekleştirmiştir.

Dönemin tahrip ihtiyaçlarına uygun olarak üretilen topların uzunluğunun 5.5 m, dış çevresinin 2.74 m, yarıçapının 0.92 m ve kütlesinin 18 ton olduğu belirtilmektedir (Bkz. Şekil 1.1). Top, azami 860 Kg'lık gülleleri yaklaşık 1.8 km mesafeye kadar atmakta ve gülleler 1.63 m derinliğe kadar toprağa gömülmekteydi [1].



Şekil 1.1. Şahi Topu.

Günümüz teknolojisindeki gelişmeler ile namludan daha uzun ömür, daha yüksek basınçlara dayanma ve lojistik yükün azaltılması amacı ile hafifletme talepleri gerçekleştirilebilir bir hedef olarak mümkün olmaktadır. İleri seviye malzemeler sınıfındaki kompozit malzemeler çelik kadar dayanıklı olmaları ve hafiflikleri ile pek çok parçanın üretiminde kullanılabilir hale gelmiştir.

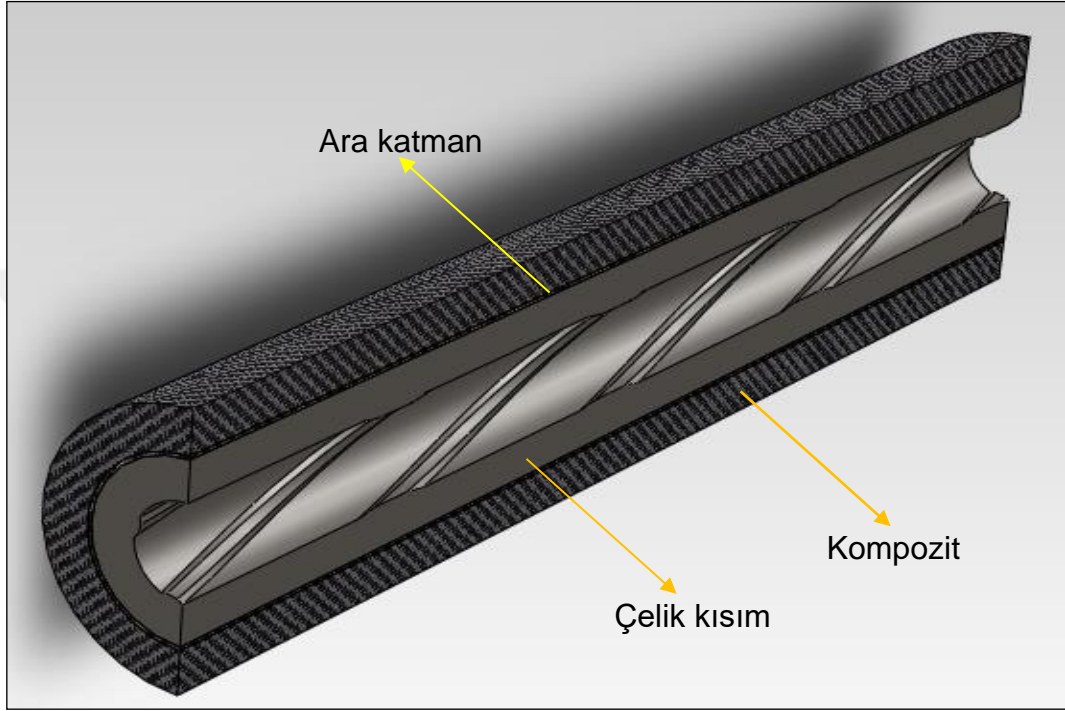
Geleneksel namlu çeliği, darbe tokluğu ve otofretaj sırasında tatmin edici kalıntı gerilme oluşturabilme kabiliyetine sahip bir malzemedir. Kompozit ile desteklenerek dayanım/ağırlık oranının artırılması çalışmaları yenilikçi tasarım çalışmalarının konusu olarak değerlendirilmektedir.

Bu motivasyonla, 105 mm çapta üretilmiş çelik obüs namlusu yerine kullanılacak karbon lif malzemesiyle desteklenmiş (Bkz. Şekil 1.2.) daha hafif bir namlunun tasarlanması bu tezin konusu olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında 105 mm çaptaki çelik obüs namlusu detaylı irdelenmiştir. Hâlihazırda üretilen namlu için uygulanan otofretaj işlemi ölçüleri, gerçekleştirilen otofretaj eniyilemesi hesabı sonrası değiştirilmiş ve namlu boyunca en fazla kalıntı gerilme oluşması sağlanması hedeflenmiştir. Hesaplama sonuçları otofretaj sonrası iç ve dış çap genişleme miktarı ölçümü ile karşılaştırılmıştır.

Otofretaj ile namlu taslağında oluşturulan ön kalıntı gerilme ve ardından talaş kaldırma ile kaybedilen gerilme miktarı ile iç balistik hesaplardan gelen aksenal doğrultudaki değişken yüklerin hesaba katıldığı bir analitik hesaplama yaklaşımı geliştirilmiştir. Analitik hesaplamaların sağladığı ön geometri yardımıyla oluşturulan nümerik bir modelin kullanılması sureti ile çelik namlu boyunca cidar eniyilemesi gerçekleştirilmiştir. ABAQUS ticari yazılımı platformunda geliştirilen nümerik model hem kalıntı gerilmeleri hem de yazılan bir FORTRAN yordamının birlikte koşturulmasıyla merminin dinamik hareketini hesaplara dâhil edebilmektedir. Bu model yardımı ile benzetimler gerçekleştirilmiş ve eniyilenmiş çelik kısım geometrisinde imal edilen namlu üzerinde yapılan gerinim ölçümleri, nümerik modelin doğrulanmasında kullanılmıştır.

Namlunun hangi bölgesine kompozit malzeme uygulanacağı, montaj kısıtları ve otofretaj hesaplamaları ışığında belirlenmiştir. Kompozit takviyeli namlu bölgesinin en az tümü çelik namlu performansında olması için farklı emniyet katsayılarında kompozit takviye uygulanmıştır.



Şekil 1.2. Kompozit malzeme ile desteklenmiş bir namlu [2].

Tasarlanan kompozit destekli namlu ile elde edilen en fazla hafifleme miktarı Araştırma Bulguları bölümünde detaylandırılmıştır.

1.2. Literatür Taraması

Tez çerçevesinde ele alınan temel konular otofretaj ve eniyilemesi, basınçlı silindirik yapılarda kalıntı gerilme tayini, topoloji eniyilemesi, basınçlı silindirik kompozit ve kompozit destekli yapılar şeklinde 3 ana başlıkta incelenmiş ve bu konulara ait literatürde tespit edilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Değirmenci [2], yüksek sıcaklığa ve dinamik iç basınca dayanıklı hafif silah namlularının kompozit destekli olarak üretilebilmesindeki dar boğazları araştırmıştır. Kompozit malzeme desteğiyle üretilecek mevcut namlunun, servis anındaki durumları sonlu eleman yöntemiyle Abaqus programında modellenmiş, benzetimi 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 benzetim verileri ile mukayese edilmiştir.

Gibson [3], hidrolik otofretajlı kalın duvarlı silindirlerdeki kalıntı gerilme dağılımını pek çok farklı yaklaşım ile ortaya koymuştur. Bir dizi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiş bu modellerin verimli çalışması için uygulanması gereken sınır şartlarını belirlemiştir.

Yıldırım [5], bir ağır silah namlusuna mekanik otofretaj uygulanması konusu incelemiştir. Otofretaj işleminden maksimum faydanın elde edilebilmesi için namlu ile mandrel arasındaki en uygun ara kesit değerini elde etmeye çalışmıştır.

Davidson ve diğerleri [6], otofretaj işlemi için hidrolik otofretaj tekniğine göre daha az işletme basınçları gerektiren mekanik (*İng.* Swage) otofretaj tekniğini geliştirmişler ve farklı çap oranları ve % çap genişleme miktarları için kalıntı gerilmeleri tespit etmişlerdir.

Araştırmanın amacı çap oranı ve aşırı gerinimin büyüklüğüne bağlı olarak kalıntı gerilme dağılımının ve bu durumun Kayar Kama Tekniği / Mekanik Otofretaj (*İng.* Swage Autofrettage Method) ile otofretaj uygulanmış silindirlere olan etkisinin belirlenmesi olmuştur. Otofretaj uygulandığında, plastik gerinim oluşturarak, sonrasında iç çalışma basıncına maruz bırakılacak kalın duvarlı silindirlere çalışma esnasında elastik davranış göstermesi için uygulanır. Otofretajın kullanım alanının daha yüksek basınçlı uygulamalara genişletilmesi ve direk içten hidrostatik basınç uygulama

prensibine dayalı konvansiyonel ofofretaj yöntemine bir alternatif olarak beklenen çap genişlemesini sağlama amacıyla kayar bir kamanın mekanik avantajını kullanan yeni bir teknik geliştirilmiştir.

Kayar kama veya mandrelin kullanımı ile silindir mandrel arasında kayma kuvvetleri oluşacak ve sonuçta oluşan kalıntı gerilme dağılımı teorik olarak öngörülen direk hidrostatik metodunun karakteristiğinden farklılık gösterir. Mekanik ofofretaj işleminde ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin aşırı gerinime ve çap oranına bağlı olarak nasıl değiştiğini görmek için gerçekleştirdikleri deneylerin sonuçlarını teorik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kalıntı gerilmenin deneysel olarak belirlenmesi, mekanik ofofretaj görmüş silindirik tüpün iç yüzeyinden bir miktar talaş kaldırılması sonucu tüpün dış yüzeyindeki gerinimlerin değişiminin ölçülmesine dayanıyordu.

Majzoobi ve Ghomi [7], ucu kapalı bir silindiri spesifik sabit bir iç basınç etkisine maruzken ağırlığını azaltmak üzere eniyilemeye çalışmıştır. Optimizasyon için SEQ tekniğini kullanmışlardır. Bu işlem için ANSYS numerik benzetim programını kullanmışlardır.

Clark [10], mekanik ofofretaj görmüş kalın cidarlı silindirlerde oluşan kalıntı gerilmelerinin tahmin edilebilmesi için elastik-mükemmel plastik malzeme modeline göre analitik yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Raporda, mekanik ofofretaj işleminde kamanın elastik sıkışması ihmal edilerek, ara kesit değeri ile elastik plastik yarıçap arasındaki matematiksel bağıntı türetilmiştir. Ayrıca ofofretaj işleminde yükün kaldırılmasından sonra iç çapta yeniden bir akmaya sebep olan Bauschinger etkisi analitik olarak ele alınmıştır. Çalışmada x-ray ölçme tekniği kullanılarak kalıntı gerilmeler deneysel olarak da elde edilmiştir.

Jost [11], bir silindirin içerisinden mandrel geçirilerek uygulanan delik genişletme işlemi sırasında meydana gelen gerilme ve gerinimler analitik olarak ayrıntılı şekilde ele alınmıştır. Denklemler türetilirken, malzeme elastik-mükemmel plastik kabul edilmiş ve Von Mises akma ölçütü esas alınmıştır. Delik ve mandrel arakesit değeri ile işlem sırasında oluşan elastik-plastik yarıçap arasındaki ilişki matematiksel olarak ifade edilmiştir. Raporda yükün kaldırılmasından sonra yeniden bir akmanın hangi şartlarda gerçekleşeceği

ile ilgili çıkarımlar yapılmıştır. Analitik sonuçlar nümerik yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu çıktığı tespit edilmiştir.

Parker ve Underwood [12], Bauschinger etkisini elastik-mükemmel plastik model için otofretaj işleminde ortaya çıkan kalıntı gerilmelerini tahmin etmeye yönelik geliştirilen analitik yöntemle dâhil etmiştir. Bu etkinin bası akma mukavemetini azaltarak silindir iç çapı çevresinde ikincil bir akmanın meydana gelmesini ne şekilde tetiklediğini matematiksel olarak ifade etmişlerdir. Daha sonra aşırı gerinime bağlı olarak artan Bauschinger etkisini yorulma ömrüyle ilişkilendirerek, yorulma ömrünü en fazla hale getirmek için eniyilenmiş aşırı gerinim miktarını tespit etmişlerdir.

Perry ve Aboudi [13], kalın duvarlı silindirlere elastoplastik gerilmeleri incelemişlerdir.

Parker ve O'Hara [14], Bauschinger etkisini hidrolik ve mekanik otofretaj yöntemleri için kıyaslayarak bir model ortaya koymuştur.

Iremorger ve Kalsi [15], mekanik otofretaj işlemi sırasında namlu ve mandrel üzerinde oluşan gerilme bölgelerini nümerik olarak çözmüşler ve göstermişlerdir.

Jahed ve Ghanbari [16], NiCrMoV12.5 çeliğinin gerçek tersine yükleme (*Ing. unloading*) davranışlarının belirlenmesi için basit bir forward-reverse torsion testi uygulamıştır. Uygulanan test sonucunda, malzemenin yükleme sırasında mükemmel plastik davranış sergilerken, tersine yükleme sırasında nonlineer bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen gerçek malzeme davranışı, otofretaj sonrası oluşan kalıntı gerilme dağılımının elde edilmesi için gerçekleştirilen analizlerde kullanılmıştır. Gerçek malzeme modeli kullanılarak yapılan analiz sonuçları ile izotropik pekleşme vb. ideal modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve ideal modellerin, gerçek modele göre hesaplanan kalıntı gerilme değerlerinden ciddi miktarda sapma gösterdiği belirlenmiştir. Makalede son olarak otofretaj görmüş silindirlerin tornada işlem gördükten sonra kalıntı

gerilme dağılımında gerçekleşecek değişim gerçek ve ideal malzeme davranışları için incelenmiştir.

Perl ve Perry [17], Bauschinger etkilerinin de dâhil edildiği otofretaj işlemi esnasında oluşan kalıntı gerilme bölgesini 3 boyutlu olarak hem deneysel hemde nümerik olarak tespit ettikleri bir makale yayınlamışlardır.

Huang ve Cui [18], farklı malzeme modelleri için otofretaj işlemi sonrasında oluşan kalıntı gerilmeleri matematiksel olarak ifade etmiştir. Makalede, malzemenin gerçek malzeme davranışına en uygun analitik model oluşturulmaya çalışılmış olup Bauschinger etkisi de hesaplamalara dâhil edilmiştir. Ayrıca model kalıntı gerilmelerinin farklı akma ölçütlerine göre hesaplanabilmesine imkân vermektedir. Elde edilen gerilme dağılımları hem nümerik hem de deneysel yöntemle de elde edilmiştir. Kullanılan üç yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Gao [19], lineer pekleşme özelliğine sahip kalın duvarlı ve uçları kapalı silindir için gerinim gradient plastisite teorisine göre bir elastoplastik sonuç oluşturmuştur.

Troiano ve Underwood [20], yüksek dayanımlı A723 çeliği için daha önce yayınlanan uniaxial Bauschinger etkilerinden farklı olacak şekilde biaxial Bauschinger etkilerini tartışmak üzere makale oluşturmuşlardır.

Ayob ve Elbasheer [21], otofretaj görmüş kalın cidarlı silindirlerin çalışma basınçlarındaki gerilme dağılımları incelenmiş ve çalışma basıncında maksimum eşdeğer gerilmenin silindirin elasik-plastik yarıçapında gerçekleştiği belirlemiştir. Elastik plastik yarıçap değişimine bağlı olarak, otofretaj görmüş silindirin çalışma basıncındaki maksimum eşdeğer gerilme dağılımının minimum noktası analitik olarak tespit edilmiş ve bu nokta eniyilenmiş otofretaj yarıçapı olarak kabul edilmiştir. Optimum otofretaj basıncı, eniyilenmiş yarıçap ile ilişkilendirilerek matematiksel olarak formüle edilmiştir. Son olarak analitik yöntemle bulunan eniyilenmiş yarıçap ile

eniyilenmiş basınç değerleri sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Park ve diğerleri [22], otofretaj yapılmış bir silindirin son ölçülerine getirilmek üzere iç ve dış çapından talaşlı imalata maruz bırakılması ile oluşan durumu analitik ve numerik olarak çalışmışlardır.

Darijani ve diğerleri [23], Bauschinger etkisi ve Tresca akma ölçütü çerçevesinde elastik lineer pekleşebilen malzemedan üretilen kalın duvarlı bir basınçlı kap için elastoplastik analitik sonuç elde etmişlerdir. Bauschinger etkisi ve Tresca'nın akma ölçütüne göre elastik lineer-pekleşen (sertleşen) malzemedan üretilmiş kalın duvarlı bir silindir için tam elastik-plastik analitik sonuç çıkartılmıştır. Çalışma basıncı ve geometrik ölçüler kullanılarak, çevresel ve eşdeğer gerilmeler tankın duvarında düzgün dağılacak şekilde eniyilenmiştir. Çevresel (hoop) ve eşdeğer gerilme değerlerine bağlı olacak şekilde iki eniyileme metodu kullanılmış ve en uygun otofretaj basıncı belirlenmiştir. Otofretaj basıncının çalışma basıncından fazla olduğu ve üç değişkene bağlı olduğu belirlenmiştir. Bunlar; Bauschinger etkisi, çalışma basıncı ve geometrik ölçülerdir. Ana amaç bir çalışma basıncında duvar kalınlığını belirlemektir. Bunun için çevresel gerilim dağılımını eniyilemek ve duvar kalınlığında uygun bir akma oranı kabul etmektir. Son bölümde, farklı çalışma şartlarındaki dört farklı tip yapısal malzeme için dış/iç çap oranı ve en uygun otofretaj basıncı grafikleri çizilmiştir. Elastik-plastik yaklaşıma göre yapılmış tasarımların, elastik metotlardan daha ekonomik olduğu gösterilmiştir.

Shim ve diğerleri [24], kalın duvarlı silindir için Bauschinger etkisini incelemişlerdir.

Ali ve diğerleri [25], silindirik tüpün dış çapının iç çapa oranı, çalışma basıncı, malzeme modeli ve otofretaj seviyesi gibi faktörlerin otofretaj işleminden elde edilen faydayı ne şekilde etkilediği üzerinde durmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda, otofretaj basıncı artarken belli bir basınç değerine kadar maksimum Von Mises gerilmesinin azaldığı ve bu değerden sonra artmaya başladığı gözlenmiştir. Dış çapın iç

apa oranının artması, çalışma basıncının artması, malzemenin pekleşme eğrisinde plastik bölgenin eğiminin artması eniyilenmiş otofretaj basıncının artmasına sebep olmaktadır.

Güngör [26], sabit i çalışma basıncına maruz bırakılmış, iç, dış çapları ve sıcaklıkları ile iki ucu sabit kabul edilmiş çelikten üretilmiş namlu haznesinin yapısal analizi gerçekleştirmiştir. Python dili kullanılarak yazılmış bir kod yardımı ile ara çap sürekli değiştirilmiştir. elik namlu haznesi üzerine izotropik metal matriks kompozitin sıkı geçme yöntemi kullanılarak monte edilmesi durumunda, çelikten üretilmiş namlu haznesi ile benzer dayanımı gösterdiği eniyilenmiş çapı belirlemiştir. Optimum ap için gerçekleştirilen hesaplama sonuçlarının, otofretaj tekniği için gerçekleştirilen hesaplama sonuçları ile benzer olduğu değerlendirilmiştir.

Hu ve Puttagunta [27], düzlem gerilme ve aksenal simetrik bir model çerçevesinde kalın duvarlı bir silindiri nümerik olarak incelemiştir. Modelde lineer olmayan gerinim pekleşmesi ve kinematik pekleşme içeren bir elastoplastik model kullanılmıştır.

Zhu ve diğerleri [28], kapalı uçlu, i ve dıştan basınca maruz bırakılmış, kalın duvarlı silindirik elastik tüpün üç boyutlu sonlu deformasyonunun nümerik benzetimini gerçekleştirmişlerdir.

Zhong Hu [29], bir ağır silah namlusuna uygulanacak mekanik otofretaj işleminin bir sonlu elemanlar programı ile benzetimini gerçekleştirmiştir. Analizde non-linear kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Mekanik otofretaj işleminde oluşacak kalıntı gerilmeler farklı arakesit değerleri için hesaplanmıştır. Makalede sürücü tarafından mandrele uygulanan kuvvetin mandrelin yer değiştirme miktarına bağlı olarak değişimi, farklı arakesit değerleri için belirlenmiştir. Otofretaj benzetimini gerçekleştirildikten sonra, elastik sınırlar içerisinde silindire uygulanabilecek maksimum basınç tespit edilmiş ve bu basınç değeri ile silindir iç yüzeyi tekrar basınçlandırılmıştır. Otofretaj gören namluda, maksimum çalışma basıncında oluşan Von Mises eşdeğer gerilmeleri farklı arakesit değerleri için belirlenmiştir. Farklı arakesit değerleri için maksimum Von Mises eşdeğer gerilmeleri kıyaslanarak en

düşük değerin hangi arakesitte olduğu tespit edilmiş ve bu değer en uygun değer olarak kabul edilmiştir.

Oktay ve diğerleri [30], bir uçak kanadının üzerine gelen yapısal yükleri Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği ile birlikte bütünleşik hesaplayarak kanadın topoloji eniyilemesini malzeme dağılım tekniğini kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Johnsen [31], topoloji eniyilemesinin geri dönüşüm alüminyum ile üretilmiş parçalar için nasıl uygulanacağına ilişkin yöntemleri tanımlamıştır. Ağırlık, kalite, güvenilirlik ve maliyetten kayıp olmaksızın saf malzeme yerine geridönüşüm alüminyum malzeme kullanımını araştırmıştır. Topoloji eniyilemesini seçilmiş yapısal bir parça için uygulamıştır.

Christiansen ve diğerleri [32], şekil ve topoloji eniyilemesi yöntemine dayanarak 3 boyutlu katı modelleri otomatik olarak oluşturan bir metot sunmuşlardır. Eniyileme veya katı model oluşturma uygulaması, bir set sınır şartı, amaç fonksiyonu, kısıtlar ve başlangıç yapısı ile başlatılmaktadır. Bu girdiyi kullanarak, sınır şartları ve kısıtlara uygun olarak amaç fonksiyonunu eniyilemek üzere, metot otomatik olarak başlangıç yapısının topolojisini tekrar şekillendirmektedir.

Rhee ve diğerleri [33], 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.

Balya [35], kombine yükler altındaki filaman sargı tüplerin tasarımı için gerekli olan parametreleri laminasyon teorisi ve sonlu eleman yöntemleriyle gerçekleştirmiştir.

Littlefield ve diğerleri [36], 889 kg'lık kütleyle, 5460 mm'lik uzunluğa ve 120 mm'lik kalibreye sahip tank topu namlusundan 56.7 kg'lık çeliği tornalayıp, yerine benzer performansı sağlayan 11.3 kg'lık Karbon/PEEK

(polietereterketon) kompozit malzemeyi sararak geliştirmiş ve eşdeğeri elik namludan boyece 45.4 kg'lık ktme azaltımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarım sürecinde aşılan problemleri irdelemişlerdir. Namlunun atış yüklerine olan tepkisini öngörmek için sonlu elemanlar modelleri kullanılmıştır ve bu modeller doğrulanmaya çalışılmıştır.

Katz ve diğerleri [37] ve Emerson ve diğerleri [38], iki farklı araştırma grubu olarak, hibrit CMC/MMC kompozitlerinin 5.56 mm kalibreli namlularda kullanımını araştırmışlardır. Araştırmalarında bu tür namlular üzerinde Grujicic ve diğerleri'nin [34] yaptığı güvenilirlik analizini uygulamışlardır.

Tabakov ve Summers [39], asimetrik yük koşullarında anizotropik kalın kompozit silindirler için teori geliştirmişlerdir. Katman sayısı, katman özelliklerinden bağımsız olarak tam analitik sonuç elde etmişler, teorinin kalın ve ince cidarlı, izotropik, ortotropik ve anizotropik katmanlı basınç tankları ve açık uçlu silindirler için kısıt olmaksızın kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Jong Woon Kim ve diğerleri [40], kalın duvarlı fenolik kompozit silindirlerin 155 C olan krleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulmaları sırasında izotropik olmayan termal deformasyon nedeni ile termal kalıntı gerilme oluştuğunu tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri soğutma ve tekrar ısıtmaya dayalı akıllı krleme metodu ile bu gerilmeyi %30 oranında azaltmışlardır.

Kalaycıoğlu ve Dirikolu [41] ağ analizi ve klasik katman teorisi yardımıyla TSE tarafından Tip 3 olarak isimlendirilen dikişsiz metal astarlı ve kompozit sargılı basınç tankının patlama basıncına göre tasarımını yapılmışlardır. Çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri esas alınmış olup, metal astar için hasar durumunu plastik akmanın başladığı an ve kompozit kısmın hasar durumunu ise fiber kopması olarak düşünmüşlerdir.

nder ve diğerleri [42] tabakalı ince cidarlı E-cam/epoksi kompozit tankların maksimum patlama basıncında en uygun tabaka açılarını araştırmıştır. İçten basınca maruz helisel açıda sarımlı kompozit borularda en uygun sarım açısının 55°, tek açıda sarımlı kompozit borularda ise bu değerin 90° olduğunu ortaya koymuştur.

Chen ve diğçerleri [43], Őekil hafızalı ileri dűzey malzeme kullanarak kalın duvarlı tűp yapısında çeŐitli Őekillerde kullanarak kesme gerilmesini %20-30 ve çevresel gerilmeyi %7.9 oranında azaltılabileceđini gűstermiŐlerdir. Çevresel gerilme için azalma oranını yeterli bulmamıŐlar ancak yűntemin katmanların delaminasyon Őartını engellediđini belirtmiŐlerdir.

R. Ansari ve diğçerleri [44], tekrar eden i basınç ve sıcaklık yűklemesine maruz bırakılmıŐ çok katmanlı filament sargı tűp için ű boyutlu anizotropik elastisite teorisine dayanan gerilme analizini gerçekleŐtirerek zamana bađlı gerilme, gerinim ve deformasyon dađılımlarını elde etmiŐlerdir. Fiber oryantasyonunun aksenal ve çevresel yűnde eđilim gűstediđi takdirde çevresel dűnűŐűn sıfıra dođru eđilim gűsterdiđini, fiber sarımın eđilimi çevresel ve uzunlamasına olmaya baŐladıđıa çevresel ve aksenal gerilmelerin artma eđiliminde olduđunu gűstermiŐlerdir.

Martins ve diğçerleri [45], 2012 yılında gerçekleŐtirdikleri nűmerik/deneysel çalıŐmada filamen sarımlı tűp için yapısal ve fonksiyonel hasar basıncını tespit etmiŐlerdir. Yapısal hasar için yapılan diğçer çalıŐmalara benzer Őekilde $\pm 55^\circ$ sarım açısında yapısal ve fonksiyonel hasar basıncının en fazla olarak gerçekleŐtiđini gűrműŐlerdir. Ayrıca Abaqus Paket Programı ile yapısal hasar için tatmin edici, fonksiyonel hasar belirlemek için bir miktar bilgi verebilecek nűmerik bir model oluŐturabilmiŐlerdir.

Roberta Sburlati [46], i ve dış basınca maruz bırakılmış ve i duvarı tamamen katmanlı veya sadece ince bir kaplama olan kalın duvarlı silindir için analitik sonuçlar elde etmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. BİRİNCİ BÖLÜM: Otofretaj Eniyilemesi

Otofretaj eniyilemesinin gerçekleştirilmesi esnasında analitik bağıntıların çözümlenmesinde eklerde paylaşılmış yordamlar oluşturulmuş ve kullanılmış, nümerik sonlu elemanlar yönteminde ise ABAQUS yazılımının modelleme ve çözücü modüllerinden faydalanılmıştır. Otofretajın gerçekleştirilmesi ve sonrasındaki ölçüm işlemleri fabrika tezgah ve test altyapıları kullanılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Analitik hesaplama ve nümerik sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmış, hesaplamalar ile elde edilen değerler deneysel yöntemden elde edilen ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.1.1. Genel Bilgiler

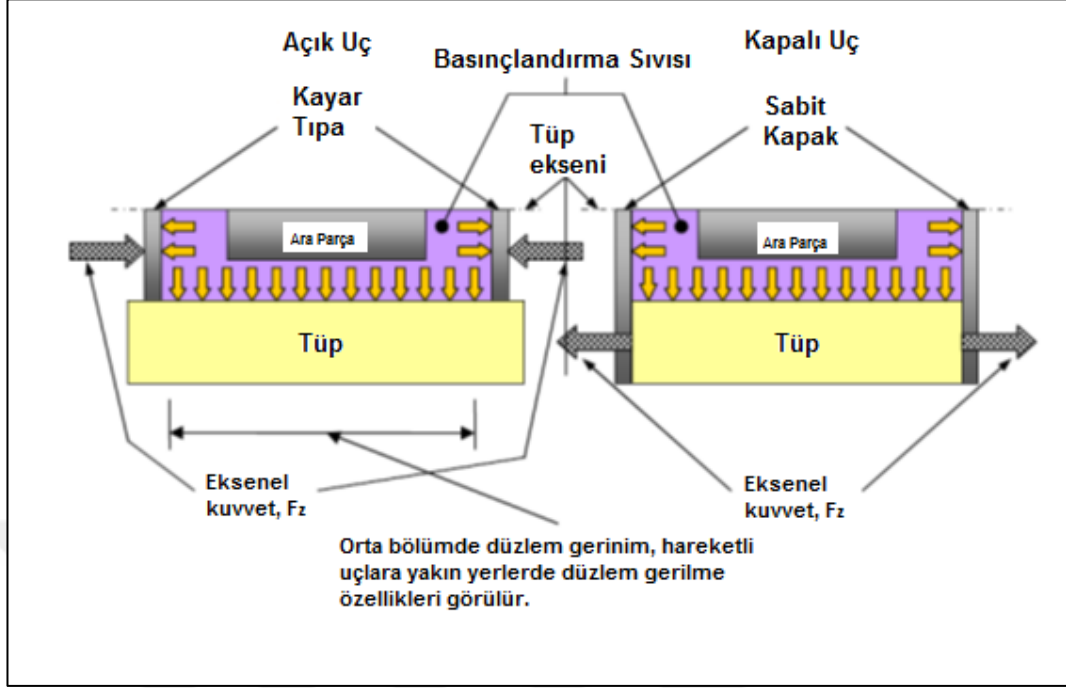
Otofretaj işlemi, önceden belirlenmiş miktarda, bir tüp içine uygulanan hidrolik veya mekanik basıncın miktarı ile ifade edilen, silindir iç çapının plastik şekil değiştirilmesini amaçlar. Uygulanan bu iç basınç kaldırıldıkça tüpün dış kısmı kendi ölçüsüne geri ulaşmaya çalışır. İç çapa yakın olan ve daha fazla miktarda şekil değiştirmiş malzeme bu harekete karşı koymaya çalışır ve bu şekilde iç çapa yakın bölgede basıda kalan, dışa doğru ise çekiye dönüşen teğetsel gerilme oluşur. Bu sonuç kalıntı gerilme dağılımı oluşmuş silindire daha sonrasında farklı bir uygulama ile iç basınç uygulanması durumunda silindirin kalıntı şekil değiştirme oluşturmadan uygulanan basınca dayanmasını sağlar.

Konvansiyonel ofofretaj uygulamasında beklenen aşırı gerinim durumu yeteri miktarda hidrostatik iç basınç uygulanmasını gerektirir. Bu şekildeki uygulama yıllardır namlu ve basınçlı kaplarda uygulanmaktadır. Hâlihazırda

1379 MPa'a kadar basınçlar kullanılarak namlu ve basınçlı kaplarda sırası ile 1103 MPa, 1310 MPa, 1655 MPa ve 1724 MPa akma dayanımı seviyelerine ulaşılmıştır. Ancak bu şekilde iç basınç uygulayarak gerçekleştirilen otofretaj işlemi pratikte 1379 MPa ile sınırlıdır. Otofretajın uygulama sınırlarını daha yüksek basınçlı uygulamalara genişletmek ve 103 MPa ile 1379 MPa basınç aralığında ortaya çıkan pek çok problemi bertaraf etmek amacıyla yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde beklenen çap genişlemesini elde etmek için kamanın mekanik avantajını kullanmak, verilen aşırı gerinim miktarını elde etmek için gerekli olan basınç gereksinimini ciddi oranda düşürmektedir. Bu işlem Otofretajın Mekanik metodu (*İng.* Swage) olarak tabir edilir ve çapça büyük bir dövme takımının (mandrel) silindir iç çapından boyunca geçirilmek sureti ile beklenen çap genişlemesinin elde edilmesine dayanır. Mandreli hareket ettirmek için gerekli kuvvet, mandrelin arkasına uygulanan direk hidrolik basıncı sağlayan bir ünite veya mekanik bir yükleme aracı ile sağlanabilir.

Direk basınç yöntemi ile karşılaştırıldığında, Mekanik metodunda aşırı gerinim miktarının oluşturulmasından sorumlu gerilme durumunun doğasındaki farklar nedeni ile sonuçta oluşan kalıntı gerilme dağılımı da farklı olmaktadır.

Hidrolik otofretaj işleminde tüpün iç çapına hidrostatik basınç uygulanır ve eşdeğer gerilme malzemenin akma gerilme değerini aşar. Bu şekilde iç çapta plastik deformasyon başlar. Basınç miktarı deformasyonun cidar boyunca arzu edilen derinliğe ulaşması için arttırılmaya devam edilir. Tipik olarak, otofretaj yapılacak tüpün merkezine, içerisine pompalanacak sıvının miktarını azaltmak üzere bir ara parça konur. Basınçlandırılmış sıvıyı tutacak şekilde tüpün uçları kapatılır. Bu kapatma işlemi tüpe tutturulmuş ve uygulanan aksenal yükü taşıyacak şekilde kayan tıpa veya kapak kullanmak sureti ile olur. Kapalı uç koşullarında tüpe uygulanan net aksenal kuvvet (açık uç koşulları ile kıyaslandığında), pik basıç şartlarında bulunan bileşke gerilmenin oranını ve elde edilecek kalıntı gerilme potansiyelini değiştirecektir. Bu iki durum Açık ve Kapalı-Uç şeklinde sınıflandırılmaktadır (Bkz. Şekil 2.1.).



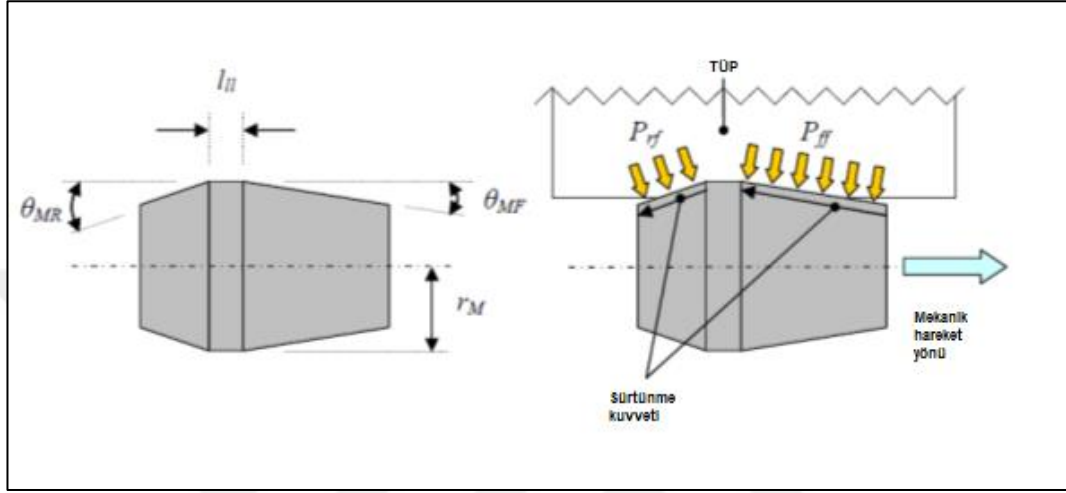
Şekil 2.1. Hidrolik otofretaj şeması, Açık ve Kapalı Uç [3].

Hidrolik otofretaj yönteminde arzu edilen deformasyon miktarının elde edilmesi için uygulanan basınç çok dikkatli kontrol edilmelidir. Verilen bir basınç değerinde malzeme akma gerilmesindeki küçük değişimler, elde edilecek aşırı gerinim derinliğinde ciddi farklar yaratabilir. Tüp uçlarında sızdırmazlığın sağlanması uygulanan basınç artırıldıkça tüpte genişleyeceğinden zahmetli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.

Mekanik Otofretaj tüpün iç yüzeyinde gerekli olan plastik genişlemeyi tüpün iç yüzeyinden daha büyük ölçülerde üretilmiş mandrel ile iç yüzey arasındaki mekanik arakesit ile sağlamak prensibine dayanır. Hidrolik otofretaj esnasında oluşan yükler mekanik otofretajda dokunma yüzeyinin küçüklüğü nedeniyle ciddi oranda azalır. Mandrel ve tüp yüzeyi arasındaki sürtünme ve bölgesel yükleme sonucunda kesme gerilmeleri oluşur.

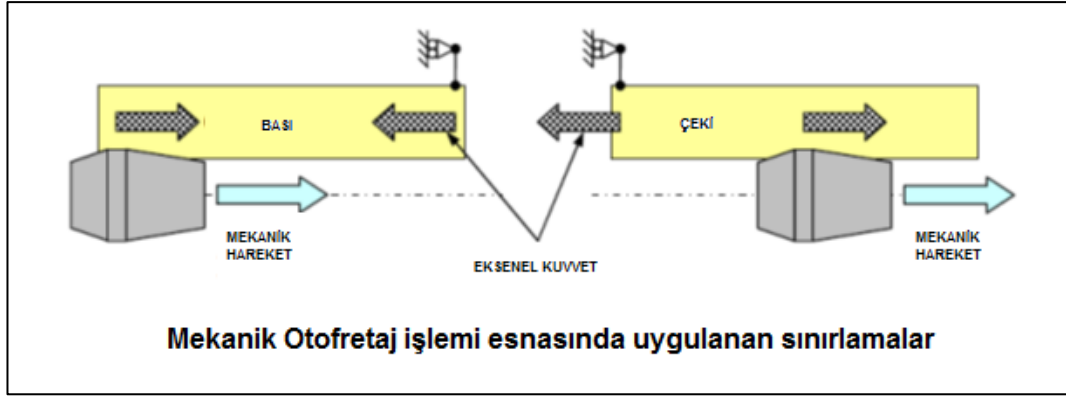
Mandreller tipik olarak iki konik bölümün sabit çaptaki kısa uzunluktaki bir geçiş bölgesi ile birleştirilmesi şeklinde geometrik şekle sahiptirler. Ön konik

bölüm arka konik bölüme göre daha küçük açıya sahiptir ve daha uzundur (Bkz. Şekil 2.2.). Konik bölümler mandrelin sadece eğimini belirlemez, ön bölüm ilk deformasyonu, arka bölüm ise tüpün yük boşalma durumunu kontrol eder.



Şekil 2.2. Mandrel şekli [3].

Mandrel ve tüp arasındaki dokunma bölgesi kayma sürtünmesinin azaltılması amacıyla yağlanır. Yağlama işleminin kullanılmasına rağmen, mandrel tüpe ciddi miktarda aksenal kuvvet uyguladığından bu durumun da sınırlandırılması gereklidir. Sınırlamanın uygulandığı yer, ya mandrel girişi ya da çıkışı olsun, yüklerin çeki veya bası oluşunu belirler (Bkz.Şekil 2.3.). Sınır öndeyse bası, arkadaysa çeki yükleri oluşur. Hidrolik otofretajda Açık ve Kapalı uç durumlarına benzer şekilde bu aksenal gerilmeler hassas kalıntı gerilme paterninin oluşmasında önemlidir.



Şekil 2.3. Mekanik otofretaj uygulama şekilleri [3].

2.1.2. Kullanılan Malzeme Modeli

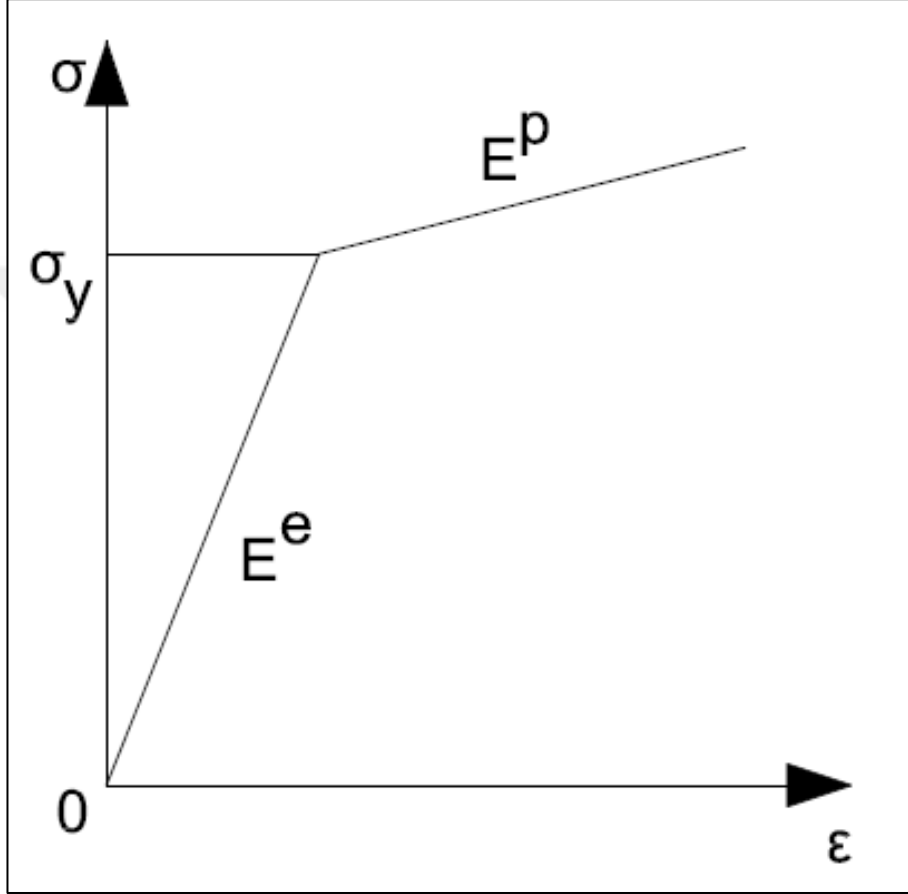
Malzemelerin gerçek gerilme-gerinim davranışlarının matematiksel olarak modellenmesindeki zorluklar bir takım ideal malzeme modeli kabullerinin ortaya atılmasına neden olmuştur. Bu çalışmada sadece hesaplamada kullanılan malzeme pekleşme modellerinden bahsedilmiştir.

2.1.3. Elastik-Doğrusal Plastik Malzeme Peklşme Modeli

Elastik-doğrusal plastik model, elastik mükemmel plastik modele nazaran malzemenin gerçek gerilme-gerinim eğrisine daha yakın bir modeldir. Elastik-mükemmel plastik modelde plastik bölge, yatay ile açısız düz bir çizgi ile temsil edilir. Bu modelde gerilme-gerinim eğrisi iki adet yataya göre farklı açılı doğrusal çizgiyle temsil edilmektedir (Bkz. Şekil 2.4.). Malzemenin gerçek gerilme-gerinim eğrisinde genelde elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş yumuşak şekilde gerçekleşirken, bu modelde sert bir geçiş söz konusudur. İdealize edilen diyagramın ilk doğrusal bölgesi malzemenin elastik modülüne eşit bir eğime sahiptir. İdealize edilmiş pekleşme davranışını temsil eden ikinci bölge E^p ise tanjant modülü (H) olarak da tanımlanır. Elastik-doğrusal plastik model için gerilme-gerinim ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^e} \quad (\sigma < \sigma_y) \quad (2.1)$$

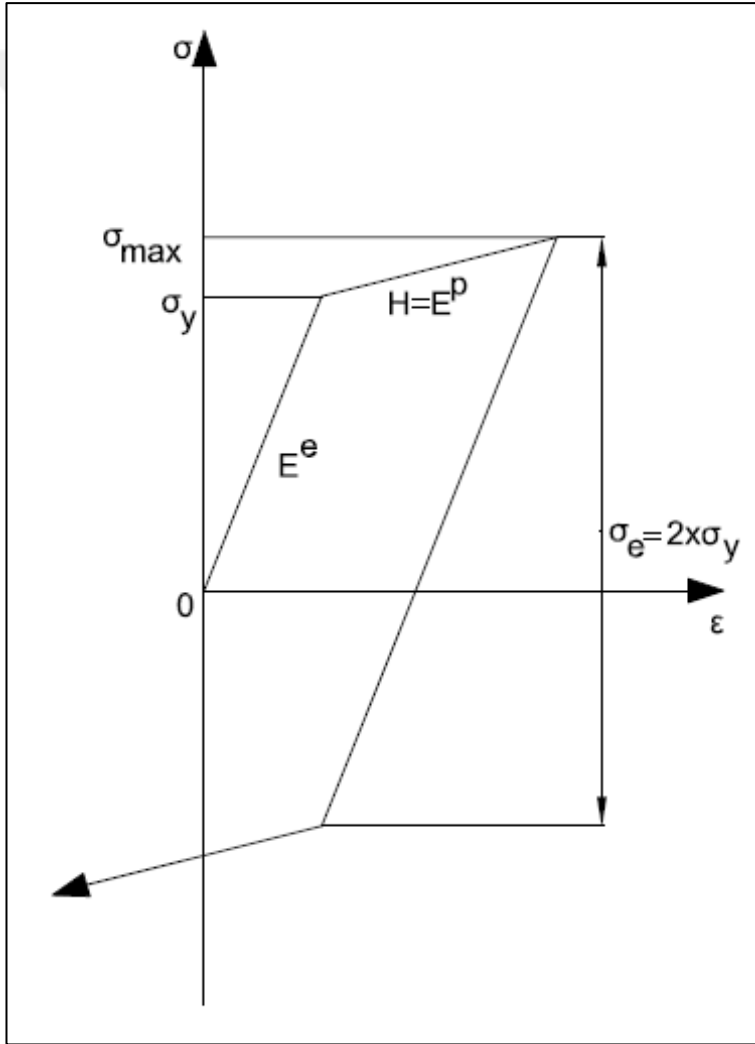
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E^e} + \frac{1}{E^p}(\sigma - \sigma_y) \quad (\sigma > \sigma_y) \quad (2.2)$$



Şekil 2.4. Elastik-Doğrusal Plastik Malzeme Modeli Gerilme-Gerinim Eğrisi.

Plastik bölgede basma ya da çekme durumunda yüklenmiş olan bir malzeme numunesi üzerinden yük kaldırılır ve numune ters yönde akma noktasına kadar yeniden yüklenirse, aksi yöndeki yeniden yükleme durumunda ölçülen akma gerilmesinin orijinal yöndeki akma gerilmesi değerinden daha küçük bir değerde olduğu gözlenecektir. Bu olgu Bauschinger etkisi olarak adlandırılmaktadır.

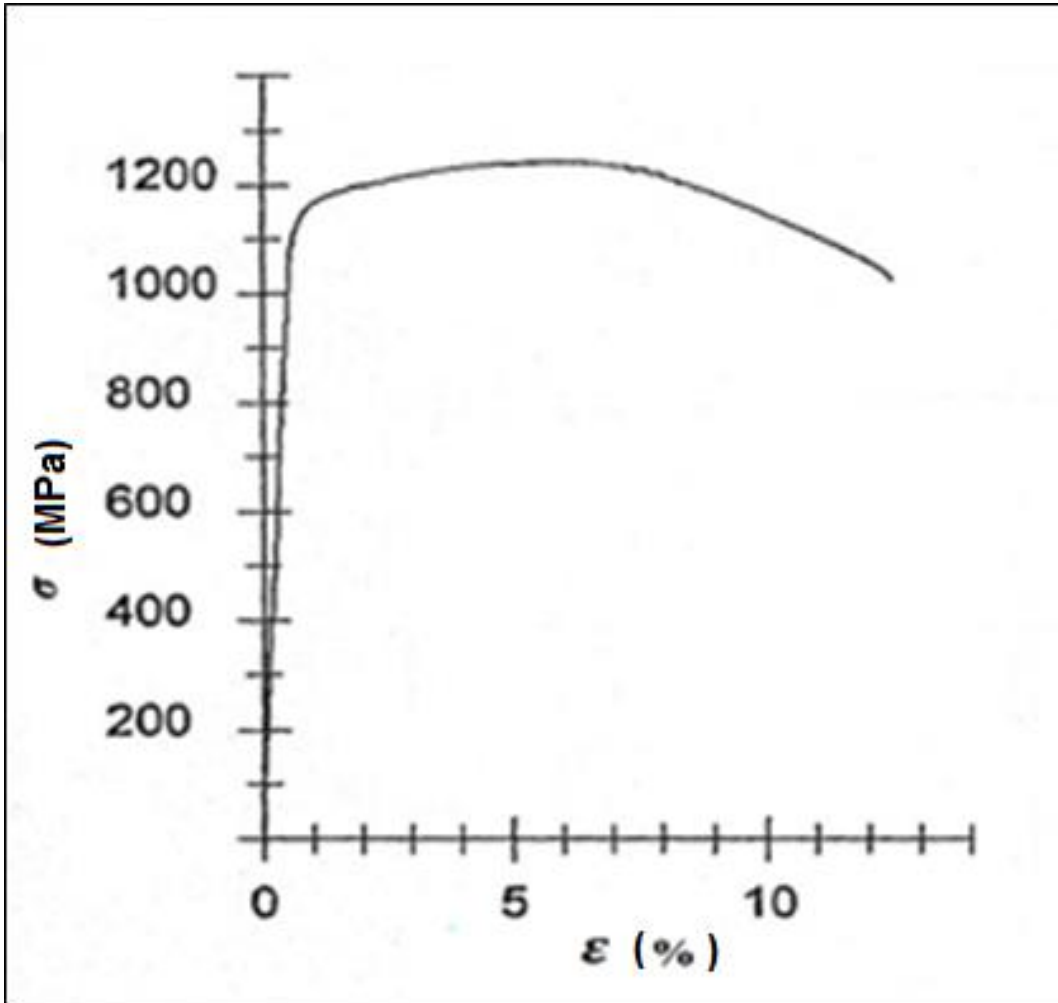
Bauschinger etkisinin varlığı, plastik deformasyonun modellenmesinin oldukça karmaşık bir hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu karmaşanın giderilmesi için Bauschinger etkisinin basitleştirilmiş bir modeli olan ikili doğrusal kinematik pekleşme modeli ortaya atılmıştır (*İng.* Bilinear Kinematic Hardening). Bu modele göre, ters yöndeki akma gerilmesindeki azalma, orijinal yönde akma gerilmesinin ötesine geçirilerek yüklenen numunenin, ilk akma noktasından itibaren gerilme seviyesindeki artışa eşittir (Bkz. Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. İkili Doğrusal (*İng.* bilinear) Kinematik Pekleşme Modeli Gerilme-Gerinim Eğrisi.

2.1.4. Elastik - Doğrusal Olmayan Plastik Malzeme Pekleşme Modeli

Malzemenin tek yönde çekme test ile elde edilmiş gerilme-gerinim eğrilerinin kullanılarak hesaplama yapılması için kullanılan modeldir. Nümerik hesaplamalarda kullanılır. Malzemenin her noktada eşit dağılmış davranış gösterdiği kabul edilir. Elastik bölge doğrusal kabul edilir ancak plastik bölge malzeme özelliklerine göre eğrisellik gösterir (Bkz. Şekil 2.6.).

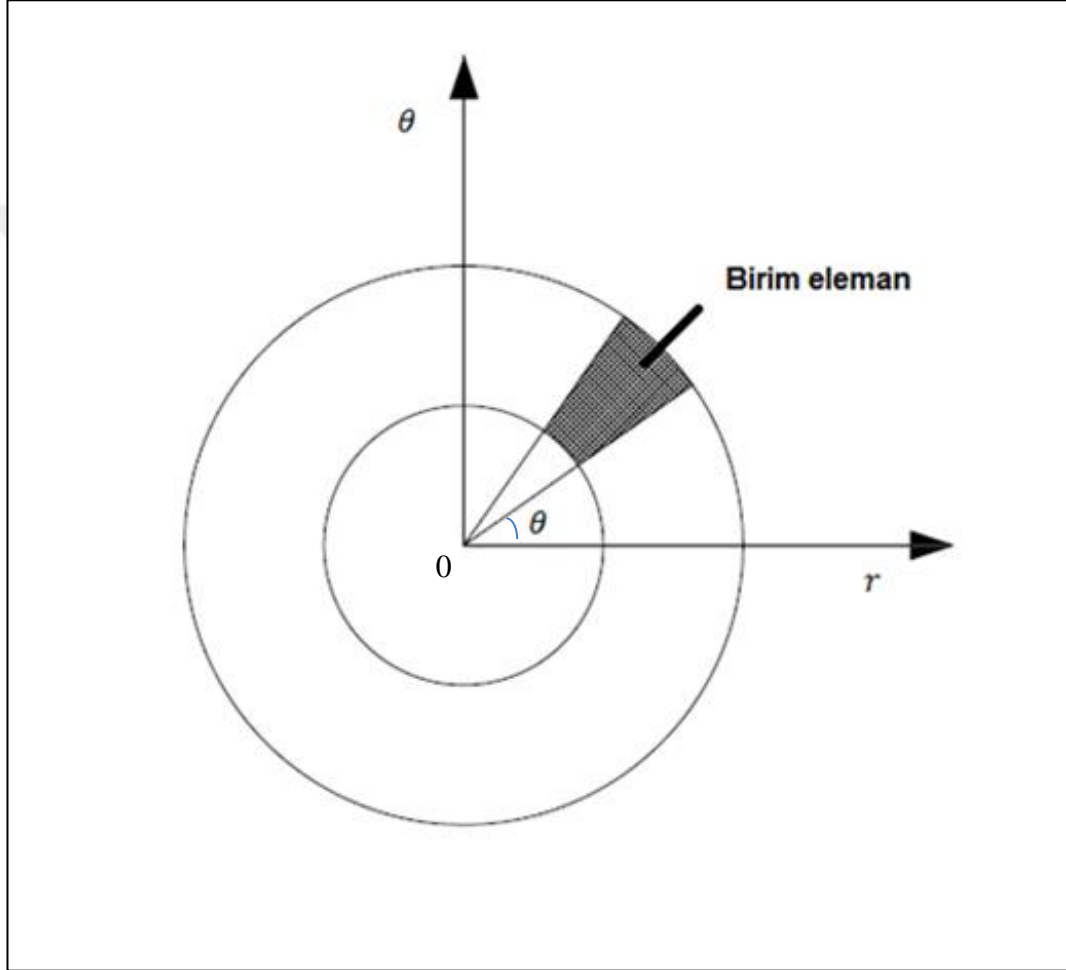


Şekil 2.6. Tek Yönde Çekme Deneyi Gerilme-Gerinim Eğrisi.

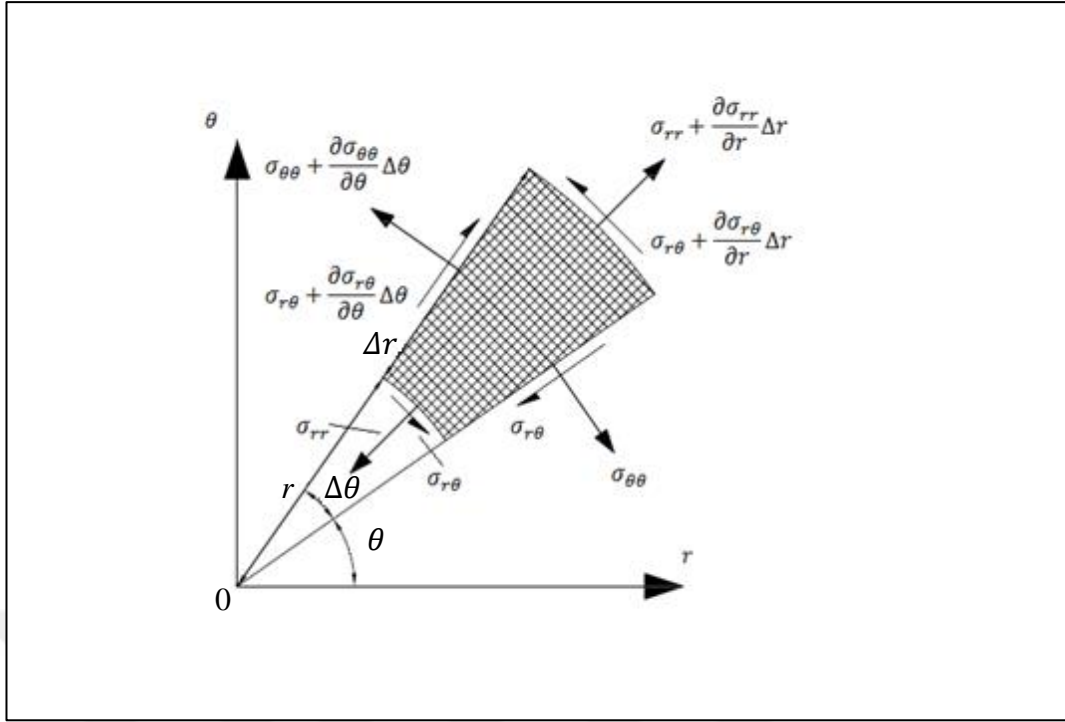
2.1.5. Analitik Yöntem

2.1.5.1. Polar Koordinatlarda Denklemler

Denge durumunu ifade edecek denklemi türetmek üzere üzerinde gerilme oluşmuş birim eleman aşağıda gösterilmiştir (Bkz. Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.).



Şekil 2.7. Polar koordinatlarda silindirik birim eleman.



Şekil 2.8. Birim eleman gerilme durumu.

Radyal yöndeki kuvvetlerin denkleğini yazarsak [4];

$$\sum F_r = \left(\sigma_{rr} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} \Delta r \right) (r + \Delta r) \Delta \theta - \sigma_{rr} r \Delta \theta - \sin \frac{\Delta \theta}{2} \left(\sigma_{\theta\theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \Delta \theta \right) \Delta r - \sin \frac{\Delta \theta}{2} (\sigma_{\theta\theta}) \Delta r + \cos \frac{\Delta \theta}{2} \left(\sigma_{r\theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} \Delta \theta \right) \Delta r - \cos \frac{\Delta \theta}{2} (\sigma_{r\theta}) \Delta r = 0 \quad (2.3)$$

Küçük eleman için $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$ alınır ve iki taraf $\Delta r \Delta \theta$ 'ya bölünürse;

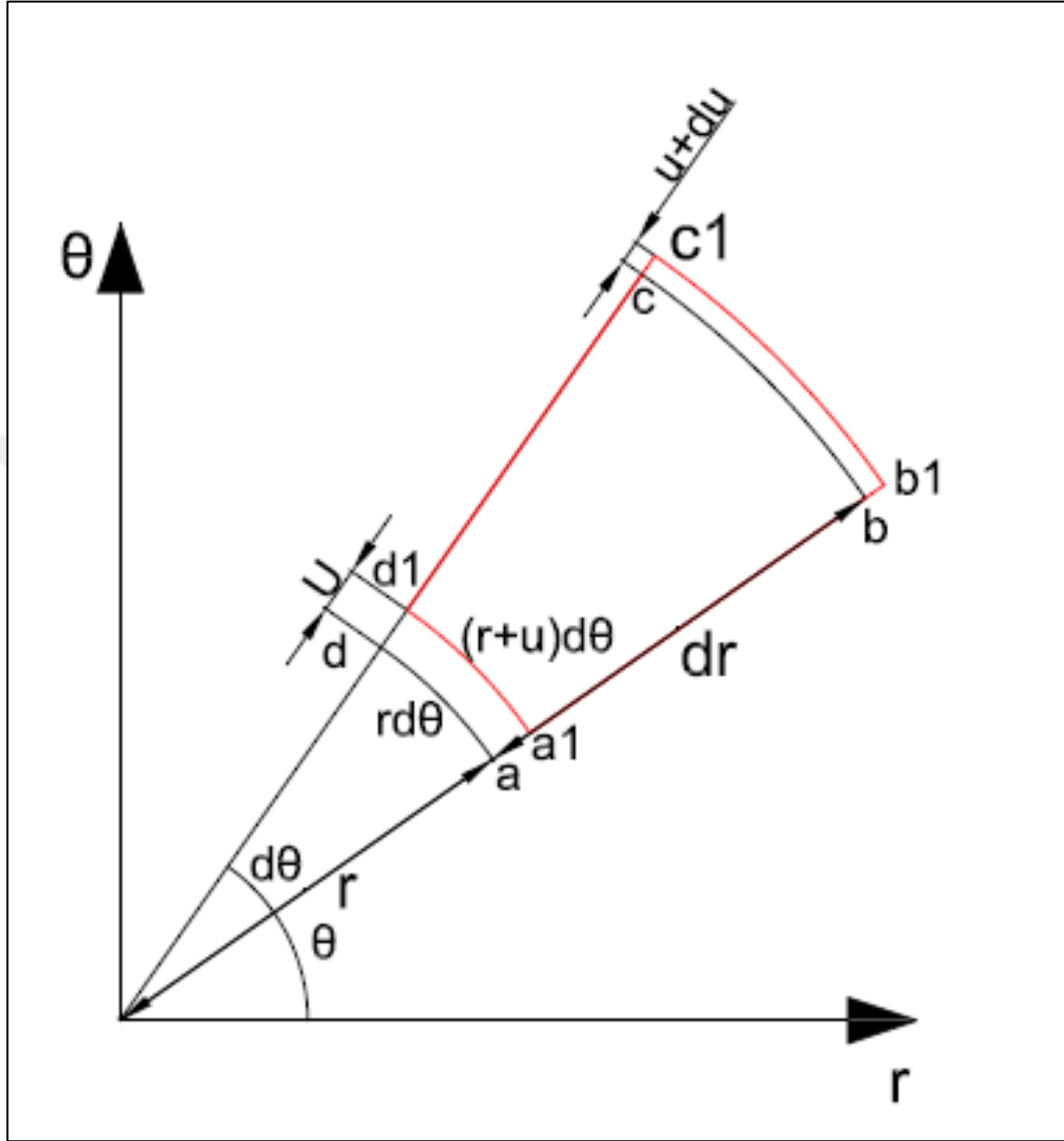
$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} (r + \Delta r) + \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \frac{\Delta \theta}{2} \left(\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} = 0 \quad (2.4)$$

bulunur. Kayma gerilmesinin oluşmadığı kabulü, çok küçük ifadelerin çıkartılması ve indislerin sadeleştirilmesi ile;

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (2.5)$$

elde edilir.

Birim elemandaki gerinimlere bakarsak;



Şekil 2.9. Noktaların yerdeğiştirmesi.

Şekil değiştirme esnasında r yarıçapı u kadar yerdeğiştirirse, a-a1, b-b1 noktasına gelir. Dış yarıçap ise u+du kadar yerdeğiştirdiği kabul edilir ve c ile d noktaları da c1 ve d1 noktalarına yerdeğiştirirler (Bkz. Şekil 2.9.). Bilindiği üzere gerinim son boydan ilk boyu çıkartıp ilk boya bölmek suretiyle elde edilen birimsiz bir orandır. r yönündeki gerinimi yazarsak;

$$\varepsilon_r = \frac{u+du-u}{dr} = \frac{du}{dr} \quad (2.6)$$

ad çizgisinin uzunluğu $rd\theta$ iken a_1d_1 $(r+u)d\theta$ olmuştur. Böylelikle çevresel gerinim;

$$\varepsilon_\theta = \frac{(r+u)d\theta-rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} \quad (2.7)$$

şekinde elde edilir.

Hooke kanununa göre polar koordinatlardaki gerinim-gerilme ilişkisi;

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)) \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)) \quad (2.10)$$

Hooke kanununa göre polar koordinatlardaki gerilme-gerinim ilişkisi;

$$\sigma_r = \frac{E}{(\nu+1)(2\nu-1)} [(\nu-1)\varepsilon_r - \nu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z)] \quad (2.11)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(\nu+1)(2\nu-1)} [(\nu-1)\varepsilon_\theta - \nu(\varepsilon_r + \varepsilon_z)] \quad (2.12)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(\nu+1)(2\nu-1)} [(\nu-1)\varepsilon_z - \nu(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta)] \quad (2.13)$$

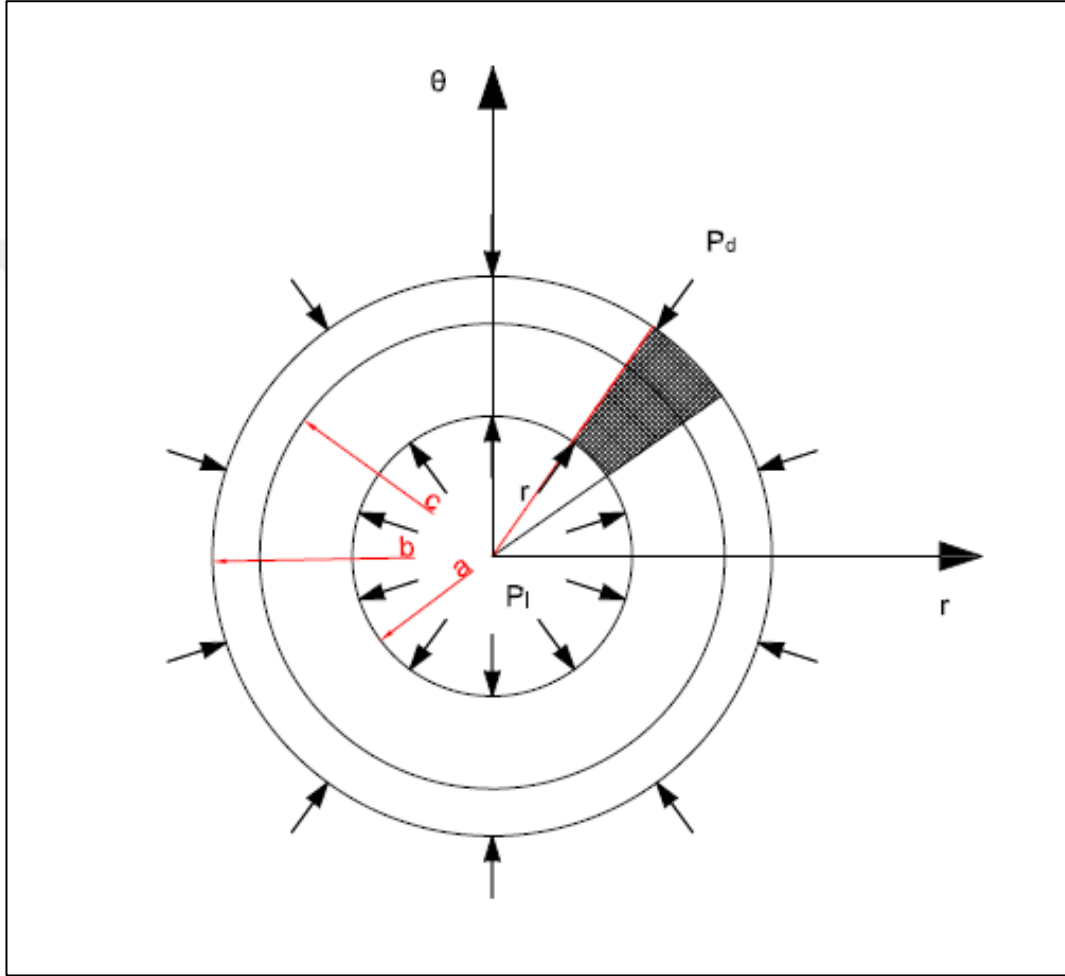
(2.6) ve (2.7) denkleminde gelen sonuç ve Hooke kanunu gerinim denklemleri (2.8) ve (2.9) eşitlenerek, ayrıca Hooke kanunu denklemleri düzlem gerilme durumu için $\sigma_z = 0$, düzlem gerinim durumu için ise $\varepsilon_z = 0$ kabulü yapılacak şekilde kullanılarak yarıçapa bağlı olarak değişen diferensiyel denklem (2.14) elde edilir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (2.14)$$

Bu denklemin çözümü;

$$u = c_1 r + \frac{c_2}{r} \quad (2.15)$$

şeklindedir. (2.15), (2.14) ile düzenlenerek Hooke kanunu denklemlerinde yerine yazılır ve c_1 ve c_2 için iki adet denklem elde edilir.



Şekil 2.10. Silindire yük uygulanması.

Bu iki denklem, borunun içten basınç uygulanması durumu sınır şartı $(\sigma_r)_{r=a} = -P_i$, dıştan basınç uygulanması durumu sınır şartı $(\sigma_r)_{r=b} = -P_d$ olacak şekilde çözümlenir (Bkz. Şekil 2.10.). Basıncın uygulanmaması durumunda ilgili çaptaki sınır şartı sıfır yazılır. Çözülünerek c_1 ve c_2

katsayıları bulunan denklemler tekrar gerilme denklemlerinde yerine yazıldığında iç/dış yarıçap, uygulanan iç/dış basınca bağlı ve yarıçapa göre değişen genel gerilme denklemleri elde edilmiş olur. Bu denklemler Lamé formülasyonu olarak bilinir ve elastik bölgede geçerlidirler.

$$\sigma_r = \frac{P_i a^2 - P_d b^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2}{r^2} \left(\frac{P_i - P_d}{b^2 - a^2} \right) \quad (2.16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_i a^2 - P_d b^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2}{r^2} \left(\frac{P_i - P_d}{b^2 - a^2} \right) \quad (2.17)$$

$$\sigma_z = 2\nu \left(\frac{P_i a^2 - P_d b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (2.18)$$

2.1.5.2. Diğer Analitik Bağlılıklar

Mekanik otofretaj işlemi konuma göre aksel simetrik elastik-plastik temas problemidir (Bkz. Şekil 2.11.). Problemi basitleştirmek için bazı kabuller yapılmıştır;

1. Mekanik otofretaj işlemi basitleştirilerek, mandrel silindirin içinden geçerken oluşturduğu temas basıncı hidrostatik basınç gibi ele alınmış ve hidrolik otofretaj işleminin analitik çözümünde kullanılan denklemlerden yararlanılmıştır.
2. Silindir iç cidarına uygulanan basınç kaldırıldığında, malzemenin gerilme-gerinim grafiğindeki geri dönüş davranışının lineer olduğu varsayılmıştır.
3. Plastik gerinim bileşenlerinin toplamı sıfıra eşittir.

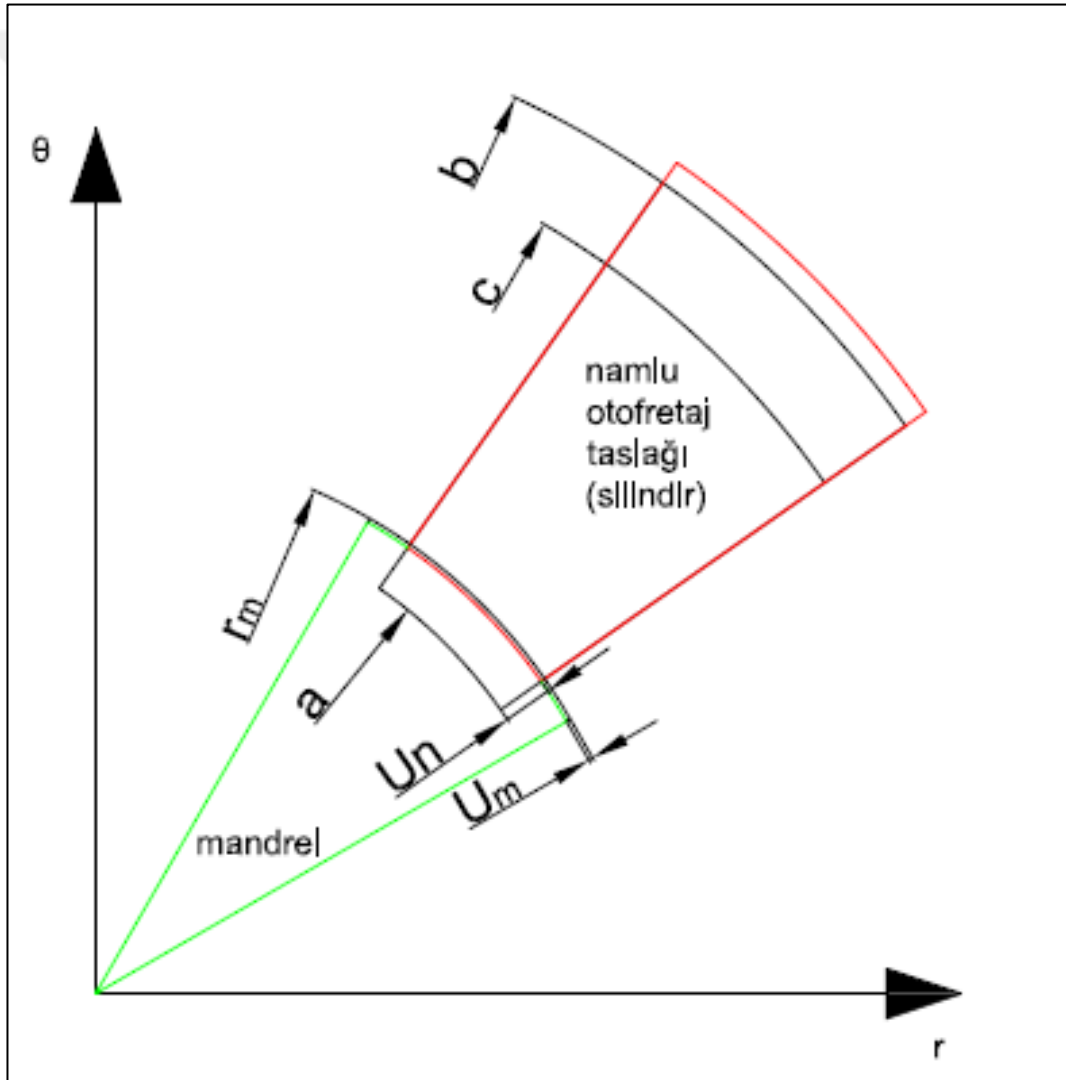
$$\varepsilon_r^p + \varepsilon_\theta^p + \varepsilon_z^p = 0 \quad (2.19)$$

4. Silindir aksel gerinimi ihmal edilerek, silindir düzlem gerinim durumunda olduğu varsayılmıştır ($\varepsilon_z = 0$). Düzlem gerinim durumunda denklem 2.10 düzenlenerek aksel gerilme σ_z aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir. Bu denklemin hem elastik hem de plastik bölgede geçerli olduğu varsayılmıştır.

$$\sigma_z = v(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (2.20)$$

5. Sürtünme modeline göre, sürtünme kuvveti mandrelin silindire uyguladığı temas basıncıyla orantılıdır. Sürtünme katsayısı μ ile gösterilecek olursa, sürtünmeden dolayı oluşacak kayma gerilmesi $(\tau = \sigma_{rz} = \mu\sigma_r)_{r=a}$ olarak ifade edilebilir. Sürtünmeden dolayı yüzeyde oluşan kayma gerilmesinin değeri, diğer gerilme bileşenlerinin yanında çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir.

6. Mandrelin işlem boyunca elastik olarak davrandığı varsayılmıştır.



Şekil 2.11. Otofretaj esnasında mandrel ve silindir.

Namlu otofretaj taslağı ve mandrelin arakesitiyle, elastik-plastik yarıçap arasında matematiksel bir ilişki kurulmak istendiğinde, otofretaj taslağı ve mandrel yarıçapları arasındaki fark;

$$\delta = r_m - a \quad (2.21)$$

Aynı zamanda namlu otofretaj taslağı çevresel genişlemesi ile mandrelin çevresel daralması arasındaki fark olarak da ifade edilir.

$$\delta = u_n - u_m = a(\varepsilon_{\theta_n})_{r=a} - a(\varepsilon_{\theta_m})_{r=a} \quad (2.22)$$

(2.20) eşitliği (2.8) ve (2.9)'da kullanılırsa düzlem gerinim durumunda gerinim bileşenleri elde edilmiş olur.

$$\varepsilon_r = \frac{1+\nu_n}{E_n} [(1 - \nu_n)\sigma_r - \nu_n\sigma_\theta] \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1+\nu_n}{E_n} [(1 - \nu_n)\sigma_\theta - \nu_n\sigma_r] \quad (2.24)$$

Bu denklemler sadece elastik sınırlar içerisinde geçerlidir. Elastik gerilme denklemleri (2.63) ve (2.64)'ü (2.23) ve (2.24) denklemlerinde yerlerine koyarak elastik bölgedeki gerinim ifadelerini elde edilir.

$$\varepsilon_r = (1 + \nu_n) \frac{\sigma_y c^2}{2E_n b^2} \left(1 - 2\nu_n - \frac{b^2}{r^2}\right) \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_\theta = (1 + \nu_n) \frac{\sigma_y c^2}{2E_n b^2} \left(1 - 2\nu_n + \frac{b^2}{r^2}\right) \quad (2.26)$$

Plastik şekil değiştirme için yapılan kabul plastik gerinim değerlerinin toplamının sıfıra eşit olmasıdır. Düzlem gerinim için aksenal gerinim zaten sıfır olduğundan;

$$\varepsilon_r^p + \varepsilon_\theta^p = 0 \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = (\varepsilon_r^e + \varepsilon_\theta^e) + (\varepsilon_r^p + \varepsilon_\theta^p) \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} = \varepsilon_r^e + \varepsilon_\theta^e = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} (\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (2.29)$$

$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$ denklemi aynı zamanda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_r) \quad (2.30)$$

(2.30), (2.29)'de yerine konular ve kayma modülü ve elastisite modülü denklemleri ile birlikte denklem düzenlenirse (2.32) elde edilir.

$$G = \frac{E_n}{2(1+\nu_n)} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} = \frac{1-2\nu_n}{2Gr} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_r) \quad (2.32)$$

Yukarıdaki diferansiyel denklem silindirin hem elastik hem de plastik bölgesinde geçerlidir. (2.32) çözüldüğünde;

$$r \frac{\partial u}{\partial r} + u = \left(\frac{1-2\nu_n}{2G} \right) \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_r) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial(ur)}{\partial r} = \left(\frac{1-2\nu_n}{2G} \right) \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \sigma_r) \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(ur - \left(\frac{1-2\nu_n}{2G} \right) r^2 \sigma_r \right) = 0 \quad (2.35)$$

İki tarafın integrali alınıp sonrasında r^2 'ye bölüldüğünde;

$$ur - \left(\frac{1-2\nu_n}{2G} \right) r^2 \sigma_r = c_1 \quad (2.36)$$

$$\frac{u}{r} - \left(\frac{1-2\nu_n}{2G} \right) \sigma_r = \frac{c_1}{r^2} \quad (2.37)$$

$$\varepsilon_{\theta_n} = \frac{u}{r} = \frac{1-2\nu_n}{2G} \sigma_r + \frac{c_1}{r^2} \quad (2.38)$$

Denklemden $r = b$ için $\sigma_r = 0$ sınır şartını uyguladığımızda (2.39) elde edilir.

$$\left(\varepsilon_{\theta_n} \right)_b = \frac{c_1}{b^2} \quad (2.39)$$

(2.26) silindirin elastik bölgesindeki teğetsel gerinimi vermekteydi. O halde $r = b$ için teğetsel gerinim denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\left(\varepsilon_{\theta_n} \right)_{r=b} = (1 - \nu_n^2) \frac{\sigma_y c^2}{E_n b^2} = (1 - \nu_n) \frac{\sigma_y c^2}{2G b^2} \quad (2.40)$$

(2.39) ve (2.40) eşitlendiğinde c_1 elde edilebilir.

$$c_1 = (1 - \nu_n) \frac{\sigma_y c^2}{2G} \quad (2.41)$$

(2.41), (2.38)'de yerine konulduğunda, otofretaj taslağının teğetsel gerinim denklemi elde edilmiş olur.

$$\varepsilon_{\theta_n} = \frac{u}{r} = (1 - 2\nu_n) \frac{\sigma_r}{2G} + (1 - \nu_n) \frac{\sigma_y c^2}{2Gr^2} \quad (2.42)$$

Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandrel, elastisite modülü yüksek malzemeden imal edilmektedir. Dolayısıyla işlem sırasında silindirik tüp plastik deformasyona uğrarken, mandrelde sadece elastik deformasyon görülmektedir. Mandrelin gerinim denklemlerinin elde edilmesi için yalnız dış basınca maruz kalan silindirik tüpün gerilme denklemlerinden yararlanılacaktır. Dıştan basınçlandırılmış silindirik tüp için türetilen denklemler mandrel için düzenlenirken, (2.16)-(2.17)-(2.18) denklemlerinde iç yarıçap a ve iç basınç P_i sıfır alınır. P_d bu aşamada artık otofretaj basıncı \dot{P} olmaktadır. Mandrel için gerilme denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_r = \sigma_{\theta} = -\dot{P} \quad (2.43)$$

$$\sigma_z = -2\nu_m \dot{P} \quad (2.44)$$

(2.43), (2.24)' de mandrel için kullanılırsa mandrelin teğetsel gerinim denklemi elde edilir.

$$\varepsilon_{\theta_m} = \frac{\dot{P}}{E_m} (2\nu_m - 1)(\nu_m + 1) \quad (2.45)$$

Namlu otofretaj taslağında ikili doğrusal kinematik pekleşme malzeme modeli kullanıldığında (Bkz. Şekil 2.5);

Gerinim pekleşmesinin görüldüğü malzemeler için Tresca akma ölçütü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sigma \quad (2.46)$$

Eşitlik (2.46)'daki σ , plastik deformasyonun herhangi bir anındaki akma gerilmesidir. İkili doğrusal pekleşme modelinde akma gerilmesi, plastik gerinime bağlı olarak lineer şekilde değişmektedir. Eşitlik (2.46), tek eksenli gerilme durumunda ikili doğrusal pekleşme modeli için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma = \sigma_y + E^p \varepsilon^p \quad (2.47)$$

Buradaki E^p gerilme-gerinim grafiğinde plastik bölgenin eğimiyle ilişkili olup, tanjant modülü (H) olarak da adlandırılır. ε^p ise plastik gerinimi ifade etmektedir. Otofretaj işleminde çok eksenli gerilme durumu söz konusudur. Çok eksenli gerilme durumu için eşitlik (2.47) efektif gerinim cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma = \sigma_y + E^p \bar{\varepsilon}^p \quad (2.48)$$

σ 'nın sadece, verilen herhangi bir elemanın birim hacmi başına düşen toplam plastik işe bağlı olduğu varsayılır. Silindirik koordinatlarda birim hacim başına yapılan plastik iş aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$dW^p = \sigma_r d\varepsilon_r^p + \sigma_\theta d\varepsilon_\theta^p + \sigma_z d\varepsilon_z^p \quad (2.49)$$

Çok eksenli gerilme durumunda birim hacim başına yapılan plastik işi, tek eksenli gerilme durumundaki birim hacim başına yapılan plastik işe eşitlersek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma_r d\varepsilon_r^p + \sigma_\theta d\varepsilon_\theta^p + \sigma_z d\varepsilon_z^p = \sigma d\bar{\varepsilon}^p \quad (2.50)$$

Plastik deformasyon sırasında hacmin sabit kalma ilkesi gerinimler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$d\varepsilon_r^p + d\varepsilon_\theta^p + d\varepsilon_z^p = 0 \quad (2.51)$$

Düzlem gerinim durumu için yukarıdaki eşitlikte $d\varepsilon_z^p = 0$ olacağı için, bu durumda eşitlik (2.51) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$d\varepsilon_r^p = -d\varepsilon_\theta^p \quad (2.52)$$

Eşitlik (2.47), eşitlik (2.45)'te yerine konulduğunda aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$(\sigma_\theta - \sigma_r)d\varepsilon_\theta^p = \sigma d\bar{\varepsilon}^p \quad (2.53)$$

$(\sigma_\theta - \sigma_r) = \sigma$ olduğu için yukarıdaki eşitlikten aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$d\bar{\varepsilon}^p = d\varepsilon_\theta^p \quad (2.54)$$

İkili doğrusal pekleşme modeli için eşitlik (2.54) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\bar{\varepsilon}^p = \varepsilon_\theta^p \quad (2.55)$$

Eşitlik (2.55), ikili doğrusal pekleşme modeli için efektif plastik gerininim, teğetsel plastik gerinime eşit olduğunu ifade etmektedir. Eşitlik (2.55), eşitlik (2.48)'de yerine konulursa, iki yönlü doğrusal pekleşme modeli için gerilme-gerinim denklemi elde edilmiş olur.

$$\sigma = \sigma_y + E^p \varepsilon_\theta^p \quad (2.56)$$

2.1.5.3. Plastik Bölgedeki Gerilmeler (Otofretaj esnasında)

Kalın cidarlı silindirdeki (namlu ofofretaj taslağında) plastik teğetsel gerininim ifadesi (2.42)'den (2.24) çıkartılarak elde edilir;

$$\varepsilon_{\theta_n}^p = \varepsilon_{\theta_n} - \varepsilon_{\theta_n}^e = (1 - \nu_n^2) \left[\frac{\sigma_y c^2}{E_n^e r^2} - \frac{\sigma}{E_n^e} \right] \quad (2.57)$$

Eşitlik (2.57) ile verilen plastik teğetsel gerininim ifadesi eşitlik (2.56)'da yerine konulursa eşitlik (2.58) elde edilir.

$$\sigma = \sigma_\theta - \sigma_r = \frac{\sigma_y \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p c^2}{E_n^e r^2} \right]}{\left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} \quad (2.58)$$

(2.5) Denge denkleminde $\sigma_\theta - \sigma_r$ yerine yukarıdaki ifade yazılır ve aradaki işlemler yapılarak [24] plastik bölge için radyal gerilme ifadesi elde edilmiş olur.

$$\sigma_r = \frac{-\frac{\sigma_y}{2} \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + \ln \frac{c^2}{r^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{r^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} \quad (2.59)$$

Plastik bölge için teğetsel gerilme denklemini;

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{\sigma_y}{2} \left[1 + \frac{c^2}{b^2} - \ln \frac{c^2}{r^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} \quad (2.60)$$

Plastik bölgede geçerli olan radyal ve teğetsel gerilme ifadeleri yerlerine konulduğunda plastik bölge için σ_z ifadesi de elde edilmiş olur.

$$\sigma_z = \frac{\nu_n \sigma_y \left[\frac{c^2}{b^2} - \ln \frac{c^2}{r^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \frac{c^2}{b^2} \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} \quad (2.61)$$

Otofretaj basıncı \dot{P} 'nin elde edilmesi için (2.54) eşitliğinden yararlanılır.

$$\dot{P} = \frac{\frac{\sigma_y}{2} \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + \ln \frac{c^2}{a^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{a^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} \quad (2.62)$$

2.1.5.4. Elastik Bölgedeki Gerilmeler (Otofretaj esnasında)

İkili doğrusal pekleşme modelinde silindirin elastik bölgesinde Lamé denklemleri geçerlidir (Lamé denklemlerinde içten basınçlandırma durumunda a yerine c, iç basınç yerine akmayı başlatacak basınç ifadesi

$$P_i = \frac{\sigma_y}{2} \left(1 - \frac{c^2}{b^2} \right) \text{ yazılarak aşağıdaki denklemler bulunur.}$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_y}{2} \left(-\frac{c^2}{r^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) \quad (2.63)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_y}{2} \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) \quad (2.64)$$

$$\sigma_z = \nu \sigma_y \frac{c^2}{b^2} \quad (2.65)$$

2.1.5.5. Otofretaj Esnasında Oluşan Elastik - Plastik Yarıçapın Belirlenmesi

(2.42) ve (2.45) ile verilen ε_{θ_n} ve ε_{θ_m} ifadeleri $r=a$ için (2.21)'da yerlerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \delta &= r_m - a \\ &= (1 - \nu_n) \frac{\sigma_y c^2}{2Ga} - a(1 - 2\nu_n) \frac{\dot{P}}{2G} - \frac{\dot{P}}{E_m^e} a(2\nu_m - 1)(\nu_m + 1) \end{aligned} \quad (2.66)$$

Yukarıdaki denklemde yapılacak basit bir ardışık yaklaştırma işlemi ile elastik-plastik yarıçap elde edilebilir. Bu işlem ilgili eklerde de tanımlanmıştır. Denklemin solu değişmezken (ilk hâldeki mandrel ve silindir yarıçapları), sağ tarafta a belli bir aralıkta değiştirilirken c de a 'dan b 'ye doğru hassas değiştirilmek sureti ile denklemin sağ ve solu birbirine 0.0001'den az olacak şekilde eşitlendiğinde bulunan c değeri plastik-elastik geçiş çapı olarak bulunmaktadır (Bkz. EK-1). Böylelikle mandrel ve silindirin parametreleri doğrultusunda genişleme ve daralma miktarları mandrel ve silindire dağıtılmış olmaktadır.

2.1.5.6. Otofretaj Sonrası Plastik Bölgedeki Kalıntı Gerilmeler

Kaynaklardan taranan farklı kalıntı gerilme hesaplama formülasyonları;

1. Set formülasyon [5]

$$\sigma_r^{Rp} = \frac{-\frac{\sigma_y}{2} \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + \ln \frac{c^2}{r^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{r^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} - \left(\frac{\dot{P} a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.67)$$

$$\sigma_\theta^{Rp} = \frac{\frac{\sigma_y}{2} \left[1 + \frac{c^2}{b^2} - \ln \frac{c^2}{r^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} - \left(\frac{\dot{P} a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.68)$$

$$\sigma_z^{Rp} = \frac{\nu \sigma_y \left[\frac{c^2}{b^2} - \ln \frac{c^2}{r^2} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \frac{c^2}{b^2} \right]}{1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e}} - 2\nu_n \left(\frac{\dot{P} a^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (2.69)$$

2. Set formülasyon [6]

$$\sigma_r^{Rp} = \sigma_y \left[\left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \left(\frac{\rho^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{c}{a} \right) + \left(\frac{\rho^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{c}{a} \right) \right] \quad (2.70)$$

$$\sigma_\theta^{Rp} = \sigma_y \left[\left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \left(\frac{\rho^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{c}{a} \right) + \left(\frac{\rho^2 + b^2}{2b^2} - \ln \frac{c}{a} \right) \right] \quad (2.71)$$

3. Set formülasyon [7]

$$\sigma_r^{Rp} = \sigma_y \left[\frac{\left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + 2 \ln \frac{c}{a} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{a^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{2(k^2 - 1) \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} \right] - \sigma_y \left[\frac{1 - \frac{c^2}{b^2} + 2 \ln \frac{c}{a} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{r^2} - \frac{c^2}{b^2} \right)}{2 \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} \right] \quad (2.72)$$

$$\sigma_\theta^{Rp} = -\sigma_y \left[\frac{\left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + 2 \ln \frac{c}{a} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{a^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{2(k^2 - 1) \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} \right]$$

$$+\sigma_y \left[\frac{1 - \frac{c^2}{b^2} + 2 \ln \frac{c}{r} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{r^2} - \frac{c^2}{b^2} \right)}{2 \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} \right] \quad (2.73)$$

$$k = \frac{b}{a} \quad (2.74)$$

2.1.5.7. Denklemlerin Von Mises Kriterine Göre Kullanılması

Yukarıdaki denklemler Tresca akma ölçütüne göre türetilmiştir. Von Mises ölçütünün matematiksel ifadesinin karmaşık yapısından dolayı, denklemlerin Von Mises ölçütüne göre türetilmesi oldukça zordur. Kolaylık sağlaması açısından Von Mises ölçütü aşağıdaki formda ifade edilebilir.

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \quad (2.75)$$

2.1.5.8. Otofretaj Sonrası Elastik Bölgedeki Kalıntı Gerilmeler

1. Set formülasyon [5]

$$\sigma_r^{Re} = \frac{\sigma_y}{2} \left(-\frac{c^2}{r^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) - \left(\frac{\dot{p}a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.76)$$

$$\sigma_\theta^{Re} = \frac{\sigma_y}{2} \left(\frac{c^2}{r^2} + \frac{c^2}{b^2} \right) - \left(\frac{\dot{p}a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.77)$$

$$\sigma_z^{Re} = \nu_n \sigma_y \frac{c^2}{b^2} - 2\nu_n \left(\frac{\dot{p}a^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (2.78)$$

2. Set formülasyon [6]

$$\sigma_r^{Re} = \sigma_y \left[\left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \left[\frac{c^2}{2b^2} + \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{c^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{c}{a} \right) \right] \right] \quad (2.79)$$

$$\sigma_{\theta}^{Re} = \sigma_y \left[\left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \left[\frac{c^2}{2b^2} + \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{c^2 - b^2}{2b^2} - \ln \frac{c}{a} \right) \right] \right] \quad (2.80)$$

3. Set formülasyonu [7]

$$\sigma_r^{Re} = \frac{\sigma_y \left(\frac{b^2}{r^2} - 1 \right) \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + 2 \ln \frac{c}{a} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{a^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{2(k^2 - 1) \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} - \frac{\sigma_y c^2 (b^2 - r^2)}{2b^2 r^2} \quad (2.81)$$

$$\sigma_{\theta}^{Re} = \frac{-\sigma_y \left(\frac{b^2}{r^2} + 1 \right) \left[1 - \frac{c^2}{b^2} + 2 \ln \frac{c}{a} + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \left(\frac{c^2}{a^2} - \frac{c^2}{b^2} \right) \right]}{2(k^2 - 1) \left[1 + (1 - \nu_n^2) \frac{E_n^p}{E_n^e} \right]} + \frac{\sigma_y c^2 (b^2 + r^2)}{2b^2 r^2} \quad (2.82)$$

2.1.5.9. Servis Basıncında Oluşan Gerilmeler

Otofretaj görmüş kalın cidarlı silindirler, kullandıkları alanlara göre farklı çalışma basınçlarına maruz kalmaktadır. Silindirik kabın emniyetli bir şekilde görevini icra edebilmesi için, kullanım esnasında silindir iç cidarından uygulanan basıncın plastik deformasyona sebep olmaması gerekir. Uygun bir basınçlı kap tasarımının yapılabilmesi için, ofofretaj gördükten sonra çalışma basıncına maruz kalan silindirik kabın gerilme dağılımının bilinmesi gerekir. Otofretaj eniyilemesi çalışma basıncı uygulanması ile oluşan gerilme dağılımı üzerinden yapılır.

Çalışma basıncına maruz kalan kalın cidarlı silindirik kaplarda oluşan gerilmeler, \ddot{P} servis basıncının (Bu çalışma için en fazla 400 MPa kullanılmıştır.) ürettiği elastik gerilmeler ile ofofretaj işlemiyle oluşturulmuş kalıntı gerilmelerin toplanması ile elde edilir.

$$\sigma_{toplam} = \sigma_{servis} + \sigma_{kalıntı} \quad (2.83)$$

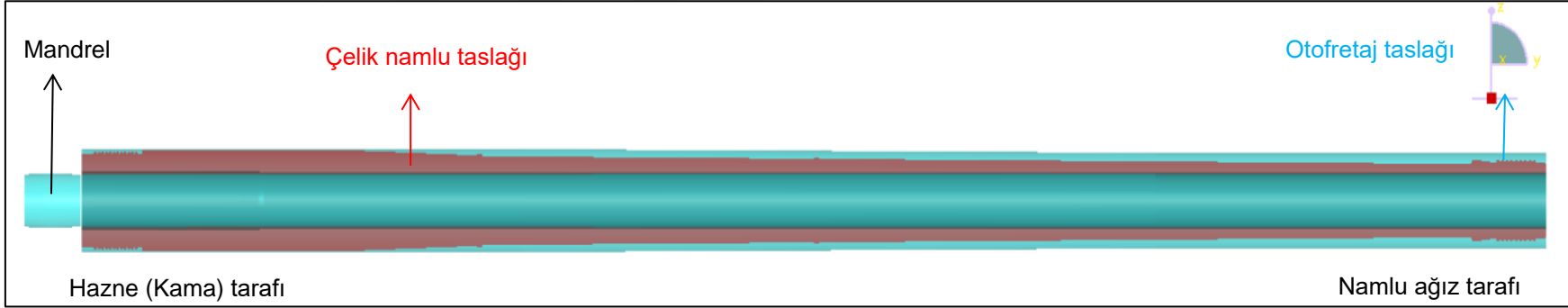
$$(\sigma_r)_{servis} = \left(\frac{\ddot{P} a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.84)$$

$$(\sigma_{\theta})_{servis} = \left(\frac{\dot{p}a^2}{b^2-a^2} \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.85)$$

$$(\sigma_z)_{servis} = 2\nu \left(\frac{\dot{p}a^2}{b^2-a^2} \right) \quad (2.86)$$

2.1.6. Halihazırdaki Otofretaj İşlemi

Namlu üretilmesi için hazırlanmış silindirik çelik çubuğun içerisine delik delinir. Talaşlı imalat ile ofofretaj taslağı ölçülerine getirilir (Bkz. Şekil 2.12. - Mavi boyalı durum). Sonrasında bu taslağın içerisinden bir mandrel geçirilerek ofofretaj işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem sonrasında yiv-set işleme ve dış kısmın son ölçüsüne getirilmesi ile çelik namlu taslağı oluşturulmuş olur (Bkz. Şekil 2.12. - Kırmızı boyalı durum).



Şekil 2.12. Otofretaj ve çelik namlu taslağı gösterimi.

39



Şekil 2.13. Otofretaj taslağı bölümleri.

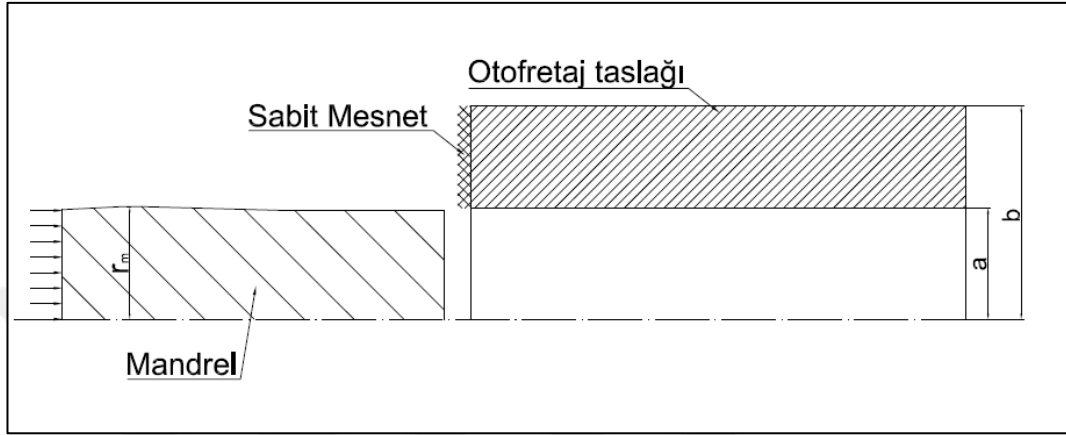
Namlu boyunca en fazla kalıntı gerilme oluşturulması için otofretaj işleminin en iyileştirilmesi ile otofretaj taslağının ölçülendirilmesi hedeflenmiştir. Otofretaj taslağının ölçülendirilmesi sonrası otofretaj işlemi sırasında oluşan kalıntı gerilmeler tespit edilerek bu değerler çelik namlu taslağında kaldırılabilir en fazla talaş miktarının ve kompozit uygulama bölgelerinin tespit edilmesinde kullanılacaktır.

Çizelge 2.1. Otofretaj taslağı ölçüleri.

	Uzunluk Aralığı	İç/Dış Çap Oranı
BÖLGE	(mm)	(mm/mm)
A	0-950	0.517
B	950-2310	0.520→0.562
C	2310-3150	0.562

Yukarıdaki şekil (Bkz. Şekil 2.13.) ve tabloda (Bkz. Çizelge 2.1.) otofretaj eniyilemesi yapılmadan önce fabrikada uygulanan otofretaj modelidir. Verilen ölçüler namlu boyuna göre ayarlanmış ölçülerdir. A bölgesinde iç çap ve dış çap sabittir (İç/dış çap oranı 0.517). B bölgesinde iç çap bir noktada konik olarak bir miktar büyümekte ve sonraki bölümde sabit kalırken, dış çap bir bölgede konik olarak azalmaktadır. C bölgesinde tekrar sabit çaplar uygulanmaktadır. Fabrikada otofretaj işlemi için A ve C bölgesinin boyları da bir miktar farklılık göstermektedir. Otofretaj tezgâhına otofretaj taslağının bağlanabilmesi için her iki ucunda fazladan paylar bırakılmaktadır. Bu durumda taslak boyu 3660 mm'ye kadar uzamaktadır. Ancak bu kısımlar işlem sonrasında kesilerek namlu boyuna erişilmektedir. Namlu boyuna kesildiği varsayılan otofretaj taslağının (L=3150 mm) teorik ağırlığı 475 kg'dır.

Yukarıdaki anlatımdan da anlaşılacağı üzere otofretaj taslağı 3 bölümden oluşmakta ve her bölgesinde farklı δ yerdeğiştirme değerleri veya oranları kullanılmaktadır.



Şekil 2.14. Otofretaj işlemi şematik gösterimi.

Mekanik otofretaj işlemi için otofretaj taslağı bir ucundan otofretaj tezgâhına bağlanır ve sabitlenir. Sabit mesnet otofretaj taslağını sadece eksen doğrultusunda hareket etmesini engeller, radyal yönde genişmesine izin verir. Mandrel, eksen doğrultusunda kuvvet uygulanarak taslağın bir ucundan diğerine doğru zorlanarak taslağın içerisinden geçirilir ve işlem tamamlanır (Bkz. Şekil 2.14.).

Otofretaj eniyilemesi çalışmasında;

Namlunun tamamında en fazla kalıntı gerilme oluşturmak için; hâlihazırda uygulanan 3 farklı bölge oluşturmak sureti ile otofretaj uygulamak yerine her bölgede eşit ve en iyileştirilmiş ölçülerin kullanılması kararlaştırılmıştır.

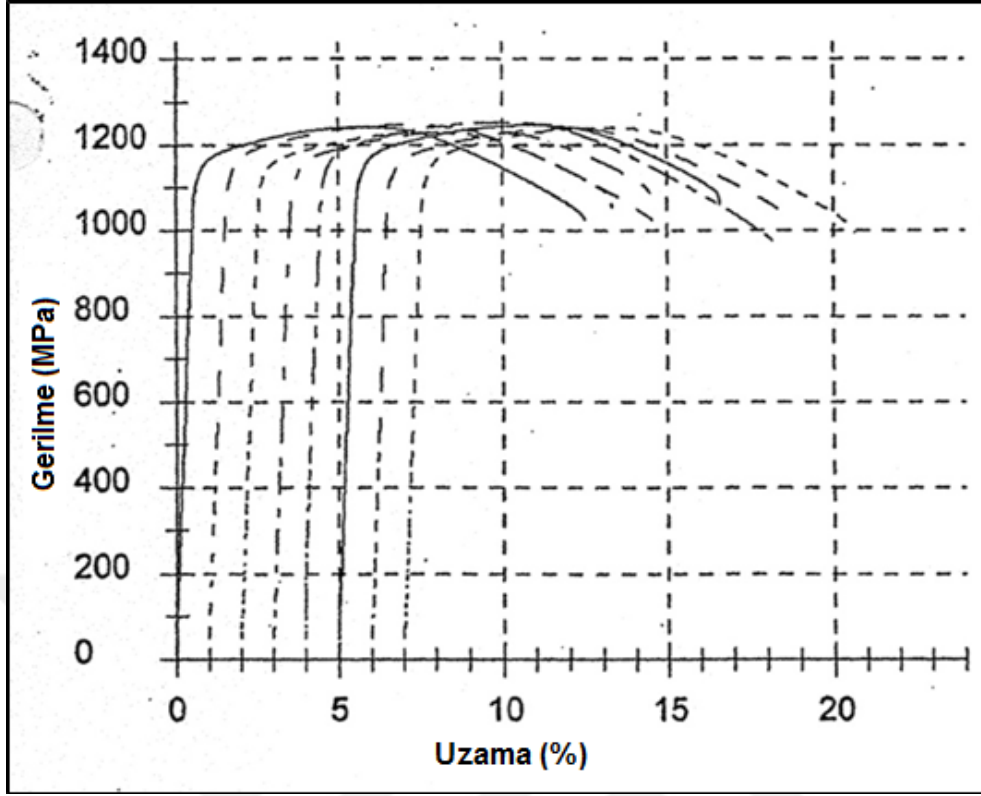
Dış yarı(çap) ve mandrel yarı(çap)ı sabit kabul edilmiş, farklı otofretaj taslağı içi yarı(çap)ı-mandrel yarı(çap)ı arakesit yüzde oranları için hesaplamalar yapılarak otofretaj taslağının en uygun içi çap ölçüsü tespit edilmiştir.

$$\% \text{ arakesit} = \left(\frac{r_m}{a} - 1 \right) \times 100 \quad (2.87)$$

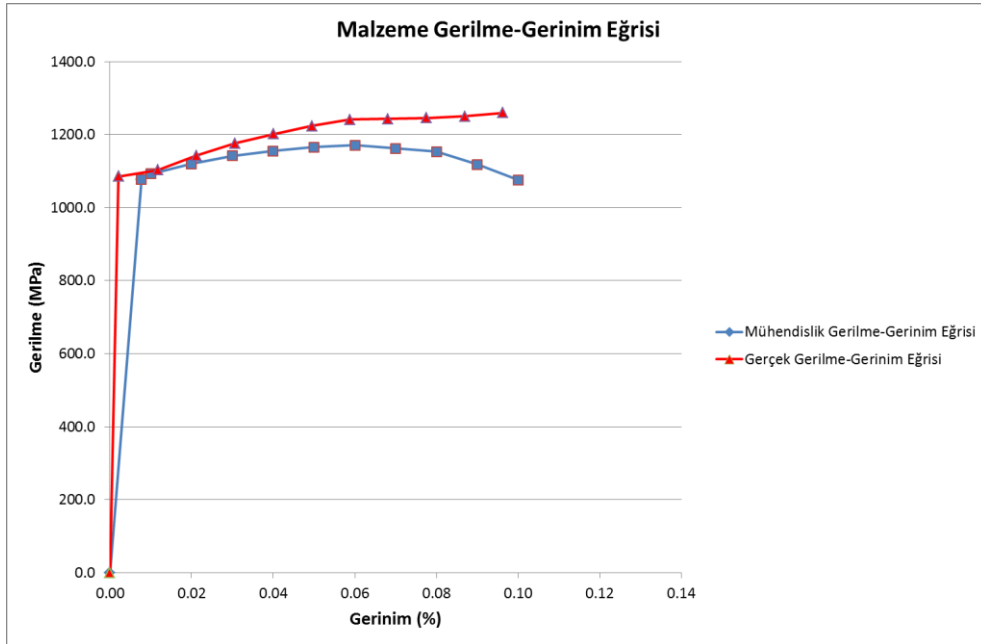
Namlu malzemesi DIN 35NiCrMoV12.5 evsafında düşük alaşımlı, yüksek dayanımlı çeliktir. Aynı zamanda namlu çeliği olarak da bilinir. Yaklaşık karşılığı AISI 4340'tır. Analitik ve Nümerik hesaplarda kullanılmak üzere malzemenin tek yönde çekme deneyi eğrileri (Bkz. Şekil 2.15. ve Şekil 2.16.) ve bu eğrilerin çözümlenmesi ile elde edilen veriler aşağıda verilmiştir (Bkz. Çizelge 2.2.). Mandrel ise tungstendir (*İng.* Wolfram Carbure). Namlu ve mandrelin malzeme özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Bkz. Çizelge 2.2.).

Çizelge 2.2. Malzeme özellik tablosu.

Özellik	Namlu Malz. Numune 1	Namlu Malz. Numune 2	WC
E^e (GPa)	179.0	141.0	450.0
ν	0.280	0.280	0.285
σ_y (MPa)	1142.46	1086.01	-
E^p (GPa)	2.8324	2.3619	-



Şekil 2.15. Namlu çeliği tek eksenli çekme deneyi sonuç eğrileri.



Şekil 2.16. Namlu Malzemesi Numune 2'nin Mühendislik ve Gerçek gerinim-gerilme eğrileri.

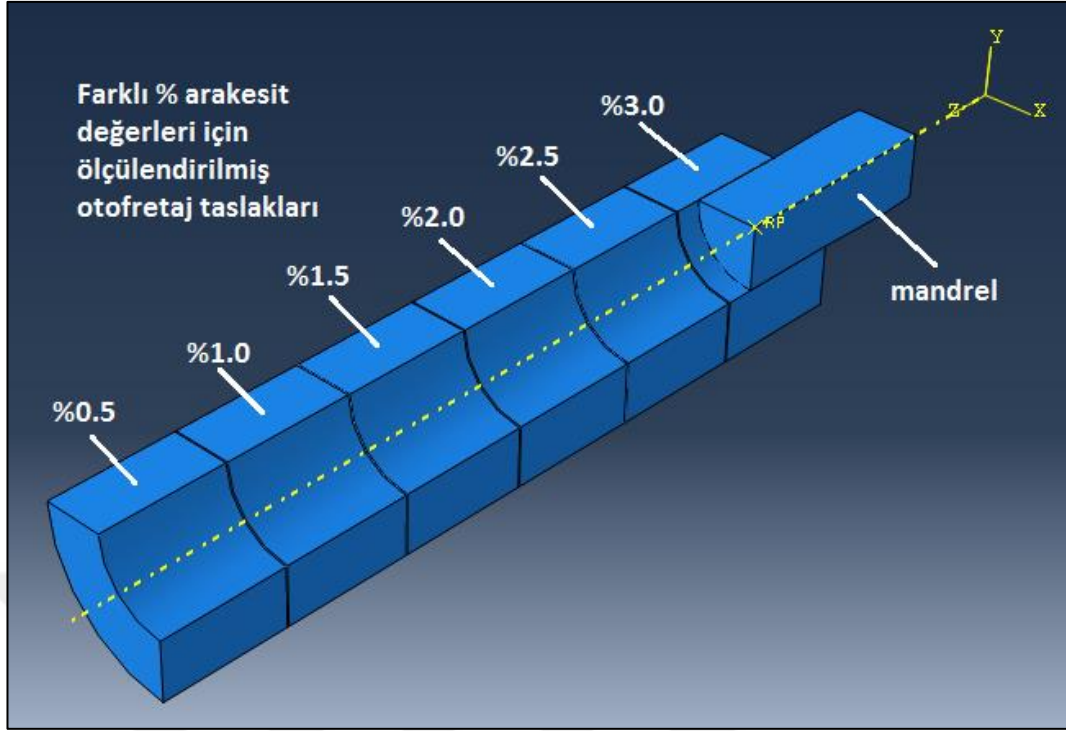
2.1.7. Analitik Yöntemin Uygulanması

Otofretaj eniyilemesi hesabı namlunun zorlanabileceği (tasarım basıncı) en yüksek değer olan 400 MPa servis basıncı değeri kullanılmak sureti ile yapılmıştır. Servis basıncı uygulandığında en yüksek eşdeğer gerilme değerleri elastik-plastik geçiş yarı(çap)ında (tüpün iç yarı(çap)ından dış yarı(çap)ına doğru gidildikçe bir yarı(çap) değerinde malzeme davranışı plastikten elastığe dönüşmektedir) gerçekleşmektedir. %0.5-3.0 arasındaki farklı yüzde arakesit değerleri kullanılarak eş değer gerilmenin en az değeri aldığı yüzde değeri, dolayısı ile ofofretaj taslağı iç yarıçapı a tespit edilmiştir. Otofretaj Eniyileme işlemi analitik olarak EK-1'deki analitik hesaplamaları yapan yordam kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yordam her bir farklı arakesit yarı(çap)ı için önce mandrel ve tüpün geometrik ölçüleri ile malzemenin elastik ve plastik bölgedeki değerlerini kullanmak sureti ile ofofretaj basıncını ve plastik elastik geçiş yarıçapını hesaplamaktadır. Sonrasında işletme basıncı için eşdeğer gerilme değerlerini hem Tresca hem de Von Mises ölçütleri için hesaplamaktadır. Böylelikle farklı arakesit yüzde değerleri için en düşük eşdeğer gerilme değeri tespit edilmiş olmaktadır. Farklı arakesit değerleri için hesapladığı değerlerin grafiğini çizmektedir. Eşdeğer gerilmenin en az değerini aldığı yer, ofofretajın uygulanabileceği optimum tüp iç yarı(çap)ının tespit edildiği yerdir (Bkz. Şekil 3.1.).

Numune 1 ve numune 2 için elde edilmiş ve ofofretaj eniyilemesinde kullanılan Eşdeğer Gerilme/Akma Gerilmesi değerleri Tresca ve Von Mises değerlendirme ölçütleri çerçevesinde Araştırma Bulguları Bölümünde Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

2.1.8. Nümerik Yöntem

Yukarıda tarif edilen modele göre gerçekleştirilmiş analitik hesapları teyit etmek üzere nümerik hesaplamalar da gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla farklı % arakesit değerleri için üç boyutlu $\frac{1}{4}$ kesit hesaplama modeli oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 2.17.).

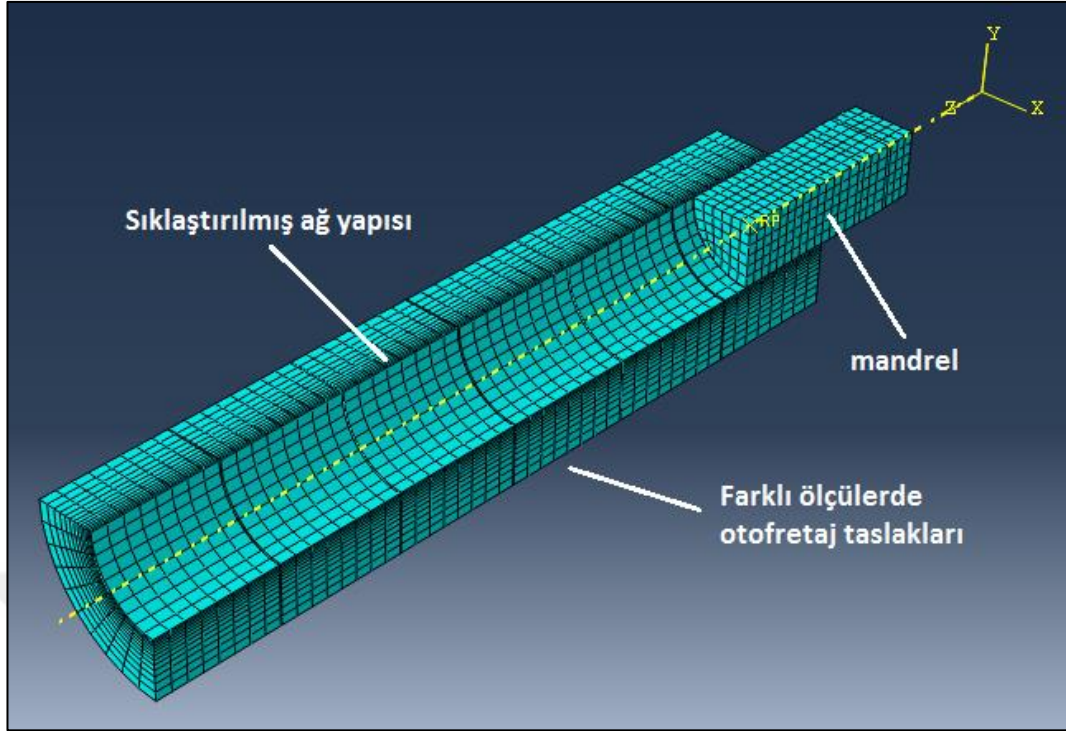


Şekil 2.17. Farklı % arakesit oranları için ölçülendirilmiş ¼ kesit nümerik model.

Otofretaj taslaklarının malzemesi önce elastik-doğrusal plastik daha sonra ise elastik-doğrusal olmayan plastik pekleşme modelini kullanmaktadır. Mandrel malzemesi için sadece elastik malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

Sürtünme katsayısı için yukarıda yapılmış kabuller ve tez dönem çalışmalarında yapılan tespitler çerçevesinde ve otofretaj işlemi sırasında mandrel ve taslağın yağlandığı da göz önünde bulundurularak 0.015 sürtünme katsayısı değeri kullanılmıştır.

Her parça şekil değiştirebilir özellikte modellenmiş ve C3D8R (üç boyutlu 8 nodlu indirgenmiş integrasyon elemanı) elemanlar ile yapı oluşturulmuştur. Ağ yapısı gerilmelerin yüksek olduğu ve hesaplamaların daha hassas yapılması istenilen taslak iç çapına yakın bölgelerde daha sık elemanlar ile örülmek sureti ile oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 2.18.). Uygun eleman büyüklüğü ve hesaplama zamanı için hassasiyet (*Ing. sensitivity*) analizleri gerçekleştirilmiştir.

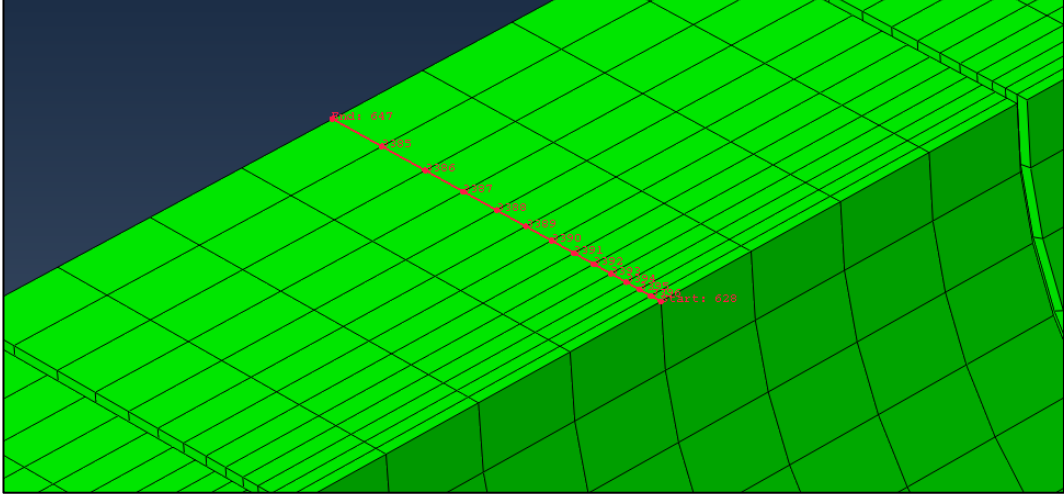


Şekil 2.18. Otofretaj eniyilemesi için numerik hesaplama modeli ağ yapısı.

Otofretaj taslaklarının her biri Şekil 2.17.'de, Şekil 2.14.'te gösterildiği gibi bir taraflarından eksen doğrultusunda hareket etmeyecek şekilde ve radyal yönde serbest bırakılarak mesnetlenmiştir. $\frac{1}{4}$ kesit kullanıldığından simetri düzlemleri ve sınır şartları uygun şekilde tanımlanmıştır [8].

Hesaplama iki aşamalı olarak değerlendirilmiş, birinci aşamada otofretaj işlemini hesaplayacak şekilde mandrel taslakların içerisinde geçirilmiş ve kalıntı gerilmelerin oluşturulması sağlanmış, ikinci aşamada analitik hesaplara benzer şekilde 400 MPa servis basıncı taslak iç çap bölgesine uygulanmıştır. Bu şekilde hem otofretaj hem de kullanım şartlarındaki gerilme dağılımı elde edilmiştir.

Her bir taslak kesiti için hesaplama sonuçlarını eğri haline getirmek üzere taslaklara cidar kalınlıkları boyunca algılayıcı (*ing. probe*) tanımlanmıştır. Tüm hesaplama sonuçları her bir taslak için boylarının orta noktalarında cidarları boyunca tanımlanmış algılayıcılar vasıtası ile elde edilmiştir (Bkz. Şekil 2.19.).



Şekil 2.19. Veri toplama için algılayıcı yerleştirilmesi.

Hesaplamalar sonucu elde edilen ve düzenlen bulgular Araştırma Bulguları Bölümü Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'te verilmiştir.

Gerçekleştirilen otofretaj eniyileme çalışmalarından elde edilen ve değerlendirilen bulgulara göre karar verilen ölçüler, fabrikada gerçekleştirilen otofretaj işleminde kullanılmıştır.

2.1.9. Eniyilenmiş Otofretaj İşleminin Gerçekleştirilmesi

Aşağıda, MKE Kurumu Ağır Silah ve Çelik Fabrikası'nda analitik ve nümerik hesaplar yardımı ile ölçülendirilmiş otofretaj taslağı için gerçekleştirilen otofretaj işlemi anlatılmıştır.

Malzeme temini: Namlu çeliği Asil Çelik Fabrikasından temin edilmektedir.



Şekil 2.20. Namlu çeliği temini.

Temin edilen çelik malzeme dövme işlemine tabi tutulur ve boyu uzatılır. Dövme işlemi malzemenin fiziksel özelliklerinin de iyileşmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 2.21. Namlu otofretaj taslağı dövme işlemleri sonrası görüntüsü.

Dövme işlemleri sonrasında taslağa iç delik delinir ve ısı işlemleri öncesi çap değerlerine işlenir.



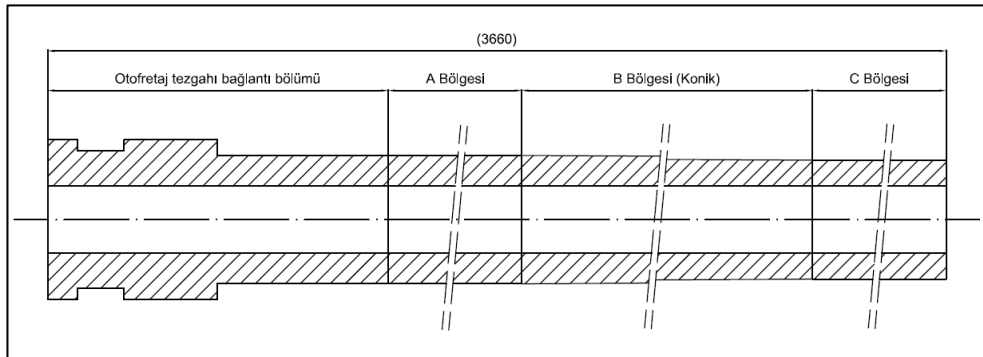
Şekil 2.22. Dövme işlemleri sonrası iç deliği delinmiş ve dış ölçüleri ısı işlemleri için hazırlanmış namlu otofretaj taslağı.



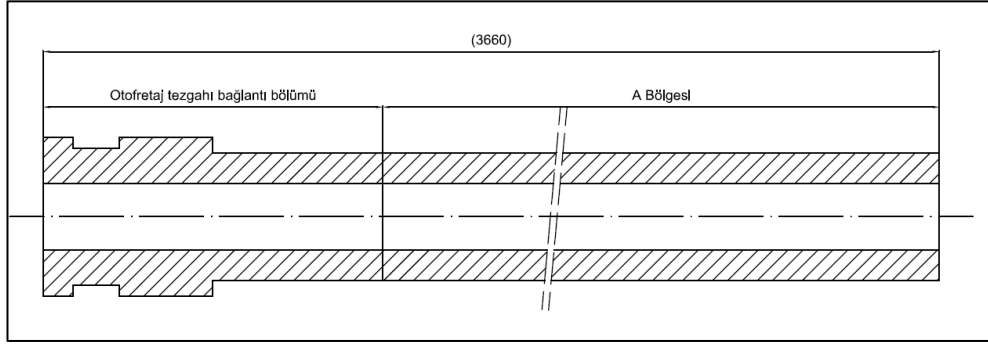
Şekil 2.23. Isıl işlem öncesi namlu ofofretaj taslağı yandan görüntüsü.

Isıl işlemden sonra ofofretaj işlemi için bu çalışma kapsamında belirlenmiş dış ve iç çaplar kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar ve değerlendirmeler çerçevesinde oluşturulmuş ofofretaj taslağı teknik resmi uygulanmak üzere Ağır Silah ve Çelik Fabrikası Müdürlüğü'ne teslim edilmiştir.

Daha önce üç kademeli olarak işlenen taslak tek kademede işlenmek üzere talaşlı imalata gönderilmiştir.



Şekil 2.24. Üç kademeli işlenmiş hâlihazırda kullanılan namlu ofofretaj taslağı ölçüleri.



Şekil 2.25. Proje kapsamında belirlenmiş tek kademeli namlu ofofretaj taslağı ölçüleri.

Gelinen noktada yukarıdaki ölçüleri işlenmekte olan taslak görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.26. Otofretaj tezgahına bağlantı yerleri işlenmiş ve diğer ölçülerine işlenecek namlu ofofretaj taslağı.

19 Haziran 2015 tarihinde namlu taslağının otofretaj işlemi yapılmak üzere talaşlı imalatı bitirilmiş ve otofretaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda otofretaj işlemi gerçekleştirilme aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Otofretaj tezgâhına bağlantı yerleri ve diğer ölçülerine işlenerek otofretaj işlemine hazırlanmış otofretaj taslağı (Namlu ağzı tarafı).



Şekil 2.28. Otofretaj tezgâhına bağlantı yerleri ve diğer ölçülerine işlenerek otofretaj işlemine hazırlanmış otofretaj taslağı (Hazne-Tezgâha bağlantı tarafı).



Şekil 2.29. Mekanik otofretaj tezgâhı genel görüntüsü (Solda) ve namlu otofretaj taslağı tezgâh bağlantı mekanizması (Sağda).

İşlem öncesinde namlu yağ kalıntılarından temizlenmekte, fosfat kaplanmakta ve yağlanmakta, mandrel sabit sıcaklıkta bir süre tutulmaktadır. Bu işlemler otofretaj işlemi esnasında oluşacak kuvvetlerin azaltılması ve işlemin kolaylaştırılması amacıyla yapılmaktadır.



Şekil 2.30. Yağ kalıntılarından temizlenmekte olan namlu otofretaj taslağı.



Şekil 2.31. Fosfatlaması yapılmış namlu otofretaj taslağı.



Şekil 2.32. Yağlaması yapılmakta olan namlu otofretaj taslağı.



Şekil 2.33. Mandrel yerleştirilmesi.



Şekil 2.34. Tezgâh bağlantılarının gerçekleştirilmesi.



Şekil 2.35. Mekanik (*Ing. swage*) otofretaj işleminin tamamlanması.

Yapılan işlem ile eniyileme hesaplama çalışması çerçevesinde belirlenen otofretaj ölçülerinde işlenmiş namlu taslağına otofretaj uygulanmıştır. Bu aşamadan sonra namlu taslağı öncelikle hâlihazırda üretilmekte olan namlu ölçülerine getirilmiş, yiv-setleri işlenmiş, ölçümleri tamamlanmış ve hazır hale getirilmiştir.

Sonrasında en fazla hafifleme için topoloji eniyileme ve kompozit destekleme çalışması çerçevesinde üretim ve montaj kısıtları çerçevesinde belirlenen ölçülerine işlenerek kompozit ile destekleme uygulamasına hazırlanacaktır.

2.1.10. Eniyilenmiş Otofretaj İşlemi Sonrası Kalıntı Gerilmelerin Belirlenmesi ve Karşılaştırılması

Yukarıda gerçekleştirilmiş ofofretaj işlemi sonrasında namlu taslağı üzerindeki kalıntı gerilmelerin hesaplanması en fazla hafiflemenin tespit edilmesi açısından önem arz etmektedir. Aşağıdaki hesaplamalar bu çerçevede eniyilenmiş ofofretaj ölçüleri kullanılarak, elastik-doğrusal plastik malzeme modeli kullanılarak ve üretilmiş namlu malzemesi Numune 2 için gerçek namlu modeline uygun olarak yapılmıştır.

2.1.10.1. Analitik Bağlıntılar Kullanılarak Otofretaj Sonrası Kalıntı Gerilme Dağılımının Tespit Edilmesi

Bölüm 2.'de özetlenen formüller kullanılarak 3 farklı analitik hesaplama yöntemiyle yapılan hesaplamalarda elde edilen bulgular Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.' da verilmiştir.

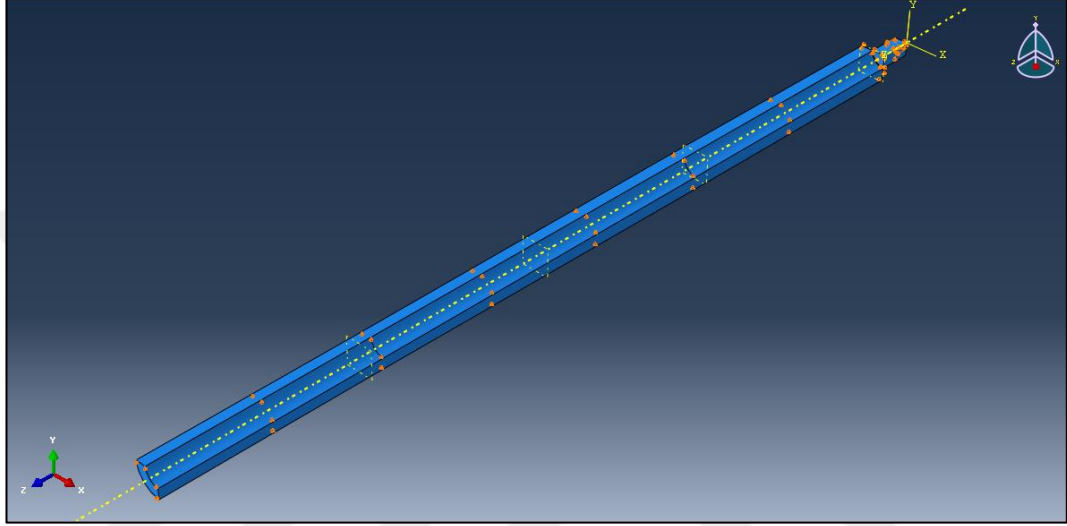
Aalitik hesapların kıyaslanması amacıyla bir kod oluşturulmuş ve EK-2'de paylaşılmıştır. Kod, 3 farklı yöntemle ofofretaj sonrası kalıntı radyal ve aksenal gerilmeyi girdilere göre hesaplar ve grafiğini çizer.

2.1.10.2. Üç Boyutlu Nümerik Sonlu Elemanlar Otofretaj Modeli Kullanılarak Otofretaj Sonrası Kalıntı Gerilme Dağılımının Tespit Edilmesi (Mandrel Uygulamak sureti ile)

Abaqus sonlu elemanlar programında ofofretaj taslağı ölçülerine bağlı kalmak sureti ile üç boyutlu $\frac{1}{4}$ kesit bir hesaplama modeli oluşturulmuştur.

Malzeme modeli olarak elastik-doğrusal plastik ve elastik- doğrusal olmayan plastik pekleşme modelleri için ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Elastik-plastik malzeme verileri tek yönde çekme testinden elde edilmiştir (Bkz. Şekil 2.16.).

Otofretaj taslağı yukarıda (Bkz. Şekil 2.14.) bahsedilen modele uygun olacak şekilde ve mandrel, taslağı çekme kuvvetlerine maruz bırakacak şekilde bir tarafından sabitlenmiştir. Mandrele eksen doğrultusunda ilerleme yerdeğiştirmesi uygulanarak taslak ile namlu otofretaj taslağı boyunca temas ettirilmiştir (Bkz. Şekil 2.36.). Sürtünme katsayısı 0.015 alınmiştır.

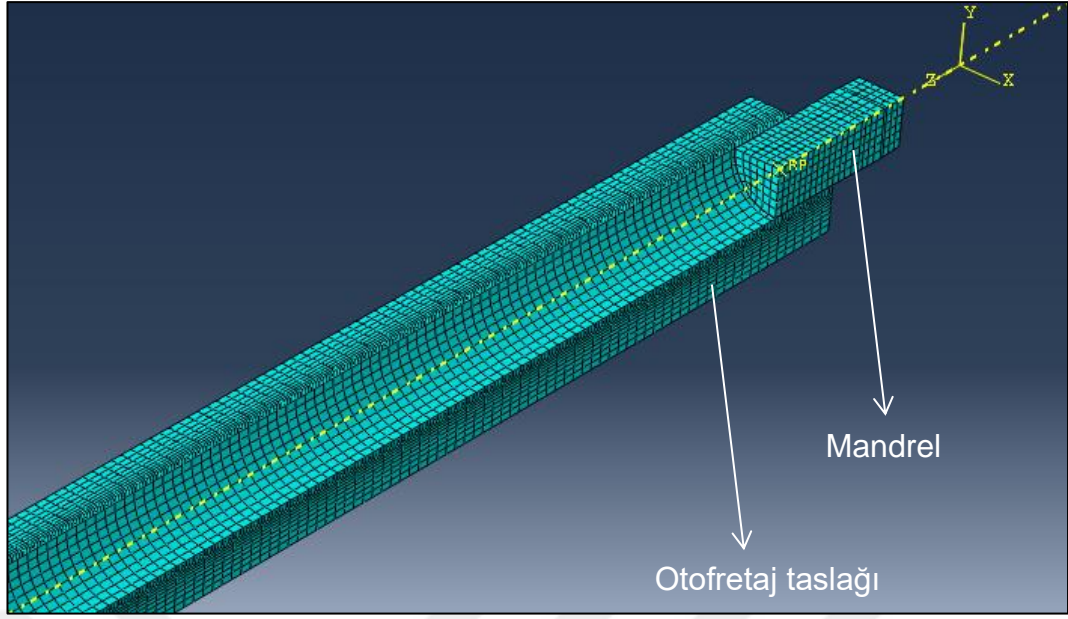


Şekil 2.36. Abaqus ¼ kesit hesaplama modeli.

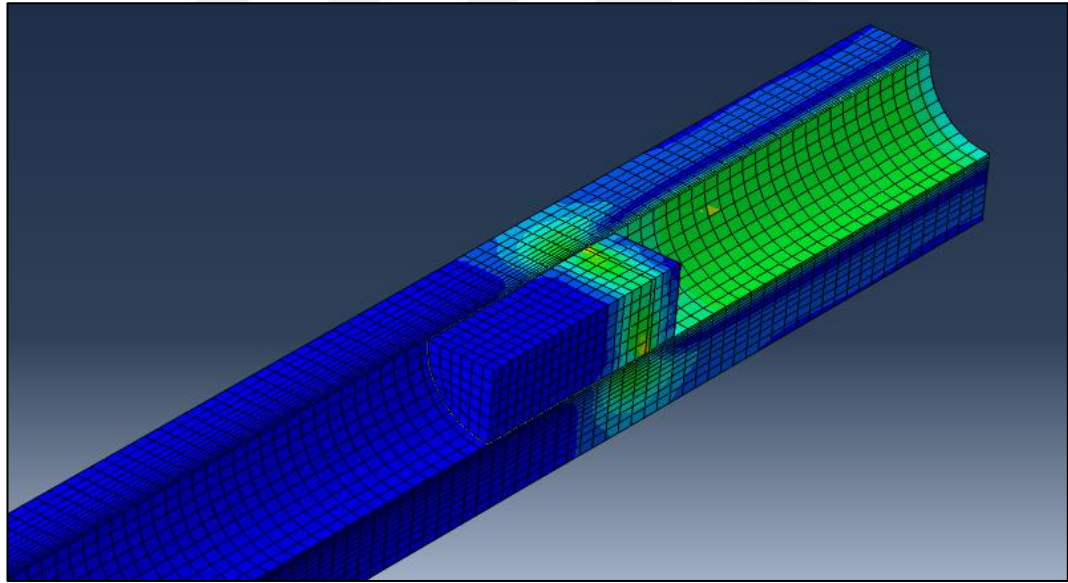
Her iki parçada şekil değiştirebilir özellikte modellenmiş ve C3D8R (üç boyutlu 8 nodlu indirgenmiş integrasyon elemanı) elemanlar ile yapı oluşturulmuştur [8] (Bkz. Şekil 2.37.).

Mandrelin otofretaj taslağı içerisinde sanal hareket ettirilmesi ile işlem gerçekteki benzer şekilde taslak ve mandrel üzerinde kalıntı gerilmelerin oluşmasına neden olur (Bkz. Şekil 2.38.).

Analitik ve Nümerik Yöntem (Mandrel uygulamak sureti ile modelleme) kullanılarak elde edilmiş bulgular Araştırma Bulguları bölümünde Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de verilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2.37. Model ağ yapısı.



Şekil 2.38. Otofretaj esnasında oluşan gerilmelerin gösterimi.

2.1.10.3. Üç Boyutlu Nümerik Sonlu Elemanlar Otofretaj Modeli Kullanılarak Otofretaj Sonrası Kalıntı Gerilme Dağılımının Tespit Edilmesi (Çap Genişletme Uygulamak sureti ile)

Bir önceki bölümde namluda otofretaj esnasında oluşan kalıntı gerilmelerin nümerik olarak tespit edilmesi için mandrel ve otofretaj taslağı dörtte bir simetrik olarak modellenmiştir. Hesaplama hem doğrusal plastik hem de doğrusal olmayan plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Gerçekte uygulandığı şekli ile mandrel otofretaj taslağı içerisinde hareket ettirilmek sureti ile taslak iç ve dış çapında genişleme ve sonrasında kalıntı gerilmelerin oluşması sağlanmıştır.

Bu şekilde kalıntı gerilmeler hesaplandıktan sonra talaşlı imalat ile boşaltılan bölgelerdeki gerilme değişiminin nümerik olarak hesaplara dâhil edilebilmesi için modelleme mantığında daha farklı bir yöntem uygulanmak durumunda kalmıştır.

Otofretaj taslağına otofretaj uygulanması, talaşlı imalat ile namlunun son şekline getirilmesi ve mühimmatın namlu içerisinde oluşturduğu dinamik yüklerin gerçektekine benzer şekilde nümerik olarak hesaplanabilmesi için otofretaj taslağı, talaşlı imalatla boşaltılan kısımlar (içten boşaltılan cidar ve dıştan boşaltılan cidar) ayrı birer parçaymış gibi modellenmiştir (Bkz. Şekil 2.39.).

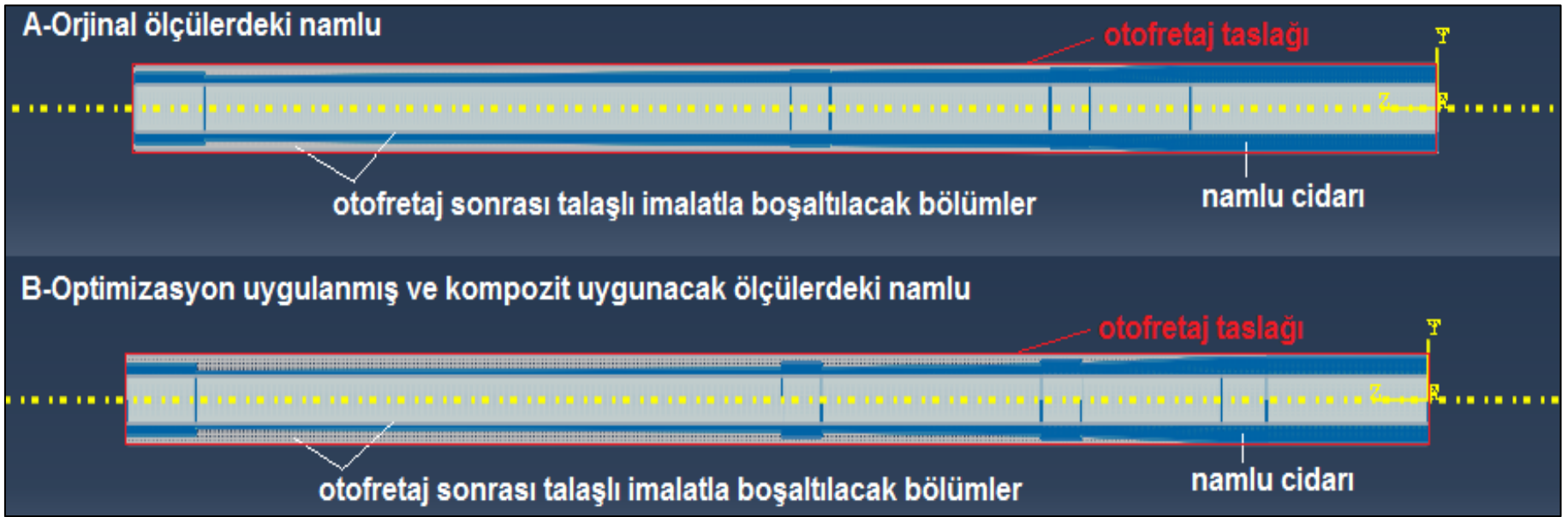
Otofretaj taslaklarının fabrika tarafından uygulanan ölçülerine (Bkz. Şekil 2.24) ve en fazla kalıntı gerilme için yeniden bu tez kapsamında tasarlanan ölçülerine sadık kalmıştır (Bkz. Şekil 2.25.).

Sonrasında otofretaj işlemi, otofretaj taslağının iç çeperine mandrel oluşturacağı yerdeğiştirme (δ) radyal yönde tanımlanmış ve çap genişlemesi ve sonrasında oluşan plastik şekil değiştirme bu şekilde oluşturulmuştur [8]. Bu işlem tamamlandıktan sonra talaşlı imalatla boşaltılan kısımlar modelden çıkartılarak kalıntı gerilmeleri ile birlikte namlular elde edilmiştir (Bkz. Şekil 3.25.). Eksen boyunca değişen yükler elde edilen ve gerçek namlu ölçülerinde olan bu kısımlara uygulanarak gerçekte oluşan gerilme

durumuna en yakın hesaplama yapılarak eski ölçülerdeki çelik namlu ile yeni ölçülerdeki ve kompozit uygulanacak çelik namlu karşılaştırılmış, yeni namlunun yük altındaki davranışı incelenmiş ve ölçüler doğrulanmıştır.

Nümerik çap genişletme yöntemi ile elde edilmiş bulgular daha önce analitik ve nümerik mandrel uygulamak sureti ile elde edilmiş bulgular ile karşılaştırmalı olarak Araştırma Bulguları bölümünde Şekil 3.9. ve Şekil 3.10.'da verilmiştir.

Analitik ve nümerik iki farklı yöntemden elde edilen bulgular, fabrikada otofretaj sonrasında gerçekleştirilmiş ve Çizelge 3.1.'de verilmiş noktalardan yapılan iç ve dış çap genişleme ölçümleri ile karşılaştırılmak sureti ile doğrulanmıştır. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirilmek sureti ile cidar kalınlığı, arakesit miktarı (δ) ve çap genişleme miktarları arasındaki ilişki tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar Araştırma Bulguları bölümü Çizelge 3.2. - Çizelge 3.7. arasındaki çizelgelerde ve Şekil 3.11., Şekil 3.12. ve Şekil 3.13.'te verilmiş ve değerlendirmeleri yapılmıştır.



Şekil 2.39. Otofretaj taslağı, iç ve dışarı çaplardan çıkartılacak talaş kısımları ve namlu cidarının gösterilmesi.

2.2. İKİNCİ BÖLÜM: Analitik Tam Ağırlık ve Nümerik Ağırlık Topoloji Eniyilemesi

Çelik kısım ağırlık eniyilemesinin gerçekleştirilmesinde, birinci bölüme benzer şekilde analitik bağıntıların çözümlenmesi için eklerde paylaşılmış yordamlar oluşturulmuş ve kullanılmış, nümerik sonlu elemanlar yönteminde ise ABAQUS yazılımının modelleme ve çözücü modüllerinden faydalanılmıştır. Çelik kısmın doğrulanmasına yönelik atışlı testler ve ölçüm işlemleri fabrika test altyapıları kullanılmak sureti gerçekleştirilmiştir.

Yöntem olarak; analitik hesaplama ve nümerik sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, hesaplamalar ile elde edilen bulgular deneysel yöntemden elde edilen ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.2.1. Otofretaj Sonrası Talaş Kaldırma İşleminin Kalıntı Gerilmeler Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi

Çoğu zaman ofofretaj işleminden sonra, silindirik basınçlı kapların iç ya da dış yüzeylerinden tornalama işlemiyle bir miktar malzeme kaldırılmaktadır. Ağır silah namlusu imalatında kompozit takviye yönteminin uygulanması için silindir dış yüzeyinden malzeme kaldırılmaktayken, yiv setlerin açılması işleminde silindir iç yüzeyinden malzeme kaybı söz konusu olmaktadır. Bu işlem, silindir üzerindeki kalıntı gerilme dağılımını değiştirmektedir. Bu bölümde, iç ya da dış yüzeyden malzeme kaldırılmasının kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi analitik olarak ele alınacaktır.

2.2.1.1. Yalnız İç Yüzeyden Yapılan Tornalama Sonucu Oluşan Gerilmeler

İç yarıçap a daki kalıntı radyal gerilmenin negatif ifadesini $r = a$ 'dan uygulanan hidrostatik basınç gibi ele alırsak, tornalama işleminden sonra bu yüzeyde oluşan basınç değişimini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\Delta P = P_{\acute{a}_2} - P_{\acute{a}_1} \quad (2.88)$$

$P_{\acute{a}_2}$ tornalamadan önceki basınç olup, $r = \acute{a}$ daki kalıntı radyal gerilmenin negatif ifadesidir. $P_{\acute{a}_1}$ ise tornalamadan sonraki yeni iç yarıçap \acute{a} daki basınç olup, bu değer sıfıra eşittir. ΔP basınç değişiminin ürettiği elastik gerilmeler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(\sigma_r)_{içtalaş} = \left(\frac{\Delta P \acute{a}^2}{b^2 - \acute{a}^2} \right) \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.89)$$

$$(\sigma_\theta)_{içtalaş} = \left(\frac{\Delta P \acute{a}^2}{b^2 - \acute{a}^2} \right) \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2.90)$$

$$(\sigma_z)_{içtalaş} = 2\nu \left(\frac{\Delta P \acute{a}^2}{b^2 - \acute{a}^2} \right) \quad (2.91)$$

ΔP basınç değişiminin ürettiği elastik gerilmeler ile kalıntı gerilmelerin süperpozisyonu sonucu yeni gerilme dağılımı elde edilir.

2.2.1.2. Yalnız Dış Yüzeyden Yapılan Tornalama Sonucu Oluşan Gerilmeler

Tornalama işleminden önce, dış yarıçap \acute{b} daki kalıntı radyal gerilmenin negatif ifadesini $r = \acute{b}$ den uygulanan hidrostatik basınç gibi ele alırsak, tornalama işleminden sonra bu yüzeyde oluşan basınç değişimini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\Delta P = P_{\acute{b}_2} - P_{\acute{b}_1} \quad (2.92)$$

$P_{\acute{b}_1}$ tornalamadan önceki basınç olup, $r = \acute{b}$ daki kalıntı radyal gerilmenin negatif ifadesidir. $P_{\acute{b}_2}$ ise tornalamadan sonraki yeni dış yarıçap \acute{b} daki basınç olup, bu değer sıfıra eşittir. ΔP basınç değişiminin ürettiği elastik gerilmeler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(\sigma_r)_{dıştalaş} = \left(\frac{-\Delta P \acute{b}^2}{\acute{b}^2 - a^2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.93)$$

$$(\sigma_{\theta})_{dıştalaş} = \left(\frac{-\Delta P b^2}{b^2 - a^2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (2.94)$$

$$(\sigma_z)_{dıştalaş} = 2\nu \left(\frac{-\Delta P b^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (2.95)$$

ΔP basınç değişiminin ürettiği elastik gerilmeler ile kalıntı gerilmelerin süperpozisyonu sonucu yeni gerilme dağılımı elde edilir.

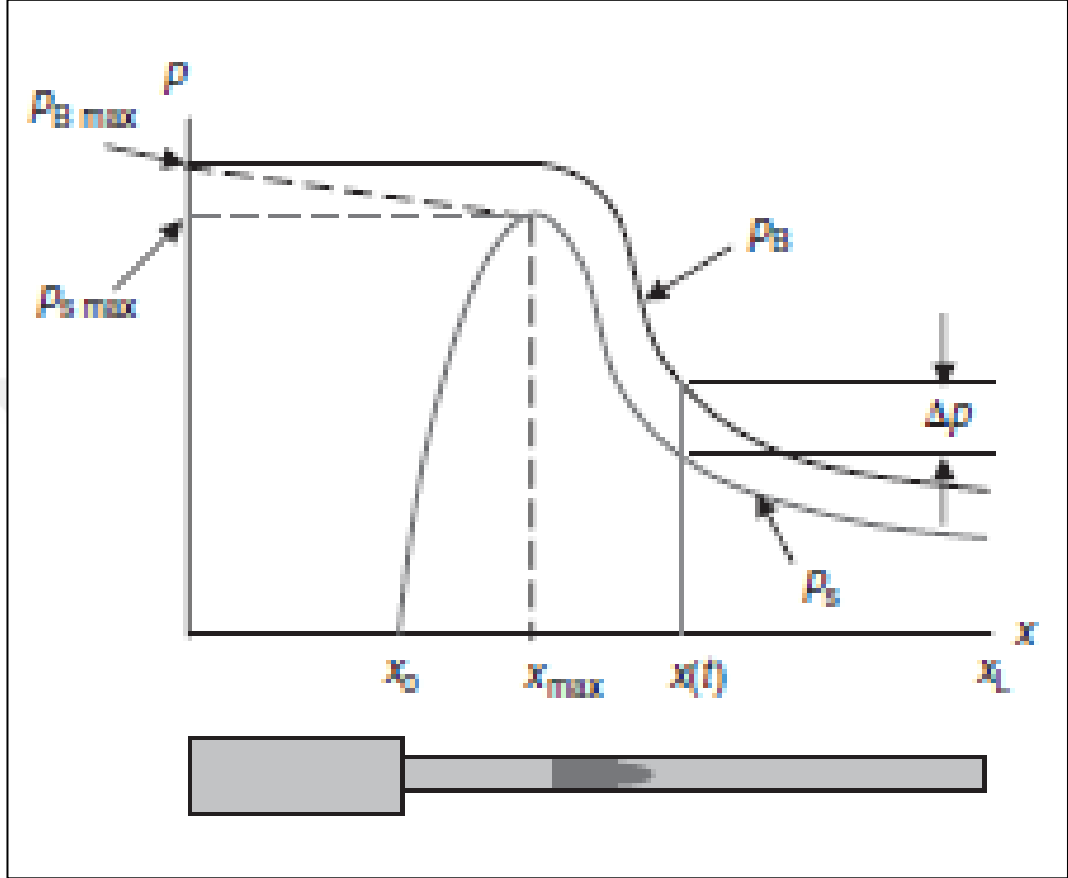
İlgi hesaplamaya ilişkin kod EK-3'te verilmiştir. Kod talaş kaldırma sonrasında ve operasyon basıncı uygulanmış durumdaki gerilme durumunu hesaplar ve radyal ile çevresel gerilmeleri grafike eder. Örnek hesaplamalardan elde edilen bulgular Araştırma Bulguları bölümünde paylaşılmıştır (Bkz. Şekil 3.14.). İç ve dış çaptan talaş kaldırılması sonrası iç çapa operasyon basıncının uygulanması sonrasındaki gerilme dağılımının hesaplanması için oluşturulmuş yordam ise EK-4'te verilmiştir. Bu hesaplamadan elde edilen bulgular ise Araştırma Bulguları bölümünde Şekil 3.15.'te verilmiştir.

2.2.2. Namlu Ağırlığını Azaltmak için Analitik Tam Ağırlık Eniyilemesi ve Nümerik Topoloji Eniyilemesi Yöntemlerinin Uygulanması ve Karşılaştırılması

2.2.2.1. Namlu İçi Mermi Hareketi

Mermi, namlu içerisinde barutun ateşlenmesi ile genişleyen barut gazının etkisi ile hareketine başlar (x_0) ve ivmelenir. Barutun mermi ve namluya etkileyen en yüksek servis basınç değeri $P_{s \max}$ olur. Ancak, tasarım yapılırken en yüksek servis basıncının olduğu konumdan (x_{\max}) önceki tüm noktalarda servis basıncı etkili olacağından, bu noktaların tamamında en yüksek basınç değeri dikkate alınır. Üstelik bu değer servis basıncından daha yüksek bir değerdir ($P_{B \max}$). Mermi namlu içerisinde hareket ederken en yüksek basıncın olduğu noktadan sonra ise basınç değeri parabolik olarak düşer ve namlu

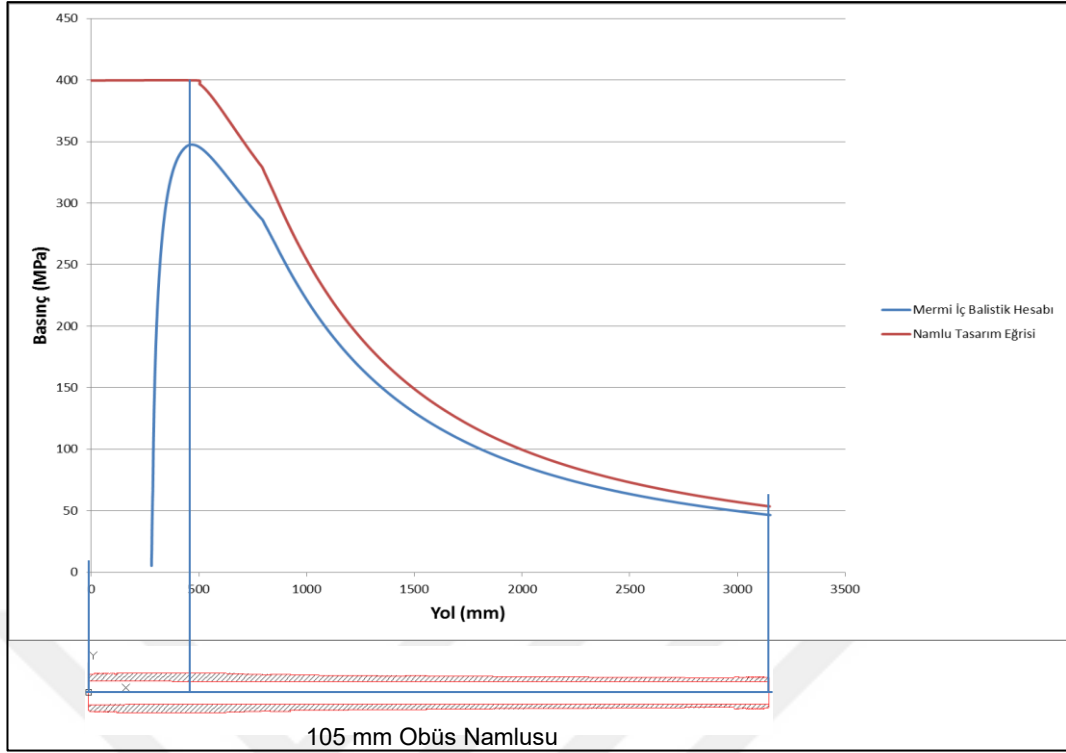
ucunda en düşük değerini alır. Genel olarak namlu içerisindeki tüm yanma olayları aşağıdaki Şekle benzer Şekilde gerçekleŐir (Bkz. Şekil 2.40.).



Şekil 2.40. Tipik namlu i balistiği basınç-yol grafiği [9].

Bu durum 105 mm obüs namlusu için düŐünecek ve namlu tasarımı en fazla hafifleme sağlamak üzere gerçekleŐtirilecektir.

105 mm Obüs ile kullanılan mühimmat modelleri düşünüldüğünde en yüksek servis basıncı değeri 345 MPa olmaktadır. Bu değer yaklaşık 1.15 kat artırılmış (ΔP) ve 400 MPa değeri için tasarım gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 2.41.).



Şekil 2.41. Namlu İç Balistik Eğrileri ve Namlu üzerindeki konumları.

Aşağıdaki çalışmalarda namlu öncelikle analitik olarak ele alınmış ve önceki konu başlıklarında bahsedilen otofretaj eniyilemesi, otofretaj sonrası talaş kaldırma ve son olarak servis basıncı uygulanması hesaplanmış ve cidar değişimi belirlenmiştir. Daha sonra numerik olarak topoloji eniyilemesi ile cidar değişimi belirlenmiş ve karşılaştırılarak namlu son ölçülerine karar verilmiştir.

2.2.2.2. Analitik Tam Ağırlık Eniyilemesi için Bir Yaklaşım

Bu çalışmada namlu boyunca her bir milimetrelık kesit için (3150 farklı nokta için) güvenlik hesabı bilgisayar kodu ile yapılarak ağırlığı eniyilenmiştir. Bu kod EK-5'te verilmiştir. Bunun için gerçekte uygulandığı şekli ile önce otofretajla eniyilenmiş kalıntı gerilme değerleri hesaplanmış, talaş kaldırma hesabı esnasında iç çap sabit miktarda kaldırılacak şekilde ve dış çap

güvenlik katsayısı göz önünde bulundurulmak sureti ile sürekli değiştirilerek (azaltılarak) en aza indirgenecek şekilde hesaplama yapılmıştır. Gerilme değerleri, tasarım basıncı (Bkz. Şekil 2.41– Kırmızı eğri) uygulanması durumunda ve tüm gerilme değerlerinin en yüksek olduğu elastik-plastik geçiş yarıçapı için hesaplanmıştır. Kısaca kod bu bölüme kadar kazanılmış tüm aşamalara ilişkin hesaplamaları kullanır. Yani çalışma basıncında optimize edilmiş ofofretaj ile belirlenen iç çap (EK-1), Bu ölçülere göre hesaplanmış kalıntı gerilmeler (EK-2), Talaş kaldırma sonrası kalıntı gerilme durumu (EK-3), Talaş kaldırma sonrası operasyon basıncındaki gerilme dağılımı (EK-4) ve tüm bu aşamaları kapsayan ve optimize edilmiş ofofretaj ölçüleri için namlu boyunca eksen boyunca her bir nokta için değişken tanımlanmış operasyon basıncında, plastik elastik geçiş çapındaki eşdeğer gerilmeyi talaş kaldırılmış durum için hesaplayan ve bunları yaparken güvenlik katsayısını hesaba katarak dış çapı sürekli azaltarak cidarı en aza indiren bir yöntem tanımlanmıştır (EK-5). Bu yöntem, ofofretaj yapılan bir namlu için her aşamanın hesaplanabildiği komple bir tasarım aracıdır.

Bu yöntem ile kalıntı gerilme ile elde edilmiş avantaj, talaş kaldırma işlemi ile oluşan kayıplar, servis basıncı ile oluşmuş kritik gerilme durumu süperpozisyon işlemi yapılarak Von Mises veya Tresca Akma Kriteri çerçevesinde değerlendirilebilmiştir.

Değerlendirilmeye alınamayan parametreler merminin namluyu yiv-set üzerinden burmaya zorlaması ve ısınma ile malzemede olabilecek dayanım azalması olmuştur. Diğer parametrelerle karşılaştırıldığında burulmanın çok etkili olmayacağı ve büyük çaplı obüslerde dakikadaki atım sayısının en fazla 6 adet olabileceği bilgisi ile namlu sıcaklıklarının çok fazla artamayacağı ve malzeme dayanımını etkileyemeyeceği değerlendirilmiştir.

Bu şekilde tasarlanan namlunun hâlihazırdaki namlunun taşıdığı yükleri taşıyabilecek özellikteki çelik malzemedan üretilmiş en hafif namlu taslağı olması amaçlanmış ve bu doğrultuda ölçülendirilmiştir. Kompozit desteğin ise güvenlik katsayısını artıran, namlu yalıtımını sağlayacak ve atış

hassasiyetini artıracak şekilde olumlu katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir ve tasarıma bu şekilde adapte edilmesi hedeflenmiştir.

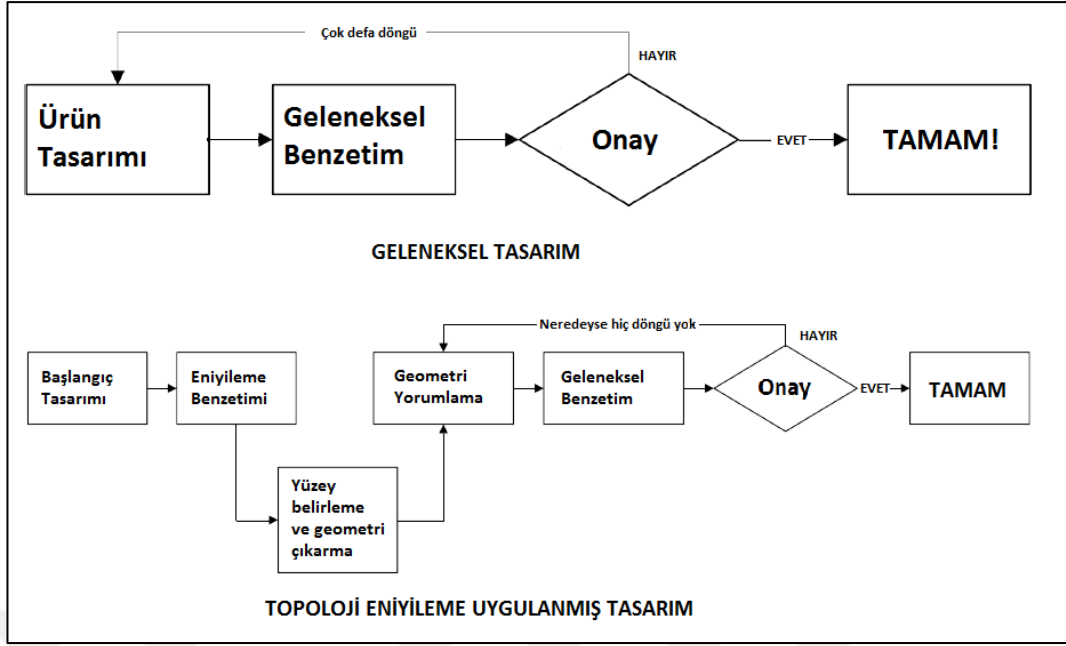
Analitik Tam Ağırlık Eniyilemesi bulguları Araştırma Bulguları bölümü Şekil 3.16., Şekil 3.17. ve Şekil 3.18.'de verilmiştir.

2.2.2.3. Nümerik Topoloji Eniyilemesi

Bilgisayarların ve ticari yazılımların geçen yüzyıl içerisindeki gelişmeleri ile bilgisayar destekli tasarım, mühendislik ve üretim ticari firmalar ve araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Çözümleme gücünün her geçen gün artması ile eniyileme algoritmalarının ürünlerin verimli tasarlanması için kullanılması da artmaktadır.

Topoloji eniyilemesi, kafes elemanlardan oluşan bir yapısal parçanın elemanlarının, yükleme koşulları ve kısıtlamalar çerçevesinde oluşan yük taşıma profiline uygun olacak şekilde dikkate alarak yapının içerisinde ve dışarısından eleman eksilterek yeni yapının daha hafif ancak yükleri ilk durumuna benzer sağlamlıkta taşıyacak şekilde organize edilmesidir. Bunu yaparken uygulanacak topoloji eniyilemesinin derecesi parçaların ağırlık/performans oranı ve kazanılacak zaman göz önünde bulundurularak belirlenir.

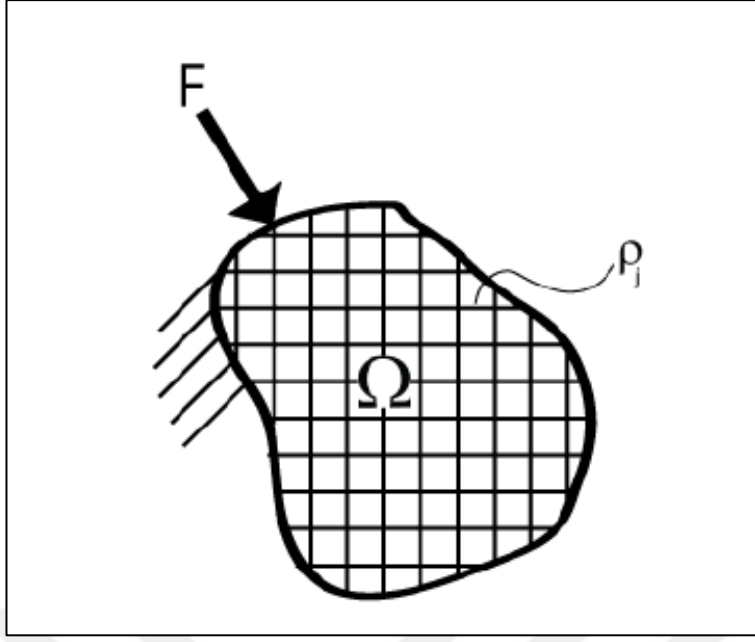
Yapısal parçaların geleneksel ve topoloji eniyilemesi yaklaşımı ile tasarlanması arasındaki fark aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.42. Geleneksel tasarım ve Topoloji Eniyilemesi uygulanmış tasarım.

Topoloji eniyilemesinde yükün taşınması durumuna göre hem içeriden hem dışarıdan eleman eksiltme uygulanmaktadır. Namluda içeriden malzeme eksiltmesine izin verilmemesinin daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu şekli ile topoloji eniyilemesi şekil ve ölçü eniyilemesi şeklinde kullanılmış olmaktadır.

Sonlu Elemanlar söz konusu olduğu zaman topoloji eniyilemesi basit şekli ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.43. Yük ve sınır şartları gösterilmiş tasarım uzayı soyut modeli.

Elemanlar geometriyi, yoğunluk ve elastik modül ise malzemeyi tanımlamaktadır. Sınır şartları ve yüklemeler çerçevesinde yapıda oluşan gerilme dağılımına göre elemanlar üzerindeki yük yoğunluğu eniyileme döngülerinde o eleman için 0-1 arasında değişen bir değer almaktadır. Yük yoğunluğu sıfıra yakın olan veya değerlendirme derecesi kullanıcı tarafından belirlenen yoğunluğa sahip elemanlar silinebilir elemanlar olarak geometriden boşaltılabilmektedir. Böylelikle boşaltılan bölgeler yapının ağırlığından kazanç sağlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Yoğunluğu bir değerine yakın elemanlar ise yükü aktif olarak taşıyan elemanlar olduklarından mutlaka geometri üzerinde kalması gereken bölgeleri temsil eder.

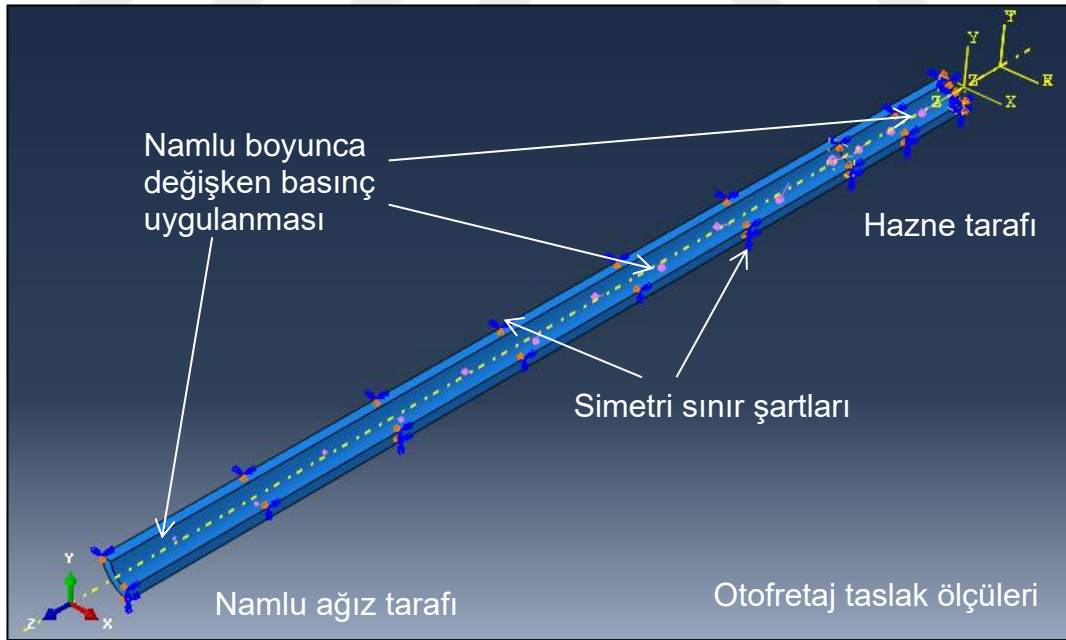
2.2.2.3.1. Nümerik Sonlu Elemanlar Topoloji Eniyileme Modeli

Namlu ağırlık eniyilemesi nümerik hesaplamalarında ABAQUS Tosca Eniyileme Modülü kullanılmıştır. Tez konusunun desteklediği proje kapsamında ABAQUS Tosca Eniyileme Modülü lisansı ve modülün eğitimi

satın alınmış ve eniyileme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Koşul Tabanlı Eniyileme döngüsü seçilmiştir. Tasarım tepkileri gerinim enerjisi ve hacim olarak belirlenmiştir. Hesaplama, gerinim enerjisini en az değerine indirgerken katılığı yani dayanımı en yüksek düzeyde tutmak üzere hacimde kullanıcı tarafından belirlenmiş kazanım hedefini tutturmak üzere çok sayıda hesaplama yapmakta ve hedefe ulaşıp ulaşılmadığını kontrol etmektedir [8].

Simetri sınır şartlarının uyguladığı düzlemlerden ve yük uygulanan bölgelerden malzeme eksiltilmesine izin verilmemiştir.

Analitik hesaptakine benzer şekilde, namlu boyunca değişen basınç, namlu iç cidarına basınç-yol eğrisi olarak (Bkz. Şekil 2.41.) analitik düzlem tanımlaması yapılarak uygulanmıştır. Başlangıç ölçüleri, otofretaj uygulanması sonrası iç cidarından sabit talaş kaldırılmış otofretaj taslağının ölçüleridir. Sınır şartları Şekil 2.44'te verilmiştir.



Şekil 2.44. Topoloji Eniyileme modeli sınır şartları ve yükleme durumu.

Analitik ve Nümerik Topoloji eniyilemesi bulguları ve karşılaştırmalar Araştırma Bulguları bölümü Şekil 3.19. - Şekil 3.24. arasındaki şekillerde ve aynı bölümdeki paragraflarda verilmiştir.

2.2.3. Çelik Kısım Tasarımın Doğrulanması

Bu bölümde; eniyileme çalışması ile en fazla hafiflemeyi sağlayacak şekilde tasarlanan çelik namlu, öncelikle hali hazırda Ağır Silah ve Çelik Fabrikasının kullanmış olduğu başlangıç orijinal ölçülerindeki namlu ile karşılaştırılmıştır. Namlulardaki otofretaj işleminin bıraktığı kalıntı gerilmeler ve otofretaj sonrası talaşlı imalat ile namlulardan boşaltılan bölgelerdeki kalıntı gerilmelerdeki değişimler hesaplara etki ettirmek üzere farklı bir modelleme mantığı ile (Bkz. Şekil 2.39.) çözümler gerçekleştirilmiş ve kalıntı gerilme hesaplamaları ile kıyaslanmıştır (Bkz. Şekil 3.25.).

2.2.3.1. Eksen Boyunca Değişen Basınç Yüğü Altında Orijinal ve Eniyilenmiş Ölçülerdeki Otofretajlı (Ön Gerilmeli) Namluların Gerilme Hesabı, Karşılaştırılması ve Doğrulanması

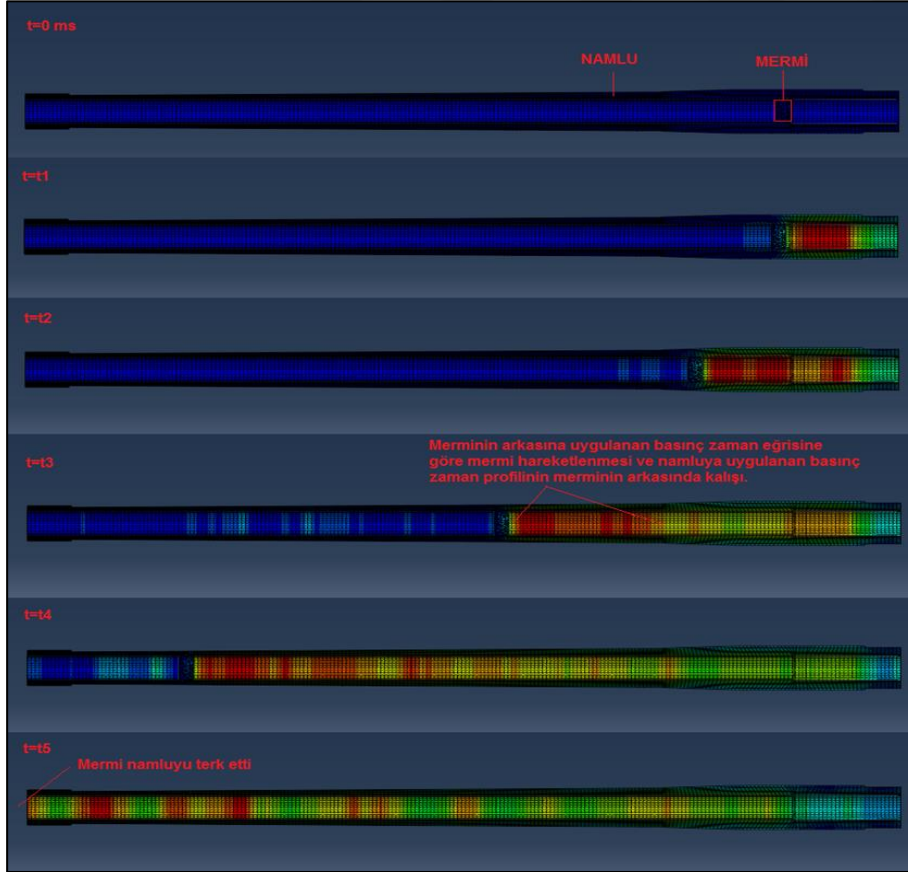
Şekil 2.39.'da gösterilen modelleme mantığı ile nümerik olarak hesaplanan ve ölçüm sonuçları ile doğrulanan otofretaj işlemi sonrası talaşla kaldırılacak kısımlar modelden çıkartılarak orijinal ve yeni tasarlanan namlunun kalıntı gerilmeli durumları elde edilmiştir.

Bu aşamadan sonra namluda mühimmatın hareketi esnasında namlu üzerine etkiyecek ve eksene göre değişen yüklerin modele etki ettirilmesi için ayrı bir model oluşturulmuştur. Bunun için bir disk mühimmatın ağırlığına sahip olacak şekilde modele dâhil edilmiştir. Diskin arka yüzeyine balistik hesaptan gelen basınç zaman profili tanımlanmıştır. Mühimmat hareketli olduğundan mühimmatın arkasında kalacak şekilde basınç zaman eğrisinin namlu iç cidarına uygulanması için FORTRAN dilinde bir rutin yazılması gerekli olmuştur [8]. Rutin, zamanın her bir dilimi için mermi arkasına

uygulanan basınç ile hesaplanan yeni konumuna göre basınç zaman eğrisinin aynı değerlerinin namlu iç cidarına uygulamaktadır. Böylelikle basıncın namluya yapmış olduğu yükleme durumu gerçektekine benzer şekilde hesaplanabilir olmuştur. Merminin sürtünmeden dolayı namluya uyguladığı yükler ise mermi-namlu arayüzünde sürtünmeli bir yüzey tanımlanarak ve sürtünme katsayısı hesap yükünü artırmayacak en yüksek değer olan 0.15 olarak tanımlanmıştır. Burada sürtünme değerinin seçilebilecek en yüksek değer seçilmesinin temel nedeni modelde sevk çemberi oluşumu esnasında oluşacak direnç kuvvetlerini bir nebze de olsa hesaplara dahil edebilmektir. Çünkü gerçekte merminin namlu içerisindeki hareketini geciktiren etkilerden bir tanesi sevk çemberi oluşumdur. Sevk çemberi bölgesi, oluştuktan sonra da namlu ile mermi arasında en fazla sürtünmenin olduğu bölgedir.

Modele ilişkin detaylar aşağıdaki şekilde tarif edilmiş ve rutinin çalıştığını daha belirgin hale getirilmek üzere öngerilmemiş namlu ile ön deneme hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve basıncın mermiyi takip ettiği ve sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir (Bkz. Şekil 2.45.).

İç balistik hesapları ile Nümerik Dinamik modelden elde edilen mermi namlu içi hareketlerine ilişkin bulgular Araştırma Bulguları Bölümünde Şekil 3.26., Şekil 3.27. ve Şekil 3.28. şekillerinde ve değerlendirme paragraflarında verilmiştir.



Şekil 2.45. Eksene göre değişen namlu yükleri ve mermi hareketi

t=0 anı;

Mermi ve namlu sabit olarak hareketsiz beklemededir.

t=t1 anı;

Mermi arkasındaki barutun ateşlenmesi sonucu basınç artar, mermi sevk çemberi yiv-sete oturur.

t=t2 anı;

Basınç hızla yükselir ve mermiyi hızlandırır. Yaklaşık olarak basıncın en yüksek değerine ulaştığı noktaya gelinmiştir.

t=t3 anı;

Mermi hızlanmaya devam eder. Basınç hızla düşmeye başlamıştır.

t=t4 anı;

Basınç düşmeye devam etmektedir.

t=t5 anı;

Mermi namluyu terk eder. Basıncılı gazlar namlu ağzından dışarı aktarılır.

Mermi arkasına uygulanan basınç ile birlikte hareket etmeye (öteleme ve dönme hareketi) başlar. Bu hesaplamada iç balistik hesap, yapısal benzetim programında malzemelerin yapısal davranışı ile birlikte dinamik olarak ele alınmıştır. Yapısal analiz programı ve iç balistik hesap bir anlamda birbirine bağlanmıştır. Mermiye, dönme hareketi, arkada çalışan rutin ile birlikte uygulanamamıştır.

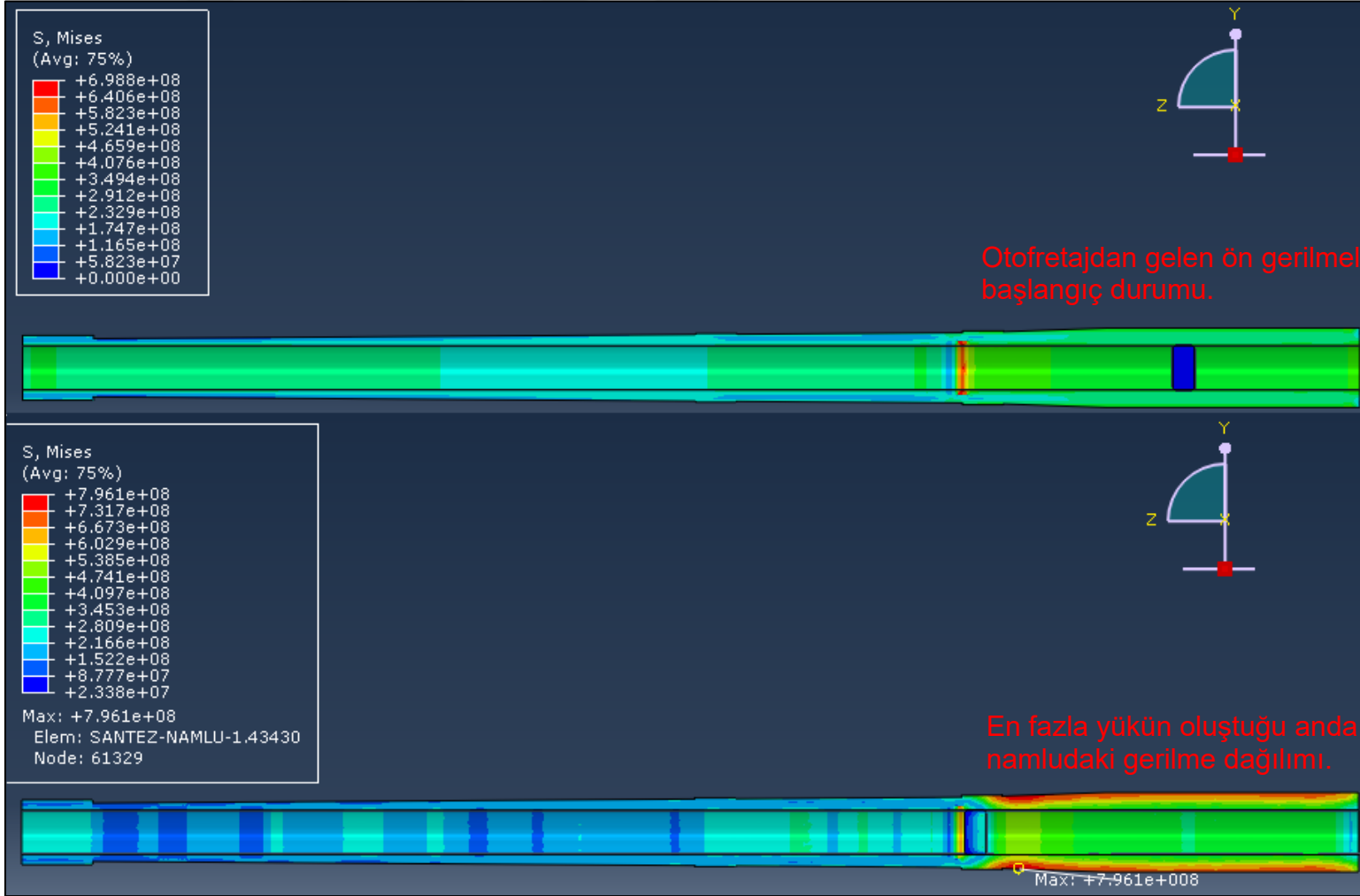
2.2.3.2. Orijinal ve Eniyilenmiş Yeni Boyutlardaki Ön Gerilmeli Çelik Namlular için Namlu Boyunca Yapısal Hesaplama Sonuçları ve Ölçümlerle Doğrulanması

Yukarıda bahsedilen model çerçevesinde orijinal boyutlardaki 105 mm Obüs Namlusu için öncelikle otofretaj işlemi uygulanmış, namlunun talaşla eksiltelen bölümleri modelden çıkartılmış ve ön gerilmeli namlu elde edilmiştir.

Namlunun farklı mühimmat modelleri ve barut hakları için gerçekleştirilmiş iç balistik hesaplarından elde edilen basınç-zaman grafikleri ve yukarıda tarif edilmiş yapısal benzetim modelinde kullanılarak namlu üzerine gelen yükler eksen boyunca çıkartılabiliştir (Bkz. Şekil 2.46.).

Elde edilen bulgular Konya Karapınar'da gerçekleştirilen aynı ölçülerdeki namlu ile farklı mühimmat modelleri ve barut haklarındaki atışlı testlerde elde edilen gerilme değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Benzer şekilde yeni tasarlanan tam eniyilenmiş çelik namlu da aynı işlemlerden geçirilerek en yüksek barut haklarındaki gerilme dağılımı çıkartılmış ve ölçülerin doğrulanması hedeflenmiştir. Bu namludaki güvenlik seviyesi 1.10 seviyelerine kadar çekilmesine karşılık, kompozit sarım gerçekleştirilmesi sonrası güvenlik seviyesinin artacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 2.46. Orijinal ölçülerdeki namlunun ön gerilmeli başlangıç ve en fazla yük durumu anındaki Von Mises gerilme değerleri.

Namlu içerisinde farklı mühimmat tipleri ve barut hakları için her durumda farklı yükleme koşulları oluşmaktadır. Bu namlu için en fazla yükleme durumu uzun menzilli mühimmatın Z2 şeklinde anılan ve mühimmatı en uzun menziline göndermeye çalışırken oluşan durumdur.

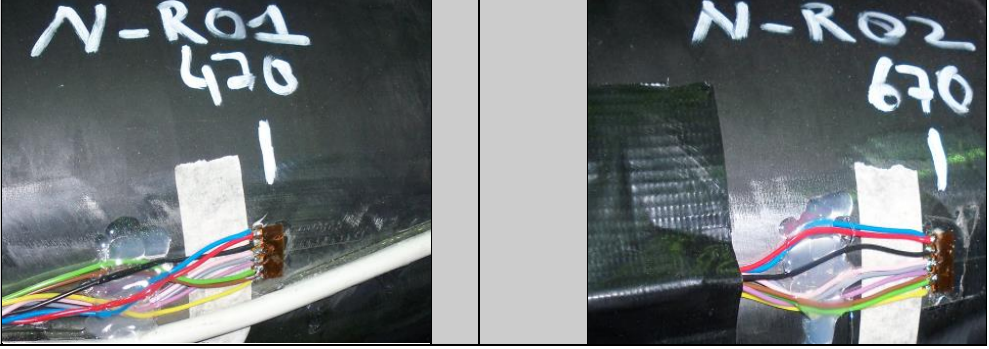
Yukarıdaki şekilde (Bkz. Şekil 2.46.) üst kısımda namlunun otofretaj ve talaş kaldırma sonrası üzerinde kalmış gerilmeler ile mühimmatın harekete başlamadığı durum gösterilmiştir. Alt bölümde ise basıncın en yüksek değerini aldığı andaki gerilme dağılımı ve en yüksek Von Mises gerilmesinin olduğu yer gösterilmiştir. Farklı barut haklarında, merminin bulunduğu yere göre en yüksek gerilmenin oluşacağı yer ve gerilme miktarı değişmektedir. Yukarıda gösterilen en yüksek kullanım basıncında (Sınama basınç değeri 3450 Bar) oluşabilecek yük durumunu göstermektedir. Namlunun bu değerden yüksek değerlere çıkması ancak bazı özel durumlar dışında önerilmez. Ancak namlunun tasarımı 4000 Bar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sistemin tasarım basıncına ulaşma olasılığı 1/1000000 şeklinde ifade edilir.

2.2.3.3. Atışlı Testler ve Gerçekleştirilen Ölçümler

Sistemin orijinal ölçülerinde namlu ile test edilmesi esnasında bir dizi gerinim ölçer (*İng.* Strain gauge) ile donatılarak atışlı testler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için iki farklı konuma üç farklı açıda toplam altı adet gerinim ölçer bağlanmıştır (Bkz. Şekil 2.47.).

Atışlı testlerde elde edilen ölçüm sonuçları ve bulgular Araştırma Bulguları bölümü Şekil 3.29. - Şekil 3.43. arasındaki şekil ve Çizelge 3.8. - Çizelge 3.17. arası çizelgeler ile ilgili paragraflarda verilmiş ve tartışılmıştır.

Elde edilen bulgular çerçevesinde çelik kısımdan elde edilebilecek ağırlık tasarrufuna ve kalıntı gerilmeli namlunun servis koşullarındaki gerilme dağılımlarına ilişkin veriler ise Çizelge 3.18. ile Şekil 3.44. ve Şekil 3.45. ile ilgili paragraflarda verilmiş ve değerlendirilmiştir.

N- R01	A	-45	N- R02	A	-45
	B	0		B	0
	C	45		C	45
					

Şekil 2.47. Namlu üzerinde gerinim ölçerlerin yerleştirilmesi.

2.3. ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: Kompozit Destek Uygulaması

Kompozit Destek Uygulanması bölümünde nümerik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş hesaplamalarda ABAQUS yazılımının modelleme ve çözücü modüllerinden faydalanılmıştır. Kompozit Desteğin doğrulanmasına yönelik atışlı testler ve ölçüm işlemleri fabrika test altyapıları kullanılmak sureti gerçekleştirilmiştir.

Yöntem olarak; nümerik sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, hesaplamalar ile elde edilen değerler deneysel yöntemden elde edilen ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu aşamaya kadar namlunun çelik kısımlarında uygulanabilecek en fazla hafifleme için otofretaj işlemi ve otofretaj taslağında bırakılabilecek en fazla ön gerilme miktarı, talaşlı imalat sırasında oluşan ön gerilme kaybı ve bu etkiler göz önünde bulundurulmak sureti ile çelik kısımda en fazla hafifleme sağlamak üzere eniyileme çalışmaları tamamlanmıştır.

Bu bölümde ise çelik kısma destek olarak güvenlik katsayısını yükselteceği öngörülen kompozit uygulanması detaylandırılacaktır.

2.3.1. Genel Bilgiler

Kompozit malzeme, kısaca kompozit, en az iki elementin birbirleri ile beraber çalışarak, elementlerin bağımsız olarak düşünüldüklerindeki özelliklerinden çok daha gelişmiş mekanik ve fiziksel özelliklere ve fonksiyonlara sahip malzemelere denir. Pratikte, pek çok kompozit, ana hacimsel yapıyı oluşturan bir matriks ve mekanik kuvveti ve matriksin peklğini artırırken bazen termal iletkenliğini ve elektriksel direngenliğini değiştiren takviye veya dolgu maddesinden oluşur. Bu takviyelendirme, genellikle, fiberlerden (örn. Monofilamentler, whiskerler) ayrıca partiküllerden (örn. Partikül takviyeli) veya daha karmaşık şekle sahip malzemelerden (örn. ağ, şerit, laminat) oluşur. Kompozitler, matriks fazlarına göre üç ana sınıfa ayrılırlar:

Polimer matriks kompozitler (PMC'ler), en yaygın olarak kullanılan ve fiber takviyeli polimerler (FRP'ler) veya daha önceleri reçine temelli kompozitler (RBC'ler) olarak bilinirler. Bu kompozit malzemelerde polimer temelli reçine matriks olarak ve pek çok çeşit fiberler örneğın e-cam, karbon-monofilamentler ve polyaramit takviye maddesi olarak kullanılır.

Seramik matriks kompozitler (CMC'ler), yüksek sıcaklıkta çalışma ve korozyon direncinin önem kazandığı zorlu koşullarda kullanılırlar. Bu tip kompozit malzemelerde, seramik, matriks maddesi ve silikon karbitten (SiC) ve boron nitritten (BN) üretilmiş kısa fiber ve whiskerler takviye maddesi olarak kullanılır. Bu kompozitlerin iki önemli alt sınıfları, cam ve cam-seramik-matriks kompozitler (GMC'ler) ve karbon-karbon kompozitlerdir (CCC'ler).

Metal matriks kompozitler (MMC'ler), ileri seviye malzemeler olarak düşünülürler, çünkü yüksek peklik ve yüksek dayanım – yoğunluk oranına, korozyon direncine ve bazı durumlarda özel elektriksel ve termal özelliklere sahiptirler. Bu özelliklerin bir malzemedeki toplanması, ileri seviye kompozitleri, havacılık ve uzay yapısal parçaları için çok çekici hale getirmiştir. Otomotiv sanayinde, alüminyum ve magnezyumun matriks olarak ve örneğın silikon karbit veya boron nitrit gibi ileri seviye seramik fiberlerin takviye malzemesi olarak kullanıldığı uygulamalar hızla artmaktadır.

Yine de, önceki paragraflarda genel tanımlamaları ve basit sınıflandırılmaları yapılmış kompozit malzemelere ilaveten çevremizdeki günlük hayatımızda kullandığımız pek çok malzeme de kompozittir. Örneğin, biyolojik prosesler ile üretilmiş kemik (örn.kollajen, kalsiyum fosfat) gibi doğal malzemeler ve ağaç (örn. matriks olarak lignin ve selüloz fiber) veya el yapımı malzemeler örneğin beton (örn. hidrolik çimento ve türevleri), kart levhası ve kâğıt, mükemmel mekanik performans gösteren kompozitlerdir. Kompozit malzeme sınıfları Çizelge 2.3.'de verilmiştir.



Çizelge 2.3. Kompozit malzemelerin yapısal sınıflaması

Sınıfı	Matriks tipi	Takviye tipi
Polimer matriks kompozitler (PMC'ler) (Fiber takviyeli kompozitler, reçine temelli kompozitler)	Termoplastikler (örn. PPS, PES)	Dolgu (örn. metal seramik tozlar, partiküller, taneler)
		Fiberler (örn. karbon monofilamentler / kesilmiş kablolar)
		Laminatlar (örn. cam levhalar, alüminyum yaprak)
	Termosetler (örn. epoksi, PI, PA)	Dolgu (örn. metal seramik tozlar, partiküller, taneler)
		Fiberler (örn. cam fiberler, karbon monofilamentler / kesilmiş kablolar)
		Laminatlar (örn. cam levhalar, alüminyum yaprak, balpeteği)
	Elastomerler (örn. kauçuk)	Dolgu (örn. grafit tozlar, partiküller, taneler)
		Fiberler (örn. karbon monofilamentler / kesilmiş kablolar)
		Laminatlar (örn. cam levhalar)
Metal matriks kompozitler (MMC'ler)	Metaller (örn. Al, Mg, Ti, Cu)	Partiküller, pullar (örn. seramik, sertmetal, elmas tipi karbon)
		Fiberler (örn. SiC veya B ₄ C monofilamentler, whiskerler)
		Diğerleri (örn. genişmiş metaller, ağ, balpeteği)
	Alaşımlar	Partiküller, pullar (örn. seramik, sertmetal, elmas tipi karbon)
		Fiberler (örn. SiC veya B ₄ C monofilamentler, whiskerler)
		Diğerleri (örn. genişmiş metaller, ağ, balpeteği)
Seramik matriks kompozitler (CMC'ler)	Seramik	Partiküller veya pullar
		Karbon monofilamentler, whiskerler
		Metal fiberler, kesilmiş kablolar ve whiskerler
		Diğerleri (örn. genişmiş metaller, ağ, balpeteği)
	Cam veya cam-seramik	Partiküller
Karbon-karbon	Monofilamentler, whiskerler, fabrik balpetekleri	

2.3.1.1. Kompozitlerin Özellikleri

Genel bir kural olarak, kompozitin özellikleri, takviye maddesinin özellikleri, matriksin fiziksel özellikleri, matrikse yapılan takviye oranı ve son olarak takviye maddesinin geometrisi ve oryantasyonu tarafından belirlenir. Genellikle, yoğunluk ve spesifik ısı kapasitesi gibi skaler fiziksel nicelikler için karışım kuralı uygulanabilirken, vektörel veya daha yüksek dereceden tensörel özellikler (örn. çekme kuvveti, Young modülü, termal iletim ve geçirgenlik vb.) Elastisite teorisi veya anizotropik ısı transferi üzerine kurulmuş daha sofistike hesaplama yöntemleri kullanılarak belirlenmelidir.

2.3.2. Kullanılan Kompozit Malzeme Özellikleri

Kompozit malzemeler ülkemizde kolay bulunabilirlikleri ile hafif silahın sarımında kullanıldıkları dikkate alınarak ve sonuçların karşılaştırılabilirliği değerlendirilerek hafif silahın sarımında kullanılanların aynısı seçilmiştir.

Kompozit malzeme özellikleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

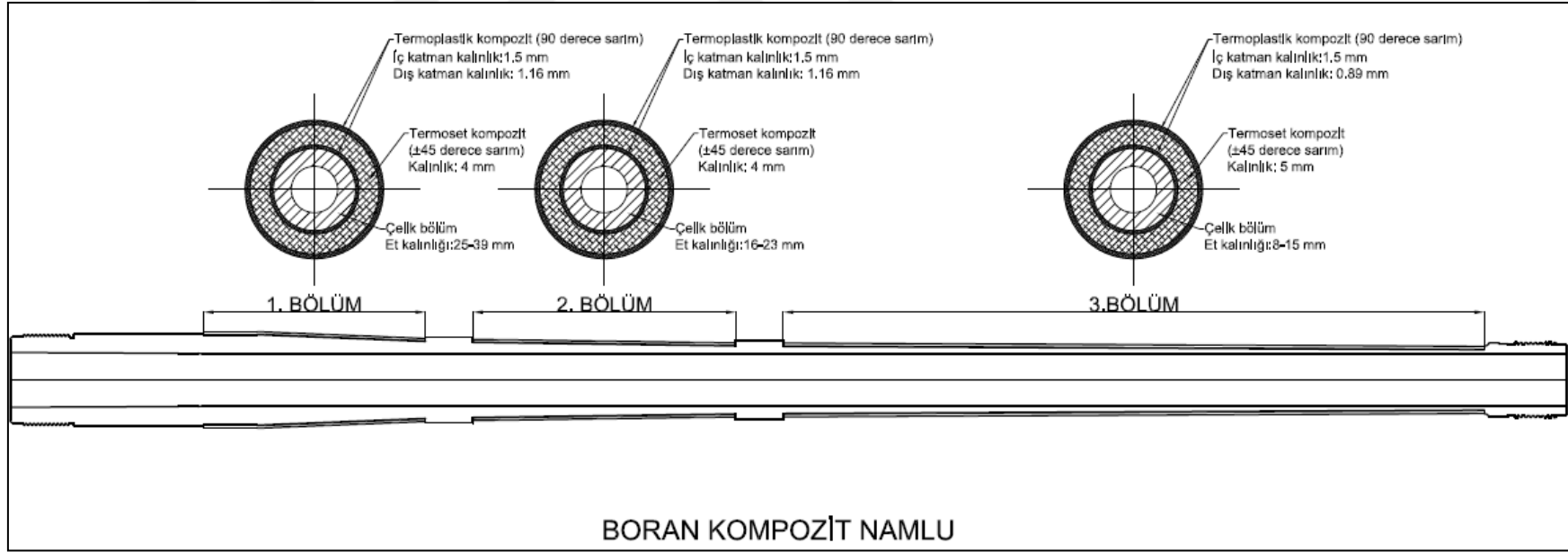
Çizelge 2.4. Kullanılan Kompozit Malzemeler ve her yönde değişen özellikleri

Malzeme özellikleri	Karbon/PEEK AS4/APC2	Karbon/Epoxy AS4/3501-6
E_{11} (GPa)	138	142
E_{22} (GPa)	10.2	10.3
G_{12} (GPa)	5.7	7.2
ν_{12} (-)	0.3	0.27
σ_{11T} (MPa)	2070	1830
σ_{11C} (MPa)	1360	1096
σ_{22T} (MPa)	86	57
σ_{12} (MPa)	186	71
α_{11} ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	0.5	-0.9
α_{22} ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	30	27
ρ (gr/cm^3)	1.60	1.58
k (W/m.K)	$k_x=4.6$ $k_y=k_z=0.42$	$k_x=15.7$ $k_y=k_z=0.687$
c (J/kg $^{\circ}\text{K}$)	850	887
h (W/m 2 K)	50	85

2.3.3. Kompozit Malzeme Uygulamasının Hesaplara İşlenmesi

Termoplastik reçineli karbon fiber kompozit malzemenin (Karbon/PEEK) çelik ile ara katman olarak kullanılması ve en dışarıya tekrar uygulanması, sarım açısının 90° olması, sarım tezgâhının yetenekleri çerçevesinde ara termoset reçineli karbon fiber kompozit (Karbon/Epoxy) katmanların ± 45 derece açı ile uygulanması uygun değerlendirilmiştir.

Namlu sarımı üç bölümde yapılacak şekilde düşünülmüştür. Her bölümde uygulanacak katman kalınlıkları aşağıda gösterilmiştir.



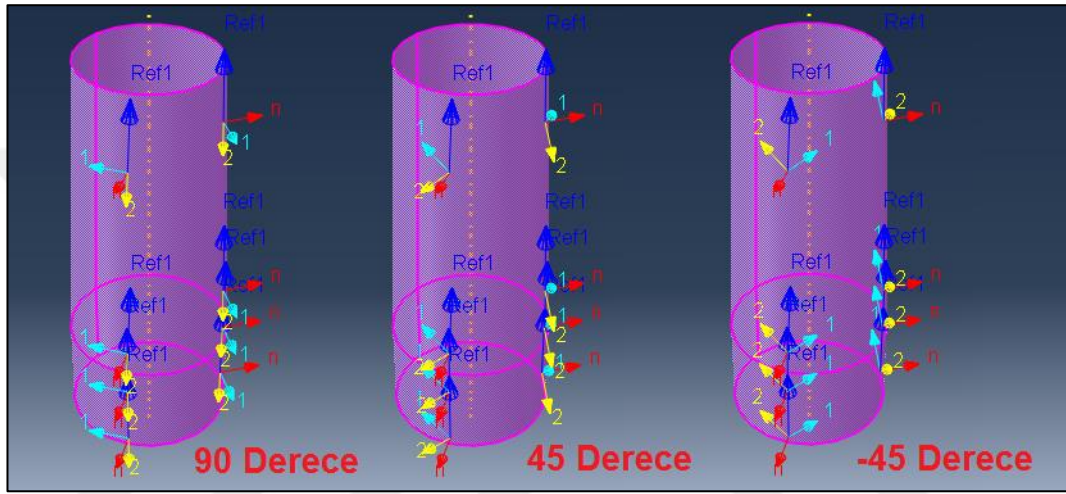
Şekil 2.48. Kompozit sarım bölümleri ve bölümlerdeki çelik ve kompozit katman kalınlıkları.

Çizelge 2.5. Bölümler ve Katman detayları

	BİRİNCİ BÖLÜM	İKİNCİ BÖLÜM	ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
Katman 1	Çelik Bölüm Kalınlığı: Değişken,	Çelik Bölüm Kalınlığı: Değişken,	Çelik Bölüm Kalınlığı: Değişken,
Katman 2	Çelik kompozit ara katman (termoplastik reçineli katman) kalınlığı: 1.5 mm. Namlu eksenine dik sarım yapılacaktır.	Çelik kompozit ara katman (termoplastik reçineli katman) kalınlığı: 1.5 mm. Namlu eksenine dik sarım yapılacaktır.	Çelik kompozit ara katman (termoplastik reçineli katman) kalınlığı: 1.5 mm. Namlu eksenine dik sarım yapılacaktır.
Katman 3	Termoset reçineli katman kalınlığı: 4 mm. Namlu eksenine göre ± 45 derece açı ile sarım yapılacaktır.	Termoset reçineli katman kalınlığı: 4 mm. Namlu eksenine göre ± 45 derece açı ile sarım yapılacaktır.	Termoset reçineli katman kalınlığı: 5 mm. Namlu eksenine göre ± 45 derece açı ile sarım yapılacaktır.
Katman 4	Dış termoplastik reçineli katman kalınlığı: 1.16 mm. Namlu eksenine dik sarım yapılacaktır.	Dış termoplastik reçineli katman kalınlığı: 1.16 mm. Namlu eksenine dik sarım yapılacaktır.	Dış termoplastik reçineli katman kalınlığı: 0.89 mm. Namlu eksenine dik sarım yapılacaktır.

2.3.4. Kompozit Malzeme Sarımı Yapılmış Namlunun Nümerik Dinamik Analizi

Kompozit katmanlar nümerik benzetim programında yüzey normalleri ve uygun eksen tanımlamaları yardımı ile tanımlanmış, her yönde değişken malzeme özellikleri uygulanmıştır (Bkz.Şekil 2.49.).



Şekil 2.49. Fiber Sarım Yönleri

Sarım işlemi modellendikten sonra kompozit sarım namlu için dinamik hesap bir defa daha en yüksek çalışma basıncı için koşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar eniyelenmiş çelik namlu ile karşılaştırılmıştır.

Kompozit desteklemenin üç kademedede yapılmasının nedeni namlu üzerinde namlunun kızak mekanizmasına bağlantı noktalarına dokunulamaması nedeniyledir. Bu noktalarda ayrıca kompozit sarımın yapılabileceği en yüksek çap değeri de sınırlandırılmıştır. Dolayısı ile sarım kalınlığının artırılması sınırlı kalacaktır. Ancak ikinci sarım bölgesinde meydana geleceği öngörülen gerilme yığılması bölgesinin bu bölgeden önce oluşma olasılığı yüksektir. Bunun nedeni teorik hesapta temsili merminin hızlanması dolayısı ile konumu gerçekte olacağı yerinden bir miktar önde olmaktadır. Ancak

olası bir pik basınç durumunda merminin normal koşullardan daha ileride olması durumu da bu incelemeler esnasında irdelenmiş olmaktadır.

Hesaplama basitleştirme yapmak adına çelik cidarın dış çapı ile namlu bağlantı noktalarının birleşim yerlerinde keskin bırakılmış köşeler uygulama esnasında yarıçap oluşturarak yumuşak geçiş yapılmak sureti ile bu bölgedeki gerilim yığılmalarının önüne geçilebileceği değerlendirilmiştir.

Bu bölümde anlatılan modelleme mantığına göre gerçekleştirilen hesaplamalarda elde edilen bulgular Araştırma Bulguları bölümüm Şekil 3.46. ve ilgili paragraflarda verilmiş ve değerlendirilmiştir.

2.4. Kompozit Destek Tasarımının Doğrulanması

Gelinen noktada San-Tez projesinde oluşan bürokratik aksamlar nedeni ile kompozit ile desteklenmiş obüs namlusu atışlı testi gerçekleştirilememiştir. Kompozit takviye kısmının değerlendirilmesi için oluşturulmuş nümerik modelin doğrulanması için hafif silah (Kompozit Sarılmış Keskin Nişancı Tüfeği) ile atışlı testler gerçekleştirilmiştir. Model ölçüleri hafif silah ölçülerine indirgenerek ve kendi iç balistiğine uygun olacak şekilde çalıştırılarak ve ölçümlerle doğrulanması hedeflenmiştir.

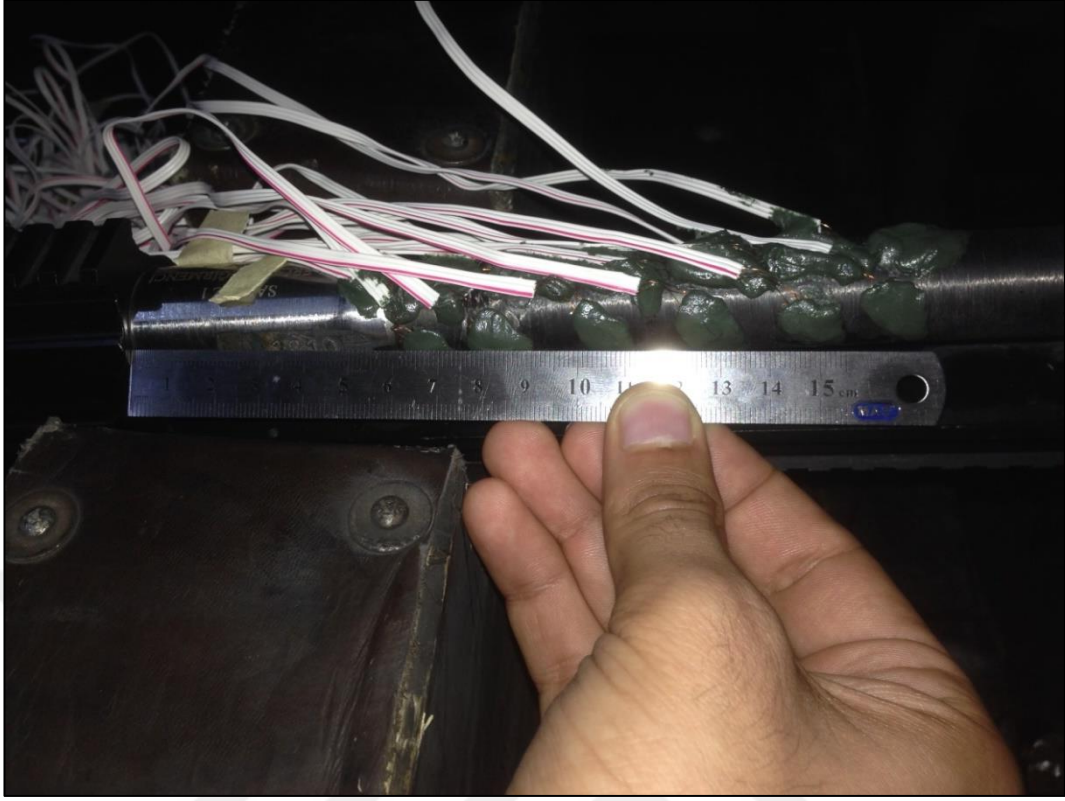
2.5. Deney Düzeneği ve Nümerik Modelleme

Bu amaçla kompozit sarılmış hafif silah namlusu ile bir dizi atış gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği aşağıda gösterilmiştir (Bkz.Şekil 2.50.).



Şekil 2.50. Keskin Nişancı Tüfeği'ne gerinim ölçer (*Ing.* Strain gauge) uygulanması.

Silah sisteminde en yüksek gerilmeler namlunun hazne kısmının hemen önünde gerçekleştiği için hazne bölümünden itibaren ilk 160 mm'lik bölüme olabildiğince sık olacak şekilde gerinim ölçer uygulanmıştır (Bkz. Şekil 2.51.).



Şekil 2.51. Hazneden başlayarak ilk 160 mm'lik bölüme uygulanmış gerinim ölçerler (Kompozit Sarılmış namlu).

Gerinim ölçerler aynı noktada namlu ekseni ile paralel, namlu eksenine dik ve namlu ekseni ile 45° açı yapacak şekilde yerleştirilmişlerdir.

Bu şekilde obüs namlusundaki karşılaştırma mantığına benzer şekilde ölçümler alınmış ve nümerik modelle karşılaştırılması hedeflenmiştir.

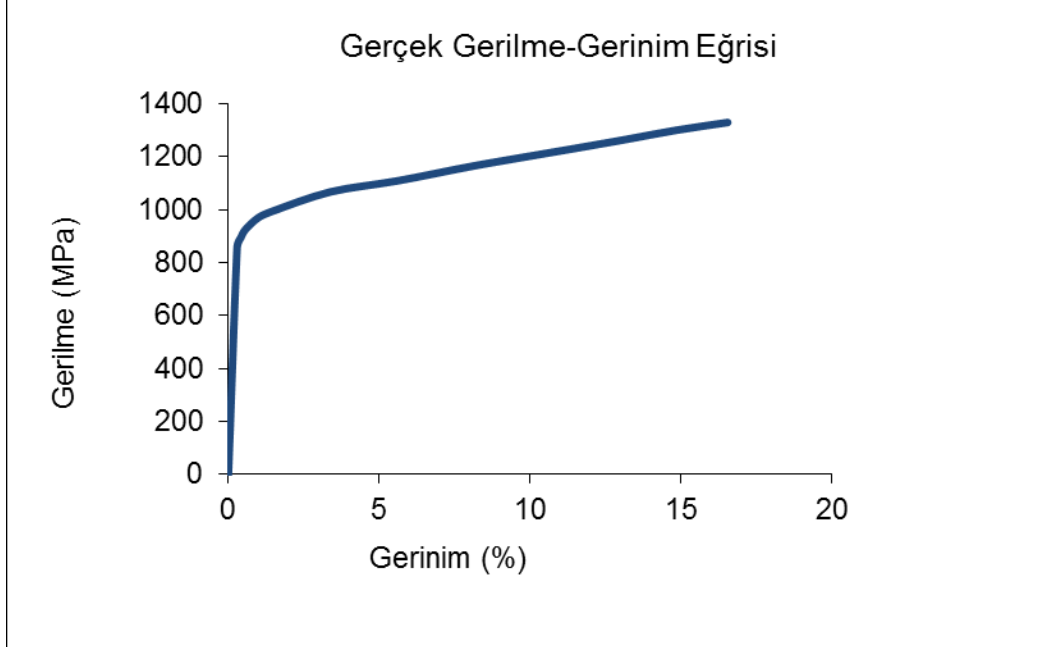
İkinci bölümde obüs namlusunun tasarlanmasında kullanılan dinamik nümerik model, kompozit bölümle ilgili ölçümlerin değerlendirilebilmesi amacıyla ölçüleri ve iç balistiği Keskin Nişancı Tüfeği ile aynı olacak şekilde düzenlenmiş ve kullanılarak modelin doğru çalıştığının teyit edilmesi amaçlanmıştır.

Kompozit sarım hafif silah namlusu için düzenlenmiş model aşağıda gösterilmiştir (Bkz. Şekil 2.52.). Hafif silah namlusu üretilirken dövme işlemi gerçekleştirilmekte ayrıca bir ofofretaj işlemine tabi tutulmamaktadır. Bu

nedenle hesaplarda elik b6l6m için her y6nde aynı malzeme 6zellikleri baz alınmış ve malzemeye uygulanan tek y6nde çekme deneyi sonuçları kullanılmıştır (Bkz. şekil 2.53.).



şekil 2.52. Kompozit sarılmış (A) namlusu 6l6m kıyaslamaları için oluşturulmuş model.



şekil 2.53. Hafif Silah Namlusu elik malzeme 6zellikleri.

Kullanılan kompozit malzemeler Çizelge 2.4.'te verilen malzemeler ile aynıdır. Kompozit malzeme kalınlıkları ise çelik kısımdan itibaren ilk katman termoplastik reçineli namlu eksenine dik 90° sarılmış ve 1.2 mm kalınlıkta, ikinci katman termoset reçineli namlu eksenine göre $\pm 45^\circ$ sarımlı ve 4 mm kalınlıkta ve son ve en üst katman termoplastik reçineli, tekrar namlu eksenine dik 90° sarımlı ve 1 mm kalınlıktaki katman şeklindedir.

Bu bölümde elde edilen bulgular Araştırma Bulguları bölümünde Şekil 3.47. - Şekil 3.50. arasındaki şekillerde ve şekillerin bulunduğu bölümdeki paragraflarda verilmiş ve tartışılmıştır.

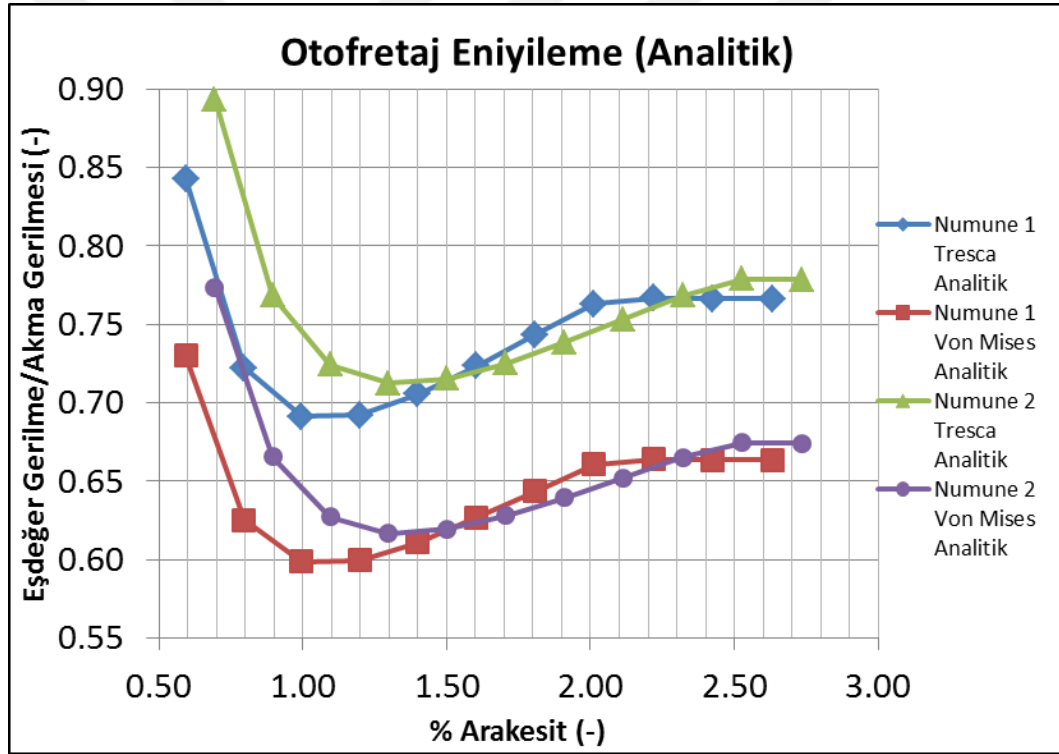


3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. BİRİNCİ BÖLÜM: Otofretaj Eniyilemesi

3.1.1. Analitik ve Nümerik Yöntem Bulguları

Analitik bağıntılar (Bkz. EK-1) ile elde edilen bulgular (Elastik-Doğrusal Plastik Malzeme Modeli);

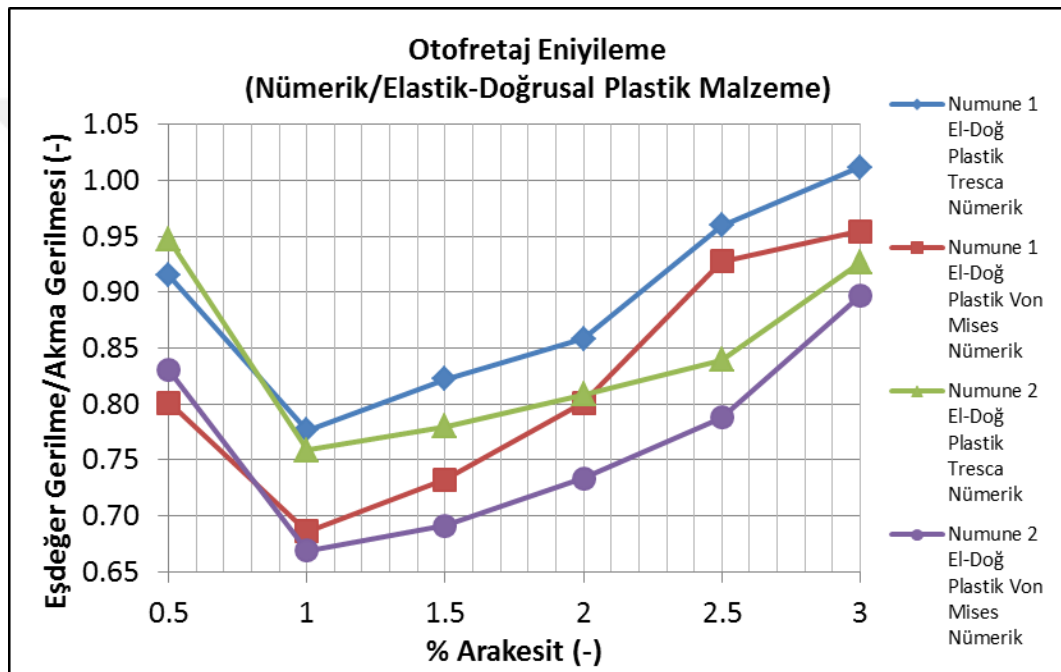


Şekil 3.1. Otofretaj eniyilemesi (Analitik).

Şekil 3.1'deki eğriler incelendiğinde malzemeye kazandırılan özelliklerinin eniyileme hesabında etkili olduğu görülmektedir. Akma gerilmesi yüksek olan numune için hesaplanan % arakesit değerinin %1.0-1.2 aralığında en düşük değerini aldığı görülmektedir. Akma gerilmesi düşük olan ve namlunun

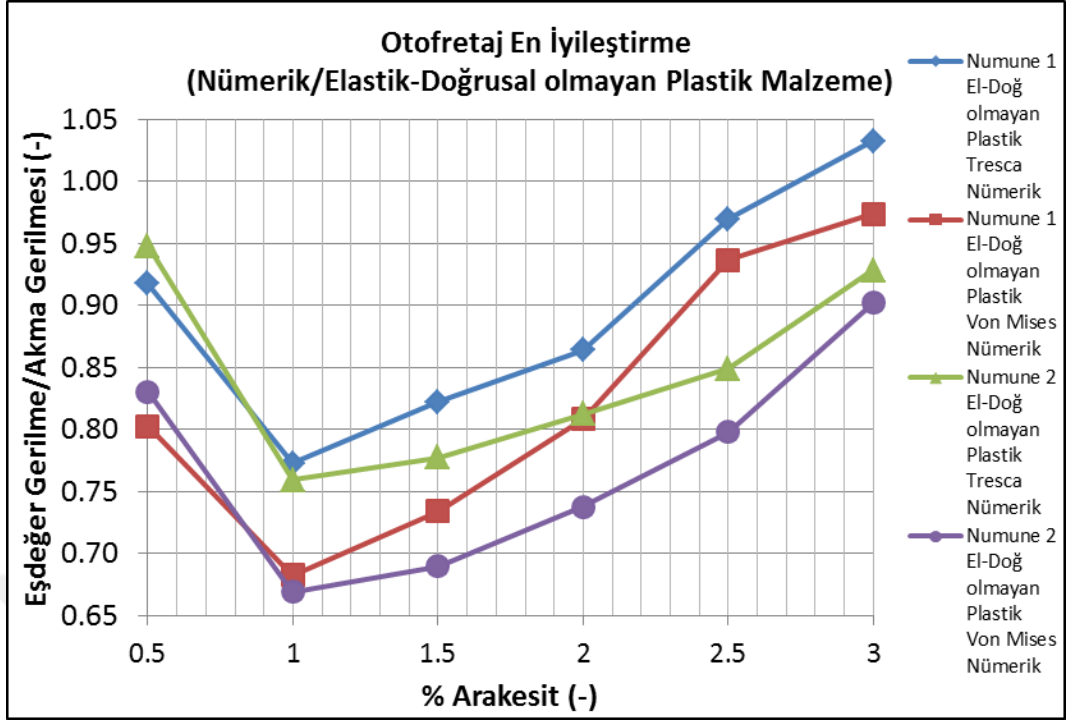
üretildiği 2 numaralı numunede ise bu değer %1.3-1.5 aralığında en düşük değerini almıştır. Ayrıca Tresca ve Von Mises ölçütleri arasında da % arakesit değerinde değil Eşdeğer Gerilme/Akma Gerilmesi oranı değerlerinde farklılaşma olduğu görülmüştür. Tresca ölçütüne göre gerilme oranı değerleri Von Mises'e göre 0.10 mertebesinde yüksek seyretmektedir.

Nümerik Yöntem Bulguları (Elastik-Doğrusal Plastik Malzeme Modeli);



Şekil 3.2. Elastik- Doğrusal Plastik Malzeme Modeli ile Otofretaj Eniyilemesi Hesabı.

Nümerik Yöntem Bulguları (Elastik- Doğrusal Olmayan Plastik Malzeme Modeli);

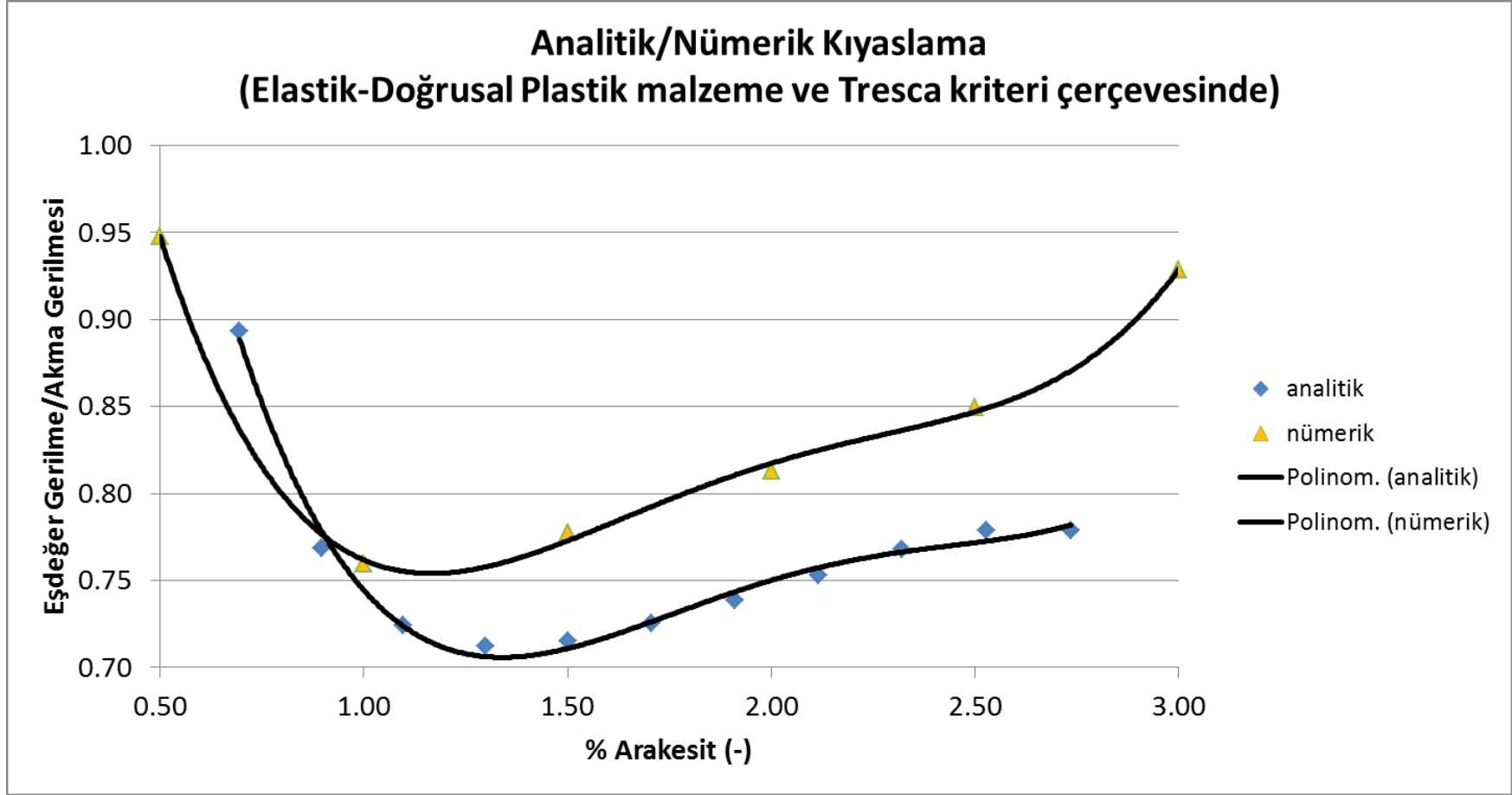


Şekil 3.3. Elastik- Doğrusal olmayan Plastik Malzeme Modeli ile Otofretaj Eniyilemesi Hesabı.

Nümerik model ile yapılan hesaplama sonuçlarına bakıldığında eşdeğer gerilme/akma gerilmesi oranı değerlerinin 400 MPa'lık yükleme koşulu ve otofretaj esnasında oluşmuş elastik-plastik geçiş çapında en düşük değerini %1.0'lik bir % arakesit değerinde aldığı görülmektedir. Ancak nümerik model ile hesap yapılan % arakesit bölüntü sayısı ve örnek miktarı analitik modelde olduğundan daha az sayıda olmuştur.

Elastik-Doğrusal Plastik ve Elastik-Doğrusal olmayan plastik malzeme kullanılmak sureti ile elde edilmiş sonuçların birbirinden çok farklı olmadığı ve hesapları sadeleştirmek ve kıyaslamak için Elastik - Doğrusal Plastik malzeme modelinin kullanılabilceği değerlendirilmiştir.

Analitik ve nümerik sonuçlar için regresyon analizi yapılması, sonuçların sadece namlunun üretildiği Numune 2 ve elastik-doğrusal malzeme özellikleri için kıyaslanması ve Tresca ölçütü çerçevesinde değerlendirilmesinin emniyetli sonuç almak adına uygun olacağı kararlaştırılmıştır. Bu şekilde;



Şekil 3.4. Analitik/Nümerik hesap kıyaslama.

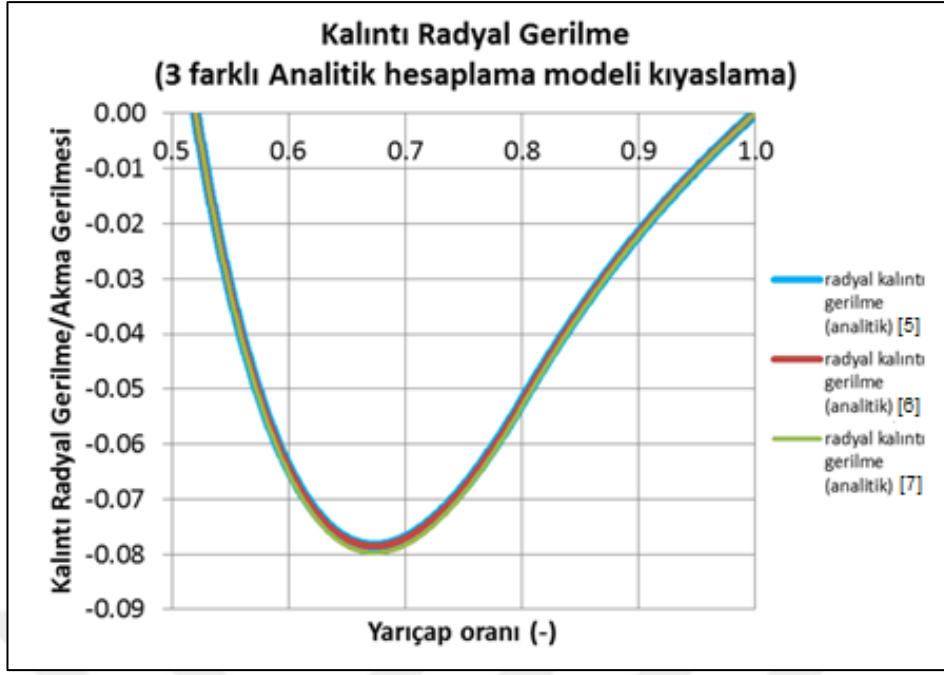
Hesaplamalar yukarıdaki grafikte özetlendiğinde, numunelere dördüncü dereceden eğri uydurulup regresyon analizi yapıldığında eğrilerin numuneleri temsil etme yüzdelerinin %98-99 düzeyinde olduğu görülmektedir. % arakesit belirlenmesinde eğrilerin kullanılması durumunda analitik sonuçların %1.3-1.4, nümerik sonuçların ise %1.1-1.3 değerleri için en düşük değerlerini aldığı belirlenmiştir. Namlu otofretaj taslağının ölçülendirilmesinde bu değerler temel alınmış ve pratikte yaşanabilecek kayıplar düşünülerek % arakesit değerinin %1.5 olarak uygulanması kararlaştırılmıştır.

3.1.2. Otofretaj Eniyilemesi Sonrası Kalıntı Gerilmeler

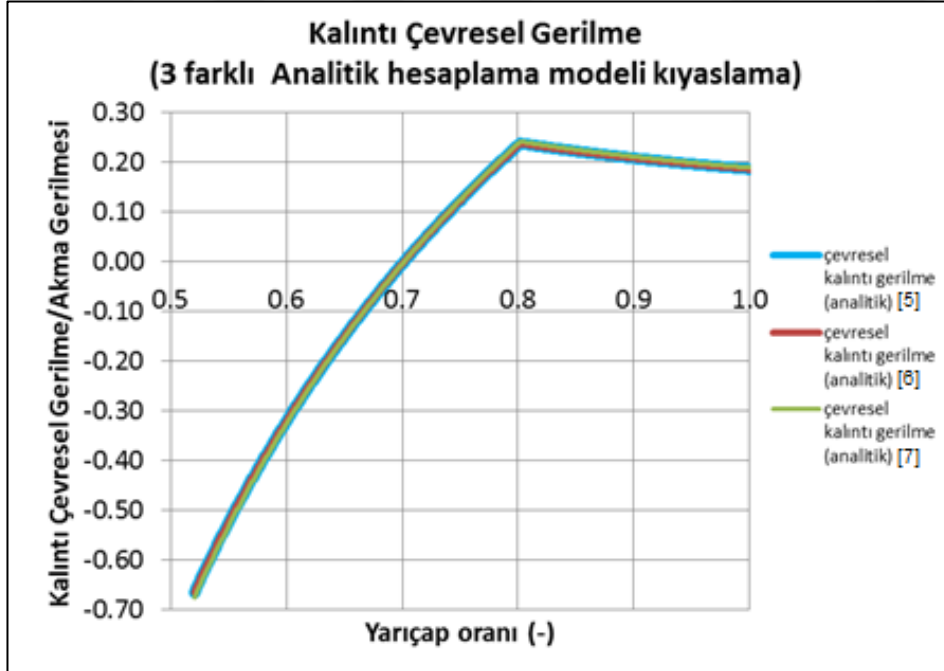
3.1.2.1. Analitik ve Nümerik Bulgular

Analitik ve Nümerik Yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiş hesaplamalara sonucunda elde edilen değerler aşağıdaki eğrilerde gösterilmiştir.

Analitik Bulgular (Elastik-Doğrusal Plastik Malzeme Modeli);



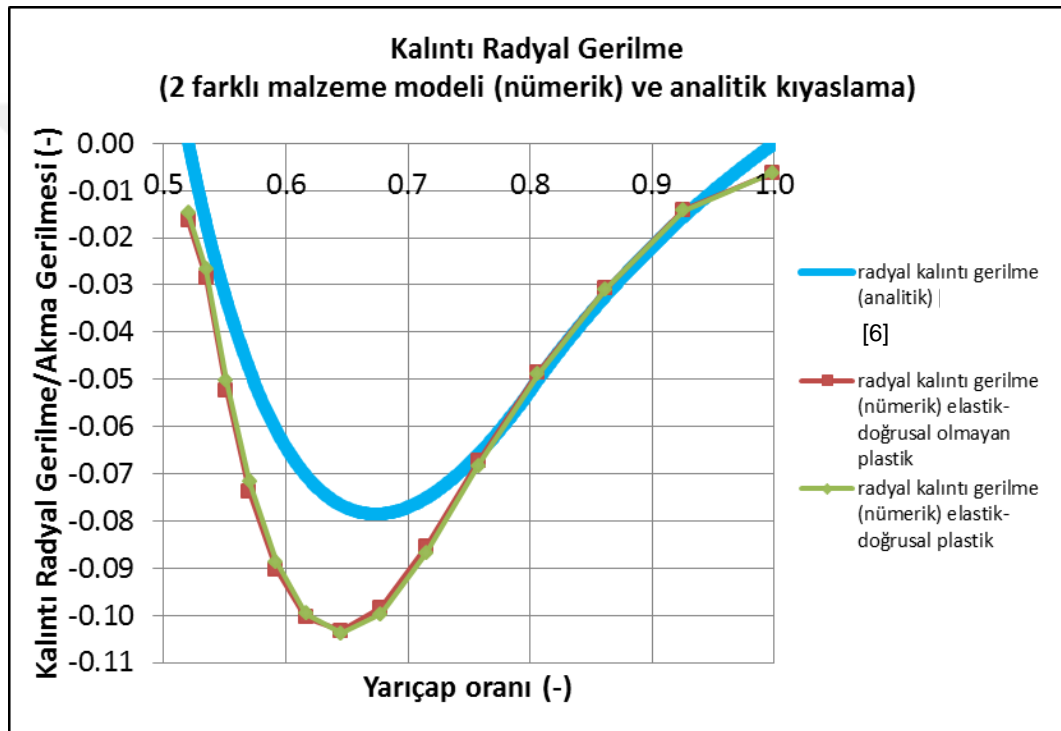
Şekil 3.5. Radyal gerilme (3 farklı model ile gerçekleştirilmiş analitik hesaplamalar).



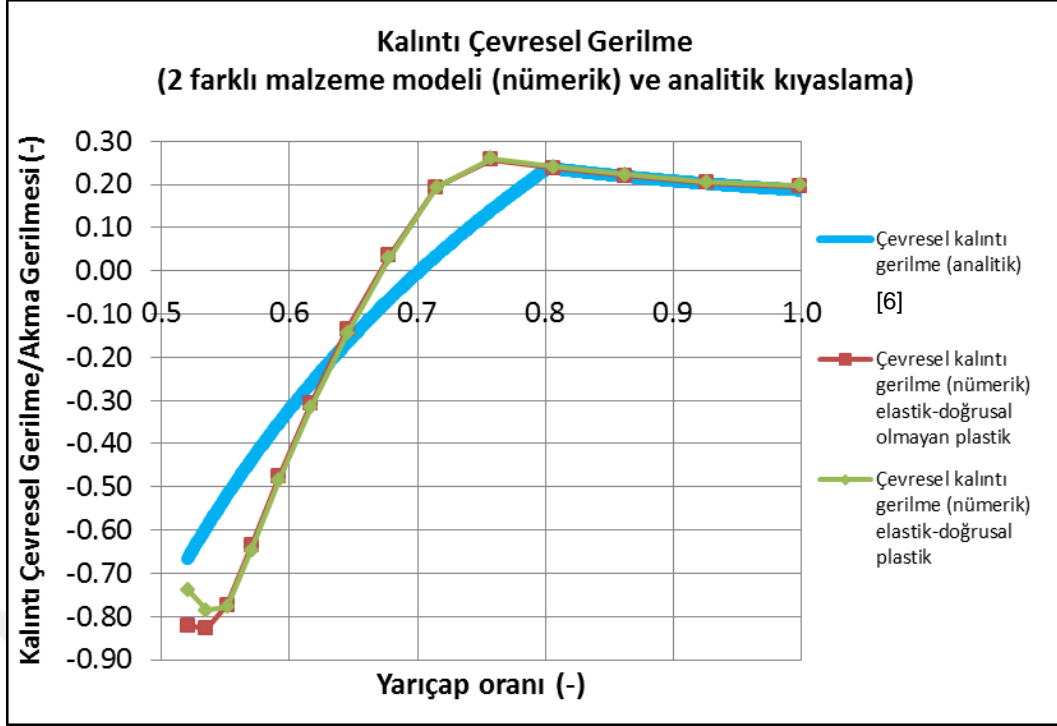
Şekil 3.6. Çevresel gerilme (3 farklı model ile gerçekleştirilmiş analitik hesaplamalar).

Gerçekleştirilen analitik hesaplamalarda 3 farklı model ile de çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum hesaplamalarda hata olasılığını en aza indirmek adına önem arz etmektedir.

Analitik ve Nümerik (Mandrel Uygulamak sureti ile) Bulguların karşılaştırılması;



Şekil 3.7. Abaqus ¼ kesit modelinde hesaplanan kalıntı radyal gerilme değerleri ve analitik hesaplama kıyaslama.



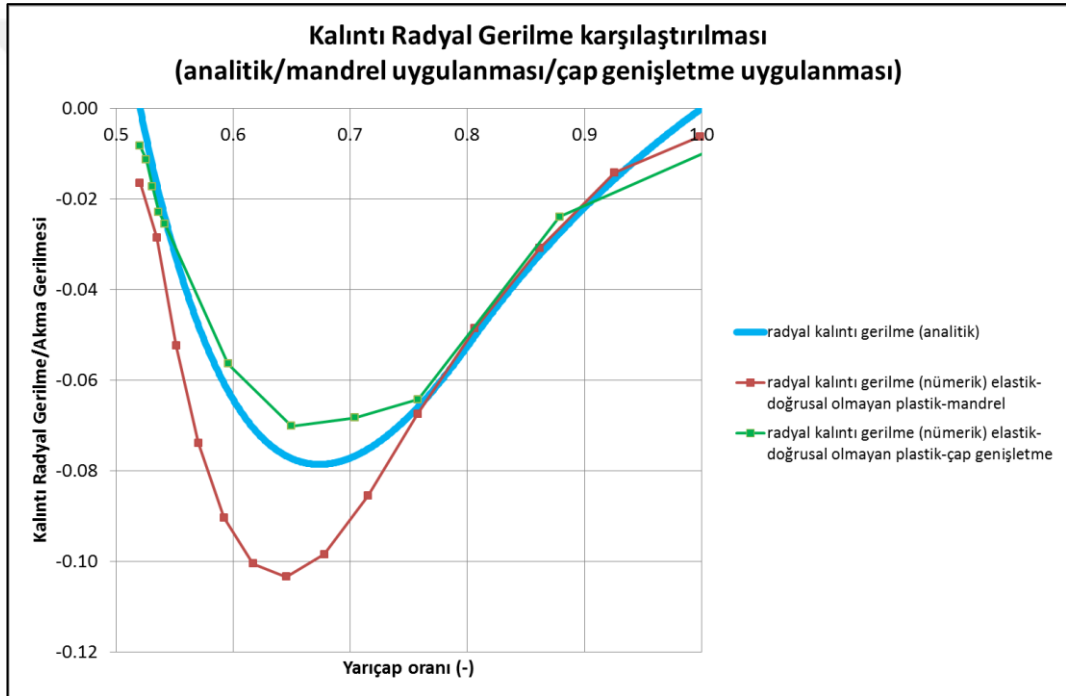
Şekil 3.8. Abaqus ¼ kesit modelinde hesaplanan kalıntı çevresel gerilme değerleri ve analitik hesaplama kıyaslama.

Gerçekleştirilen kıyaslamalar ile analitik model ile nümerik modelin hesaplama sonuçları arasında çok olmamakla birlikte bir miktar farklar olduğu görülmektedir. Bu farkların radyal gerilmenin en düşük değeri ile çevresel gerilmenin çap arttıkça değişim eğimleri olduğu görülmüştür. Bu farkları oluşturan temel etkinin ise analitik hesaplamalar için yapılan kabuller olduğu değerlendirilmiştir.

Bu hali ile otofretaj işlemi esnasında ve sonrasında otofretaj taslağı üzerinde oluşacak ve kalıntı olacak gerilme dağılımı çıkartılmış olmaktadır. Bu değerler, ileriki bölümlerde çelik namlu taslağının ölçülendirilmesinde, mühimmatın ateşlenmesi esnasında oluşan basınç-zaman profiline göre çelik ile benzer dayanım özellikleri göstermesi planlanan kompozit namlunun kompozit sarılacak kısmının belirlenerek çelik namludan kaldırılabilir en fazla talaş miktarının teorik olarak belirlenmesinde kullanılmıştır.

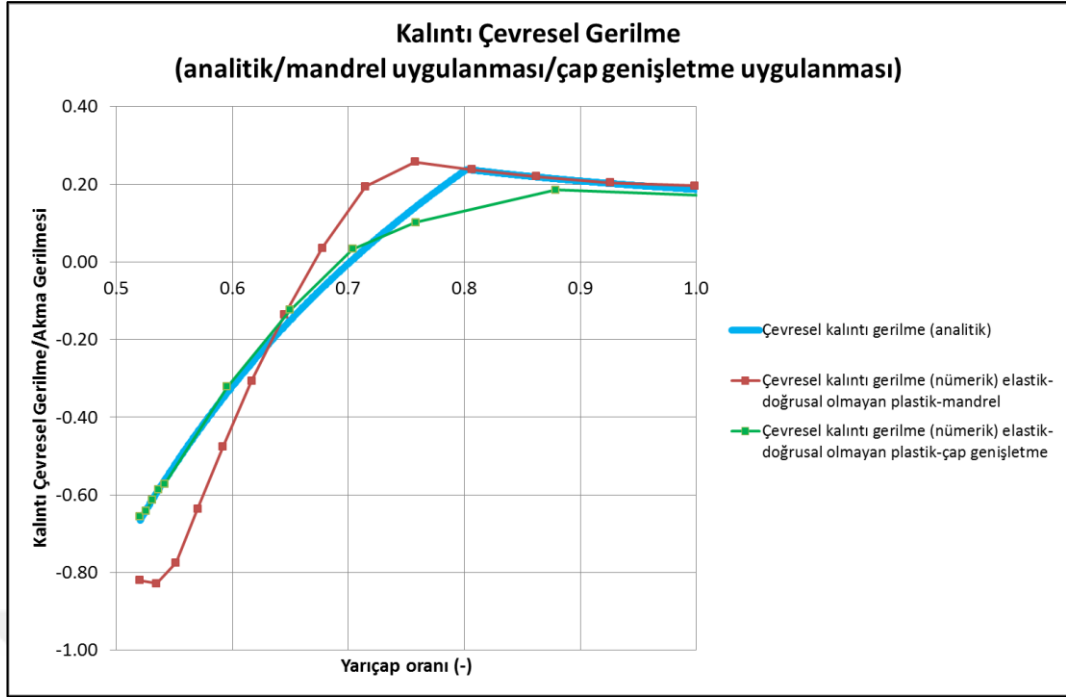
Ayrıca, analitik hesaplama, nümerik mandrel uygulanarak ve çap genişletme metodu ile yeni belirlenmiş ölçülerdeki otofretaj ölçüleri kullanılarak elde edilmiş bulgular karşılaştırılmıştır.

Radyal gerilmeler incelendiğinde en yüksek bası gerilmesinin mandrel uygulanması yönteminde elde edildiği belirlenmiştir. Çap genişletme yöntemi ile hesaplanan en yüksek bası gerilmesinin, analitik yöntemle elde edilen değere göre bir miktar düşük kaldığı ancak analitik yöntemle genel olarak yakın değerler aldığı tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Farklı Yöntemlerle Hesaplanmış Kalıntı Radyal Gerilmeler.

Çevresel gerilmeler bakıldığında radyal gerilmelere benzer şekilde analitik ve çap genişletme yöntemi ile hesaplanan bası çevresel gerilme değerlerinin mandrel ile hesaplanan değerlere göre bir miktar azaldığı ancak genel olarak çap boyunca bir uyum gösterdikleri belirlenmiştir (Bkz. Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Farklı Yöntemlerle Hesaplanmış Kalıntı Çevresel Gerilmeler.

3.1.3. Deneysel Bulgular ve Karşılaştırma

Fabrika otofretaj işleminden sonra iç ve dış çaplardaki genişleme miktarlarını ölçmekte ve otofretajın beklendiği şekilde gerçekleşip gerçekleşmediğini kontrol etmektedir. Ölçüm yapılan noktalar A Bölgesinin başlangıcından itibaren 0-200-500 mm ileride, B bölgesinde 1860 mm, C bölgesinde ise 2760 mm konuma denk gelen bölgelerdeki iç ve dış çap genişleme (plastik şekil değiştirme) miktarlarıdır. Üç bölge otofretaj uygulamasında fabrikanın beklediği genişleme miktarları ve kontrol parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Bkz. Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Fabrika tarafından uygulanan üç bölgele otofretaj kontrol değerleri.

ÖLÇME ŞERİDİ POZİSYONU		DELİK ÇAPI GENİŞLEME MİKTARI KONTROL DEĞERLERİ	
EKSEN	MESAFE (mm)	En az (mm)	En fazla (mm)
A	0	0.86	1
B	200	0.86	1
C	500	0.86	1
D	1860	0.28	0.5
E	2760	0.28	0.5

Fabrikada üç bölgele otofretaj uygulanmış iki adet orijinal ölçülerindeki iki adet namlunun ölçüm sonuçları aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir (Bkz. Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.2. Namlu Numarası:10 (Otofretaj öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları) -ÖLÇÜM.

Pozisyonu	Teorik Model	Fark (Plastik Genişleme)	
Eksen	Mesafe (mm)	Dış çap (mm)	İç çap (mm)
A	0	0.59	0.92
B	200	0.60	0.91
C	500	0.54	0.92
D	1860	0.29	0.35
E	2760	0.32	0.37

Çizelge 3.3. Namlu Numarası:4 (Otofretaj öncesi ve sonrası ölçüm sonuçları)
- ÖLÇÜM.

Pozisyonu	Teorik Model	Fark (Plastik Genişleme)	
		Dış çap (mm)	İç çap (mm)
A	0	0.53	0.97
B	200	0.55	0.99
C	500	0.54	1.02
D	1860	0.20	0.29
E	2760	0.21	0.29

Çap genişleme yönteminin kullanıldığı, doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin tanımlandığı ve üç bölge otofretaj ölçüleri ve orijinal namlu ölçüleri için gerçekleştirilmiş hesaplamada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 3.4.).

Çizelge 3.4. Çap genişleterek eski otofretaj ölçülerinde hesaplama sonuçları
- HESAP.

Pozisyonu	Teorik Model	Fark (Plastik Genişleme)	
		Dış çap (mm)	İç çap (mm)
A	0	0.60	0.88
B	200	0.50	0.86
C	500	0.50	0.87
D	1860	0.25	0.34
E	2760	0.21	0.34

Tez çalışması kapsamında belirlenmiş yeni ölçülerde otofretaj işlemi yapılmış taslağın ölçümü yapıldığında ise aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır (Bkz. Çizelge 3.5.).

Çizelge 3.5. Yeni otofretaj ölçülerinde gerçekleştirilmiş otofretaj işlemi-ÖLÇÜM.

Pozisyonu	Teorik Model	Fark (Plastik Genişleme)	
		Dış çap (mm)	İç çap (mm)
A	0	0.30	0.45
B	200	0.32	0.45
C	500	0.33	0.45
D	1860	0.31	0.44
E	2760	0.30	0.44

Yeni otofretaj ölçülerine göre ancak iki farklı yöntem ile nümerik hesabın yapılması durumunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. İlk hesaplamada plastik şekil değiştirme iç çap δ kadar genişletilerek (Bkz. Çizelge 3.6.), ikincisinde ise mandrel, gerçekte otofretajın gerçekleştirildiği şekilde borunun içerisinden geçirilerek (Bkz. Çizelge 3.7.) sağlanmıştır.

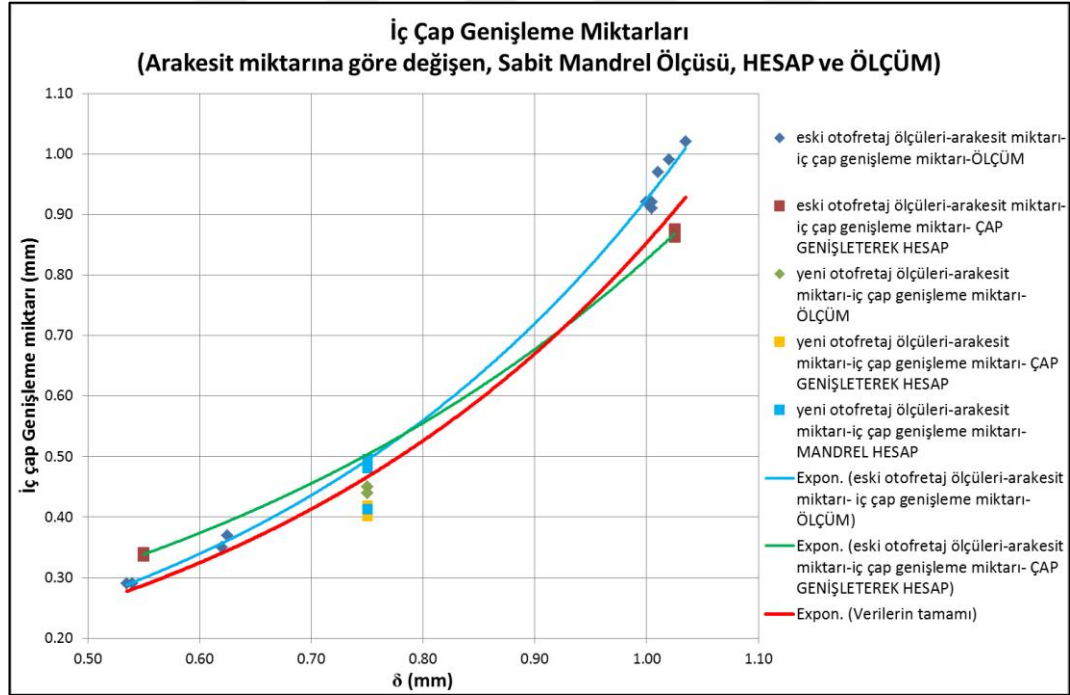
Çizelge 3.6. Yeni otofretaj ölçülerinde çap genişletme yöntemi ile gerçekleştirilmiş otofretaj hesaplama işlemi - HESAP.

Pozisyonu	Teorik Model	Fark (Plastik Genişleme)	
		Dış çap (mm)	İç çap (mm)
A	0	0.25	0.42
B	200	0.23	0.41
C	500	0.23	0.41
D	1860	0.22	0.40
E	2760	0.23	0.41

Çizelge 3.7. Yeni otofretaj ölçülerinde mandrel geçirme yöntemi ile gerçekleştirilmiş otofretaj hesaplama işlemi - HESAP.

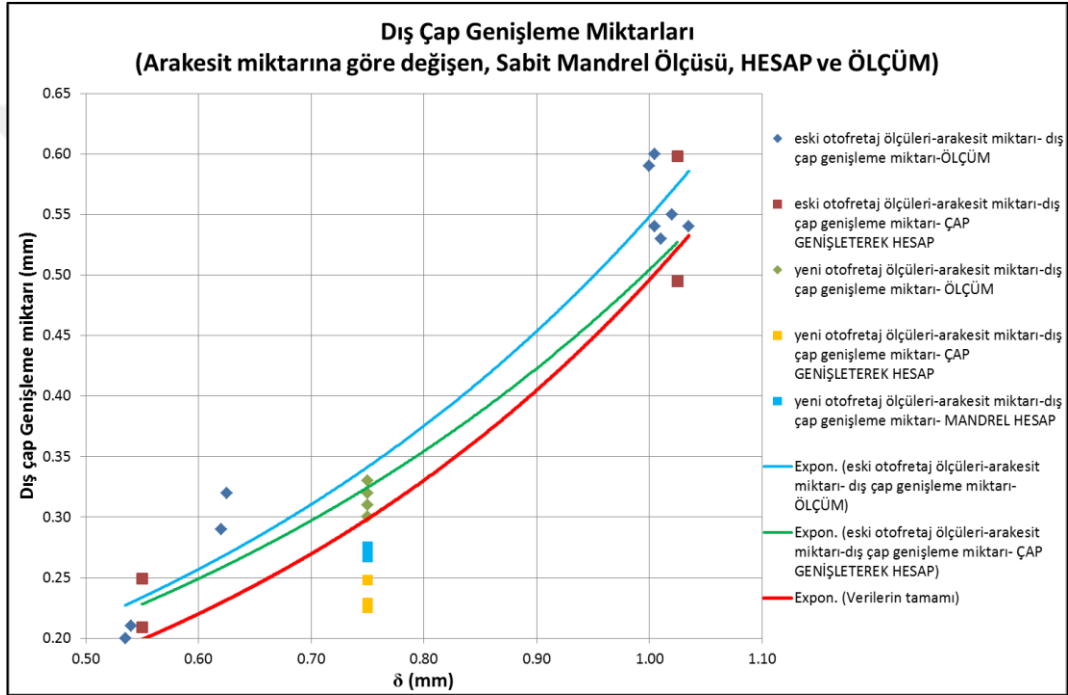
Pozisyonu	Teorik Model	Fark (Plastik Genişleme)	
		Dış çap (mm)	İç çap (mm)
A	0	0.27	0.41
B	200	0.27	0.48
C	500	0.27	0.48
D	1860	0.28	0.48
E	2760	0.27	0.50

Veriler δ (Mandrel-Otofretaj taslağı arakesit ölçüsü) – Plastik çap genişleme miktarları eğrilerine çevrildiğinde aşağıdaki grafikler oluşmaktadır.



Şekil 3.11. Arakesit miktarına göre iç çap plastik genişleme miktarları.

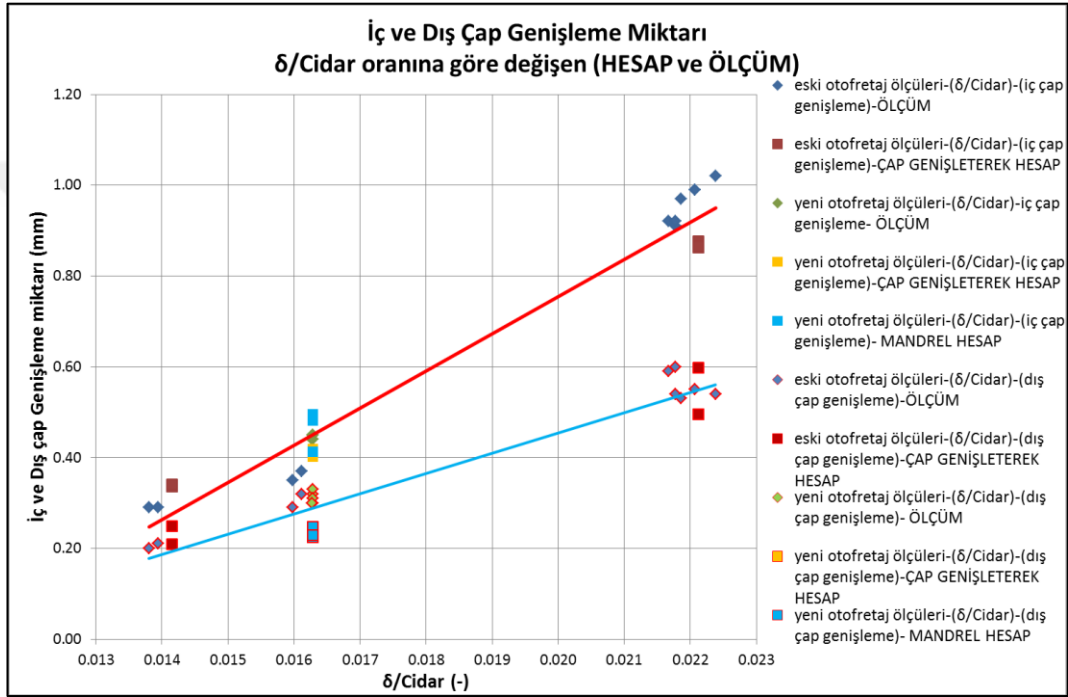
Yukarıdaki grafik incelendiğinde; sabit mandrel ölçüsü ve değişken arakesit (iç çap) ölçüleri için gerçekleştirilmiş ölçüm sonuçlarının eski otofretaj taslağı için uyum içerisinde olduğu ve üstel bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Yeni otofretaj ölçüleri için çap genişletme ve mandrel uygulanarak gerçekleştirilmiş hesaplama sonuçları, eski otofretaj ölçüleri için çap genişletme uygulanarak yapılmış hesaplama sonuçları arasında görülen uyuma uygun çıkmamış daha düşük değerler hesaplanmıştır.



Şekil 3.12. Arakesit miktarına göre dış çap plastik genişleme miktarları.

Dış çap genişleme miktarlarına bakıldığında ise eski otofretaj ölçüleri için çap genişleterek yapılan hesaplama ile yeni otofretaj ölçülerine göre gerçekleştirilmiş otofretajlı dış çap genişleme ölçüm sonuçlarının uyum gösterdiği görülmüştür. Bu iki grafik ile yapılan değerlendirmelerden arakesit miktarı kadar cidar kalınlığının da iç ve dış çap genişlemesinin tespitinde dikkate alınmasının gerekli olduğu değerlendirilmiştir.

Arakesit değerleri cidar kalınlıklarına bölünerek birimsiz hale getirildiğinde, arakesitin cidar kalınlığına oranı arttıkça lineer olarak iç ve dış çap genişleme miktarlarının da arttığı belirlenmiştir. Dolayısı ile arakesit miktarı (δ) kadar cidar kalınlığı da plastik şekil değiştirme, yani kalıntı şekil değiştirme ve kalıntı gerilme değerleri üzerinde etkili olmaktadır (Bkz. Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Arakesit(δ)-Cidar kalınlığı oranına göre değişen iç ve dış genişleme miktarları.

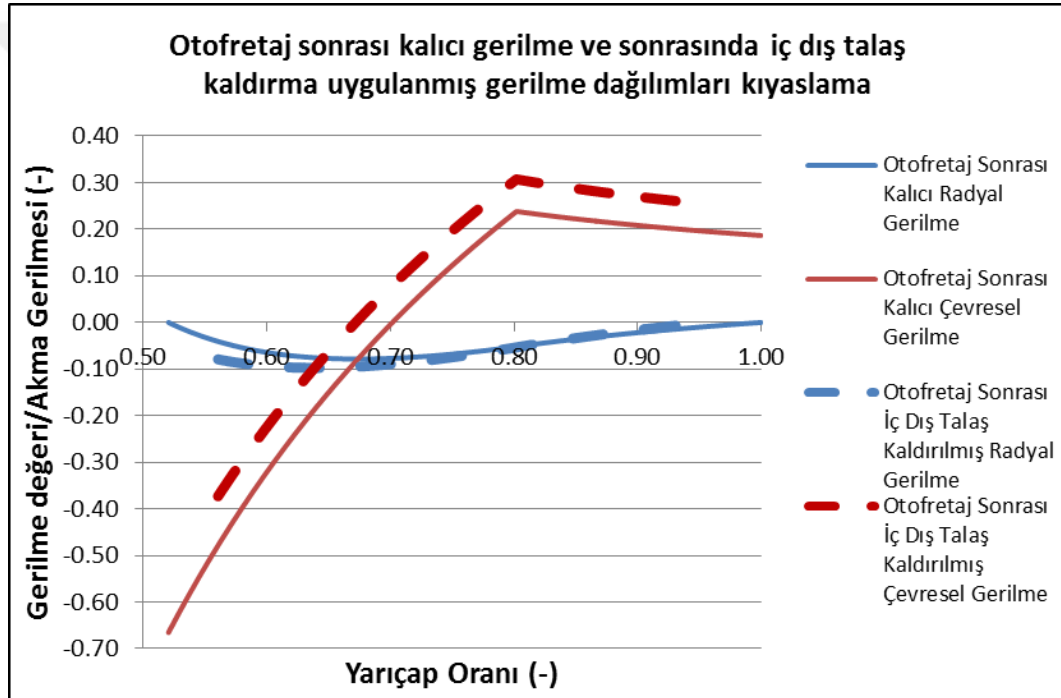
3.2. İKİNCİ BÖLÜM: Analitik Tam Ağırlık ve Nümerik Ağırlık Topoloji Eniyilemesi

3.2.1. Analitik ve Nümerik Yöntem Bulguları

3.2.1.1. Otofretaj İşlemi Sonrası Talaş Kaldırma İşlemi Uygulanmış Namlu Taslağındaki Gerilme Dağılımı

Otofretaj işleminden sonra örnek olarak göstermek üzere yaklaşık olarak hazne ve yiv-set ölçüleri dikkate alınarak iç yarıçaptan 3.826 mm ve dış yarıçaptan 5 mm talaş kaldırılması durumunda oluşacak gerilme dağılımı süperpozisyon uygulanarak kalıntı gerilme dağılımı ile kıyaslandığında aşağıdaki sonuç elde edilmiştir.

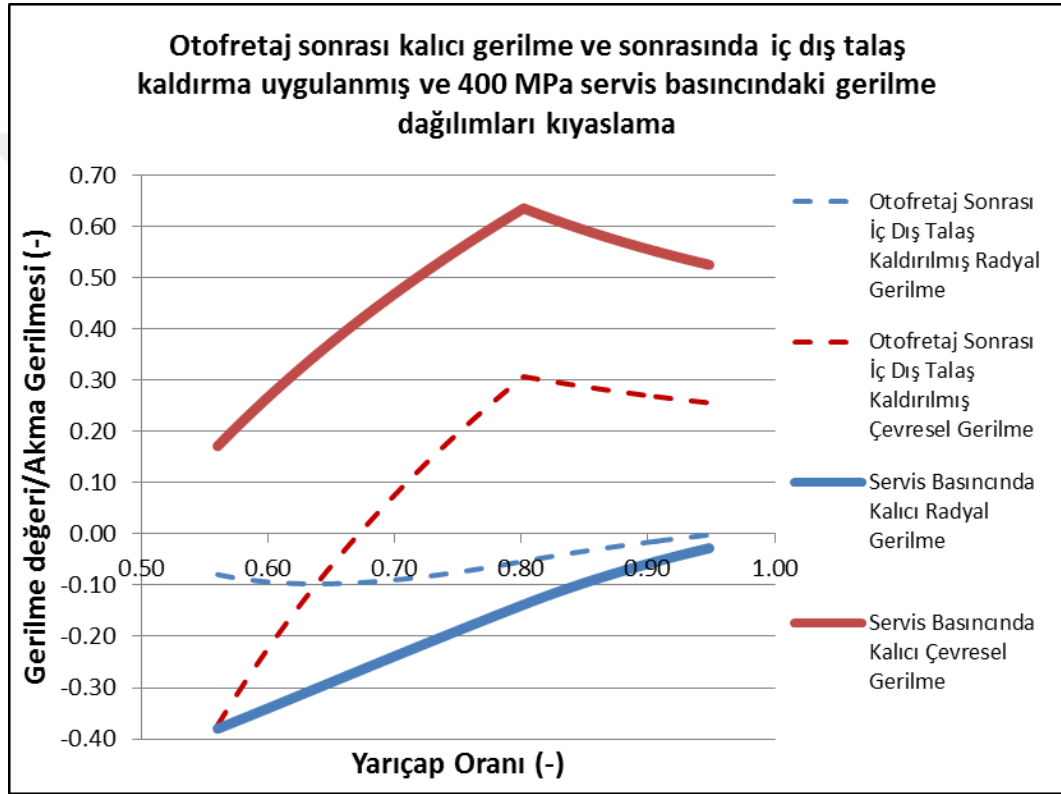
Bu hesapların yapılması için oluşturulan hesaplama kodu EK-3'te verilmiştir. Kod yukarıda tariflenen talaş kaldırma işlemi sonrasında tüpteki kalıntı gerilme durumunu hesaplar ve grafike eder (Bkz. Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Otofretaj uygulanması sonrası kalıntı gerilmeler ve sonrasında iç ve dış çaptan tornalama uygulandığı durumdaki gerilmelerin kıyaslanması.

3.2.1.2. Otofretaj İşlemi Sonrası Talaş Kaldırma İşlemi ve Servis Basıncı Uygulanmış Namlu Taslağındaki Gerilme Dağılımı

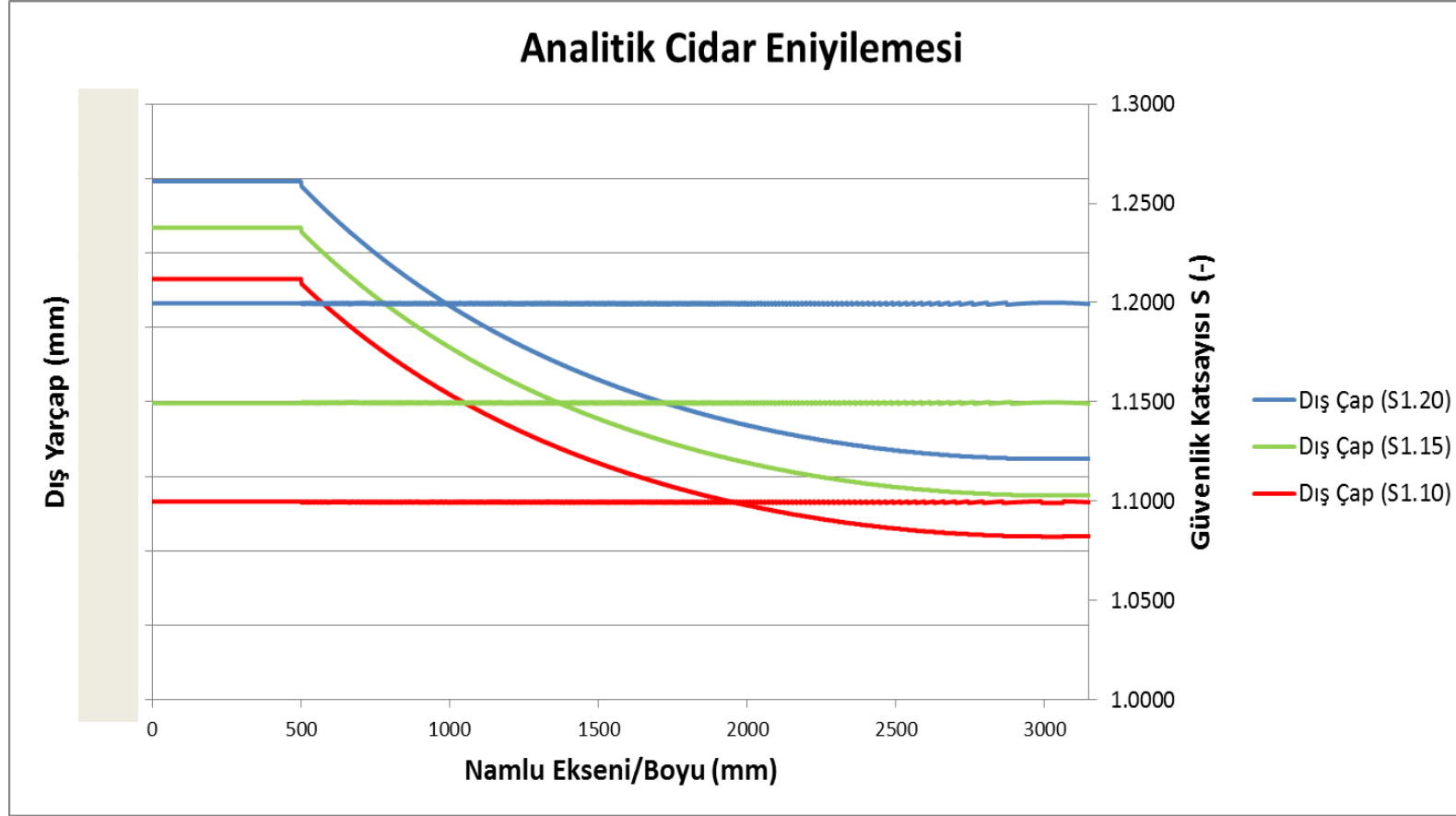
Otofretaj işleminden sonra iç ve dış çaptan talaş kaldırılması (Bkz. Şekil 3.14.) ve 400 MPa servis basıncı uygulanması durumunda oluşacak gerilme dağılımı süperpozisyon uygulanarak belirenmiş ve talaş kaldırılmış gerilme dağılımı ile kıyaslanarak aşağıdaki sonuç elde edilmiştir.



Şekil 3.15. Otofretaj uygulanmış, talaş kaldırılmış ve Servis basıncı uygulanmış namlu taslağı için gerilme dağılımı.

3.2.1.3. Analitik Tam Ağırlık Eniyilemesi Bulguları

Analitik Ağırlık Eniyilemesi hesabı ile elde edilen, farklı emniyet katsayıları için yapılmış ölçülendirmeler aşağıda gösterilmiştir. Ağırlıklarda elde edilen hafifleme miktarları Araştırma Bulguları bölümü sonunda özetlenmiştir.



Şekil 3.16. Farklı Emniyet Katsayıları için önerilen Analitik Yaklaşım ile hesaplanmış namlu dış yarıçap ölçüleri ve Emniyet Katsayısı değerleri

3150



Güvenlik Katsayısı: S1.10



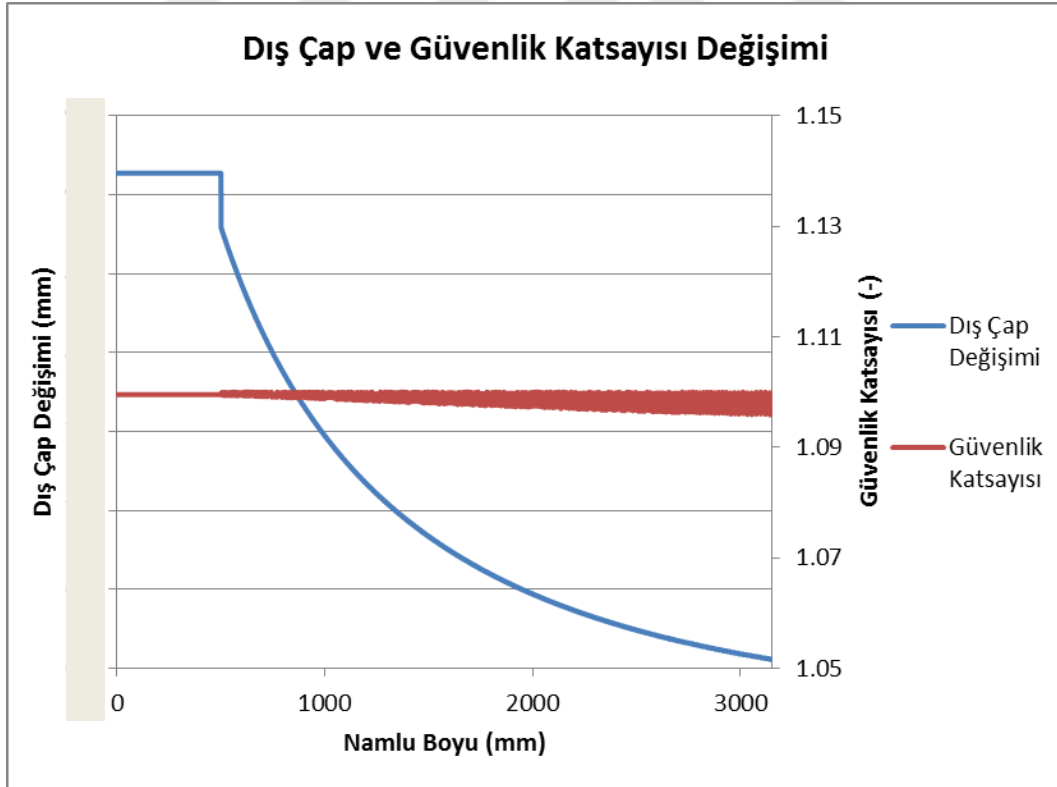
Güvenlik Katsayısı: S1.15



Güvenlik Katsayısı: S1.20

Şekil 3.17. Farklı güvenlik katsayıları için analitik olarak hesaplanmış namlu ölçüleri.

Namlunun iç çapına sabit talaş kaldırma değeri uygulanmış, dış çapta hesaplama ile elde edilmiş ölçüler namlu taslağı resimlerine işlenmiştir. Bu işlem yapılırken namlu üzerinde bulunan bağlantı noktalarına dokunulmamıştır (Bkz. Şekil 3.17.). Güvenlik katsayısı değerleri 1.20 ve 1.15 için hazne bölümünden talaş kaldırılmamıştır. 1.10 değeri için yiv-setin başladığı bölgeden sonra hazne dış çapından bir miktar talaş alınabileceği öngörülmüş, 1.05 güvenlik değerinde hazne boyunca talaş kaldırılabilmesi değerlendirilmiştir. Güvenliği ve kompozit desteği de dikkate alarak değerlendirildiğinde 1.10 güvenlik katsayısı için tasarlanmış çelik namlunun istekleri karşılayabilecek özellikte ve ağırlıkta olacağı değerlendirilmiş ve bu ölçülerin kullanılması kararlaştırılmıştır. 1.10 güvenlik seviyesi için namlu boyunca hesaplanmış kısıtlara göre değiştirilmemiş cidar değişimi ve güvenlik katsayısı değerler aşağıda gösterilmiştir.



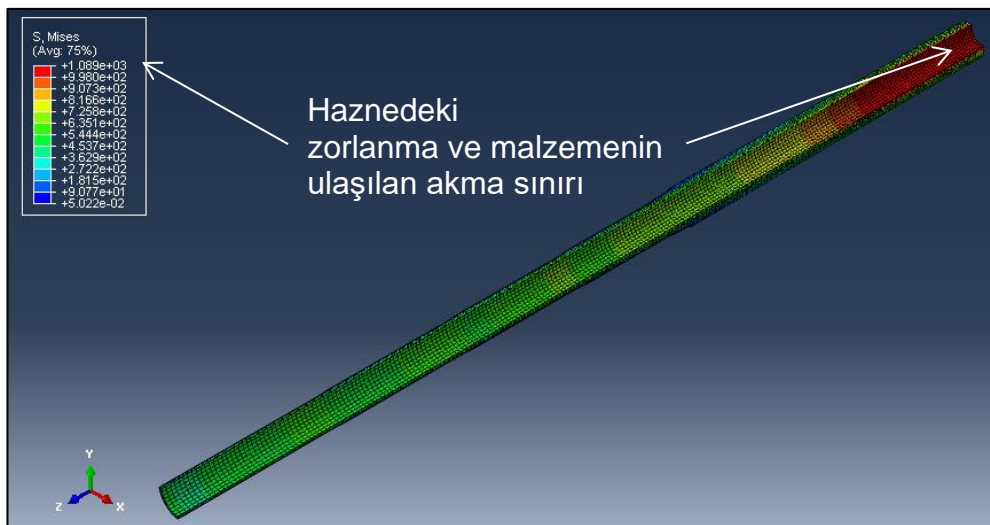
Şekil 3.18. Namlu boyunca Analitik Hesaplama ile tespit edilmiş dış yarıçap ve güvenlik katsayısı değişimi ve yakınsaması

Şekil 3.17.'de cidar değişimleri aralarındaki farklar çok belirgin olmasa da boyu 3150 mm olan çelik bir kütlede 1-2 mm'nin bile ağırlığa etkisi önemli olmaktadır. Bağlantı noktalarının kompozit sarımı kısıtlayacağı da öngörüldüğünde farklı güvenlik katsayıları için tam eniyelenmiş çelik namlu ağırlıkları Araştırma Bulguları Bölümünün sonunda verilmiştir.

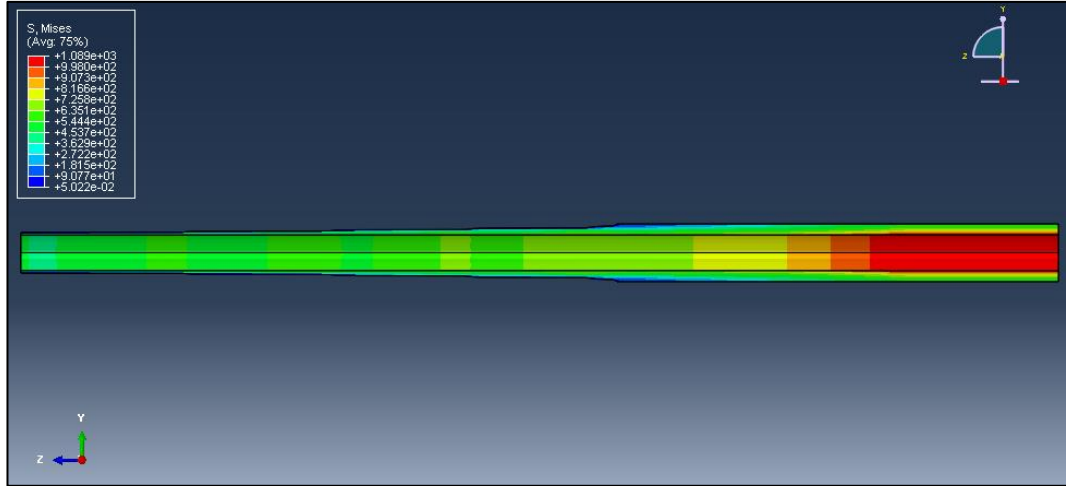
3.2.1.4. Nümerik Sonlu Elemanlar Topoloji Eniyileme Bulguları

Hesaplama 15 adımda gerçekleştirilmiştir. Hesaplama sonrasında oluşan geometri aşağıda verilmiştir. En çok zorlanmanın olduğu bölüm hazne çevresinde cidarın kalın, namlu ucuna geldikçe ve azalan basınç etkisi ile cidarın azaldığı görülmektedir. Hesaplama ile en fazla zorlanmanın olduğu bölümde malzemenin akma sınır değerine çekildiği (1089 MPa) görülmektedir (Bkz. Şekil 3.19). Elde edilen yeni geometri üretim ve bağlantı kısıtları çerçevesinde tekrar ele alınacak ve bu geometrinin yükleri taşıma durumu ayrıca benzetim yapılarak kontrol edilecektir.

Nümerik Sonlu elemanlar Topoloji Eniyilemesi hesaplaması ile elde edilen geometriler aşağıda verilmiştir;



Şekil 3.19. Ağırılıkça eniyelenmiş dörtte bir simetrik model.



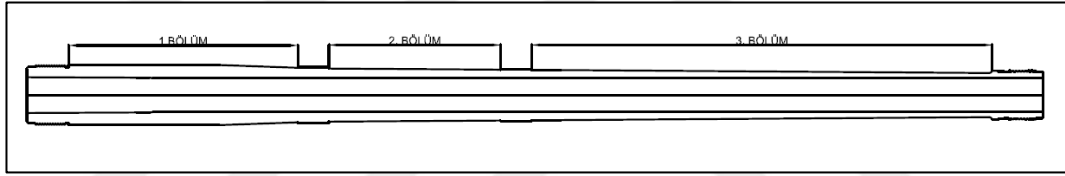
Şekil 3.20. Ağırlıkça eniyilenmiş yarım simetrik model.

3.2.1.5. Güvenlik Katsayısı 1.10 Olacak Şekilde Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilemesi Yapılmış Modellerin Karşılaştırılması

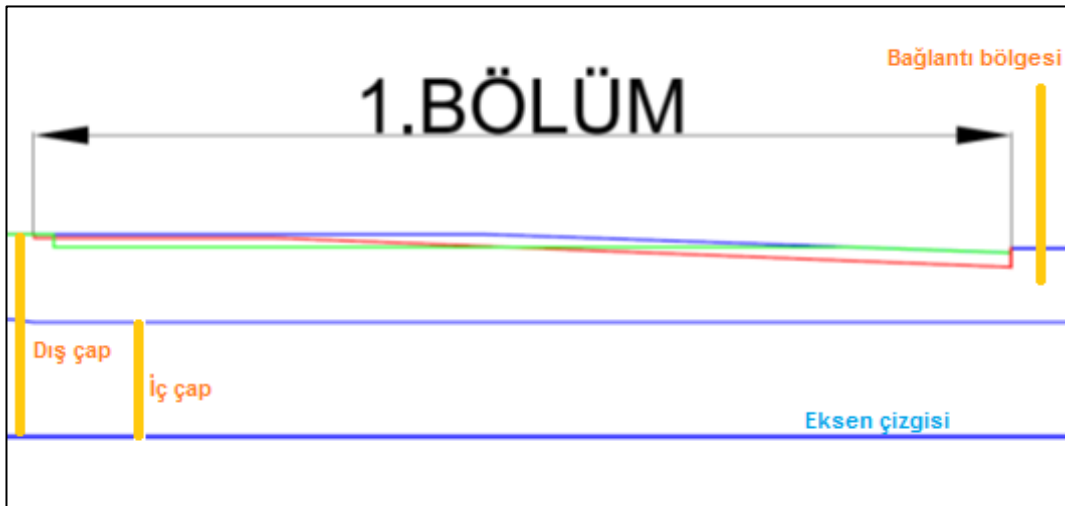
Güvenlik katsayısı 1.10 olacak şekilde eniyilenmiş namlu ölçüleri ile topoloji eniyilemesiyle elde edilmiş namlu ölçüleri karşılaştırıldığında analitik hesap ile elde edilebilecek ağırlığın topoloji eniyilemesi ile elde edilen ağırlıktan daha hafif olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, analitik hesaplamada otofretaj ile elde edilen kalıntı gerilmenin olumlu etkilerinin hesaplara dâhil edilebilmesidir. Topoloji eniyileme hesabında öncelikle otofretajdan elde edilen kalıntı gerilmeler hesaba dâhil edilmiş ancak hesaplama sonucunda, namlunun gerilme dağılımına göre namlu cidarının içerisinde de malzeme eksiltme durumu oluşmuştur. Bu şekilde bir üretim söz konusu olamayacağından otofretaj etkileri hesaplama dışı bırakılmıştır. Otofretaj ile oluşan kalıntı gerilmeler yüklerin normalden daha güvenli taşınmasına olanak sağlamaktadır. Topoloji eniyilemesi ile elde edilmiş namlu ağırlığı 249.76 kg'dır.

Namlu bağlantı noktaları düşünüldüğünde 3 farklı bölümde incelenebilir (Bkz. Şekil 3.21.). Hazne tarafı veya hazne bölümü diyebileceğimiz 1. Bölüm, iki bağlantı noktası arasında 2. Bölüm ve namlu ağzı tarafı 3. Bölüm.

Aşağıdaki şekillerde başlangıç orijinal ölçülerindeki namlu (koyu mavi çizgiler), topoloji eniyilenmiş ölçüler (yeşil çizgiler) ve analitik cidar eniyilemesi ile belirlenmiş (kırmızı çizgiler) ölçüler gösterilmiştir. Topoloji eniyilemesi hazne bölümünde daha agresif cidar eksiltmekle beraber (Bkz. Şekil 3.22.), 2. Bölümde analitik cidar eniyilemesi çok cidar kaldırılmasını önermektedir (Bkz. Şekil 3.23.). Son bölümde ciddi bir fark olmamakla birlikte farklı noktalarda farklı ölçülendirme yapılmıştır (Bkz. Şekil 3.24.). Temelde topoloji eniyilemesinde cidar azaltma bölgeleri basamaklı olarak geçiş yapmaktadır. Analitik yöntemde ise cidar değişimi basınç eğrisine benzeme eğilimi göstermiş ancak bu eğriler tarafımda lineer hale getirilerek ölçülendirme yapılmıştır.

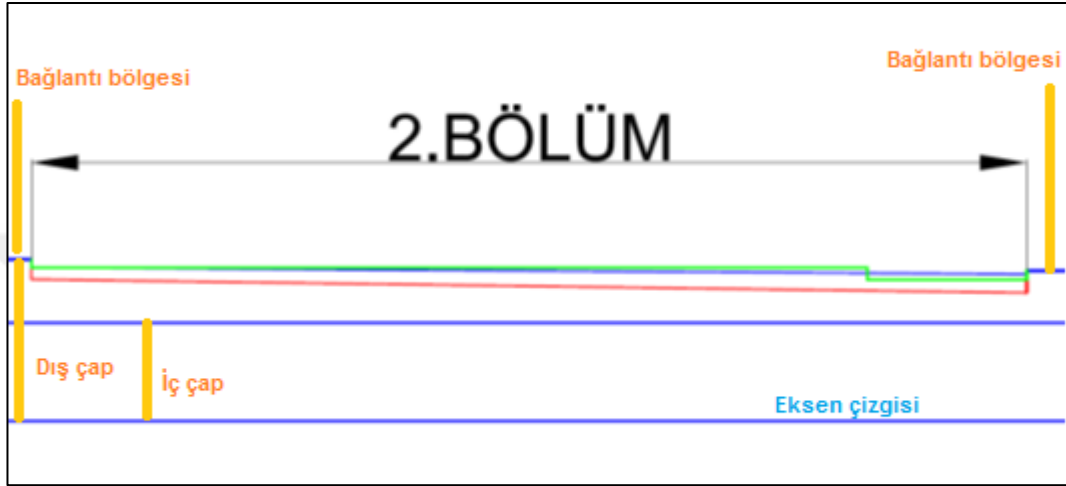


Şekil 3.21. Çelik namlu bölümleri (sol taraf hazne-sağ taraf namlu ucu).

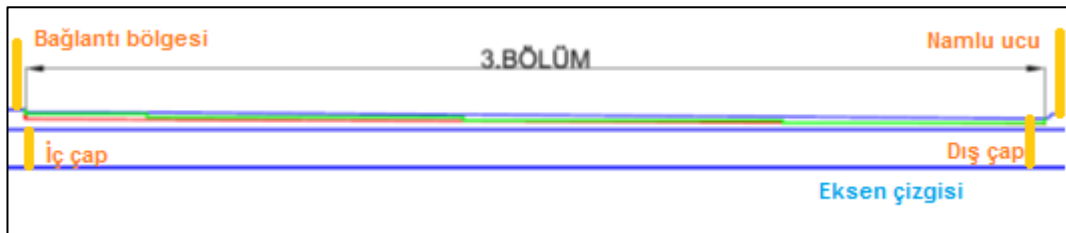


Şekil 3.22. İlk bölüm orijinal, Analitik Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilenmiş Dış çap çizgileri

Analitik yöntemle her aşamadaki farklı etkinin hesaplara katılmış olması sebebi ile analitik cidar eniyileme ile belirlenmiş ölçülerin doğrulanmasına ilişkin çalışma yapılması ve hafifleme için bu ölçülerin değerlendirilmesi kararlaştırılmıştır.

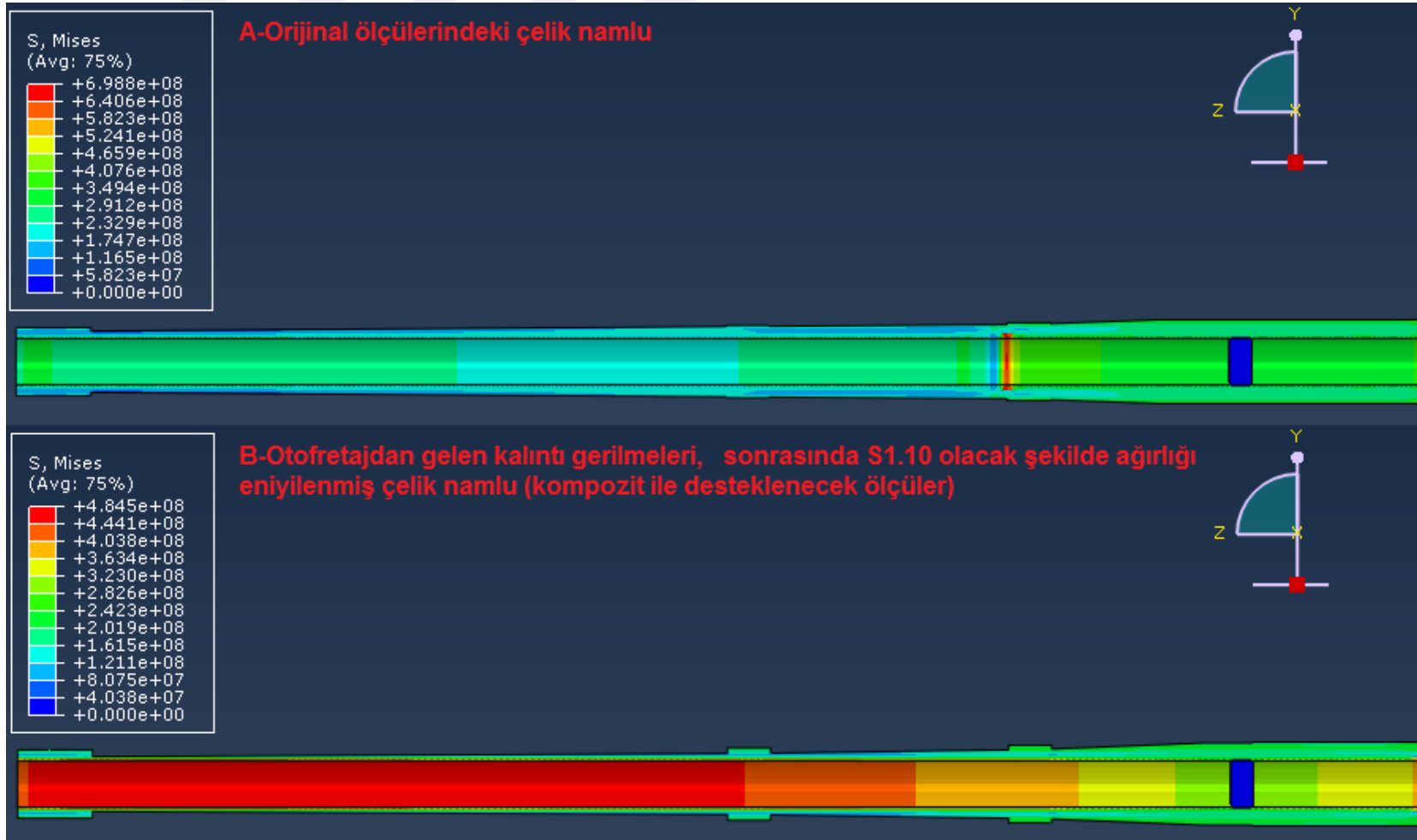


Şekil 3.23. Orta bölüm orijinal, Analitik Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilenmiş Dış çap çizgileri



Şekil 3.24. Son bölüm orijinal, Analitik Eniyilenmiş ve Topoloji Eniyilenmiş Dış çap çizgileri

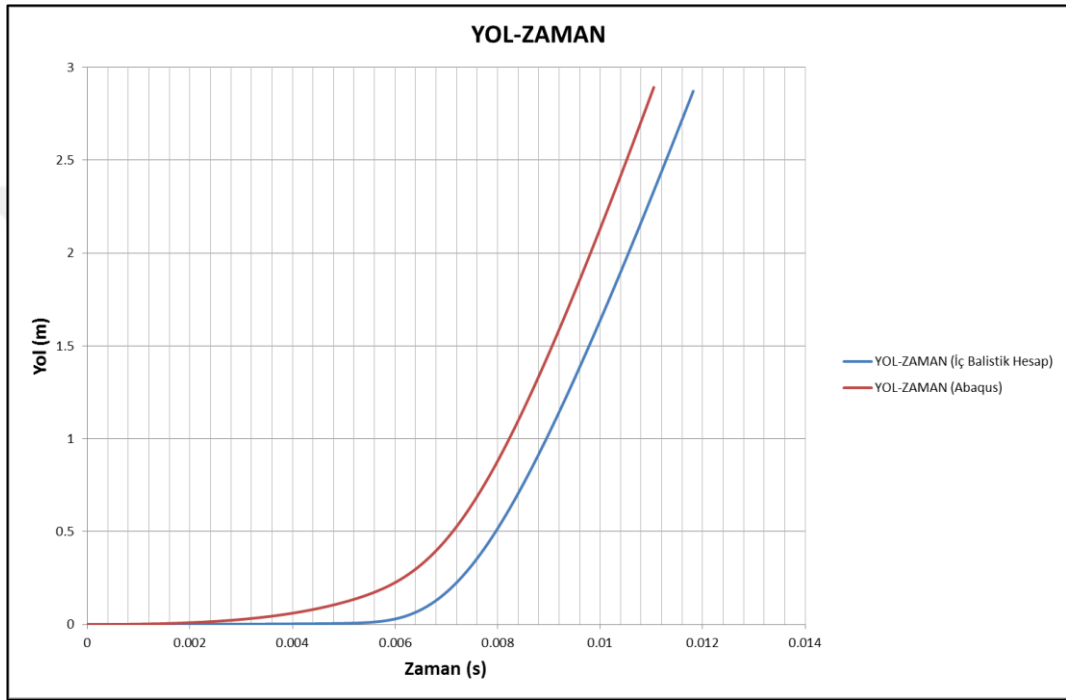
Otofretajı eniyilenmiş ve sonrasında talaş kaldırma uygulanmış ve üzerinde kalıtı gerilmeler olacak şekilde orijinal ve S1.10 olacak şekilde ağırlığı eniyilenmiş tamamen çelik namluların kalıntı gerilmeli başlangıç durumları aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Bkz. Şekil 3.25.).



Şekil 3.25. Otofretaj ile kalıntı gerilme oluşturulmuş ve talaşlı imalattan sonra kalan ön gerilmeleri ile namullar.

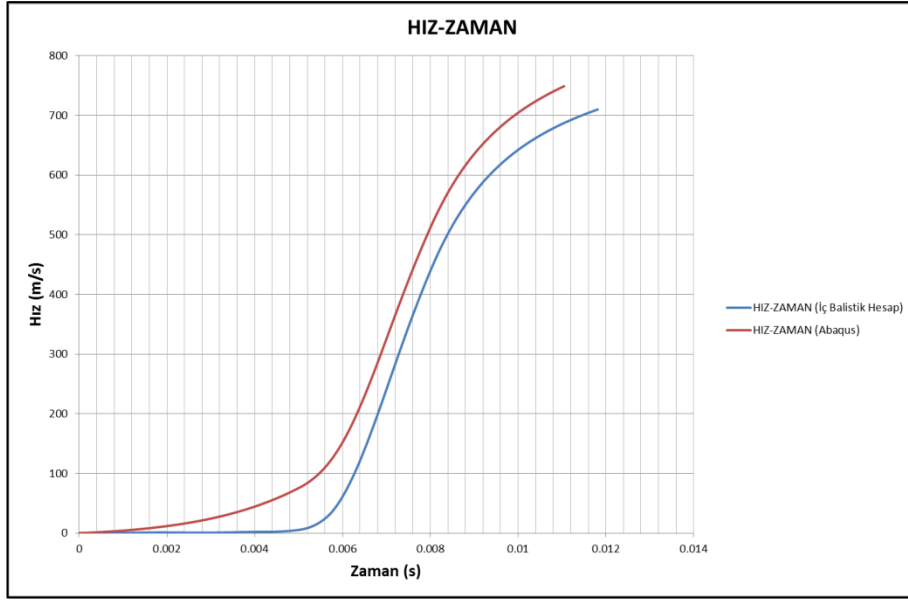
3.2.1.6. Balistik ve Nümerik Dinamik Model Hesaplama Bulguları

Balistik hesaplama ile ve fiziksel modelden elde edilmiş basınç zaman, merminin namlu içerisinde kat ettiği yol zaman ve hız zaman eğrileri aşağıda karşılaştırılmıştır. Bu şekilde iç balistik uyumu dolayısı ile yükün doğru şekilde namluya aksettirildiği gösterilmek istenmiştir.



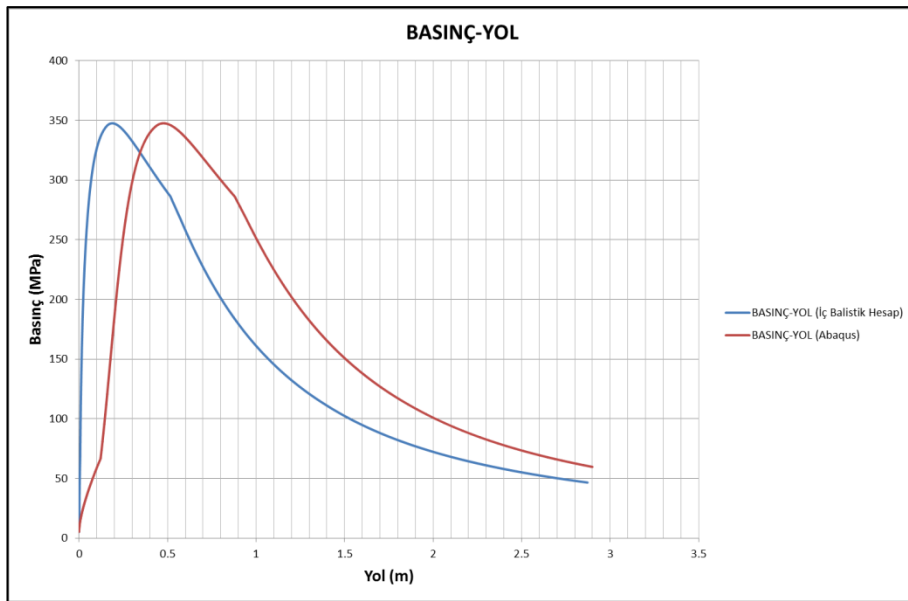
Şekil 3.26. Merminin namlu içerisinde zamana bağlı aldığı yol.

Balistik hesaba göre Abaqus tarafından hesaplanan, zamana bağlı, namlu içerisinde merminin aldığı yolun daha hızlı kat edildiği belirlenmiştir (Bkz. Şekil 3.26.). Mermi, Abaqus hesabında namluyu 2 ms. önce terk etmektedir. Merminin namluyu erken terk etmesi, daha erken hızlanmaya başladığının ve eylemsizlik değerleri ile birlikte namlu içerisinde sevk çemberi oluşumu esnasında merminin yaşadığı hızlanma gecikmesinin modelde temsil edilememiş olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 3.27. Merminin namlu içerisinde zamana bağlı hız değişimi.

Namlu terk edildiği andaki hızlar arasında da hızlanma eğrileri birbirine benzemekle birlikte hız ve zaman farkı olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 3.27.).



Şekil 3.28. Merminin aldığı yol ve yola göre uygulanan basınç değişimi.

Şekil 3.27. ve Şekil 3.28.'den anlaşılacağı üzere iç balistik hesabına göre merminin namlu içerisindeki daha hızlı olan ilerleme hareketi nedeniyle namlu içerisinde en yüksek basıncın uygulandığı mesafe normalde beklenenden biraz daha ileride olmaktadır. Bu durum gerilme hesabında kritik bölgenin yerinin bir miktar ileriye ötelenmesi anlamına gelmekle birlikte herhangi bir durumda basıncın beklenmedik şekilde yükselmesi durumunda namlunun başına gelebilecek normal dışı yükleme durumunu temsil ettiğinden daha güvenli bir kontrol yapmak açısından olumlu değerlendirilmiştir. Tasarım gerçekleştirilirken bu olasılıklar göz önünde bulundurularak kritik bölge namlunun ilk 500 mm.'lik kısmı olarak ele alınmıştır.

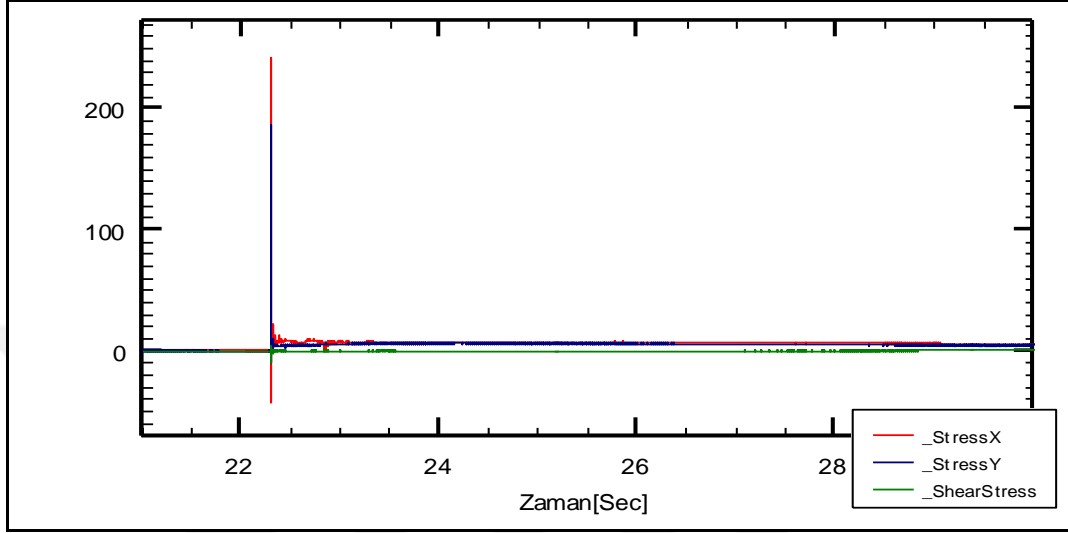
3.2.1. Deneysel Bulgular ve Karşılaştırma

Birden farklı şartta atışlar gerçekleştirildiğinden atışları birbiri ile karıştırmamak üzere kısaltmalar uygulanmış ve bu kısaltmalar aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

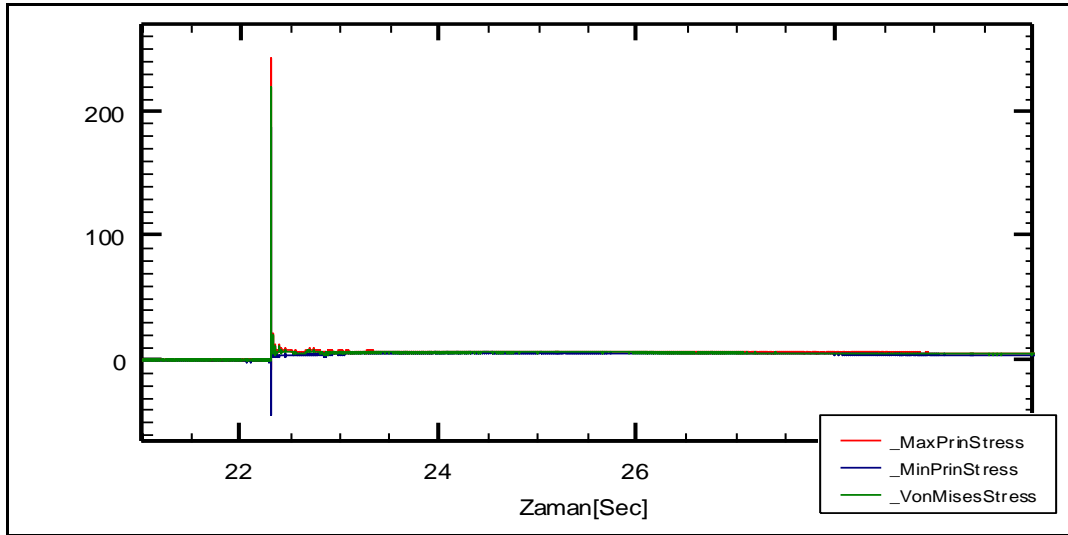
Çizelge 3.8. Atışlı test kısaltma tablosu.

		Atış Kodu
		G1A1 - I - K - M1 - 3BH - 385.6m (a) - (b) - (c) - (d) - (e) - (f)
Sıra	Kısaltma	Açıklama
(a)	GxAy	x=gün, y=atış no
(b)	I / T	Isıtma ya da Tanzim Atış
(c)	K / C	Kör mermi ya da cepbane
(d)	M1 / SG3	Cephane tipi
(e)	xBH / Z2	Patlayıcı miktarı
(f)	xxx.xm	Milyem yükseliş

Aşağıdaki şekil ve tablolarda atışlı testlerde elde edilen gerilme verileri ve bu verilerden türetilmiş asal gerilme ve Von Mises gerilme değerleri sıralanmış ve sonrasında hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



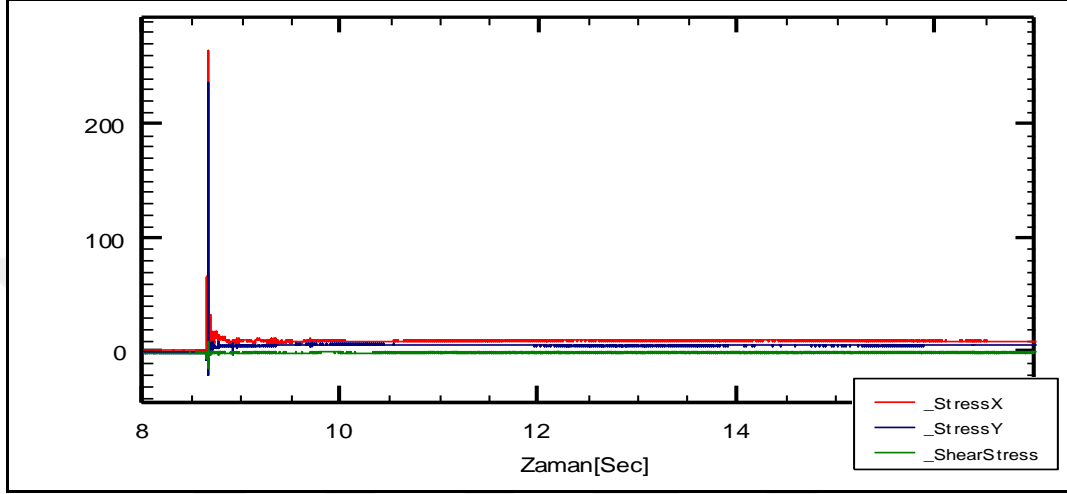
Şekil 3.29. G1A2-I-K-M1-5BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.



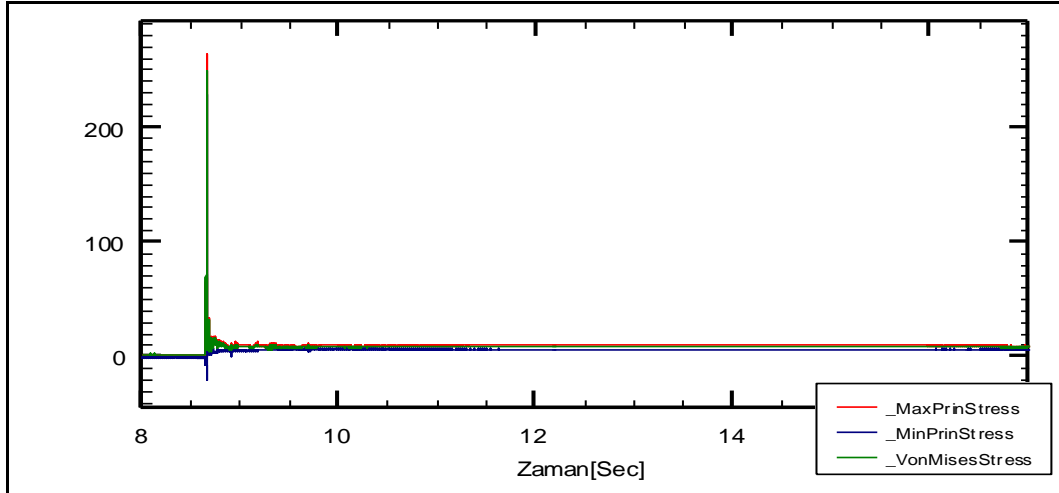
Şekil 3.30. G1A2-I-K-M1-5BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.

Çizelge 3.9. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.29., Şekil 3.30.).

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	243.1	187.6	4.4	243.4	187.2	220.3
Min [MPa]	-43.2	-10.3	-8.9	-6.9	-43.2	0.2



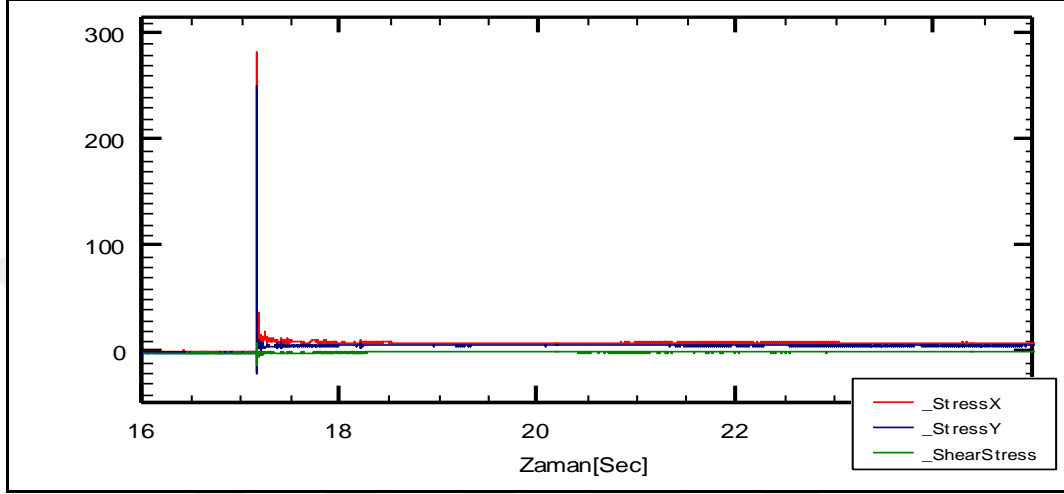
Şekil 3.31. G1A3-I-K-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.



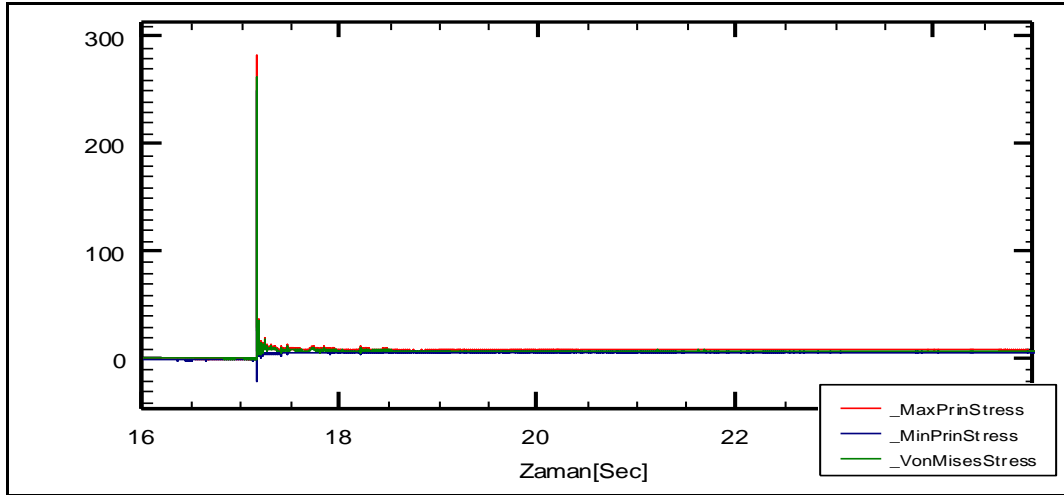
Şekil 3.32. G1A3-I-K-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.

Çizelge 3.10. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.31., Şekil 3.32.).

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	264.2	236.5	8.9	264.5	228.4	248.4
Min [MPa]	-11.9	-20.2	-14.1	0.7	-20.9	1.0



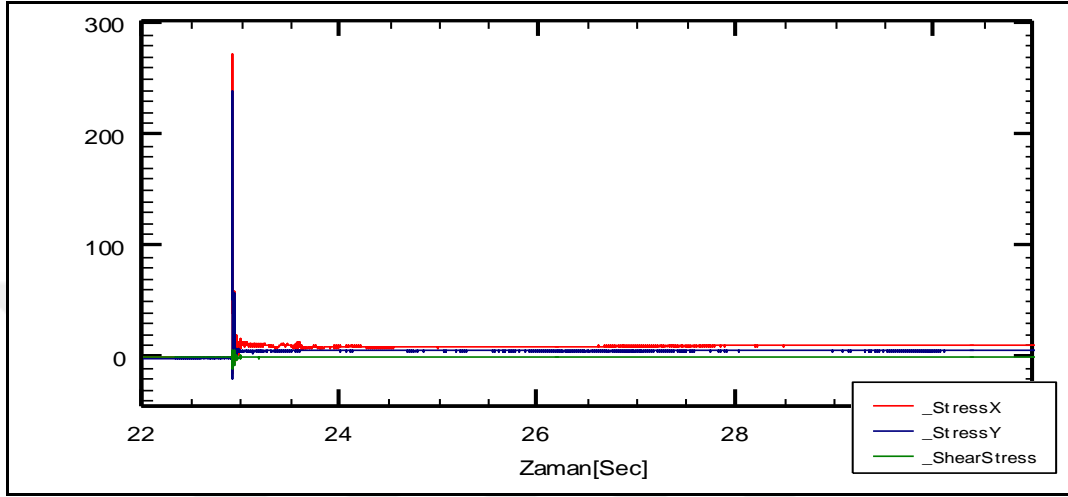
Şekil 3.33. G1A4-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.



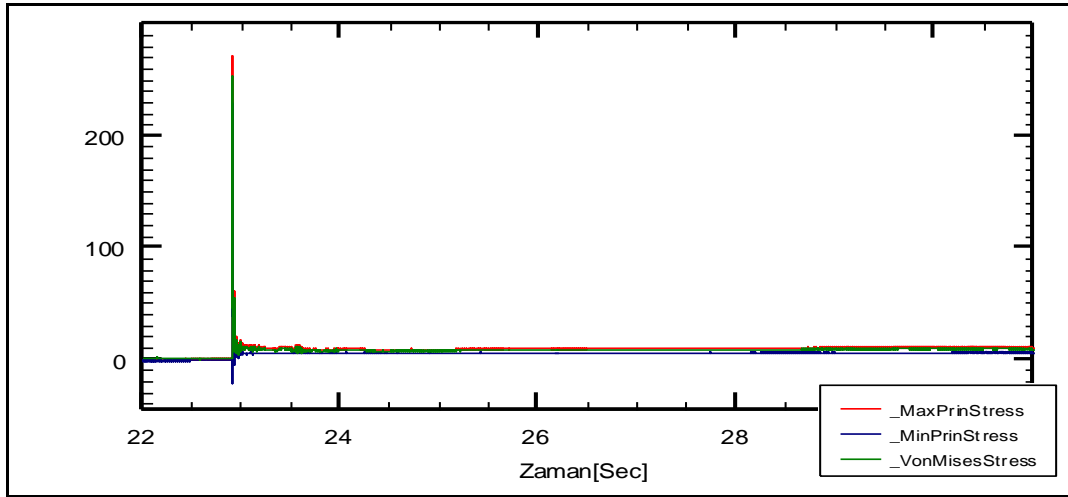
Şekil 3.34. G1A4-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.

Çizelge 3.11. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.33., Şekil 3.34.).

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	283.5	251.3	8.1	283.7	250.7	262.4
Min [MPa]	-18.9	-19.8	-12.4	-0.7	-20.6	0.3



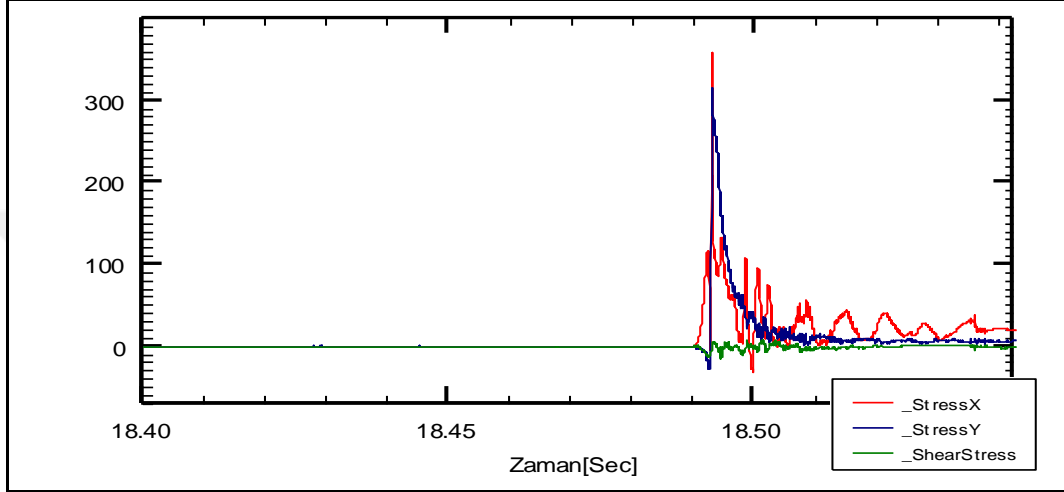
Şekil 3.35. G1A5-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.



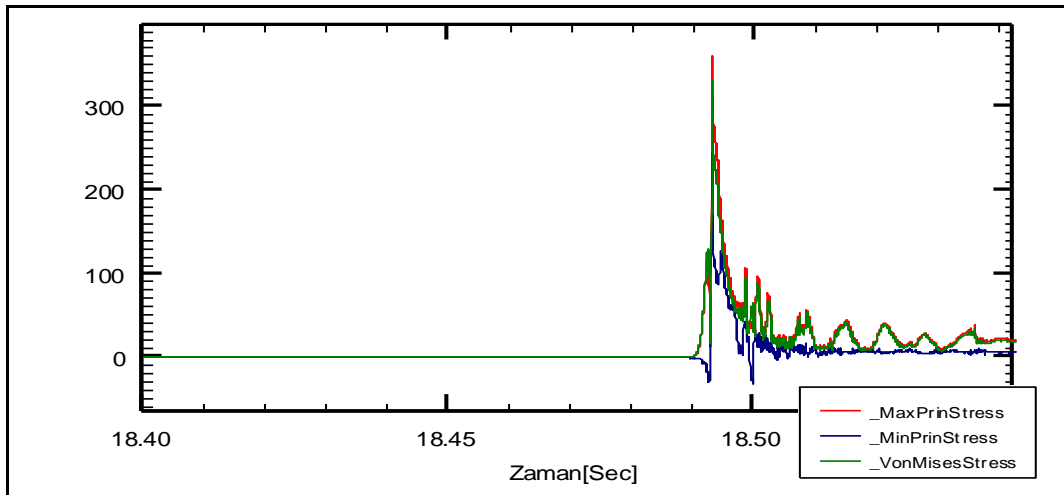
Şekil 3.36. G1A5-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.

Çizelge 3.12. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.35., Şekil 3.36.)

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	272.2	238.8	6.4	272.5	230.1	254.0
Min [MPa]	-14.5	-20.2	-10.8	-0.5	-21.2	0.3



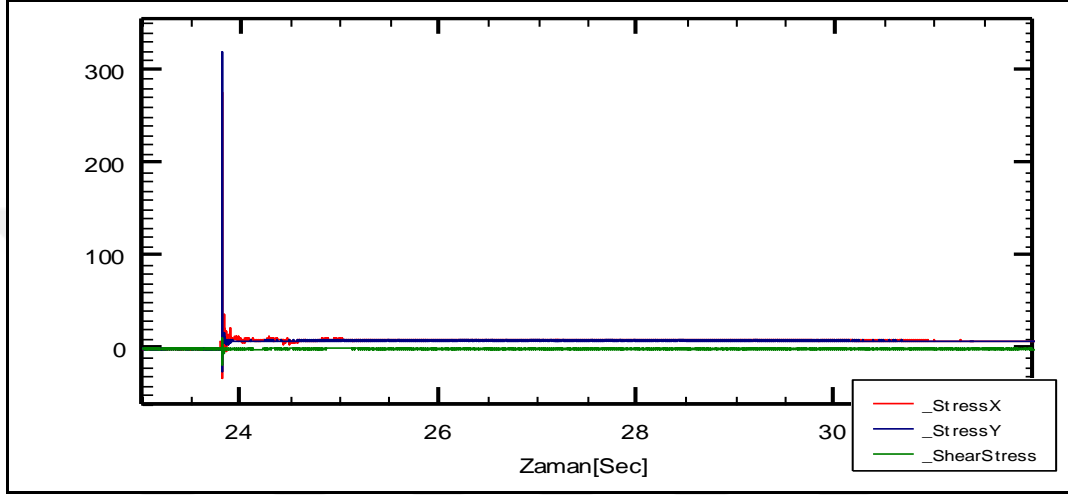
Şekil 3.37. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R01 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi



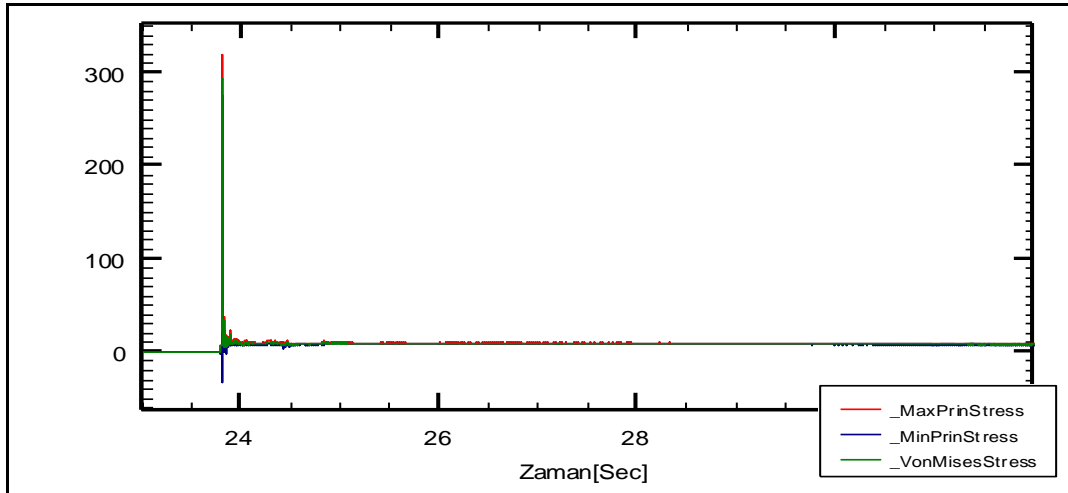
Şekil 3.38. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R01 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi

Çizelge 3.13. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.37., Şekil 3.38.)

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	360.0	316.9	7.8	360.1	315.2	330.6
Min [MPa]	-32.4	-27.9	-14.3	-0.5	-32.4	0.0



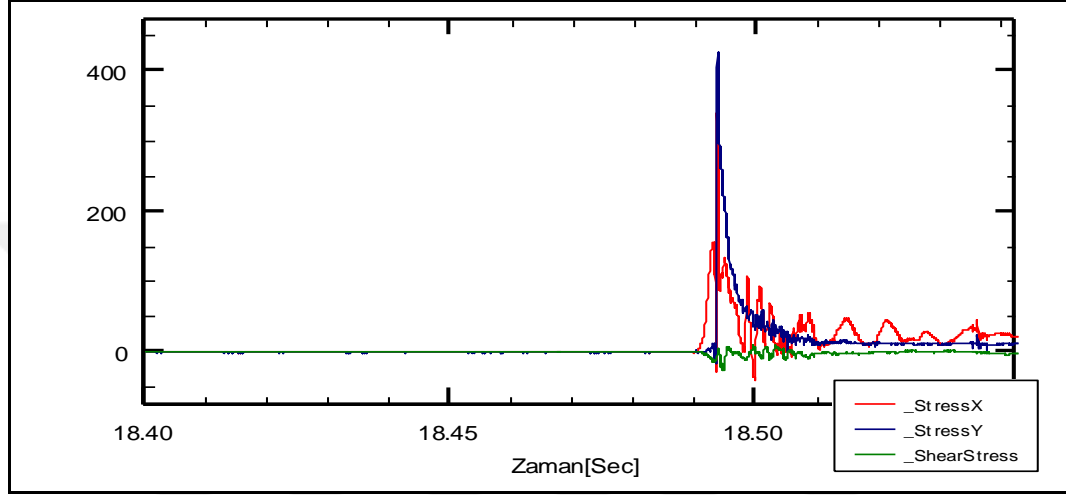
Şekil 3.39. G1A7-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R02 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi.



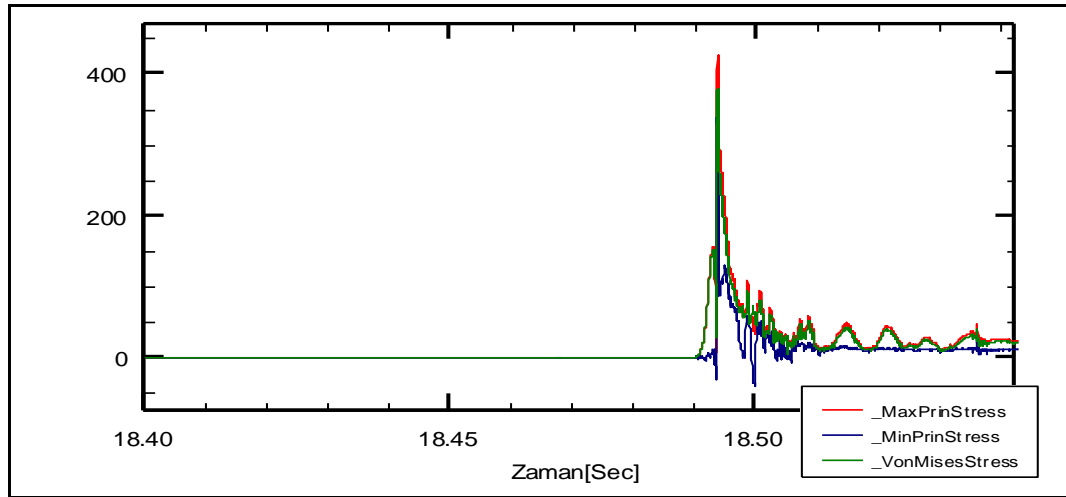
Şekil 3.40. G1A7-T-C-M1-7BH-385.6m durumunda N-R02 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi.

Çizelge 3.14. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.39., Şekil 3.40.).

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	276.6	318.9	12.0	319.2	276.6	293.4
Min [MPa]	-30.9	-24.7	-18.1	-0.6	-33.2	0.0



Şekil 3.41. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R02 Rozetinde XY Gerilmelerin Zamanla Değişimi

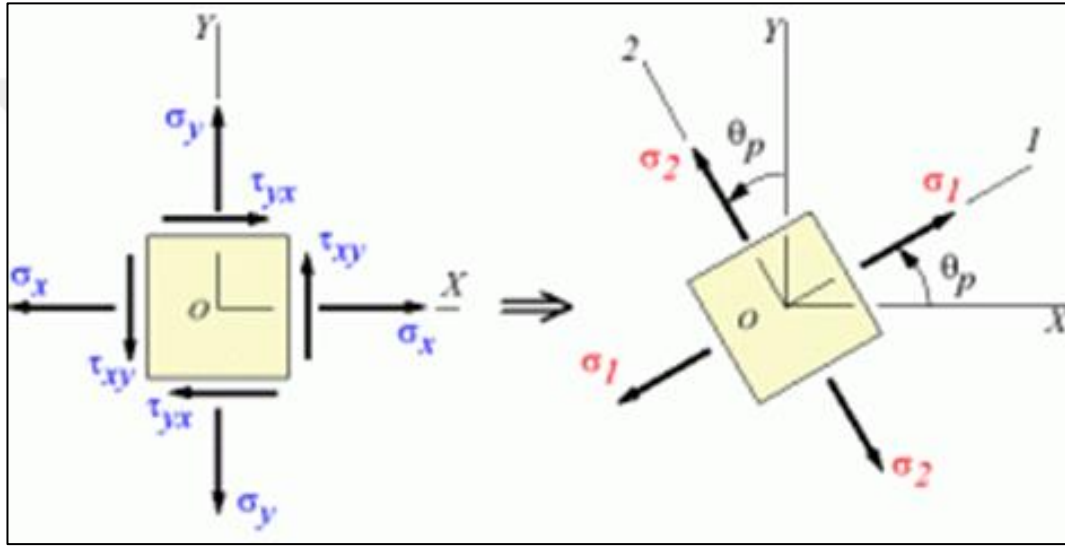


Şekil 3.42. G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m durumunda N-R02 Rozetinde Asal Gerilmelerin ve Von Mises Gerilmesinin Zamanla Değişimi

Çizelge 3.15. Gerilme Değerlerinin Özeti (Şekil 3.41., Şekil 3.42.).

	σ_x	σ_y	T_{xy}	σ_1	σ_2	σ_{vm}
Max [MPa]	341.0	426.0	10.4	426.0	340.5	378.8
Min [MPa]	-38.9	-16.0	-26.0	-0.5	-39.1	0.0

3.2.1.1.1. Ölçüm ve Hesaplama Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Model Doğruluğunun tespiti



Şekil 3.43. Koordinat sisteminde normal ve kayma gerilmeleri (solda) ve Asal gerilmeler (sağda).

Bir düzlemde koordinat sistemine göre yüzeyin normallerinde oluşan gerilmeler ve yüzeyde oluşan kayma gerilmeleri ölçüldüğünde, birim elemanın kayma gerilmelerinin sıfır olması ve sadece normal gerilmelerin olduğu bir açıda döndürülmesi ile asal gerilmeler bulunur ve en yüksek normal ve kayma gerilmeleri birbirleri cinsinden ifade edilebilir hale gelirler. Böylelikle bulunan asal gerilmeler ve kayma gerilmeleri yardımı ile Von Mises gerilmesi hesaplanarak malzemenin emniyet durumu değerlendirilir. Ölçümlerle elde edilmiş normal ve kayma gerilmeleri asal gerilmeleri bulmak

üzere kullanılmış sonrasında Von Mises gerilmeleri hesaplanmıştır. Ölçümlere benzer şekilde hesaplamalarda Von Mises gerilmeleri namlu üzerinde gerinim ölçerlerin yerleştirdikleri, namlu kama tarafından 470 mm ve 670 mm ileride elemanlar seçilerek elde edilmiştir.

Farklı barut hakları ile gerçekleştirilen numerik hesaplardan elde edilen değerler aşağıda özetlenmiş ve ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.16. ÖLÇÜM ve HESAPLAMA Sonuçları

Gerinim Ölçer Numarası	ÖLÇÜM		HESAP		
	N-R01	N-R02	N-R01	N-R02	En Fazla olduğu değer ve konumu*
Von Mises Gerilmeleri	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa - mm
G1A2-I-K-M1-5BH-385.6m	220.30	--	470.90	425.30	704.60 – 936
G1A3-I-K-M1-7BH-385.6m	248.40	--	634.74	577.90	675.10 - 140
G1A4-T-C-M1-7BH-385.6m	262.40	--	634.74	577.90	675.10 - 140
G1A5-T-C-M1-7BH-385.6m	254.00	--	634.74	577.90	675.10 - 140
G1A7-T-C-M1-7BH-385.6m	--	293.40	634.74	577.90	675.10 - 140
G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m	330.60	378.80	692.50	722.67	796.10 - 800

*Hazne (Kama) tarafı sıfır kabul edilmiştir.

İlk bakışta ölçüm ve hesap değerleri arasında ciddi farklar olduğu görülse de dikkat edilmesi gereken husus ön gerilmeli olarak yüke maruz bırakılan namluda çap genişlemesinin ön gerilmeli duruma göre daha az olacaktır. Gerinim ölçerlerin çalışma mantığı şekil değiştirmeyi tespit etmek ve malzeme özellikleri çerçevesinde gerilme değerlerine hesap ile geçmek şeklinde olduğundan daha az şekil değiştirme göstermiş bir malzeme gerinim ölçer ile daha az hesaplanmış bir gerilme değeri değerlendirilmesine

neden olacaktır. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin gerinim ölçer değerlerine eklenmesi gereklidir.

N-R01 gerinim ölçerin yerleştirildiği konumdaki eleman üzerindeki kalıntı gerilme miktarı 365.89 MPa, N-R02 gerinim ölçerin konumundaki elemanın ise 343.49 MPa'dır. Bu değerler ölçüm değerlerine eklendiğinde aşağıdaki tablo oluşur.

Çizelge 3.17. Düzeltilmiş ÖLÇÜM ve HESAPLAMA Sonuçları

Gerinim Ölçer Numarası	ÖLÇÜM		HESAP		
	N-R01	N-R02	N-R01	N-R02	En Fazla olduğu değer ve konumu*
Von Mises Gerilmeleri	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa - mm
G1A2-I-K-M1-5BH-385.6m	586.19	--	470.90	425.30	704.60 – 936
G1A3-I-K-M1-7BH-385.6m	614.29	--	634.74	577.90	675.10 - 140
G1A4-T-C-M1-7BH-385.6m	628.29	--	634.74	577.90	675.10 - 140
G1A5-T-C-M1-7BH-385.6m	619,89	--	634.74	577.90	675.10 - 140
G1A7-T-C-M1-7BH-385.6m	--	636,89	634.74	577.90	675.10 - 140
G2A2-T-K-SG3-Z2-000.0m	696.49	722.29	692.50	722.67	796.10 - 800

*Hazne (Kama) tarafı sıfır kabul edilmiştir.

Bu şekli ile sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu, gerinim ölçme sonuçlarının çok dikkatli irdelenmesi gerektiği değerlendirilmiştir. En uzak sonucun %80.0 yakın olduğu, en yakın sonucun ise %99.9 yakın olduğu belirlenmiştir.

3.2.1.1.2. Orijinal Ölçülerdeki Namlu ve Eniyilenmiş Yeni Ölçülerdeki Namlunun Karşılaştırılması ve Elde Edilen Teorik Çelik Kısım Hafifleme Miktarının Belirlenmesi

Yukarıdaki hesaplama ve ölçüm faaliyetleri neticesinde tam eniyilenmiş yeni ölçülerdeki namlunun gerilme durumu orijinal namlu ile karşılaştırılarak güvenlik zafiyetinin daha kompozit sarılmaksızın oluşmayacağı gösterilmek istenmiştir.

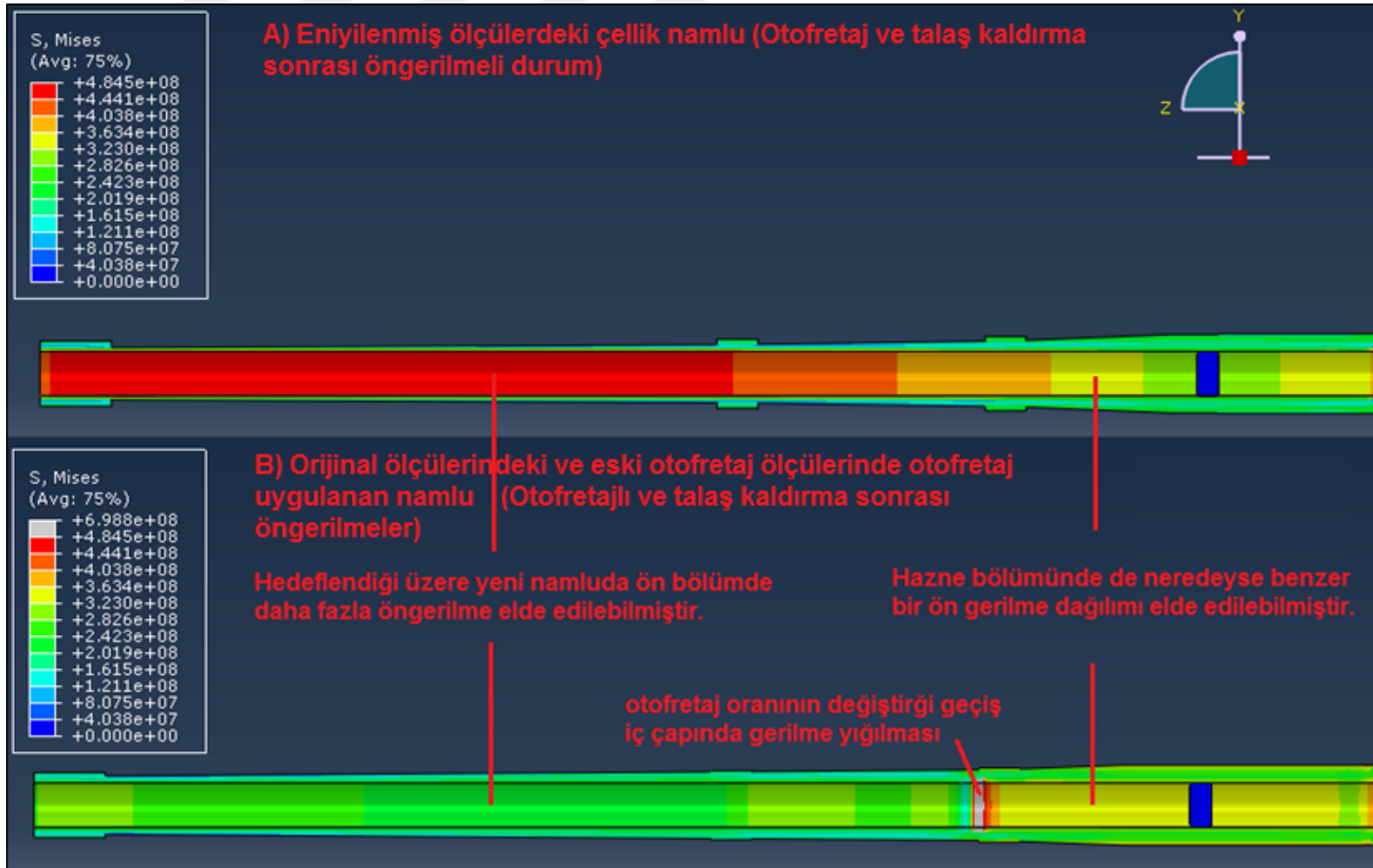
Şekil 3.44. incelendiğinde çelik malzemeye ve geometrik ölçülerine uygun şekilde eniyileme yapılarak kalıntı gerilme miktarının artırılabilirdiği, yeni namluda bu anlamda ön bölümden ciddi oranda talaş kaldırılabilirdiği böylelikle hafifleme sağlanabilirdiği görülmüştür. Hazne bölümünde de benzer bir ön gerilme dağılımı yakalandığı gösterilmiştir.

Şekil 3.45.'de ise kompozit sarım öncesinde eniyileme ölçülerindeki çelik namlunun 1.10 hedeflenen ölçülerde güvenlik katsayısının 1.18 olarak elde edilebileceği, orijinal ölçülerdeki namlunun emniyet seviyesinin ise en yüksek yükleme koşullarında 1.36 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.

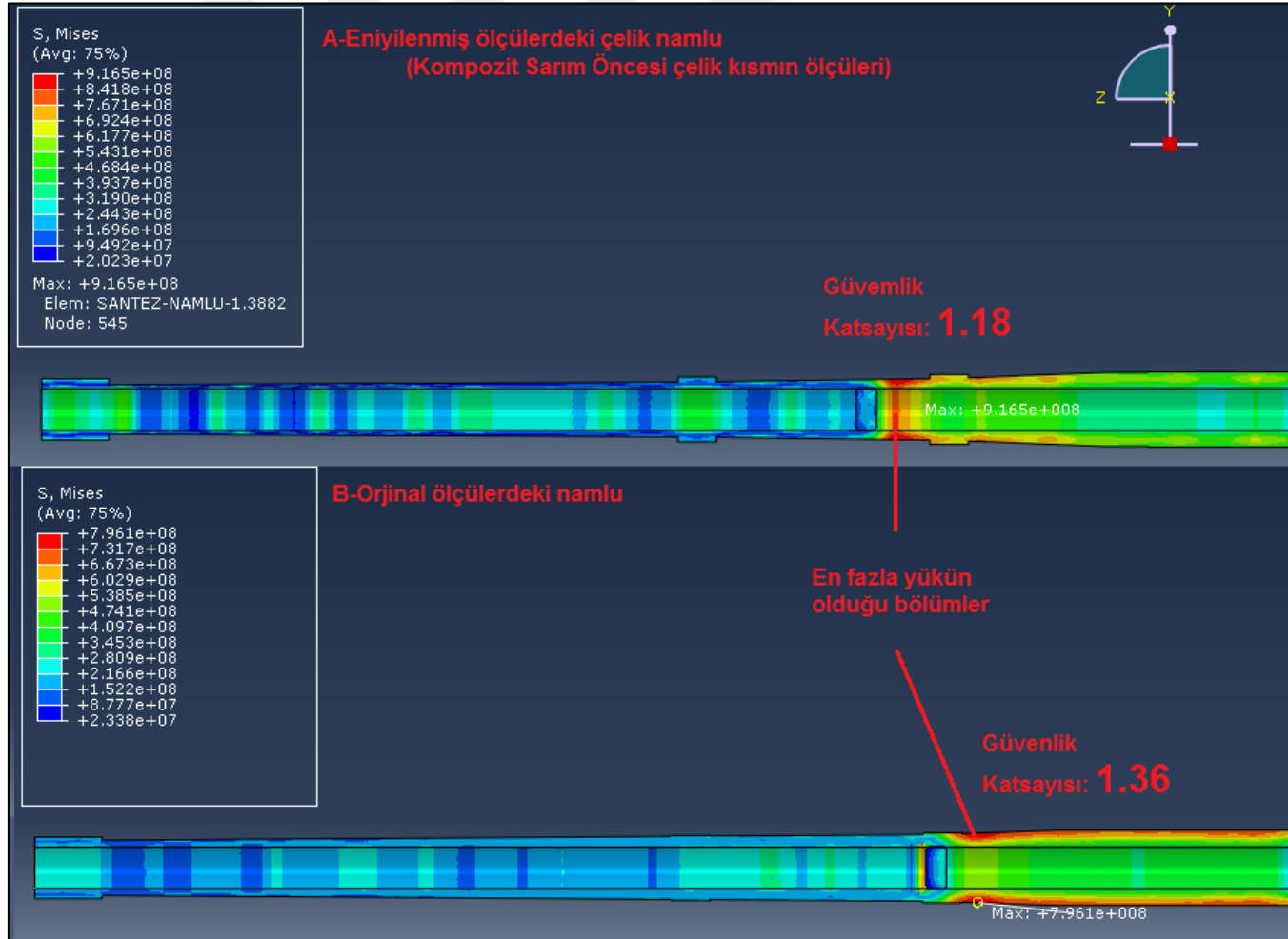
Eniyilenmiş ölçülerdeki çelik namlu 216.8 Kg. (son ölçülerine işlendiğinde), eski namlu başlangıç ağırlığı ise 295.7 Kg'dır. Böylelikle namlunun çelik kısmı (78.9 Kg.) %26.7 oranında hafifletilmiştir.

Çizelge 3.18. Farklı Güvenlik Katsayı Değerleri için Çelik Kısımın Hafifleme Miktarları

Güvenlik katsayısı (-)	Namlu Ağırlığı (kg)	% hafifleme
Başlangıç ağırlığı	295.70	00.0
S1.20	245.38	17.0
S1.18	240.78	18.6
S1.15	235.30	20.4
S1.12	230.37	22.1
S1.10	216.82	26,7
S1.05	196.70	33.5



Şekil 3.44. Eski ve yeni ölçülerdeki çelik namlunun kalıntı gerilme durumları.

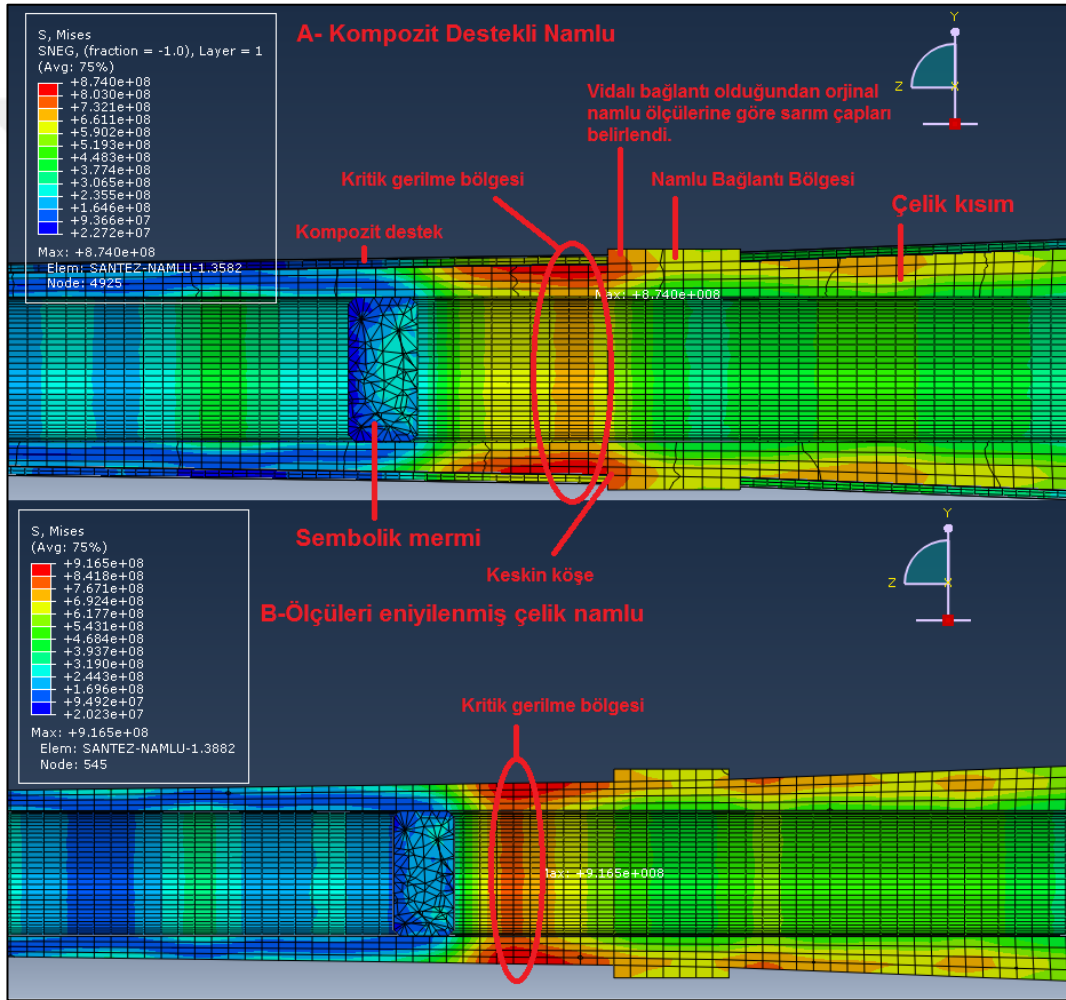


Şekil 3.45. Namluların en fazla gerilme ve emniyet katsayısı açısından karşılaştırılması.

3.3. ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: Kompozit Destek Uygulaması

3.3.1. Nümerik Yöntem Bulguları

Kompozit destek yükün taşınmasına yardımcı olmakta ve desteksiz duruma göre aynı yerde gerçekleşen en yüksek gerilme bölgesindeki gerilme değerini 916.5 MPa'dan 874.0 MPa'a düşürmektedir. Bu şekli ile emniyet katsayısı değerini 1.18'den 1.24 düzeyine çıkarmaktadır.



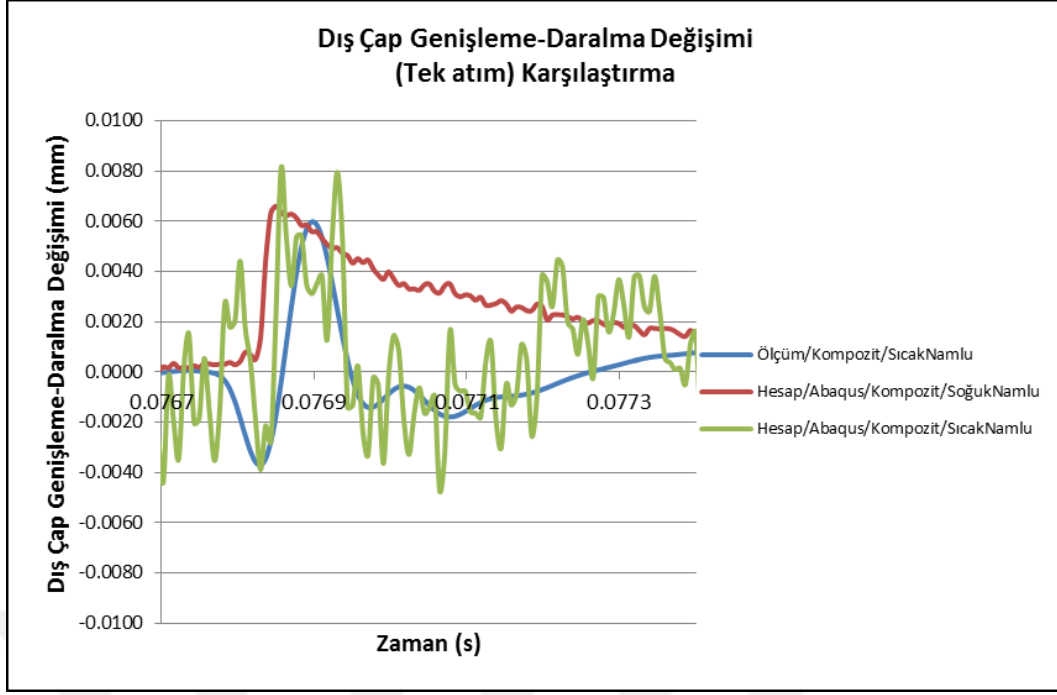
Şekil 3.46. Kompozit Malzeme ile desteklenmiş ve desteklenmemiş ölçüleri eniyilenmiş namluların en yüksek gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Teorik olarak sarım yapılmış kompozit malzemenin ağırlığı 11.80 Kg olmaktadır. Böylece, kompozit sarılmış namlunun ağırlığı 228.62 Kg olur ki orijinal namluya göre hafifletilen kütle miktarı 67.0 Kg. ve hafifleme miktarı da %22.7 olarak bulunur.

3.3.2. Deneysel Yöntem Bulguları ve Karşılaştırma

Teorik modele göre gerek kompozit destekli namluda en yüksek gerilme değerlerinin elde edildiği namlu eksen konumu hazne bölümünden itibaren 100 mm ileridedir. Ölçülen en yüksek gerinim değerleri haznedan itibaren yerleştirilmiş 4. veya 5. gerinim ölçerin hizasında gerçekleşmiştir. Bu durum teorik modeldekine benzer şekilde en yüksek gerinimlerin haznedan itibaren ilk 100 mm'lik bölümde oluştuğunu teyit etmiştir.

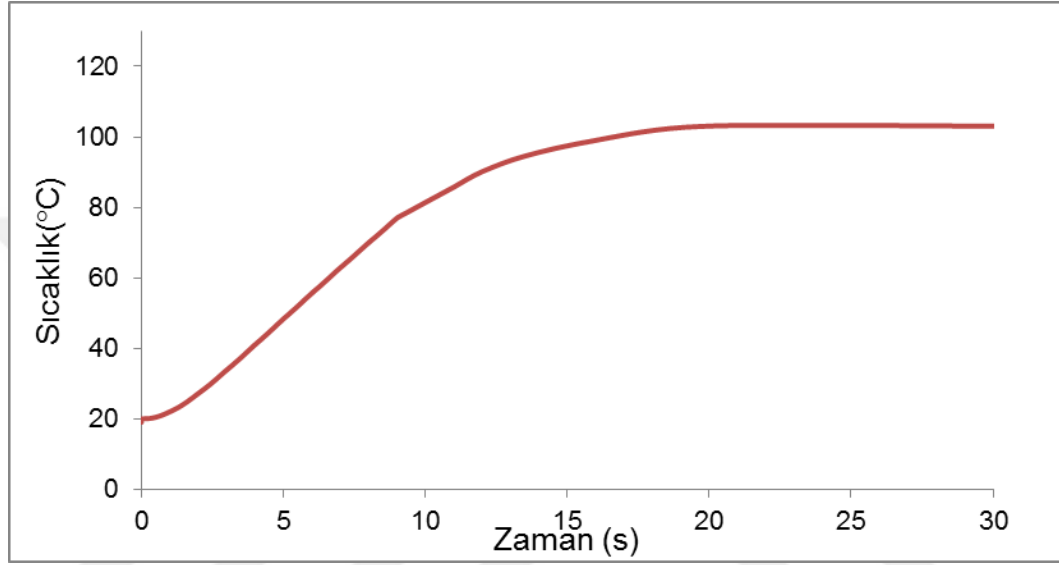
Kompozit sarımın üzerinden alınan gerinim değerlerinin teorik modeldeki değerlerle uyumunun belirlenmesinde en yüksek gerilmenin tespit edildiği noktadaki dış çapın değişiminin hesaplanmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu amaçla çevresel gerinimi ölçen ve eksen dik olan gerinim ölçerin gerinim değerleri kompozit dış çap değişimi değerlerin çevrilmiştir. Ayrıca teorik dinamik modelde eksende aynı noktada dış çapta bir nokta tanımlanmış ve temsili merminin bu noktadan geçerken dış çapta oluşturduğu değişim zamana bağlı olarak çıkartılmıştır. Ölçüm sonuçlarında da atım esnasında oluşan gerinimler dış çap değişimlerine çevrilmek sureti ile karşılaştırılmıştır. Eğrilerin başlangıç noktaları sıfıra taşınmıştır. Atım anında elde edilmiş teorik ve gerçek sonuçlar aşağıdaki grafikte eğrilere dönüştürülerek paylaşılmıştır (Bkz. Şekil 3.47.).



Şekil 3.47. Tek atım esnasındaki hesap ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Hesaplama sıcaklık değeri kullanılmadığı durumda temsili mermi, gerinim ölçeri temsilen tanımlı kompozit sarımın dış çapında tanımlı noktadan geçerken oluşan dış çap değişimini sadece zamanın kısa bir diliminde artan sonra da zamana bağlı olarak azalan bir eğri şeklinde oluşturmaktadır. Oysaki ölçümlerde elde edilen değerler daha çok dış çapın azalan ve artan salımı şeklinde gerçekleştiğini göstermiştir. Bu şekilde değerlendirildiğinde sıcaklığın da gerinim dolayısı ile dış çap değişimini etkileyen bir faktör olabileceği değerlendirilmesi ile nümerik hesaplama malzemelerin sıcaklığa ilişkin özelliklerinin de kullanıldığı akuple ısı-şekil değiştirme (*İng.* Coupled Thermal-Displacement) şeklinde çözdürülmüştür. Burada sıcaklık namlunun her bir noktasında eşit ve 100 °C olarak tanımlanmıştır. Bu değer seçilmesinde daha önce gerçekleştirilmiş atışlı test sonuçları dikkate alınmıştır. Bu testlerde sıcaklığın 100 °C'ye kadar artış gösterdiği lakin bu değerden daha yüksek değerlere artış meyili göstermediği tespiti yapılmıştır (Bkz. Şekil 3.48.). Hesaplama bu şekilde yapıldığı zaman sonuçların ölçüm

sonuçlarına benzer şekilde artma ve azalmalar şeklinde salındığı ve çok benzer olduğu belirlenmiştir. Merminin gerinim ölçer noktasına ulaşmasının hemen öncesinde dış çapta bir küçülme, mermi noktadan geçerken ani bir genişleme, sonrasında ise salınarak dengeye gelmeye meyil etme şeklinde bir davranış gösterdiği belirlenmiştir [2].

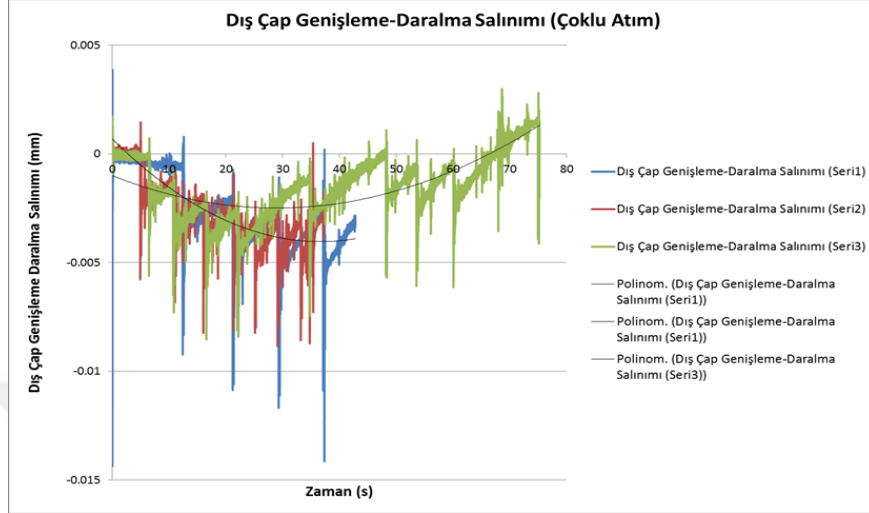


Şekil 3.48. Basıncın en yüksek olduğu yerde kompozit namluda ölçülen sıcaklığın zamana bağlı değişimi

Dış çapın değişimine daha geniş bir zaman diliminde ve çoklu atımların gerinim değerlerinin dış çap değişimi olarak çevrildiği eğriler ile bakıldığında ise ilginç bir sonuçla karşılaşılmıştır.

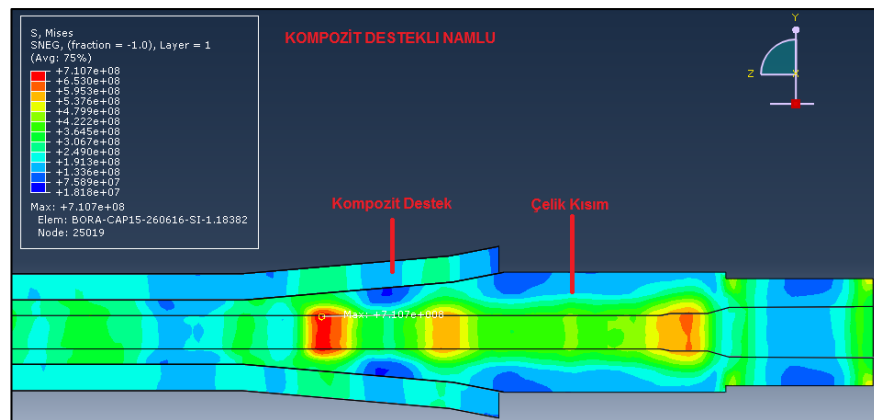
Üç farklı seri şeklinde yapılmış atışlarda aynı bölgedeki gerinim ölçerin ölçtüğü değerler dış çap değişimi olarak çevrildiğinde ve incelendiğinde dış çapın belli bir atım sayısına kadar ve her atımda benzer olacak şekilde küçülme eğilim gösterdiği ancak atım sayısı arttıkça çapın tekrar genişleme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bunda etkili olan nedenin karbon/epoksi reçine kompozitin negatif genişleme katsayısı olduğu değerlendirilmiştir. Bu durumda ilk atımlarda kompozit takviye çelik bölümü sıkılaşmaya meyil

göstermekte atım sayısı arttıkça bu meyil azalmakta, çap önce ilk haline geri dönmekte ve sonrasında genişlemeye başlamaktadır.



Şekil 3.49. Birden fazla atım için yakın noktadaki dış çap değişim eğilimi.

Namlu eksenini boyunca en fazla yük durumunun olduğu noktada namlunun çelik bölümünde oluşan Von Mises gerilme değeri ise 710.7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu şekli ile kritik çelik kesitin emniyet katsayısı 1.40 olmaktadır.



Şekil 3.50. Kompozit Destekli Keskin Nişancı Silah Namlusu Gerilme Dağılımı (100 °C)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. SONUÇLAR

Kompozit malzeme ile desteklenerek hafifletilmiş, aksenel konuma göre değişken iç yükler dayanıklı çelik boru (obüs namlusu) tasarımı konusunda yararlanılacak konu başlıklarına ilişkin detaylı bir literatür taraması yapılmıştır.

Çelik borunun, Savunma Sanayisinde kullanılan Ağır Silah Namlusu olarak tasarlanmasının gerekliliği, ülke savunmasında bu konularda yapılmış çalışmaların azlığı, bu alanda oluşturulacak bilgi birikiminin aynı zamanda çalışanı olduğum Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu'na kazandırılması konusunda niyet ve gayret gösterilmesi, kişisel olarak katkıda bulunma hissiyatım nedenleri ile perçinlenmiştir. Tez konusu Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın SANTEZ Projesinde de uygulamaya değer bir proje olarak başlamıştır.

Detaylı literatür taraması sayesinde ofofretaj, kalıntı gerilme tespiti, eniyileme ve kompozit malzemelerin uygulanması konularında ve bu konu başlıklarının nasıl kullanılabileceği konularında uygun bir yol haritası belirlenebilmiştir.

Öncelikle hâlihazırda MKE Kurumu Ağır Silah ve Çelik Fabrikasında 105 mm obüs namlusuna uygulanan ofofretaj işlemi ele alınmıştır. Ofofretajın gerek analitik, gerek nümerik yöntemlerin kullanılarak her yönü ile irdelenmesi sayesinde hâlihazırdaki ofofretaj ölçülerinde iyileştirmeler yapılarak öncelikle kompozit destek uygulanmaksızın çelik kısmın en hafif haline getirilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen eniyileme hesaplamalarıyla ofofretaj ölçüleri değiştirilmiştir ve yeni ölçülerle ofofretaj uygulanmıştır.

Mekanik otofretajın hidrostatik otofretaja göre olan üstünlükleri ve uygulamanın kolaylaştırılmasına yaptığı katkılar belirlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Otofretaj eniyilemesinde malzemeye kazandırılan özelliklerinin eniyileme hesabında etkili olduğu görülmektedir. Akma gerilmesi yüksek olan numune için hesaplanan % arakesit değerinin %1.0-1.2 aralığında en düşük değerini aldığı belirlenmiştir. Akma gerilmesi düşük olan ve namlunun üretildiği 2 numaralı numunede ise bu değer %1.3-1.5 aralığında en düşük değerini almıştır. Ayrıca Tresca ve Von Mises ölçütleri arasında da % arakesit değerinde değil Eşdeğer Gerilme/Akma Gerilmesi oranı değerlerinde farklılaşma olduğu görülmüştür. Tresca ölçütüne göre gerilme oranı değerleri Von Mises'e göre 0.10 mertebesinde yüksek seyretmektedir. Otofretaj işleminin analitik ve nümerik irdelenmesi ve sonuçlarına ilişkin bir makale hazırlanmıştır.

Sürtünme katsayısının mekanik otofretaj yönteminde gerilme dağılımına herhangi kayda değer bir etki yapmadığı teyit edilmiştir.

Nümerik otofretaj hesaplamalarında Elastik-Doğrusal Plastik ve Elastik-Doğrusal olmayan plastik malzeme sonuçlarının birbirinden çok farklı olmadığı ve hesapları sadeleştirmek ve kıyaslamak için Elastik - Doğrusal Plastik malzeme modelinin kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Eniyilenmiş otofretajda mandrel otofretaj taslağı arakesit çapı belirlenmesinde Analitik ve nümerik sonuçların eğrilerinin kullanılması durumunda; analitik sonuçların %1.3-1.4, nümerik sonuçların ise %1.1-1.3 değerleri için en düşük değerlerini aldığı belirlenmiştir. Namlu otofretaj taslağının ölçülendirilmesinde bu değerler temel alınmış ve pratikte yaşanabilecek kayıplar düşünülerek % arakesit değerinin %1.5 olarak uygulanması kararlaştırılmıştır.

Otofretajdan en verimli şekilde ön gerilme elde edilmesi (otofretaj eniyilemesi), otofretaj işlemi sonrası talaşlı imalat ile kalıntı gerilmelerden kayıplar yaşanması durumlarını hesaplamak ve istenen güvenlik değerine

göre cidarın namlu boyunca, eniyilemesi ve en fazla hafiflemenin elde edilmesi için bir analitik hesaplama algoritması oluşturulmuştur. Algoritma ile merminin namlu içerisinde oluşturduğu basınç yol grafiğine göre çelik namlu cidarının eniyilemesi ve en fazla hafifleme gerçekleştirilmiştir. Bu algoritma ile çalışan bir döngü yazılmış ve algoritmaya ilişkin bir makale oluşturulmaktadır.

Nümerik benzetimler gerçekleştirilmiş, analitik hesaplar ile uyumu değerlendirilerek analitik/nümerik hesap ve algoritmanın doğruluğu kontrol edilmiştir.

Namlu içerisinde merminin barut yanması ile hareketlenmesi ve namlu üzerinde oluşturduğu dinamik yük durumunu temsil etmeye üzere nümerik hesap için fortran döngüsü oluşturularak hesabın gerçekteki yükleme koşullarını temsil edecek şekilde mermiyi takip etmesi sağlanarak iç balistik hesap yapısal benzetim şeklinde nümerik olarak modellenenmiş ve hem öngerilmeli etkisi hem de mermiyi takip eden servis basınçlarında namlu yapısal tepkileri belirlenebilmiştir. 105 mm Obüs ile kullanılan mühimmat modelleri düşünüldüğünde en yüksek servis basıncı değeri 345 MPa olmaktadır. Bu değer yaklaşık 1.15 kat artırılmış (ΔP) ve 400 MPa değeri için tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

Analitik yöntemle her aşamadaki farklı etkinin hesaplara katılmış olması sebebi ile analitik cidar eniyileme ile belirlenmiş ölçülerin doğrulanmasına ilişkin çalışma yapılması ve hafifleme için bu ölçülerin değerlendirilmesi kararlaştırılmıştır.

Hesaplama modeli sahada gerinim ölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiş ölçümler kullanılarak doğrulanmıştır. Gerinim ölçerlerin öngerilmeli parçalarda yapılan ölçümlerine ilişkin önemli tespitlerde bulunulmuştur. Servis yüklerinin uygulanması esnasında ön gerilmeli olarak yüke maruz bırakılan namluda çap genişlemesi ön gerilmeli duruma göre daha az olacağından ve gerinim ölçerlerin çalışma mantığı şekil değiştirmeyi tespit etmek ve malzeme özellikleri çerçevesinde gerilme değerlerine hesap ile geçmek şeklinde olduğundan daha az şekil değiştirme göstermiş bir

malzeme daha az hesaplanmış bir gerilme değeri değerlendirilmesine neden olacaktır. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin gerinim ölçer değerlerine eklenmesi gerekliliği dikkate alınmıştır. Gerinim ölçme sonuçlarının çok dikkatli irdelenmesi gerektiği değerlendirilmiştir. En uzak sonucun %80.0 yakın olduğu, en yakın sonucun ise %99.9 yakın olduğu belirlenmiştir.

Kompozit sarım öncesinde eniyileme ölçülerindeki çelik namlunun 1.10 hedeflenen ölçülerde güvenlik katsayısının 1.18 olarak elde edilebileceği, orijinal ölçülerdeki namlunun emniyet seviyesinin ise en yüksek yükleme koşullarında 1.36 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.

Eniyilenmiş ölçülerdeki çelik namlu 216.8 Kg. (son ölçülerine işlendiğinde), eski namlu ise 295.7 Kg. ağırlığındadır. Böylelikle namlunun çelik kısmı (78.9 Kg.) %26.7 oranında hafifletilmiştir. Bu hafifleme miktarlarının tespitinde güvenliğin yükseltilmesi amacıyla hazne bölümünden cidar eksiltilmesi en az seviyede tutulmuştur. San-Tez projesi kapsamında hazne bölgesinden eksiltilebilecek ek cidar miktarı konusunda çalışmalara devam edilmektedir. Bu çalışma kapsamında belirlenen hafifletme oranlarının bir miktar daha artırılabilmesi değerlendirilmektedir.

Namlunun kompozit sarımında termoset reçineli kompozitlerin kullanımında termal genleşme katsayılarının uyumsuzluğu nedeni ile çelik alt katman ve kompozit ceket arasında üretim sonrası boşluk oluşması nedeni ile zorluk oluşmaktadır. Bu olumsuzluğun elimine edilmesi amacıyla çelik ve termoset reçineli kompozit katman arasında ayrıca dış yüzeye termoplastik reçineli kompozit katman uygulanması kararlaştırılmıştır.

Termoplastik reçineli karbon fiber kompozit malzemenin (Karbon/PEEK) çelik ile ara katman olarak kullanılması ve en dışarıya tekrar uygulanması, sarım açısının 90° olması, sarım tezgâhının yetenekleri ve hafif silah namlusunda daha önce uygulandığından kıyaslama yapma amacıyla ara termoset reçineli karbon fiber kompozit (Karbon/Epoxy) katmanların ± 45 Derece açı ile uygulanması uygun değerlendirilmiştir.

Kompozit desteklemenin üç kademedede yapılmasının nedeni namlu üzerinde namlunun kızak mekanizmasına bağlantı noktalarına dokunulamaması nedeniyledir. Bu noktalarda ayrıca kompozit sarımın yapılabileceği en yüksek çap değeri de sınırlandırılmıştır. Dolayısı ile sarım kalınlığının artırılması sınırlı kalacaktır. Hesaplama basitleştirme yapmak adına çelik cidarın dış çapı ile namlu bağlantı noktalarının birleşim yerlerinde keskin bırakılmış köşeler uygulama esnasında yarıçap oluşturarak yumuşak geçiş yapılmak sureti ile bu bölgedeki gerilim yığılmalarının önüne geçilebileceği değerlendirilmiştir.

Kompozit destek yükün taşınmasına yardımcı olmakta ve desteksiz duruma göre aynı yerde gerçekleşen en yüksek gerilme bölgesindeki gerilme değerini 916.5 MPa'dan 874.0 MPa'a düşürmektedir. Bu şekli ile emniyet katsayısı değerini 1.18'den 1.24 düzeyine çıkarmaktadır.

Kompozit malzeme sarımı öncesi çelik namlu taslağının ağırlığında (78.9 Kg) %26.7 hafifeme, kompozit sarım sonrası ise (67 Kg) %22.7 Kg hafifleme elde edilmiştir. Özetlemek gerekirse tamamen çelik ve 295.7 Kg ağırlığa sahip çelik bir namlu yerine kullanılabilir ve ağırlığı 228.62 Kg olan ve kompozitle desteklenmiş bir namlu kullanılabilir.

Başka bir doktora tezi çalışmasında bu hafiflemenin geri tepme mekanizmasına yapacağı etkiler incelenmektedir.

Kompozit desteğin hesaplarının doğrulanması için gerçekleştirilen testlerde; üç farklı seri şeklinde yapılmış atışlarda aynı bölgedeki gerilim ölçerinin ölçtüğü değerler dış çap değişimi olarak çevrildiğinde ve incelendiğinde dış çapın belli bir atım sayısına kadar ve her atımda benzer olacak şekilde küçülme eğilim gösterdiği ancak atım sayısı arttıkça çapın tekrar genişleme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bunda etkili olan nedenin karbon/epoksi reçine kompozitin negatif genleşme katsayısı olduğu değerlendirilmiştir. Bu durumda ilk atımlarda kompozit takviye çelik bölümü sıkılaşmaya meyil göstermekte atım sayısı arttıkça bu meyil azalmakta, çap önce ilk haline geri dönmekte ve sonrasında genişlemeye başlamaktadır.

4.2. ÖNERİLER

Kompozit sarımın namlu dinamik titreşim davranışına etkileri ayrı bir çalışma konusu olarak daha detaylı incelenebilir.

Tek atım ve çoklu atımların sıcaklık profilleri çıkartılabilir.

Kalıntı gerilmelerin yorulma davranışı dolayısı ile namlu ömrüne etkileri incelenebilir.

Namlu içine uygulanabilecek kaplama yöntemleri araştırılarak, kaplama yöntemi geliştirilerek yöntemin aşınma, sıcaklık değişimin profiline olacak etkileri çıkartılabilir.

Kompozit namlunun hedefte mühimmat ile birlikte oluşturduğu dağılım performansı belirlenerek çelik namlu ile karşılaştırılabilir.

Silah sisteminin mekanizma dinamik benzetimleri, namlu ve geri tepme mekanizmalarının etkilerini içerecek şekilde gerçekleştirilebilir ve silah sisteminin kamyon üzerine monte edilmesi için platform tasarlanabilir.

Hafif silah ve ağır silah namlularından elde edilmiş değerler karşılaştırılmak sureti ile ölçülerin namluların parametre davranışlarını nasıl etkilediği belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Şahsuvaroğlu H, Fatih'in Şâhi Topları, Tarih ve Medeniyet, <http://www.tarihvedenedeniyet.org/2009/08/fatihin-sahi-toplari/> (Erişim tarihi: 31.08.2009)
- [2] Değirmenci E, Yüksek Sıcaklığa ve Dinamik İç Basınca Maruz Kompozit Destekli Boru Tasarımı. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, 2010.
- [3] Gibson M. C, Determination of Residual Stress Distributions in Autofrettaged Thick-Walled Cylinders, PhD Thesis, April 2008.
- [4] Timoshenko S., Goodier J.N., "Two Dimensional Problems in Polar Coordinates", Theory of Elasticity, 2nd edition, The Maple Company, New York, 55-125 (1951).
- [5] Yıldırım H, Analytical And Numerical Analysis of Swage Autofrettage Process Applied to Thick Walled Cylinders. Master Thesis, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, 2015.
- [6] Davidson T.E, Kendall D.P, and Reiner A.N, Residual Stresses in Thick-walled Cylinders Resulting from Mechanically Induced Overstrain. SESA Spring Meeting, *Experimental Mechanics*, p253-262, May 1963.
- [7] Majzoobi G.H, & Ghomi A, Optimisation of autofrettage in thick-walled cylinders, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16, 124-131, 2006
- [8] Abaqus Users Manual, Abaqus Release 6.13 Documentation, Abaqus Inc.
- [9] Carlucci D.E., Jacobson S.S., "Tube design", *Ballistics Theory And Design Of Guns And Ammunition*, 1st edition, CRC Press, New York, 163-173 (2007).

- [10] Clark G, Residual stresses in swage-autofrettged thick-walled cylinders. Report MRL-R-847, Defence Science and Technology Organisation, Materials Research Laboratories, Melbourne, Australia, 1982.
- [11] Jost G.S, Stresses and strains in a cold-worked annulus. Aircraft Structures Report 434, Defence Science and Technology Organisation, Aeronautical Research Laboratory, Melbourne, Australia, 1988.
- [12] Parker Anthony P, Underwood John H, Influence of the bauschinger effect on residual stress and fatigue lifetimes in autofrettaged thick-walled cylinders. Technical Report ARCCB-TR-97020, US Army Armament Research Development and Engineering Center, Close Combat Armaments Center, Benet Laboratories, Newyork, USA, 1997.
- [13] Perry J, Aboudi J, Computer Modeling of Internal Pressure Autofrettage Process of a Thick-Walled Cylinder with the Bauschinger Effect, Journal of Pressure Vessel Technology, V125, p248-252, 2003.
- [14] Parker A.P, O'Hara G.P, Hydraulic Versus Swage Autofrettage and Implications of the Bauschinger Effect, Journal of Pressure Vessel Technology, V125, p309-314, 2003.
- [15] Iremonger M. J, Kalsi G. S, A Numerical Study of Swage Autofrettage, Journal of Pressure Vessel Technology, V125, p347-351, 2003.
- [16] Jahed H, & Ghanbari G, Actual unloading behavior and its significance on residual stress in machined autofrettaged tubes. Journal of Pressure Vessel Technology, 125, 321-325, 2003.
- [17] Perl M, Perry J, An Experimental-Numerical Determination of the Three-Dimensional Autofrettage Residual Stress Field Incorporating Bauschinger Effects, Journal of Pressure Vessel Technology, V128, p173-178, 2006.

- [18] Huang X.P, & Cui W.C, Effect of bauschinger effect and yield criterion on residual stress distribution of autofrettaged tube. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 128, 212-216, 2006.
- [19] Gao X.L, Strain gradient plasticity solution for an internally pressurized thick-walled cylinder of an elastic linear-hardening material, *ZAMP*, V58, p162-173, 2006.
- [20] Troiano E, Underwood J. H, Parker, A. P, Finite Element Investigation of Bauschinger Effect in High-Strength A723 Pressure Vessel Steel, *Journal of Pressure Vessel Technology*, V128, p185-189, 2007.
- [21] Ayob A, & Elbasheer M.K, Optimum autofrettage pressure in thick cylinders. *Jurnal Mekanikal*, 24, 1-14, 2007.
- [22] Jae-Hyun Park, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim, Ki-Up Chad, Suk-Kyun Hong, Machining effect of the autofrettaged compound cylinder under varying overstrain levels, *Journal of materials processing technology*, V201, p491-496, 2008.
- [23] Darijani H, Kargarnovin M.H, Naghdabadi R, Design of thick-walled cylindrical vessels under internal pressure based on elasto-plastic approach, *Materials and Design*, V30, p3537-3544, 2009.
- [24] Shim W.S, Kim J.H, Lee Y.S, Cha K.U, Hong S.K, A Study on Hydraulic Autofrettage of Thick-Walled Cylinders Incorporating Bauschinger Effect, *Experimental Mechanics*, V50, p621-626, 2010.
- [25] Ali A.R.M, Ghosh N.C, & Alam T.E, Optimum design of pressure vessel subjected to autofrettage process. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 4(10), 582-587, 2010.
- [26] Güngör O, Metal Matriks Kompozit Sarılmış Namlu Haznesi Yapısal Analizi ve Çap Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2010.

- [27] Hua Z, Puttagunta S, Computer Modeling of Internal Pressure Autofrettage Process of a Thick-Walled Cylinder with the Bauschinger Effect, *Engineering & Applied Sciences*, V1, p143-161, 2012.
- [28] Y. Zhu, X.Y.Luo, H.M.Wang, R.W.Ogden, C.Berry, Three-dimensional non-linear buckling of thick-walled elastic tubes under pressure, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, V48, p1-14, 2013.
- [29] Zhong Hu C. P, Computer Modeling and Optimization of Swage Autofrettage Process of a Thick-Walled Cylinder Incorporating Bauschinger Effect. *American Transactions on Engineering & Applied Sciences*, 3(1): 32. 2014.
- [30] Oktay E, Akay H, Merttopçuoğlu O, Parallelized Structural Topology Optimization and CFD Coupling for Design of Aircraft Wing Structures, *Computers & Fluids*, Vol. 49, pp 141-145, 2011.
- [31] Johnsen S, Structural Topology Optimization. Basic Theory, Methods and Applications. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [32] Christiansen N. A, Bærentzen J.A, Nobel-Jørgensen M, Aage N, Sigmund O, Combined shape and topology optimization of 3D structures, *Computers & Graphics*, Vol. 46, pp 25-35, 2014.
- [33] K.Y. Rhee, H.S. Oh, and S.H. Jang, Delamination Characteristics of Multi-Directional Carbon Fiber/Epoxy Composites Under High Pressure, *Polymer Composites*, V22, N6, p793-802, 2001.
- [34] R. Grujicic, J.R. Delong, and W.S. Derosset, Reliability Analysis of Hybrid Ceramic/Steel Gun Barrels, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, V26, p405-420, 2003.
- [35] B. Balya, Design and Analysis of Filament Wound Composite Tubes, M. Sc. Thesis, METU, December 2004.

- [36] A. Littlefield, E. Hyland, A. Andalora, N. Klein, R. Langone, and R. Becker, Carbon Fiber/Thermoplastic Overwrapped Gun Tube, *Materials and Manufacturing Processes*, V21, p573-578, 2006.
- [37] R.N. Katz, L.A. Bracamonte, J.C. Withers, and S. Chaudhury, Hybrid Ceramic Matrix/Metal Matrix Composite Gun Barrels, *Materials and Manufacturing Processes*, V21, p579-583, 2006.
- [38] R. Emerson, R. Carter, and J. Tzeng, Press-Fit Sheating for Ceramic Gun Liners, *Materials and Manufacturing Processes*, V21, p597-601, 2006.
- [39] P.Y. Tabakov, E.B. Summers, Lay-up optimization of multilayered anisotropic cylinders based on a 3-D elasticity solution, *Computers and Structures*, V84, p374-384, 2006.
- [40] Jong Woon Kim, Ji Hyung Lee, Hyoung Geun Kim, Hak Sung Kim, Dai Gil Lee, Reduction of residual stresses in thick-walled composite cylinders by smart cure cycle with cooling and reheating, *Composite Structures*, V75, p261-266, 2006.
- [41] Kalaycıoğlu, B., Dirikolu M.H. "Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Basınç Tankı Tasarımı", *Int.J.Eng.Research&Development*, Vol.1, No.2, p53-60, 2009.
- [42] Önder A, Sayman O, Doğan T, Tarakçıoğlu N. Burst failure load of composite pressure vessels. *Composite Structures*, V89, p159, 2009.
- [43] Hung-Wen Chen, Huai-Ku Sun, Tien-Chih Liu, Autofrettage analysis of a fibre-reinforced composite tube structure incorporated with a SMA, *Composite Structures*, V89, p497-508, 2009.
- [44] R. Ansari, F. Alisafaei, P. Ghaedi, Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature, *Composite Structures*, V92, p1100-1109, 2010.

- [45] Luiz A.L. Martins, Fernando L. Bastian, Theodoro A, Structural and functional failure pressure of filament wound composite tubes, *Materials and Design*, V36, p779-787, 2012.
- [46] Roberta Sburlati, Analytical elastic solutions for pressurized hollow cylinders with internal functionally graded coatings, *Composite Structures*, V94, p3592-3600, 2012.
- [47] Boresi A.P., Schmidt R.J., Sidebottom O.M., "The thick wall cylinder", *Advanced Mechanics of Materials*, 5th edition, John Wiley and Sons, New York, 440-468 (1993).



EKLER

DİKKAT! Eklerde yordamların içerisinde kullanılan bazı değerler bilgi gizliliği açısından değiştirilmiştir.

Hesaplama yapmadan önce kodun bütününe inceleyiniz ve kendi uygulamak istediğiniz değerleri doğru tanımladığınızdan emin olunuz.

Yordamların çalıştığı teyit edilmiştir ve yukarıdaki bölümlerdeki hesaplamalarda kullanılmıştır.

Yordamların kullanımı sonucunda çıkacak sonuçlar kullanıcının kendi sorumluluğundadır.

EK-1 Otofretaj Optimizasyon Yordamı

% Otofretaj Optimizasyon hesapları

% Tanımlamalar

% ra: tüp iç yarıçapı (mm)

% rb: tüp dış yarıçap (mm)

% ri: mandrel-tüp sıkı geçme arayüz çapı (mm)

% rm: mandrel yarıçapı (mm)

% delta: namlu mandrel arayüz ölçüsü (mm), $\delta = r_m - r_a$

% Pi: Sıkı geçme arayüz basıncı ($r = r_a$ 'daki) (MPa)

% Pe : Akma oluşması için en az basınç miktarı (MPa)

% POt : Tüpün Poisson Oranı (-)

% POm : Mandrelin Poisson Oranı (-)

% Gt : Tüpün Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POt))$

% Gm : Mandrelin Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POm))$

% rp : Birincil akma yarıçapı (mm)

% rs : İkincil akma yarıçapı (mm)

% r: yarıçap (değişken) (mm)

% Et: Namlu malzemesi elastik modülü (GPa)

% Etp: Namlu malzemesi plastik modülü (Bilinear Kinematik Hard. Plastik Bölge eğimi) (GPa)

% Em: Mandrel malzemesi elastik modülü (GPa)

% k: Malzeme Akma Gerilmesi (MPa), $k = \text{SigmaY} / (3)^{1/3}$

% $K = r/a$ () - çap oranı

% SigmaY: Namlu malzemesinin akma Mukavemeti değeri (MPa)

% SigmaRp: Radyal kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetap: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı plastik bölge gerilme değeri(MPa),

% SigmaRe: Radyal kalıntı elastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetae: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı elastik bölge gerilme değeri(MPa),

clc

clear all

rm=40.70; %(mm)

Et=179.0; %(GPa)

Etp=2.8324; %(GPa)

Em=450; %GPa

POt=0.28; %(-)

POm=0.285; %(-)

Gt=Et./(2.*(1+POt)); %(GPa)

Gm=Em./(2.*(1+POm)); %(GPa)

SigmaY=1142.46; %(MPa)

k1=SigmaY./(3)^(1./2);

```

rb=120; %(mm)

i=0;

j=0;

w=0;

g=Et/Em; %(-)

lamda=0;

SigmaR = zeros(10,1);

SigmaTeta = zeros(10,1);

rak=zeros(10,1);

rpk=zeros(10,1);

for ra=45.40:0.1:50.40;

    k=rb/ra; %(mm)

    delta=(rm-ra); %(mm)

    lamda=delta/ra; %(-)

    z1=lamda*Et*1000/SigmaY;

    w=w+1;

    %-----

    %Plastik-elastik yarıçap hesabı

    j=j+1;

    for rp=ra:0.001:rb

        OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-
        (rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

        alfa=(1-POt)*(SigmaY/2)*rp*rp/(Gt*1000*ra)-ra*0.5*(1-
        2*POt)*OtofB/(Gt*1000)-ra*OtofB*(POm+1)*(2*POm-1)/(Em*1000);

        hata=abs(delta-alfa);

        if hata<0.0001

            rpk(j,1)=rp;

```

```

fprintf('rp=%f\n',rp);

break;

end

rak(w,1)=ra;

end

%-----

Popr=400;

%Otofretaj sonrası sabit basınç uygulanması sonrası

%plastik-elastik geçiş yarıçapındaki kalıntı gerilme dağılımı

%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzooobi G.H.,

%Ghomi A. Sayfa 128 Denklem 23-24-25-26-27-28)

i=i+1;

SigmaR(i,1)=(SigmaY*(rb^2/rp^2-1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/ra)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/ra^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)))-
SigmaY*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rp)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2-
rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))-Popr*(rb^2/rp^2-1)/(k^2-1);

SigmaTeta(i,1)=-SigmaY*(rb^2/rp^2+1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/ra)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/ra^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-
POt^2)*Etp/Et))+SigmaY*(1+rp^2/rb^2-2*log(rp/rp)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2+rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))
+Popr*(rb^2/rp^2+1)/(k^2-1);

end

grid on

hold on

SigmaEqvTresca=SigmaTeta-SigmaR;

SigmaEqvVonMis=3^(1/2)/2*(SigmaTeta-SigmaR);

SigmaEqvPercentTresca=SigmaEqvTresca/SigmaY;

SigmaEqvPercentVonMis=SigmaEqvVonMis/SigmaY;

rmk=ones(i,1)*rm;

rakPercent=((rmk./rak)-1)*100;

```

```
plot(rakPercent,SigmaEqvPercentTresca,'linewidth',2,'color','r');  
plot(rakPercent,SigmaEqvPercentVonMis,'linewidth',2,'color','b');  
title('Otofretaj Optimizasyonu')  
ylabel('GerilmeDeğeri/AkmaGerilmesi(-)')  
xlabel('Arakesit Çap Oranı (%)')
```



EK-2 Otofretaj Sonrası Kalıntı Gerilmeler Yordamı

% Otofretaj Sonrası Kalıntı Gerilme Hesapları (Karşılaştırmalı)

% Tanımlamalar

% ra: tüp iç yarıçapı (mm)

% rb: tüp dış yarıçap (mm)

% ri: mandrel-tüp sıkı geçme arayüz çapı (mm)

% rm: mandrel yarıçapı (mm)

% delta: namlu mandrel arayüz ölçüsü (mm), $\delta = r_m - r_a$

% Pi: Sıkı geçme arayüz basıncı ($r = r_a$ 'daki) (MPa)

% Pe : Akma oluşması için en az basınç miktarı (MPa)

% POt : Tüpün Poisson Oranı (-)

% POr : Mandrelin Poisson Oranı (-)

% Gt : Tüpün Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POt))$

% Gm : Mandrelin Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POr))$

% rp : Birincil akma yarıçapı (mm)

% rs : İkincil akma yarıçapı (mm)

% r: yarıçap (değişken) (mm)

% Et: Namlu malzemesi elastik modülü (GPa)

% Etp: Namlu malzemesi plastik modülü (Bilinear Kinematik Hard. Plastik Bölge eğimi) (GPa)

% Em: Mandrel malzemesi elastik modülü (GPa)

% k: Malzeme Akma Gerilmesi (MPa), $k = \sigma_Y / (3)^{1/3}$

% K=r/a () - çap oranı

% SigmaY: Namlu malzemesinin akma Mukavemeti değeri (MPa)

% SigmaRp: Radyal kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetap: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

```

% SigmaRe: Radyal kalıntı elastik bölge gerilme değeri (MPa),
% SigmaTetae: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı elastik bölge gerilme
değeri(MPa),
clc
clear all
rm=40.70; %(mm)
Et=141.0; %(GPa)
Etp=2.3619; %(GPa)
Em=450; %GPa
POt=0.28; %(-)
POm=0.285; %(-)
Gt=Et./(2.*(1+POt)); %(GPa)
Gm=Em./(2.*(1+POm)); %(GPa)
SigmaY=1086.01; %(MPa)
k1=SigmaY./(3).^ (1./2);
%L=950'de iç çap 99.35, dış çap 192;
ra=40.30; %(mm) (DİKKAT!! Buraya optimize edilmiş otofretaj için yarıçap
değeri yazılacak)
rb=120; %(mm)
k=rb/ra; %(mm)
hold on
delta=(rm-ra); %(mm)
lamda=delta/ra; %(-)
g=Et/Em; %(-)
z1=lamda*Et*1000/SigmaY;
%-----
%Plastik-elastik yarıçap hesabı

```

```

for rp=ra:0.001:rb

OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

alfa=(1-POt)*(SigmaY/2)*rp*rp/(Gt*1000*ra)-ra*0.5*(1-2*POt)*OtofB/(Gt*1000)-ra*OtofB*(POm+1)*(2*POm-1)/(Em*1000);

hata=abs(delta-alfa);

if hata<0.0001

fprintf('rp=%f\n',rp);

break;

end

end

%-----

SigmaRp = zeros(200,1);

SigmaTetap = zeros(200,1);

SigmaRpKen = zeros(200,1);

SigmaTetapKen = zeros(200,1);

SigmaRpYil = zeros(200,1);

SigmaTetapYil = zeros(200,1);

rr = zeros(200,1);

abc=log(rp/ra);

i=0;

for r=ra:0.05:rp;

    i=i+1;

%Majzoobi Hesabı (Kıyaslama için)

SigmaRp(i,1)=(SigmaY*(rb^2/r^2-1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/ra)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/ra^2-rp^2/rb^2)))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))-SigmaY*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/r)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/r^2-rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et));

```

```

SigmaTetap(i,1)=-SigmaY*(rb^2/r^2+1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/ra)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/ra^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-
POt^2)*Etp/Et))+SigmaY*(1+rp^2/rb^2-2*log(rp/r)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/r^2+rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et));

```

```

%Kendall Hesabı (Kiyaslama için)

```

```

SigmaRpKen(i,1)=SigmaY*((ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-(rb^2/r^2))*(((rp^2-
rb^2)/(2*rb^2))-(log((rp/ra)))))+(((rp^2-rb^2)/(2*rb^2))-(log((rp/r))));

```

```

SigmaTetapKen(i,1)=SigmaY*((ra^2/(rb^2-ra^2))*(1+(rb^2/r^2))*(((rp^2-
rb^2)/(2*rb^2))-(log((rp/ra)))))+(((rp^2+rb^2)/(2*rb^2))-(log((rp/r))));

```

```

%Yildirim Hesabı (Kiyaslama için)

```

```

OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

```

```

SigmaRpYil(i,1)=(-SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/r)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*
((rp/r)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-
rb^2/r^2);

```

```

SigmaTetapYil(i,1)=(SigmaY/2)*(1+(rp/rb)^2-log((rp/r)^2)+(1-
POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-
(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1+rb^2/r^2);

```

```

rr(i,1)=r;

```

```

end

```

```

SigmaRe = zeros(200,1);

```

```

SigmaTetae = zeros(200,1);

```

```

SigmaReKen = zeros(200,1);

```

```

SigmaTetaeKen = zeros(200,1);

```

```

SigmaReYil = zeros(200,1);

```

```

SigmaTetaeYil = zeros(200,1);

```

```

for r=rp:0.05:rb;

```

```

    i=i+1;

```

```

%Majzoobi Hesabı (Kiyaslama için)

```



```

SigmaRe(i,1)=(SigmaY*(rb^2/r^2-1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/ra)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/ra^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)))-
(SigmaY*rp^2*(rb^2-r^2)/(2*rb^2*r^2));

```

```

SigmaTetae(i,1)=(-SigmaY*(rb^2/r^2+1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/ra)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/ra^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-
POt^2)*Etp/Et)))+(SigmaY*rp^2*(rb^2+r^2)/(2*rb^2*r^2));

```

```

%Kendall hesabı (Kıyaslama için)

```

```

SigmaReKen(i,1)=SigmaY*((1-(rb^2/r^2))*(((rp^2)/(2*rb^2))+(ra^2/(rb^2-
ra^2))*(((rp^2-rb^2)/(2*rb^2))-log((rp/ra)))));

```

```

SigmaTetaeKen(i,1)=
SigmaY*((1+(rb^2/r^2))*(((rp^2)/(2*rb^2))+(ra^2/(rb^2-ra^2))*(((rp^2-
rb^2)/(2*rb^2))-log((rp/ra)))));

```

```

%Yildirim Hesabı (Kıyaslama için)

```

```

OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

```

```

SigmaReYil(i,1)=(SigmaY/2)*(-(rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
ra^2))*(1-rb^2/r^2);

```

```

SigmaTetaeYil(i,1)=(SigmaY/2)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
ra^2))*(1+rb^2/r^2);

```

```

rr(i,1)=r;

```

```

end

```

```

v=size(SigmaRp,1);

```

```

SigmaRe(1:v,:)=[];

```

```

SigmaR=vertcat(SigmaRp,SigmaRe);

```

```

SigmaTetae(1:v,:)=[];

```

```

SigmaTetaR=vertcat(SigmaTetap,SigmaTetae);

```

```

SigmaReKen(1:v,:)=[];

```

```

SigmaRKen=vertcat(SigmaRpKen,SigmaReKen);

```

```

SigmaTetaeKen(1:v,:)=[];

```

```

SigmaTetaRKen=vertcat(SigmaTetapKen,SigmaTetaeKen);

```

```

SigmaReYil(1:v,:)=[];

```

```
SigmaRYil=vertcat(SigmaRpYil,SigmaReYil);
SigmaTetaeYil(1:v,:)=[];
SigmaTetaRYil=vertcat(SigmaTetaP_Yil,SigmaTetaeYil);
grid on
hold on
plot(rr,SigmaR,'linewidth',2,'color','b');
plot(rr,SigmaTetaR,'linewidth',2,'color','r');
plot(rr,SigmaRKen,'linewidth',2,'color','magenta');
plot(rr,SigmaTetaRKen,'linewidth',2,'color','cyan');
plot(rr,SigmaRYil,'linewidth',2,'color','green');
plot(rr,SigmaTetaRYil,'linewidth',2,'color','black');
title('Kalıntı Gerilme Dağılımı')
ylabel('Gerilme(MPa)')
xlabel('r(mm)')
```

EK-3 Otofretaj Sonrası Talaş Kaldırma Hesabı Yordamı

% Otofretaj Sonrası Talaş Kaldırma Hesabı

% Tanımlamalar

% ra: tüp iç yarıçapı (mm)

% rb: tüp dış yarıçap (mm)

% ri: mandrel-tüp sıkı geçme arayüz çapı (mm)

% rm: mandrel yarıçapı (mm)

% delta: namlu mandrel arayüz ölçüsü (mm), $\delta = r_m - r_a$

% Pi: Sıkı geçme arayüz basıncı ($r = r_a$ 'daki) (MPa)

% Pe : Akma oluşması için en az basınç miktarı (MPa)

% POt : Tüpün Poisson Oranı (-)

% POM : Mandrelin Poisson Oranı (-)

% Gt : Tüpün Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POt))$

% Gm : Mandrelin Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POM))$

% rp : Birincil akma yarıçapı (mm)

% rs : İkincil akma yarıçapı (mm)

% r: yarıçap (değişken) (mm)

% Et: Namlu malzemesi elastik modülü (GPa)

% Etp: Namlu malzemesi plastik modülü (Bilinear Kinematik Hard. Plastik Bölge eğimi) (GPa)

% Em: Mandrel malzemesi elastik modülü (GPa)

% k: Malzeme Akma Gerilmesi (MPa), $k = \sigma_Y / (3)^{1/3}$

% $K = r/a$ () - çap oranı

% σ_Y : Namlu malzemesinin akma Mukavemeti değeri (MPa)

% σ_{Rp} : Radyal kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

% σ_{Tetap} : Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

```
% SigmaRe: Radyal kalıntı elastik bölge gerilme değeri (MPa),  
% SigmaTetae: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı elastik bölge gerilme değeri(MPa),  
clc  
clear all  
rm=40.70; %(mm)  
Et=141.0; %(GPa)  
Etp=2.3619; %(GPa)  
Em=450; %GPa  
POt=0.28; %(-)  
POm=0.285; %(-)  
Gt=Et./(2.*(1+POt)); %(GPa)  
Gm=Em./(2.*(1+POm)); %(GPa)  
SigmaY=1086.01; %(MPa)  
k1=SigmaY./(3).^ (1./2);  
ra=49.95; %(mm)  
rat=ra+3.826; %Talaş kaldırılmış iç çap değeri (ra'ya eklenen değer içten talaş kaldırma miktarı;  
rb=120; %(mm)  
rbt=rb-5; %Talaş kaldırılmış dış çap değeri (rb'den çıkarılan değer dıştan talaş kaldırma miktarı;  
k=rb/ra; %(mm)  
hold on  
delta=(rm-ra); %(mm)  
lamda=delta/ra; %(-)  
g=Et/Em; %(-)  
z1=lamda*Et*1000/SigmaY;  
rp=76.983;
```

```
OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);
```

```
DeltaBic=-((-SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/rat)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/rat)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-rb^2/rat^2));
```

```
fprintf('DeltaBic=%f\n',DeltaBic);
```

```
DeltaBdis=((SigmaY/2)*(-(rp/rbt)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-rb^2/rbt^2));
```

```
fprintf('DeltaBdis=%f\n',DeltaBdis);
```

%Otofretaj sonrası plastik bölgedeki kalıntı gerilme dağılımı hesabı

%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzooobi G.H.,

%Ghomi A. Sayfa 125 Denklem 15-16)

```
SigmaRpYil = zeros(200,1);
```

```
SigmaTetapYil = zeros(200,1);
```

```
rr = zeros(200,1);
```

```
abc=log(rp/ra);
```

```
i=0;
```

```
for r=ra:0.05:rp;
```

```
    i=i+1;
```

```
    OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))...
```

```
    /(1+(1-POt^2)*Etp/Et);
```

```
    SigmaRpYil(i,1)=((-SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/r)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-rb^2/r^2))+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1-(rb^2/r^2)))+((-DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1-(ra^2/r^2)));
```

```
    SigmaTetapYil(i,1)=((SigmaY/2)*(1+(rp/rb)^2-log((rp/r)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1+rb^2/r^2))+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1+(rb^2/r^2)))+((-DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1+(ra^2/r^2)));
```

```
    rr(i,1)=r;
```

```
end
```

```

%Otofretaj sonrası elastik bölgedeki kalıntı gerilme dağılımı hesabı
%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzooobi G.H.,
%Ghomi A. Sayfa 126 Denklem 23-24)
SigmaReYil = zeros(200,1);
SigmaTetaeYil = zeros(200,1);
for r=rp:0.05:rb;
    i=i+1;
    OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);
    SigmaReYil(i,1)=(SigmaY/2)*(-(rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1-rb^2/r^2)+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1-(rb^2/r^2)))+((-
    DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1-(ra^2/r^2)));
    SigmaTetaeYil(i,1)=(SigmaY/2)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1+rb^2/r^2)+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1+(rb^2/r^2)))+((-
    DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1+(ra^2/r^2)));
    rr(i,1)=r;
end
v=size(SigmaRpYil,1);
SigmaReYil(1:v,:)=[];
SigmaRYil=vertcat(SigmaRpYil,SigmaReYil);
SigmaTetaeYil(1:v,:)=[];
SigmaTetaRYil=vertcat(SigmaTetaYil,SigmaTetaeYil);
grid on
hold on
plot(rr,SigmaRYil,'linewidth',2,'color','cyan');
plot(rr,SigmaTetaRYil,'linewidth',2,'color','red');
title('Kalıntı Gerilme Dağılımı')
ylabel('Gerilme(MPa)')
xlabel('r(mm)')

```

EK-4 Talaş Kaldırma Sonrası Operasyon Basıncında Kalıntı Gerilme Hesabı Yordamı

% Otofretaj Sonrası Talaş Kaldırma Sonrası Servis Basıncında Gerilme Değerleri Hesabı

% Tanımlamalar

% ra: tüp iç yarıçapı (mm)

% rb: tüp dış yarıçapı (mm)

% ri: mandrel-tüp sıkı geçme arayüz çapı (mm)

% rm: mandrel yarıçapı (mm)

% delta: namlu mandrel arayüz ölçüsü (mm), $\delta = r_m - r_a$

% Pi: Sıkı geçme arayüz basıncı ($r = r_a$ 'daki) (MPa)

% Pe : Akma oluşması için en az basınç miktarı (MPa)

% POt : Tüpün Poisson Oranı (-)

% POm : Mandrelin Poisson Oranı (-)

% Gt : Tüpün Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POt))$

% Gm : Mandrelin Kayma Modülü (GPa), $G = E / (2 \cdot (1 + POm))$

% rp : Birincil akma yarıçapı (mm)

% rs : İkincil akma yarıçapı (mm)

% r: yarıçap (değişken) (mm)

% Et: Namlu malzemesi elastik modülü (GPa)

% Etp: Namlu malzemesi plastik modülü (Bilinear Kinematik Hard. Plastik Bölge eğimi) (GPa)

% Em: Mandrel malzemesi elastik modülü (GPa)

% k: Malzeme Akma Gerilmesi (MPa), $k = \sigma_Y / (3)^{1/3}$

% $K = r/a$ () - çap oranı

% σ_Y : Namlu malzemesinin akma Mukavemeti değeri (MPa)

% σ_{Rp} : Radyal kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetap: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı plastik bölge gerilme değeri(MPa),

% SigmaRe: Radyal kalıntı elastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetae: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı elastik bölge gerilme değeri(MPa),

clc

clear all

rm=40.70; %(mm)

Et=141.0; %(GPa)

Etp=2.3619; %(GPa)

Em=450; %GPa

POt=0.28; %(-)

POm=0.285; %(-)

Gt=Et./(2.*(1+POt)); %(GPa)

Gm=Em./(2.*(1+POm)); %(GPa)

SigmaY=1086.01; %(MPa)

k1=SigmaY./(3).^(1./2);

ra=49.95; %(mm)

rat=ra+3.826; %Talaş kaldırılmış iç çap değeri (ra'ya eklenen değer içten talaş kaldırma miktarı;

rb=120; %(mm)

rbt=rb-.05; %Talaş kaldırılmış dış çap değeri (rb'den çıkarılan değer dıştan talaş kaldırma miktarı;

k=rb/ra; %(mm)

hold on

delta=(rm-ra); %(mm)

lamda=delta/ra; %(-)

g=Et/Em; %(-)

z1=lamda*Et*1000/SigmaY;

rp=76.983;

OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

DeltaBic=-((-SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/rat)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/rat)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-rb^2/rat^2));

fprintf('DeltaBic=%f\n',DeltaBic);

DeltaBdis=((SigmaY/2)*(-(rp/rbt)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-rb^2/rbt^2));

fprintf('DeltaBdis=%f\n',DeltaBdis);

%Otofretaj sonrası plastik bölgedeki kalıntı gerilme dağılımı hesabı

%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzoobi G.H.,

%Ghomi A. Sayfa 125 Denklem 15-16)

SigmaRpYil = zeros(200,1);

SigmaTetapYil = zeros(200,1);

rr = zeros(200,1);

abc=log(rp/ra);

i=0;

for r=ra:0.05:rp;

 i=i+1;

OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

 SigmaRpYil(i,1)=((-SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/r)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-rb^2/r^2))+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1-(rb^2/r^2)))+((-DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1-(ra^2/r^2)));

 SigmaTetapYil(i,1)=((SigmaY/2)*(1+(rp/rb)^2-log((rp/r)^2)+(1-POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-(OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1+rb^2/r^2))+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1+(rb^2/r^2)))+((-DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1+(ra^2/r^2)));

```

    rr(i,1)=r;
end
%Otofretaj sonrası elastik bölgedeki kalıntı gerilme dağılımı hesabı
%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzooobi G.H.,
%Ghomi A. Sayfa 126 Denklem 23-24)
SigmaReYil = zeros(200,1);
SigmaTetaeYil = zeros(200,1);
for r=rp:0.05:rb;
    i=i+1;
    OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);
    SigmaReYil(i,1)=(SigmaY/2)*(-(rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1-rb^2/r^2)+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1-(rb^2/r^2)))+((-
    DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1-(ra^2/r^2)));
    SigmaTetaeYil(i,1)=(SigmaY/2)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1+rb^2/r^2)+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1+(rb^2/r^2)))+((-
    DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1+(ra^2/r^2)));
    rr(i,1)=r;
end
v=size(SigmaRpYil,1);
SigmaReYil(1:v,:)=[];
SigmaRYil=vertcat(SigmaRpYil,SigmaReYil);
SigmaTetaeYil(1:v,:)=[];
SigmaTetaRYil=vertcat(SigmaTetaYil,SigmaTetaeYil);
%Talaş Kaldırma Sonrası Servis Basıncı uygulanması
Pservis=400;
SigmaRpYilSer = zeros(200,1);
SigmaTetaYilSer = zeros(200,1);
rrs = zeros(200,1);

```

```

i=0;
for r=ra:0.05:rp;
    i=i+1;

    OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

    SigmaRpYilSer(i,1)=((-SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/r)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-
    (OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1-rb^2/r^2))+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1-(rb^2/r^2)))+((-
    DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1-(ra^2/r^2)))+((Pservis*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-
    (rb^2/r^2)));

    SigmaTetapYilSer(i,1)=((SigmaY/2)*(1+(rp/rb)^2-log((rp/r)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*(Etp/Et))-
    (OtofB*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1+rb^2/r^2))+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-
    rat^2)*(1+(rb^2/r^2)))+((-DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1+(ra^2/r^2)))
    +((Pservis*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1+(rb^2/r^2)));

    rrs(i,1)=r;
end

%Otofretaj sonrası elastik bölgedeki kalıntı gerilme dağılımı hesabı
%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzooobi G.H.,
%Ghomi A. Sayfa 126 Denklem 23-24)

SigmaReYilSer = zeros(200,1);
SigmaTetaeYilSer = zeros(200,1);

for r=rp:0.05:rb;
    i=i+1;

    OtofB=(SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);

    SigmaReYilSer(i,1)=(SigmaY/2)*(-(rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1-rb^2/r^2)+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1-(rb^2/r^2)))+((-
    DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1-(ra^2/r^2)))+((Pservis*ra^2/(rb^2-ra^2))*(1-
    (rb^2/r^2)));

    SigmaTetaeYilSer(i,1)=(SigmaY/2)*((rp/r)^2+(rp/rb)^2)-(OtofB*ra^2/(rb^2-
    ra^2))*(1+rb^2/r^2)+((DeltaBic*rat^2)/(rb^2-rat^2)*(1+(rb^2/r^2)))+((-

```

```

DeltaBdis*rbt^2)/(rbt^2-ra^2)*(1+(ra^2/r^2)))+(Pservis*ra^2/(rb^2-
ra^2))*(1+(rb^2/r^2));

    rrs(i,1)=r;

end

v=size(SigmaRpYilSer,1);
SigmaReYilSer(1:v,:)=[];
SigmaRYilSer=vertcat(SigmaRpYilSer,SigmaReYilSer);
SigmaTetaeYilSer(1:v,:)=[];
SigmaTetaRYilSer=vertcat(SigmaTetaPylSer,SigmaTetaeYilSer);

grid on
hold on
plot(rr,SigmaRYil,'linewidth',2,'color','cyan');
plot(rr,SigmaTetaRYil,'linewidth',2,'color','red');
plot(rrs,SigmaRYilSer,'linewidth',2,'color','blue');
plot(rrs,SigmaTetaRYilSer,'linewidth',2,'color','black');

title('Kalıntı Gerilme Dağılımı')
ylabel('Gerilme(MPa)')
xlabel('r(mm)')

```

EK-5 Namlu Boyunca Analitik Cidar Optimizasyon Hesapları Yordamı

% Namlu Boyunca Cidar Optimizasyon hesapları (Plastik-Elastik Geçiş çapı

% bilinear Kinematik Hardening ile hesaplanıyor) ve iç çaptan cidar

% kaldırıldıktan sonra iç basınç uygulanıyor.

% Tanımlamalar

% ra: tüp iç yarıçapı (mm)

% rb: tüp dış yarıçap (mm)

% rm: mandrel yarıçapı (mm)

% delta: namlu mandrel arayüz ölçüsü (mm), $\text{delta}=\text{rm}-\text{ra}$

% POt : Tüpün Poisson Oranı (-)

% POr : Mandrelin Poisson Oranı (-)

% rp : Birincil akma yarıçapı (mm)

% r: yarıçap (değişken) (mm)

% Et: Namlu malzemesi elastik modülü (GPa)

% Etp: Namlu malzemesi plastik modülü (Bilinear Kinematik Hard. Plastik Bölge eğimi) (GPa)

% Em: Mandrel malzemesi elastik modülü (GPa)

% $K=r/a$ () - çap oranı

% SigmaY: Namlu malzemesinin akma Mukavemeti değeri (MPa)

% SigmaRp: Radyal kalıntı plastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetap: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı plastik bölge gerilme değeri(MPa),

% SigmaRe: Radyal kalıntı elastik bölge gerilme değeri (MPa),

% SigmaTetae: Çevresel/Teğetsel/Hoop kalıntı elastik bölge gerilme değeri(MPa),

clc

clear all

rm=40.70; %(mm)

```

ra=49.95; %(mm)
rat=ra+2.55; %(mm)
rb=120; %(mm)
Et=179.0; %(GPa)
Etp=2.8324; %(GPa)
Em=450; %GPa
POt=0.28; %(-)
POm=0.285; %(-)
SigmaY=1142.46; %(MPa)
k1=SigmaY./(3).^(1./2);
g=Et/Em; %(-)
k=rb/ra; %(mm)
delta=(rm-ra); %(mm)
lamda=delta/ra; %(-)
%z1=lamda*Et*1000/SigmaY;
SigmaRa=0;
alfa=0;
Gt=Et./(2.*(1+POt)); %(GPa)
%-----
%Plastik-elastik yarıçap hesabı
for rp=ra:0.001:rb
    SigmaRa=-((SigmaY/2)*(1-(rp/rb)^2+log((rp/ra)^2)+(1-
    POt^2)*(Etp/Et)*((rp/ra)^2-(rp/rb)^2))/(1+(1-POt^2)*Etp/Et);
    alfa=(1-POt)*(SigmaY/2)*rp*rp/(Gt*1000*ra)+0.5*(1-
    2*POt)*SigmaRa/(Gt*1000)-SigmaRa*(1+POm)*(1-2*POm)/(Em*1000);
    hata=abs(delta-alfa);
    if hata<0.0001

```

```

break;

end

end

%-----

SigmaR=zeros(3150,1);

SigmaTeta=zeros(3150,1);

Popr=zeros(3150,1);

for l=1:1:500

Popr(l,1)=400;

%Otofretaj sonrası sabit basınç uygulanması sonrası

%plastik-elastik geçiş yarıçapındaki kalıntı gerilme dağılımı

%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzoobi G.H.,

%Ghomi A. Sayfa 128 Denklem 23-24-25-26-27-28)

SigmaR(l,1)=(SigmaY*(rb^2/rp^2-1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rat)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rat^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)))-
SigmaY*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rp)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2-
rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))-Popr(l,1)*(rb^2/rp^2-1)/(k^2-1);

SigmaTeta(l,1)=-SigmaY*(rb^2/rp^2+1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rat)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rat^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-
POt^2)*Etp/Et))+SigmaY*(1+rp^2/rb^2-2*log(rp/rp)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2+rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))
+Popr(l,1)*(rb^2/rp^2+1)/(k^2-1);

end

for l=501:1:3150

Popr(l,1)=6E-05*l^2 - 0.3631*l + 562.3;

%Otofretaj sonrası sabit basınç uygulanması sonrası

%plastik-elastik geçiş yarıçapındaki kalıntı gerilme dağılımı

%"Optimisation of autofrettage in thickwalled cylinders." Majzoobi G.H.,

%Ghomi A. Sayfa 128 Denklem 23-24-25-26-27-28)

```

```

SigmaR(l,1)=(SigmaY*(rb^2/rp^2-1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rat)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rat^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)))-
SigmaY*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rp)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2-
rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)) -Popr(l,1)*(rb^2/rp^2-1)/(k^2-1);

```

```

SigmaTeta(l,1)=-SigmaY*(rb^2/rp^2+1)*(1-rp^2/rb^2+2*log(rp/rat)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rat^2-rp^2/rb^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-
POt^2)*Etp/Et))+SigmaY*(1+rp^2/rb^2-2*log(rp/rp)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2+rp^2/rb^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))
+Popr(l,1)*(rb^2/rp^2+1)/(k^2-1);

```

```
end
```

```
grid on
```

```
hold on
```

```
SigmaEqv=SigmaTeta-SigmaR;
```

```
S=SigmaY./SigmaEqv;
```

```
rbm=zeros(3150,1);
```

```
rbm(:,1)=rb;
```

```
for l=1:1:3150;
```

```
    while S(l,1)>=1.10;
```

```
        rbm(l,1)=rbm(l,1)-0.05;
```

```

SigmaR(l,1)=(SigmaY*(rbm(l,1)^2/rp^2-1)*(1-
rp^2/rbm(l,1)^2+2*log(rp/rat)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rat^2-
rp^2/rbm(l,1)^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)))-SigmaY*(1-
rp^2/rbm(l,1)^2+2*log(rp/rp)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2-
rp^2/rbm(l,1)^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et)) -Popr(l,1)*(rbm(l,1)^2/rp^2-1)/(k^2-
1);

```

```

SigmaTeta(l,1)=-SigmaY*(rbm(l,1)^2/rp^2+1)*(1-
rp^2/rbm(l,1)^2+2*log(rp/rat)+(1-POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rat^2-
rp^2/rbm(l,1)^2))/(2*(k^2-1)*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))+SigmaY*
(1+rp^2/rbm(l,1)^2-2*log(rp/rp)+(1-
POt^2)*Etp/Et*(rp^2/rp^2+rp^2/rbm(l,1)^2))/(2*(1+(1-POt^2)*Etp/Et))
+Popr(l,1)*(rbm(l,1)^2/rp^2+1)/(k^2-1);

```

```
SigmaEqv=SigmaTeta-SigmaR;
```

```
S=SigmaY./SigmaEqv;
```

```
end
```



```
end
```

```
plot(rbm,'linewidth',2,'color','b');
```



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı :GÜNGÖR, Onur
Doğum Tarihi :17.08.1976
Medeni Hali :Evli
Yabancı Dil :İngilizce (Yabancı Dil Sınavı: Seviye B)
e-mail :onur.gungor@mkek.gov.tr

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Y.Lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	2010
Lisans	Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	1998
Lise	Tekirdağ Malkara Lisesi	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-	MKEK Mühimmat Fabrikası	Ar-Ge Müdürlüğü Ar-Ge Başmühendisi
1999-2006	MKEK Mühimmat Fabrikası	Bakım Onarım Müd. Bak. Onr. Müh.