



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞIR SİLAH NAMLULARINDA OTOFRETAJ İŞLEMLERİNİN
İNCELENMESİ**

**DOĞAN BARAN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Yahya DOĞU**

KIRIKKALE-2024

Doğan BARAN tarafından hazırlanan “AĞIR SİLAH NAMLULARINDA OTOFRETAJ İŞLEMLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Yahya DOĞU
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

İkinci Danışman: Prof. Dr. Osman BİCAN
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Ömer KELEŞ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı,
Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Alemdar ONGUN
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı,
Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÇANDAR
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı,
Gaziantep Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 22/01/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....

Doğan BARAN
22/01/2024

ÖZET

AĞIR SİLAH NAMLULARINDA OTOFRETAJ İŞLEMLERİNİN İNCELENMESİ

BARAN, Doğan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Yahya DOĞU

Ocak 2024, 144 sayfa

Otofretaj, kalın cidarlı silindirlerin basınç taşıma kapasitelerini ve yorulma ömrünü artırmak için silindirin cidar kalınlığı boyunca kalıntı gerilme oluşturma işlemidir. Otofretajın uygulanmasında kullanılan çeşitli yöntemler arasında, özellikle ağır silah namlularının üretiminde tercih edilen genel iki ofofretaj yöntemi hidrolik ve mekanik ofofretaj işlemidir.

Bu tez kapsamında, ağır silah namlusunda hidrolik ve mekanik ofofretaj işlemi sonunda oluşan gerilmeler ve deformasyonlar analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Elastik-plastik geçiş yarıçapını ve optimum ofofretaj basıncını hesaplamak için analitik denklemler kullanılmıştır. Otofretajsız namluda çalışma basıncında meydana gelen gerilmeler Lamé denklemleri ile, ofofretajlı namluda ise ofofretaj uygulama aşamaları olan yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncının uygulanması için türetilmiş denklemler ile hesaplanmıştır.

Hidrolik ofofretaj işleminin incelendiği namlu için ofofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncı altında Von Mises eşdeğer gerilme değeri analitik olarak 1498,74 MPa ve sayısal olarak 1507 MPa hesaplanmıştır. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri namlu cidar kalınlığının %61'ine gelen konumda sayısal olarak 961,96 MPa hesaplanmıştır. Bu değer analitik olarak 957,75 MPa hesaplanmıştır. Otofretaj uygulanması ile çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerinin yaklaşık %36 oranında azaldığı hesaplanmıştır. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak çap, akma

mukavemeti, otofretaj basıncı ve çalışma basıncına göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Mekanik otofretaj işleminin incelendiği namlu için ise otofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncı altında Von Mises eşdeğer gerilme değeri namlu iç çapında 1350,3 MPa iken, otofretajlı namluda 368,36 MPa olmuştur. Otofretajlı namluda, eşdeğer gerilmenin maksimum değeri, namlu cidar kalınlığının %63'üne karşılık gelen bölgede 1136,2 MPa seviyesinde olmuştur. Otofretajın uygulanması ile Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri %16,88 azalmıştır. Mekanik otofretaj işleminde sayısal olarak hesaplanan mil kuvveti ile ölçülen değer arasındaki fark %4,52 olmuştur. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak farklı yüzde arakesit oranı, akma mukavemeti, sürtünme katsayısı, mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu ve mandrel konik açıları orantı faktörlerine göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hidrolik otofretaj, Mekanik Otofretaj, Kalıntı gerilme, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

INVESTIGATION of AUTOFRETTAGE PROCESSES in HEAVY GUN BARRELS

BARAN, Doğan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, PhD Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Yahya DOĞU

January 2024, 144 pages

Autofrettage process forms residual stresses to increase the pressure carrying capacity and fatigue life of thick-walled cylinders. Although there are many techniques in practice, swage and hydraulic autofrettage processes have been mostly used in heavy gun barrel production process.

Within the scope of this thesis, the stresses and deformations resulting from hydraulic and swage autofrettage of heavy gun barrels are analytically and numerically calculated. The results are compared with the studies in the literature.

Analytical equations are employed to calculate elastic-plastic junction radius and optimum autofrettage-pressure. The stress distributions are calculated with Lamé equations for the non-autofrettaged barrel under working pressure. In addition, the stress distributions during autofrettage process are calculated with certain equations specific to loading and unloading stages and working pressure application.

In hydraulic autofrettage, the maximum value of Von Mises stress is calculated analytically as 1498.74 MPa at the inner radius for a non-autofrettaged barrel under 670 MPa working pressure. While it has a maximum value of 1507 MPa at inner radius for autofrettaged barrel numerically. The location of the maximum Von Mises stress occurs at 61% barrel thickness at a value of 961.96 MPa for autofrettaged barrel under 670 MPa working pressure. It is also calculated as 957.75 MPa analytically. There is a 36% reduction of Von Mises stress for autofrettaged barrel. The investigation matrix includes a wide range of four main parameters: barrel diameter, yield strength of barrel material, autofrettage-pressure and working-pressure. The effects of these parameters on hydraulic autofrettage are given as a graph and evaluated in a comparative manner.

In swage autofrettage, the Von Mises stress under 670 MPa working pressure for non-autofrettaged barrel is calculated as 1350.3 MPa. The Von Mises equivalent stress for the autofrettaged barrel is 1136.2 MPa at 63% barrel thickness. As a result, there is 16.88% reduction of Von Mises stress for autofrettaged barrel. The investigation matrix includes five main parameters: percent interference, yield strength of barrel

material, friction coefficient, mandrel parallel section length and mandrel slope angle scaling factor. The effects of these parameters on swage autofrettage are given as a graph and evaluated in a comparative manner.

Keywords: Hydraulic autofrettage, Swage autofrettage, Residual stress, Finite element analysis



TEŞEKKÜR

Tez çalışması süresince bilgi, birikim ve tecrübesiyle yol gösteren, zaman ve mekân sınırlaması olmadan her daim desteğini esirgemeyen değerleri danışman hocam Prof. Dr. Yahya Doğu'ya teşekkür ederim.

Çalışma esnasında değerli fikir, görüş ve önerilerine başvurduğum ikinci danışman hocam Prof. Dr. Osman Bican'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam süresince her türlü sabır, destek, özverilerini esirgemeyen başta annem ve babam olmak üzere tüm aile bireylerime teşekkür ve şükranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Otofretaj İşlemi.....	2
1.2. Literatür (Hidrolik Otofretaj)	10
1.3. Literatür (Mekanik Otofretaj).....	14
1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı	17
2. HİDROLİK OTOFRETAJ	21
2.1. Elastik-Plastik Geçiş Yarıçapının Hesaplanması	22
2.2. Optimum Otofretaj Basıncının Hesabı	23
2.3. Otofretaj İşlemindeki Temel Bağlıntılar.....	24
2.4. Gerilme-Birim Şekil Değişimi İlişkisi.....	27
2.5. Gerilmelerin Analizi	28
2.6. Sınır Şartları	30
2.7. Hidrolik Otofretaj SEM Modeli	33
3. MEKANİK OTOFRETAJ	39
3.1. Mekanik Otofretaj SEM Modeli.....	41
3.2. Mekanik Otofretaj SEM Modeli Doğrulama Analizleri.....	48
4. HİDROLİK OTOFRETAJ SONUÇLARI	54
4.1. Analiz Matrisi	55
4.2. Hidrolik Otofretaj SEM Modeli Doğrulama Analizleri.....	57
4.3. Referans Analiz için Analitik ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması ...	65
4.4. Parametrik Analizler	77
4.5. Hidrolik Otofretaj Dış Çap Değişimi.....	87

5. MEKANİK OTOFRETAJ SONUÇLARI.....	90
5.1. Analiz Matrisi	91
5.2. Referans Analiz için Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi.....	92
5.3. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Mil Kuvveti.....	102
5.4. Parametrik Analizler	103
5.5. Mekanik Otofretaj İç Çap Değişimi.....	123
6. HİDROLİK OTOFRETAJ İŞLEMİ İÇİN GENEL DEĞERLENDİRMELER.....	131
7. MEKANİK OTOFRETAJ İŞLEMİ İÇİN GENEL DEĞERLENDİRMELER.....	135
KAYNAKLAR	139
ÖZGEÇMİŞ.....	143

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

Çizelge 2.1. AISI 4340 alaşım çeliğinin kimyasal kompozisyonu (ASM, 2002)	36
Çizelge 2.2. AISI 4340 çeliğin mekanik özellikleri (ASM, 2002)	36
Çizelge 3.1. SEM modelinde tanımlanan malzeme özellikleri	46
Çizelge 4.1. Hidrolik otofretaj işleminde incelenen parametreler ve bu parametrelere ait değerler	55
Çizelge 4.2. Hidrolik otofretaj analiz matrisi	56
Çizelge 4.3. Mesh bağımsızlık analizlerinde kullanılan mesh sayıları	57
Çizelge 4.4. Otofretajsız ve otofretajlı namluda çalışma basıncında analitik ve sayısal olarak hesaplanan Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin karşılaştırılması	77
Çizelge 5.1. Mekanik otofretaj işleminde incelenen parametreler ve bu parametrelere ait değerler	91
Çizelge 5.2. Mekanik otofretaj analiz matrisi	92
Çizelge 5.3. Eksenel gerilme değerlerinin karşılaştırılması	116
Çizelge 5.4. Orantı faktörlerine göre mandrel ön ve arka konik açılarının değişimi	120
Çizelge 5.5. Analitik hesaplamalarda kullanılan parametreler	125

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

Şekil 1.1. Otofretaj işlemi uygulama örnekler	2
Şekil 1.2. Otofretaj işlemi adımları	3
Şekil 1.3. Otofretaj işlemi şekil değişimi bölgeleri.....	4
Şekil 1.4. Kalın Cidarlı Silindirlerde Gerilme Dağılımı (a) Otofretajsız (b) Otofretajlı	4
Şekil 1.5. Hidrolik ofofretaj işlemi.....	6
Şekil 1.6. Mekanik ofofretaj işlemi	7
Şekil 1.7. Termal ofofretaj işlemine ait örnek düzeneç (a) ve şematik diyagram (b) (Kamal, 2015)	8
Şekil 1.8. Rotasyonel ofofretaj düzeneği örnek şeması (Zare ve Darijani, 2016).....	9
Şekil 1.9. Patlayıcı ofofretaj işlemi örnek şeması (Shufen, 2018).....	10
Şekil 2.1. Hidrolik ofofretaj işlemi uygulanan kalın cidarlı silindirin tam kesit görünüşü.....	21
Şekil 2.2. Elastik-plastik geçiş yarıçapı	22
Şekil 2.3. İç basınca maruz kalan kalın cidarlı silindirin kesit görünüşü.....	24
Şekil 2.4. Bilineer kinematik pekleşme modeline uygun gerilme-gerilim eğrisi (Çandar, 2017)	28
Şekil 2.5. Elastik-plastik geçiş yarıçapı	30
Şekil 2.6. SEM model bölgesi ve tanımlanan sınır şartları	34
Şekil 2.7. Namlu iç çapına sınır şartı olarak uygulanan zamana bağlı basınç değişimi	34
Şekil 2.8. AISI 4340 çeliği için gerilme-birim şekil değişimi eğrisi (ASM, 2002) ...	36
Şekil 2.9. Mesh (sayısal ağ) yapısı.....	37
Şekil 3.1. Mekanik ofofretaj işlemi uygulanan kalın cidarlı silindirin tam kesit görünüşü.....	39
Şekil 3.2. Mekanik ofofretajda kullanılan mandrel şeması (Gibson, 2008).....	40
Şekil 3.3. Mekanik ofofretaj yataklama şekilleri (Gibson, 2008)	41
Şekil 3.4. 2B ve 3B mekanik ofofretaj SEM modeli.....	41
Şekil 3.5. Mekanik ofofretaj SEM modeli (Gibson, 2008)	42
Şekil 3.6. Namlu ve mandrelin geometri şeması.....	43
Şekil 3.7. SEM modeli ve sınır şartları	43

Şekil 3.8. Namlu-mandrel arasındaki kontak tanımlamaların yapılması	45
Şekil 3.9. Bilineer kinematik pekleşme modeli (Gibson, 2008)	45
Şekil 3.10. Mekanik otofretaj genel mesh yapısı (Gibson, 2008; Gibson vd., 2012, 2014)	47
Şekil 3.11. Maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin farklı mesh eleman boyutlarına göre değişimi.....	47
Şekil 3.12. SEM modeli mesh yapısı	48
Şekil 3.13. 2B model teğetsel gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014).....	49
Şekil 3.14. 2B model radyal gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014)	49
Şekil 3.15. 2B model eksenel gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014).....	50
Şekil 3.16. 2B model Von Mises eşdeğer gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014)	50
Şekil 3.17. 2B ve 3B model teğetsel gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014)	51
Şekil 3.18. 2B ve 3B model radyal gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014, Hu)	52
Şekil 3.19. 2B ve 3B model eksenel gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014, Hu)	52
Şekil 3.20. 2B ve 3B model Von Mises eşdeğer gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014, Hu)	53
Şekil 4.1. Mesh bağımsızlık analizleri için mesh görüntüleri.....	57
Şekil 4.2. Yükleme aşamasında mesh sayısına göre gerilme dağılımları	58
Şekil 4.3. Basınç kaldırma aşamasında mesh sayısına göre gerilme dağılımları.....	59
Şekil 4.4. Çalışma basıncı altında mesh sayısına göre gerilme dağılımları	59
Şekil 4.5. Açısal çizgi konumları	60
Şekil 4.6. Yükleme aşamasında okuma yapılan açısal konuma göre gerilme dağılımları	60
Şekil 4.7. Basınç kaldırma aşamasında okuma yapılan açısal konuma göre gerilme dağılımları	61
Şekil 4.8. Çalışma basıncı altında okuma yapılan açısal konuma göre gerilme dağılımları	61
Şekil 4.9. Çevresel SEM modeli büyüklükleri.....	62
Şekil 4.10. Yükleme aşamasında çevresel SEM modeli büyüklüğüne göre gerilme dağılımları	62
Şekil 4.11. Basınç kaldırma aşamasında çevresel model büyüklüğüne göre gerilme dağılımları	63
Şekil 4.12. Çalışma basıncı altında çevresel model büyüklüğüne göre gerilme dağılımları	63
Şekil 4.13. 2B ve 3B SEM modelleri.....	64
Şekil 4.14. Yükleme aşamasında 2B ve 3B SEM modelinden elde edilen gerilme dağılımları	64

Şekil 4.15. Basınç kaldırma aşamasında 2B ve 3B SEM modelinden elde edilen gerilme dağılımları	65
Şekil 4.16. Çalışma basıncı altında 2B ve 3B SEM modelinden elde edilen gerilme dağılımları	65
Şekil 4.17. Analitik çalışmada otofretajsız namluda gerilme dağılımları	66
Şekil 4.18. Analitik çalışmada yükleme aşamasında gerilme dağılımları	68
Şekil 4.19. Analitik çalışmada basınç kaldırma aşamasında gerilme dağılımları	68
Şekil 4.20. Analitik çalışmada çalışma basıncı altında gerilme dağılımları	69
Şekil 4.21. Analitik çalışmada von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin karşılaştırılması	69
Şekil 4.22. Sayısal çalışmada otofretajsız namluda gerilme dağılımları	71
Şekil 4.23. Sayısal çalışmada yükleme aşamasındaki gerilme dağılımları	71
Şekil 4.24. Sayısal çalışmada basınç kaldırma aşamasındaki gerilme dağılımları	72
Şekil 4.25. Sayısal çalışmada çalışma basıncı aşamasındaki gerilme dağılımları	72
Şekil 4.26. Otofretajsız namluda gerilme dağılımlarının karşılaştırılması	73
Şekil 4.27. Yükleme aşamasındaki gerilme dağılımların karşılaştırılması	73
Şekil 4.28. Basınç kaldırma aşamasındaki gerilme dağılımların karşılaştırılması	74
Şekil 4.29. Çalışma basıncı aşamasındaki gerilme dağılımların karşılaştırılması	74
Şekil 4.30. Otofretajsız namluda çalışma basıncı altında oluşan gerilmelere ait SEM görüntüsü	76
Şekil 4.31. Yükleme aşamasının sonundaki gerilmelere ait SEM görüntüsü	76
Şekil 4.32. Basınç kaldırma aşamasının sonundaki gerilmelere ait SEM görüntüsü	76
Şekil 4.33. Otofretajlı namluda çalışma basıncı oluşan gerilmelere ait SEM görüntüsü	76
Şekil 4.34. Yükleme aşamasında çapa göre gerilmelerin dağılımı	79
Şekil 4.35. Basınç kaldırma aşamasında çapa göre gerilmelerin dağılımı	79
Şekil 4.36. Çalışma basıncı altında çapa göre gerilmelerin dağılımı	80
Şekil 4.37. Çalışma basıncı altında farklı namlu çaplarına göre maksimum Von Mises gerilme değerinin ve konumunun değişimi	80
Şekil 4.38. Yükleme aşamasında akma mukavemetine göre gerilmelerin dağılımı ..	82
Şekil 4.39. Basınç kaldırma aşamasında akma mukavemetine göre gerilmelerin dağılımı	82
Şekil 4.40. Çalışma basıncı altında akma mukavemetine göre gerilmelerin dağılımı	83
Şekil 4.41. Çalışma basıncı altında farklı akma mukavemetlerine göre maksimum Von Mises gerilme değerinin ve konumunun değişimi	83
Şekil 4.42. Optimum otofretaj basıncı-gerilme ilişkisi	85

Şekil 4.43. Çalışma basınçlarına göre optimum otofretaj basıncı-gerilme ilişkisi	86
Şekil 4.44. Hidrolik otofretaj tesisi (https://www.thiot-autofrettage.com , 2023)	87
Şekil 4.45. XRD kalıntı gerilme ölçüm cihazı (https://www.atilim.edu.tr , 2023)	88
Şekil 4.46. Dış çap ölçü probleminin (sensörlerinin) namlu taslağı üzerine yerleştirilmesi (Roy, 2023)	88
Şekil 4.47. Sayısal çalışmada elde edilen iç çap ve dış deformasyon miktarları	89
Şekil 5.1. Mekanik otofretajsız namluda gerilme dağılımları.....	93
Şekil 5.2. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan teğetsel gerilmeye ait SEM görüntüsü	95
Şekil 5.3. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan radyal gerilmeye ait SEM görüntüsü	96
Şekil 5.4 Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan eksenel gerilmeye ait SEM görüntüsü	96
Şekil 5.5. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan Von Mises eşdeğer gerilmesine ait SEM görüntüsü.....	97
Şekil 5.6. Mekanik otofretaj işleminin sonunda elde edilen gerilme dağılımları	97
Şekil 5.7. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan teğetsel gerilmeye ait SEM görüntüsü.....	99
Şekil 5.8. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan radyal gerilmeye ait SEM görüntüsü.....	99
Şekil 5.9. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan eksenel gerilmeye ait SEM görüntüsü.....	99
Şekil 5.10. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilmeye ait SEM görüntüsü	100
Şekil 5.11. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları	100
Şekil 5.12. Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 5.13. Mekanik otofretaj işlemi esnasında sayısal modelden elde edilen mil kuvveti.....	102
Şekil 5.14. Yüzde arakesit oranına göre teğetsel gerilmelerin değişimi	105
Şekil 5.15. Yüzde arakesit oranına göre radyal gerilmelerin değişimi	106
Şekil 5.16. Yüzde arakesit oranına göre eksenel gerilmelerin değişimi	106
Şekil 5.17. Yüzde arakesit oranına göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi	107
Şekil 5.18.Yüzde arakesit oranına göre mil kuvvetinin değişimi	107
Şekil 5.19. Akma mukavemetlerine göre teğetsel gerilmelerin değişimi	108
Şekil 5.20. Akma mukavemetlerine göre radyal gerilmelerin değişimi.....	109
Şekil 5.21. Akma mukavemetlerine göre eksenel gerilmelerin değişim.....	109

Şekil 5.22. Akma mukavemetlerine göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi	110
Şekil 5.23. Akma mukavemetlerine mil kuvvetinin değişimi.....	110
Şekil 5.24. Sürtünme katsayısına göre teğetsel gerilmelerin değişimi.....	112
Şekil 5.25. Sürtünme katsayısına göre radyal gerilmelerin değişimi.....	112
Şekil 5.26. Sürtünme katsayısına göre eksenel gerilmelerin değişimi.....	113
Şekil 5.27. Sürtünme katsayısına göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi ..	113
Şekil 5.28. Sürtünme katsayısına göre mil kuvvetinin değişimi.....	114
Şekil 5.29. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre teğetsel gerilmelerin değişimi ...	117
Şekil 5.30. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre radyal gerilmelerin değişimi	117
Şekil 5.31. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre eksenel gerilmelerin değişimi ...	118
Şekil 5.32. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi	118
Şekil 5.33. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre mil kuvvetinin değişimi	119
Şekil 5.34. Orantı faktörüne göre teğetsel gerilmelerin değişimi	121
Şekil 5.35. Orantı faktörüne göre radyal gerilmelerin değişimi.....	122
Şekil 5.36. Orantı faktörüne göre eksenel gerilmelerin değişimi.....	122
Şekil 5.37. Orantı faktörüne göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi.....	123
Şekil 5.38. Orantı faktörüne göre mil kuvvetinin değişimi.....	123

SİMGELER DİZİNİ

a:	İç yarıçap
$a^{\text{genişleme}}$:	Mekanik otofretaj işleminden sonra iç çapta oluşan genişleme değeri
A:	σ_y , ε_y ve T'ye bağlı sabit
b:	Elastik-plastik geçiş yarıçapı
c:	Dış yarıçap
$c^{\text{genişleme}}$:	Mekanik otofretaj işleminden sonra dış çapta oluşan genişleme değeri
C:	Mekanik otofretaj oranı
d_a :	Mekanik otofretaj taslağı iç çapı
d_b :	Mandrel arka konik bölge çapı
d_c :	Mekanik otofretaj taslağı dış çapı
d_r :	Mandrel ön konik bölge çapı
E:	Elastisite modülü
El_{AX-II} :	Mandrel üzerindeki düz bölgenin kaç parçaya bölüneceğini gösteren indis
F_z :	Eksenel kuvvet
G:	Kayma modülü
I:	Arakesit miktarı
k:	Dış çap/iç çap oranı
l_{db} :	Mandrel üzerindeki düz bölge
P_a :	Otofretaj basıncı
P_{opt} :	Optimum otofretaj basıncı
P_{ϕ} :	Çalışma basıncı
P_{rf} :	Mandrel arka konik bölgesindeki temas basıncı
P_{ff} :	Mandrel ön konik bölgesindeki temas basıncı
P_{y1} :	Plastik deformasyon sonucu oluşan akmanın iç yüzeyde başladığı basınç
P_{y2} :	Plastik deformasyonun namlu cidar kalınlığı boyunca yayıldığı basınç
r_m :	Mandrel yarıçapı
r_a :	Mekanik otofretaj taslağı iç yarıçapı
r_c :	Mekanik otofretaj taslağı dış yarıçapı
t:	Namlu cidar kalınlığı
T:	Tanjant modülü

ϵ_a :	Mekanik otofretaj işleminden sonra iç çapta oluşan birim şekil değişimi
ϵ_c :	Mekanik otofretaj işleminden sonra dış çapta oluşan birim şekil değişimi
$\epsilon_{eş}$:	Eşdeğer birim şekil değişimi
ϵ_r :	Radyal birim şekil değişimi
ϵ_θ :	Teğetsel birim şekil değişimi
ϵ_z :	Eksenel birim şekil değişimi
ϵ_y :	Akma noktasında-oluşan birim şekil değişimi
ϵ_r^p :	Plastik deformasyon sonucu oluşan radyal gerilme
ϵ_θ^p :	Plastik deformasyon sonucu oluşan teğetsel gerilme
ϵ_z^p :	Plastik deformasyon sonucu oluşan eksenel gerilme
μ :	Sürtünme kuvveti
σ_y :	Akma mukavemeti
σ_ϕ :	Çekme mukavemeti
$\sigma_{eş}$:	Eşdeğer gerilme
σ_r :	Radyal gerilme
σ_θ :	Teğetsel gerilme
σ_z :	Eksenel gerilme
σ^T :	Toplam gerilme
σ^S :	Çalışma basıncı altında oluşan gerilme
ν :	Poisson oranı
ν_m :	Mandrel poisson oranı
θ_{ab} :	Mandrel arka konik açısı
θ_{af} :	Mandrel ön konik açısı
τ_{rz} :	Sürtünme kuvvetinden kaynaklı kayma gerilmesi

KISALTMALAR DİZİNİ

2B:	İki boyut
3B:	Bir boyut
ASM:	American Society of Metals
ASME:	The American Society of Mechanical Engineers
BEF:	Bauschinger etki faktörü
C:	Karbon
Cr:	Krom
Co:	Kobalt
ÇB:	Çalışma basıncı
Fe:	Demir
F-F:	Flexible-Flexible Kontak
HB:	Brinell Sertliği
LVDT:	Doğrusal değişkenli diferansiyel dönüştürücü
Mn:	Mangan
Mo:	Molibden
Ni:	Nikel
OF:	Orantı faktörü
SEM:	Sonlu elemanlar metodu
Ti:	Titanyum
UPF:	Kullanıcı tarafından programlanabilir fonksiyon
W:	Tungsten
WC:	Tungsten karbür
YAO:	Yüzde arakesit oranı

1. GİRİŞ

Otofretaj işlemi; genel anlamda 15000 psi (>1000 bar) basıncın ve 5 Hz frekansın üzerinde darbeli ve değişken yükler altında çalışan silindirik parçalara yük taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü artırmak için uygulanan bir üretim işlemidir (www.machinedesign.com, 2023). Otofretaj işleminin yapıldığı genel uygulama örnekleri aşağıda listelenmiştir ve Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

- 1) Ağır silah namluları (Gibson vd. (2012, 2014), Hu vd., (2014, 2019)),
- 2) Dizel motor common-rail yakıt enjeksiyon sistemlerinin yakıt püskürtme nozulları (Jain vd., 2016),
- 3) Su jetlerinin yüksek basınca maruz kalan silindir, çek valf ve kesme valfleri (Trieb vd., 2005; Çandar & Filiz, 2017),
- 4) Petrokimya endüstrisinde kullanılan depolama tankları (Partovi, 2012; Kamal & Dixit, 2015),
- 5) Nükleer santrallerdeki yakıt kazanları (Majzoobi & Ghomi, 2006b; Malik vd., 2007),
- 6) Gıda teknolojisindeki besin işlemi tekniği (Alegre vd., 2006).

Bu uygulama örnekleri arasında savuma sanayi uygulaması olarak silah namluları dikkat çekmekle birlikte diğer uygulamalar da önemli uygulamalardır.

Bu tez çalışmasının kapsamı olan savunma sanayi özelinde ağır silah namlusu üretimi için ofofretaj işlemi çok önemli bir işlem adımıdır. Ağır silah namlularının çalışma şartlarında tipik olarak barutun yanması ile oluşan namlu iç yüzey sıcaklığı 1100°C seviyesine kadar çıkarken maksimum barut gazı basıncı ise 4000 bar seviyelerine ulaşmaktadır (Lawton, 2001; Putti vd., 2016). Bu yüksek sıcaklık ve basınç altında, tekrarlı atışlarda çalışan ağır silah namluları için ofofretaj işlemi önemli bir yer teşkil etmektedir.



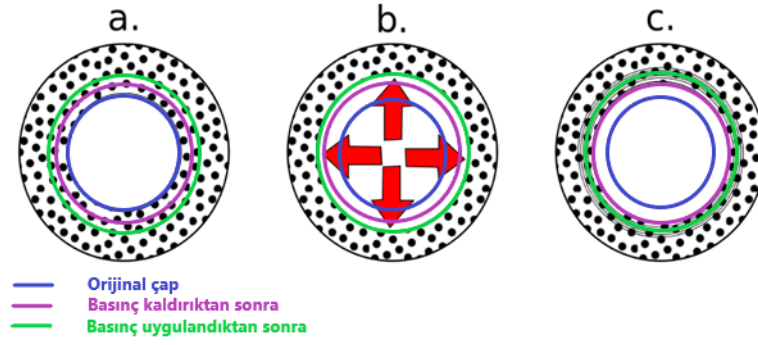
Şekil 1.1. Otofretaj işlemi uygulama örnekler

1.1.Otofretaj İşlemi

Otofretaj işlemi, dinamik ve değişken yükler altında çalışan kalın cidarlı silindirlerde, silindir yük taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü artırmak için silindir cidar kalınlığı boyunca kalıntı gerilme oluşturma işlemi olarak tanımlanabilir.

Otofretaj işleminde silindire radyal yönde geçici olarak elastik sınırın üzerinde bir gerilme uygulanarak, silindir et kalınlığında iç yarıçapa doğru yönelen bir kalıntı gerilme oluşturulur. Otofretaj işlemi ulaşım için kullanılan yollardaki köprülerin ön gerilme uygulanarak dayanımının artırılması olayıyla benzerdir. Otofretaj işlemine benzer diğer bir teknik ise yüzeye metalik ve seramik bilye püskürtülmesi ile kalıntı gerilme oluşumu gösterilebilir.

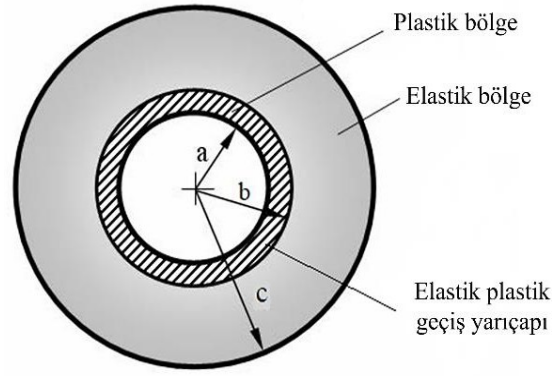
Otofretaj işlemi adımları Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Otofretaj işleminde, kalın cidarlı silindir (a), elastik dayanım limitinin üzerinde bir iç basınca maruz bırakılmakta (b) ve işlemin sonunda bası (-) yönünde kalıntı gerilme oluşmuş bir bölge (c) meydana gelmektedir.



Şekil 1.2. Otofretaj işlemi adımları

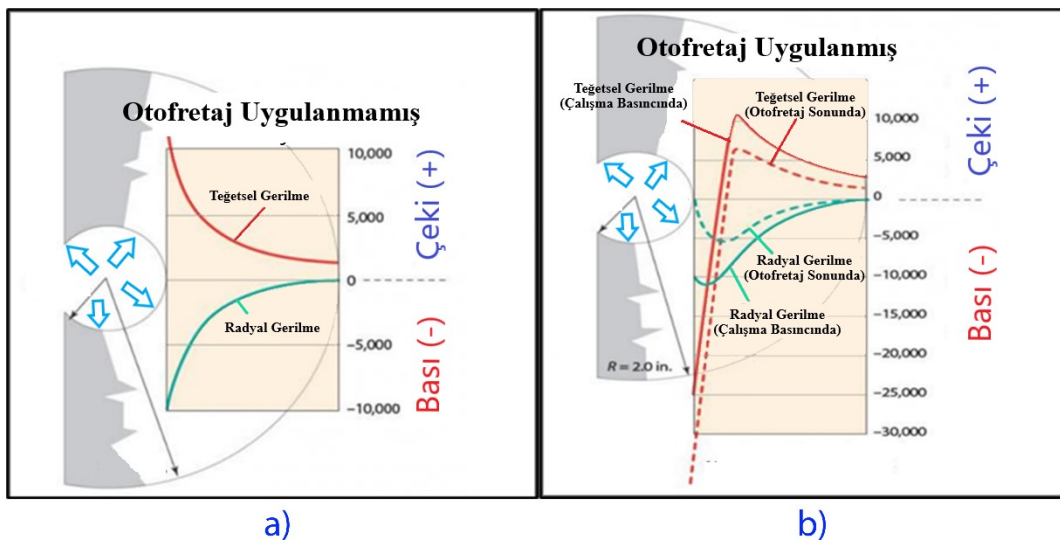
Otofretaj işlemi, kalın cidarlı silindirlerin iç çapında bası (-) yönünde kalıntı gerilme oluşturarak silindirin basınç taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü artıran bir işlemdir. Otofretaj işleminde, kalın cidarlı silindirin iç yüzeyi, çalışma basıncının üzerinde ve silindir cidarını plastik deformasyona uğratmaya yetecek kadar yüksek bir iç basınca maruz bırakılır. Basıncın uygulanması ile silindir cidarında elastik-plastik bir geçiş bölgesi oluşur (Şekil 1.3). Uygulanan basınç kaldırıldığında silindir iç tarafı elastik-plastik geçiş yarıçapına (b yarıçapı) kadar plastik deformasyona uğrar. Silindirin dış çapında oluşan elastik toparlanma yani elastik geri dönüş ise silindir cidarını içe doğru baskı altına alır. Dolayısıyla, iç yüzeye yakın bölgelerde bası (-) yönünde kalıntı gerilme oluşurken, dış yüzeyde ise çeki (+) yönünde kalıntı gerilme oluşur. Oluşan bası (-) yönündeki kalıntı gerilme, çalışma basıncı altında oluşan teğetsel gerilmeleri sönmüleyerek gerilmelerin seviyesini azaltır. Böylece, ofofretaj işlemi silindirin basınç taşıma kapasitesini artırırken silindirin yorulma ömrünün de artmasını sağlar. Otofretaj işlemi tipik olarak büyük cidar kalınlığına sahip dinamik yüklere maruz kalan, bunun sonucunda yorulmaya uğrayabilecek silindirlere uygulanır. Silindirlerde ofofretaj işleminin uygulanmasının en önemli sebebi yorulma ömrünü artırmaktır (Majzoobi ve Ghomi, 2006; Barzanjy, 2011).

Böylece, ofofretaj işlemi yüksek basınç altında çalışılan uygulamalarda, dayanım, çalışma ömrü ve güvenlikten feragat edilmeksizin, silindirlerin cidar kalınlığının azaltılmasına da imkân sağlar.



Şekil 1.3. Otofretaj işlemi şekil değişimi bölgeleri

Otofretajsız ve otofretajlı kalın cidarlı bir silindirde oluşan gerilme dağılımları genel olarak Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Otofretaj işlemi uygulanmamış namluda teğetsel gerilmene namlu iç çapında maksimum değerdedir (Şekil 1.4a). Otofretajlı namluda ise meydana gelen kalıntı gerilme sayesinde, silindir iç çapında bası (-) yönünde teğetsel gerilmenin olduğu görülmektedir. Silindire çalışma basıncı uygulandığında ise çatlak başlangıcını ve ilerlemesini tetikleyen σ_t teğetsel gerilmesi cidar kalınlığına dağıtılmıştır (Şekil 1.4b). Böylece iç çapta daha güvenli bir çalışma bölgesi oluşmaktadır. σ_t teğetsel gerilmesi, çeki (+) gerilmesi yerine bası (-) gerilmesine dönüşmüş, bunun sonucunda silindir malzemesi çatlak oluşumu ve yorulma açısından daha emniyetli bir hale gelmiştir. Otofretaj uygulanmadığı durumda, silindirin yapısal bütünlüğüne çok az etki eden dış çap, otofretaj işlemi sonucunda silindirin oluşan gerilmelere daha fazla dayanmasına katkıda bulunur.



Şekil 1.4. Kalın Cidarlı Silindirlerde Gerilme Dağılımı (a) Otofretajsız (b) Otofretajlı

Otofretaj Yöntemleri

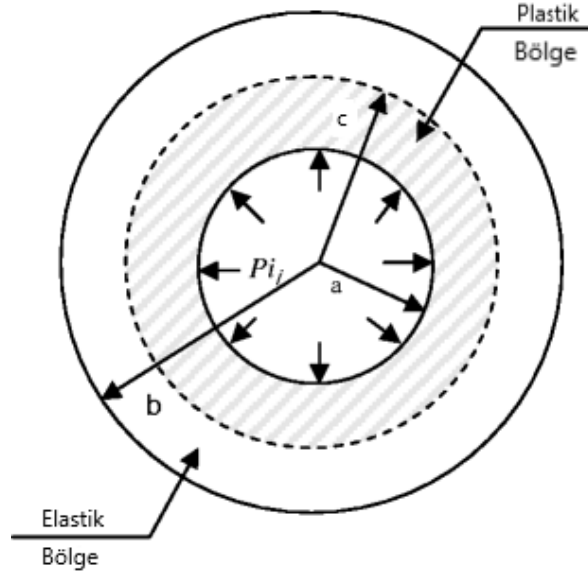
Otofretaj işleminin uygulanması için geliştirilen yöntemler genel olarak aşağıda listelenmiştir.

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1) Mekanik ofofretaj işlemi | Swage autofrettage |
| 2) Hidrolik ofofretaj işlemi | Hydraulic autofrettage |
| 3) Termal ofofretaj işlemi | Thermal autofrettage |
| 4) Rotasyonel ofofretaj işlemi | Rotational autofrettage |
| 5) Patlayıcı ofofretaj işlemi | Explosive autofrettage |

Bu tez kapsamında, bir ağır silah namlusunun hidrolik ve mekanik ofofretaj işlemi sonunda oluşan gerilme ve kalıcı deformasyon miktarları analitik, sayısal ve deneysel olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, bu ofofretaj yöntemleri aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

1) Hidrolik Otofretaj:

Hidrolik ofofretaj işleminde silindir iç yüzeyi silindir malzemesinin elastik dayanım sınırının üzerinde kontrollü bir iç basınca maruz bırakılır (Şekil 1.5). Bunun sonucunda silindir cidar kalınlığı içinde elastik-plastik bir bölge oluşur. İç yarıçap bölgeleri dış bölgelere nazaran daha fazla deformasyona uğrar. Uygulanan kontrollü iç basınç kaldırıldıktan sonra silindir ilk ölçülerine dönmeye çalışır. Fakat, homojen olmayan plastik deformasyondan kaynaklı olarak elastik-plastik bölge sınırında kalıntı gerilme oluşur. Silindirin dinamik darbeleri yüke maruz kaldığı esnada teğetsel yönde oluşan yükler, oluşan bu kalıntı gerilmenin neticesinde oldukça azalır.



Şekil 1.5. Hidrolik otofretaj işlemi

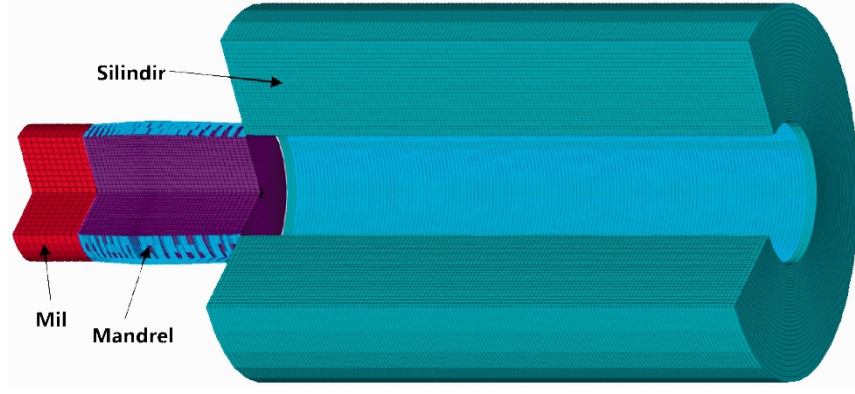
Hidrolik otofretaj işleminin bazı avantajları şunlardır:

- Silindir cidar kalınlığına göre farklı bölgelerde farklı otofretaj gerilmelerinin elde edilebilmesi (çift kademeli otofretaj)
- Değişken/Kademeli silindir iç çap profillerine göre otofretaj yapabilme kabiliyeti

Hidrolik otofretaj işleminin en önemli dezavantajı ise otofretaj için oldukça yüksek basınçlara ihtiyaç duyulması ve bu sebeple de sistem üzerinde kullanılan conta grupları ve diğer yüksek basınç elemanlarının zarar görme ihtimalidir.

2) Mekanik Otofretaj:

Mekanik otofretaj işleminde silindirin plastik deformasyonu, silindir eksenine boyunca boyda boyda geçirilen iç çaptan daha büyük bir geometriye sahip, özel olarak imal edilmiş bir mandrel yardımıyla sağlanır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Mekanik otofretaj işlemi

Mandrelin silindir içinde hareketini sağlayabilmek için silindir ile mandrel arasında oluşan sürtünme kuvvetini yenebilecek bir kuvvete ihtiyaç vardır. Mandrel silindir içinde hareket ederken sürtünme katsayısını ve oluşan direnç kuvvetini azaltmak için özel yağlar kullanılır. Ayrıca, silindir iç yüzeyine fosfat kaplama (çinko/mangan) ve bu kaplamanın üzerine stearate bazlı yağlar (O'hara, 1992) tatbik edilmesi uygulamada en fazla tercih edilen yöntemdir.

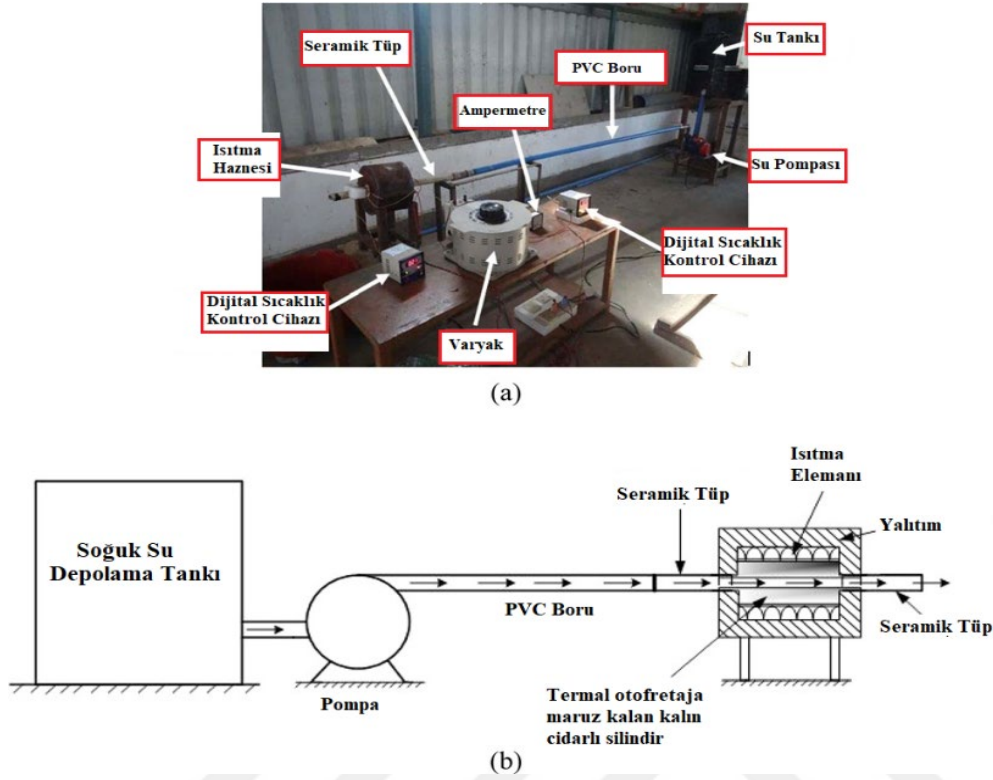
Mekanik otofretaj işleminin en önemli özelliği, hazırlık ve uygulama aşamalarının kolay ve hızlı olmasıdır. En önemli dezavantajı ise, işlem uygulanmadan önce imalat toleranslarının oldukça dar olmasıdır. Ayrıca, değişken iç çapa sahip silindirlere bu işlemin uygulanması mümkün değildir.

3) Termal Otofretaj:

Termal otofretaj işlemi ile kalın cidarlı silindirlere kalıntı gerilme oluşturma fikri 19. yüzyıldaki askeri uygulamalara dayanmaktadır. Birleşik Devletler Ordusu Topçu Departmanı personeli General Thomas Rodman, bu yöntemi 1850'lerde döküm yöntemiyle üretilen namlular üzerinde, namlu dış çapını ısıtıp iç çapını ise soğutmak suretiyle uygulamıştır (Bastable, 1992). Bu yöntemde, kalın cidarlı silindir veya küresel tanklar, yükleme aşamasında (loading) cidar kalınlığı boyunca sıcaklık gradyanına maruz bırakılmaktadır. Boşaltma (unloading) aşamasında, kalın cidarlı silindir oda sıcaklığına soğutulmaktadır; böylece silindir cidar kalınlığı boyunca kalıntı gerilme oluşturulmaktadır (Shufen ve Dixit, 2018).

Termal otofretaj işlemine ait düzenek ve şematik diyagram Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Şekil 1.7 incelendiğinde, silindirin dış çapı bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmaktadır. İç çap ise bir soğuk su sirkülasyon sistemi ile sürekli olarak soğutulmaktadır. Böylece silindir

cidar kalınlığı boyunca kalıntı gerilme oluşumuna neden olan sıcaklık gradyanları; dolayısıyla plastik bir deformasyon oluşmaktadır.



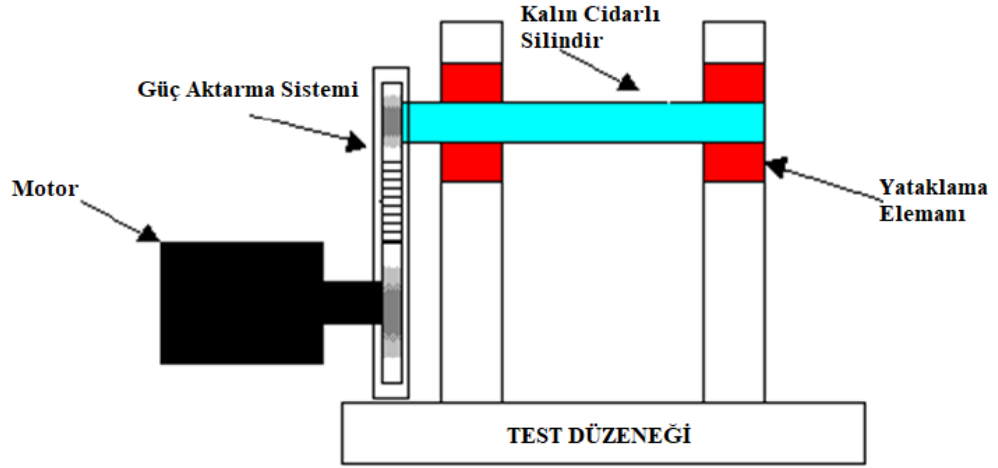
Şekil 1.7. Termal otofretaj işlemine ait örnek düzenek (a) ve şematik diyagram (b) (Kamal, 2015)

4) Rotasyonel Otofretaj:

Rotasyonel (rotational) otofretaj yakın zamanda Zare ve Darijani (Zare ve Darijani, 2016) tarafından geliştirilmiş bir otofretaj işlemidir. Bu otofretaj işleminde, yükleme ve boşaltma işlemleri, kalın cidarlı silindirin bağlı olduğu düzenekte açısal hızı sıfırdan belli bir değere çıkarmakla ve yavaş bir şekilde tekrardan sıfıra indirme ile sağlanmaktadır.

Kalın cidarlı silindir yeterli seviyede açısal hıza ulaştığında, silindirin iç çapı cidar kalınlığı boyunca belli bir mesafeye kadar plastik deformasyona uğrar. Böylece silindir cidar kalınlığında elastik-plastik bir geçiş bölgesi meydana gelir (Kamal, 2018).

İşlem esnasında silindirin dönüş hareketi bir motor vasıtasıyla sağlanmaktadır ve işlem bir güç aktarma sistemi ile sürekli olarak kontrol altında tutulmaktadır (Şekil 1.8).



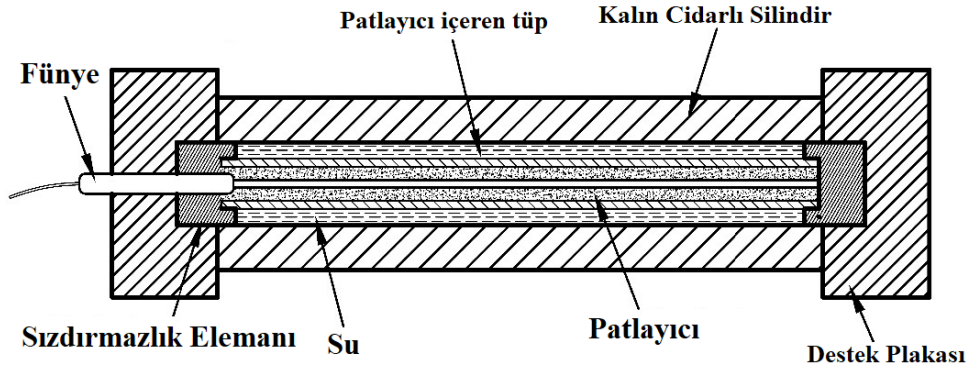
Şekil 1.8. Rotasyonel otofretaj düzeneği örnek şeması (Zare ve Darijani, 2016)

5) Patlayıcı Otofretaj:

Patlayıcı kullanarak (explosive) gerçekleştirilen otofretaj işleminde ise kalın cidarlı silindirin cidar kalınlığı boyunca kalıntı gerilme oluşumu, düşük parçalanma hızına sahip patlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilir.

Bu otofretaj işleminde kullanılan düzeneğin şematik olarak Şekil 1.9’da gösterilmiştir. Belirli bir miktarda barut hakkı içeren ve bir piston ile sızdırmazlığı sağlanmış sünek bir tüp, otofretaj işlemi yapılan kalın cidarlı silindirin içine, basıncın silindir içine iletilmesini sağlayan bir akışkan ile beraber yerleştirilmektedir. Daha sonra düşük parçalanma hızına sahip patlayıcı madde, bir elektrik tahrikli bir fünye ile patlatılmaktadır. Patlama neticesinde genişleyen barut gazları, sistem içinde bulunan akışkanı basınçlandırmakta ve hidrolik otofretaj işlemine benzer şekilde kalın cidarlı silindirin cidar kalınlığı boyunca kalıntı gerilme oluşturulmaktadır (Ezra, 1973; Çandar, 2018).

Bu otofretaj yöntemi, işlem esnasında kullanılan patlayıcı maddeden ve genellikle savunma sanayi uygulamalarında kullanılmasından dolayı araştırmacılar tarafından deneysel olarak detaylı bir şekilde incelenememiştir (Shufen, 2018).



Şekil 1.9. Patlayıcı otofretaj işlemi örnek şeması (Shufen, 2018)

1.2.Literatür (Hidrolik Otofretaj)

Yukarıda belirtilen otofretaj yöntemlerinden yaygın kullanılanları hidrolik ve mekanik otofretaj yöntemleridir ki bu tezin kapsamı da bu iki yöneme yöneliktir. Tez kapsamında ağır silah namlusunun hidrolik ve mekanik otofretaj işlemi incelenmiştir. Bu sebeple, literatürde yapılan çalışmalar tez kapsamına yönelik olarak aşağıda sırasıyla hidrolik ve mekanik otofretaj işlemleri için verilmiştir.

Huang (Huang, 2005) gerçek çekme-basma testi grafiklerini referans alarak gerinim pekleşmesi ve Bauschinger etkisini içeren bir otofretaj modeli ortaya koymuştur. Çalışmada, Bauschinger etkisi katsayısı ne kadar küçük olursa, bası (-) yönündeki akmanın o denli kolay meydana geleceği ve bu durumun kalıntı gerilme dağılımını doğrudan etkileyeceği sonucuna varılmıştır.

Ayob ve arkadaşları (Ayob vd., 2009) kalın cidarlı bir silindirde otofretaj işlemini sayısal olarak ABAQUS paket programı ile incelemiştir. Sayısal çalışmanın sonunda, 3 farklı sonuç elde edilmiştir. Birincisi, pratikte kalın cidarlı silindirin cidar kalınlığı boyunca tamamen akmaya uğradığı durumda, maksimum yük taşıma kapasitesi elde etmek için, silindire otofretaj işleminin uygulanmamasının uygun olacağı görülmüştür. İkinci olarak, akmanın sadece silindirin iç yüzeyinde gerçekleştiği durumda, tam otofretaj (full autofrettage) işleminin uygulamasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Son olarak silindir üzerinde çalışma basıncı altında minimum eşdeğer gerilme değeri edinilmek istenmesi durumunda ise optimum otofretaj işleminin yapılmasının uygun olacağı belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar analitik çalışmalarla karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Lee ve arkadaşları (Lee vd., 2009) otofretajlı bileşik silindirler için elastik-mükemmel plastik malzeme modeli ile gerinim pekleşmesi modelini karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmada, Bauschinger etkisi nedeniyle gerinim pekleşmesi modelinden elde edilen bası (-) yönündeki kalıntı gerilme değerinin, elastik-mükemmel plastik malzeme modeline göre daha küçük bir seviyede olduğu görülmüştür.

Shim ve arkadaşları (Shim vd., 2010) yapmış oldukları çalışmada, ASME kodu tarafından kabul edilen KENDALL Modelini kullanarak SNMC 8 türü yüksek mukavemetli bir çelikte otofretaj işlemi sonunda elde edilen kalıntı gerilmeleri hesaplamaya çalışmışlardır. Bu kapsamda, Bauschinger etki faktörünün (BEF) elde edilen sonuçlara etkisini incelemek için SNMC 8 çeliği üzerinde çekme ve tek yönlü Bauschinger etkisi testi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu veriler kalıntı gerilmelerin hesaplanmasında kullanılmıştır. KENDALL modeli yardımıyla Bauschinger etkisi göz önünde bulundurularak hesaplanan kalıntı gerilme değerleri, analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, iç çapta Bauschinger etkisi göz önünde bulundurularak hesaplanan kalıntı gerilme değerlerinin, standart hesaplamalardan daha düşük bir değerde olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçların basınçlı kapların tasarım aşamalarında kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Babu ve Balaji (Babu ve Balaji, 2013) yaptıkları çalışmada otofretajsız ve otofretajlı bir silindirde oluşan gerilmelerdeki değişimi sayısal olarak hesaplamıştır. Çalışmanın neticesinde, 200 MPa otofretaj basıncı uygulanmış ve 180 MPa çalışma basıncı altında çalışan bir silindirin maksimum eşdeğer gerilme seviyesinde %15,7 oranında azalma tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada, otofretaj işleminin verimli bir şekilde yapılabilmesi için gereken minimum ve maksimum otofretaj basıncı hesaplanmıştır. Farklı otofretaj basınçlarında oluşan maksimum eşdeğer gerilmenin silindir cidar kalınlığı üzerindeki konumu da tespit edilmiştir.

Rupali ve Mondal (Rupali ve Mondal, 2015) farklı otofretaj basınçlarına tabi tutulan küresel basınç tankında oluşan kalıntı gerilme dağılımını Von Mises akma kriterini baz alarak hesaplamıştır. Çalışmada bilineer malzeme modeli kullanılmış ve gerinim pekleşmesi durumu göz önünde bulundurulmuştur. Çok kademeli otofretaj işleminin daha faydalı kalıntı gerilme dağılımına neden olup olmadığı ve bu durumun yorulma ömrü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca Bauschinger etkisinin ve akma kriterinin kalıntı gerilmelerin hesaplanmasındaki etkisi sonlu elemanlar modeli vasıtasıyla incelemiştir.

Jabur ve arkadaşları (Jabur vd., 2016) yapmış oldukları çalışmada, otofretaj işleminin radyal, teğetsel ve toplam gerilmeler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Gerilme dağılımını incelemek için ABAQUS paket programından yararlanılmış ve otofretaj radyusu (elastik-plastik geçiş yarıçapı) hesaplanmıştır. Sonuçlarda, otofretaj işlemi sonucunda teğetsel ve maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin azaldığı; bu gerilmelerin silindir iç yüzeyinden malzeme cidar kalınlığı boyunca belirli bir konuma yönlendirildiği görülmüştür. Maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerindeki azalmanın otofretaj basıncına bağlı olduğu ve peş peşe yapılan otofretaj işleminin maksimum Von Mises eşdeğer gerilmesi ve otofretaj elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

Jain ve arkadaşları (Jain vd., 2016) hidrolik otofretaj işlemi sonunda deneysel olarak hesaplanan kalıntı teğetsel gerilmeleri, analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmıştır. Çalışmada alüminyum (6082T6) malzemeden üretilmiş common rail bir enjektöre hidrolik otofretaj uygulanmıştır. Analitik ve sayısal olarak optimum otofretaj basıncı hesaplanmıştır. Otofretaj uygulanmış enjektörde, deneysel olarak çalışma basıncı altında hesaplanan kalıntı teğetsel gerilme değerlerinin, analitik ve sayısal sonuçlardan farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Çandar ve Filiz (Çandar ve Filiz, 2017) bir su jeti basınç yükseltme pompasında kullanılan yüksek basınç silindirinin hidrolik otofretaj işlemini incelemiştir. Çalışma basıncında Von Mises eşdeğer gerilme değerinin minimum seviyesine karşılık gelen optimum otofretaj basıncı ve bu basınca karşılık gelen elastik-plastik yarıçap değeri hesaplanmıştır. Elastik-plastik yarıçap optimize edilerek optimum otofretaj basıncı belirlenmiştir. ANSYS paket programı yardımıyla gerilme analizleri gerçekleştirilmiş, analitik ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Huang ve Tang (Huang ve Tang, 2019) yaptıkları çalışmada gerinim pekleşmesi ve Bauschinger etkisini de içeren bilineer kinematik pekleşme modeli temelinde bir otofretaj modeli oluşturmuştur. Çalışmada teorik hesaplamalar ile sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, optimum otofretaj basıncını hesaplamak için karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında %3,1'lik bir fark olduğu görülmüş ve teorik hesaplamalarla analiz sonuçlarının uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca gerilme-ömür metodu ile, yüksek basınç silindirleri için yorulma ömrü tahmini olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, otofretaj işleminin yüksek basınç silindirlerinde yorulma ömrünü 15 kat artırdığı tespit edilmiştir.

Replinger ve ark. (Replinger vd., 2020) hidrojen yakıt hücresinde kullanılan bir alüminyum valf gövdesi için optimum otofretaj basıncını hesaplamak ve kritik çatlak alanını belirlemek için sayısal çalışmalar yapmıştır. Sayısal çalışma ANSYS paket programı ile gerçekleştirilmiş ve tanımlanan sınır şartları ve malzeme özellikleri temelinde optimum otofretaj basıncı hesaplanmıştır. Alüminyum valf gövdesinin yorulma ömrünü hesaplamak ve çatlak başlangıcı ile büyümesini incelemek için FKM kılavuzu kullanılmıştır. Ayrıca FKM kılavuzunun doğrulanması için hidrolik yorulma testleri yapılmıştır. Sayısal analizlerin ve yorulma testlerinin, çatlak limitinin belirlenmesi açısından uyum içinde olduğu görülmüştür. 2500 bar optimum otofretaj basıncı için, valf gövdesinde çatlakların başlamasının kaçınılmaz olduğu; ancak belirli bir seviyede sınırlandığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, alüminyum valf gövdesinde 150.000 devirlik tasarım gereksinimi, yorulmadan kaynaklı kırılma olayı gerçekleşmeden karşılanmıştır.

Li ve ark. (Li vd., 2020) ultra yüksek basınçlı kaplarda (UHP) patlama basıncını hesaplayabilmek için yeni bir formülasyon geliştirmiştir. Formülasyonu doğrulamak için deneysel veriler kullanılmıştır. Patlama basıncı, %5'ten daha az bir hata payı ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların geleneksel Faupel formülleri ile %15 hata payı ile hesaplanan sonuçlara göre oldukça düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmada, UHP kapları için gerilme dağılımı ve optimum otofretaj basıncı analitik olarak hesaplanmıştır. Son olarak gerilme ömrü yöntemine dayalı olarak UHP kabının yorulma ömrü, Shigley yaklaşım yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Hu ve Parker [15], kaya gazı (şeyl) çıkarma prosesinde kullanılan hidrolik çatlatma pompaları valf bloklarının iç yüzeyinde meydana gelen gerilme-birim şekil değişimi ilişkisini sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar metodu (SEM), gerçek malzeme özelliklerini ve Bauschinger etkisini içermektedir. Bu model, ANSYS paket programında halihazırda kullanılan Bilineer Kinematik Pekleşme Malzeme Modeli (BKIN) ile karşılaştırılmıştır. Yükleme ve basınç kaldırma aşamalarındaki gerilme dağılımı 500 MPa otofretaj basıncı için hesaplanmıştır. Yükleme aşamasında kalıntı gerilme ve birim şekil değişiminin BKIN ve geliştirilen model için hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Basınç kaldırma aşamasında ise gerilme seviyeleri, BKIN ve geliştirilen model arasında büyük farklılık göstermiştir. BKIN malzeme modeli ile elde edilen kalıntı gerilme dağılımının daha üniform olduğu ve kalıntı gerilme seviyesinin geliştirilen modelden daha fazla olduğu görülmüştür.

Görüldüğü gibi hidrolik otofretaj ile ilgili çalışmalar daha çok analitik ve sayısal çalışmalardır ve deneysel çalışmaların sayısı sınırlıdır.

1.3.Literatür (Mekanik Otofretaj)

Benzer şekilde, mekanik otofretaj işlemi konusunda yapılan çalışmalardan tez kapsamına uygun olanlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Iremonger ve Kalsi (Iremonger ve Kalsi, 2003) yapmış oldukları çalışmada özel bir malzemeden üretilmiş mandrelin namlu içinden boydan boya geçirilmesi ile gerçekleştirilen mekanik otofretaj işlemini incelemiştir. Analizler geometrik ölçüleri birbirinden farklı iki mandrelin peş peşe (çift paso) namlu içinden boydan boya geçirilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak çalışmada, tek paso ve çift paso olarak gerçekleştirilen mekanik otofretaj işlemlerinde meydana gelen mil kuvveti, kalıcı deformasyon miktarları ve gerilme dağılımları incelenmiştir. Son olarak tek paso olarak gerçekleştirilen mekanik otofretaj işleminde mandrel geometrisinde yapılan modifikasyonun elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Perry ve Perl (Perry ve Perl, 2006) mekanik otofretaj işleminin sonunda oluşan kalıntı gerilmeleri sayısal olarak hesaplayabilmek için 3-B'lu eksenel-simetrik özgün bir model oluşturmuştur. Sayısal hesaplamalarda kullanılan eksenel-simetrik denge denklemleri, Gauss-Seidel sonlu farklar iterasyon yöntemi yardımıyla çözülmüştür. Geliştirilen yeni bir bilgisayar kodu ile gerilme, birim şekil değişimi, yer değiştirme ve mil kuvveti değerleri hesaplanmıştır. Sayısal çalışma, deneysel çalışma ile desteklenmiştir. Sayısal çalışmada hesaplanan kalıcı deformasyon miktarı ve mil kuvvetinin deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Bihamta ve arkadaşları (Bihamta vd., 2007) mekanik otofretaj işlemi üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sayısal çalışma kapsamında 2-B'lu ve 3-B'lu modeller oluşturularak hem iş parçası hem de mandrel geometrisinde yapılan modifikasyonun oluşan mil kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca farklı yağlayıcılar kullanılarak sürtünme kuvvetinin mil kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son olarak sayısal çalışmalar deneysel çalışma ile karşılaştırılarak model doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Alinezhad ve Bihamta (Alinezhad ve Bihamta, 2012) ABAQUS paket programı kullanarak mandrel geometrisinde yapılan modifikasyonların, mekanik otofretaj

işlemi sonunda oluşan kalıntı gerilme değerlerini ne şekilde etkilediğini incelemiştir. Sayısal çalışmaları doğrulamak için deneysel çalışmalar yürütülmüş, sayısal ve deneysel sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Gibson ve arkadaşları (Gibson vd., 2012) ilk olarak diğer araştırmacılar tarafından mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak incelenmesi için ANSYS paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiş analizleri tekrarlamıştır. Böylece kendilerine özgü oluşturdukları modelin doğrulama çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, mandrel konik açıları ve mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğunun farklı değerlerinin mil kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Benzer şekilde farklı sürtünme kuvvetine göre mil kuvvetinde oluşan değişim incelenmiştir. Benzer çalışmalar çift pasolu mekanik otofretaj işlemi için de tekrarlanmıştır. Sayısal çalışmada, referans çalışmayla bir miktar farklılık oluşmuş ve bunun nedeni ise referans çalışmada kullanılan kaba mesh yapısı olduğu belirlenmiştir.

Gibson ve arkadaşları (Gibson vd., 2014) mekanik otofretaj işleminde oluşan deformasyon mekanizmasını ve kalıntı gerilme profilini incelemek için ANSYS paket programı kullanarak analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, mandrel konik açısına, mandrel üzerindeki düz bölgenin uzunluğuna ve sürtünme katsayısının değişimine göre parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada, eksenel gerilmelerin kalıntı teğetsel gerilme ve ikincil bir plastik akma durumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan model ve elde edilen sonuçlar, mekanik otofretaj işleminin doğasının daha iyi anlaşılabilmesi için araştırmacıların bilgisine sunulmuştur.

Hu ve Penumarthy (Hu ve Penumarthy, 2014) çalışmalarında, kalın cidarlı bir silindir üzerinde yapılan bir mekanik otofretaj işlemini incelemiştir. Bu amaçla, eksenel-simetrik olarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Çalışmada Bauschinger etkisini de içeren kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan kalıntı gerilmeler bu kapsamda incelenmiştir. Sayısal olarak elde edilen kalıntı gerilme değeri, literatürde verilen deneysel kalıntı gerilme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bauschinger etkisi ve sürtünme katsayısının gerilme-birim şekil değişimi dağılımları üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Son olarak optimum mandrel geometrisi (yüzde arakesit oranı) ve çalışma basıncı altında oluşan minimum Von Mises eşdeğer gerilme değeri hesaplanmıştır.

Hu (Hu, 2018) çalışmasında, sonlu elemanlar analizi yardımıyla çift pasolu mekanik otofretaj işlemini incelemiştir. Mekanik otofretaj işlemi ASTM A723-1130 çelikten imal edilmiş 105 mm tank namlusu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Malzeme modeli olarak Bauschinger etkisini içeren lineer olarak pekleşmeyen plastik modeli seçilmiştir. Çalışma kapsamında, mandreli namlu içinde eksenel olarak hareket ettirmeye yarayan mil kuvveti incelenmiştir. Çift pasolu mekanik otofretaj işleminde mil kuvvetinin %30-35 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca mekanik otofretaj işleminde meydana gelen kalıntı gerilme değerleri de hesaplanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçların nötron difraksiyonu yöntemi ile hesaplanan sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Mekanik otofretaj işleminden sonra çalışma basıncı uygulandığında Von Mises eşdeğer gerilme değerinin %18 oranında azaldığı ve namlunun basınç taşıma kapasitesinin %31 oranında arttığı tespit edilmiştir. Çalışma sonunda optimum yüzde arakesit oranı belirlenmiştir. Son olarak tek pasolu ve çift pasolu mekanik otofretaj işlemleri sonunda elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Chica ve arkadaşları (Chica vd., 2019) soğuk şekillendirme (cold expansion) yöntemi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, mandrelin geometrik özelliklerinden olan ön konik açı, mandrelin düz bölgesinin uzunluğu ve yüzde arakesit oranı üzerinde parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde kayıtlı ve ağır silah namlusu üzerinde önceden gerçekleştirilmiş mekanik otofretaj işlemi ile karşılaştırılmıştır. Ardından çalışma daha küçük delik çapına sahip geometriler üzerinde uygulanarak dış çap/iç çap oranı olarak nitelendirilen K oranı hesaplanmıştır. K oranının mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan kalıntı gerilmeleri ne şekilde etkilediği incelenmiştir.

Hu ve arkadaşları (Hu vd., 2021) mekanik otofretaj işlemi için, A723 çeliği ile imal edilmiş kalın cidarlı bir silindirde Bauschinger etkisini de göz önünde bulunduran sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Bu analiz gerçekleştirirken özgün olarak oluşturulan kullanıcı tarafından programlanabilir bir fonksiyondan (UPF) yararlanmışlardır. Kullanıcı tarafından programlanabilir fonksiyonun (UPF) metodoloji oluşturulurken A723 çeliğinin Bauschinger etkisini yansıtan malzeme çekme testlerinden yararlanılmış ve testlerin doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra sayısal olarak 3 boyutlu mekanik otofretaj analizi gerçekleştirebilmek için UPF kullanılarak oluşturulan fonksiyon ve kodlardan yararlanılmıştır. Elde edilen yeni

model ile literatürde kayıtlı malzeme modeli kıyaslanmıştır. Ardından, Bauschinger etkisini de içeren mekanik otofretaj çözümleri ile buna eşdeğer hidrolik otofretaj çözümleri karşılaştırılmıştır. Mekanik otofretaj işlemi sonunda silindir iç yüzeyine yakın bölgede oluşan kalıntı teğetsel gerilme değerlerinin hidrolik otofretaj işlemine nazaran daha derin ve bası (-) yönünde olduğu görülmüştür. Bununla beraber, mekanik otofretaj sonuçları çeki (+) yönünde eksenel gerilme üretirken hidrolik otofretaj çözümleri bası (-) yönünde eksenel gerilme oluşturmuştur. Son olarak, mekanik otofretaj işleminin ardından silindir üzerinden talaş kaldırılarak iç yüzeye yakın yerlerde oluşan gerilme dağılımları önemli şekilde iyileştirilmiştir.

Mekanik otofretaj ile ilgili çalışmalar yine daha çok analitik ve sayısal çalışmalardır ve deneysel çalışmaların sayısı sınırlıdır

Hidrolik ve mekanik otofretaj işlemlerinin doğasını tam olarak anlayabilmek için birçok yeni çalışma yapılmaktadır. Bu tez çalışması, özellikle sınırlı sayıda çalışma olan yerli literatüre katkı sağlaması adına önem arz etmektedir.

1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı

Ağır silah üretim sürecinin en kritik yapı taşlarından birini oluşturan otofretaj işlemi için, işlem sonunda oluşan kalıntı gerilmenin belirlenmesi ile otofretajlı ve otofretajsız namlunun çalışma basıncı altındaki mekanik davranışlarını belirlemek kritik öneme sahip çalışma başlıklarıdır.

Bu tez çalışmasında temel amaç, hem hidrolik hem de mekanik otofretaj işlemini analitik ve sayısal olarak bir sistematik dahilinde ve mühendislik yaklaşımı ile incelemektir. Böylece ağır silah namlusu tasarımının en önemli basamağını oluşturan otofretaj işlemi için detaylı bir bilgi paketi de oluşmuş olacaktır.

Tez kapsamında hidrolik otofretaj ve mekanik otofretaj olmak üzere iki ayrı otofretaj işlemi için incelemeler yapılmıştır.

Hidrolik otofretaj:

Tez çalışmasında öncelikle 120 mm'lik ağır silah namlusu üzerinde hidrolik otofretaj işlemi sonunda meydana gelen gerilmeler, analitik olarak ve sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS paket programında sayısal olarak hesaplanmıştır.

Analitik çalışmada, çalışma basıncı altında namlu cidar kalınlığında Von Mises eşdeğer gerilmesinin en düşük değerini verecek şekilde elastik-plastik geçiş yarıçapı ve optimum otofretaj basıncı hesaplanmıştır.

Otofretaj işlemi sonunda meydana gelen gerilmeler otofretajsız namluda Lamé denklemleri ile, otofretajlı namluda ise otofretaj uygulama aşamaları olan yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncının uygulanması için türetilmiş denklemler ile hesaplanmıştır.

Sayısal çalışmada, düzlem şekil değiştirme hali (plane strain) ve Distorsiyon (Von Mises) Enerjisi Teorisi temelinde Bilineer Kinematik Pekleşme Modeli kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS paket programında, otofretajlı namluda yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı altında oluşan gerilmelerin değeri hesaplanmıştır.

Sayısal çalışma kapsamında, sonuçların mesh sayısından, okuma yapılan açısal konumdan, çevresel model büyüklüğünden ve boyuttan bağımsızlığını teyit etmek için doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ardından, sonuçların sistematik olarak karşılaştırmalı bir şekilde incelenmesi için bir analiz matrisi oluşturulmuştur. Analiz matrisinde incelenecek etkin parametreler

- 1) çap,
- 2) akma mukavemeti,
- 3) otofretaj basıncı ve
- 4) çalışma basıncı

olarak alınmıştır. Her bir parametre için pratikte karşılaşılabilecek değişim aralıkları belirlenmiştir. Tüm analiz matrisi için analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Analitik ve sayısal çalışmalarda elde edilen sonuçların deneysel olarak doğrulanması için, kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin (X-ışınımı kırınımı, nötron ışınımı kırınımı, delik delme vs.) uygulama ve süreçlerinin zorluğu göz önüne alındığında, otofretaj işleminin uygunluğunun teyidi için kullanılan iç ve dış çap kalıcı deformasyon miktarlarından yararlanılmıştır. Deneysel sonuçlar, sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve SEM modelinin doğruluğu konusunda değerlendirme yapılmıştır.

Mekanik otofretaj:

Mekanik otofretaj işleminde ise aynı 120 mm ağır silah namlusunda oluşan gerilme, mil kuvveti ve kalıcı deformasyon miktarları sayısal olarak hesaplanmıştır.

Mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak modellenmesi için literatürdeki çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. SEM tabanlı ANSYS paket programı kullanılarak literatürde bulunan iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) modeller tekrarlanarak tez kapsamında yapılacak mekanik otofretaj işleminin ön doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Doğrulama çalışmaları ve sonuçları incelendiğinde, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) olarak gerçekleştirilen analizlerde elde edilen gerilme dağılımlarının gerek literatürdeki referans çalışmalardaki sonuçlarla gerekse kendi aralarında tutarlı olduğu ve hata payının düşük olduğu görülmüştür. Ancak daha yoğun mesh yapısı ve sayısının oluşturulması ve analizlerin hızlı bir şekilde yakınsaması amacıyla analizler iki boyutlu (2B) eksenel-simetrik model kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Mekanik otofretaj işlemi için SEM tabanlı ANSYS paket programında oluşturulan modelde, mesh yapısının ve sayısının literatürdeki bilgilerden de faydalanarak optimum değeri hesaplanmıştır. Ardından ANSYS paket programında kullanılan temas, malzeme ve geometrik sınır şartları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Referans çalışmanın sonunda elde edilen gerilme dağılımları ve mil kuvveti değeri yorumlandıktan sonra, elde edilen gerilme ve mil kuvvetlerinin farklı model parametrelerine göre değişimlerini incelemek ve değerlendirmek için bir analiz matrisi oluşturulmuştur.

Mekanik otofretaj analiz matrisinde incelenecek etkin parametreler olarak

- 1) yüzde arakesit oranı,
- 2) akma mukavemeti,
- 3) sürtünme katsayısı,
- 4) mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu ve
- 5) mandrel konik açıları orantı faktörleri

dikkate alınmıştır. Her bir parametre için pratikte karşılaşılabilecek değişim aralıkları belirlenmiştir. Tüm analiz matrisi için analizler yapılmıştır ve sonuçlar grafik halinde verilerek değerlendirilmiştir.

Ayrıca, mekanik otofretaj işleminin doğrulanması için kullanılan deneysel kalıcı deformasyon miktarlarının, analitik ve sayısal çalışma ile karşılaştırılması ve çalışmanın doğrulanması da yapılmıştır.

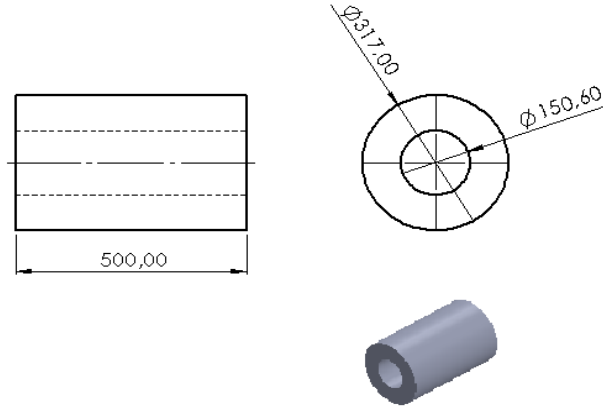


2. HİDROLİK OTOFRETAJ

Savunma sanayi uygulamalarında, ağır silah namlularının üretiminde otofretaj işlemi yaygın olarak hidrolik ve mekanik olarak yapılmaktadır. Bu tezin konusu olarak savunma sanayi kapsamında hidrolik ve mekanik otofretaj işlemleri aşağıda sırasıyla detaylı olarak incelenmiştir.

Hidrolik otofretaj işleminde, namlu iç çapı namlu malzemesinin elastik dayanım limitinin üzerinde kontrollü iç basınca maruz bırakılır, bunun sonucunda cidar kalınlığı içerisinde elastik-plastik bir bölge oluşur. Uygulanan kontrollü iç basınç kaldırıldıktan sonra, namlu malzemesi ilk ölçülerine dönmek ister. Bu aşamada homojen olmayan plastik deformasyondan dolayı bası (-) yönünde kalıntı bir gerilme oluşur. Atış esnasında teğetsel yönde (+) oluşan yükler, oluşan bu kalıntı gerilmenin neticesinde oldukça azalır.

Bu tez çalışmasında, Şekil 2.1’de gösterilen 120 mm namlu iç çapına sahip ağır silah namlusu olan tank namlusunun hidrolik otofretaj işlemi sonucu oluşan gerilmeler analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.1. Hidrolik otofretaj işlemi uygulanan kalın cidarlı silindirin tam kesit görünüşü

İlerleyen alt bölümlerde hem analitik hem de sayısal çalışmada sınır şartı olarak kullanılacak optimum otofretaj basıncı ve bu basınç hesaplanırken gerekli olan elastik-plastik geçiş yarıçapı hesaplanmıştır. Bu iki değer, kalıntı gerilmelerin hesaplanması için oldukça önemlidir.

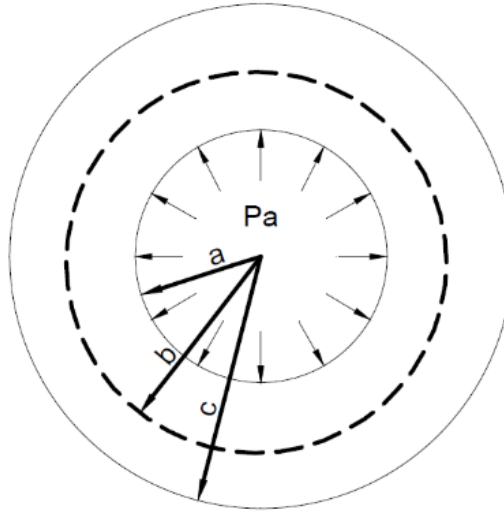
Otofretaj işlemi;

- 1) yükleme,
- 2) basınç kaldırma

olmak üzere iki aşamadan oluşur. İncelemelerde üçüncü aşama olarak çalışma basıncının uygulanması da dahil edilmiştir. Her 3 aşamada oluşan gerilmelerin hesaplanmasından önce, hesaplamalarda kullanılan denklemler Bölüm 2.3'te gösterilmiştir. Yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları belirli kabul ve sınır şartları altında ilgili denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

2.1.Elastik-Plastik Geçiş Yarıçapının Hesaplanması

Hidrolik otofretaj basıncı uygulandıktan sonra, malzeme iç yarıçapından dış yarıçapına doğru belirli bir yarıçap mesafesine kadar plastik deformasyona uğrar. Malzemenin plastik bölgede kaldığı ve elastik bölgeye geçiş yaptığı sınır çizgisi elastik-plastik geçiş yarıçapı (b) (Şekil 2.2) olarak isimlendirilir. Buradaki temel amaç, elastik-plastik geçiş yarıçapında eşdeğer gerilmenin değerini minimum seviyede tutmaktır (Ayob ve Elbasheer, 2007; Çandar ve Filiz, 2017).



Şekil 2.2. Elastik-plastik geçiş yarıçapı

Elastik-plastik geçiş yarıçapının hesaplaması için 2.1 numaralı denklem kullanılmıştır (Zhu ve Yang, 1998).

$$b = a \times e^{\left(\frac{\sqrt{3}P_w}{2\sigma_y}\right)} \quad (2.1)$$

Burada;

b: Elastik-plastik geçiş yarıçapı, mm

a: Namlu iç yarıçapı, mm

P_w : Namlu alışma basıncı, MPa

σ_y : Namlu malzemesi akma mukavemeti, MPa

Hidrolik otofretaj işleminde optimum otofretaj basıncını hesabında kullanılan elastik-plastik geçiş yarıçapı (b); 2.1 numaralı denklem vasıtasıyla 122,21 mm olarak hesaplanmıştır.

2.2. Optimum Otofretaj Basıncının Hesabı

Hidrolik otofretaj işleminde, çalışma basıncı altında Von Mises eşdeğer gerilme değeri minimum seviyede olması için uygulanan basınç optimum otofretaj basıncı olarak isimlendirilir. Optimum otofretaj basıncı (2.2) numaralı denklem ile hesaplanmıştır (andar ve Filiz, 2017).

$\sigma_{re} = \sigma_{rp}$ (r=b için)

$$P_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2A \ln \frac{b}{a} + (\sigma_y - A) b^2 \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) - \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{b^2} \right) \right] \quad (2.2)$$

Burada;

P_{opt} : Optimum otofretaj basıncı, MPa

A: σ_y , ϵ_y ve T'ye (tanjant modülü) bağlı değişken

σ_y : Namlu malzemesi akma mukavemeti, MPa

a: Namlu iç yarıçapı, mm

b: Elastik-plastik geçiş yarıçapı, mm

c: Namlu dış yarıçapı, mm

2.2 numaralı denklem yardımıyla r=b sınır şartı için optimum otofretaj basıncı (P_{opt}), 954,84 MPa olarak hesaplanmıştır.

2.3.Otofretaj İşlemindeki Temel Bağıntılar

Bir ucu kapalı kalın cidarlı silindir Şekil 2.3'te gösterildiği gibi basınca maruz kaldığında, silindir üzerinde radyal (σ_r), teğetsel (σ_θ) ve eksenel (σ_z) gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler asal gerilmelerdir. Sonsuz küçük bir diferansiyel eleman üzerinde kuvvet eşitliği yazılıp bu eşitlik radyal doğrultuda sıfıra eşitlendiğinde (2.3) ve (2.4) numaralı denklem takımları elde edilir (Srivastava ve Gope, 2012):

$$\Sigma F_r = 0,$$

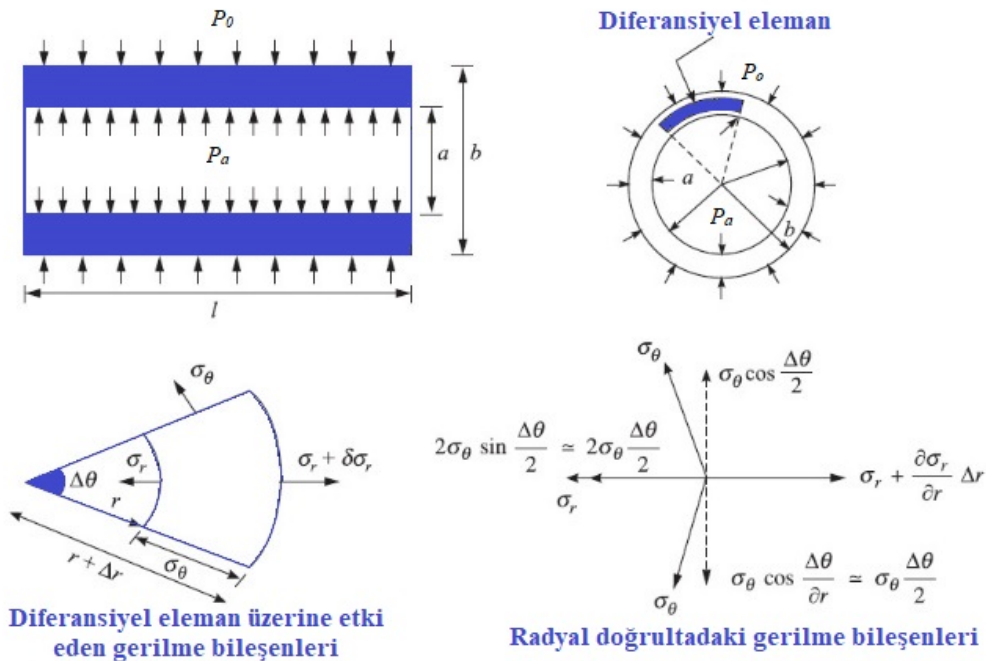
$$\sigma_r r d\theta + 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2} dr - ((\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\theta) = 0 \quad (2.3)$$

$$\sigma_r r d\theta + 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2} dr - \sigma_r r d\theta - \sigma_r dr d\theta - d\sigma_r r d\theta - d\sigma_r dr d\theta = 0 \quad (2.4)$$

“ $d\sigma_r dr d\theta$ ” teriminin küçük olmasından dolayı ihmal edilir ve $\sin \frac{d\theta}{2} \cong \frac{d\theta}{2}$ olduğu varsayımı yapılırsa denklem (2.5) ve (2.6)’da ifade edildiği gibi olur.

$$\sigma_\theta dr - \sigma_r dr - r d\sigma_r = 0 \quad (2.5)$$

$$\sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} - \sigma_\theta = 0 \quad (2.6)$$



Şekil 2.3. İç basınca maruz kalan kalın cidarlı silindirin kesit görünüşü

Elastik bölgedeki gerilme-birim şekil değişimi ilişkisinden ve Hooke kanunundan (2.7) numaralı bağıntılar elde edilir.

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta))\end{aligned}\quad (2.7)$$

Otofretaj işlemi esnasında ağır silah namlusu, oftofretaj tezgâhı üzerinde iki ana kolon arasında sabitlendiği için eksenel yönde uzama olmaz ve bu nedenden dolayı analitik model oluşturulurken düzlem şekil değiştirme hali kabulü ($\varepsilon_z=0$) yapılmıştır. Bir diğer kabul ise malzemenin gerilme-birim şekil değişimi ilişkisi ile ilgilidir. Otofretaj işlemi esnasında oluşan eşdeğer gerilme-birim şekil değişimi ilişkisinin, malzeme üzerinde yapılan basit çekme deneyi ile elde edilen gerilme-birim şekil değişimi ilişkisi ile benzer olduğu varsayılmaktadır. Bunlara ek olarak, problemin çözümünde sıkıştırılmaz hacim kabulü ($\varepsilon_\theta + \varepsilon_r + \varepsilon_z = 0$) yapılmış ve Von Mises Hasar Kriteri (Maksimum Şekil Değiştirme Enerjisi Kriteri) esas alınmıştır (Huang, 2005; Çandar ve Filiz, 2017).

Von Mises Hasar Kriteri, gerilme ve birim şekil değişimi hesaplamaları için (2.8) ve (2.9) numaralı denklemler kullanılmaktadır:

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2]} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_{eş} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\epsilon_\theta - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\theta)^2]} \quad (2.9)$$

Düzlem şekil değiştirme hali için, $\varepsilon_z = 0$, kabulü yapıldığında (2.7) numaralı denklem aşağıdaki halini alır;

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (2.10)$$

Von Mises Hasar Teorisi temelinde (2.10) numaralı denklem (2.8) numaralı denklemde yerinde yazıldığında teğetsel (σ_θ) ve eksenel gerilmeler(σ_z) elde edilir.

$$\sigma_{\theta} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{e\varphi} + \sigma_r \quad (2.11)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{e\varphi} + \sigma_r \quad (2.12)$$

Radyal gerilme (σ_r) denklem (2.6) ve (2.11) numaralı denklemler yardımıyla elde edilir.

$$\sigma_r = \int \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{e\varphi}}{r} dr \quad (2.13)$$

Eşdeğer birim şekil değişimi değeri olan $\varepsilon_{e\varphi}$ düzlem şekil değiştirme ve sıkıştırılmaz hacim varsayımı yapılarak (2.14) ve (2.15) numaralı denklemlerde verildiği şekilde elde edilir.

$$\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_r + \varepsilon_z = 0$$

$$\frac{u}{r} + \frac{d_u}{d_r} + 0 = 0$$

$$\int \frac{1}{r} dr = - \int \frac{1}{u} d_u$$

$$\ln r + \ln u = \ln c \rightarrow u = c/r$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r} = \frac{c}{r^2} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_r = \frac{d_u}{d_r} = -\frac{c}{r^2} \quad (2.15)$$

Burada ε_{θ} ve ε_r sırasıyla maksimum ve minimum asal birim şekil değişimlerini ifade etmektedir.

(2.14) ve (2.15) numaralı denklemler, (2.9) numaralı denklemde yerine yazıldığında, (2.16) numaralı denklem elde edilir. Burada c integral sabitidir.

$$\varepsilon_{e\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{c}{r^2} \quad (2.16)$$

2.4. Gerilme-Birim Şekil Değişimi İlişkisi

Genel anlamda, malzemeler elastik ve plastik bölgelerde farklı karakteristik özellikler gösterir. Elastik bölgede, yükleme kaldırıldığında malzeme orijinal şekline döner. Plastik bölgede ise malzemeye elastik limitin üzerinde bir yük uygulandığında, plastik deformasyon meydana gelir ve kalıcı bir deformasyon oluşur.

Yapılan çalışmada, malzemenin gerilme- birim şekil değişimi ilişkisinin Şekil 2.4'te ifade edilen bilineer kinematik pekleşme modeline uygun olduğu kabulü yapılmıştır. Model aşağıda sıralanan elastik (O-A) ve plastik (A-B) iki bölgeden oluşmaktadır.

1. Elastik bölge (O-A)

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (2.17)$$

2. Plastik bölge (A-B)

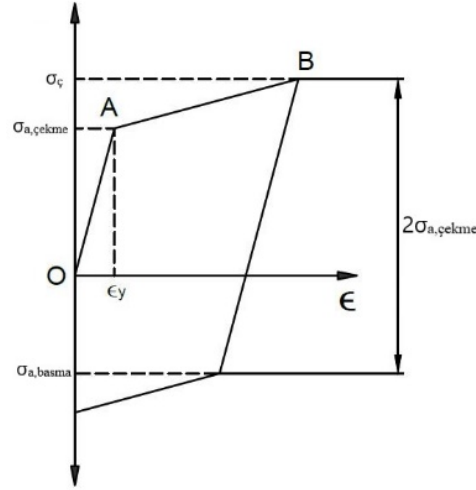
$$\sigma = \sigma_y + T(\epsilon_p - \epsilon_y) \quad (2.18)$$

Burada, σ_y , ϵ_y , ϵ_p ve T sırasıyla akma mukavemeti, akma noktasına denk gelen birim şekil değişimi, plastik bölgedeki birim şekil değişimi ve Tanjant Modülüdür. (2.18) numaralı denklem düzenlendiğinde;

$$\sigma = A + T(\epsilon_p) \quad (2.19)$$

Burada A, σ_y , ϵ_y ve T'ye bağlı bir sabittir.

$$A = \sigma_y - T\epsilon_y$$



Şekil 2.4. Bilineer kinematik pekleşme modeline uygun gerilme-gerilim eğrisi (Çandar, 2017)

2.5. Gerilmelerin Analizi

Otofretaj işleminde yükleme ve basınç kaldırma aşamalarında meydana gelen gerilmeleri hesaplayabilmek için uygun kabullerin yapılması ve sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında temel bağıntılar, düzlem şekil değiştirme hali ve Von Mises hasar kriteri temelinde oluşturulmuştur. Kullanılan malzemenin gerilme-birim şekil değişimi ilişkisini modellemek için Huang modeli (Huang, 2005) referans alınmıştır. Namlu malzemesi elastik ve plastik bölgede sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir. Buna ek olarak namlu cidar kalınlığı boyunca üniform bir aksenal gerilme-birim şekil değişimi dağılımı olduğu varsayımı yapılmıştır. Kalıntı gerilme dağılımı ikincil bir plastik akmanın gerçekleşmediği elastik yük kaldırma (elastic unloading-no reverse yielding) durumuna göre hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında Bauschinger etkisi göz önünde bulundurulmamıştır. Çalışma basıncı altında oluşan gerilmeler ise, basınç kaldırma aşamasında oluşan kalıntı gerilmeler ile çalışma basıncı uygulandığında oluşan elastik gerilmelerin üst üste bindirilip toplanmasıyla (süperpozisyon) elde edilmiştir.

a) Elastik Bölge (O-A)

(2.18) ve (2.19) numaralı denklemler, (2.13) numaralı denklemde yerine yazıldığında, (2.20) numaralı denklem elde edilir.

$$\sigma_{re} = -\frac{2}{3}\frac{E}{r^2}c_{e1} + c_{e2} \quad (2.20)$$

(2.16), (2.17) ve (2.20) numaralı denklemler (2.11) numaralı denklemde yerine yazıldığında (2.21) numaralı denklem elde edilir.

$$\sigma_{\theta e} = \frac{2}{3}\frac{E}{r^2}c_{\theta 1} + c_{\theta 2} \quad (2.21)$$

(2.16), (2.17) ve (2.20) numaralı denklemler (2.12) numaralı denklemde yerine yazıldığında (2.22) numaralı denklem elde edilir.

$$\sigma_{ze} = c_{e2} \quad (2.22)$$

b) Plastik Bölge (A-B)

(2.16) ve (2.19) numaralı denklemler (2.13) numaralı denklemde yerine yazıldığında (2.23) numaralı denklem elde edilir.

$$\sigma_{rp} = \frac{2}{\sqrt{3}}A \ln r - \frac{2}{3}\frac{T}{r^2}c_{p1} + c_{p2} \quad (2.23)$$

(2.16) ve (2.19) numaralı denklemler (2.11) numaralı denklemde yerine yazıldığında (2.24) numaralı denklem elde edilir.

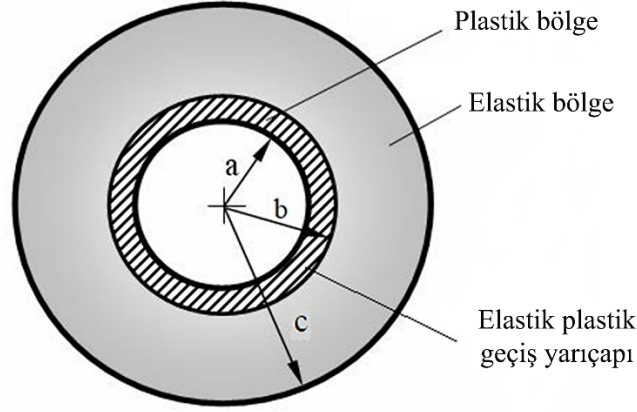
$$\sigma_{\theta p} = \frac{2}{\sqrt{3}}A(1 + \ln r) + \frac{2}{3}\frac{T}{r^2}c_{p1} + c_{p2} \quad (2.24)$$

(2.16) ve (2.19) numaralı denklemler (2.12) numaralı denklemde yerine yazıldığında (2.25) numaralı denklem elde edilir.

$$\sigma_{zp} = \frac{1}{\sqrt{3}}A(1 + 2\ln r) + c_{p2} \quad (2.25)$$

2.6.Sınır Şartları

Kalın cidarlı bir silindir P_a (Şekil 2.5) iç basıncına maruz kaldığında aşağıda ifade edilen sınır şartları meydana gelir.



Şekil 2.5. Elastik-plastik geçiş yarıçapı

1. Elastik ve plastik bölgede ($r=b$) oluşan her iki eşdeğer gerilme değeri, kalın cidarlı silindirin akma mukavemetine eşittir.

- a. $r=b$, $\sigma_{eş, e}=\sigma_y$, sınır şartları için:

$$c_{e1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_y}{E} b^2 \quad (2.26)$$

- b. $r=b$, $\sigma_{eş, p}=\sigma_y$, sınır şartları için:

$$c_{p1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(\sigma_y - A)}{T} b^2 \quad (2.27)$$

olarak bulunur.

2. Kalın cidarlı silindirin dış çapındaki radyal gerilme (σ_r) 0'a ve iç çapındaki radyal gerilme ise $-P_a$ (otofretaj basıncı) basıncına eşittir.

- a. $r=c$, $\sigma_{re}=0$, sınır şartı için;

$$c_{e2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{b^2}{c^2} \quad (2.28)$$

- b. $r=a$, $\sigma_{rp}=-P_a$, sınır şartı için;

$$c_{p2} = \frac{2}{\sqrt{3}} A \ln a - \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \frac{b^2}{a^2} - P_a \quad (2.29)$$

olarak bulunur.

Çandar (Çandar ve Filiz, 2017) ve Huang'ın (Huang, 2005) çalışmalarında kullanılan sınır şartları ve kabuller temelinde yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı altında elastik ve plastik bölgede oluşan radyal (σ_r), teğetsel (σ_θ) ve eksenel (σ_z) gerilmeler (2.30)'dan (2.47)'e kadar verilen eşitlikler vasıtasıyla hesaplanmıştır

- **Yükleme Aşamasında Oluşan Gerilme Dağılımı**

- a. **Elastik Bölge (O-A)**

$$\sigma_{re} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (2.30)$$

$$\sigma_{\theta e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (2.31)$$

$$\sigma_{ze} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{b^2}{c^2} \quad (2.32)$$

- b. **Plastik Bölge (A-B)**

$$\sigma_{rp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{r^2} \right) - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) - P_a \quad (2.33)$$

$$\sigma_{\theta p} = \frac{2}{\sqrt{3}} A \left(1 + \ln \frac{r}{a} \right) + \frac{b^2}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r^2} \right) - P_a \quad (2.34)$$

$$\sigma_{zp} = \frac{1}{\sqrt{3}} A + \frac{2}{\sqrt{3}} A \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \frac{b^2}{a^2} - P_a \quad (2.35)$$

- **Basınç Kaldırma Aşamasında Oluşan Gerilme Dağılımı**

Otofretaj basıncı tamamen kaldırıldığında, bası (-) yönünde oluşan akma gerilmesi Bauschinger etkisinden dolayı daha küçük bir değerde değilse, basınç kaldırma durumu elastik davranış gösterir. Bu durumda basınç kaldırma durumunda oluşan gerilmeler, Lamé denklemleriyle hesaplanabilmektedir. Namlu malzemesinin elastik ve plastik bölgesinde oluşan kalıntı gerilmeler aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanabilmektedir.

1) Namlu Malzemesinin Elastik Kısımında Oluşan Kalıntı Gerilmeler ($b \leq r \leq c$)

$$\sigma_{re} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{r^2} \right) - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.36)$$

$$\sigma_{\theta e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} + \frac{1}{r^2} \right) - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.37)$$

$$\sigma_{ee} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{b^2}{c^2} - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \quad (2.38)$$

2) Namlu Malzemesinin Plastik Kısımında Oluşan Kalıntı Gerilmeler ($a \leq r \leq b$)

$$\sigma_{rp} = \frac{2}{\sqrt{3}} A \ln \frac{r}{a} + \frac{b^2}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right) - P_a - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.39)$$

$$\sigma_{\theta p} = \frac{2}{\sqrt{3}} A \left(1 + \ln \frac{r}{a} \right) + \frac{b^2}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r^2} \right) - P_a - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.40)$$

$$\sigma_{ep} = \frac{1}{\sqrt{3}} A + \frac{2}{\sqrt{3}} A \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \frac{b^2}{a^2} - P_a - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \quad (2.41)$$

• Çalışma Basıncı Aşamasında Oluşan Gerilme Dağılımı

Çalışma basıncı uygulandığında namluda oluşan toplam gerilme, namlu iç yüzeyinde oluşan bası (-) yönündeki kalıntı gerilmelerin neticesinde azalacaktır. Oluşan bu gerilmeler aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanabilmektedir.

1. Çalışma Basıncı Altında Namlu Malzemesinin Elastik Kısımında Oluşan Kalıntı Gerilmeler ($b \leq r \leq c$)

$$\sigma_{re} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{r^2} \right) - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) + P_\zeta \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.42)$$

$$\sigma_{\theta e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y b^2 \left(\frac{1}{c^2} + \frac{1}{r^2} \right) - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) + P_\zeta \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.43)$$

$$\sigma_{ze} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{b^2}{c^2} - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} + P_\zeta \frac{a^2}{c^2 - a^2} \quad (2.44)$$

2. Çalışma Basıncı Altında Namlu Malzemesinin Plastik Kısımında Oluşan Kalıntı Gerilmeler ($a \leq r \leq b$)

$$\sigma_{rp} = \frac{2}{\sqrt{3}} A \ln \frac{r}{a} + \frac{b^2}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right) - P_a - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) + P_\zeta \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 - \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.45)$$

$$\sigma_{\theta p} = \frac{2}{\sqrt{3}} A \left(1 + \ln \frac{r}{a} \right) + \frac{b^2}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r^2} \right) - P_a - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) + P_\zeta \frac{a^2}{c^2 - a^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \quad (2.46)$$

$$\sigma_{zp} = \frac{1}{\sqrt{3}} A + \frac{2}{\sqrt{3}} A \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_y - A) \frac{b^2}{a^2} - P_a - P_a \frac{a^2}{c^2 - a^2} + P_w \frac{a^2}{c^2 - a^2} \quad (2.47)$$

2.7. Hidrolik Otofretaj SEM Modeli

Namlu hidrolik otofretaj işleminde oluşan gerilmelerin sayısal olarak hesaplanması için SEM tabanlı ANSYS paket programı kullanılmıştır. Bu çalışmada SEM modeli için iki boyutlu (2-B) geometri kullanılmıştır.

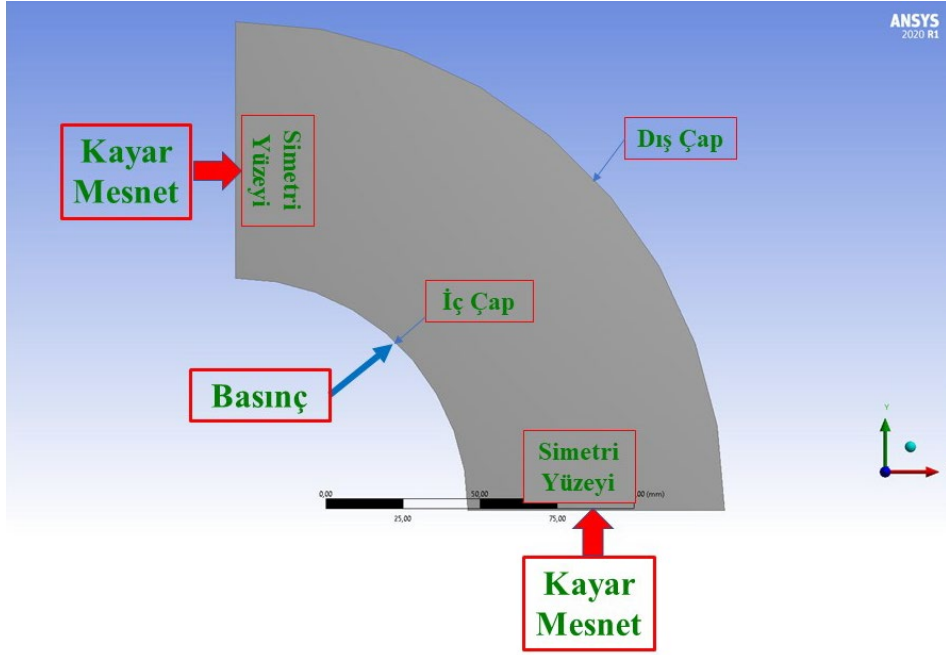
Geometri ve Sınır Şartları:

Modelde geometri ve yükleme şartlarındaki düzlemsel simetriden dolayı, modelin bütününe temsil eden çeyrek daire kesiti kullanılmıştır (Şekil 2.6).

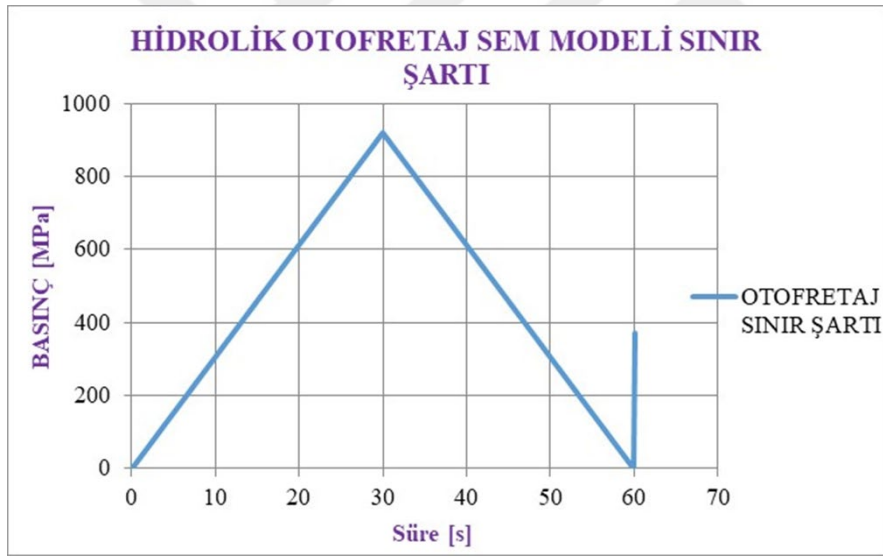
2-B modelde referans bölge olarak iç balistik döngü sonunda termal gerilmelere ve basınç yüklerine en fazla maruz kalan namlunun ilk 500 mm mesafedeki malzeme kesiti dikkate alınmıştır. Bu bölgede iç çap 150,6 mm, dış çap ise 317 mm'dir.

Şekil 2.6'da belirtilen sınır şartları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

1. Modelde çeyrek kesitin simetri bölgelerine kayar mesnet sınır şartı tanımlanmıştır.
2. Dış çap, hareket edebildiğinden serbest bırakılmıştır.
3. İç çapa ise Şekil 2.7'de gösterilen basınç sınır şartı tanımlanmıştır.
 - a. 30 saniye boyunca otofretaj basıncının yüklenmesi,
 - b. 30 saniye süresince yüklenen basıncın kaldırılması,
 - c. 20 ms boyunca çalışma basıncının yüklenmesi.



Şekil 2.6. SEM model bölgesi ve tanımlanan sınır şartları



Şekil 2.7. Namlu iç çapına sınır şartı olarak uygulanan zamana bağlı basınç değişimi

Malzeme modeli ve özellikleri:

Malzeme modeli olarak Bilineer Kinematik Pekleşme modeli kullanılmıştır.

Genel olarak namlu üretiminde yüksek mukavemet ve tokluk değerlerine sahip düşük alaşımlı çelikler (35NiCrMoV12-5; 32NiCrMo12-10; ve AISI 4340) kullanılır. Çalışma kapsamında namlu malzemesi olarak AISI 4340 türü çelik seçilmiştir ve SEM analizinde girdi olarak programa tanıtılmıştır. Namlu çeliğinin kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1, 2.2 ve Şekil 2.8’de listelenmiştir.

Otofretaj işleminde yorulma ömrünü artıran ve çatlak başlangıcını geciktiren temel olay bası (-) yönünde oluşturulan kalıntı gerilmedir. Malzeme içinde oluşturulan bu kalıntı gerilmenin dağılımını ve mertebesini etkileyen en önemli olayların başında Bauschinger etkisi (Perry ve Aboudi, 2003; Troiano vd., 2003; Huang, 2005; Lee vd., 2009; Shim vd., 2010) gelmektedir. Art arda yapılan çekme ve basma testlerinde, bası (-) yönündeki akma gerilmesi, bir önceki yükleme durumundaki plastik birim şekil değişiminin miktarına göre kayda değer şekilde azalmaktadır (Perry ve Perl, 2017). Çizelge 2.2’de namlu malzemesinin bası (-) yönündeki akma mukavemetinin ($\sigma_{a, \text{bası}}$), çeki (+) yönündeki akma mukavemeti ($\sigma_{a, \text{çeki}}$) ile çok az bir farklılık gösterdiği görülmektedir.

Teorik olarak çeki (+) yönündeki akma gerilmesinin bası (-) yönündeki akma gerilmesine eşit olduğu durumlarda, bir silindirin dış yarıçap/iç yarıçap oranı (k) 2,2 değerini aşmadığı sürece silindir malzemesi içinde ikincil bir plastik akma (reverse yielding) gerçekleşmez (Hill, 1950). Fakat Bauschinger etkisinden dolayı bir kritik basınç eşiğinden sonra bu olay daha düşük k oranlarında da görülebilir (Perry ve Perl, 2017).

Bauschinger etkisi, Bauschinger etki faktörü ile gösterilir. $\sigma_{a, \text{bası}}/\sigma_{a, \text{çeki}}$ değeri olarak tanımlanan bu değer, 0,3-1,0 arasında değişmektedir (Huang, 2005). Bu faktör ne kadar düşükse, bası (-) yönündeki akma mukavemeti o denli düşer ve kalıntı gerilme değerini olumsuz yönde etkiler (Çandar ve Filiz, 2017; Shim vd., 2010; Perry ve Perl, 2017). Pratikte kalıntı gerilme üzerindeki bu olumsuz etkiyi gidermek için, otofretaj işleminden sonra malzeme düşük sıcaklıkta gerilim giderme prosesine tabi tutulur (Perl ve Perry, 2013).

Tez çalışması kapsamında referans kaynaktan elde edilen değerlerde (ASM, 2002) Bauschinger etkisinin çok düşük olduğu, malzemenin çeki (+) ve bası (-) yönündeki

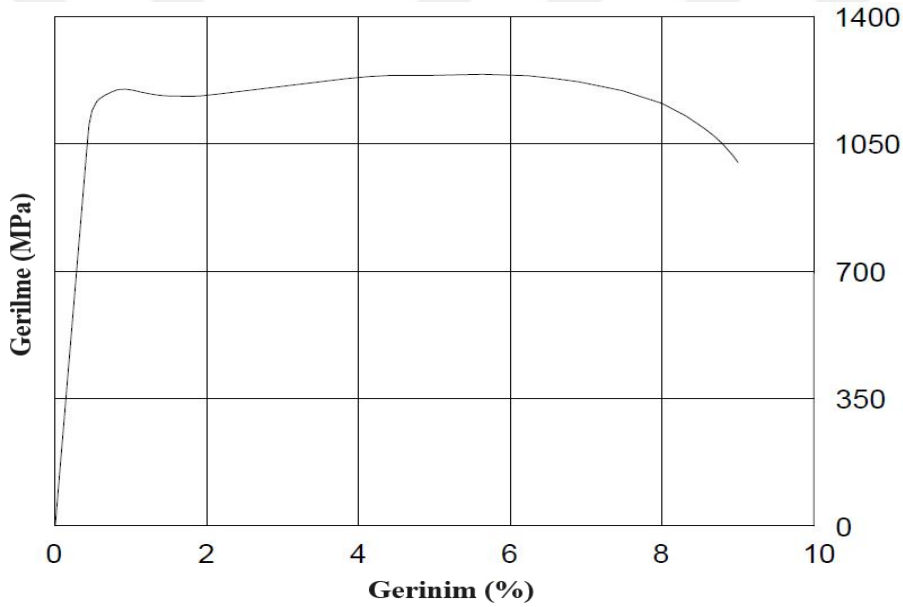
akma mukavemetleri değerlerinden kolayca anlaşılmaktadır. Analitik ve sayısal çalışmalara bu değerler kullanılarak devam edilmiştir.

Çizelge 2.1. AISI 4340 alaşım çeliğinin kimyasal kompozisyonu (ASM, 2002)

%Fe	%Ni	%Cr	%C	%Mo	%Diğer
96,6	1,8	0,8	0,4	0,25	0,1

Çizelge 2.2. AISI 4340 çeliğin mekanik özellikleri (ASM, 2002)

Isıl İşlem	σ_y , çeki (MPa)	σ_y , bası (MPa)	σ_c (MPa)	E (GPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Sertlik (HB)	ν
510°C’de yağda su verme	1200	1130	1270	200	1489	400	0,3

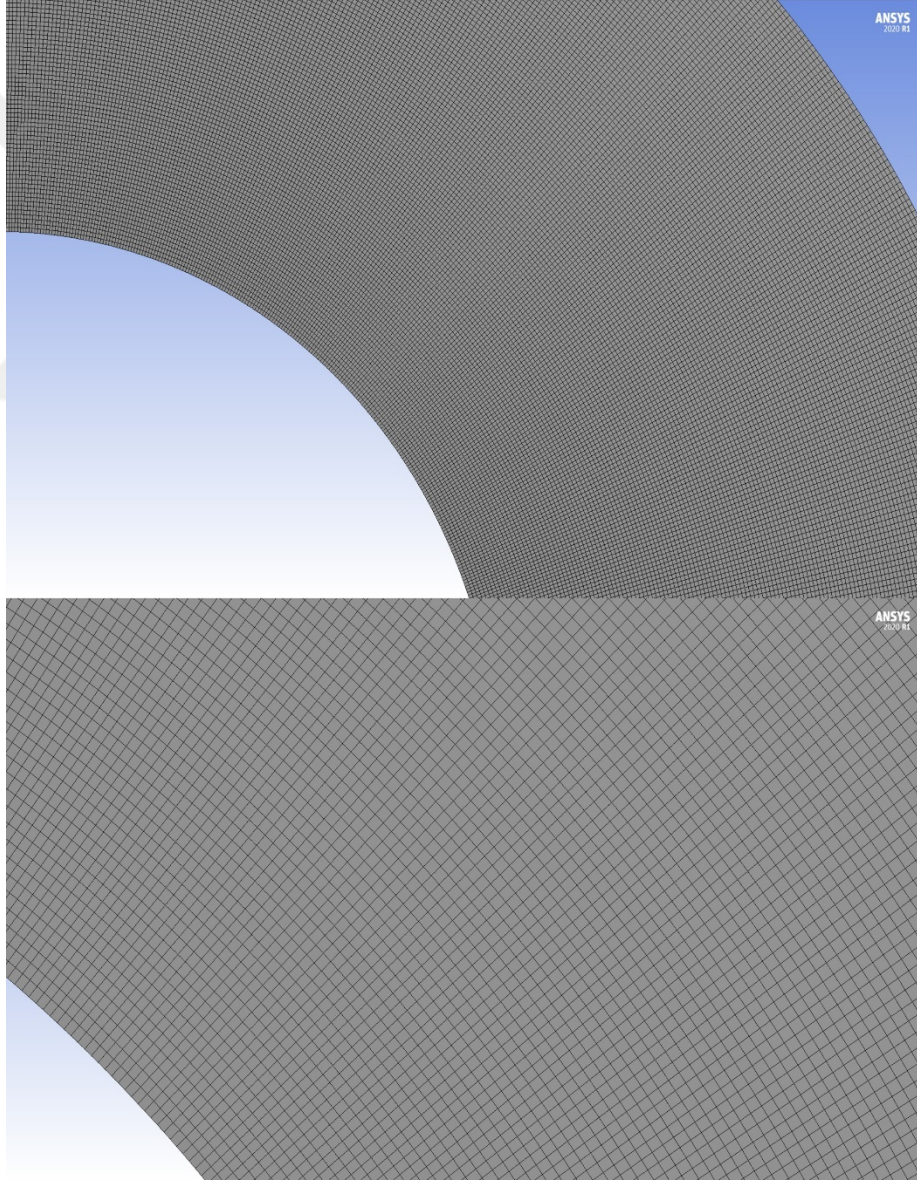
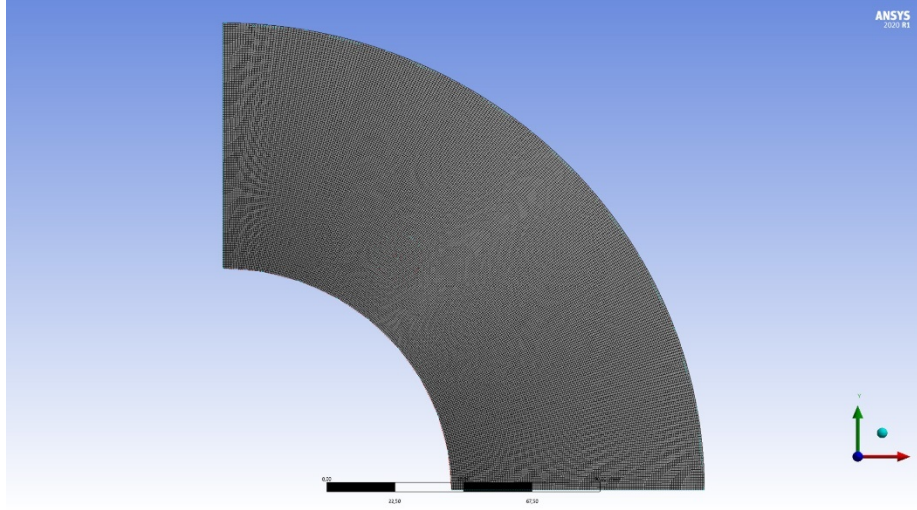


Şekil 2.8. AISI 4340 çeliği için gerilme-birim şekil değişimi eğrisi (ASM, 2002)

Mesh yapısı:

Hidrolik otofretaj SEM modelinde mesh (sayısal ağ) sayısından bağımsız sonuç elde edilebilmesi için mesh bağımsızlık analizleri yapılmıştır. Mesh bağımsızlık analizlerinden elde edilen sonuçlar Bölüm 4’te verilmiştir.

Mesh bağımsızlık analizleri göz önünde bulundurularak analiz matrisinde referans matris için eleman sayısı 0,6 mm ve düğüm/eleman sayısı (node/element) 115085/38086 olarak belirlenmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Mesh (sayısal ağ) yapısı

Bu tez çalışmasının amacı, ağır silah namlusunda hidrolik otofretaj işlemi sonunda oluşan gerilme dağılımlarını analitik ve sayısal yöntemler kullanarak parametrik olarak incelemesidir. Çalışmada, namlu çapı, namlu malzemesinin akma mukavemeti, otofretaj basıncı ve çalışma basıncını içeren 4 temel parametre detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analiz matrisi ve sonuçlar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

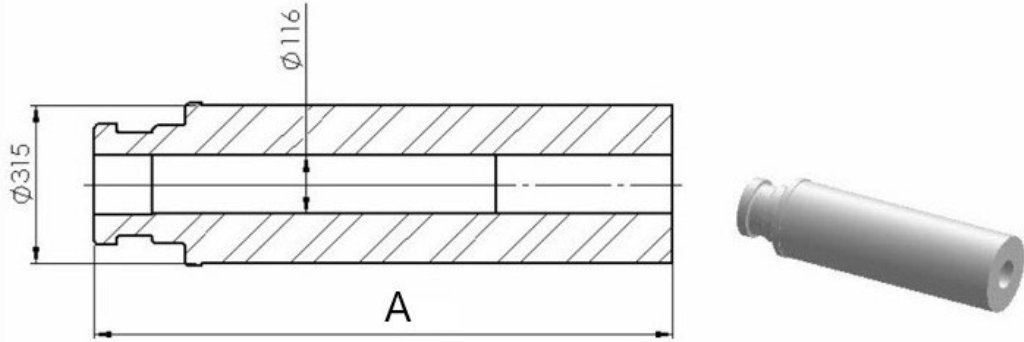


3. MEKANİK OTOFRETAJ

Ağır silah namlularının mekanik otofretaj işlemi, namlu iç çapı boyunca iç çaptan daha büyük bir çapa sahip özel imal edilmiş konik bir mandrel geçirilerek yapılır (Şekil 3.1). Mekanik otofretaj ile ilgili ilk çalışmalar Davidson vd. (1963) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Mekanik otofretaj işlemi için özel tasarlanmış tezgahlar kullanılır. Namlu iç çapından daha büyük olan konik mandrelin, aksel olarak namlu içinden boydan boya geçirilmesini sağlamak, mekanik sürtünme ve elastik-plastik şekil değişimlerinden dolayı kritik bir işlemdir. Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandrel, namlu uzunluğuna göre belirli sayıda mil kullanılarak namlu içinden boydan boya geçirilir. Milleri, dolayısıyla mandreli hareket ettirmek için tezgahdaki hidrolik ünite kullanılır.

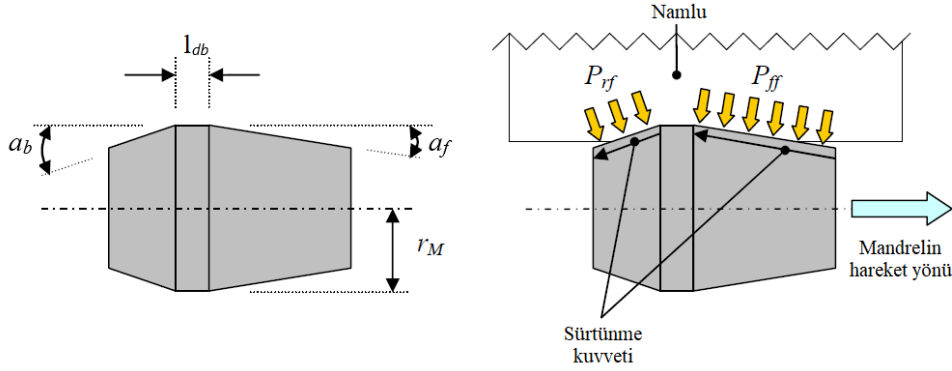
Mekanik otofretaj işlemi esnasında meydana gelen yüklemeler, işlemin geometrik uygulaması gereği olarak oldukça küçük bir temas alanı olan konik mandrelin düz kısmında gerçekleşir ki bu sebeple hidrolik otofretaj işleminden farklıdır (Gibson, 2008). Mekanik otofretaj işleminde bölgesel deformasyon esnasında mandrel-namlu arasındaki sürtünmeden dolayı çok yüksek kayma gerilmeleri oluşur.



Şekil 3.1. Mekanik otofretaj işlemi uygulanan kalın cidarlı silindirin tam kesit görünüşü

Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandreller tipik olarak sabit çaplı ortadaki kısa düz bir bölgenin, farklı açılardaki iki konik bölge ile birleşmesinden oluşur (Şekil 3.2). Mandrelin ön konik bölgesinin eğimi arka konik bölgeye kıyasla daha küçüktür.

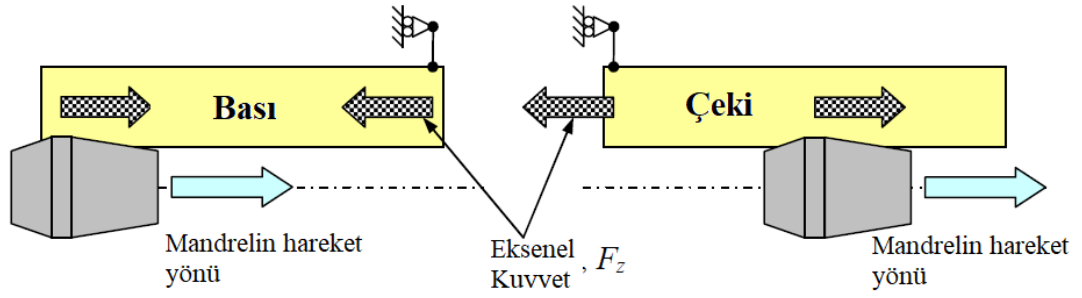
Mandrel üzerinde bulunan ön ve arka konik bölgeler, yalnızca mandrelin namlu içinde merkezlenmesini sağlamaz; aynı zamanda plastik deformasyonu ve kalıntı gerilme oluşumunu sağlar.



Şekil 3.2. Mekanik otofretajda kullanılan mandrel şeması (Gibson, 2008)

Mandrelin hareketini sağlayabilmek için namlu ile mandrel arasında oluşacak sürtünme kuvvetini yenebilecek bir kuvvete ihtiyaç vardır. Mandrel namlu içinde hareket ederken sürtünme katsayısını ve oluşan direnç kuvvetini azaltmak için özel yağlar kullanılır. Ayrıca, namlu iç yüzeyine fosfat kaplama (çinko/mangan) ve bu kaplamanın üzerine stearate bazlı yağlar (O'hara, 1992) tatbik edilmesi uygulamada en fazla tercih edilen yöntemdir.

Namlu iç yüzeyi uygun bir şekilde yağlansa da mandrelin namlu içindeki hareketinden dolayı ciddi seviyede aksenal bir kuvvet meydana gelir. Bu yüzden namlunun iyi bir şekilde merkezlenmesi ve yataklanması gerekmektedir. Namlunun mandrel hareket yönüne göre ön veya arka uç kısmından yataklanması, namlunun deformasyona uğrayan kısmının çeki (+) veya deformasyona uğramayan kısmının bası (-) altında olup olmayacağı durumunu etkilemektedir (Şekil 3.3). Tez kapsamında namlu, uygulamada olduğu gibi mandrelin namluya giriş yaptığı arka uç kısmından yataklanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Mekanik otofretaj yataklama şekilleri (Gibson, 2008)

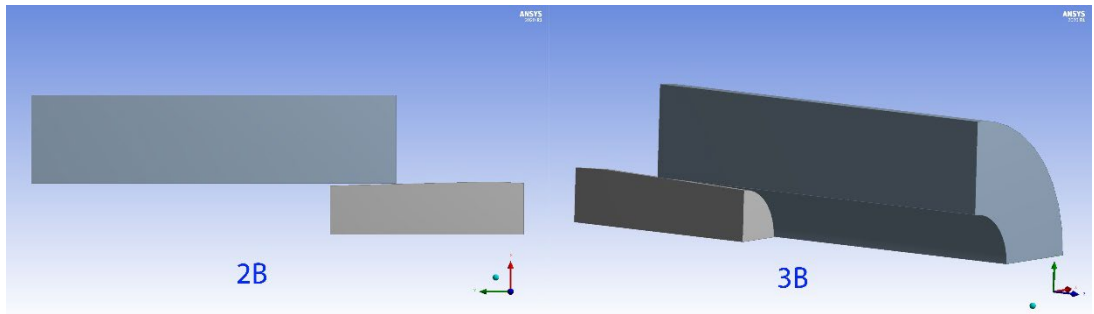
3.1.Mekanik Otofretaj SEM Modeli

Mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak modellenmesi için literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu sayısal çalışmalarda kullanılan model geometrisi

- 1) 2B eksenel-simetrik geometri ve
- 2) 3B çeyrek geometri

olarak alınmıştır. Şekil 3.4’de temsili olarak bu geometriler gösterilmiştir.

İki boyutlu (2B) eksenel-simetrik modelin kullanıldığı çalışmalara örnek olarak O’hara, 1992; Iremonger ve Kalsi, 2003; Gibson vd., 2012, 2014; Chica vd., 2019 gösterilebilir. Üç boyutlu (3B) çeyrek model için ise Hu vd., 2014, 2021; Hu, 2019 tarafından yapılan çalışmalar ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3.4. 2B ve 3B mekanik otofretaj SEM modeli

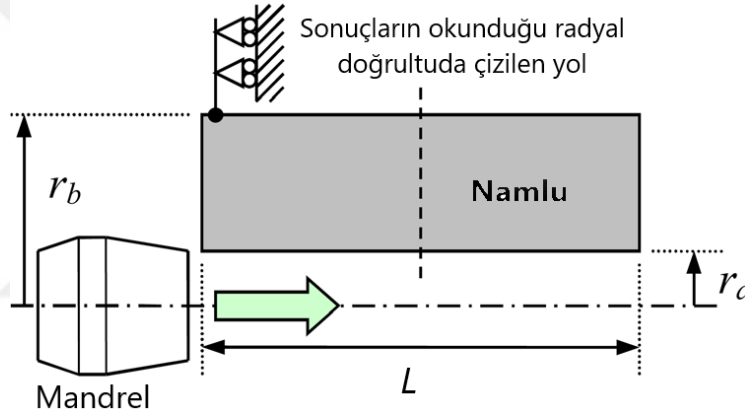
Oluşturulan mekanik otofretaj modelinin doğrulanması için literatür tabanlı olarak hem 2B eksenel-simetrik geometri ile hem de 3B çeyrek geometri ile modeller oluşturulmuştur. Doğrulama analizlerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında ise mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak modellenmesi için iki boyutlu (2B) aksel-simetrik model kullanılmıştır. Bu modelleme SEM tabanlı ANSYS paket programında yapılmıştır. Silindirik koordinatlarda gerçekleşen otofretaj işlemi geometrik ve sınır şartları dikkate alındığında aksel-simetrik olarak iki boyutlu olarak modellenebilir. Ayrıca, iki boyutlu modelleme sayesinde daha yoğun mesh yapısı ve analiz süresinin azaltılması sağlanır.

Aşağıda 2B aksel-simetrik SEM modeli hakkında bilgi verilmiştir.

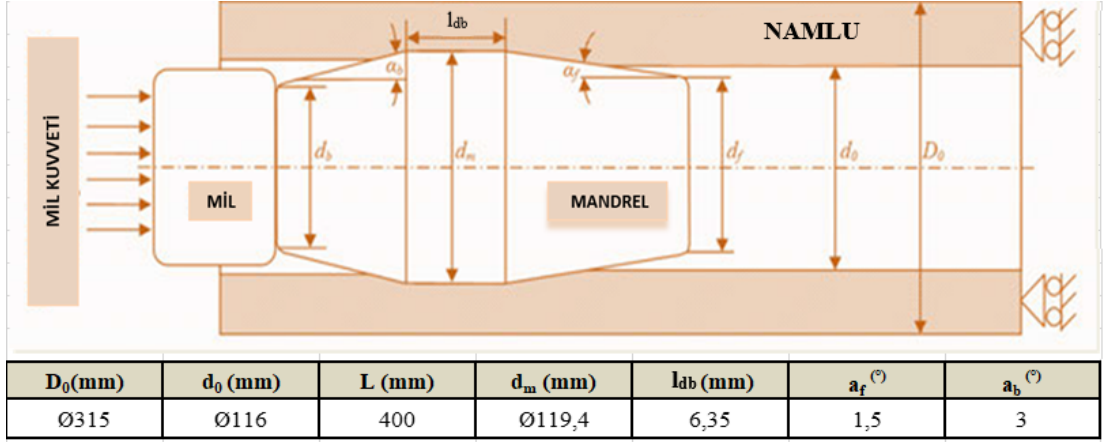
Geometri ve Sınır Şartları:

Çalışma kapsamında kullanılan iki boyutlu (2B) aksel-simetrik modelin geometrik şeması Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. Göz önüne alınan geometri, namlunun yatay ekseninin ortasından radyal doğrultuda çizilen yolu (path) kapsamaktadır.



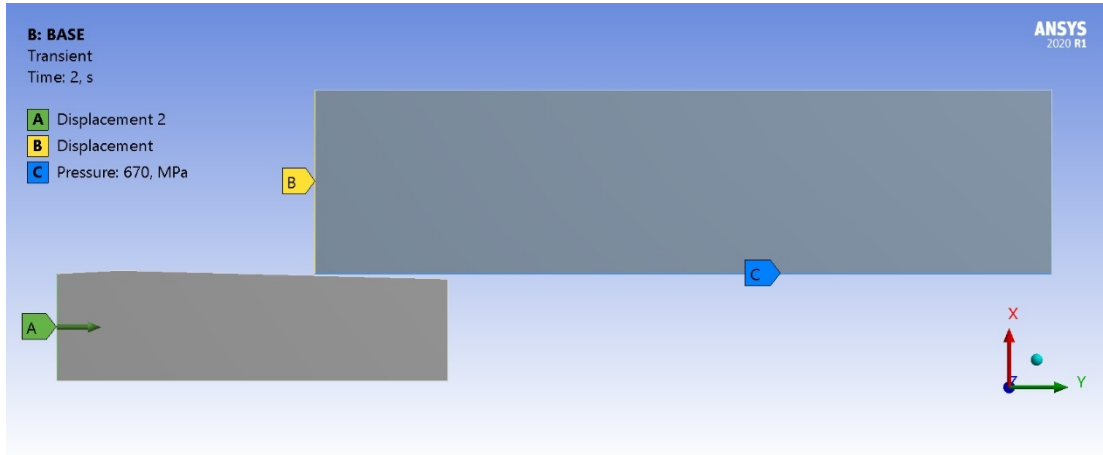
Şekil 3.5. Mekanik otofretaj SEM modeli (Gibson, 2008)

Mekanik otofretaj SEM modelinde kullanılan namlu ve mandrelin temel geometrik boyutları Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmiştir (Hu vd., 2014). Burada namlu uzunluğu (L) olarak, namlunun ateşleme sonrasında en yüksek ısı ve basınç yüklerine maruz kaldığı en kritik bölge olan ilk 400 mm'lik mesafe alınmıştır



Şekil 3.6. Namlu ve mandrelin geometri şeması

ANSYS paket programında oluşturulan SEM modeli ve sınır şartları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Mandrelin A yüzeyinin x yönündeki hareketi kısıtlanmıştır ve y yönündeki hareketi için ise mandrelin namlunun içinden boydan boya geçmesi için 540 mm yer değiştirme tanımlanmıştır. Namlunun B yüzeyinin x yönündeki hareketine izin verilmiş ve y yönündeki hareketi ise sınırlandırılmıştır. Mandrelin namlu içindeki boydan boya hareketi tamamlandıktan sonra, ağır silah namlusunun çalışma basıncı olan 670 MPa basınç değeri, namlunun iç yüzeyi olan C yüzeyine sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Çalışma basıncı olarak ilgili ağır silah namlusunun ortalama hazne basıncı olan 670 MPa değeri kullanılmıştır (Kruczynski & Hewitt, 1991; MKE, 2021).



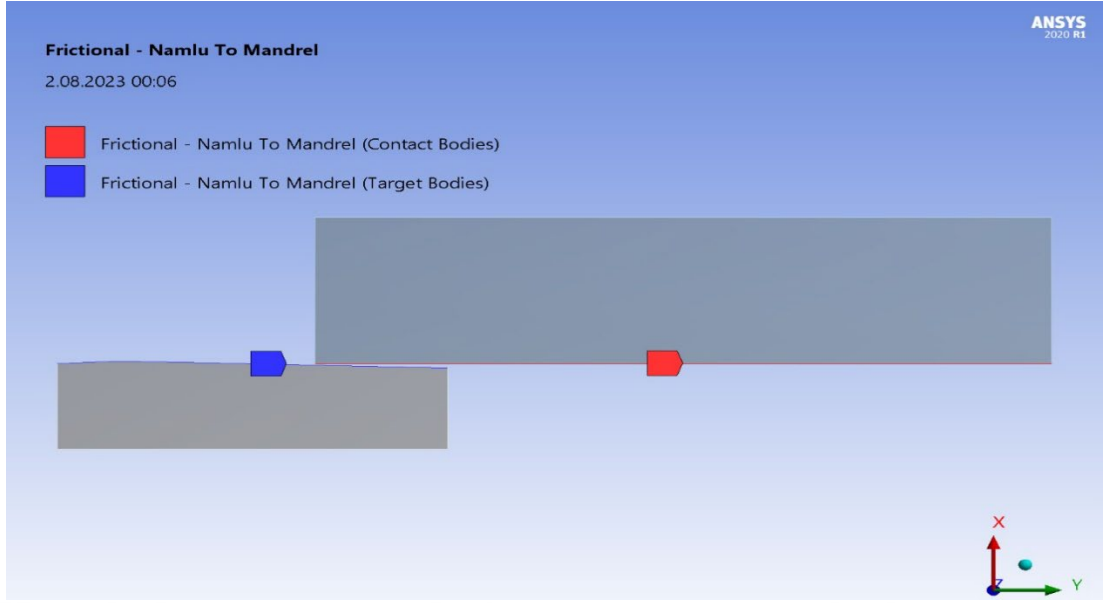
Şekil 3.7. SEM modeli ve sınır şartları

Mandrel-namlu temas tanımlaması ve sürtünme katsayısı:

Namlu ile mandrel arasındaki kontak tipi Flexible-Flexible (F-F) olarak seçilmiştir. Yüzey-Yüzey (surface-surface) olarak tanımlanan F-F kontak tipi, temas eden cisimlerin rijitliğine ve bu cisimlerin birbiri içine nüfuz etme durumlarına göre simetrik veya asimetrik olarak seçilmelidir. Genel anlamda asimetrik kontak tipi için, bir cisim diğer cisme göre daha rijit ise o cisme target (hedef), diğerine ise contact (kontak) tanımlaması yapılması gerekmektedir. Mekanik otofretaj işlemi 500 GPa değerinde elastisite modülüne sahip tungsten karbür (WC) malzemeden yapılmış mandrel, 209 GPa değerinde elastisite modülüne sahip namlu malzemesine göre daha rijittir. Bu sebeple, analiz kapsamında namlu malzemesi kontak, mandrel ise target seçilerek, asimetrik F-F kontak tipi seçilmiştir (Şekil 3.8).

Analiz kapsamında izotropik olarak tanımlanan Coloumb sürtünme kuvveti kullanılmıştır. Bu modele göre, sürtünme kuvveti mandrelin namluya uyguladığı temas basıncıyla orantılıdır. Sürtünme katsayısı μ ile gösterilirse, sürtünmeden dolayı oluşacak kayma gerilmesi $(\sigma_{rz} = \mu\sigma_r)_{r=ra} + kohezyon$ olarak ifade edilebilir. Fakat sürtünmeden dolayı yüzeyde oluşan kayma gerilmesinin değeri, diğer gerilme bileşenlerinin yanında çok küçük olduğu için ihmal edilmektedir. Sürtünme katsayısı olarak, literatürde araştırmacıların hemen hemen hepsinin tercih ettiği 0,015 μ değeri seçilmiştir. Bu değer, namlu iç yüzeyine fosfat kaplama (çinko/mangan) ve bunun üzerine stearat bazlı yağ uygulaması sonucu elde edilen sürtünme katsayısı değerine karşılık gelmektedir. Bununla beraber Bihanta vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, $0,05 \leq \mu \leq 0,18$ arasında çeşitli yağlayıcılar kullanılarak elde edilmiş sürtünme katsayıları da tespit edilmiştir.

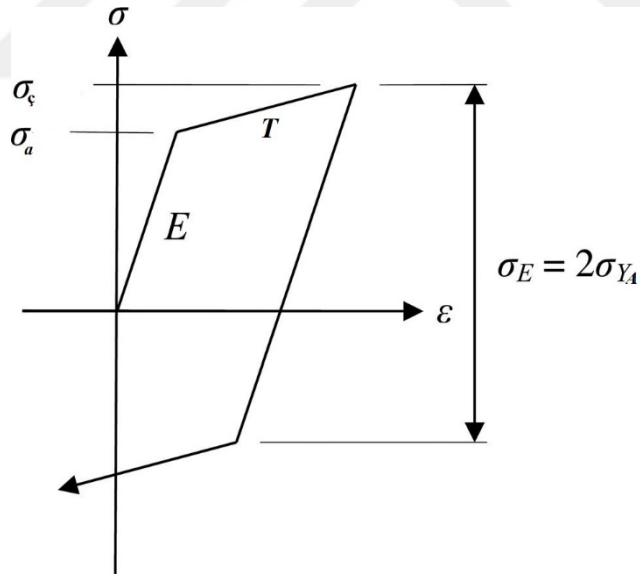
Mekanik otofretaj işlemi esnasında mandrel-namlu temas yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan ısı üretimi nedeniyle sıcaklık artışı olur. Bu sebeple mekanik otofretaj işlemi gerçekte izotermal olmamakla birlikte, oluşan ısı üretimin belirlenmesi, modele tanımlanması ve sıcaklıkla değişen malzeme özelliklerinin net bilinmesi konularındaki belirsizliklerden dolayı literatürdeki modellerde olduğu gibi izotermal varsayımı kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Namlu-mandrel arasındaki kontak tanımlamaların yapılması

Malzeme modeli ve özellikleri:

Analiz kapsamında SEM Modeline girdi olarak tanımlanan malzeme modeli, bilineer kinematik pekleşme modelidir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Bilineer kinematik pekleşme modeli (Gibson, 2008)

SEM analizinde malzeme modeli olarak bilineer kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Namlu ve mandrel için kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Namlu malzemesi olarak AISI 4340 çeliği dikkate alınmıştır. Bu malzemenin akma mukavemeti (σ_y) 1195 MPa, tanjant modülü (T) ise 3723 MPa’dır. Mandrel malzemesi olarak ise namlu malzemesinden daha tok ve mukavemetli bir

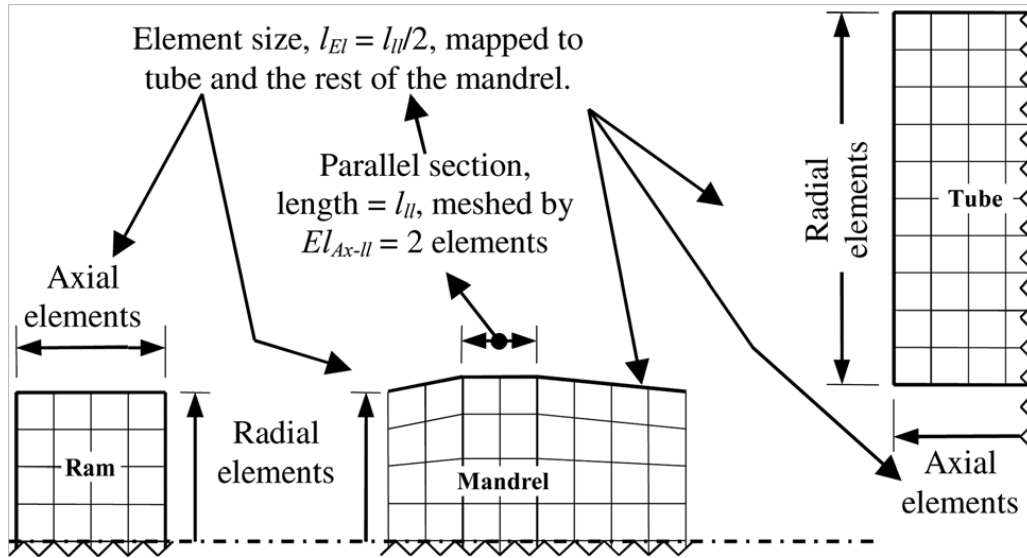
yapıya sahip olan WC (tungsten karbür) kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de verilen mandrel malzemesinin de mekanik özellikleri SEM modelinde tanımlanmıştır (Gibson, 2008).

Çizelge 3.1. SEM modelinde tanımlanan malzeme özellikleri

Namlu		Mandrel	
Parametre	Değer	Parametre	Değer
E (GPa)	200	E (GPa)	500
ν	0,3	ν	0,24
σ_y (MPa)	1195	σ_y (MPa)	-
T (MPa)	3723	T (MPa)	-

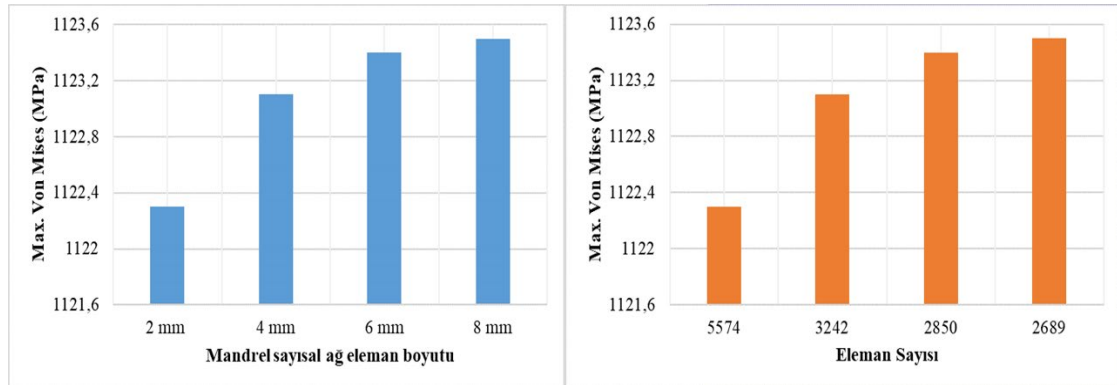
Mesh yapısı:

Çalışma kapsamında mekanik otofretaj SEM modeli için kullanılan mesh geometrisi ve boyutları Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Gibson ’un (Gibson 2008; Gibson vd., 2012, 2014) çalışmalarında, namlu ve mandrel için mesh yapısı oluştururken, optimum ve tutarlı gerilme değerleri elde edebilmek için, mesh duyarlılık çalışmalarının yapılması gerektiği ifade edilmektedir. Bu sebeple, mesh yapısı oluşturulurken mandrel üzerindeki düz bölgenin (l_{db}) kaç parçaya bölüneceği, gerilme dağılımlarının mertebesini ve hata oranını doğrudan etkilemektedir. Gibson’ın çalışmasında, mandrel üzerindeki düz bölgenin (l_{db}) kaç adet parçaya bölündüğü El_{AX-II} indisi ile belirtilmiştir. Çalışmada, mandrelin düz bölgesindeki eleman sayısı ile hata yüzdesinin değişimi grafik üzerinde çizdirildiği ve $El_{AX-II} \geq 4$ durumu için hata oranının göreceli olarak azaldığı tespit edilmiştir.



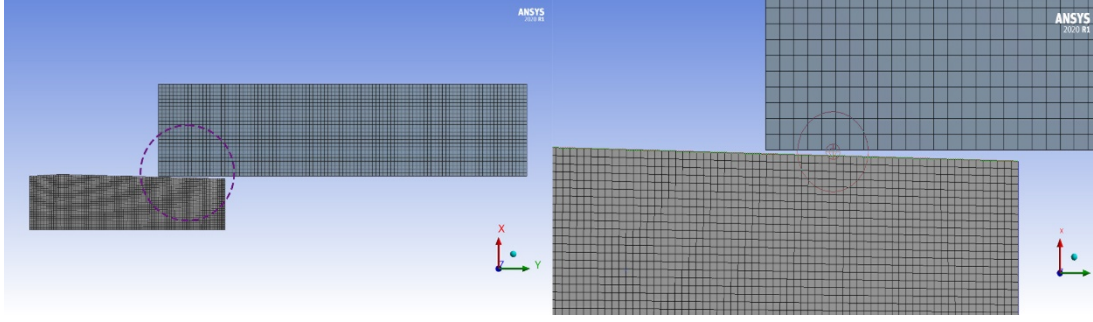
Şekil 3.10. Mekanik ofofretaj genel mesh yapısı (Gibson, 2008; Gibson vd., 2012, 2014)

Analiz sonuçlarının mesh sayısından bağımsız olup olmadığını göstermek için analizler mandrel mesh yapısı eleman boyutu değiştirilerek tekrarlanmıştır. Mandrelin düz bölgesi için sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 mm eleman boyutu kullanılarak mesh yapısı oluşturulmuştur. Bu boyutlara karşılık gelen eleman sayıları sırasıyla 5574, 3242, 2850 ve 2689'dur. Şekil 3.11'de gösterildiği gibi değişen mandrel mesh yapısı eleman boyutuna bağlı olarak 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin kayda değer seviyede değişmediği görülmüştür.



Şekil 3.11. Maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin farklı mesh eleman boyutlarına göre değişimi

Bu sonuçlar göre, mandrel için 2 mm, namlu için ise 4 mm boyutunda elemanlar kullanılmış ve oluşan mesh yapısı Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Namlu ve mandrel için düğüm/eleman sayısı (node/element) toplamda 17244/5574 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 3.12. SEM modeli mesh yapısı

3.2.Mekanik Otofretaj SEM Modeli Doğrulama Analizleri

Mekanik ofofretaj işleminin sonunda oluşan gerilmelerin ve işlem esnasında oluşan mil kuvvetinin sayısal olarak hesaplanması için SEM tabanlı ANSYS paket programı kullanılmıştır.

Literatürde bulunan O'hara ve Gibson'ın 2 boyutlu (2B) modelleri ile Hu'nun 3 boyutlu (3B) modeli tekrarlanarak tez kapsamında oluşturulan mekanik ofofretaj modelinin doğrulaması yapılmıştır.

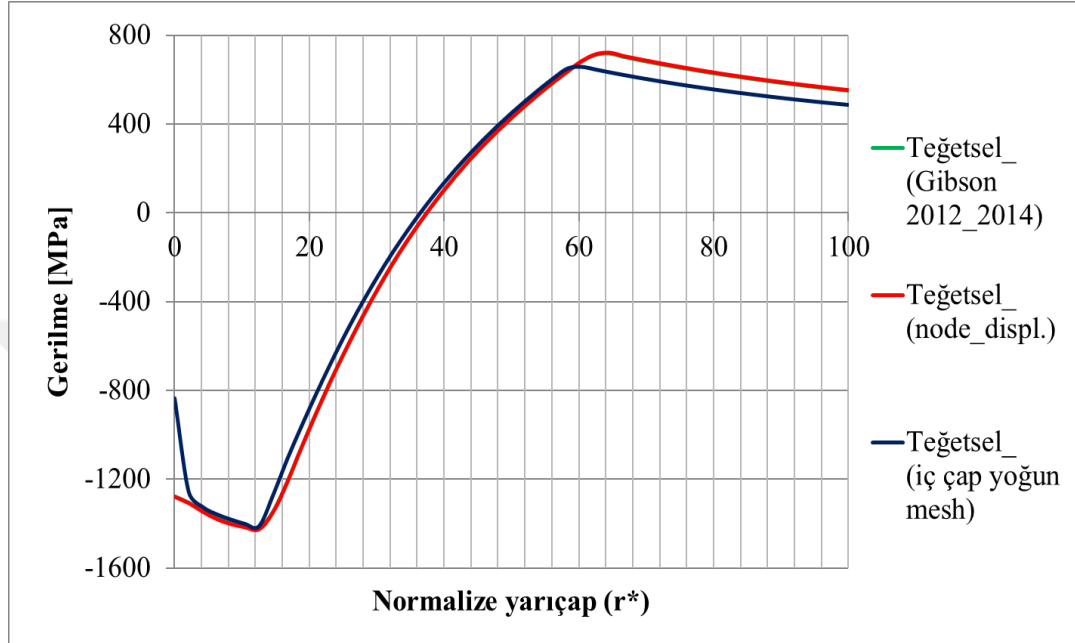
2B eksenel-simetrik SEM modeli doğrulama:

Çalışma kapsamında oluşturulan mekanik ofofretaj SEM modelinin doğruluğunu teyit etmek için Gibson'ın iki boyutlu (2B) modelleri referans alınmıştır. Bu amaçla, Gibson vd. (2012, 2014)'nin 2B analizleri ilgili geometri, malzeme, mesh yapısı ve sınır şartları kullanılarak yapılmış ve elde edilen teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmeleri sırasıyla Şekil 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16'da karşılaştırılmıştır. Burada yatay eksen, namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir ($r^* = (r-a) / (b-a) * 100$).

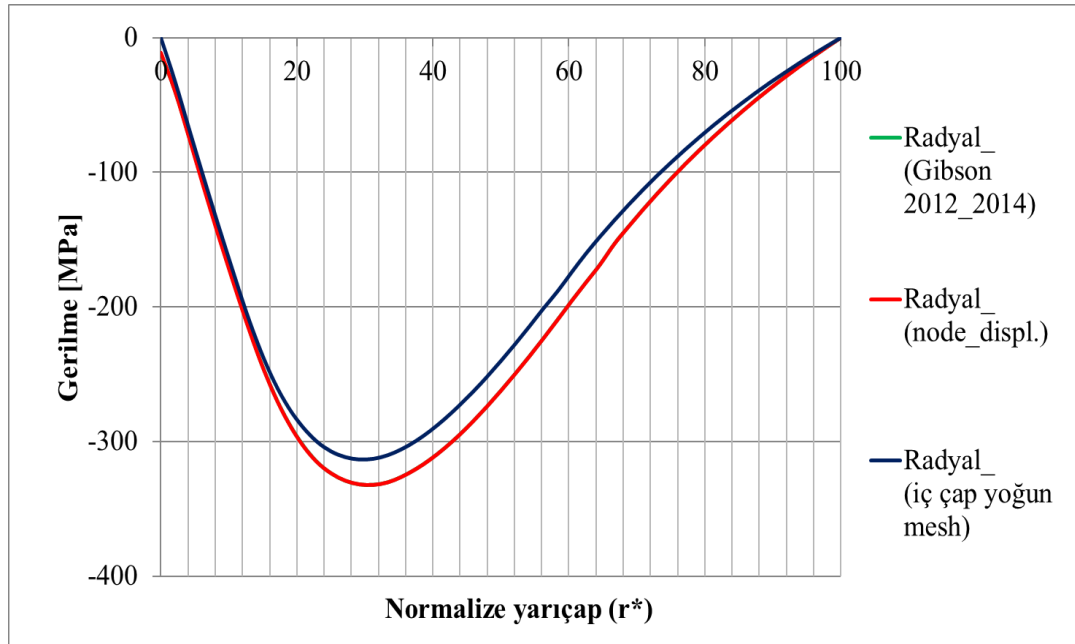
Referans çalışmaya ek olarak, mesh yapısı plastik deformasyonun kritik olduğu iç yüzeye yakın yerlerde daha yoğun oluşturulmuştur. Ayrıca O'hara, G.P. (1992)'nin yaptığı gibi, namlunun arka yüzeyi yerine, ofofretaj işlemi esnasında namluyu tutan çenelerin bulunduğu dış çaptaki düğüm noktasından sabitlenerek de (node displacement) analiz yapılmış ve sonuçları aynı şekillerde (Şekil 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16) gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, mekanik ofofretaj işlemi sonunda elde edilen teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin, yoğun mesh yapısının kullanıldığı

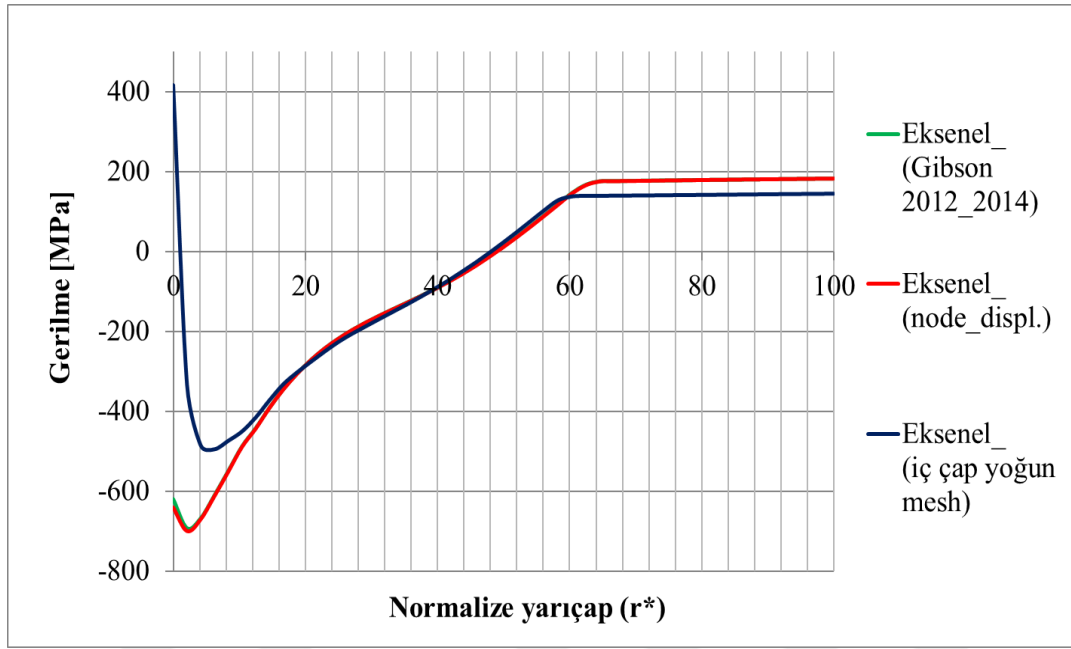
varyasyon hariç namlu iç çapına yakın konumda Gibson'ın (Gibson vd., 2012, 2014) gerilme dağılımları ile benzer olduğu görülmüştür. Sadece, namlu iç çapına yakın yerde yoğun mesh yapısının kullanıldığı analizde fark bir miktar fazla olmuştur. Diğer taraftan, namlu arka yüzeyinin ve dış çaptaki düğümün sabitlenmesi ile elde edilen sonuçlar birbiri üzerine çakışmıştır.



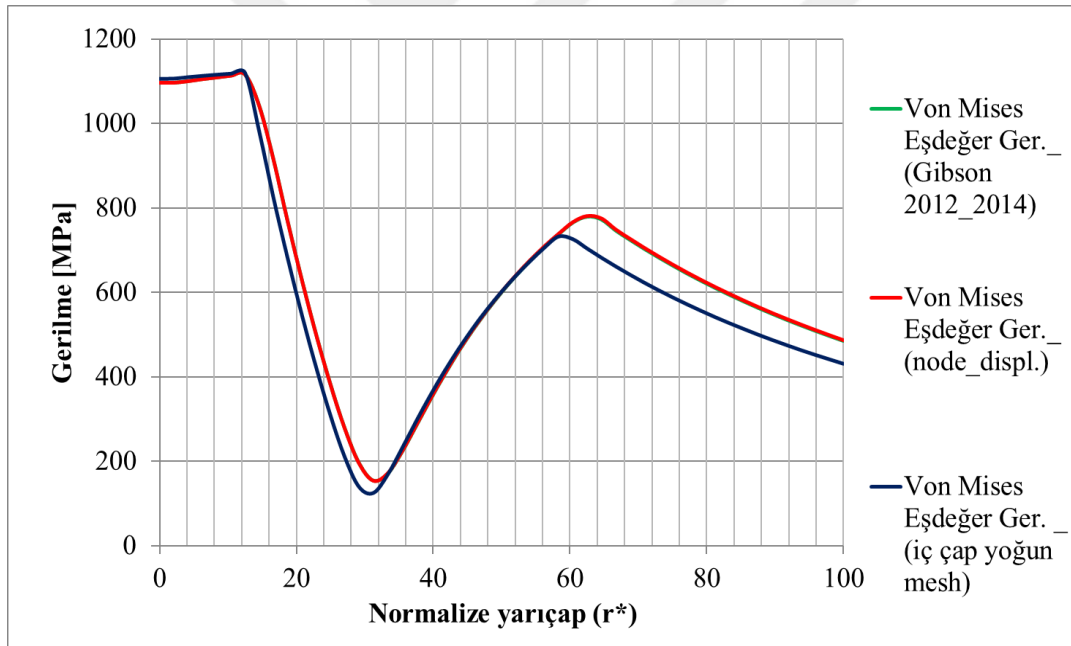
Şekil 3.13. 2B model teğetsel gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014)



Şekil 3.14. 2B model radyal gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014)



Şekil 3.15. 2B model eksenel gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014)



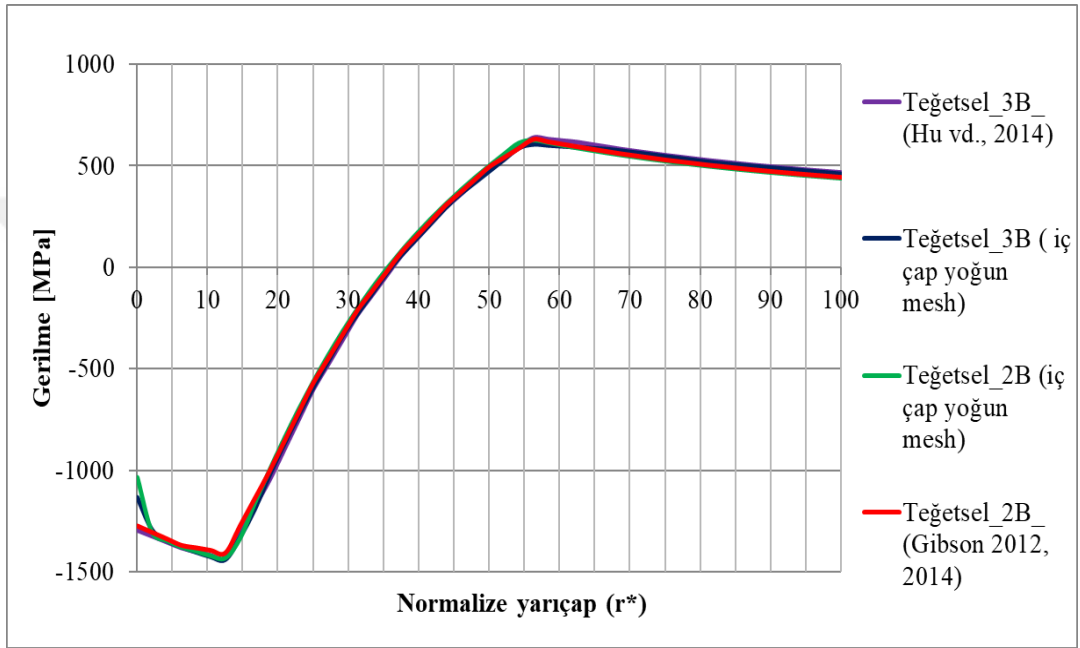
Şekil 3.16. 2B model Von Mises eşdeğer gerilme karşılaştırması (Gibson vd., 2012, 2014)

3B çeyrek SEM modeli doğrulama:

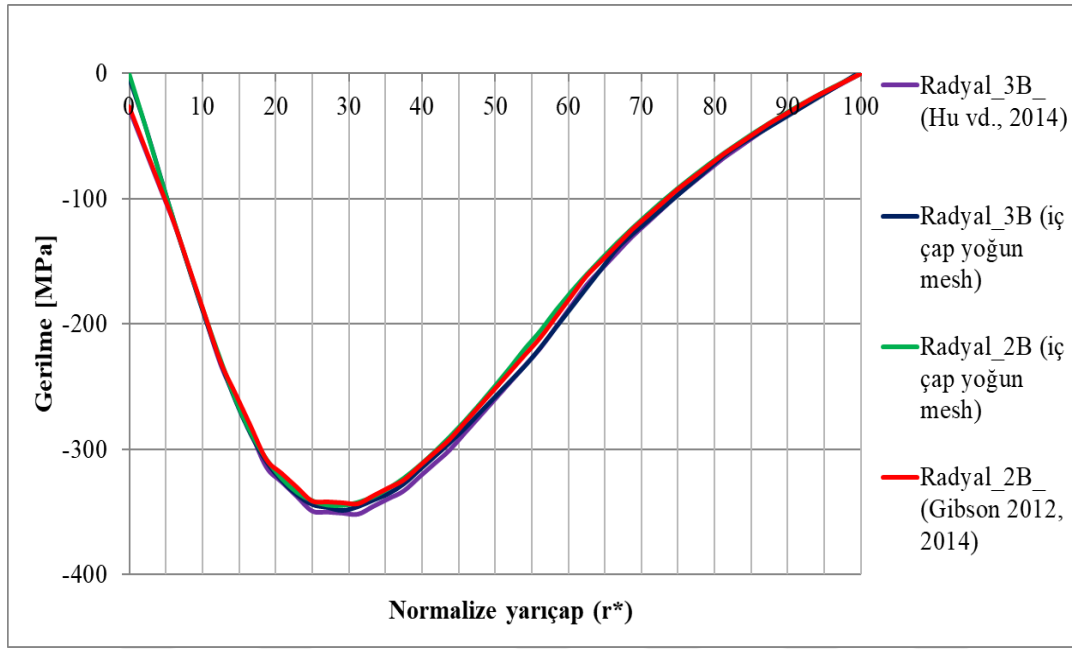
Benzer şekilde üç boyutlu (3B) analiz ile doğrulama çalışması yapmak için, Hu'nun (Hu vd., 2014; Hu, 2018) çalışmasındaki analiz adımları tekrarlanmıştır. Bu çalışmada verilen geometri için ayrıca 2B eksenel-simetrik analiz de yapılmıştır. Bu sayede 2B ve 3B model karşılaştırması yapılabilmiştir. Elde edilen teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmeleri sırasıyla Şekil 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20'de

karşılaştırılmıştır. Şekillerde ayrıca O'hara (O'hara, 1992) ve Gibson'ın (Gibson vd., 2012, 2014) 2B analiz sonuçları da gösterilmiştir Şekillerde görüldüğü gibi, bir cümle ile Hu'nun 3B sonuçları, bu geometri için yapılan 3B ve 2B sonuçları ve Gibson'ın 2B sonuçları birbiri ile örtüşmektedir.

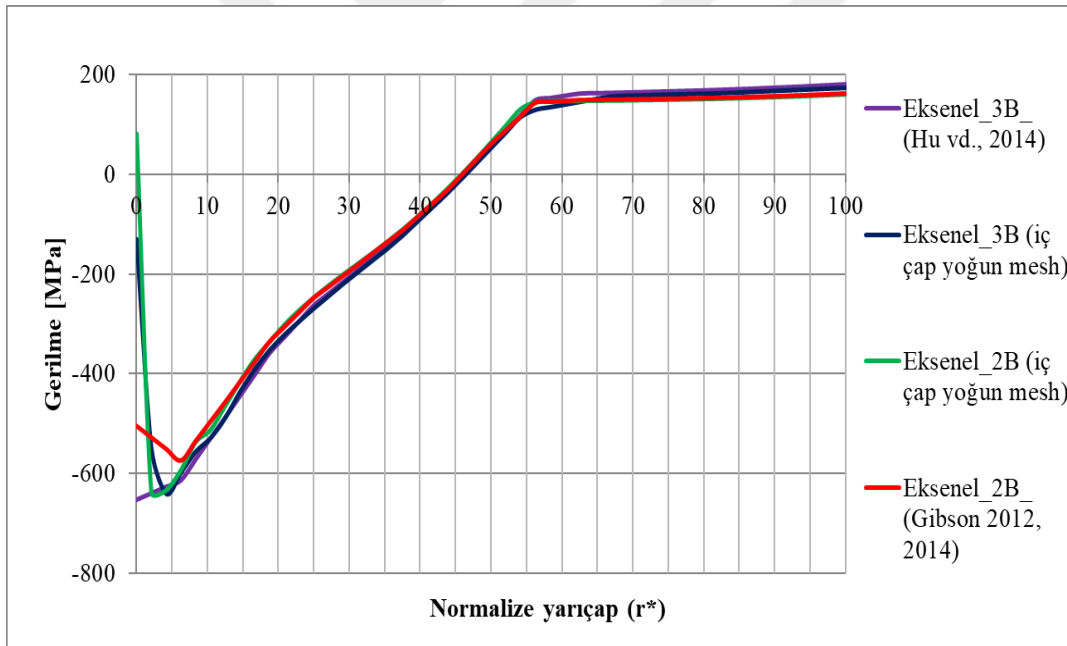
Sonuçlar incelendiğinde, yapılan iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizler için, namli iç çapına yakın yerde yoğun mesh yapısının kullanıldığı varyasyon hariç benzer gerilme dağılımlarının elde edildiği görülmüştür.



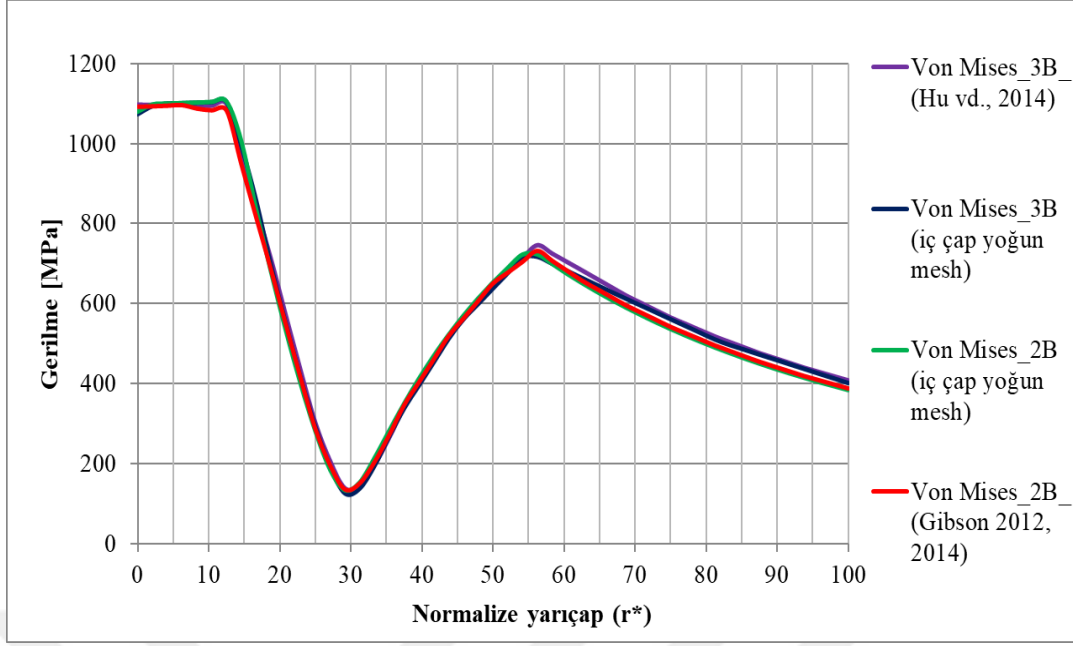
Şekil 3.17. 2B ve 3B model teğetsel gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014)



Şekil 3.18. 2B ve 3B model radyal gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014, Hu)



Şekil 3.19. 2B ve 3B model eksenel gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014, Hu)



Şekil 3.20. 2B ve 3B model Von Mises eşdeğer gerilme karşılaştırması (Hu vd., 2014, Hu)

Doğrulama çalışmalarının sonuçları incelendiğinde, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizlerde elde edilen gerilme dağılımlarının gerek literatürdeki referans çalışmalardaki sonuçlarla gerekse kendi aralarında tutarlı ve hata payının düşük olduğu görülmüştür. Ancak daha yoğun mesh yapısı ve sayısının oluşturulması ve analizlerin hızlı bir şekilde yakınsaması; ayrıca bu tez çalışması kapsamında ileriki bölümlerde bahsedilecek analiz matrisinde çok sayıda analiz gerçekleştirileceğinden dolayı, analizler iki boyutlu (2B) eksenel-simetrik model kullanılarak yapılmıştır.

4. HİDROLİK OTOFRETAJ SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında, otofretajsız ve hidrolik otofretajlı namluda çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.1’de gösterildiği üzere, inceleme matrisi 4 ana parametre içermektedir. Bunlar:

- 1) namlu çapı (d_b)
- 2) namlu malzemesinin akma mukavemeti (σ_y)
- 3) otofretaj basıncı (P_a)
- 4) çalışma basıncı (P_w)

parametreleridir. Çizelge 4.1’de pratik uygulamalardaki bu parametrelerin değerleri ve değişim aralıkları göz önüne alınarak bu parametreler için seçilen değerler listelenmiştir.

Parametrik analizler gerçekleştirilmeden önce bir referans analiz durumu belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de referans analiz için seçilen değerler koyu renkli ve altı çizili olarak gösterilmiştir.

Namlu çapı referans analizdeki değerlerin %0,66, %0,77, %0,98 ve %1’ne göre belirlenmiştir.

Namlu malzemesinin akma mukavemeti, namlu ısıtma işlem prosesinin alt ve üst limit değerlerini içerecek şekilde 1150, 1200 ve 1250 MPa olarak seçilmiştir.

Otofretaj basıncı olarak 536,45, 600, 670, 720, 780, 840, 893,13, 954,84 ve 1000 MPa olmak üzere 9 farklı değer belirlenmiştir. Minimum otofretaj basıncı olarak akmanın namlu iç yüzeyinde başladığı basınç olan 536,45 MPa seçilmiştir. Maksimum otofretaj basıncı olarak ise namlu malzemesinin tamamen plastik deformasyona uğradığı 1000 MPa değeri seçilmiştir.

Çalışma basıncı olarak ise 470, 570 ve 670 MPa değerleri seçilmiştir. Seçilen bu değerler, hidrolik otofretaj işlemi incelenen namluda kullanılan mühimmatın alt ve üst basınç değerleridir.

Çizelge 4.1. Hidrolik otofretaj işleminde incelenen parametreler ve bu parametrelere ait değerler

Parametreler	Değer									
Namlu çapı(d/d _b)	0,66	0,77	0,98	<u>1,00</u>						
Akma mukavemeti (MPa)	1150	<u>1200</u>	1250							
Otofretaj basıncı (MPa)	536,45	600	670	720	780	840	893,13	<u>954,84</u>	1000	
Çalışma basıncı (MPa)	470	570	<u>670</u>							

4.1. Analiz Matrisi

İnceleme parametrelerinin belirlenmesinin ardından, sistematik bir karşılaştırma ve değerlendirme yapabilmek için, Çizelge 4.2’de verilen bir analiz matrisi oluşturulmuştur. Analiz matrisinde görüldüğü gibi toplam analiz sayısı 34’dür. Burada, referans analiz, Analiz 1 olarak belirtilmiştir. Referans analizde (Analiz 1) namlu çapı 150,6 mm, namlu malzemesinin akma mukavemeti 1200 MPa, optimum otofretaj basıncı 954,8 MPa ve çalışma basıncı 670 MPa olarak belirlenmiştir. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak çap, akma mukavemeti, otofretaj basıncı ve çalışma basıncına göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Hidrolik otofretaj SEM modelinde geometri ve yükleme şartlarındaki düzlemsel simetriden dolayı, modelin bütününi temsil eden çeyrek daire kesiti kullanıldığı Bölüm 2.7’de belirtilmiş ve model bölgesi ve sınır şartları Şekil 2.6’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Hidrolik otofretaj analiz matrisi

Analiz #	d/d _b (mm/mm)	Akma Mukavemeti (MPa)	Otofretaj Basıncı (MPa)	Çalışma Basıncı (MPa)
1	1	1200	954,84	670
2	0,98	1200	954,84	670
3	0,77	1200	954,84	670
4	0,66	1200	954,84	670
5	1	1250	954,84	670
6	1	1200	954,84	670
7	1	1150	954,84	670
8	1	1200	536,45	670
9	1	1200	600	670
10	1	1200	670	670
11	1	1200	720	670
12	1	1200	780	670
13	1	1200	840	670
14	1	1200	893,13	670
15	1	1200	954,84	670
16	1	1200	1000	670
17	1	1200	536,45	570
18	1	1200	600	570
19	1	1200	670	570
20	1	1200	720	570
21	1	1200	780	570
22	1	1200	840	570
23	1	1200	893,13	570
24	1	1200	954,84	570
25	1	1200	1000	570
26	1	1200	536,45	470
27	1	1200	600	470
28	1	1200	670	470
29	1	1200	720	470
30	1	1200	780	470
31	1	1200	840	470
32	1	1200	893,13	470
33	1	1200	954,84	470
34	1	1200	1000	470

4.2. Hidrolik Otofretaj SEM Modeli Doğrulama Analizleri

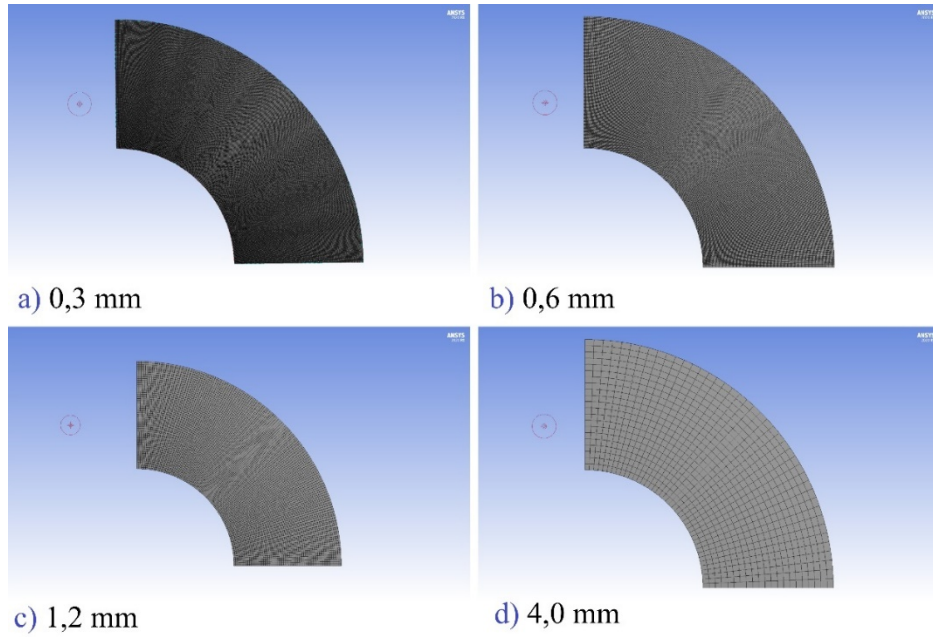
Çalışma kapsamında, 2B eksenel-simetrik SEM modelinden hesaplanan gerilme dağılımlarının doğruluğunu ve mesh yapısından, okuma yapılan açısız konumdan, çevresel model büyüklüğünden ve 2B / 3B modelden bağımsızlığını teyit etmek için doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

4.2.1. Mesh Bağımsızlık Analizleri

Sayısal çalışmalarda elde edilen gerilme dağılımlarının mesh sayısından bağımsızlığını teyit etmek için, mesh bağımsızlık analizleri yapılmıştır. İki boyutlu (2B) kesit için 4 farklı mesh sayısı durumunda Çizelge 4.3’ de gösterilen analizler yapılmıştır. Bu mesh sayılarına göre oluşan mesh görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Mesh bağımsızlık analizlerinde kullanılan mesh sayıları

Eleman boyutu	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
0,3	143.526	440.379
0,6	38.086	115.085
1,2	9.591	29.190
4,0	882	2.773

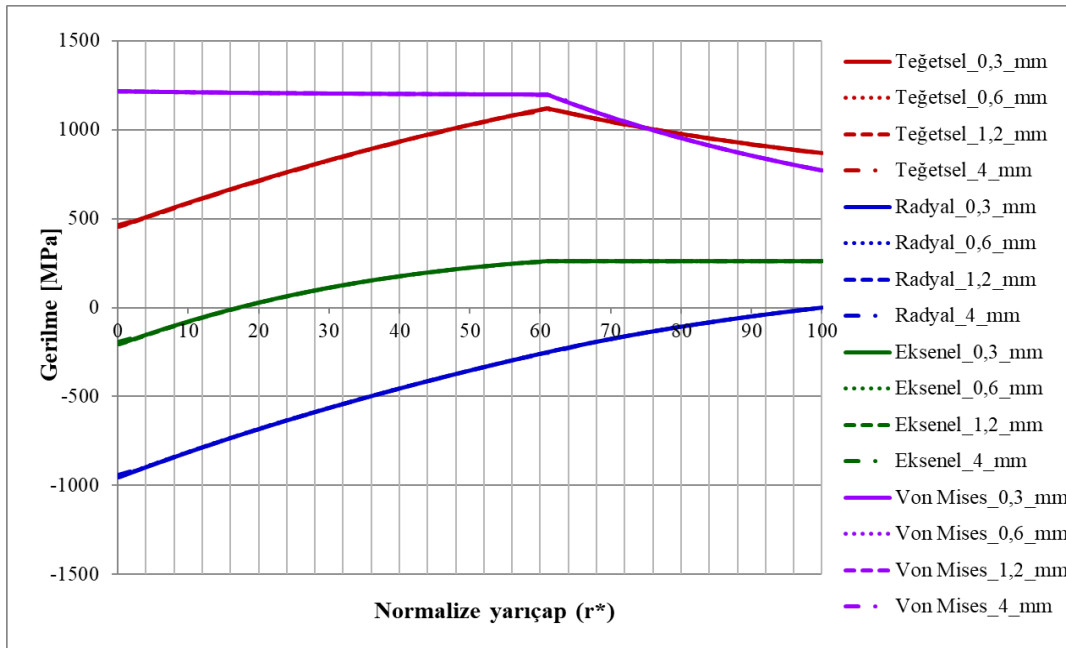


Şekil 4.1. Mesh bağımsızlık analizleri için mesh görüntüleri

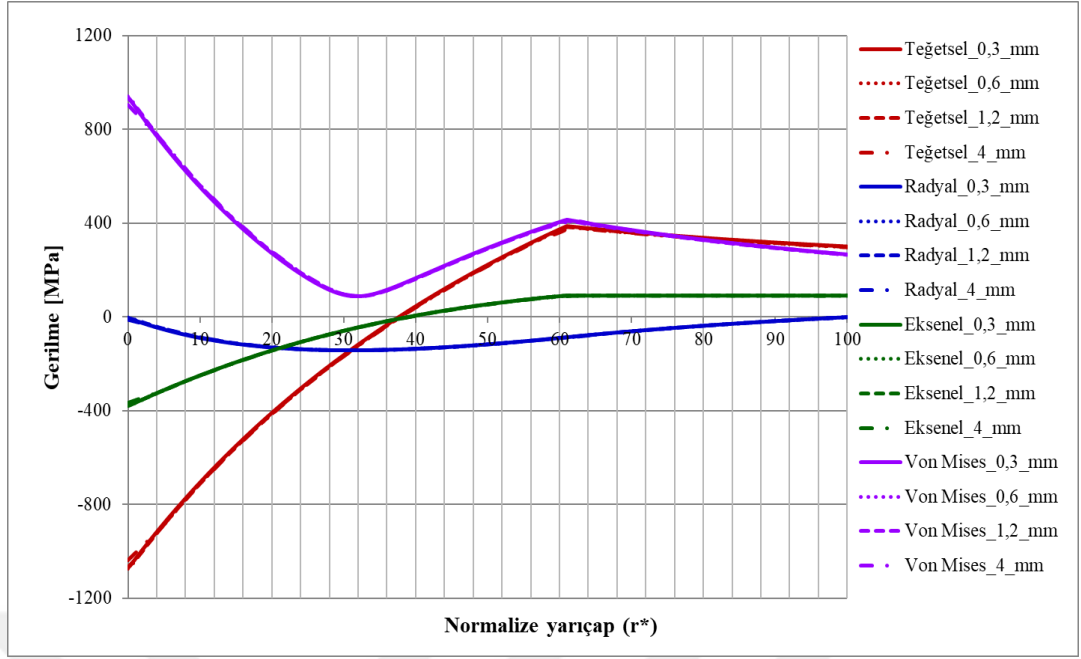
Hidrolik otofretajdaki aşağıdaki 3 aşama, SEM modelinde incelenmiştir.

- 1) Yükleme
- 2) Basınç kaldırma
- 3) Çalışma basıncı

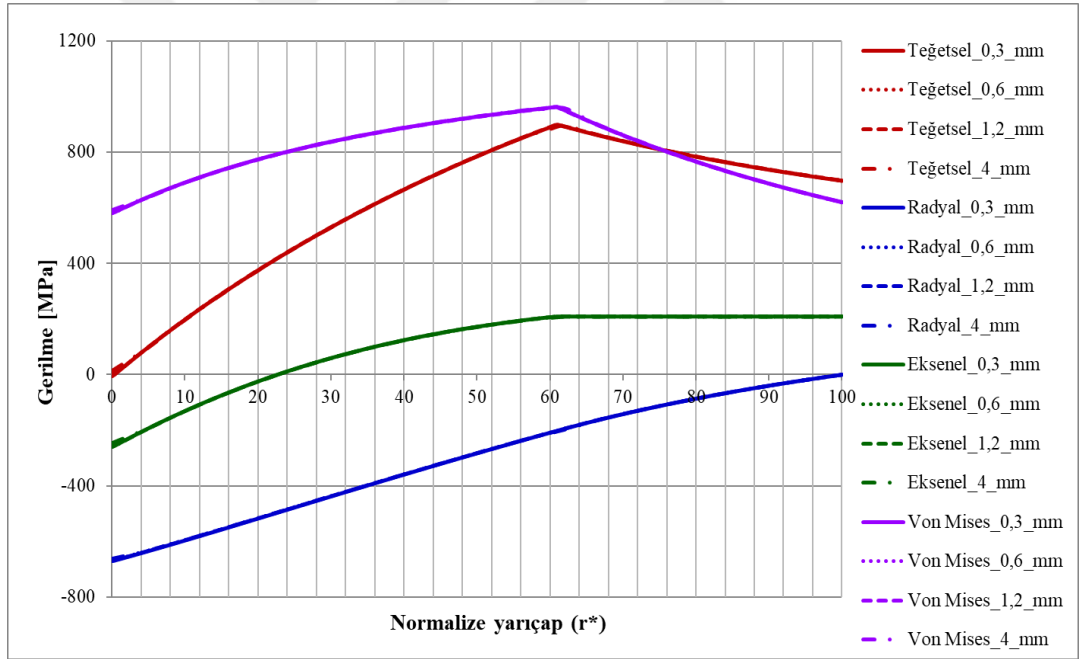
Yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı aşamaları sonunda elde edilen teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmeleri sırasıyla Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Şekillerde tüm aşamalarda elde edilen gerilme dağılımlarının yön ve mertebe bakımından farklılık göstermediği görülmektedir.



Şekil 4.2. Yükleme aşamasında mesh sayısına göre gerilme dağılımları



Şekil 4.3. Basınç kaldırma aşamasında mesh sayısına göre gerilme dağılımları

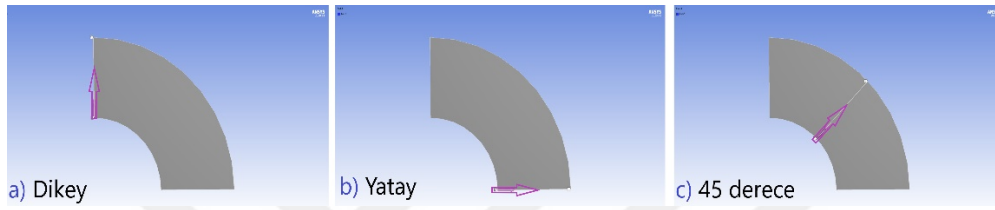


Şekil 4.4. Çalışma basıncı altında mesh sayısına göre gerilme dağılımları

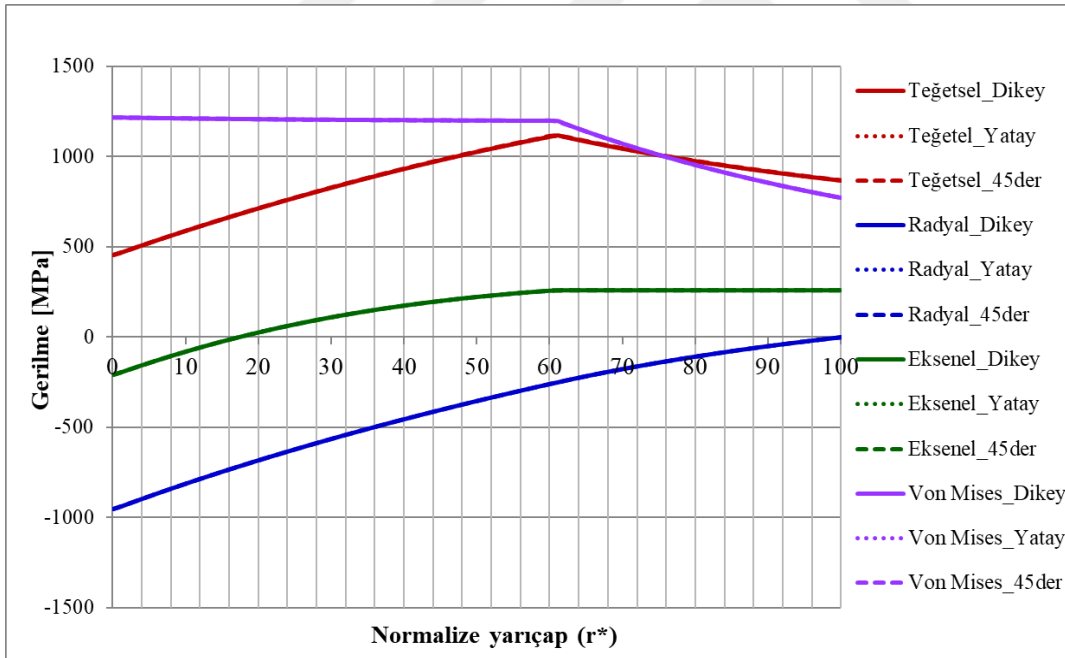
4.2.2. Okuma Yapılan Açısal Konumdan Bağımsızlık Analizi

Hidrolik otofretaj SEM modelinde geometri ve yükleme şartlarındaki düzlemsel simetriden dolayı, modelin bütününe temsil eden çeyrek daire kesitinin kullanıldığı Bölüm 2.7’de belirtilmiş ve model bölgesi ve sınır şartları Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Çeyrek modelde aşağıdaki Şekil 4.5’de gösterilen açısal çizgi konumlarında (dikey, yatay ve 45°) gerilme değerleri okunmuştur.

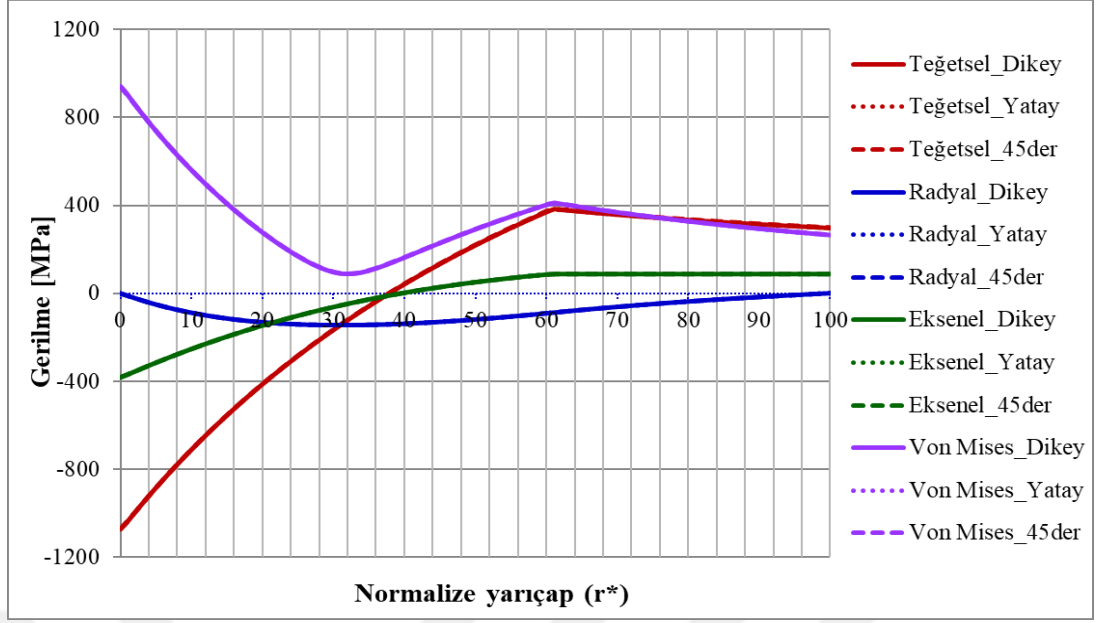
Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de verilen sonuçlar karşılaştırıldığında gerilme dağılımlarının yön ve mertebe bakımından farklılık göstermediği tespit edilmiştir. Bu sonuç beklenen bir sonuçtur ve doğruluğu teyit edilmiştir.



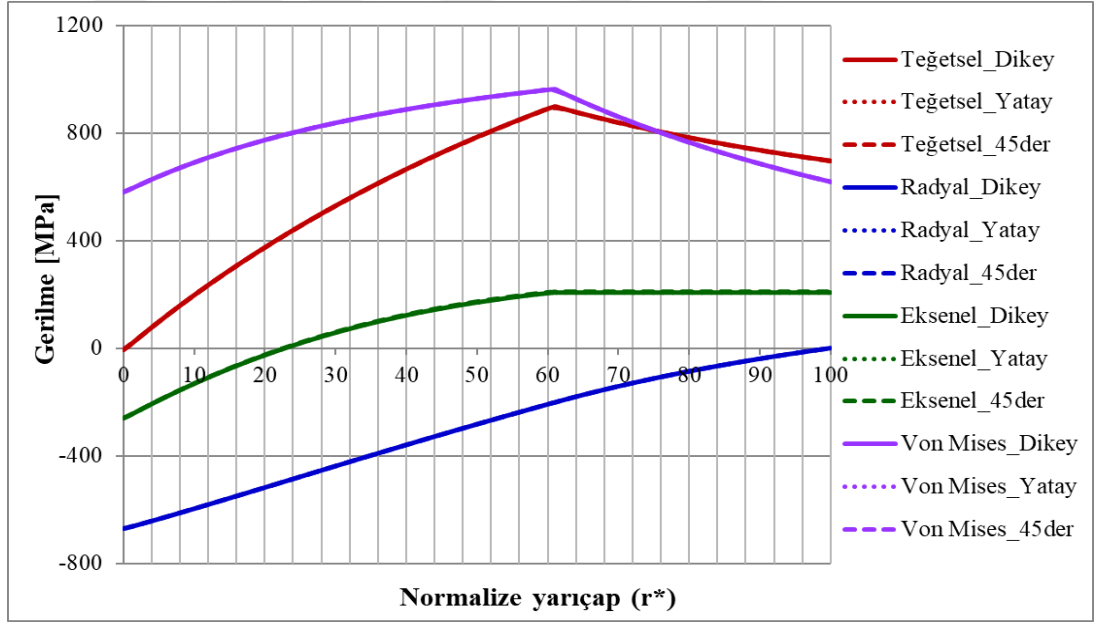
Şekil 4.5. Açısal çizgi konumları



Şekil 4.6. Yükleme aşamasında okuma yapılan açısal konuma göre gerilme dağılımları



Şekil 4.7. Basınç kaldırma aşamasında okuma yapılan açısız konuma göre gerilme dağılımları

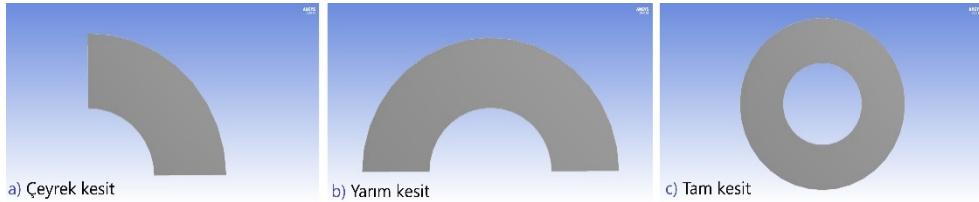


Şekil 4.8. Çalışma basıncı altında okuma yapılan açısız konuma göre gerilme dağılımları

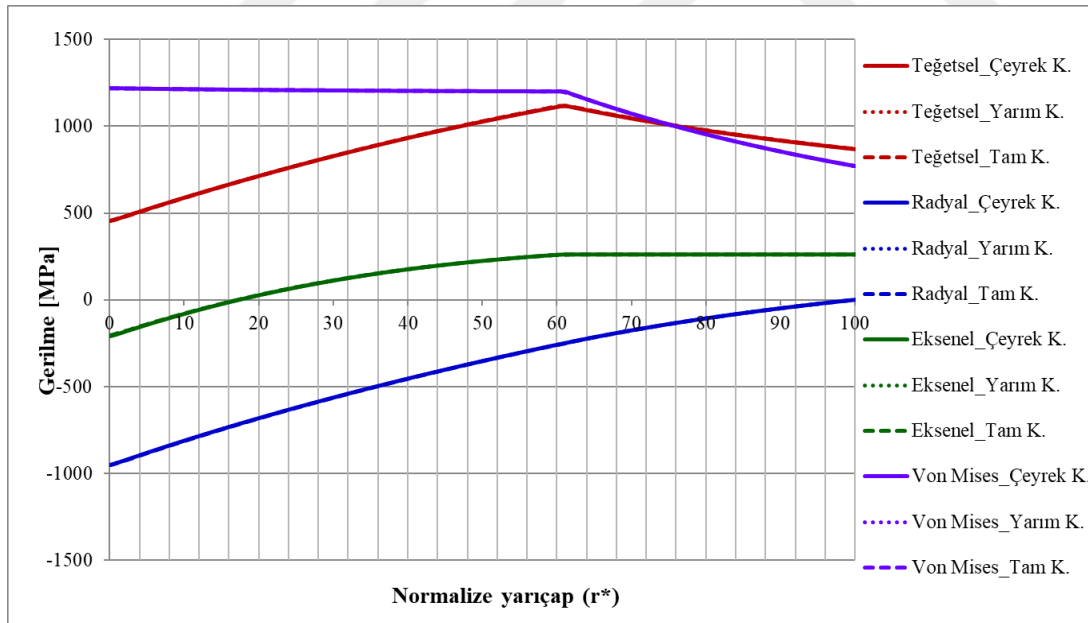
4.2.3. Çevresel Model Büyüklüğünden Bağımsızlık Analizi

Hidrolik otofretaj SEM modelinde geometri ve yükleme şartlarındaki düzlemsel simetriden dolayı, modelin bütünü temsil eden çeyrek daire kesitinin kullanıldığı Bölüm 2.7’de belirtilmiş ve model bölgesi ve sınır şartları Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Analizlerin çevresel model büyüklüğünden bağımsızlığını göstermek için, aşağıdaki şekilde (Şekil 4.9) gösterildiği gibi (çeyrek, yarım ve tam kesit) gerilme değerleri okunmuştur.

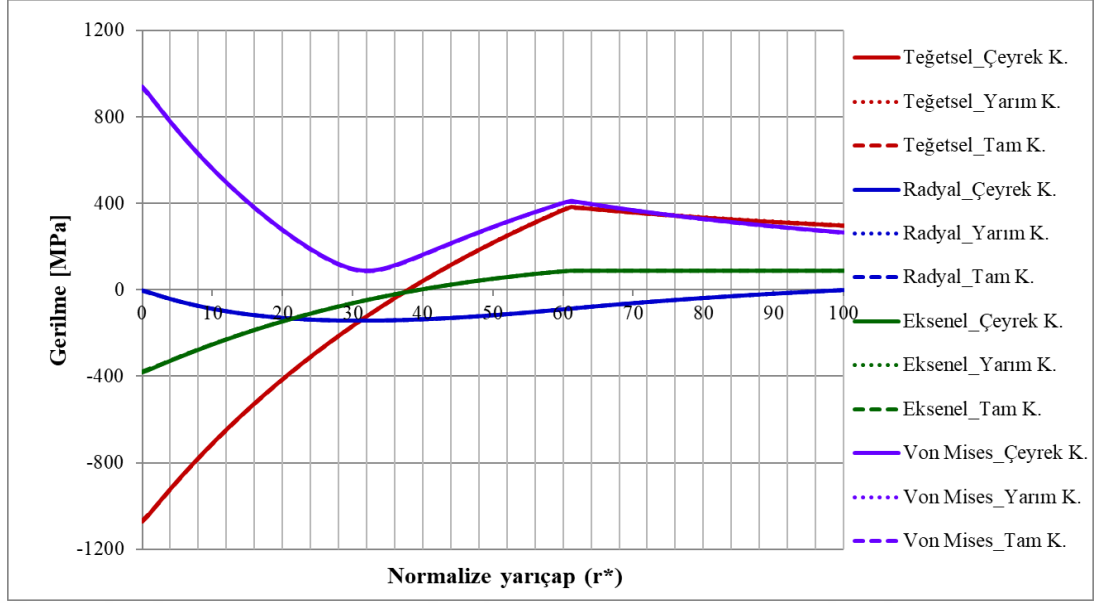
Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilen sonuçlar karşılaştırıldığında gerilme dağılımlarının yön ve merteye bakımından farklılık göstermediği tespit edilmiştir. Bu sonuç beklenen bir sonuçtur ve doğruluğu teyit edilmiştir.



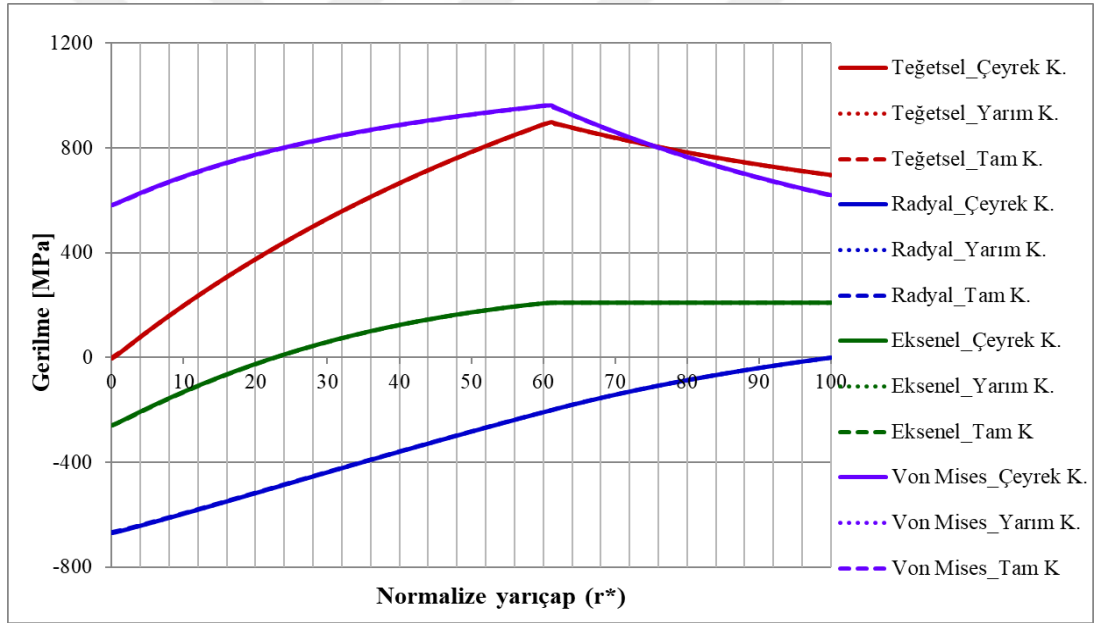
Şekil 4.9. Çevresel SEM modeli büyüklükleri



Şekil 4.10. Yükleme aşamasında çevresel SEM modeli büyüklüğüne göre gerilme dağılımları



Şekil 4.11. Basınç kaldırma aşamasında çevresel model büyüklüğüne göre gerilme dağılımları



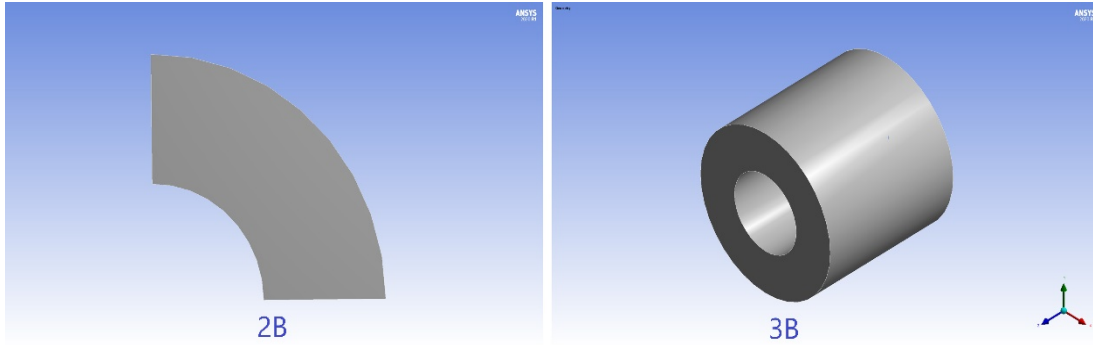
Şekil 4.12. Çalışma basıncı altında çevresel model büyüklüğüne göre gerilme dağılımları

4.2.4. 2B ve 3B Analiz Sonuçları

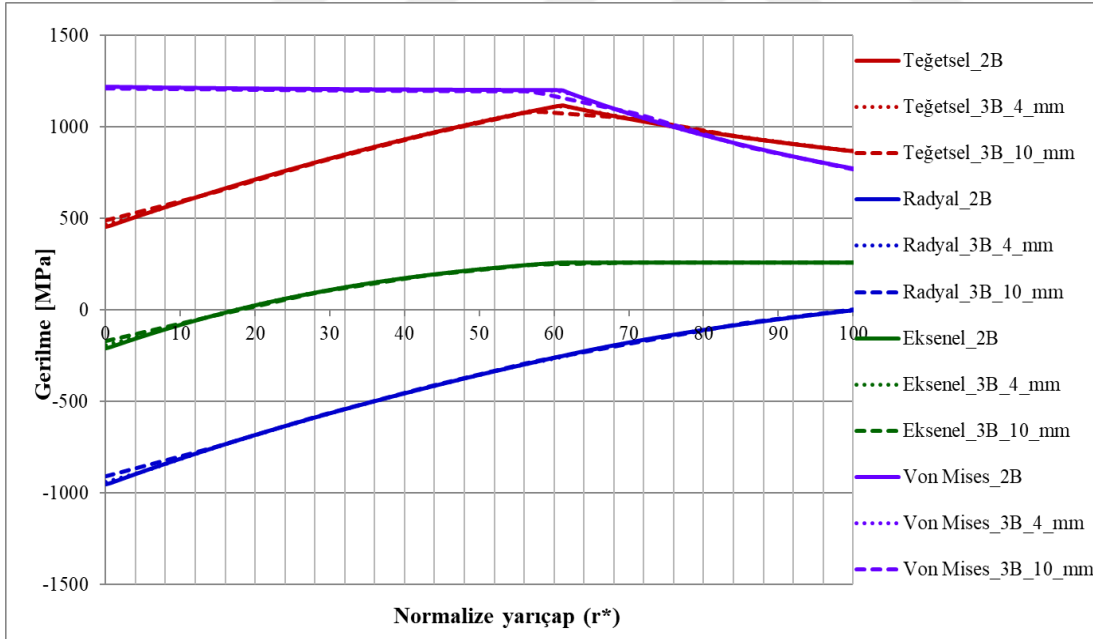
Hidrolik otofretaj SEM modelinde geometri ve yükleme şartlarındaki düzlemsel simetriden dolayı, modelin bütününe temsil eden çeyrek daire kesitinin kullanıldığı Bölüm 2.7’de belirtilmişti ve model bölgesi ve sınır şartları Şekil 2.6’da gösterilmişti. Analizlerin SEM modelinin boyutundan bağımsızlığını göstermek için, aşağıdaki şekilde (Şekil 4.13) gösterildiği gibi 2B ve 3B modeller ile analizler yapılmış ve gerilme değerleri okunmuştur. 2B analiz için 0,6 mm eleman boyutu kullanılan temel

analiz seçilmiştir. 3B analiz için ise için 4 mm ve 10 mm mesh eleman boyutuna sahip modeller kullanılmıştır

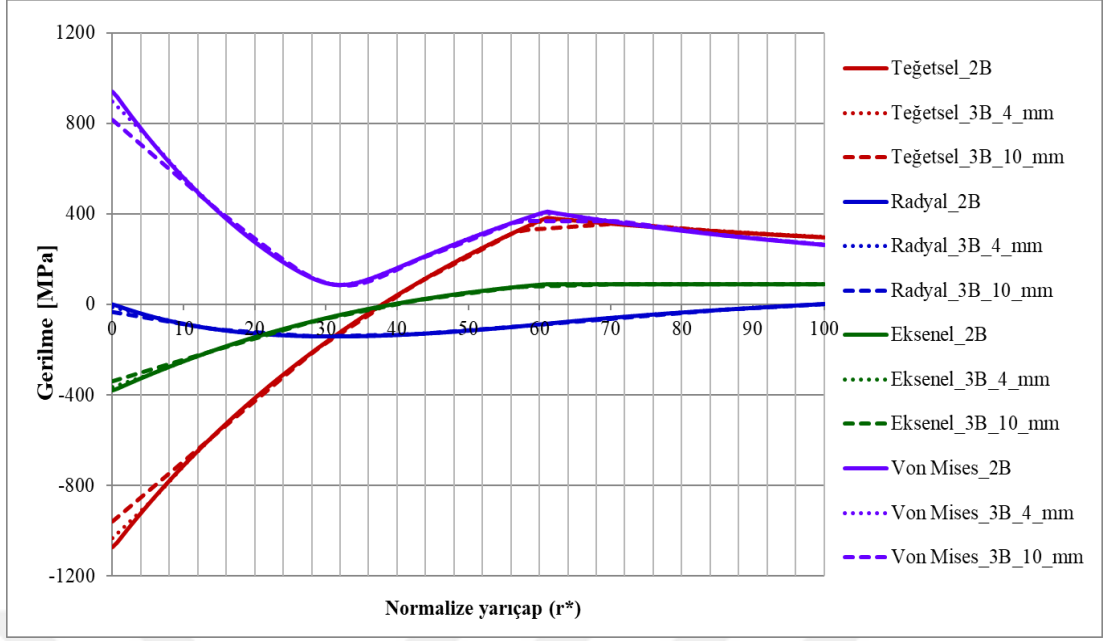
Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16’da verilen sonuçlar incelendiğinde, iki boyutlu (2B) modele göre, üç boyutlu (3B) modelde eleman boyutundan dolayı eleman ve düğüm (node) sayısı arttıkça elde edilen gerilmelerde sapmalar meydana geldiği görülmüştür. Kalıntı gerilmelerin seviyeleri incelendiğinde sapmalar olsa dahi, gerilme dağılımlarının yön ve merteye bakımından ciddi bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.



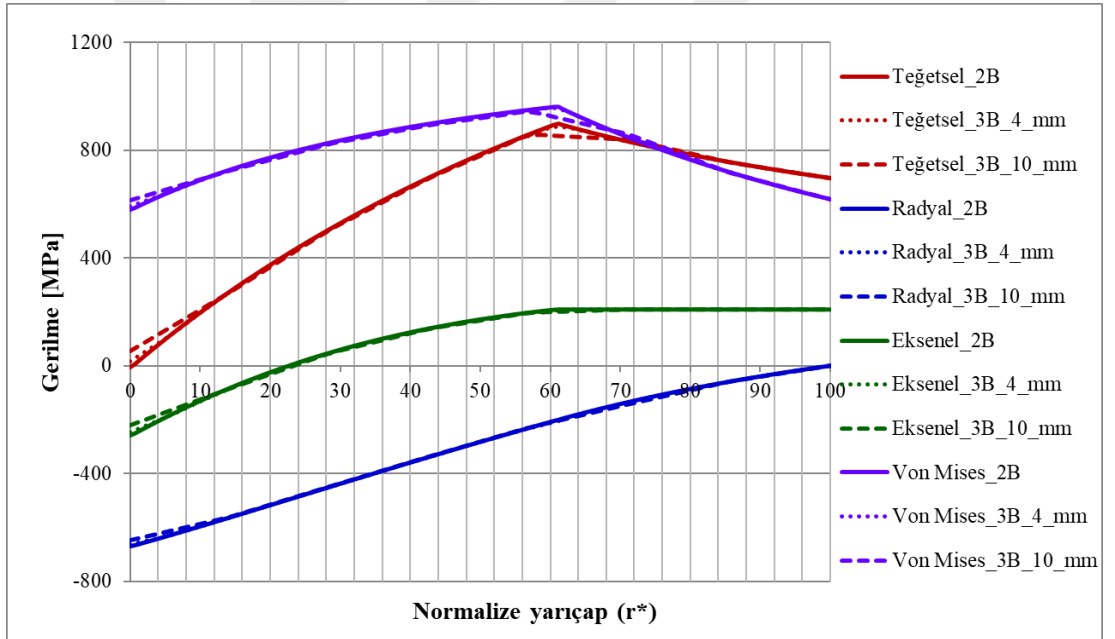
Şekil 4.13. 2B ve 3B SEM modelleri



Şekil 4.14. Yükleme aşamasında 2B ve 3B SEM modelinden elde edilen gerilme dağılımları



Şekil 4.15. Basınç kaldırma aşamasında 2B ve 3B SEM modelinden elde edilen gerilme dağılımları



Şekil 4.16. Çalışma basıncı altında 2B ve 3B SEM modelinden elde edilen gerilme dağılımları

4.3. Referans Analiz için Analitik ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Çalışması kapsamında ilk olarak referans analiz şartları için analitik olarak gerilme değerleri hesaplanmıştır ve SEM modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

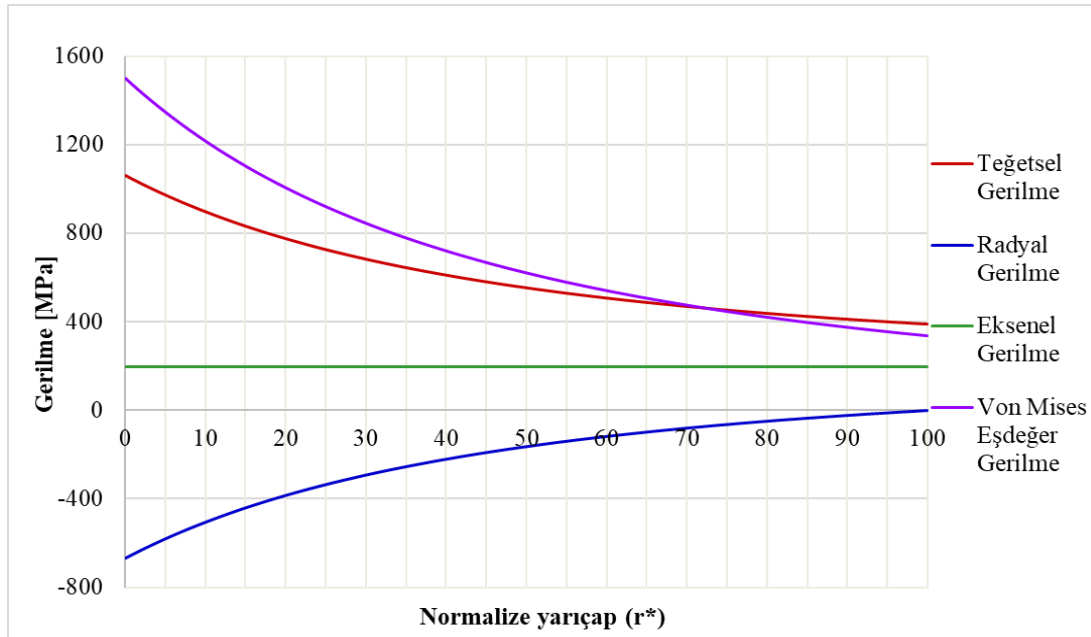
Analitik hesaplamalarda 2.1 ve 2.2 numaralı denklemler vasıtasıyla sırasıyla elastik-plastik geçiş yarıçapı ve optimum otofretaj basıncı hesaplanmıştır. Elde edilen bu

veriler ve diğer sabitlerle beraber 2.30'dan 2.47'e kadar olan bütün denklemler yardımıyla yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları hesaplanmıştır.

4.3.1. Analitik çözüm sonuçları:

Otofretajsız namlu: İlk olarak 670 MPa çalışma basıncı altında otofretajsız namluda oluşan gerilme dağılımları radyal doğrultuda Şekil 4.17'de verilmiştir. Yatay eksen namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir ($r^* = (r-a) / (b-a) * 100$). Düşey eksen ise teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri verilmiştir. Şekil 4.17 incelendiğinde, teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapında 1060,59 MPa değerinde olduğu, dış yarıçapta ise asimptotik olarak 390,59 MPa değerine düştüğü görülmektedir.

Radyal gerilme, iç yarıçaptan dış yarıçapa doğru, çalışma basıncı olan -670 MPa değerinden 0 MPa değerine düşmektedir. Eksenel gerilme, kalın cidarlı silindirlere meydana gelen gerilmelerin doğası gereği çok düşük seviyede 200 MPa'nın altında kalmıştır. Von Mises eşdeğer gerilme değeri ise 1498,73 MPa değerinde oluşmuştur. Namlu malzemesinin akma mukavemeti olan 1200 MPa değerinin üzerinde olan bu değerin, yorulma ömrü ve çatlak başlangıcı ile birlikte kırılma olayının oluşma riskini olumsuz yönde etkileyeceğini söylemek mümkündür.



Şekil 4.17. Analitik çalışmada otofretajsız namluda gerilme dağılımları

Şekil 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de hidrolik otofretaj aşamalarından yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı uygulama işlemlerinden sonra analitik olarak elde edilen gerilme dağılımlarının normalize edilmiş yarıçapa göre değişimleri gösterilmiştir.

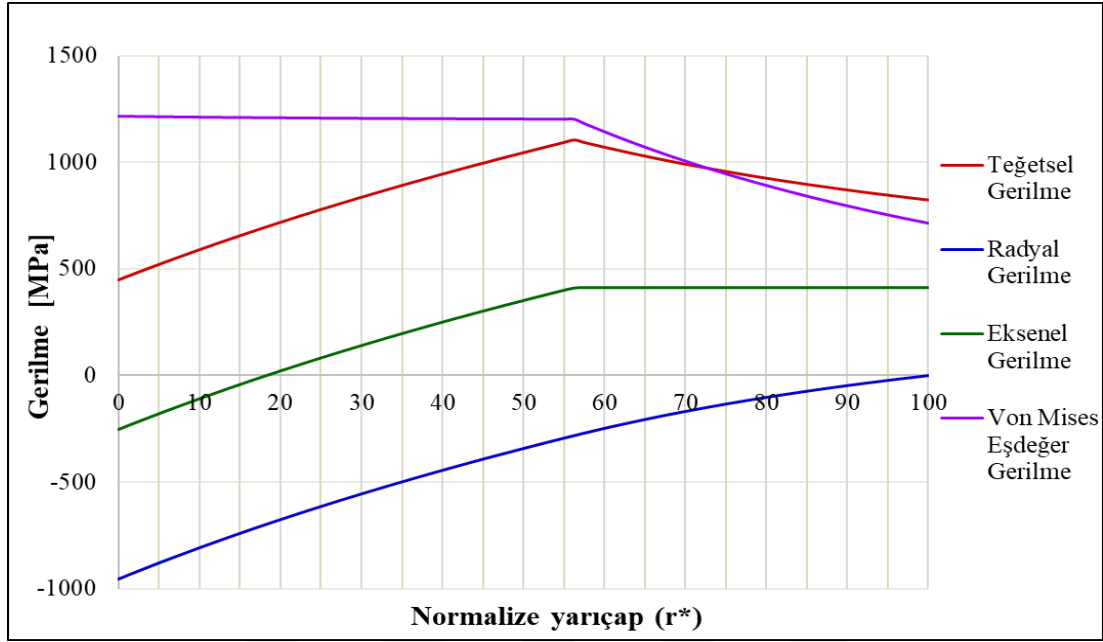
Yükleme aşaması: Şekil 4.18’de yükleme aşamasının sonunda, Von Mises eşdeğer gerilme değerinin elastik-plastik sınır yarıçapı değerine kadar (cidar kalınlığının %56’sı) yaklaşık 1203 MPa değerinde sabit şekilde olduğu görülmektedir. Daha sonra eşdeğer gerilme doğrusal bir şekilde 712,36 MPa değerine düşmektedir. Benzer şekilde teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapından elastik plastik geçiş yarıçapına kadar 447,03 MPa değerinden 1104,10 MPa değerine kadar arttığı; ardından namlu dış yarıçapında 822,57 MPa değerine düştüğü görülmektedir.

Basınç kaldırma: Şekil 4.19’da basınç kaldırma işleminin sonunda, teğetsel gerilmenin iç yarıçapta negatif olarak -1064,46 MPa olduğu ve cidar kalınlığının %56’sına denk gelen konumda pozitif olarak 356,93 MPa ile en yüksek değerini aldığı görülmektedir. Teğetsel gerilmenin basınç kaldırma aşamasında namlu cidar kalınlığı boyunca yönlendirildiği ve çatlak başlangıcı riskinin büyük olduğu iç yüzeyde bası (-) yönünde olduğu açıkça görülmektedir. Burada bası (-) yönünde oluşturulan kalıntı gerilmenin önemi ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak Von Mises eşdeğer gerilme değerinin namlu cidar kalınlığı boyunca dalgalı bir seyir gösterdiğini söylemek mümkündür. Eşdeğer gerilme iç yarıçapta 921,84 MPa’dan namlu cidar kalınlığının %30’na karşılık gelen yerde 6,84 MPa değerine düşmektedir. Ardından elastik plastik geçiş yarıçapında eşdeğer gerilme 387,84 MPa değerini almakta ve azalarak dış yarıçapta 230,29 MPa değerini almaktadır.

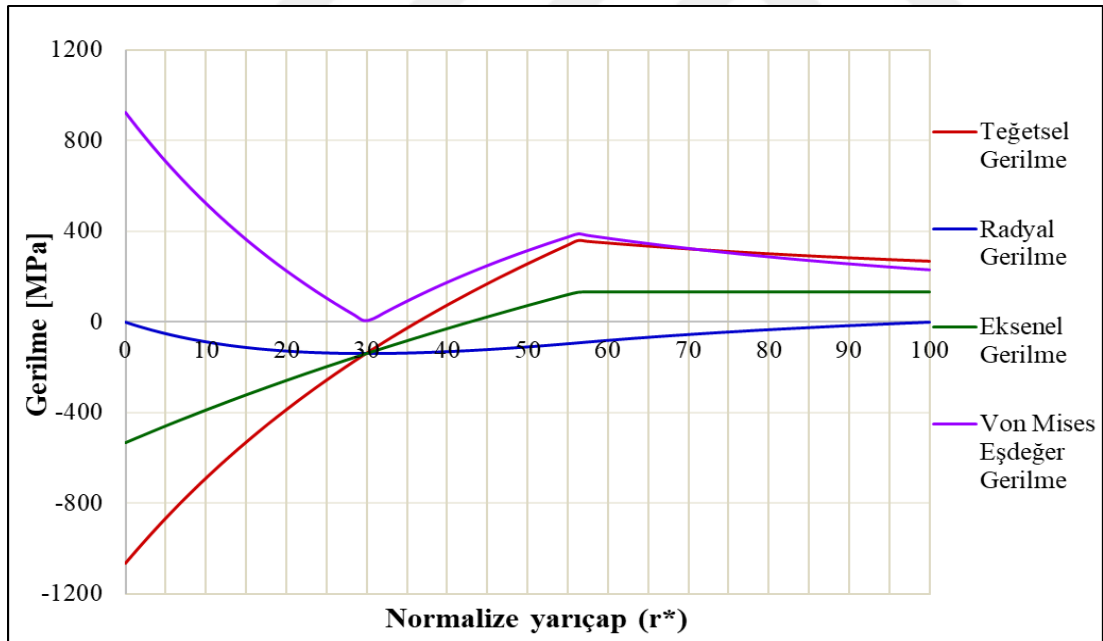
Çalışma basıncı: Şekil 4.20’de ise çalışma basıncı uygulanmasının ardından oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir. Elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde eşdeğer gerilme 957,75 MPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.17’de otofretajsız namluda oluşan 1498,73 MPa Von Mises eşdeğer gerilme değeri dikkate alındığında, otofretaj işlemi sonunda eşdeğer gerilmenin maksimum değerinin %36 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Otofretajsız ve otofretajlı: Şekil 4.21’de verilen otofretajsız ve otofretajlı namluda oluşan gerilme dağılımlarına bakıldığında; otofretajsız namluda eşdeğer gerilmelerin konuma göre sürekli düştüğü, buna karşın otofretajlı namluda eşdeğer gerilmelerin belirli bir değere kadar arttığı, ardından azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak,

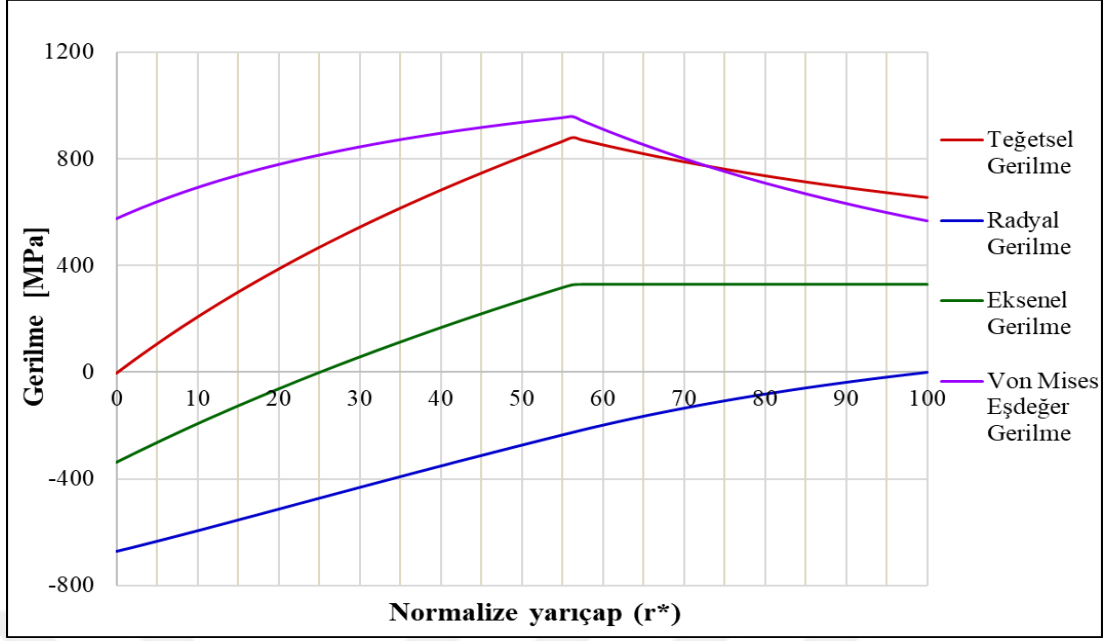
otofretajlı namlunun ofofretajsız namluya göre daha yüksek basınç taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.



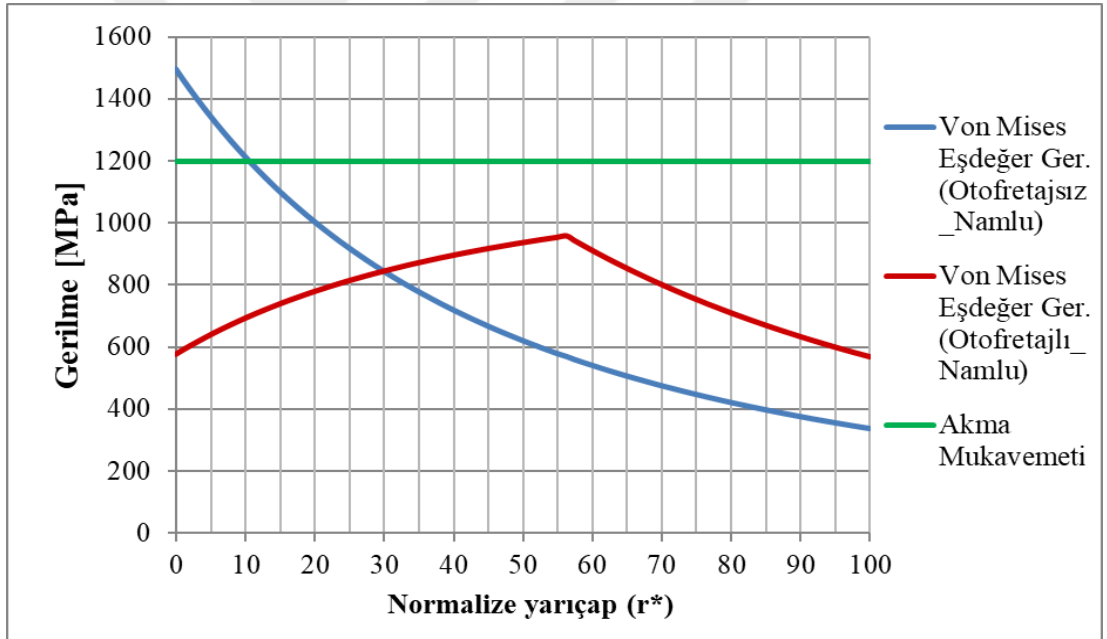
Şekil 4.18. Analitik çalışmada yükleme aşamasında gerilme dağılımları



Şekil 4.19. Analitik çalışmada basınç kaldırma aşamasında gerilme dağılımları



Şekil 4.20. Analitik çalışmada çalışma basıncı altında gerilme dağılımları



Şekil 4.21. Analitik çalışmada von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

4.3.2. Sayısal çözüm sonuçları:

Sayısal hesaplamalarda, SEM modelinde otofretaj aşamaları ardışık olarak namlu iç yarıçapına sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Otofretaj basıncı doğrusal olarak 0'dan 954,8 MPa kadar artırılarak namlu iç yarıçapına uygulanmış; ardından 30 saniye boyunca doğrusal olarak azaltılarak kaldırılmıştır. Hemen ardından çalışma basıncı namlu iç yarıçapına iç balistik döngü süresince uygulanmıştır. SEM analizinde elde

edilen gerilme dağılımları analitik çalışmaya benzer olarak yükleme aşamasının sonunda (30. saniye) (Şekil 4.23), basınç kaldırma aşamasının sonunda (60. saniye) (Şekil 4.24) ve çalışma basıncının uygulanmasının (60,02. saniye) (Şekil 4.25) ardından çizdirilmiştir.

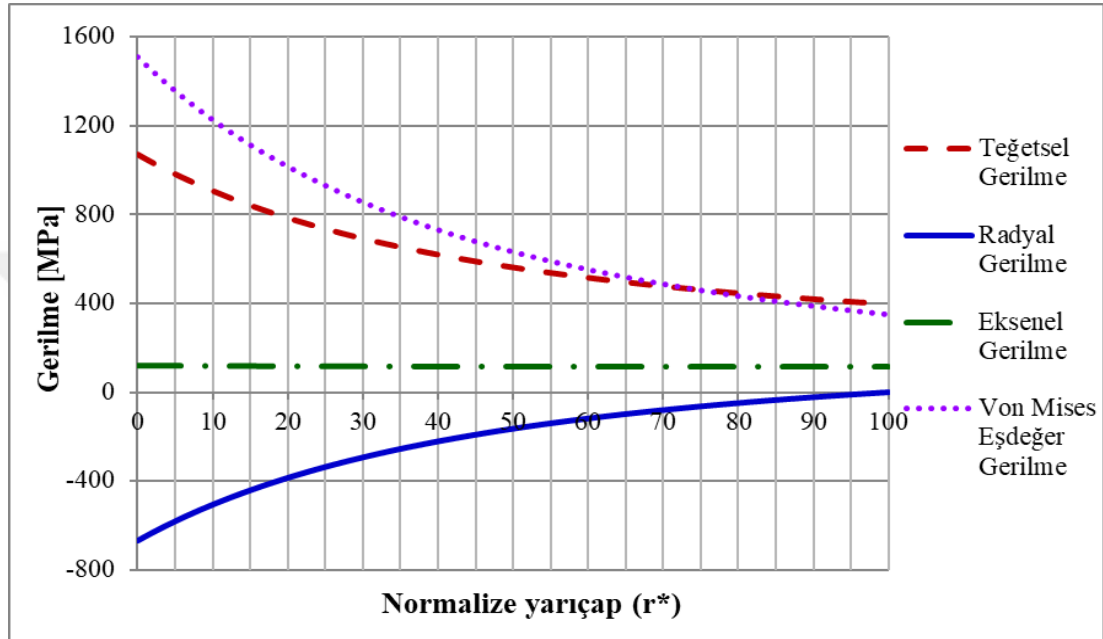
Otofretajsız namlu: Şekil 4.22’de otofretajsız namluda oluşan gerilme dağılımları radyal doğrultuda verilmiştir. Yatay eksen namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir ($r^*=(r-a) / (b-a) *100$). Düşey ekseninde ise teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri verilmiştir. Şekil 4.22 incelendiğinde, teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapında 1067,7 MPa değerinde olduğu, dış yarıçapta ise asimptotik olarak 394,42 MPa değerine düştüğü görülmektedir.

Yükleme aşaması: Şekil 4.23’de yükleme aşamasının sonunda, Von Mises eşdeğer gerilme değerinin plastik deformasyondan dolayı elastik-plastik sınır yarıçapına kadar (cidar kalınlığının %61’i) yaklaşık 1218,8 MPa değerinde sabit olduğu görülmektedir. Daha sonra bu eşdeğer gerilme doğrusal bir şekilde 772,3 MPa değerine düşmektedir. Benzer şekilde, teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapından elastik-plastik geçiş yarıçapına kadar 453,9 MPa’dan 1119,8 MPa değerine kadar arttığı; ardından namlu dış yarıçapında 868,8 MPa değerine düştüğü görülmektedir.

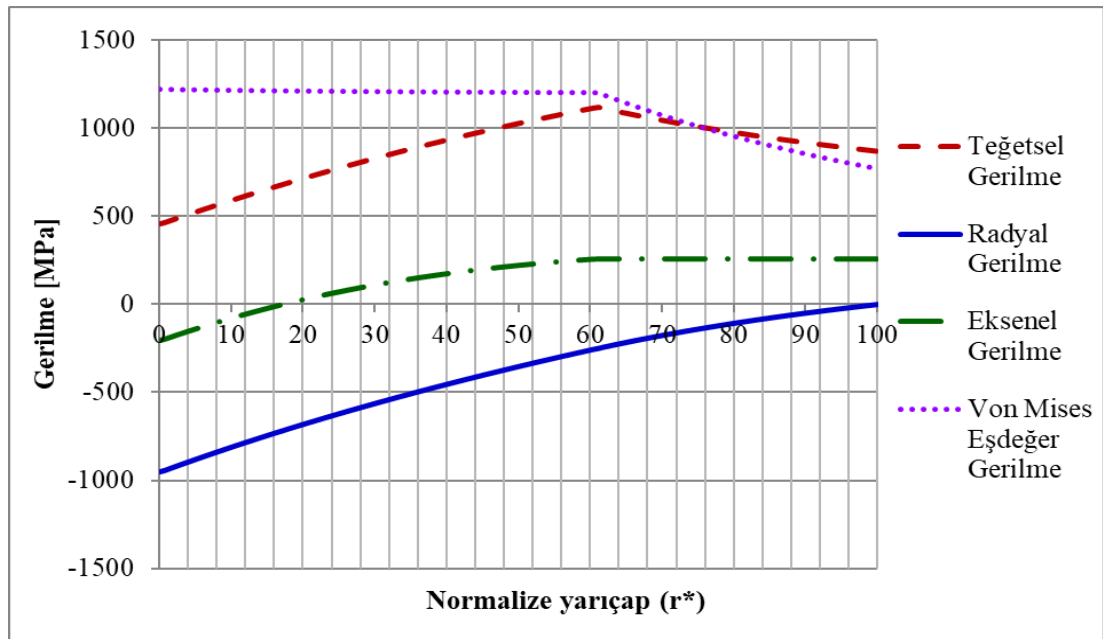
Basınç kaldırma: Şekil 4.24’de basınç kaldırma işleminin sonunda, teğetsel gerilmenin iç yarıçapta negatif olarak -1073,3 MPa olduğu ve cidar kalınlığının %61’ne denk gelen konumda pozitif olarak 394,1 MPa ile en yüksek değerini aldığı görülmektedir. Teğetsel gerilmenin basınç kaldırma aşamasında namlu cidar kalınlığı boyunca yönlendirildiği ve çatlak başlangıcı riskinin büyük olduğu iç yüzeyde bası (-) yönünde olduğu açıkça görülmektedir. Bu noktada bası (-) yönünde oluşturulan kalıntı gerilmenin önemi ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak Von Mises eşdeğer gerilme değerinin namlu cidar kalınlığı boyunca dalgalı bir seyir gösterdiğini söylemek mümkündür. Eşdeğer gerilme iç yarıçapta 941,5 MPa’dan namlu cidar kalınlığının %32’ne karşılık gelen konumda 87,5 MPa değerine düşmektedir. Ardından elastik plastik geçiş yarıçapında eşdeğer gerilme 411,5 MPa olmakta ve azalarak dış yarıçapta 264,7 MPa değerini almaktadır.

Çalışma basıncı: Şekil 4.25'te ise çalışma basıncının uygulanmasının ardından oluşan gerilme dağılımı gösterilmiştir. Elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde eşdeğer gerilme 961,9 MPa olarak belirlenmiştir.

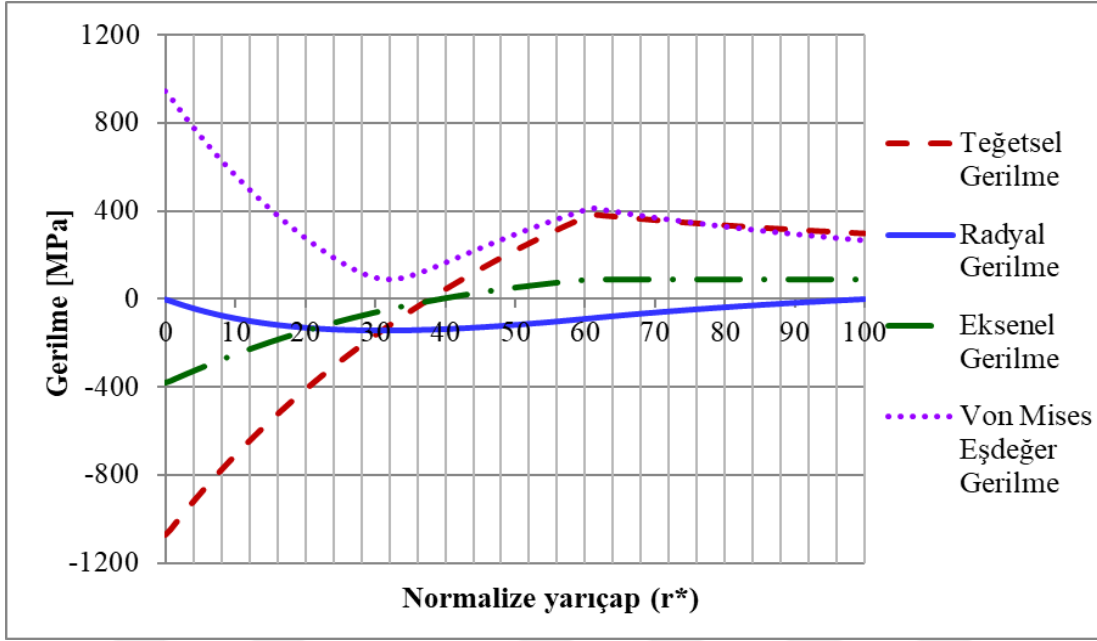
Otofretajsız ve otofretajlı: Şekil 4.22'de otofretajsız namluda oluşan 1507,0 MPa Von Mises eşdeğer gerilme değeri dikkate alındığında, otofretaj işlemi sonunda eşdeğer gerilme maksimum değerinin %36 oranında azaldığı tespit edilmektedir.



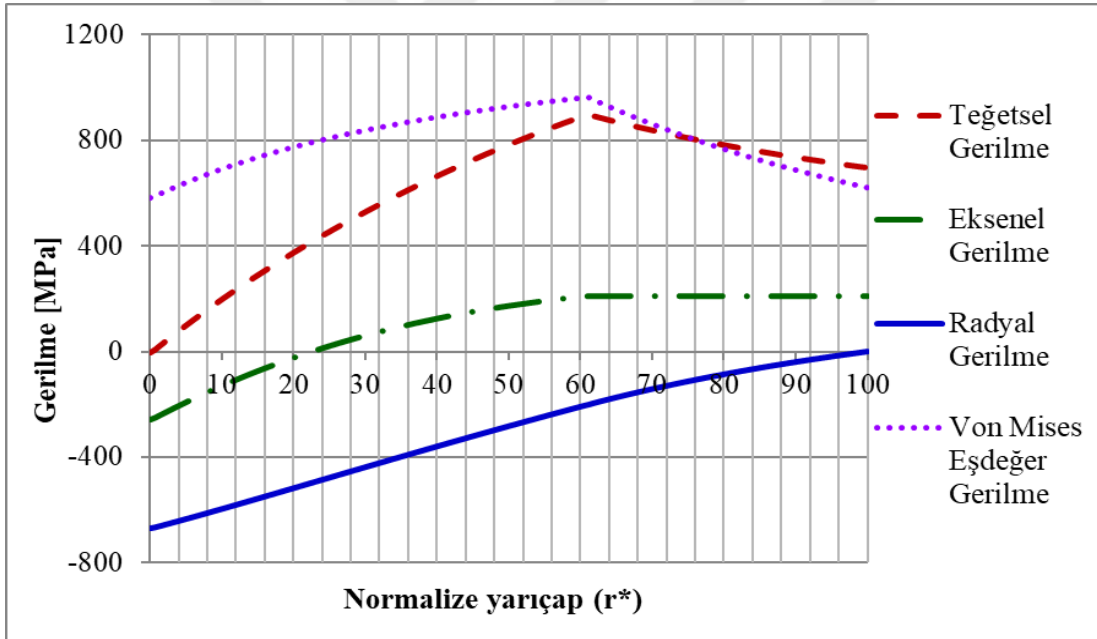
Şekil 4.22. Sayısal çalışmada otofretajsız namluda gerilme dağılımları



Şekil 4.23. Sayısal çalışmada yükleme aşamasındaki gerilme dağılımları



Şekil 4.24. Sayısal çalışmada basınç kaldırma aşamasındaki gerilme dağılımları

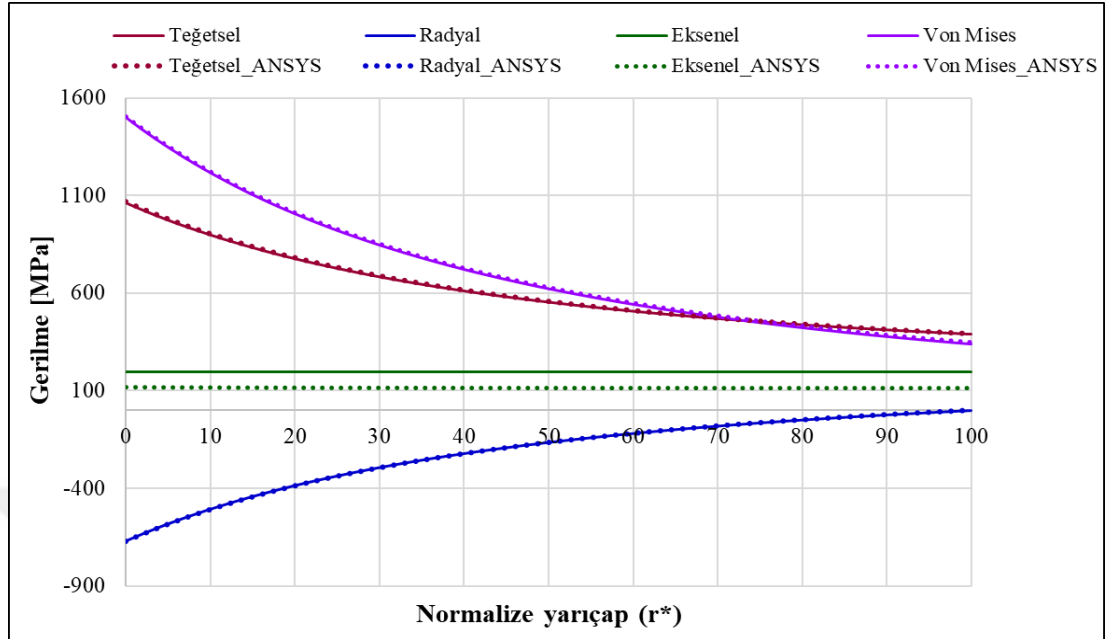


Şekil 4.25. Sayısal çalışmada çalışma basıncı aşamasındaki gerilme dağılımları

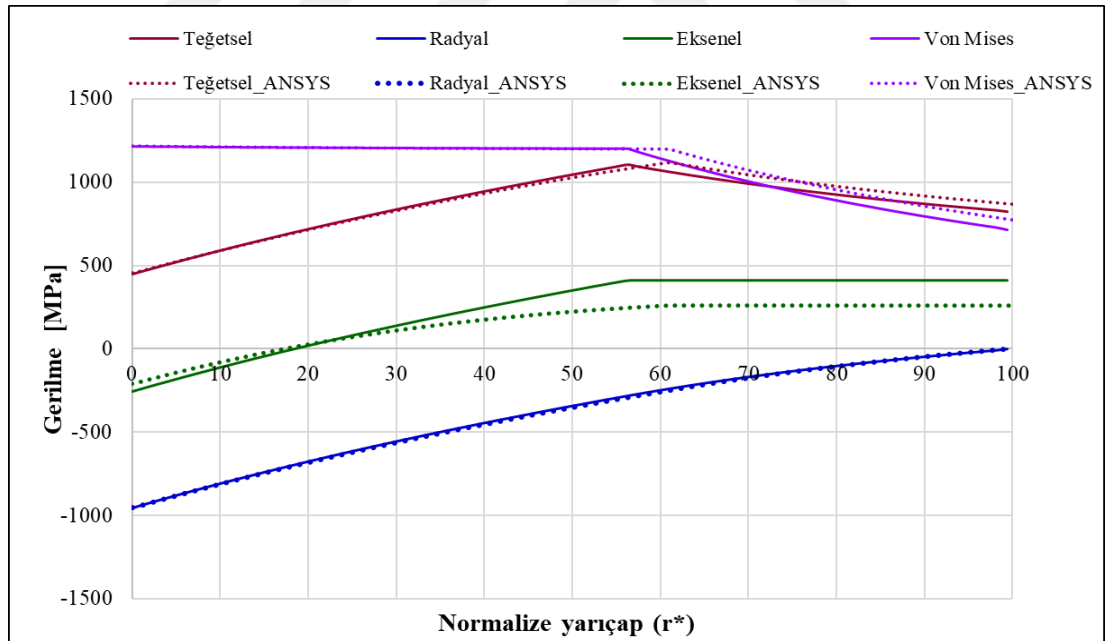
4.3.3. Analitik ve sayısal çözüm karşılaştırmaları:

Şekil 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'da otofretajsız ve otofretajlı namluda analitik ve sayısal çalışmalardan elde edilen gerilme dağılımları aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.26'de otofretajsız namluda oluşan gerilme değerlerinin analitik ve sayısal çalışmalarda benzer olduğu görülmüştür. Otofretajlı namluda yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncı aşamalarında radyal ve teğetsel gerilmelerin (4.27, 4.28

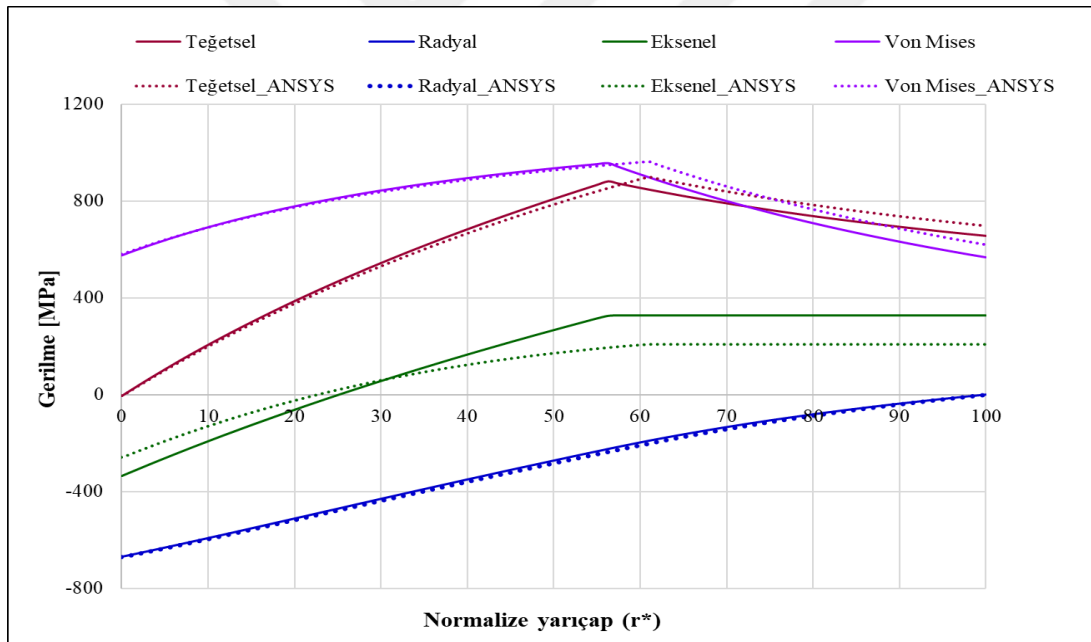
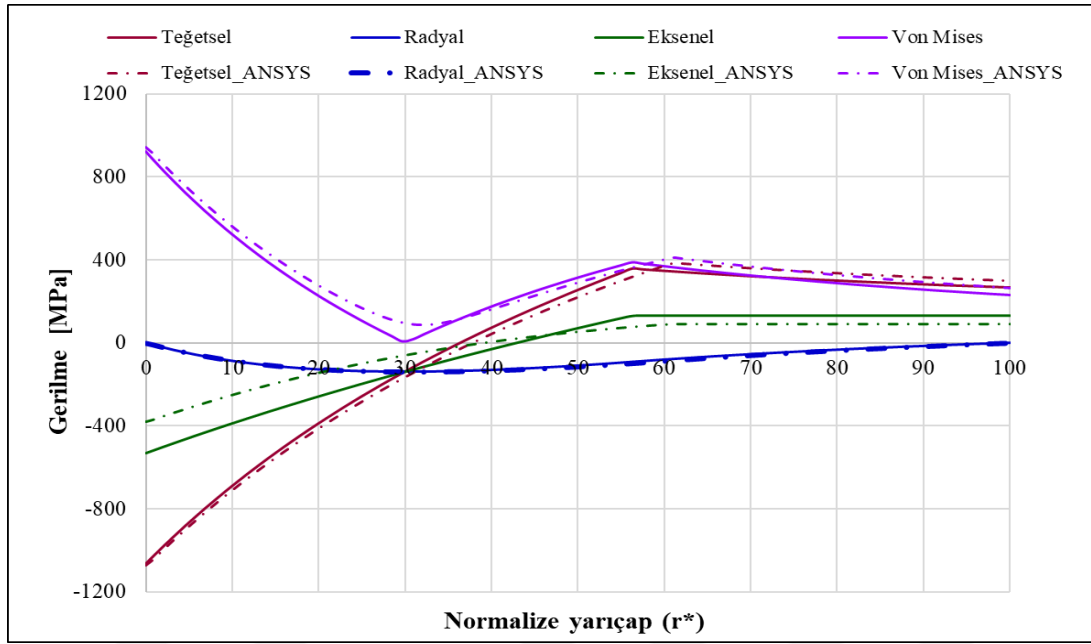
ve 4.29) oldukça yakın olduğu görülmektedir. Eksenel gerilmelerin ise her 3 aşamada da çok az farklılık göstermektedir.



Şekil 4.26. Otofretajsız namluda gerilme dağılımlarının karşılaştırılması



Şekil 4.27. Yükleme aşamasındaki gerilme dağılımların karşılaştırılması



4.3.4. SEM modeli gerilme görüntüleri:

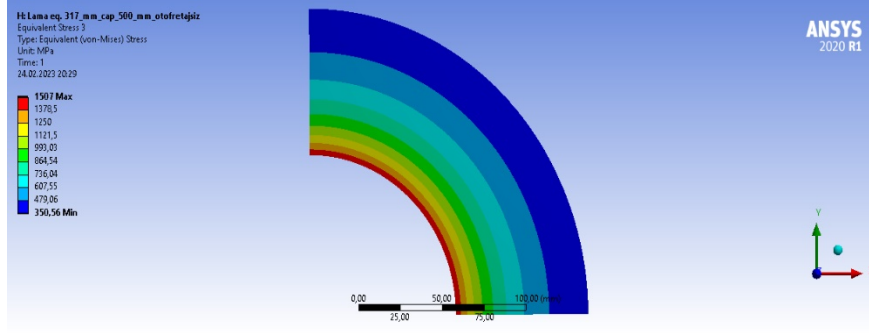
Çalışma kapsamında, namlu cidar kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımlarının hesaplamasına ek olarak, hidrolik otofretaj işlemi aşamalarının her birinde namlu cidar kalınlığında oluşan gerilme dağılımlarının SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33’de sırasıyla verilmiştir.

Şekil 4.30’da çalışma basıncı otofretajsız namluya uygulandığında, maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değeri namlu iç yarıçapında 1507 MPa değerinde olmaktadır ve namlu dış yarıçapına doğru azalarak 350,56 MPa değerini almaktadır.

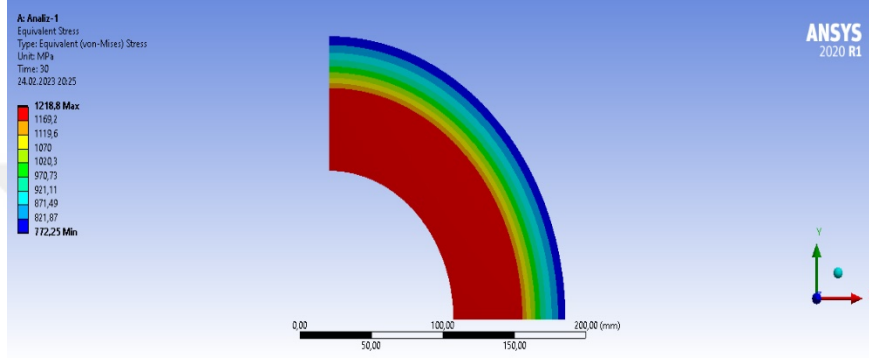
Yükleme aşamasının sonunda namlu iç yarıçapında meydana gelen Von Mises eşdeğer gerilmesinin SEM görüntüsü Şekil 4.31’de verilmiştir ve bu değerin 1218,8 MPa olduğu görülmektedir. Bu değer, namlunun çekme mukavemeti değeri olan 1270 MPa’dan daha küçüktür. Bu noktada optimum otofretaj basıncı olan 954,84 MPa değerinin güvenli bir değer olduğu sonucuna varılabilir.

Basınç kaldırma aşamasının sonunda, namlu iç yarıçapında oluşan maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değeri 941,53 MPa olmaktadır (Şekil 4.32). Bu değerin malzemenin bası (-) yönündeki akma mukavemeti olan 1130 MPa’dan küçük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, namlu malzemesinde otofretaj işlemi sonunda elde edilen kalıntı gerilme değerinin Bauschinger etkisinden olumsuz bir şekilde etkilenmeyeceği ve namlu malzemesinde otofretaj işlemi neticesinde ikincil bir plastik akmanın olmayacağı sonucuna varılmaktadır.

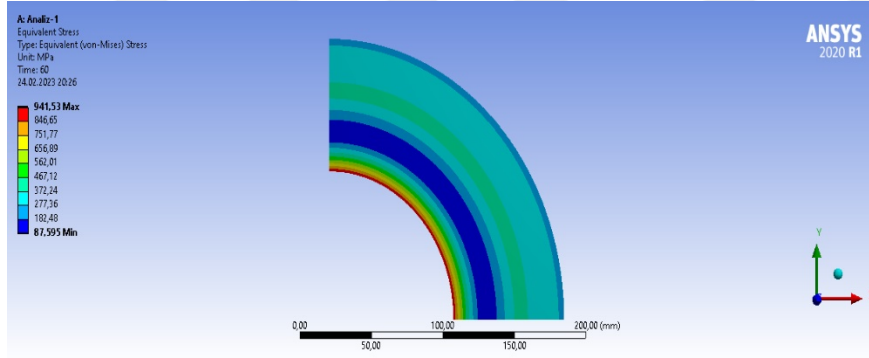
Son olarak, 670 MPa çalışma basıncı altında otofretajlı namluda oluşan gerilme dağılımlarına ait SEM görüntüsü Şekil 4.33’de verilmiştir. Otofretajlı namluda çalışma basıncı altında maksimum eşdeğer gerilme değeri, namlu cidar kalınlığının %61’ne denk gelen yerde 961,96 MPa’dır. Otofretajsız namluda ise bu değer namlu iç yarıçapında 1507 MPa seviyesinde olmaktadır. Eşdeğer gerilme, otofretajlı namluda otofretajsız namluya kıyasla yaklaşık %36 oranında azalmıştır.



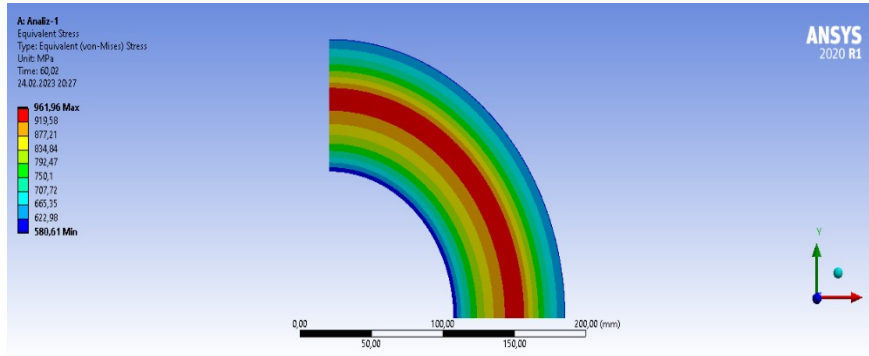
Şekil 4.30. Otofretajsız namluda çalışma basıncı altında oluşan gerilmelere ait SEM görüntüsü



Şekil 4.31. Yükleme aşamasının sonundaki gerilmelere ait SEM görüntüsü



Şekil 4.32. Basıncı kaldırma aşamasının sonundaki gerilmelere ait SEM görüntüsü



Şekil 4.33. Otofretajlı namluda çalışma basıncı oluşan gerilmelere ait SEM görüntüsü

Analitik ve sayısal çalışma sonunda, namlu malzemesi üzerinde kritik bölgeler olan iç yarıçap, elastik-plastik geçiş yarıçapı ve dış yarıçap üzerinde çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri Çizelge 4.4'te listelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, otofretaj işleminin namlunun basınç taşıma kapasitesini artırdığı ve analitik ile sayısal sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4. Otofretajsız ve otofretajlı namluda çalışma basıncında analitik ve sayısal olarak hesaplanan Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

	Otofretajsız namlu	Otofretajlı namlu	
	$\sigma_{\text{sayısal,}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{analitik,}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{sayısal,}}$ (MPa)
İç yarıçap	1507	576,89	580,62
Elastik-plastik geçiş yarıçapı	-	957,75	961,96
Dış yarıçap	350,57	568,56	619,47

4.4. Parametrik Analizler

Çalışma kapsamında analitik ve sayısal sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasından sonra, parametrik analizler yalnızca sayısal çalışmalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1'de gösterildiği üzere, oluşturulan analiz matrisi 4 temel parametreyi içermektedir:

1. Namlu çapı (d_b),
2. Namlu malzemesinin akma mukavemeti (σ_y),
3. Otofretaj basıncı (P_a),
4. Çalışma basıncı (P_w).

Analiz matrisinde incelenen parametreler ve bunların değerleri belirlenirken saha uygulamaları göz önünde bulundurulmuştur. Analiz matrisi içinde 34 adet varyasyon üzerinde çalışılmıştır. Referans analizde (Analiz 1) namlu çapı 150,6 mm, namlu malzemesinin akma mukavemeti 1200 MPa, optimum otofretaj basıncı 954,8 MPa ve çalışma basıncı 670 MPa olarak belirlenmiştir. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak çap, akma mukavemeti, otofretaj basıncı ve çalışma basıncına göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

İlerleyen alt bölümlerde, incelenen her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı başlıklar halinde açıklanarak değerlendirilmiştir.

4.4.1. Namlu Çapının Gerilme Üzerindeki Etkisi

Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilen analiz matrisinde farklı namlu çaplarına göre gerilme dağılımları çizdirilmiştir (Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36). Namlu çapından kasıt, hidrolik otofretaj işlemine tabi tutulacak namlunun otofretaj işlemi öncesindeki yanma odası çapıdır.

Namlu çapı referans analiz temel alınarak oluşturulmuş ve oluşturulan 4 değer referans çapın %0,66’sı, %0,77’i, %0,98’i ve %1’i dikkate alınarak belirlenmiştir.

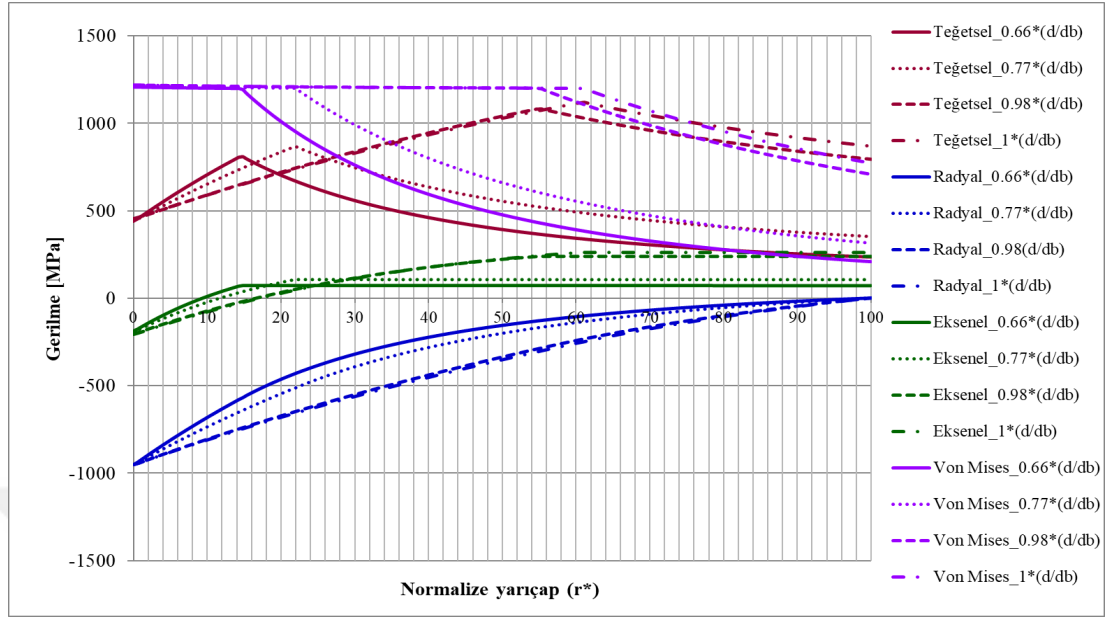
Grafikler incelendiğinde, namlu çapı azaldıkça, otofretaj işlemi sonunda bası (-) yönünde elde edilen teğetsel gerilmenin değerinin ve yönünün ciddi şekilde azaldığı görülmektedir.

Benzer şekilde radyal ve eksenel gerilme değerlerinde de sapmaların olduğu görülmektedir. Çalışma basıncı altında namlu çapı azaldıkça Von Mises eşdeğer gerilme değerinin azaldığı ve namlu iç çapına daha yakın bir bölgeye yönlendiği görülmektedir.

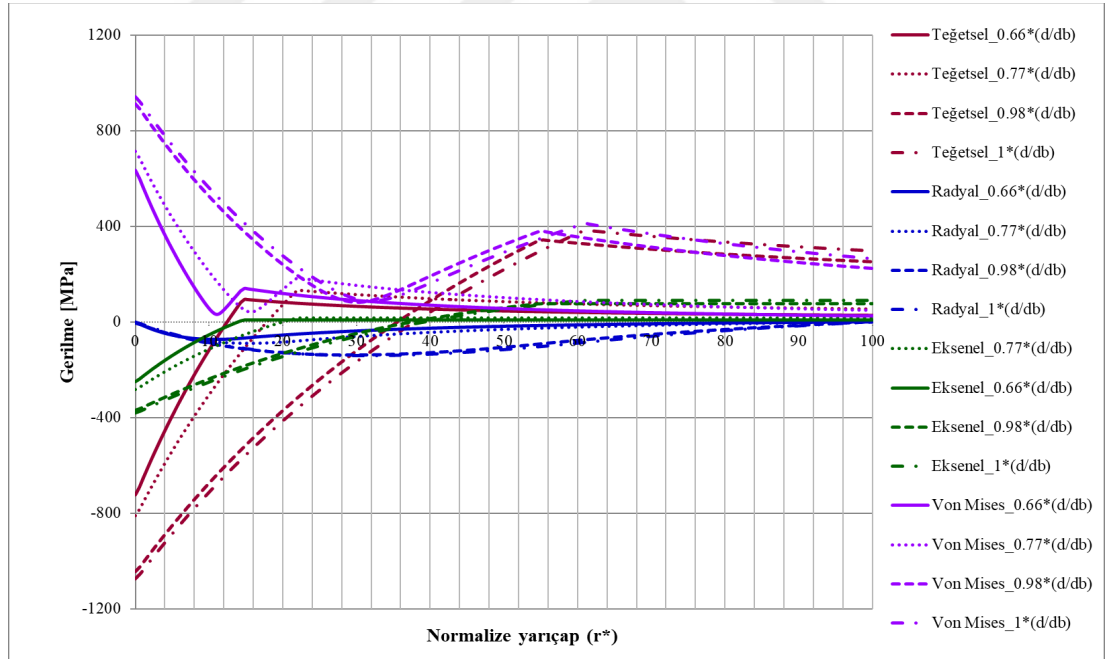
Şekil 4.37’de farklı namlu çaplarına göre çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri ve konumları grafik üzerinde çizdirilmiştir. Namlu çapının artması ile maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin parabolik şekilde arttığı ve eşdeğer gerilmenin konumunun dış yarıçapa doğru yönlendiği görülmektedir. Referans çapın %0,66’sı kadar olan namlu çapı için, 65,1 mm namlu cidar kalınlığında oluşan maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değeri 879,1 MPa’dır. Referans analizde ise 126,5 mm namlu cidar kalınlığına karşılık gelen konumda maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değeri 961,9 MPa olmuştur. İki alt ve üst limit değeri karşılaştırıldığında, namlu çapına göre Von Mises eşdeğer gerilme değerinin değişiminin 1,6 MPa/mm olduğu görülmektedir.

Bu yorumlara ek olarak, namlu imalatı esnasında sıralı iç çap tornalama işlemleri neticesinde talaş kaldırılması ile otofretaj işlemi sonrası elde edilen bu kalıntı gerilme değerinin ciddi oranda azalması söz konusu olacaktır (Troiano, 2006). Dolayısıyla, otofretaj işlemi öncesindeki yanma odası çapının otofretaj sonrası istenilen nihai

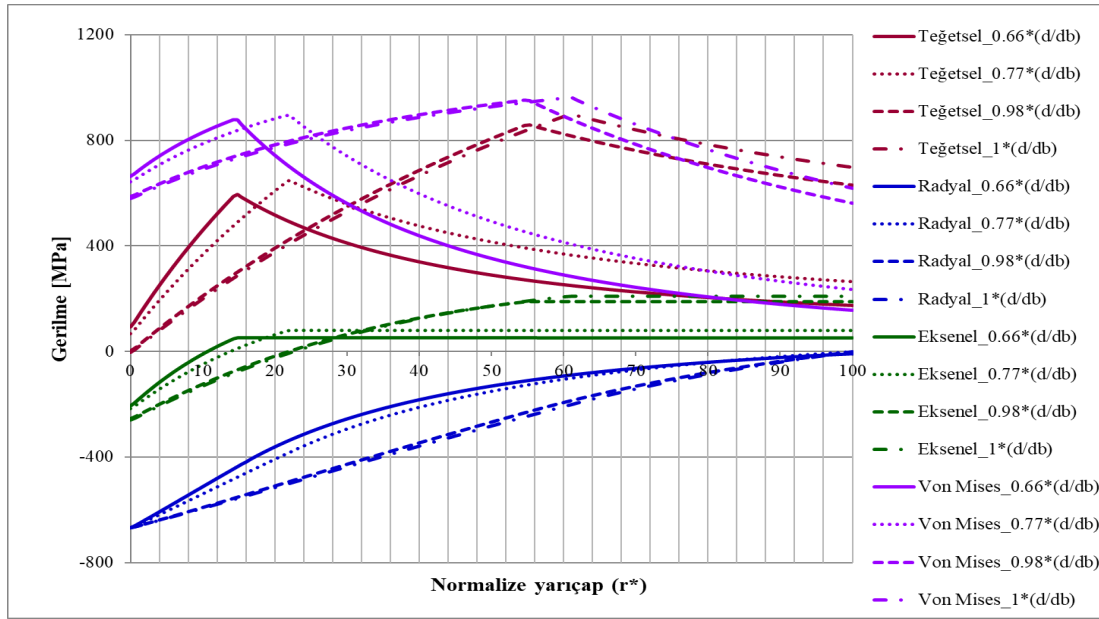
ölçüye yakın olmasının, nihai ölçüye ulaşmak için daha az talaş kaldırılmasından dolayı önemlidir.



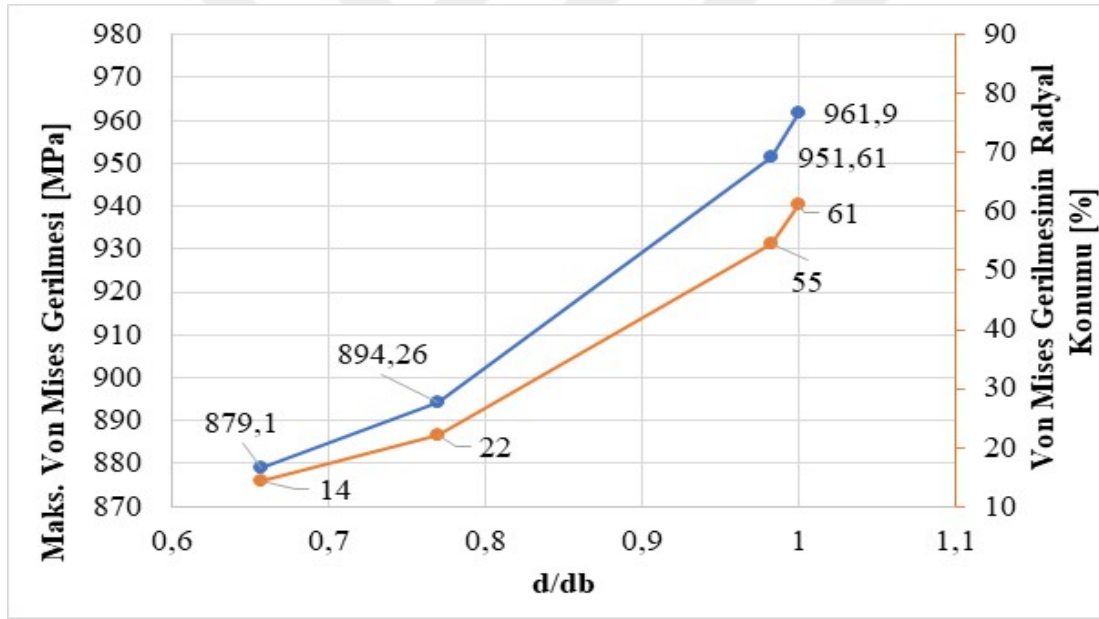
Şekil 4.34. Yükleme aşamasında çapa göre gerilmelerin dağılımı



Şekil 4.35. Basınç kaldırma aşamasında çapa göre gerilmelerin dağılımı



Şekil 4.36. Çalışma basıncı altında çapa göre gerilmelerin dağılımı



Şekil 4.37. Çalışma basıncı altında farklı namlu çaplarına göre maksimum Von Mises gerilme değerinin ve konumunun değişimi

4.4.2. Akma Mukavemetine Göre Gerilme Dağılımları

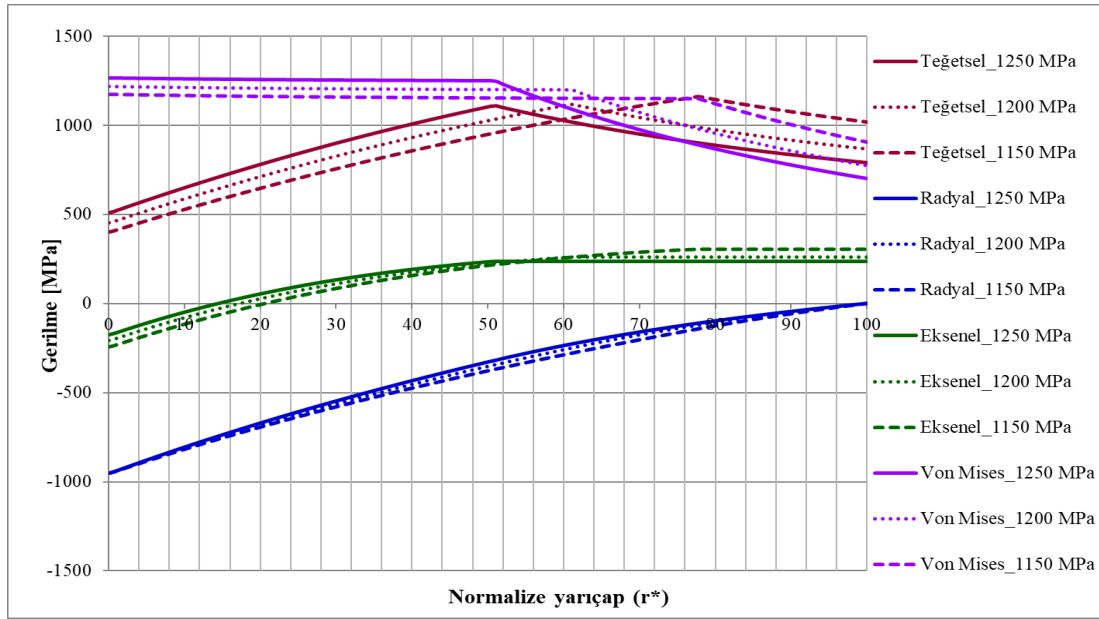
Analiz matrisinde AISI 4340 namlu malzemesinin farklı sıcaklıklardaki ısıtılma işlem prosesleri neticesinde elde edilen akma mukavemetleri baz alınarak elde edilen gerilme dağılımları çizdirilmiştir (Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40). Namlu malzemesinin farklı sıcaklıklardaki ısıtılma işlem prosesine göre belirlenen alt ve üst sınır değerleri içinde yer alan 1150 MPa, 1200 MPa ve 1250 MPa akma mukavemetlerine göre analizler gerçekleştirilmiştir.

Akma mukavemeti, optimum otofretaj basıncının (P_{opt}) hesaplanmasındaki değişkenlerden biridir. Dolayısıyla akma mukavemeti değiştiğinde, optimum otofretaj basıncı da değişecektir. Ancak Bölüm 4.1’de verilen Analiz Matrisinde tek bir parametrenin gerilme dağılımları üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple, akma mukavemetleri değişse de analizler 954,84 MPa optimum otofretaj basıncı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

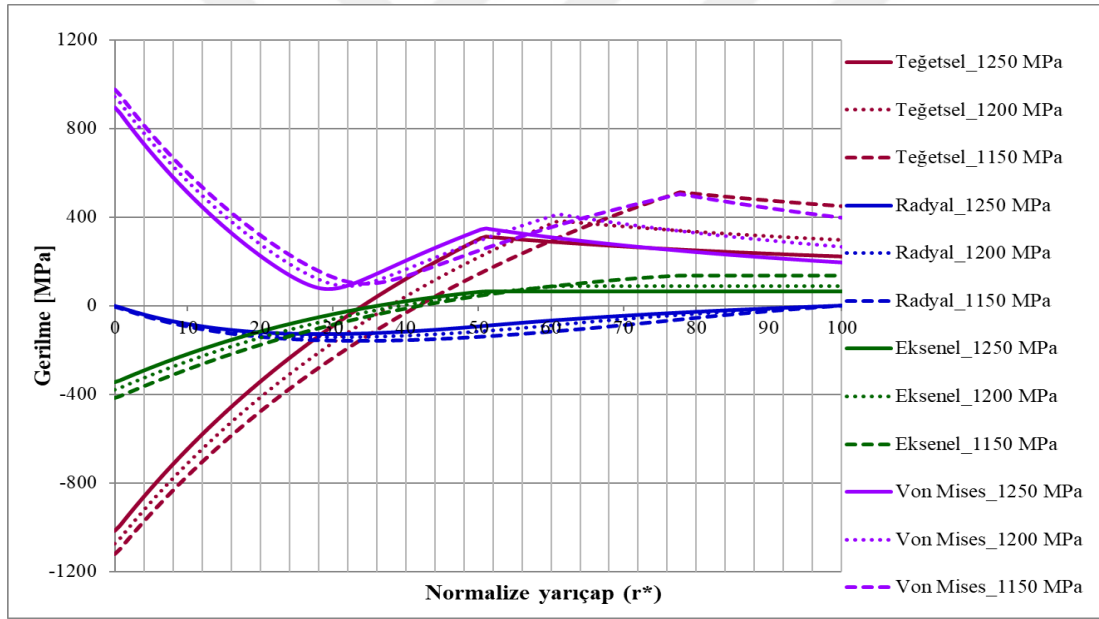
Grafikler incelendiğinde, aynı namlu malzemesinde akma mukavemeti daha düşük değer olan 1150 MPa için, çalışma basıncı altında elastik-plastik geçiş yarıçapının namlu malzemesi cidar kalınlığı boyunca dış yarıçapa doğru yönlendiği, akma mukavemeti daha yüksek değer olan 1250 MPa için ise çalışma basıncı altında elastik-plastik geçiş yarıçapının namlu malzemesi cidar kalınlığı boyunca iç yarıçapa doğru yönlendiği görülmektedir. Elastik-plastik geçiş yarıçapı 1150, 1200 ve 1250 MPa akma mukavemetleri için sırasıyla namlu cidar kalınlığının %78, %61 ve %50’sinde oluşmaktadır.

Çalışma basıncı altında maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde olduğu görülmektedir. Maksimum eşdeğer gerilme değeri 1150, 1200 ve 1250 MPa akma mukavemetleri için sırasıyla 951,39, 961,90 ve 977,72 MPa olarak hesaplanmıştır.

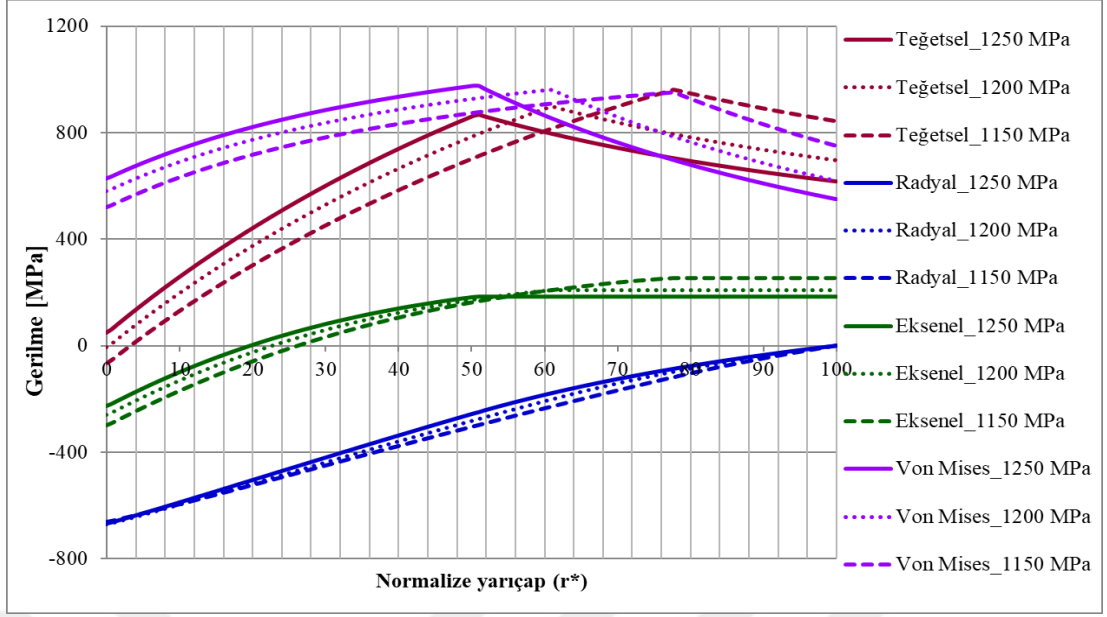
Şekil 4.41’de verilen grafik incelendiğinde, akma mukavemetine göre Von Mises eşdeğer gerilme değerinin değişimi 0,3 MPa/MPa olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla akma mukavemetindeki bu değişimin oldukça küçük olduğu ve her 3 akma mukavemeti değeri için çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerinin seviyesinin hemen hemen eşit olduğu da tespit edilmiştir.



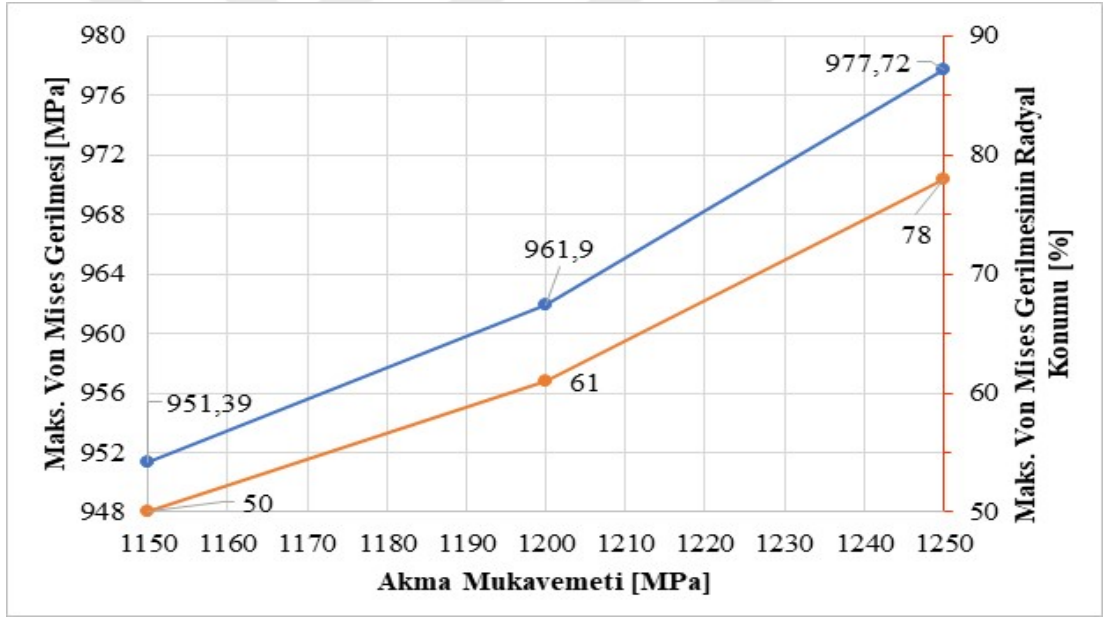
Şekil 4.38. Yükleme aşamasında akma mukavemetine göre gerilmelerin dağılımı



Şekil 4.39. Basınç kaldırma aşamasında akma mukavemetine göre gerilmelerin dağılımı



Şekil 4.40. Çalışma basıncı altında akma mukavemetine göre gerilmelerin dağılımı



Şekil 4.41. Çalışma basıncı altında farklı akma mukavemetlerine göre maksimum Von Mises gerilme değerinin ve konumunun değişimi

4.4.3. Otofretaj Basıncına Göre Gerilme Dağılımları

Hidrolik ofofretaj işleminde, ofofretaj basıncı en önemli parametrelerden birisidir. Optimum ofofretaj basıncı namlu iç ve dış yarıçapının, namlu malzemesinin mekanik özelliklerinin ve çalışma basıncının bir fonksiyonudur ve 2.2’de verilen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır.

Otofretaj basıncının etkisini incelemek için, Çizelge 4.2’de verilen farklı birçok ofofretaj basınç değeri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Otofretaj basıncının etkisi incelenirken referans parametreler (namlu çapı 150,6 mm, namlu malzemesinin akma mukavemeti 1200 MPa) kullanılmıştır.

Otofretaj işlemi için iki kritik basınç değer limitinin olduğunu söylemek mümkündür. Bunlardan ilki, akmanın namlu malzemesi iç yüzeyde başladığı P_{y1} basıncıdır. Bu basınç değerinin altında, herhangi bir ofofretaj etkisinden bahsetmek mümkün değildir. Diğer basınç değeri ise plastik deformasyonun namlu cidar kalınlığı boyunca yayıldığı P_{y2} basıncıdır. P_{y1} ve P_{y2} basıncı 4.1 ve 4.2’de verilen yarı ampirik denklemlerle hesaplanmaktadır (Ali vd., 2010).

$$P_{y1} = \sigma_y \frac{\left(1 - \left(1 - \left(1/k^2\right)\right)\right)}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

$$P_{y2} = \sigma_y \ln(k) \quad (4.2)$$

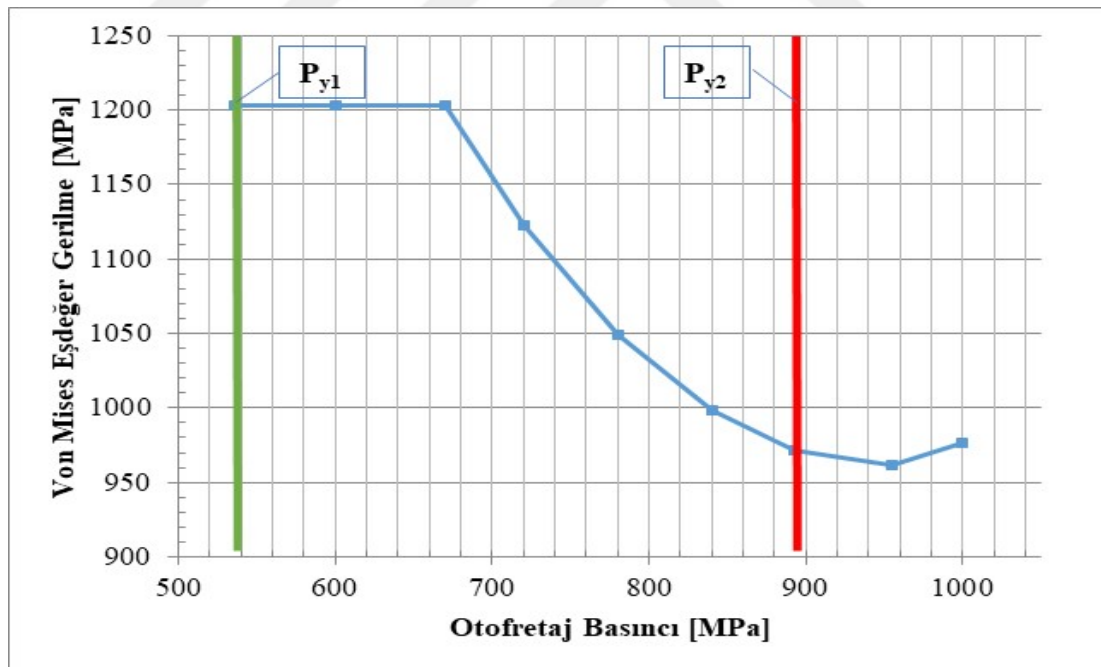
Burada k iç yarıçapın dış yarıçapa oranı olarak ifade edilmektedir. 4.1 ve 4.2’de verilen denklemler kullanılarak yapılan hesaplamalarda, P_{y1} 536,45 MPa olarak P_{y2} ise 893,13 MPa olarak bulunmuştur. Burada 893,13 MPa olarak hesaplanan P_{y2} basınç değerinin Denklem 2.2 ile 954,84 MPa olarak hesaplanan optimum ofofretaj basınç değerinden daha düşük olduğunu görülmektedir. Bunun temel nedeni, Denklem 4.2’de verilen yarı-ampirik denklemin, Denklem 2.2’de optimum ofofretaj basıncının hesaplanmasında kullanılan yarı-ampirik denklem ile malzeme modeli ve plastisite teorisi açısından benzerlik göstermemesidir. Ayrıca gerinim pekleşmesinden dolayı namlu malzemesi Denklem 4.2 ile hesaplanan teorik değerden daha yüksek bir basınç değerinde tamamen plastik duruma geçecektir. Bu iki değer yorumlandığında, ofofretaj basıncı 536,45 MPa’dan daha düşük bir değerde ise, herhangi bir ofofretaj etkisinden bahsetmenin mümkün olmadığı sonucuna varılır. Eğer ofofretaj basıncı 893,13 MPa’dan daha yüksek ise, ofofretaj işleminin etkinliği kademeli olarak

düşmektedir. Bu durum ise, namlunun basınç taşıma kapasitesinin azalacağı anlamına gelmektedir.

Otofretaj basıncının etkisinin incelemesinde kullanılan 9 basınç değeri sırasıyla 536,45, 600, 670, 720, 780, 840, 893,13, 954,84 ve 1000 MPa'dır. Burada, namlu malzemesinin tamamen plastik deformasyona uğramasından dolayı, incelenen maksimum otofretaj basınç değeri 1000 MPa'dır;

Analiz matrisinde çeşitli otofretaj basınçlarında, otofretaj operasyonu için kritik bölge olan elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin değişimi ise Şekil 4.42'de verilmiştir.

670 MPa otofretaj basıncına kadar Von Mises eşdeğer gerilme değerinin yaklaşık 1200 MPa civarında olduğu görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, otofretaj basıncının çalışma basıncının altında olması durumunda herhangi bir otofretaj etkisinin olmamasıdır. 670 MPa otofretaj basıncı değerinden sonra, 954,84 MPa optimum otofretaj basıncı değerine karşılık gelen yerde, elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde Von Mises eşdeğer gerilmesi 962 MPa ile en düşük değerini almaktadır.



Şekil 4.42. Optimum otofretaj basıncı-gerilme ilişkisi

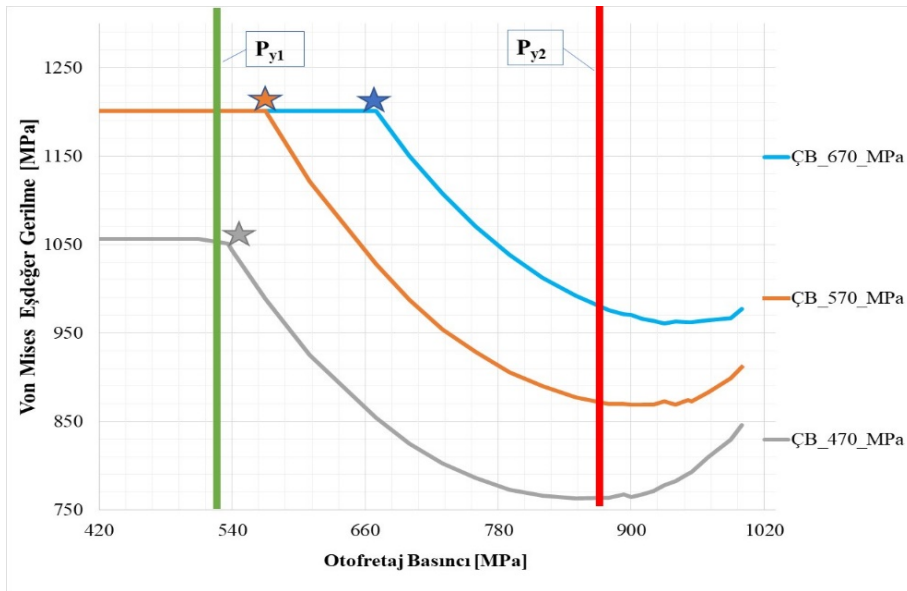
4.4.4. Çalışma Basıncına Göre Gerilme Dağılımları

Pratikte, ağır silah namluları farklı çalışma basınçlarına maruz kalmaktadır. Çalışma basıncının etkisi incelenirken 470, 570 ve 670 MPa çalışma basıncı altında bir önceki alt bölümde verilen 9 farklı otofretaj basınç değeri referans alınmıştır. Çalışma basıncı değerlerinin alt ve üst limit değerleri, ağır silah namlusunun test ve saha atışlarında elde edilen basınç ölçümleri referans alınarak belirlenmiştir.

Analiz matrisinde çok fazla analiz olduğundan, sadece çalışma basıncı safhası için otofretaj operasyonu için kritik bölge olan elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin değişimi çizdirilmiştir (Şekil 4.43).

Şekil 5.39’da gösterildiği üzere, tüm çalışma basıncı değerleri için 536,45 MPa otofretaj basıncı değerine kadar Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin sabit kaldığı görülmektedir. Ayrıca, bütün çalışma basınçlarında grafiğin eğiminin belli bir noktaya kadar azaldığı ve P_{y2} (893,13 MPa) basıncına yaklaşık eşit bir değerde tekrar artışa geçtiği görülmektedir.

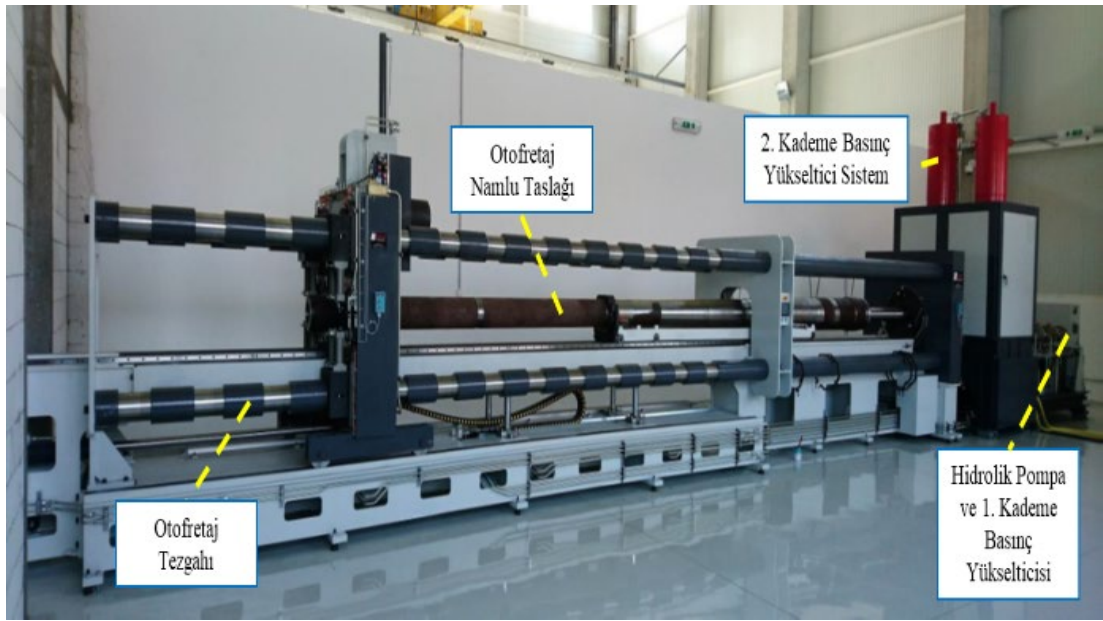
Özetle, Von Mises eşdeğer gerilmesinin çalışma basıncına bağlı olarak oluştuğu ve herhangi bir çalışma basıncında optimum otofretaj basıncının teorik olarak P_{y1} ve P_{y2} basınçları arasında olduğu söylemek mümkündür.



Şekil 4.43. Çalışma basınçlarına göre optimum otofretaj basıncı-gerilme ilişkisi

4.5. Hidrolik Otofretaj Dış Çap Değişimi

Hidrolik otofretaj işlemi, özel olarak tasarlanmış tesis ve tezgahlarda yapılmaktadır (Şekil 4.44). Namlu iç yüzeyine belirlenen optimum otofretaj basıncı belirlenen zaman aralığında uygulanır. Otofretaj tezgâhı bünyesinde bulunan alçak ve yüksek basınç üniteleri, hidrolik ünite ve diğer basınç ile bağlantı elemanları sayesinde işlem, stabil ve güvenli bir şekilde tamamlanabilmektedir. Hidrolik otofretaj işleminde basınçlandırma esnasında namlu içindeki sızdırmazlığın iyi bir şekilde sağlanması gerekmektedir. İşlem esnasında oluşabilecek en küçük kaçak ve sızıntı, otofretaj işleminin yapılamamasına veya tekrarlanmasına neden olabilmektedir.



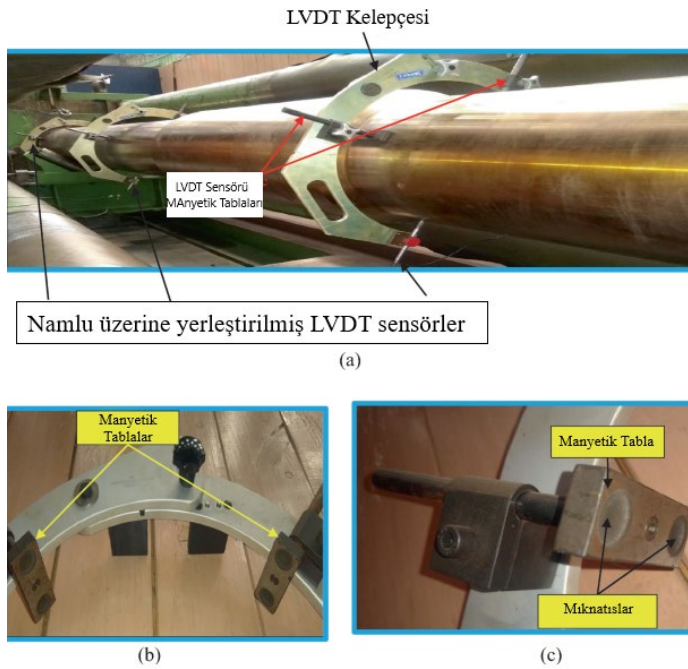
Şekil 4.44. Hidrolik otofretaj tesisi (<https://www.thiot-autofrettage.com>, 2023)

Tez çalışması kapsamında, ağır silah namlusu üzerinde hidrolik otofretaj işlemleri sonunda oluşan gerilmeler analitik ve sayısal olarak hesaplanmıştır. Analitik ve sayısal olarak çalışmada elde edilen sonuçların deneysel olarak doğrulanması için, kalıntı gerilme ölçüm teknikleri (X-ışınımı kırınımı, nötron ışınımı kırınımı, delik delme vs.) kullanılmaktadır (Şekil 4.45). Bu yöntemlerin uygulama süreçlerindeki zorluklar göz önüne alındığında, otofretaj işlemi esnasında kullanılan iç ve dış çap kalıcı deformasyon miktarları analitik ve sayısal hesaplamaların doğruluğunu teyit etmek için kullanılabilir.



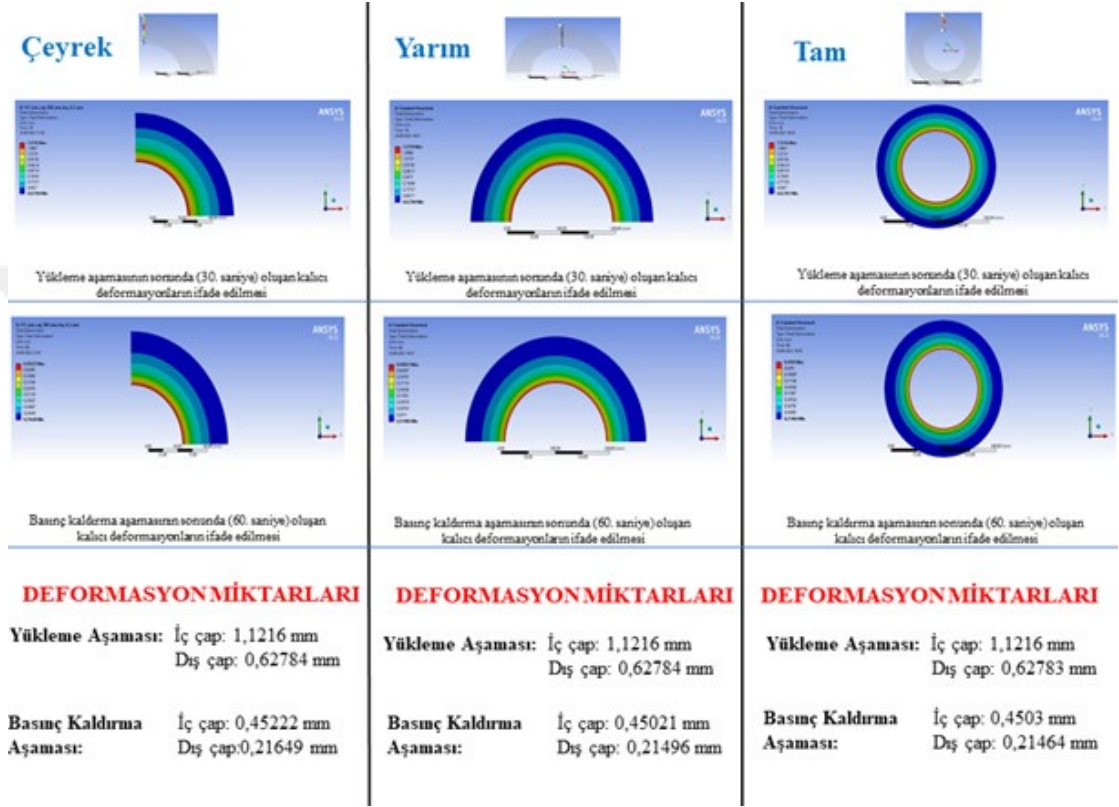
Şekil 4.45. XRD kalıntı gerilme ölçüm cihazı (<https://www.atilim.edu.tr>, 2023)

Bu amaçla otofretaj işlemi esnasında dış çap genişleme miktarları anlık olarak hassas sensör ve okuma elemanları ile takip edilmektedir. Hidrolik otofretaj işleminde özel olarak tasarlanmış tezgâh/tesis ve ölçü aletleri kullanılmaktadır. Talaşlı imalat prosesleri ile istenilen imalat boyut ve toleranslarına getirilen namlular, işlem kontrolü için otofretaj namlu taslağı üzerinde belirli konumlara yerleştirilmiş yüksek hassasiyetli ($\approx 0,01$ mm) problar (sensör) (Şekil 4.46) kullanılarak hidrolik otofretaj işlemine tabi tutulur. İşlem esnasında dış çap genişleme verileri alınır.



Şekil 4.46. Dış çap ölçü probleminin (sensörlerinin) namlu taslağı üzerine yerleştirilmesi (Roy, 2023)

SEM analizinde çeyrek, yarım ve tam kesit model kullanılarak elde edilen kalıcı dış çap ve iç çap genişleme değerleri Şekil 4.47’de verilmiştir. Sonuçlar incelediğinde çeyrek, yarım ve tam kesit model kullanılarak elde edilen dış çap ve iç çap değerlerinin benzer olduğu görülmektedir. Gerilme dağılımlarının hesaplanmasında kullanılan modelin bütününe temsil eden çeyrek daire kesiti için dış çapın 0,21649 mm, iç çapın ise 0,45222 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.47. Sayısal çalışmada elde edilen iç çap ve dış deformasyon miktarları

Sayısal olarak hesaplanan dış çaptaki değişim ile ölçümler karşılaştırıldığında, aralarında kalıcı dış çap genişleme miktarı olarak %32,3 oranında farklılık olduğu görülmüştür. Oluşan bu farklılığın temel nedenleri arasında; sayısal çalışmada sonlu elemanlar yönteminde kullanılan malzeme modeli, yapılan ölçümlerdeki hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sorunları, ölçümü yapılan namlu malzemesinin otofretaj işlemi öncesinde maruz kaldığı ısıl işlem ve imalat proseslerinden kaynaklı kalıntı gerilme ve birim şekil değişimi durumları olduğu düşünülmektedir.

5. MEKANİK OTOFRETAJ SONUÇLARI

Tez çalışması kapsamında, otofretajsız ve mekanik otofretajlı namluda çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları sayısal olarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.1’de gösterildiği üzere, inceleme matrisi 5 ana parametre içermektedir. Bunlar:

1. yüzde arakesit oranı ($((r_m/a)-1) * 100$)
2. namlu malzemesinin akma mukavemeti (σ_y)
3. sürtünme katsayısı, (μ)
4. mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu (l_{db})
5. mandrel konik açıları orantı faktörüdür (a_f ve a_b)

parametreleridir. Çizelge 5.1’de pratik uygulamalardaki bu parametrelerin değerleri ve değişim aralıkları göz önüne alınarak bu parametreler için seçilen değerler listelenmiştir.

Parametrik analizler gerçekleştirilmeden önce bir referans analiz durumu belirlenmiştir. Çizelge 5.1’de referans analiz için seçilen değerler koyu renkli ve altı çizili olarak gösterilmiştir.

Yüzde arakesit oranı, mandrel üzerinde bulunan düz bölgeye ait çap sabit tutulup namlu iç çapı değiştirilmek suretiyle 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,94 ve 3,0 olarak belirlenmiştir.

Namlu malzemesinin akma mukavemeti, namlu ısıl işlem prosesinin alt ve üst limit değerlerini içerecek şekilde 1000, 1100 ve 1195 MPa olarak seçilmiştir.

Sürtünme katsayısı, 0,005, 0,010, 0,015, 0,030, 0,045, 0,060, 0,120 ve 0,180 olmak üzere 9 farklı değer seçilerek belirlenmiştir.

Mandrel üzerindeki düz bölge referans uzunluk olan 6,35 mm’nin 0,25, 0,50, 0,75, 1,5, 3,00 ve 4,50 katı olarak seçilmiştir.

Mandrel konik açısı için ise 1/2, 2/3, 1,5, 2,0 ve 2,5 orantı faktörleri seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Mekanik otofretaj işleminde incelenen parametreler ve bu parametrelere ait değerler

Parametreler	Değer							
Yüzde								
arakesit oranı $((r_m/a)-1)$ *100)	0,5	1,0	1,5	2,0	<u>2,94</u>	3,5		
Akma								
mukavemeti (MPa)	1000	1100	<u>1195</u>					
Sürtünme katsayısı (μ)	0,005	0,010	<u>0,015</u>	0,030	0,045	0,060	0,120	0,180
Mandrel								
üzerindeki düz bölge (l_{db})	0,25	0,50	0,75	<u>1,0</u>	1,50	3,00	4,50	
Mandrel								
konik açılar oranı faktörü (a_f ve a_b)	0,50	0,67	<u>1,0</u>	1,50	2,00	2,50		

5.1. Analiz Matrisi

İnceleme parametrelerinin belirlenmesinin ardından, sistematik bir karşılaştırma ve değerlendirme yapabilmek için, Çizelge 5.2’de verilen bir analiz matrisi oluşturulmuştur. Analiz matrisinde görüldüğü gibi toplam analiz sayısı 26’dır. Burada, referans analiz, Analiz 1 olarak belirtilmiştir. Referans analizde (Analiz 1) yüzde arakesit oranı 2,94, namlu malzemesinin akma mukavemeti 1195 MPa, sürtünme katsayısı 0,015, mandrel üzerindeki düz bölgenin uzunluğu 6,35 mm ve mandrel konik açıları oranı faktörü (a_f : 1,5° ve a_b : 3,0°) ise 1 olarak belirlenmiştir. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak yüzde arakesit oranı, akma mukavemeti, sürtünme katsayısı, mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu ve mandrel konik açıları oranı faktörüne göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.2. Mekanik otofretaj analiz matrisi

Analiz #	Yüzde Arakesit Oranı ($(r_m/a)-1$)*100)	Akma Mukavemeti (MPa)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Mandrel üzerindeki düz bölge, l_{db} (6,35 mm)	Mandrel Konik Açılar Orantı Faktörü (a_f ve a_b)
1	2,94	1195	0,015	1* l_{db}	1
2	0,5	1195	0,015	1* l_{db}	1
3	1	1195	0,015	1* l_{db}	1
4	1,5	1195	0,015	1* l_{db}	1
5	2,0	1195	0,015	1* l_{db}	1
6	3,5	1195	0,015	1* l_{db}	1
7	2,94	1100	0,015	1* l_{db}	1
8	2,94	1000	0,015	1* l_{db}	1
9	2,94	1195	0,005	1* l_{db}	1
10	2,94	1195	0,010	1* l_{db}	1
11	2,94	1195	0,030	1* l_{db}	1
12	2,94	1195	0,045	1* l_{db}	1
13	2,94	1195	0,060	1* l_{db}	1
14	2,94	1195	0,120	1* l_{db}	1
15	2,94	1195	0,180	1* l_{db}	1
16	2,94	1195	0,015	0,25* l_{db}	1
17	2,94	1195	0,015	0,50* l_{db}	1
18	2,94	1195	0,015	0,75* l_{db}	1
19	2,94	1195	0,015	1,50* l_{db}	1
20	2,94	1195	0,015	3,00* l_{db}	1
21	2,94	1195	0,015	4,50* l_{db}	1
22	2,94	1195	0,015	1* l_{db}	0,50
23	2,94	1195	0,015	1* l_{db}	0,67
24	2,94	1195	0,015	1* l_{db}	1,50
25	2,94	1195	0,015	1* l_{db}	2,00
26	2,94	1195	0,015	1* l_{db}	2,50

5.2. Referans Analiz için Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında referans analiz için elde edilen gerilme değerleri sayısal olarak hesaplanmıştır ve grafik üzerinde gösterilmiştir. Hidrolik otofretaj işlemine benzer şekilde sistematik bir çalışma yapabilmek adına analiz matrisi oluşturulmuştur. Çalışmanın doğrulanmasında, analitik, sayısal ve ölçülen kalıcı iç çap genişleme değerlerinden yararlanılmıştır. Bunlara ek olarak mekanik otofretaj işlemi esnasında, mandrel in namlu içinde eksenel olarak hareket ettirilebilmesi için gerekli mil kuvveti, ölçüm sonuçları ve sayısal olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak bir başka doğrulama parametresi geliştirilmiştir.

5.2.1. Otofretajsız namlu

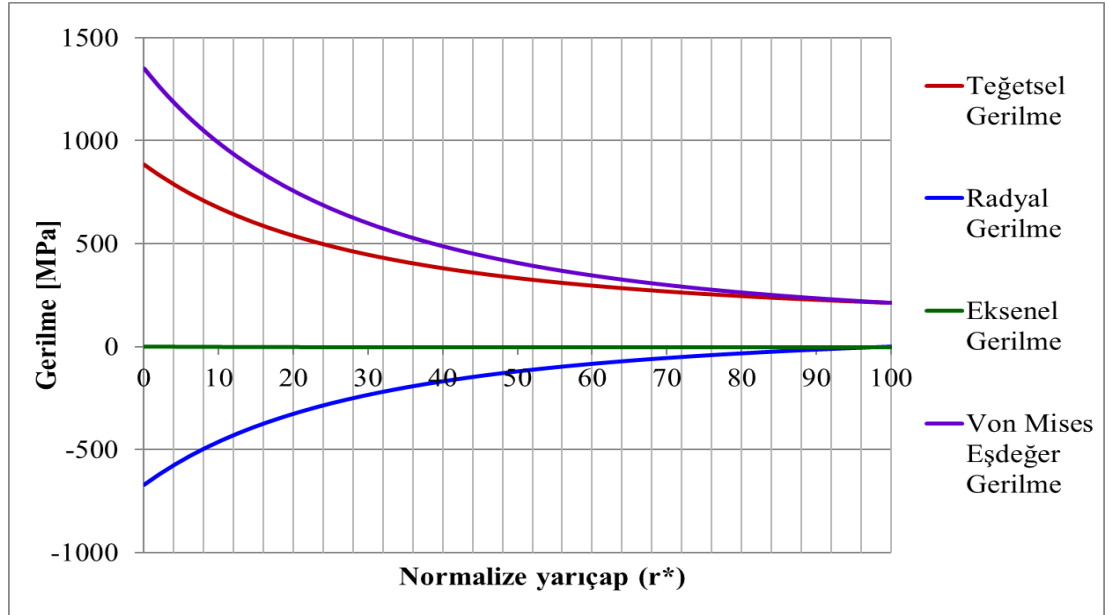
Otofretajsız namlu: Mekanik ofofretaj işlemi için, hidrolik ofofretaj işlemine benzer şekilde (Bölüm 2), 670 MPa çalışma basıncı altında ofofretajsız namluda oluşan gerilme dağılımları radyal doğrultuda Şekil 5.1’de verilmiştir. Yatay eksen namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir ($r^*=(r-a) / (b-a) *100$). Düşey eksen ise teğetsel, radyal, aksenal ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri verilmiştir.

Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapında 884,87 MPa değerinde olduğu, dış çapa doğru ise asimptotik olarak 211,95 MPa değerine düştüğü görülmektedir.

Radyal gerilme iç çaptan dış çapa doğru, çalışma basıncı olan -670 MPa değerinden 0 MPa değerine düşmektedir.

Eksenel gerilme, kalın cidarlı silindirlere meydana gelen gerilmelerin doğası gereği, çok düşük seviyede 1 MPa’nın altında oluşmuştur.

Von Mises eşdeğer gerilme değeri ise iç çapta 1350,3 MPa’dır. Namlu malzemesinin akma mukavemeti olan 1195 MPa değerinin üzerinde olan bu değer, yorulma ömrü ve çatlak başlangıcı ile birlikte kırılma olayının oluşma riskini olumsuz yönde etkileyecektir.



Şekil 5.1. Mekanik ofofretajsız namluda gerilme dağılımları

5.2.2. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda:

Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda:

Şekil 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5'te mekanik otofretaj işlemi sonunda elde edilen teğetsel, radyal, aksenal ve Von Mises eşdeğer gerilme değerlerine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.6'da ise elde edilen gerilme dağılımları grafik üzerinde gösterilmiştir.

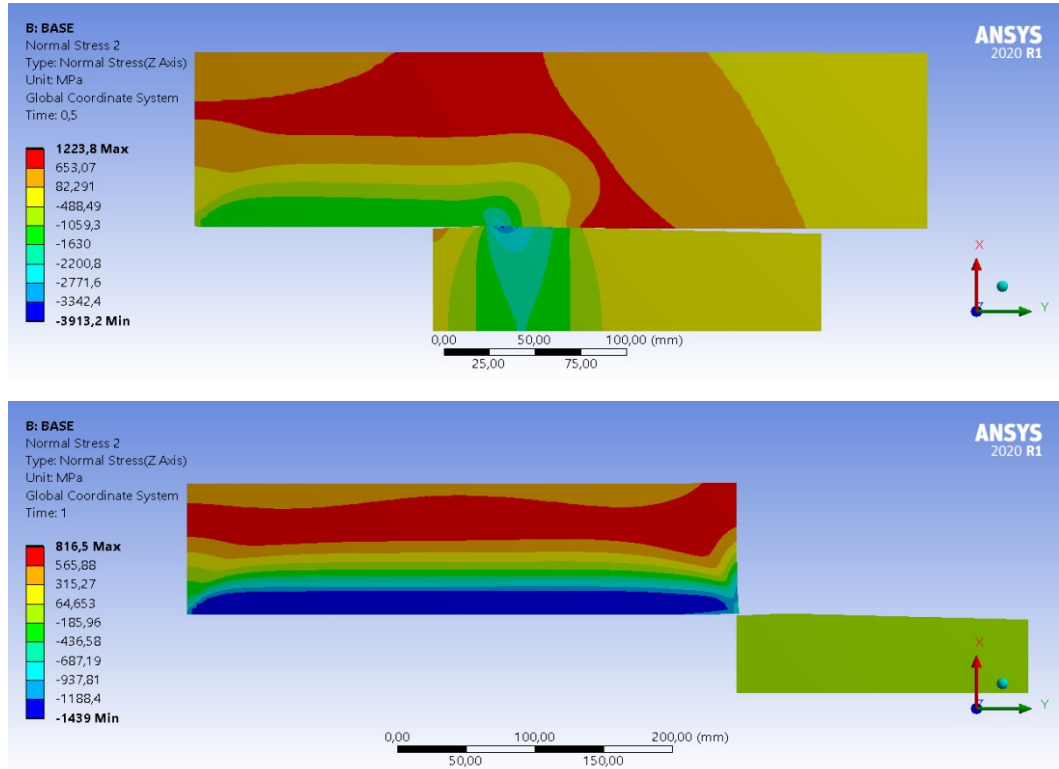
Teğetsel gerilme: Şekil 5.2 ve 5.6'da gösterilen teğetsel gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mandrelin namlu iç çapı ile temas ettiği bölgede, mandrelin namlu iç çapı boyunca hareketi esnasında namlu iç çapını genişlemeye zorlayan kuvvet ile dış çapın plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin bir araya gelmesiyle, namlu iç çapına yakın yerlerde oldukça yüksek seviyede bası (-) yönünde teğetsel gerilme oluşmaktadır. Namlu dış çapına doğru ise düşük seviyede çeki (+) yönünde teğetsel gerilme oluştuğu görülmektedir. Teğetsel gerilmenin bası (-) yönünde, namlu et kalınlığının %15'lik mesafesine denk gelecek şekilde -1429,8 MPa değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca teğetsel gerilme, çeki (+) yönünde namlu et kalınlığının %65'lik mesafesine karşılık gelecek şekilde 721,23 MPa değerini almaktadır. Sonuç olarak, namlu atış yüküne maruz kaldığında, çeki (+) yönünde oluşan teğetsel gerilmenin mertebesi ciddi seviyede azaltılıp namlu cidar kalınlığı boyunca yönlendirilerek, bası (-) yönünde karakteristik özellik gösteren kalıcı bir kalıntı gerilmenin meydana gelmesi sağlanmaktadır.

Radyal gerilme: Şekil 5.3 ve 5.6'da gösterilen radyal gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi temas bölgesi içinde, mandrelin namlu içindeki aksenal hareketinden ve iç çapta meydana gelen genişlemeden kaynaklı olarak namlu iç yüzeyinde bası (-) yönünde kalıcı bir radyal bir gerilme meydana gelmektedir. Namlu iç ve dış çapında gerilme değerleri yaklaşık 0 MPa iken namlu cidar kalınlığının %31'lik mesafesine denk gelen konumda radyal gerilme maksimum değeri olan -377,08 MPa değerini almaktadır

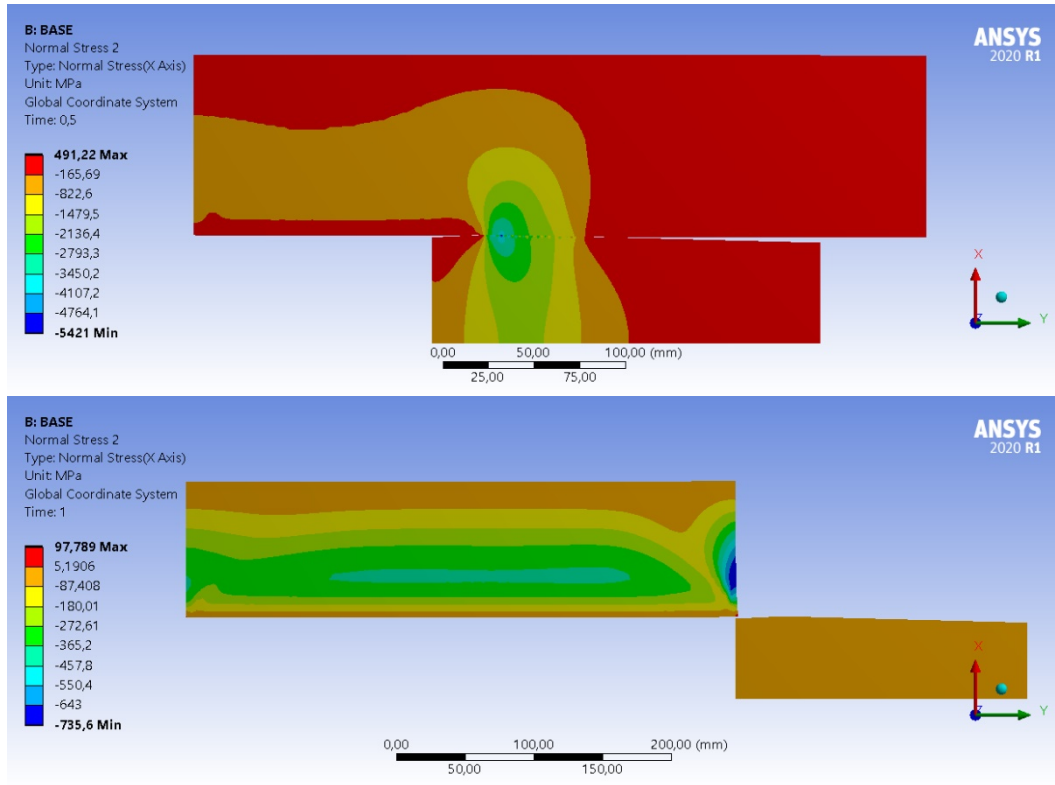
Eksenel gerilme: Şekil 5.4 ve 5.6'da gösterilen aksenal gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mekanik otofretaj işleminin aksenal-simetrik ve dinamik bir deformasyon türü olmasından dolayı, aksenal gerilmeler oldukça önem arz etmektedir. Mandrelin namlu iç çapını sıkıştırarak namlu içinde hareketi esnasında, iç çapta meydana gelen sürtünme ile iç yüzeylere yakın yerlerde ciddi miktarda bası (-) yönünde aksenal gerilme olurken, dış çap çeki (+) yönünde aksenal gerilmeye maruz

kalmaktadır. Burada namlu iç çapında bası (-) yönünde -733,36 MPa aksenal gerilme oluşmaktadır. Namlu cidar kalınlığının %2'ne karşılık gelen bölgede ise -889,36 MPa ile en yüksek değerini alan aksenal gerilme, namlu cidar kalınlığı boyunca azalmaktadır. Namlu cidar kalınlığının %50'lik kısmına denk gelen yerde çeki (+) olarak yönelen aksenal gerilmenin namlu dış çapındaki değeri 205,01 MPa seviyesinde olmaktadır

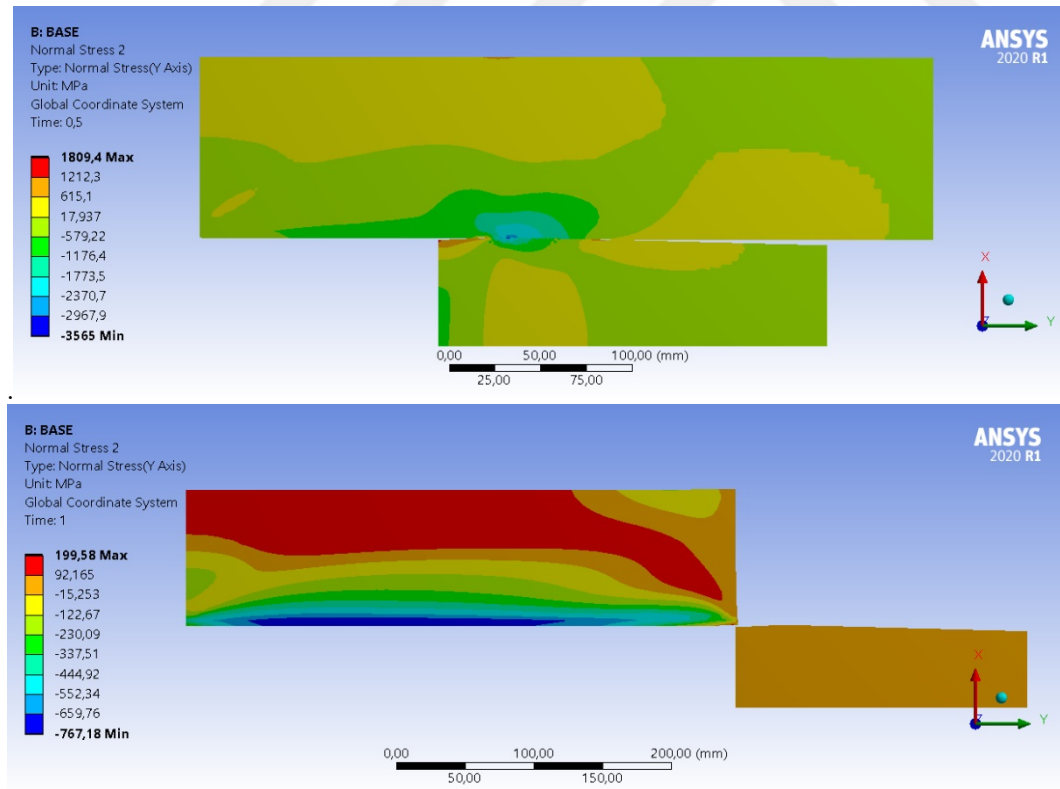
Von Mises eşdeğer gerilme: Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilen Von Mises eşdeğer gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mekanik otofretaj işleminin sonunda, gerilme bileşenlerinin iç yüzeyden dış yüzeye doğru çeki (+) yönünden bası (-) yönüne doğru yönelmesinden kaynaklı olarak, Von Mises eşdeğer gerilmesi değerinin namlu iç çapından cidar kalınlığı boyunca yönlendirildiği görülmektedir (Şekil 5.5 ve 5.6). Von Mises eşdeğer gerilme değerinin namlu iç çapından namlu cidar kalınlığının %15'lik kısmına kadar yaklaşık 1092 MPa değerinde sabit olarak kaldığı görülmektedir. Ardından eşdeğer gerilmenin namlu cidar kalınlığının %33'lük kısmında 192,2 MPa ile minimum değerini almaktadır. Von Mises eşdeğer gerilmesi minimum değerini aldıktan sonra, artarak namlu e cidar kalınlığının %65'lik kısmına denk gelen yerde 793,08 MPa değerini aldığı, ardından tekrar düşüşe geçerek namlu dış çapında 480,65 MPa değerine sahip olduğu görülmektedir.



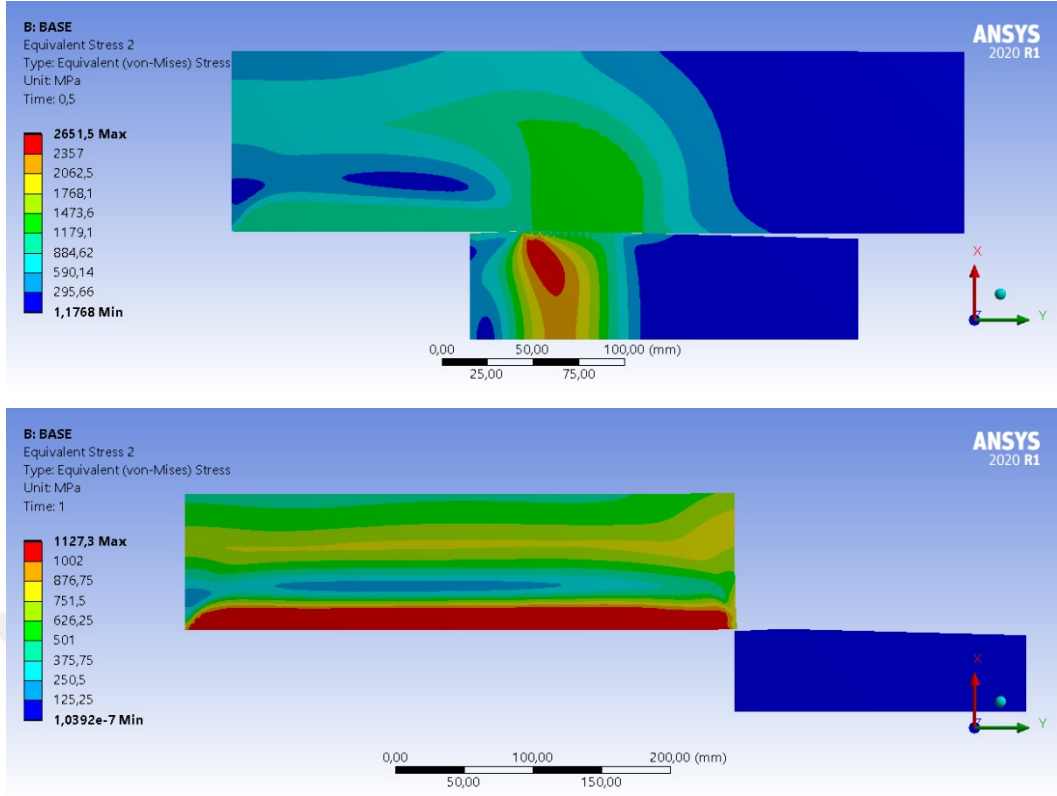
Şekil 5.2. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan teğetsel gerilmeye ait SEM görüntüsü



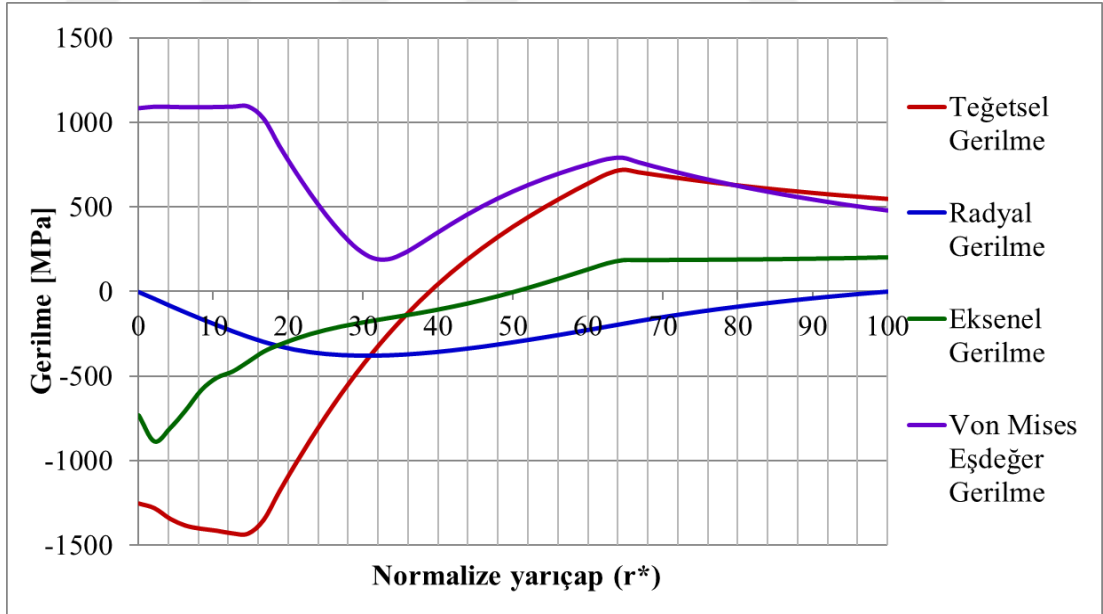
Şekil 5.3. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan radyal gerilmeye ait SEM görüntüsü



Şekil 5.4 Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan eksenel gerilmeye ait SEM görüntüsü



Şekil 5.5. Mekanik otofretaj işlemi esnasında ve sonunda oluşan Von Mises eşdeğer gerilmesine ait SEM görüntüsü



Şekil 5.6. Mekanik otofretaj işleminin sonunda elde edilen gerilme dağılımları

Mekanik otofretaj işlemi uygulanmış namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmelere ait SEM görüntüsü Şekil

5.7, 5.8, 5.9 ve 5.10’da gösterilmiştir. Çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları ise Şekil 5.11’de grafik üzerinde gösterilmiştir.

5.2.3. Mekanik otofretajlı Çalışma basıncı altında:

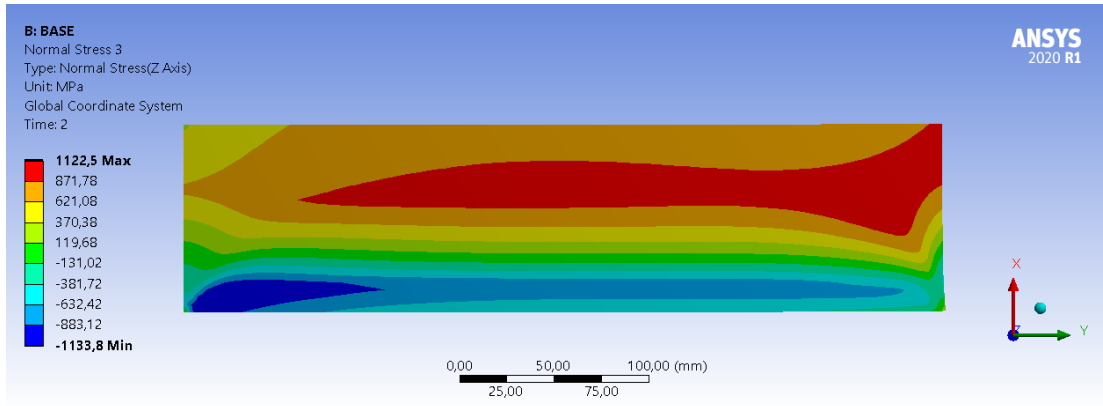
Mekanik otofretajlı Çalışma basıncı altında:

Teğetsel gerilme Namlu mekanik otofretaj işlemine tabi tutulduktan sonra, teğetsel gerilmenin iç çapta -401,42 MPa değerinde olduğu ve namlu et kalınlığının %13’lük mesafesine denk gelen konumda -757,62 MPa değerine sahip olduğu görülmektedir. Burada önem arz eden durum, teğetsel gerilmenin otofretajsız bir namluya nazaran iç çapa yakın bölgelerde bası (-) yönünde ve namlu et kalınlığının %65’lik mesafesine denk gelen konumda 1007,3 MPa değerinde olduğudur. Böylece teğetsel gerilme yorulma ve çatlak başlangıcı açısından kritik bölge olan iç çaptan oldukça uzak bir mesafeye yönlendirilmiştir.

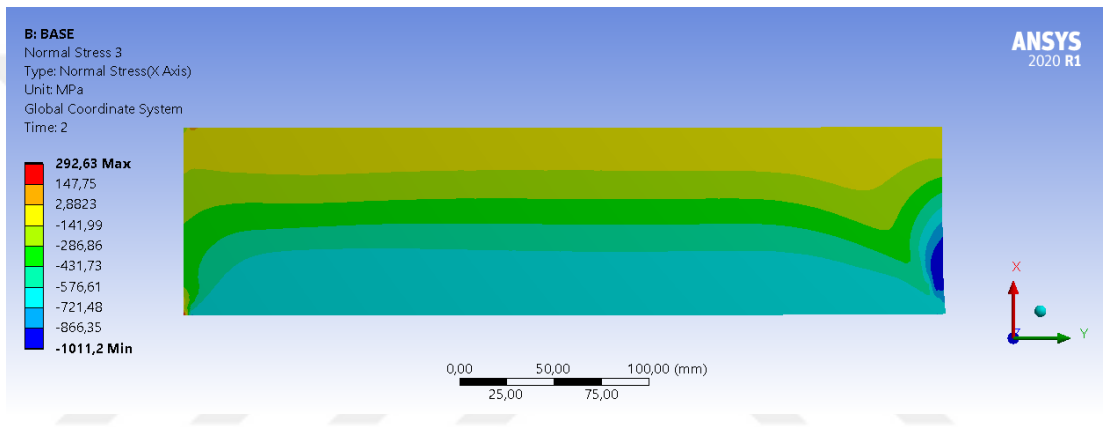
Radyal gerilme: Namlu et kalınlığı içerisinde oluşturulmuş kalıntı gerilmenin etkisiyle, radyal gerilmenin namlu iç çapında -666,4 MPa değeri ile maksimum seviyede olduğu ve dış çapa doğru ise nihai değerinin 0 MPa olacak şekilde düştüğü görülmektedir.

Eksenel gerilme Eksenel gerilmenin mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan eksenel gerilme dağılımına benzer şekilde olduğu görülmektedir. Namlu et kalınlığının %2’ne karşılık gelen bölgede, -760,57 MPa ile en yüksek değerini alan eksenel gerilme, namlu et kalınlığının %52’ne karşılık gelen konumda çeki (+) yönüne geçmektedir. Eksenel gerilme dış çapta nihai olarak 218,98 MPa değerini almaktadır.

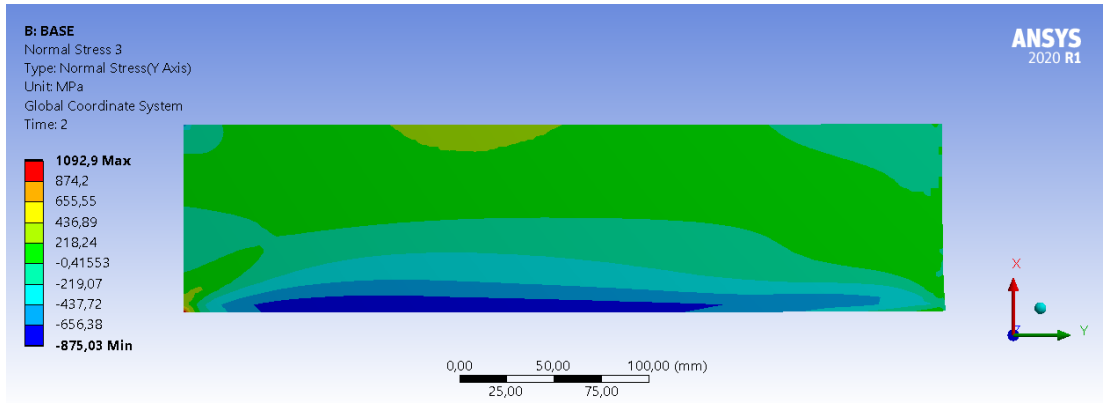
Von Mises eşdeğer gerilme: Von Mises eşdeğer gerilmesinin namlu et kalınlığı boyunca yönlendirildiği ve seviyesinin otofretajsız bir namluya göre makul seviyede azaldığı görülmektedir. Eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %63’ne denk gelen konumda 1122,3 MPa seviyesinde olmaktadır.



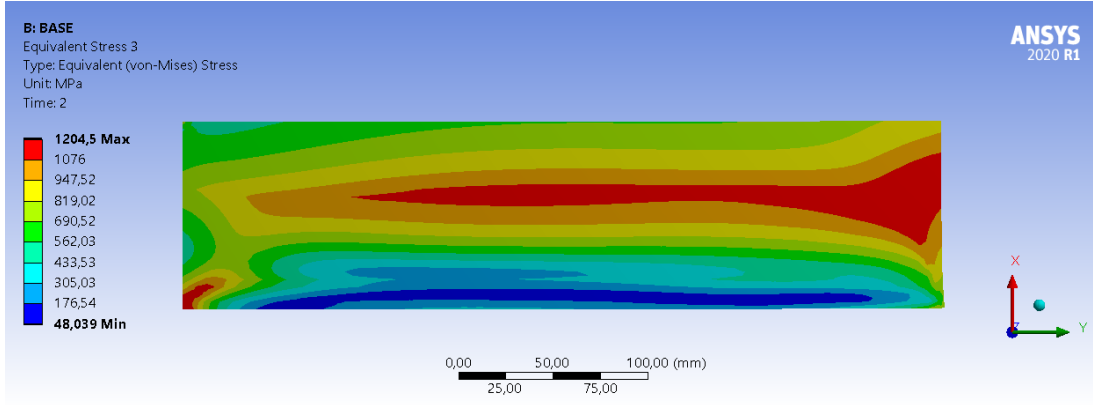
Şekil 5.7. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan teğetsel gerilmeye ait SEM görüntüsü



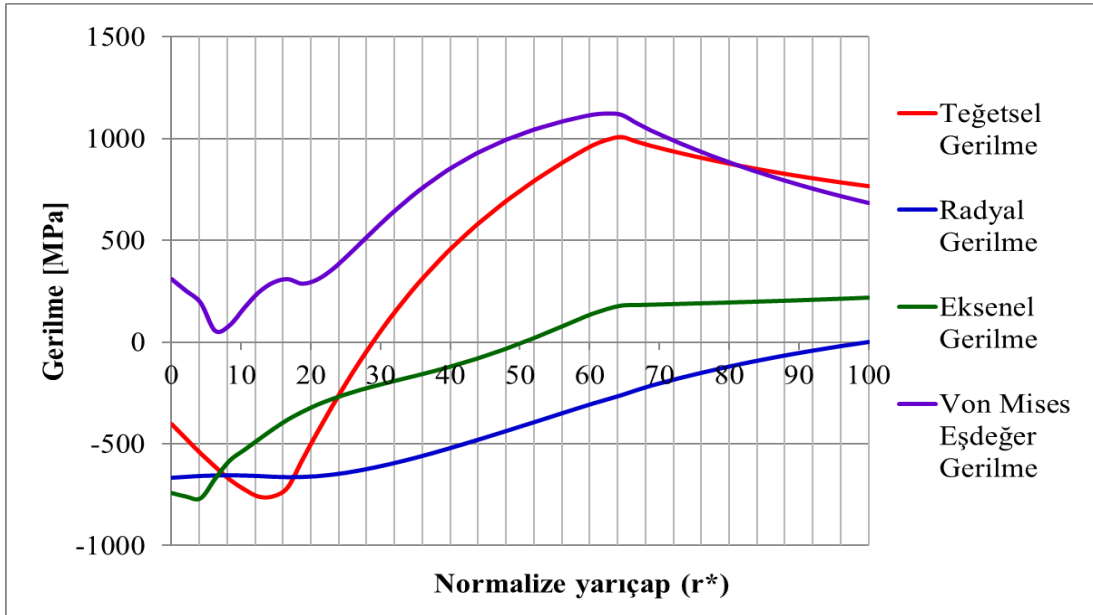
Şekil 5.8. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan radyal gerilmeye ait SEM görüntüsü



Şekil 5.9. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan eksenel gerilmeye ait SEM görüntüsü



Şekil 5.10. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilmeye ait SEM görüntüsü



Şekil 5.11. Otofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan gerilme dağılımları

5.2.4. Otofretajsız ve Otofretajlı karşılaştırması (Çalışma basıncı altında)

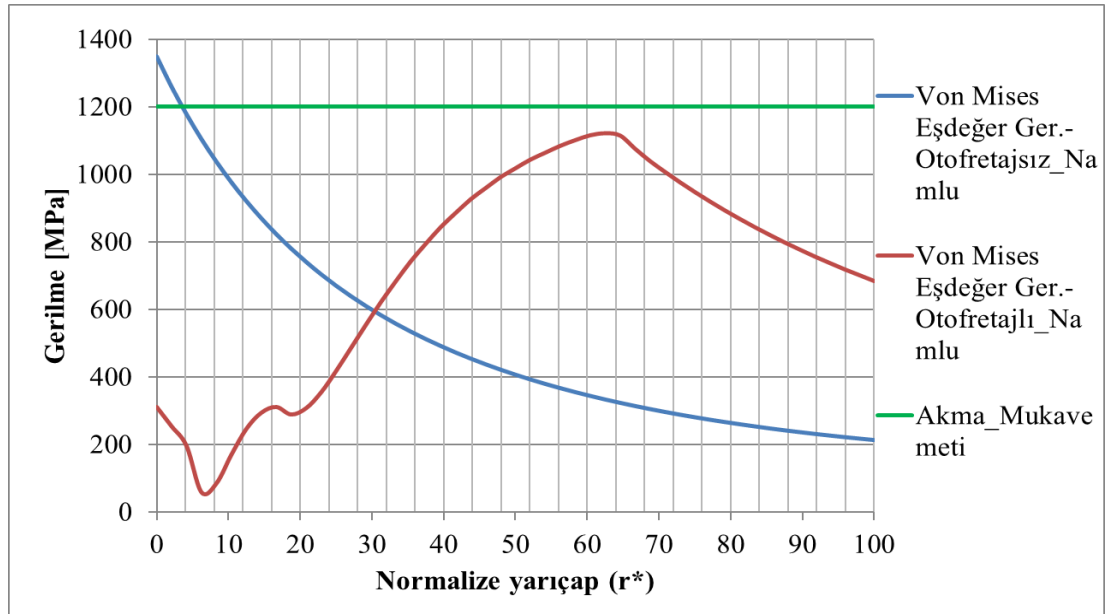
Otofretajsız ve Otofretajlı karşılaştırması (Çalışma basıncı altında)

Şekil 5.12’de ofofretajsız ve ofofretajlı namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiştir. Otofretajsız namluda, çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerinin, namlu iç çapında namlu malzemesi akma mukavemeti olan 1195 MPa değerinin üstünde olacak şekilde 1350,3 MPa olduğu görülmektedir. Kırılma mekaniğinde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi açısından kritik bölge olan iç çapta akma mukavemetinin üzerinde oluşan bu değer, namlunun yapısal bütünlüğünün korunması açısından olumsuz bir durum teşkil etmektedir.

Otofretaj işleminin ardından 670 MPa çalışma basıncı uygulandığında ise, iç çapa yakın bölgelerde Von Mises eşdeğer gerilme değerinin dalgalı bir seyir göstererek minimum değerini aldığı görülmektedir. Eşdeğer gerilme, namlu iç çapında 310,45 MPa iken namlu et kalınlığının %6'sına denk gelen kısımda minimum değerini alarak 57.15 MPa olmaktadır. Bu noktadan sonra çok küçük bir düşüşün ardından, eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %63'ne denk gelen konumda 1122,3 MPa olmaktadır. Bu gerilme değerinin, namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa'nın altında olduğu görülmektedir. Eşdeğer gerilme maksimum değerini aldıktan sonra dış çapta 683,78 MPa nihai değerini almaktadır.

Otofretajlı namluda Von Mises eşdeğer gerilme değeri, otofretajsız bir namluya göre iç çapa yakın bölgelerde oldukça azalırken, otofretajlı namluda maksimum eşdeğer gerilme otofretajsız namluya göre %16,88 oranında azalmıştır. Benzer geometrik ölçüye sahip bir ağır silah namlusunda yapılan çalışmada (Hu vd., 2014), maksimum Von Mises eşdeğer gerilmesi %18 oranında azalmıştır. Çalışmada elde edilen sonucun, literatürde verilen değerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Otofretaj işleminin ardından otofretajsız namluya göre daha düşük bir eşdeğer gerilme değeri elde edilmesi, otofretajlı namluda basınç taşıma kapasitesinin artmasına olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Basınç taşıma kapasitesinden kasıt, namlunun uygulanan herhangi bir basınç yükü esnasında plastik deformasyona maruz kalmamasıdır.



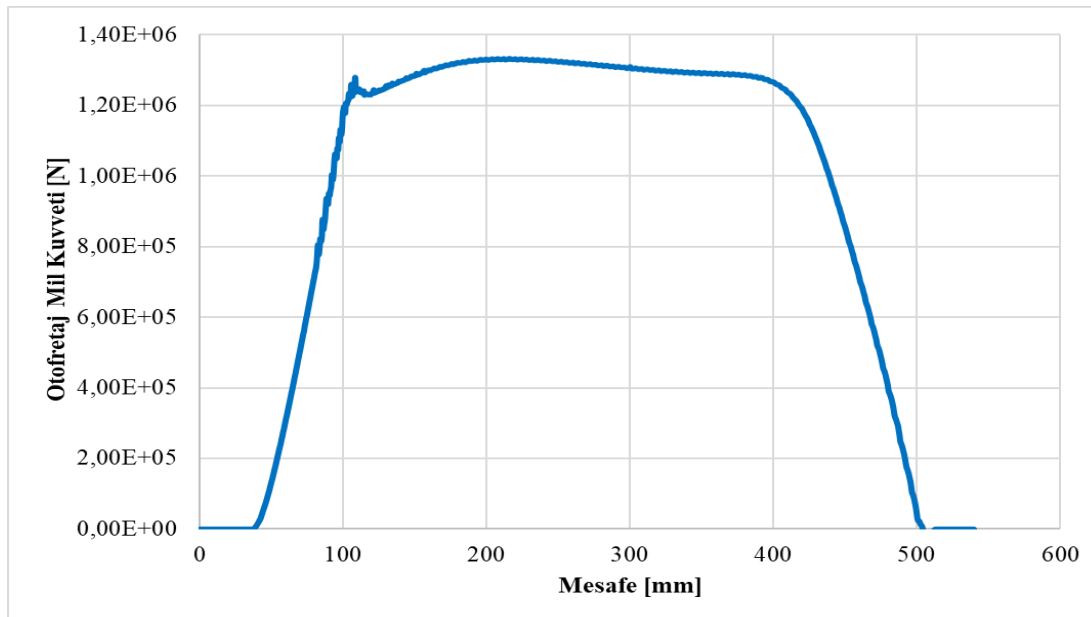
Şekil 5.12. Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

5.3. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Mil Kuvveti

Mekanik ofofretaj işlemindeki önemli parametrelerden birisi de mandrelin namlu içinde hareketini sağlayan mil kuvvetidir. Mekanik ofofretaj işleminin gerçekleşebilmesi için namlu ile mandrel arasındaki temas ve etkileşimden oluşan sürtünme kuvvetini yenecek bir kuvvetin, işlem boyunca güvenli ve stabil bir şekilde sisteme aktarılmalıdır.

Mekanik ofofretaj işlemi esnasında gerekli olan kuvvetin optimum seviyede, mekanik ofofretaj tesisinde mevcut hidrolik sistemin kapasitesi içinde olması gereklidir. Oluşan bu kuvvetin optimize edilmesi, mekanik ofofretaj tesisinin bakım ve işletme giderlerinin azaltılmasında oldukça faydalı olacaktır. Ayrıca mil kuvvetinin verimli bir şekilde kontrol altına alınması, mandrelin daha çok gerilmeye ve deformasyona uğramasının da önüne geçecektir.

Sayısal modelden hesaplanan mandrelin namlu içinde hareketini sağlamak için oluşan mil kuvvetinin namlu boyunca değişimi Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Referans analizdeki geometri, sınır şartları ve malzeme özellikleri mil kuvvetinin okunması için temel olarak alınmıştır. Bu analizde sürtünme katsayısı 0,015 değerindedir. Mandrel üzerindeki düz bölgenin (l_{db}) namlu iç yüzeyi ile temas ettiği andan mandrelin namluyu terk ettiği ana kadar oluşan mil kuvvetinin 1.330.000,00 N (135,58 ton) civarında olduğu görülmektedir. Bu değer ile ölçülen değer arasında %4,5 mertebesinde makul bir farklılık görülmektedir.



Şekil 5.13. Mekanik ofofretaj işlemi esnasında sayısal modelden elde edilen mil kuvveti

5.4. Parametrik Analizler

Çalışma kapsamında referans analiz için sayısal sonuçların değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasından sonra, parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1’de gösterildiği üzere, inceleme matrisi 5 ana parametre içermektedir:

- 1) yüzde arakesit oranı $((r_m/a)-1) * 100$,
- 2) namlu malzemesinin akma mukavemeti (σ_y),
- 3) sürtünme katsayısı, (μ),
- 4) mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu (l_{db}),
- 5) mandrel konik açıları orantı faktörüdür (a_f ve a_b),

Analiz matrisinde incelenen parametreler ve bunların değerleri belirlenirken saha uygulamaları göz önünde bulundurulmuştur. Burada, referans analiz, Analiz 1 olarak belirtilmiştir. Referans analizde (Analiz 1) yüzde arakesit oranı 2,94, namlu malzemesinin akma mukavemeti 1195 MPa, sürtünme katsayısı 0,015, mandrel üzerindeki düz bölgenin uzunluğu 6,35 mm ve mandrel konik açıları orantı faktörü (a_f : 1,5° ve a_b : 3,0°) ise 1 olarak belirlenmiştir. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak yüzde arakesit oranı, akma mukavemeti, sürtünme katsayısı, mandrel üzerindeki düz bölge ve mandrel konik açıları orantı faktörüne göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

İlerleyen alt bölümlerde, incelenen her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı başlıklar halinde açıklanarak değerlendirilmiştir.

5.4.1. Yüzde Arakesit Oranına Göre Gerilme ve Mil Kuvveti Dağılımları

Mekanik otofretaj işlemi için oluşturulan analiz matrisinde incelenecek ilk parametre, yüzde ara kesit oranıdır (YAO). Yüzde arakesit oranı, mandrel üzerinde bulunan düz bölgeye ait çapın namlu iç çapına oranı anlamına gelmektedir.

Yüzde arakesit oranı, Denklem 5.1’de gösterilmiştir.

$$\%Arakesit\ Oranı = \left(\frac{r_m}{a} - 1 \right) \times 100 \quad (5.1)$$

Yüzde arakesit oranları, mandrel üzerinde bulunan düz bölgeye ait çap sabit tutularak namlu iç çapı değiştirilmek suretiyle belirlenmiştir.

Referans analizde %2,94 yüzde arakesit oranı temel alınmıştır. Ardından sırasıyla %0,5, 1,0, 2,0 ve 3,5 arakesit oranları seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.14, 5.15, 5.16 ve 5.19’da mekanik otofretaj işleminden sonra farklı yüzde arakesit oranlarına göre oluşan teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 5.18’de ise farklı yüzde arakesit oranlarına göre, mandrelin namlu içinde eksenel hareketi esnasında oluşan mil kuvvetleri verilmiştir.

Teğetsel Gerilme: Şekil 5.14’de teğetsel gerilmenin namlu iç yarıçapından dış yarıçapa doğru, bası (-) yönünden çeki (+) yönüne doğru yönlendirildiği görülmektedir. Yüzde arakesit oranı arttıkça, teğetsel gerilmenin bası (-) yönünden çeki (+) yönüne geçiş yaptığı namlunun cidar kalınlığının yüzdelik oranına denk gelen konumunda da artmıştır.

%0,5 YAO için teğetsel gerilmenin bası (-) yönünden çeki (+) yönüne geçiş yaptığı konum namlu cidar kalınlığının %4’ne karşılık gelirken, %3,5 YAO için ise namlu cidar kalınlığının %15’ne karşılık gelmektedir. %0,5 YAO için namlu cidar kalınlığının %4’ne karşılık gelen teğetsel gerilme değeri -412,04 MPa iken, %3,5 YAO için namlu cidar kalınlığının %15’ne karşılık gelen teğetsel gerilme değeri -1381,4 MPa’dır.

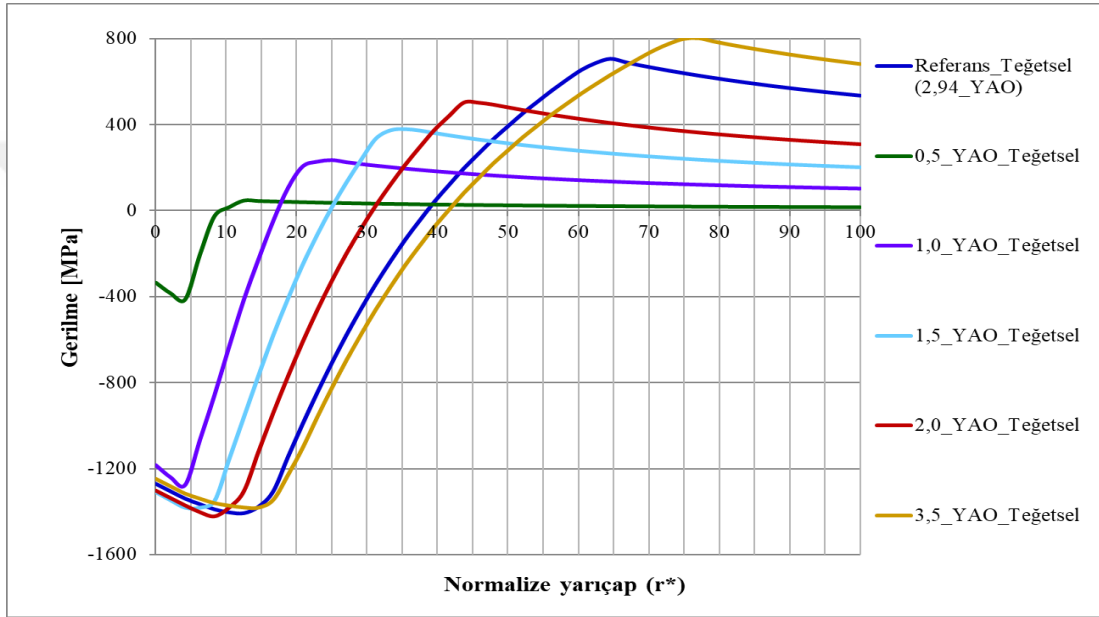
Radyal Gerilme: Şekil 5.15’de radyal gerilme değerlerinin iç ve dış yarıçapta 0 olduğu görülmektedir. İç yarıçapta ise gerilmeler bası (-) yönündedir ve maksimum değerini almaktadır. Artan yüzde kesit oranı ile radyal gerilmeler namlu cidar kalınlığı içinde daha yüksek bir seviyede oluşmaktadır. %0,5 YAO için radyal gerilmenin maksimum değeri -385,40 MPa iken, %3,5 YAO için bu değer -38,01 MPa’dır.

Eksenel Gerilme: Şekil 5.16’da eksenel gerilmelerin teğetsel gerilmelere benzer şekilde namlu iç yarıçapından dış çapa doğru, bası (-) yönünden çeki (+) yönüne doğru yönlendirildiği görülmektedir. Daha büyük yüzde arakesit oranı daha geniş bir sıkışma alanı yarattığı için, eksenel gerilme değeri de büyük olmaktadır. %0,5 YAO için eksenel gerilme değeri -272,71 MPa iken, %3,5 YAO için bu değer -695,15 MPa’dır.

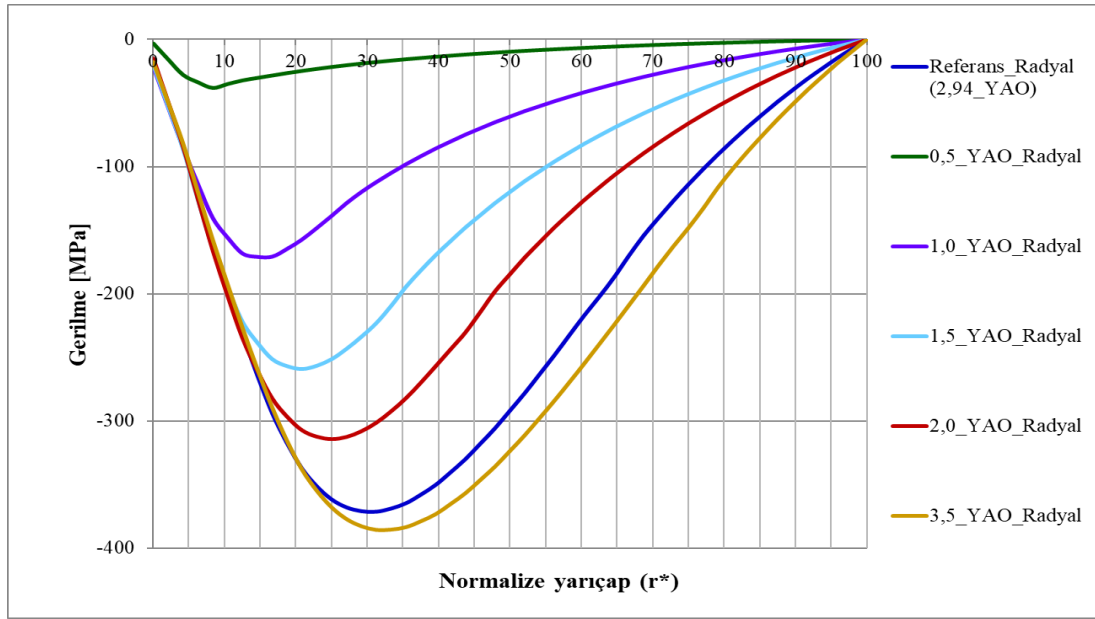
Von Mises Eşdeğer Gerilme: 5.17’de Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin hem iç hem de dış yarıçapta yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Gerilme değerlerinin bası (-) yönünden çeki (+) yönüne doğru yönlendirmesinden kaynaklı olarak Von Mises gerilme değerinin namlu cidar kalınlığı boyunca, iç yarıçaptan belli mesafede minimum değerini aldığı görülmektedir. %0,5 YAO için Von Mises eşdeğer gerilmesinin minimum değeri namlu cidar kalınlığının %4’lük kısmına karşılık gelen

konumda 336,97 MPa olmuştur. %3,5 YAO için ise; bu değer namlu cidar kalınlığının %15'ine karşılık gelen konumda 1078,4 MPa olmuştur.

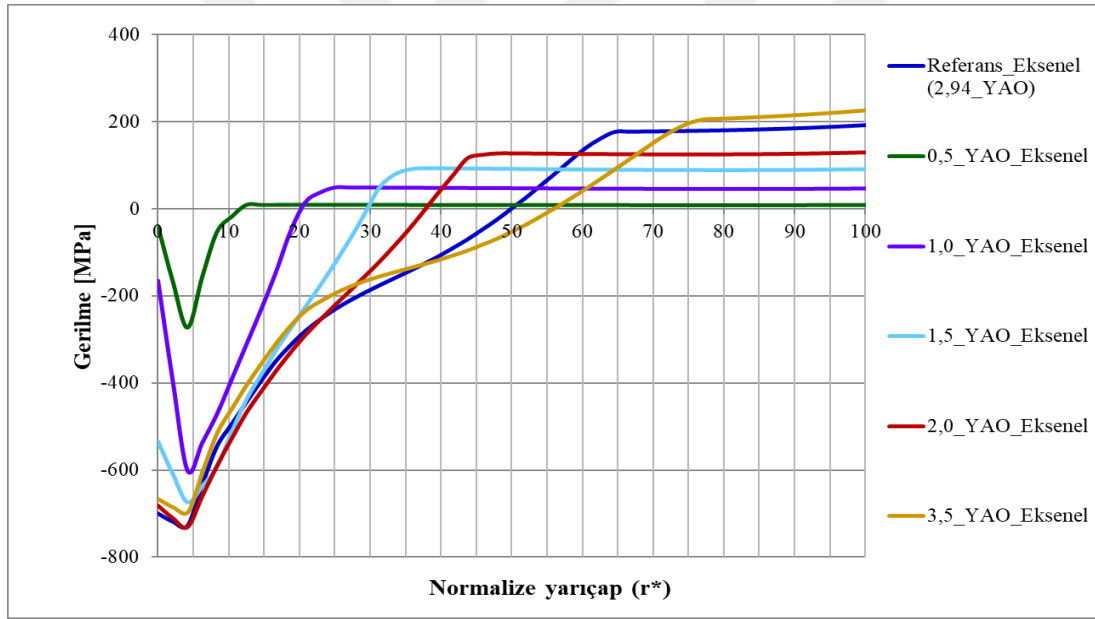
Mil kuvveti: Şekil 5.18'de farklı yüzde arakesit oranlarına göre, mandrelin namlu içinden boydan boya hareketini sağlamak için gerekli mil kuvveti grafik üzerinde çizdirilmiştir. Grafik incelendiğinde, yüzde arakesit oranı arttıkça, plastik deformasyon miktarının da aynı oranda arttığı; dolayısıyla daha yüksek bir mil kuvvetine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. %0,5 YAO için mil kuvveti ortalama 14,07 ton iken %3,5 YAO için mil kuvveti 165,19 ton civarındadır.



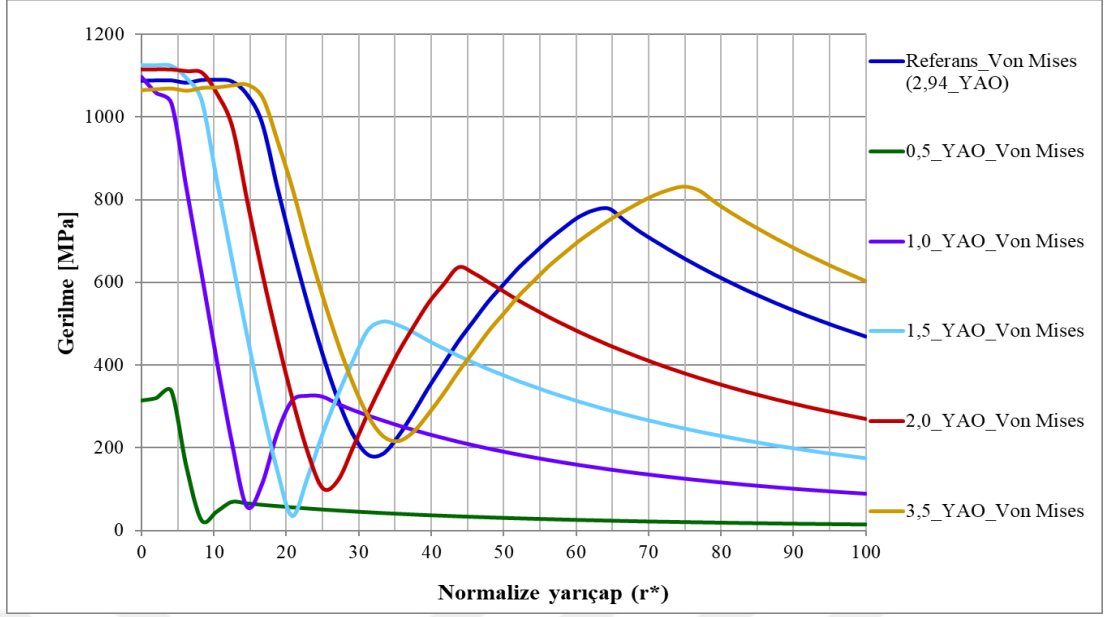
Şekil 5.14. Yüzde arakesit oranına göre teğetsel gerilmelerin değişimi



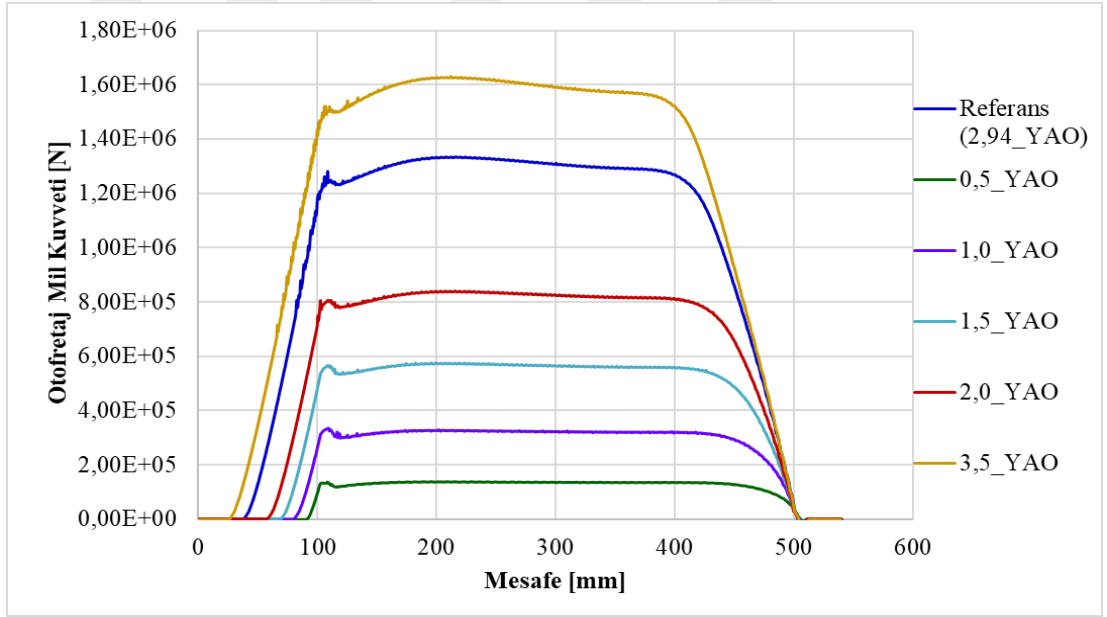
Şekil 5.15. Yüzde arakesit oranına göre radyal gerilmelerin değişimi



Şekil 5.16. Yüzde arakesit oranına göre eksenel gerilmelerin değişimi



Şekil 5.17. Yüzde arakesit oranına göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi



Şekil 5.18. Yüzde arakesit oranına göre mil kuvvetinin değişimi

5.4.2. Akma Mukavemetine Göre Gerilme ve Mil Kuvveti Dağılımları

Mekanik otofretaj işlemi için oluşturulan analiz matrisinde, incelenen parametrelerden olan akma mukavemeti için sayısal çalışmada namlu malzemesi olarak tanımlanan AISI 4340 türü çeliğin değeri olan 1195 MPa referans olarak seçilmiştir.

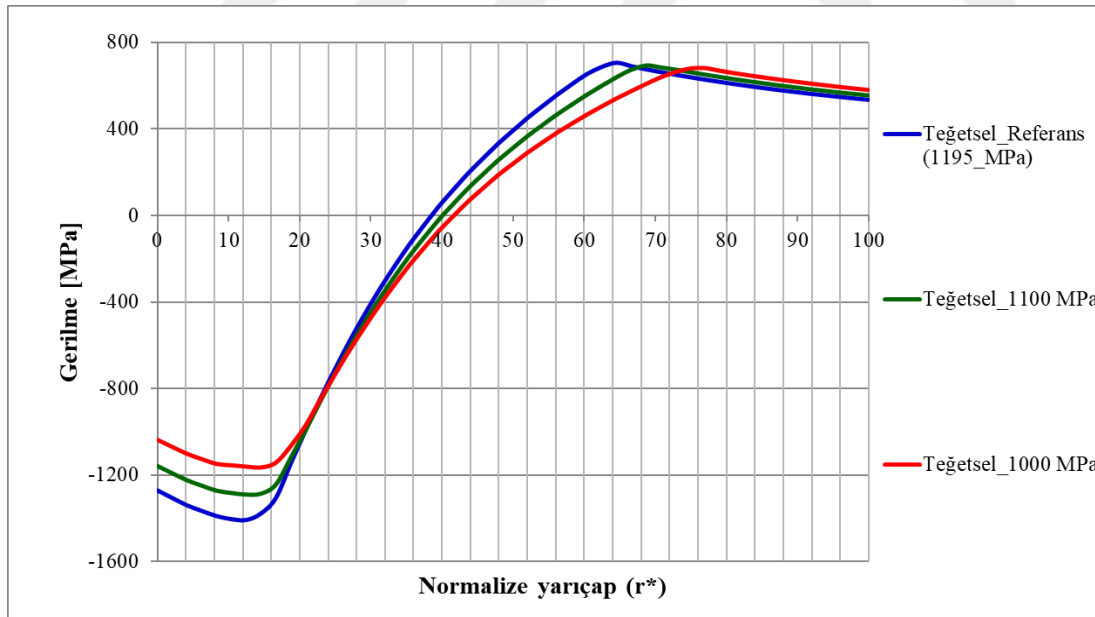
Daha sonra seçilen namlu malzemesinin farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıtma işlemi neticesinde oluşabilecek akma mukavemeti değerlerine göre analizler gerçekleştirilmiştir. Seçilen akma mukavemetlerinin, ısıtma işlem sıcaklıklarına bağlı

olarak deneysel çalışmalarda elde edilebilen makul değerler olmasına dikkat edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 1000 MPa, 1100 MPa ve 1195 MPa'dır.

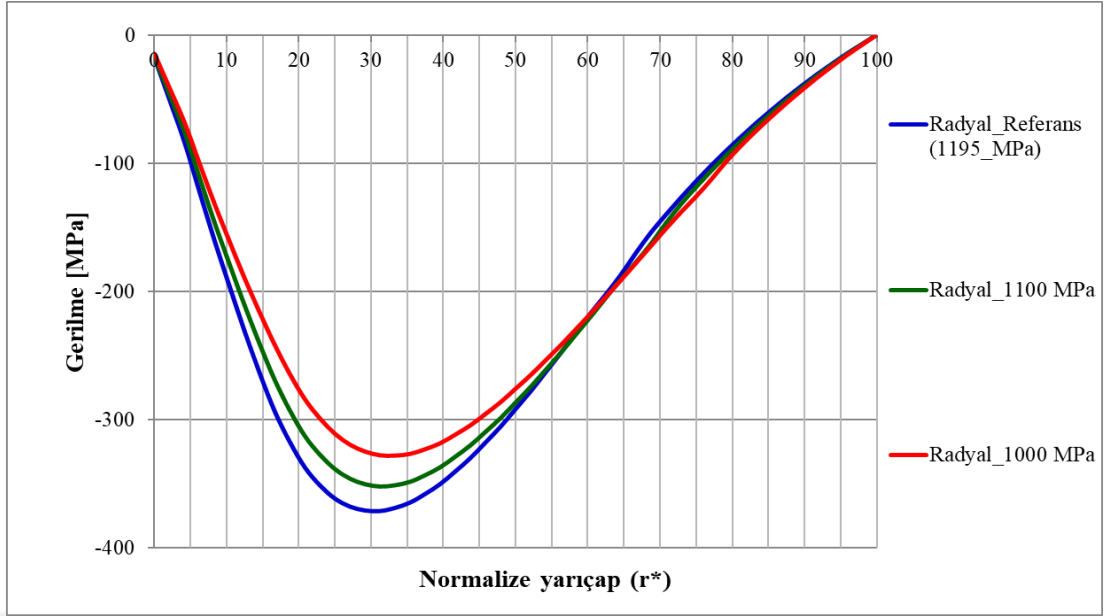
Şekil 5.19, 5.20, 5.21 ve 5.22'de mekanik otofretaj işleminden sonra farklı akma mukavemetlerine göre oluşturulmuş teğetsel, radyal, aksenal ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri grafik üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 5.23'de ise farklı akma mukavemetlerine göre, mandrelin namlu içinde aksenal hareketi neticesinde oluşan mil kuvvetleri verilmiştir.

Şekil 5.19, 5.20, 5.21 ve 5.22'de verilen grafikler birlikte incelendiğinde, artan akma mukavemeti ile namlunun mekanik otofretaj işlemi neticesinde oluşan plastik deformasyona karşı direnci artmıştır. Grafiklerde bu duruma paralel olarak bütün gerilme değerleri artmıştır.

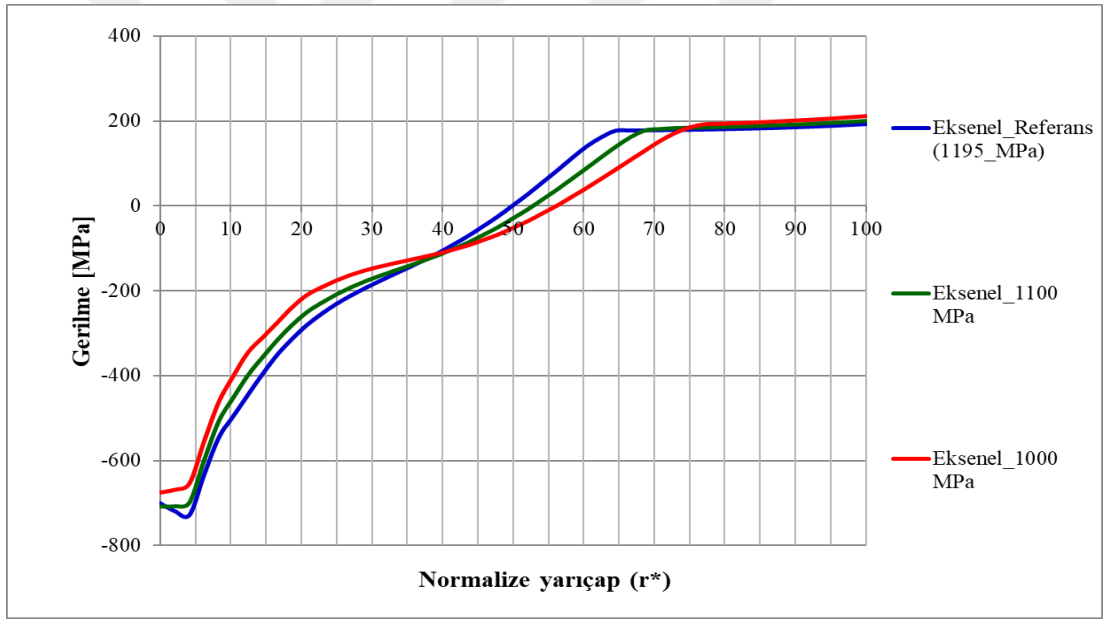
Şekil 5.23'de artan akma mukavemeti ile namlu malzemesinin plastik deformasyona direnci artmış; dolayısıyla mil kuvvetinde de artış olmuştur. Ancak ciddi bir artış olmamıştır. Referans değer olan 1195 MPa akma mukavemeti için mil kuvveti ortalama 135,58 ton iken, 1000 MPa akma mukavemeti için mil kuvveti 130,53 ton civarında oluşmuştur. İki değer arasındaki fark %3,73 olarak hesaplanmıştır.



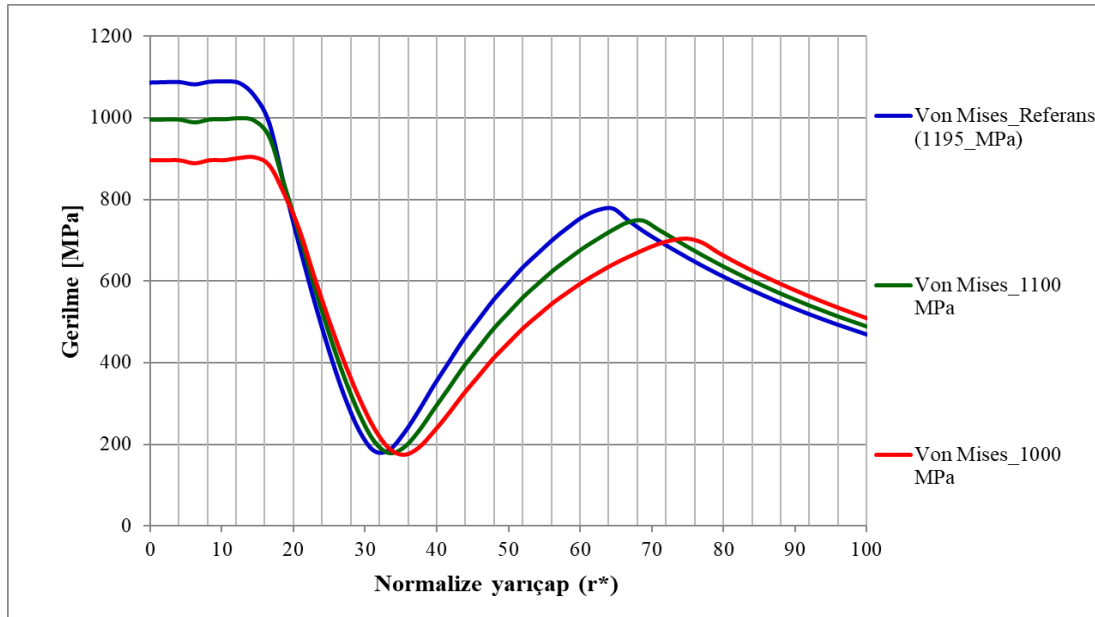
Şekil 5.19. Akma mukavemetlerine göre teğetsel gerilmelerin değişimi



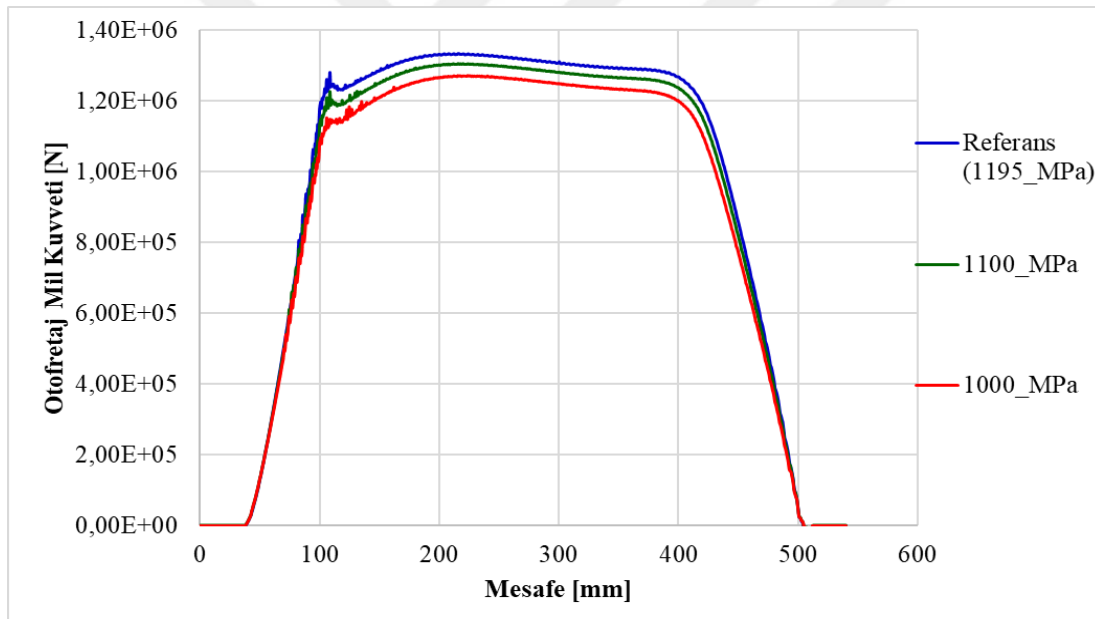
Şekil 5.20. Akma mukavemetlerine göre radyal gerilmelerin değişimi



Şekil 5.21. Akma mukavemetlerine göre eksenel gerilmelerin değişim



Şekil 5.22. Akma mukavemetlerine göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi



Şekil 5.23. Akma mukavemetlerine mil kuvvetinin değişimi

5.4.3. Sürtünme Katsayısına Göre Gerilme ve Mil Kuvveti Dağılımları

Analiz matrisinde incelenen diğer bir parametre sürtünme katsayısıdır (μ).

Sürtünme katsayısı için referans değer olarak $0,015\mu$ belirlenmiştir. Bu değer sayısal çalışmada sınır şartı olarak SEM modeline tanımlanan ve namlu iç yüzeyine fosfat kaplama (çinko/mangan) üzerine stearat bazlı yağ (O'hara, 1992) tatbik edildiğinde oluşan sürtünme katsayısı değeridir.

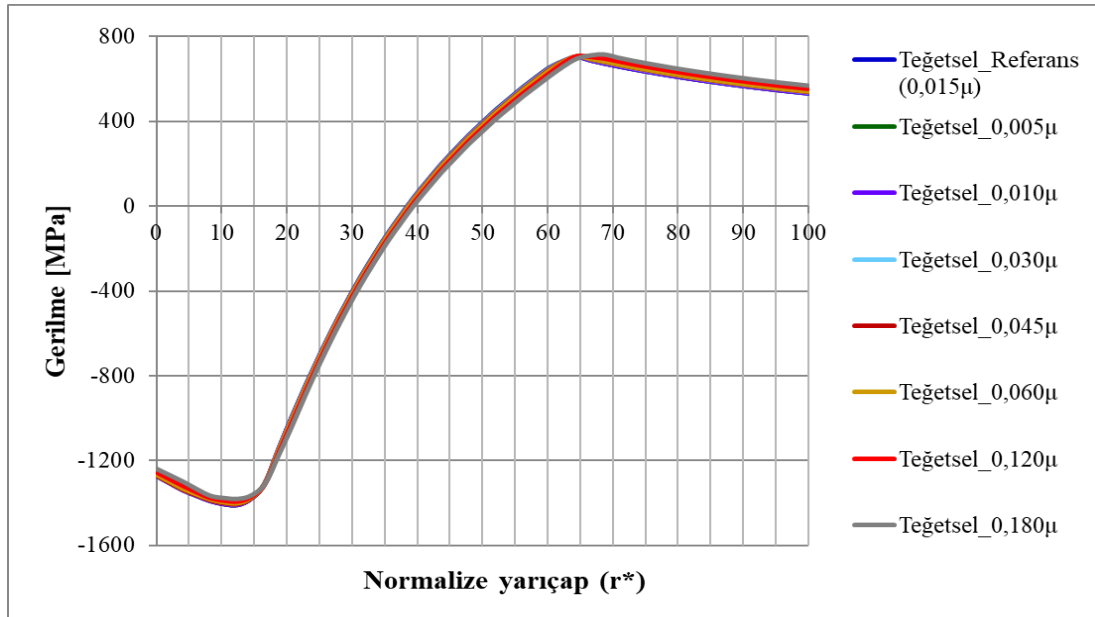
Literatürde mekanik otofretaj işleminde yağlayıcı olarak birçok yağlama ürünün kullanıldığı belirtilmektedir (O'hara, 1992; Bihamta vd., 2007; Gibson vd., 2012, 2014; Hu vd., 2014; Hu, 2018). Bu yağlayıcılar kullanıldığında elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin 0,005 ile 0,180 μ arasında değiştiği bilinmektedir. Analiz matrisinde belirtilen 0,005, 0,010, 0,015, 0,030, 0,045, 0,060, 0,120 ve 0,180 μ sürtünme katsayıları için elde edilen gerilme dağılımları ve mil kuvvetleri hesaplanmıştır.

Şekil 5.24, 5.25, 5.26 ve 5.29'da mekanik otofretaj işleminden sonra, farklı sürtünme katsayılarına göre oluşturulmuş teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri grafik üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 5.28'de ise farklı sürtünme katsayılarına göre, mandrelin namlu içinde boydan boya hareketi esnasında oluşan mil kuvvetleri grafik üzerinde verilmiştir.

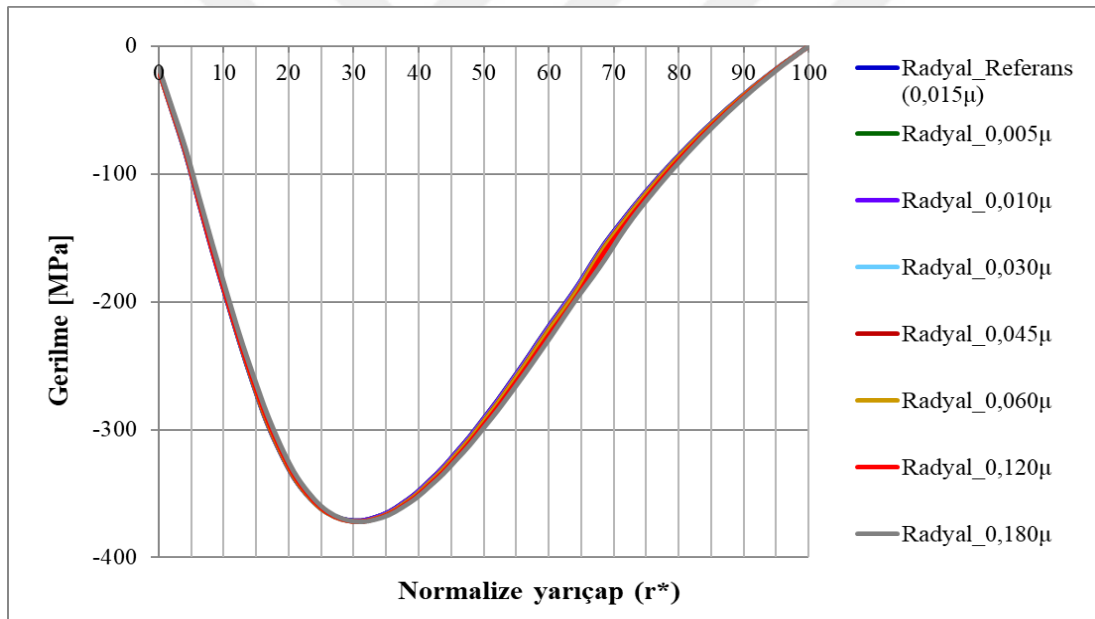
Teğetsel ve Radyal Gerilme: Şekil 5.24 ve 5.25'de, bütün sürtünme katsayıları için teğetsel ve radyal gerilmelerin hemen hemen benzer olduğu görülmektedir.

Eksenel Gerilme: Şekil 5.26'da artan sürtünme katsayısı ile eksenel gerilmelerin çok küçük bir değişim gösterdiği görülmektedir. Şekil 5.25 ile beraber değerlendirildiğinde, sürtünme katsayısı değişmesine rağmen, kontak basıncı ($r=r_a$ 'da $\sigma=\sigma_r$) sabit kalmaktadır ve dolayısıyla değişim oldukça düşüktür. Ayrıca grafik incelendiğinde, eksenel gerilmeler sürtünme katsayısı arttıkça daha pozitif bir başka tabirle daha az negatif hale gelmektedir, ancak grafik üzerinde birbirleri ile benzer bir eğilim izlemektedir.

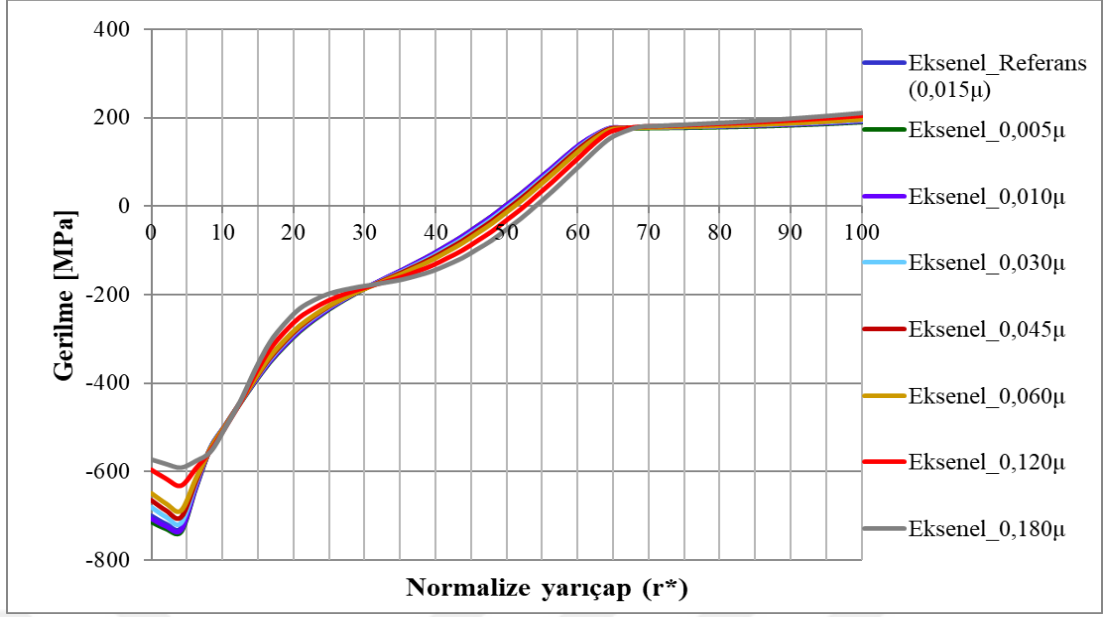
Von Mises Eşdeğer Gerilme: Şekil 5.27'da oluşan Von Mises eşdeğer gerilmelerin çok az farklılık gösterdiği görülmektedir.



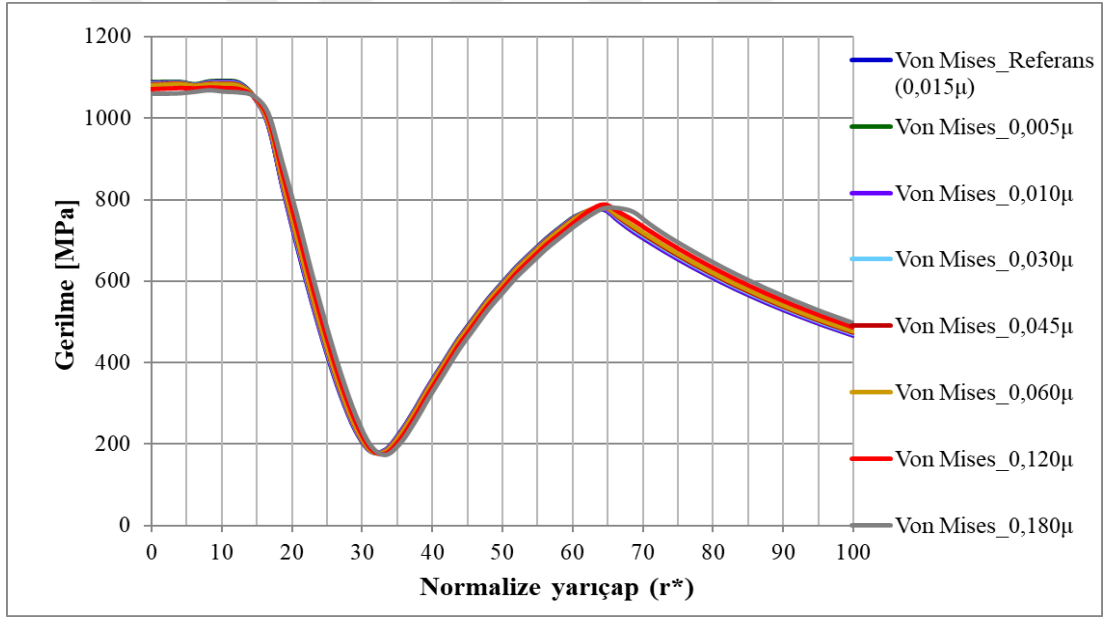
Şekil 5.24. Sürtünme katsayısına göre teğetsel gerilmelerin değişimi



Şekil 5.25. Sürtünme katsayısına göre radyal gerilmelerin değişimi



Şekil 5.26. Sürtünme katsayısına göre eksenel gerilmelerin değişimi



Şekil 5.27. Sürtünme katsayısına göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi

Mil kuvveti: Şekil 5.28'de, artan sürtünme kuvveti ile mandrelin namlu içinde eksenel olarak hareket edebilmesi için gerekli mil kuvveti de önemli ölçüde artmaktadır.

Analiz matrisinde referans analizde sürtünme katsayısı (μ) 0,015 olarak seçilmiştir ve bu değer sınır şartı olarak SEM programında tanımlanmıştır. Bu sürtünme katsayısının, namlu iç yüzeyine fosfat kaplama (çinko/mangan) üzerine stearat bazlı yağ (O'hara, 1992) tatbik edildiğinde elde edildiği daha önceki bölümlerde ifade edilmiştir.

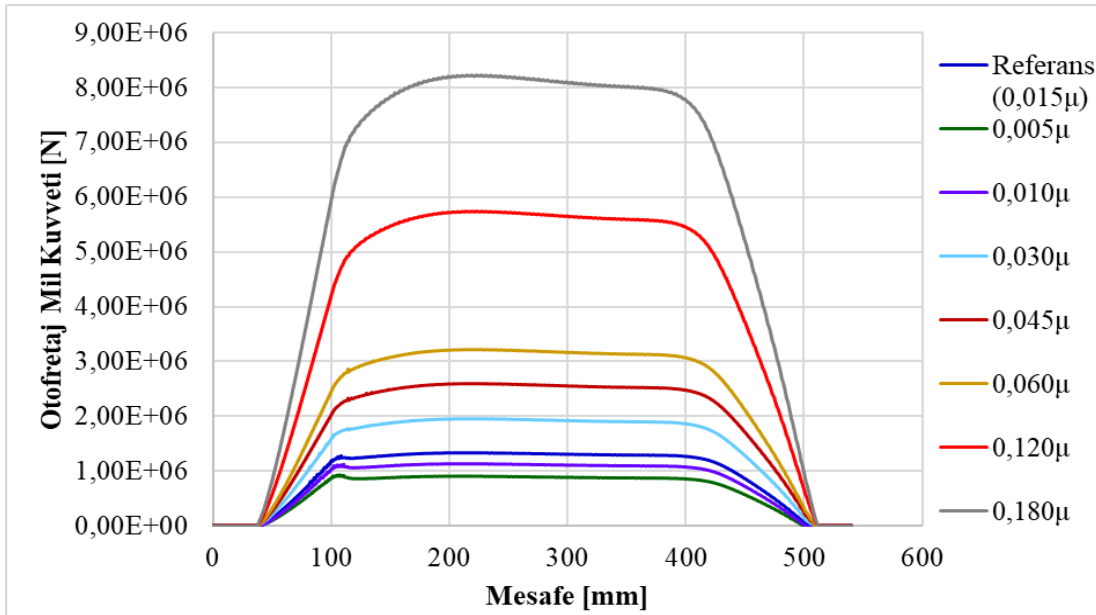
Analiz matrisinde 0,015 μ sürtünme katsayısı sınır şartı ile yapılan referans analizde, mil kuvveti 135,58 ton (1.330.000,00 N) olarak hesaplanmıştır.

Analiz matrisindeki sürtünme katsayıları kıyaslandığında, en düşük sürtünme katsayısı sınır şartı tanımlandığında elde edilen mil kuvveti yaklaşık 9,59 ton (94.000,00 N) iken, en yüksek sürtünme katsayısı ile yapılan analizde hesaplanan değer 836,17 ton (8.200.000,00 N) olmuştur.

Mekanik otofretaj tesisinin, 3 kademeli kuvvet ayar skalası bulunmaktadır. 3. kademe kuvvet skalası seçildiğinde, tesis maksimum 320 ton kuvvet ile mandrelin namlu içinde hareket etmesini sağlayacak mil kuvveti üretmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde, SEM analizinde 0,060 μ sürtünme katsayısı sınır şartı tanımlandığı durumda elde edilen mil kuvveti yaklaşık 330,39 ton (3.240.000,00 N) olduğu görülmektedir. Mevcut otofretaj tesisinin kapasitesi göz önüne alındığında, seçilen sürtünme katsayısının kritik eşiğidir. 0,060 μ ve üstünde seçilen sürtünme katsayıları için, mekanik otofretaj işleminin başarı ile gerçekleştirilmesi mümkün değildir.

Hesaplanan sürtünme kuvvetleri değerlendirildiğinde, sürtünme katsayısını düşürecek yağlama elamanlarının kullanımının tezgâh bakım ve onarım maliyetleri ile işletme giderleri açısından ne denli önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.28. Sürtünme katsayısına göre mil kuvvetinin değişimi

5.4.4. Mandrel Üzerindeki Düz Bölgeye Göre Gerilme ve Mil Kuvveti Dağılımları

Mekanik otofretaj işlemi için oluşturulan analiz matrisinde, mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğunun gerilme dağılımları ve mil kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Mandrel üzerinde bulunan düz bölge uzunluğu l_{db} indisi ile gösterilmektedir. Referans analizde mandrel üzerinde bulunan düz bölgenin uzunluğu 6,35 mm'dir. Düz bölgenin uzunluğu 0,25, 0,50, 0,75, 1,5, 3,00 ve 4,50 katsayıları ile orantılanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.29, 5.30, 5.31 ve 5.32'de mekanik otofretaj işleminden sonra farklı düz bölge uzunluklarına göre oluşturulmuş teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri grafik üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 5.33'da ise düz bölge uzunluklarına göre, mandrelin namlu içinde eksenel hareketi esnasında oluşan mil kuvvetleri grafik üzerinde verilmiştir.

Teğetsel Gerilme: Şekil 5.29'da mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan teğetsel gerilme değerlerinin 3,00 ve 4,50 l_{db} değerlerine sahip mandrel geometrileri hariç benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu noktada optimum l_{db} değerinin belirlenmesi için mekanik otofretaj işlemi sonunda sayısal olarak hesaplanan eksenel gerilme değerleri referans alınabilmektedir (Gibson vd., 2014).

Tez çalışması kapsamında, hidrolik otofretaj işlemi analitik olarak incelenirken Von Mises Akma Kriteri için yapılan hesaplamalarda (Bölüm 2, Denklem 2.10), düzlem şekil değişimi hali kabulü yapılmış ($\epsilon_z=0$) ve poisson oranının (ν) 0,5 olarak seçilmiştir. Düzlem birim şekil değişimi kabulünde, eksenel şekil değişimi 0 olarak kabul edilmiştir ($\epsilon_z=0$). Dolayısıyla eksenel gerilme(σ_z) teğetsel ve radyal gerilmelerin ortalamasına eşittir ($\sigma_z = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2}$).

Çizelge 5.3'te SEM analizinde hesaplanan eksenel gerilme değerleri ile düzlem birim şekil değişimi kabulü ile yapılan hesaplamalar karşılaştırılmıştır. İki değer arasında en az yüzdelik farkın 1,0 ve 1,5 l_{db} değerine sahip mandrel geometrilerine ait olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.3. Eksenel gerilme değerlerinin karşılaştırılması

l_{db}	Eksenel gerilme, σ_z (MPa)	Teğetsel ve radyal gerilmelerin ortalama değeri, $(\sigma_z + \sigma_r) / 2$ (MPa)	Fark
0,25	-964,2	-621,9035	-55,0401
0,5	-900,52	-631,7335	-42,5475
0,75	-811,13	-639,8235	-26,774
1	-754,67	-633,9655	-19,0396
1,5	-541,26	-637,251	15,0633
3	-341,14	-609,7385	44,05143
4,5	-303,81	-602,0025	49,53343

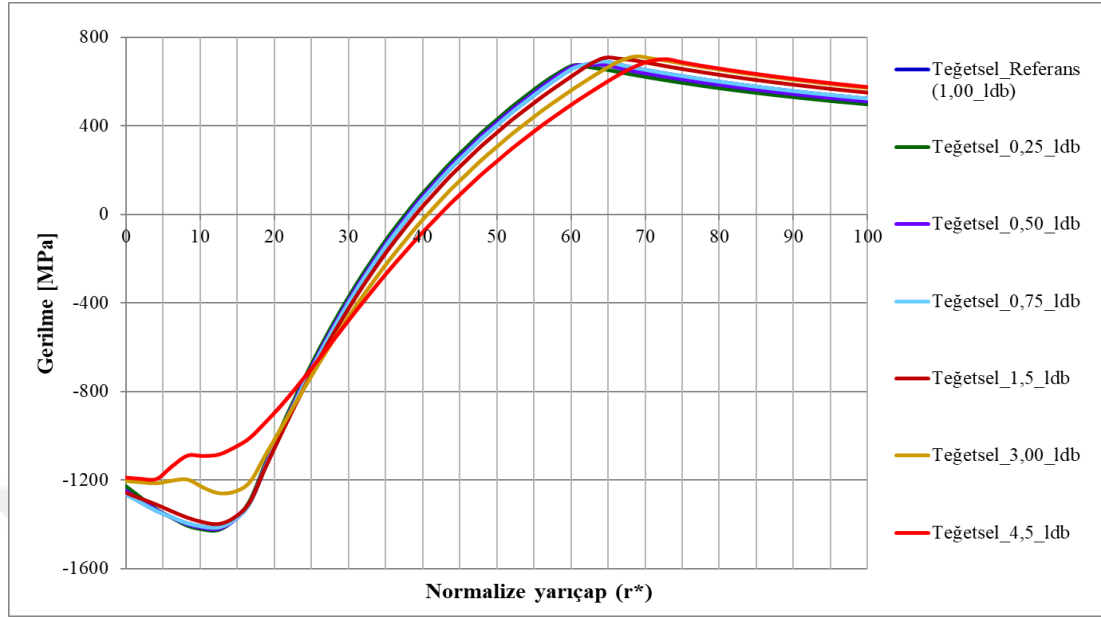
Radyal Gerilme: Şekil 5.30’da radyal gerilmelerinin artan l_{db} oranı ile azaldığı görülmektedir. Bu durumun temel sebebi artan l_{db} ile namlu iç bölgesinin plastik deformasyona uğradığı bölgenin genişlemesi ve bu bölgedeki kontak basıncının düşmesidir. Sonuç olarak, mandrel üzerindeki düz bölgenin merkezi ile temas halindeki namlu malzemesinin rijitliği azalarak ilgili bölgede radyal gerilmenin etkisi düşmektedir.

Eksenel Gerilme: Şekil 5.31’de, 3,00 ve 4,50 l_{db} değerleri için, bası (-) yönünde oluşan eksenel birim şekil değişiminden kaynaklı olarak, namlu cidar kalınlığının %20’lik bölümü içinde eksenel gerilmede pozitif yönde bir artış olmaktadır. Mekanik otofretaj işleminde daha büyük l_{db} değerleri için, namlu iç çapında mandrelin arka konik bölgesine karşılık gelen bölgede yüksek kayma gerilmeleri neticesinde plastik eksenel şekil değişimi meydana gelmektedir. Dolayısıyla, 3,00 ve 4,50 l_{db} değerleri için teğetsel gerilme değerlerinde (Şekil 5.29) kayda değer bir düşüş olduğu görülmektedir. Sonuç olarak mekanik otofretaj işleminin etkisi önemli ölçüde azalmaktadır.

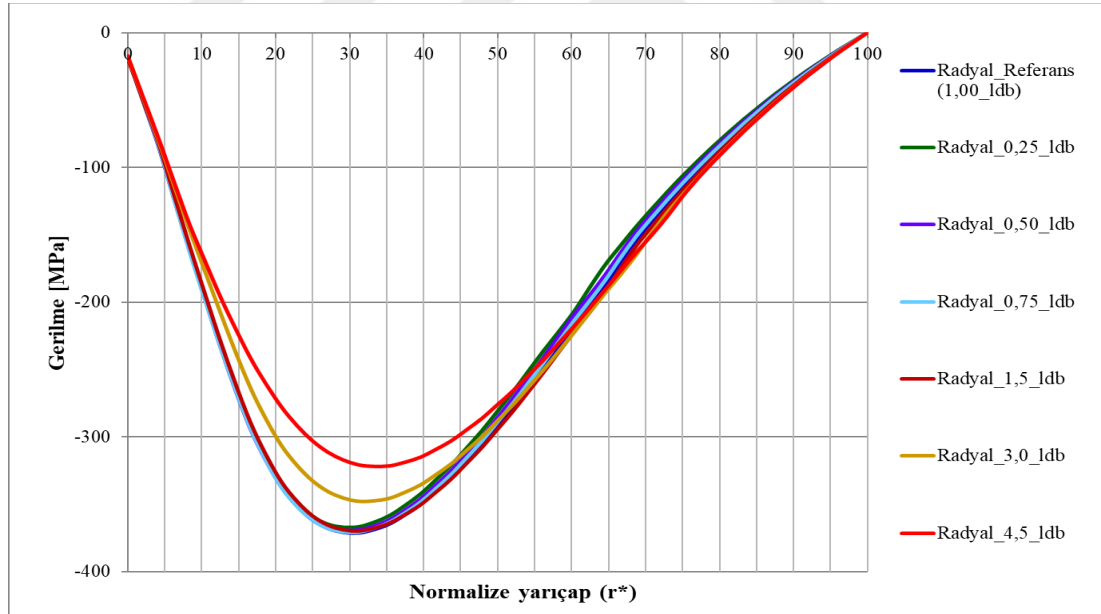
Von Mises Eşdeğer Gerilme: Şekil 5.32’de, 3,00 ve 4,50 l_{db} değerlerinde radyal, eksenel ve teğetsel gerilmelerde oluşan farklılıkların bu üç gerilme değerinin bileşkesi olan Von Mises eşdeğer gerilme değerini bir miktar etkilediği görülmektedir. Diğer l_{db} değerleri için Von Mises eşdeğer gerilme dağılımları benzerdir.

Mil kuvveti: Şekil 5.33’da mandrel üzerindeki düz bölgenin değeri arttıkça, plastik deformasyon miktarının artmasına bağlı olarak mil kuvveti de artmıştır. Ancak en yüksek değer olan 4,50 l_{db} göz önüne alındığında, ortaya çıkan mil kuvvetinin

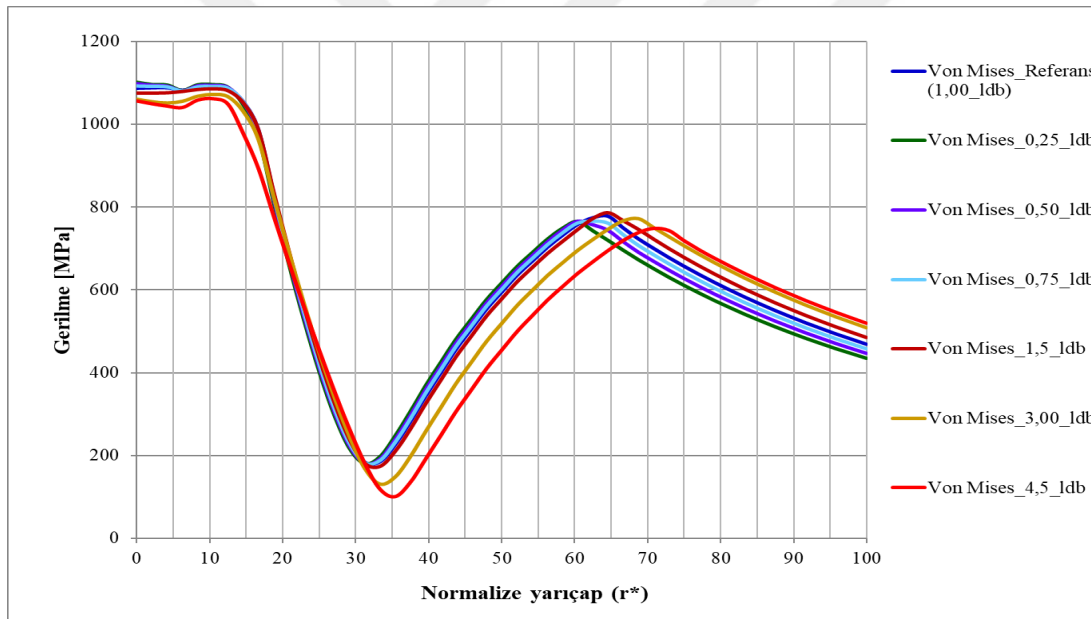
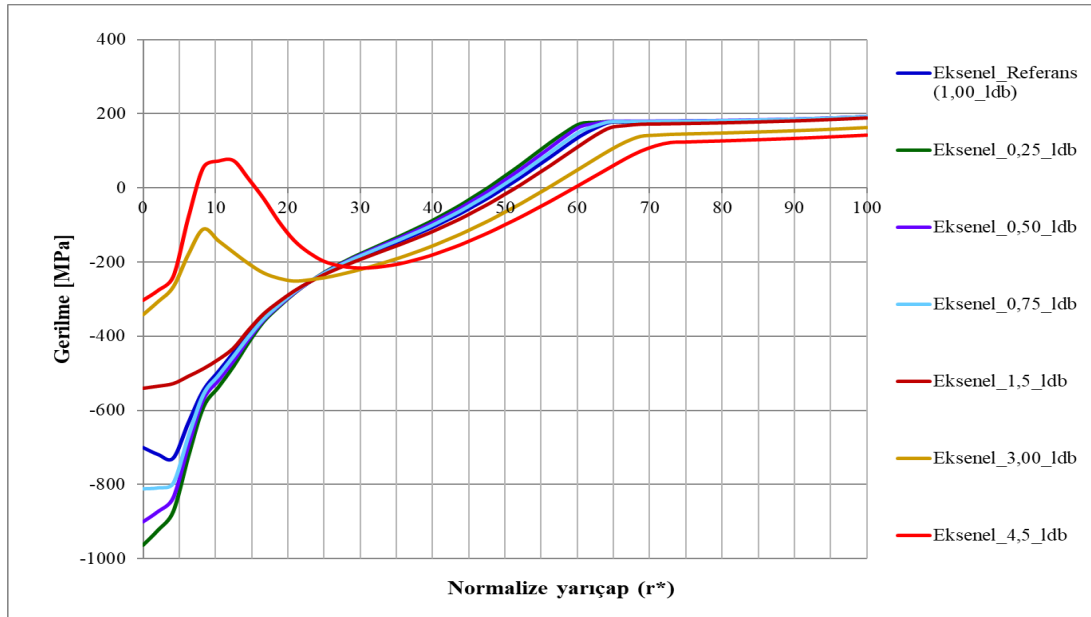
1.430.000,00 N (145,82 ton) civarında olduğu görülmektedir. Bu değer, mekanik otofretaj tesisinin kapasitesinin altında bir değerdir.

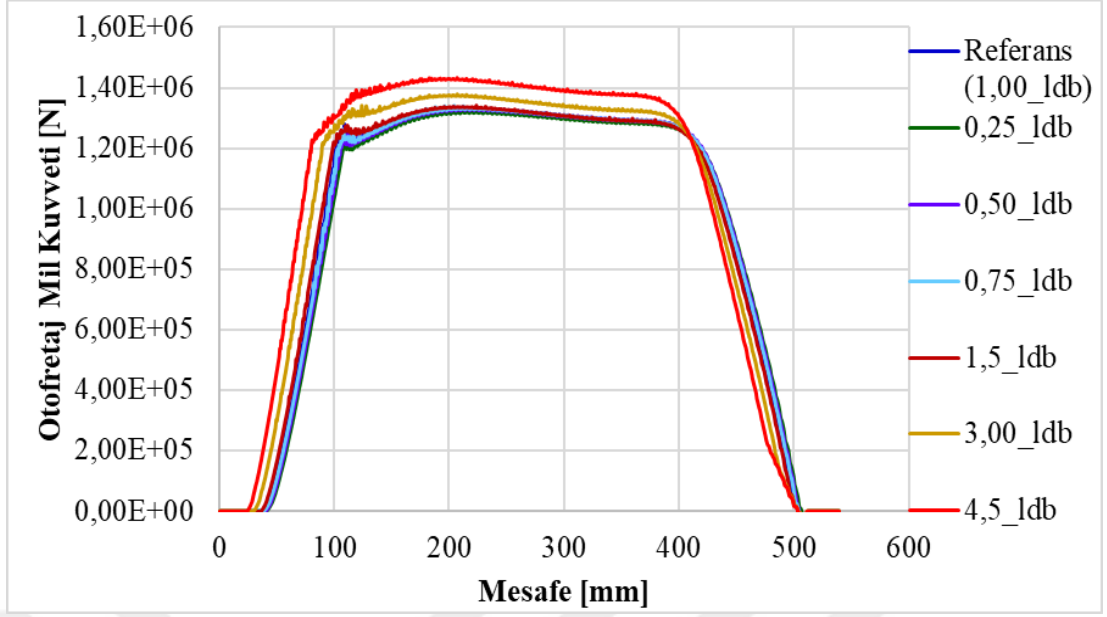


Şekil 5.29. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre teğetsel gerilmelerin değişimi



Şekil 5.30. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre radyal gerilmelerin değişimi





Şekil 5.33. Mandrel üzerindeki düz bölgeye göre mil kuvvetinin değişimi

5.4.5. Mandrel Konik Açıları Orantı Faktörüne Göre Gerilme ve Mil Kuvveti Dağılımları

Mekanik otofretaj işlemi için oluşturulan analiz matrisinde incelenen bir başka parametre, orantı faktörüdür.

Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandrelin ön ve arka konik açıları (α_f ve α_b) sırasıyla $1,5^\circ$ ve $3,0^\circ$ 'dır. Analiz matrisinde verilen ön ve arka konik açıları orantılanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Mandrel konik açılarının orantısal değişiminin, gerilme dağılımları ve mil kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Orantılama için 1/2, 2/3, 1,5, 2,0 ve 2,5 orantı faktörleri seçilmiştir. Örneğin; 1/2 orantı faktörü için mandrel ön konik açısı $0,75^\circ$ iken arka konik açısı ise $1,5^\circ$ olmaktadır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4. Orantı faktörlerine göre mandrel ön ve arka konik açılarının değişimi

Orantı faktörü (OF)	Ön konik açı (a_f) (°)	Arka konik açı (a_b) (°)
1/2	0,75	1,5
2/3	1,0	2,0
1	1,5	3,0
1,5	2,25	4,5
2,0	3,0	6,0
2,5	3,75	7,5

Şekil 5.34, 5.35, 5.36 ve 5.37’de farklı orantı faktörlerine göre mekanik otofretaj işlemi sonucunda elde edilen teğetsel, radyal, aksenal ve Von Mises eşdeğer gerilme değerleri grafik üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 5.38’de ise farklı orantı faktörlerine göre, mandrelin namlu içinde aksenal hareketi sonucunda oluşan mil kuvvetleri grafik üzerinde verilmiştir.

Teğetsel Gerilme: Şekil 5.34’de 1/2 ve 2/3 değerinde orantı faktörüne sahip mandrel geometrisi için, teğetsel gerilme değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5.36’da verilen aksenal gerilme grafiği ile birlikte değerlendirildiğinde, Von Mises eşdeğer gerilme değeri üzerinde etkili olan teğetsel gerilmenin seviyesinin, oluşan aksenal gerilme değerinden dolayı ciddi oranda azalmaktadır. Şekil 5.36 incelendiğinde, aksenal gerilmelerin daha az negatif olduğu görülmektedir, bu durum da belli bir Von Mises eşdeğer gerilme değerinde oluşan teğetsel gerilmelerin değerini sınırlamaktadır (σ_z , σ_θ ve σ_r ‘nin ortalamasıdır).

Radyal Gerilme: Şekil 5.35’de verilen grafik incelendiğinde, orantı faktörü arttıkça mandrel ile namlu arasında kontak basıncının arttığı; dolayısıyla plastik deformasyon miktarı düşmektedir. Temas basıncı arttıkça da mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan radyal gerilmelerin arttığı görülmektedir.

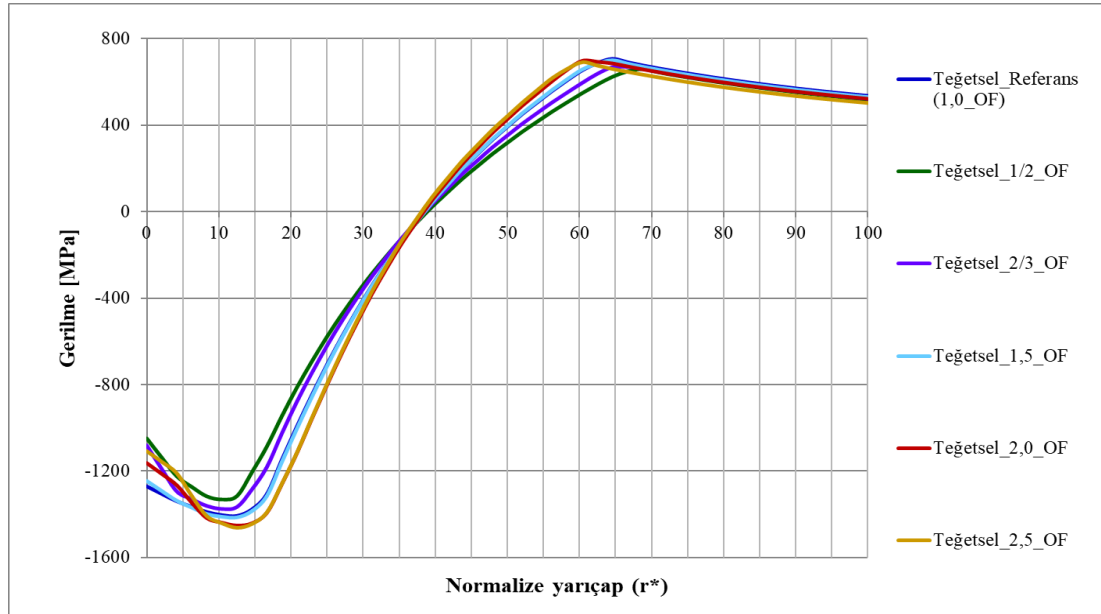
Eksenel Gerilme: Şekil 5.36’da verilen aksenal gerilme grafiği incelendiğinde, iç çapa yakın bölgelerde aksenal gerilmelerin, daha düşük orantı faktörleri için ciddi değişim gösterdiği görülmektedir. Referans kaynaklar (Gibson 2008; Gibson vd., 2014) incelendiğinde, mandrelin namlu eksen boyunca hareketi esnasında oluşan aksenal deformasyonun, plastik aksenal birim şekil değişimine bağlı olarak mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan aksenal gerilme değerlerini ciddi şekilde etkilediği

görülmektedir. Orantı faktörü arttıkça iç çapta oluşan kalıntı eksenel gerilmeler önemli ölçüde negatif olmaktadır.

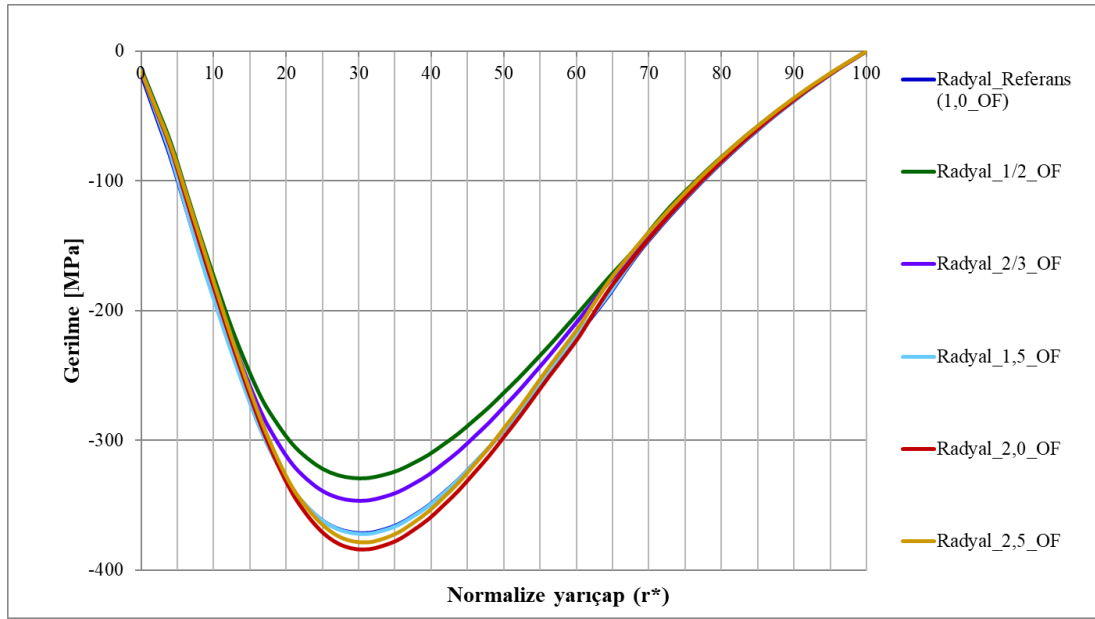
Von Mises Eşdeğer Gerilme: Şekil 5.37’de verilen Von Mises eşdeğer gerilme grafiği incelendiğinde, eksenel gerilmelerdeki farklılıklardan dolayı özellikle 1/2 ve 2/3 OF oranlarında elde edilen Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin çok düşük sapma gösterdiği görülmektedir.

Mil kuvveti: Şekil 5.38’de verilen grafik incelendiğinde, artan orantı faktörü ile mandrel namluyla arayüz oluşturduğu konik bölgeye karşılık gelen temas alanında azalma olduğu ve bunun neticesinde bu bölgede meydana gelen temas basıncının arttığı; dolayısıyla ilgili bölgede kayma gerilmelerinin ve radyal gerilmelerin de arttığı görülmektedir. Bu etkilerden dolayı, özellikle 2,0 ve 2,5 OF değerleri için mil kuvvetleri ciddi oranda artmıştır.

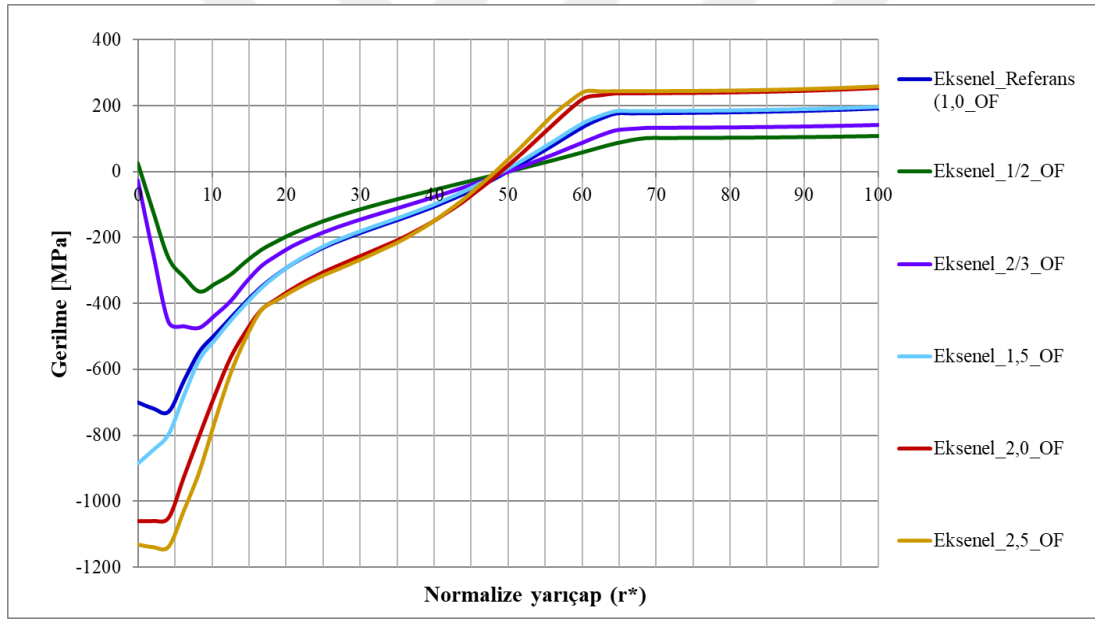
Daha düşük orantı faktörlerinde ise (1/2 ve 2/3 OF), mandrel namlunun daha büyük miktarda alanını deforme etmesi söz konusudur. Bunun neticesinde de kayma gerilmeleri ve mil kuvvetleri oldukça artmaktadır. Mekanik otofretaj tesisinin kapasitesi göz önüne alındığında, referans analizde kullanılan mandrel ön ve arka konik açısı (α_f ve α_b) olan $1,5^\circ$ ve $3,0^\circ$ derecenin, optimum bir değer olduğunu ifade etmek mümkündür.



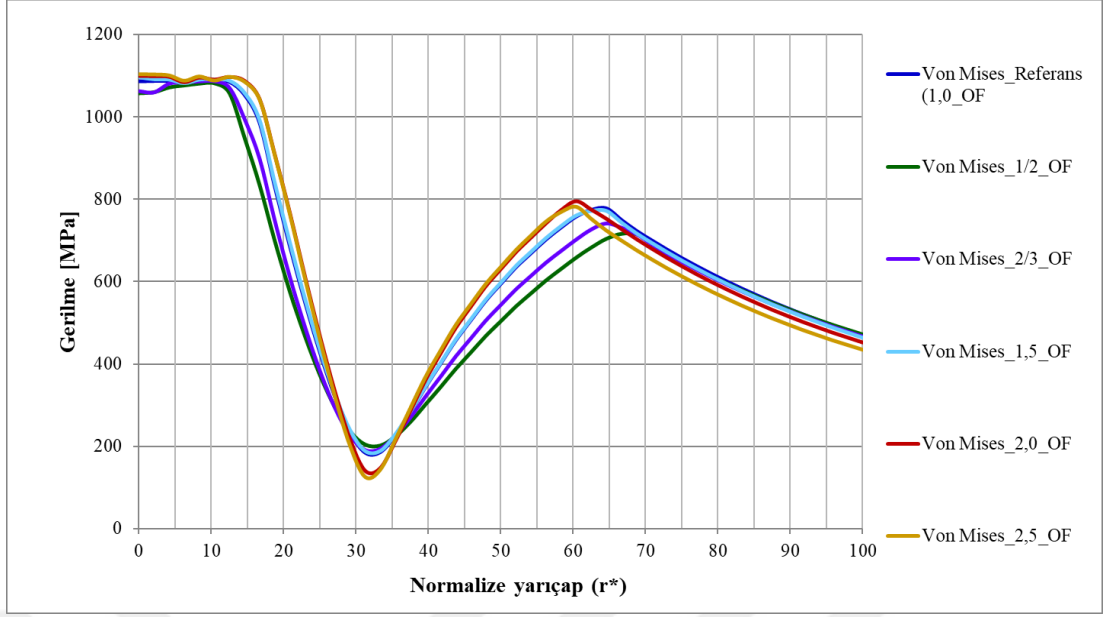
Şekil 5.34. Orantı faktörüne göre teğetsel gerilmelerin değişimi



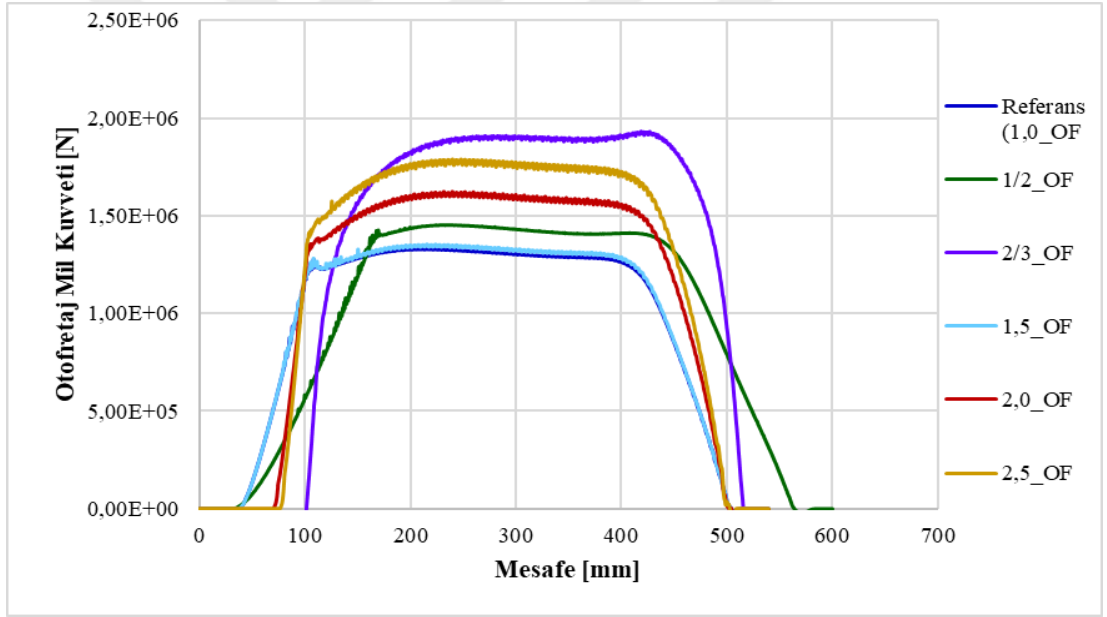
Şekil 5.35. Orantı faktörüne göre radyal gerilmelerin değişimi



Şekil 5.36. Orantı faktörüne göre eksenel gerilmelerin değişimi



Şekil 5.37. Orantı faktörüne göre Von Mises eşdeğer gerilmelerin değişimi



Şekil 5.38. Orantı faktörüne göre mil kuvvetinin değişimi

5.5. Mekanik Otofretaj İç Çap Değişimi

Mekanik otofretaj işlemi, bu işlem için özel olarak tasarlanmış tezgâh ve tesislerde yapılmaktadır. Namlu iç çapından daha büyük özel olarak imal edilmiş mandrelin, aksenal olarak namlu içinden boydan boyda geçirilmesini sağlamak oldukça kritik ve hassas bir işlemdir. Mekanik otofretaj işleminde kullanılan mandrel, namlu uzunluğuna göre belirli sayıda mil kullanılarak namlu içinden boyda boyda geçirilir. Milleri, dolayısıyla mandreli harekete geçirmek için, hidrolik ünitelerden yararlanılır.

Mekanik otofretaj işlemi için bir başka önemli faktör, mandrelin namlu içinde hareketi esnasında sürtünme kuvvetini minimum seviyeye indirmektir. Mekanik otofretaj işlemi esnasında sürtünme kuvvetinin minimum seviyeye indirilmesi, işlem esnasında oluşan gerilme dağılımının ve mil kuvvetinin optimum seviyede olmasını sağlamaktadır.

Pratikte mekanik otofretaj işlemi esnasında sürtünme katsayısının azaltılması için birçok yağ kullanılmaktadır. Bunların başında yüksek basınç gresleri, kesme yağları, doğal yağlar ve çeşitli mineraller içeren katı yağlayıcılar gelmektedir (1992, O'hara; Bihanta vd., 2007; Hu vd., 2014).

Tez kapsamında hesaplanan sayısal sonuçlar ile ölçülen iç çap kalıcı değişimi karşılaştırılmıştır. Ayrıca, iç çap değişimi analitik olarak da aşağıda hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

5.5.1. Namlu İç Çap Değişiminin Analitik Hesabı

Mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan kalıcı iç çap genişleme miktarının analitik olarak hesaplanması için aşağıda verilen analitik denklem takımlarından yararlanılmıştır (Öztörün, 2013; Rheinmetall, 1982)

Namlunun nihai imalat ölçüleri namlu iç çapı ölçüsü (a) 116 mm, dış çap ölçüsü (c) ise 315 mm'dir. Ancak namlu mekanik otofretaj öncesinde iç çapa otofretaj yağı uygulanmadan mangan fosfatlama işlemine tabi tutulduğundan iç ve dış çapta genleşme meydana gelir.

Mekanik otofretaj işlemi için, otofretaj oranı (C) olarak isimlendirilen elastik-plastik geçiş yarıçapının namlu cidar kalınlığına oranı 0,63 olarak alınmıştır. Bu durumda elastik plastik geçiş yarıçapı namlu cidar kalınlığının %63'üne denk gelmektedir. Burada sayısal çalışmada referans analiz için hesaplanan elastik-plastik geçiş yarıçapı kullanılmıştır. Hesaplama adımlarına geçmeden önce hesaplamada kullanılan parametreler Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Analitik hesaplamalarda kullanılan parametreler

a (mm)	c (mm)	t (mm)	C	σ_y (MPa)	E (GPa)
58,029	157,551	99,522	0,63	1195	200

Burada;

a: Namlu iç yarıçapı, mm

c: Namlu dış yarıçapı, mm

t: Namlu malzemesi cidar kalınlığı, mm

C: Otofretaj oranı,

σ_y : Namlu malzemesi akma mukavemeti, MPa

E: Elastisite modülü, GPa

Mekanik oftofretaj işlemi için elastik plastik geçiş yarıçapı (b) 5.2’de verilen denklemle hesaplanmaktadır.

$$b = a + (t * C) \quad (5.2)$$

$$b = 58,029 + (99,522 * 0,63)$$

$$b = 120,73 \text{ mm olarak bulunur.}$$

Mekanik oftofretaj işlemi esnasında, elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde mandrelin namlu iç çapına uyguladığı basınç 5.3’denklemleri ile hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{\sigma_y \times (c^2 - a^2)}{a^2 \times \left(1 + \frac{b^2}{c^2}\right)} \quad (5.3)$$

$$P = \frac{1195 \times (24822,32 - 3367,37)}{3367,37 \times \left(1 + \frac{14575,22}{24822,32}\right)}$$

$$P = 2816,80 \text{ MPa}$$

Hesaplanan 2816, 80 MPa basınç değeri, namlu malzemesinin akma mukavemeti olan 1195 MPa değerinin çok üzerindedir. Bu durumda namlu malzemesi, elastik-plastik geçiş yarıçapına kadar plastik deformasyona uğrayacaktır.

Yapılan hesaplamalarda kullanılan gerilme hesaplamaları elastik bölge ve Hook Kanununa göredir. Özetle, Hook Kanunu, namlu malzemesinin elastik-plastik geçiş yarıçapından sonraki %63'lük kısmından itibaren geçerli olacaktır. Bu durumda namlu dış çapında oluşan teğetsel gerilme 5.4'de verilen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = \frac{Pxa^2}{(c^2-a^2)} x \left(1 + \frac{c^2}{c^2}\right) \quad (5.4)$$

$$\sigma_t = \frac{2816,80x3367,37}{(24822,32 - 3367,37)} x \left(1 + \frac{24822,32}{24822,32}\right)$$

$$\sigma_t = 884,17 \text{ MPa}$$

Namlu dış çapında oluşan radyal gerilme ise 5.5'de verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_r = \frac{Pxa^2}{(c^2-a^2)} x \left(1 - \frac{c^2}{c^2}\right) \quad (5.5)$$

$$\sigma_r = \frac{2816,80x3367,37}{(24822,32 - 3367,37)} x \left(1 - \frac{24822,32}{24822,32}\right)$$

$$\sigma_r = 0 \text{ MPa}$$

Dış çapta oluşan birim şekil değişimi 5.6'da verilen denklemle hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_c = \frac{1}{E} x (\sigma_t - \nu \sigma_r) \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1}{200000} x (884,17 - 0,3 \times 0)$$

$$\varepsilon_c = 0,00626 \text{ mm/mm}$$

Denklem 5.7 ve 5.8 ile dış çap için hesaplanan birim şekil değişimi kullanılarak mandrel in namlu içinde hareket etmesinden dolayı oluşan dış çap genişleme değeri hesaplanmaktadır.

$$\Delta L_c = 2 \times \varepsilon_c \times \pi \times c \quad (5.7)$$

$$\Delta L_c = 2 \times 0,00626 \times \pi \times 157,551$$

$$\Delta L_c = 4,743 \text{ mm}$$

$$(2\pi c)^{genişleme} = (2 \times \pi \times c) + \Delta L_c \quad (5.8)$$

$$(2\pi c)^{genişleme} = (2 \times \pi \times 157,551) + 4,743$$

$$(2\pi c)^{genişleme} = 993,668 \text{ mm}$$

$$(c)^{genişleme} = \frac{993,668}{2\pi}$$

$$(c)^{genişleme} = 158,227 \text{ mm}$$

Mekanik otofretaj işleminin sonunda, dış çap 157,5 mm'den 158.227 mm'ye genişlemiştir. Benzer şekilde mandrel namlunun içindeyken namlu iç çapının hangi ölçüde olacağının belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer de 5.9'da verilen denklem vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$\pi c^2 - \pi a^2 = \pi (c^{genişleme})^2 - \pi (a^{genişleme})^2 \quad (5.9)$$

$$(a^{genişleme})^2 = (c^{genişleme})^2 - c^2 + a^2$$

$$(a^{genişleme})^2 = (158,227)^2 - 157,551^2 + 58,029^2$$

$$a^{genişleme} = 59,841 \text{ mm}$$

$a^{genişleme}$ olarak belirlenen değer, mandrel yarıçapına karşılık gelmektedir. Başka bir deyişle, mandrel çapı Ø119,682 mm olmaktadır.

Analiz matrisinde referans analizde kullanılan mandrel çapı, Ø119,405 mm'dir. Analitik denklemler kullanılarak yapılan hesaplamalarda olması gereken mandrel çapı ise Ø119,682 mm'dir. Ancak mandrel namludan çıktıktan sonra oluşacak namlu iç çap ölçüsünün hesaplanmasında sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek adına referans mandrel ölçüsü olan Ø119,405 mm değerinin kullanılması gerekmektedir.

Mekanik otofretaj işleminde, mandrel namlu içinden geçirilirken plastik deformasyona uğramaması oldukça önemlidir. Toz metalürjisi yöntemiyle imal edilen ve üretimi esnasında hassas talaşlı imalat işlemlerine tabi tutulan tungsten karbür (WC)

mandrel, 67 HRc ve üzeri sertliği ile aşınma dayanımı açısından oldukça iyidir. Ancak hesaplamalar sonunda geometrik ölçüleri belirlenen tungsten karbür mandrelin imalatı oldukça zor ve maliyetlidir. Bu nedenle, referans analizdeki yüzde arakesit oranına uygun mandrelin geometrik ölçülerinin analitik hesaplamalarda kullanılması gerekmektedir.

Mekanik otofretaj işlemi tamamlanıp mandrel namluyu terk ettikten sonra, namlunun iç ve dış çapı daralmaya başlayacaktır. Bu daralmanın esas olarak iki asıl nedeni vardır. Birinci neden, plastik deformasyondan sonra meydana gelen elastik toparlanma (elastik-plastik geçiş yarıçapının iç kısmında kalan plastik bölgenin toparlanması), ikinci neden ise plastik bölgenin kısmen daralma göstermesiyle namlu dış çap bölgesindeki elastik gerilmedeki azalmanın namlu iç ve dış çaplarını çok küçük miktar da olsa daraltmasıdır. Ancak burada çok daha öneme sahip olan birinci nedendir. Kalıcı deformasyon miktarını hesaplamadan önce, mandrel namlunun içinde iken oluşan birim şekil değişimi hesaplanmalıdır. Birim şekil değişimi 5.10'da verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L_a}{2\pi a} \quad (5.10)$$

$$\Delta L_a = 2 \times \pi \times (a^{\text{genişleme}} - a)$$

$$\Delta L_a = 2 \times \pi \times (59,563 - 58,029)$$

$$\Delta L_a = 10,515 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L_a}{2\pi a}$$

$$\varepsilon_a = \frac{10,515}{2 \times \pi \times 58,029}$$

$$\varepsilon_a = 0,02888$$

Mandrel çapı Ø119,405 mm olduğu durum için, iç çaptaki birim şekil değişimi ε_a 0,0288 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Yarıçap için bu birim şekil değişimi 0,0144 mm/mm olmaktadır.

Son olarak mekanik otofretaj işlemi sonunda, mandrel namluyu terk ettikten sonra iç çapın alacağı son değer 5.11’de verilen denklemle hesaplanmaktadır.

$$a^{kalıcı} = a \times (1 + \varepsilon_a) \quad (5.11)$$

$$a^{kalıcı} = 58,029 \times (1 + 0,0144)$$

$$a^{kalıcı} = 58,8657 \text{ mm}$$

Mekanik otofretaj işlemi sonunda mandrel namluyu terk ettikten sonra, iç çap Ø117,7315 mm’ye genişlemektedir.

Mekanik otofretaj işleminden önce namlu iç çapı (a) Ø116,058 mm iken, otofretaj işleminden sonra iç çap Ø117,7315 mm’ye genişlemiştir. Dolayısıyla mekanik otofretaj işleminden sonra iç çapta oluşan kalıcı deformasyon miktarı analitik olarak **1,6735 mm** hesaplanmıştır.

5.5.2. Namlu İç Çap Değişiminin Karşılaştırması

Mekanik otofretaj işleminden sonra oluşan kalıcı iç ve dış çap deformasyon miktarları, sayısal olarak ANSYS paket programında hesaplanmıştır. Bölüm 3’te sınır ve yükleme şartları detaylı bir şekilde açıklanan 2-B’lu model kullanılarak mekanik otofretaj işleminin sonunda, iç çap kalıcı genişleme değeri 1,4989 mm olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında mekanik otofretaj işlemi sonunda analitik hesaplamalar ile sayısal ve ölçümlerde elde edilen kalıcı iç çap deformasyonları belirlenmiştir.

Analitik hesaplamalardan elde edilen kalıcı iç çap deformasyon miktarının 1,6735 mm, sayısal çalışmanın sonunda elde edilen değer 1,4989 mm ve ölçümlerde elde edilen ortalama değerin 1,80 mm olduğu görülmektedir.

Analitik ve ölçüm arasında %7,03 oranında makul bir farklılığın olduğu görülmektedir. Makul olarak nitelendirebilecek bu farklılığın nedeni, analitik denklem takımlarının oluşturulmasında kullanılan malzeme modelinde birçok kabul ve ihmalin yapılmasıdır.

Ayrıca, elde edilen sayısal sonucun analitik sonuçtan %10,43, ölçümlerden ise %16,73 oranında farklılık gösterdiği görülmektedir. Buradaki farklılıkların temel sebebi ise, sayısal çalışmada SEM yönteminde kullanılan malzeme modelinin gerçek malzeme

gerilme-birim şekil değışimi durumunu tam olarak yansıtamaması, yapılan iç çap ölçümlerdeki hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sorunları, ölçümlerdeki namlu malzemesinin otofretaj işlemi öncesinde maruz kaldığı ısı işlem ve imalat proseslerinden kaynaklı kalıntı gerilme ve birim şekil değışimi durumları olarak ifade edilmektedir.



6. HİDROLİK OTOFRETAJ İŞLEMİ İÇİN GENEL DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında hidrolik otofretaj işlemi için yapılan değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- 1) Sayısal çalışmada ANSYS paket programı yardımıyla yapılan analizde hidrolik otofretaj sonunda oluşan gerilmelerin değeri hesaplanmıştır.
- 2) Analitik çalışmada, çalışma basıncı altında namlu cidar kalınlığında Von Mises eşdeğer gerilmesinin en düşük değerini verecek şekilde elastik-plastik geçiş yarıçapı ve optimum otofretaj basıncı hesaplanmıştır.
- 3) 670 MPa çalışma basıncı altında, namlu cidar kalınlığı içinde oluşan Von Mises eşdeğer gerilmesinin en düşük değerini verecek şekilde elastik-plastik geçiş yarıçapı 122,21 mm ve optimum otofretaj basıncı ise 954,84 MPa olarak hesaplanmıştır.
- 4) Çalışmada malzeme modeli olarak Bauschinger etkisini de yansıtan Bilineer Kinematik Pekleşme Modeli kullanılmıştır.
- 5) Analitik çalışmada otofretajsız namluda oluşan gerilme dağılımları çalışma basıncı altında Lamé denklemleri ile hesaplanmıştır. Otofretajlı namluda ise, otofretaj uygulama aşamaları olan yükleme, basınç kaldırma ve çalışma basıncının uygulanması için türetilmiş denklemler ile hesaplanmıştır.
- 6) Sonuçlar incelendiğinde, analitik ve sayısal sonuçlar arasında tutarlılık olduğu görülmüştür. Otofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncı altında elde edilen Von Mises eşdeğer gerilme değeri analitik olarak 1498,74 MPa, sayısal olarak ise 1507 MPa olarak hesaplanmıştır.
- 7) Otofretajlı namluda ise 670 MPa çalışma basıncı altında Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri analitik olarak 957,75 MPa, sayısal olarak ise 961,96 MPa hesaplanmıştır. Her iki çalışmada da Von Mises eşdeğer gerilme yaklaşık olarak %36 oranında azalmıştır.
- 8) Von Mises eşdeğer gerilme değerindeki azalma sayesinde, dinamik ve değişken basınç ile termal yükler altında çalışan ağır silah namlusunun yorulma ömrünün önemli ölçüde artacaktır.

- 9) 2B çeyrek kesit daire SEM modelinden hesaplanan gerilme dağılımlarının mesh yapısından, okuma yapılan açisal konumdan, çevresel model büyüklüğü ve 2B/3B modelden bağımsızlığını teyit etmek için doğrulama çalışmaları yapılmıştır.
- 10) Mesh sayısından bağımsızlık analizlerinde, 0,3 mm, 0,6 mm, 1,2 mm ve 4,0 mm mesh boyutuna sahip elemanlar kullanılmıştır. Sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.
- 11) Okuma yapılan açisal konumdan bağımsızlık analizlerinde, 2-B'li modelde dikey, yatay ve 45° namlu kesiti boyunca oluşan gerilmeler grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir. Çevresel model büyüklüğünden bağımsızlık analizinde, 2-B'li modelde çeyrek (45°), yarım (180°) ve tam kesit (360°) boyunca oluşan gerilmeler grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.
- 12) Sayısal çalışmada elde edilen gerilme dağılımlarının boyuttan bağımsızlığını teyit etmek için, 2-B'li ve 3-B'li modelde edilen gerilmeler grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.
- 13) Sonuçların sistematik olarak karşılaştırmalı bir şekilde incelenmesi için bir analiz matrisi oluşturulmuştur. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak çap, akma mukavemeti, otofretaj basıncı ve çalışma basıncına göre analizler yapılarak sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.
- 14) Analiz matrisinde verildiği şekilde farklı yanma odası çaplarına göre gerilme dağılımları çizdirilmiştir. Namlu çapı referans analiz temel alınarak oluşturulmuş ve oluşturulan 4 değer, referans çapın %0,66'sı, %0,77'i, %0,98'i ve %1'i dikkate alınarak belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, namlu çapı azaldıkça, otofretaj işlemi sonunda bası (-) yönünde elde edilen teğetsel gerilmenin değerinin ve yönünün ciddi şekilde azaldığı görülmüştür. Namlu çap değişimine göre alt ve üst limit değeri karşılaştırıldığında, namlu çapına göre Von Mises eşdeğer gerilme değeri değişiminin 1,6 MPa/mm olduğu tespit edilmiştir.
- 15) Analiz matrisinde namlu malzemesinin akma mukavemeti olarak 1150 MPa, 1200 MPa ve 1250 değerleri seçilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, aynı namlu malzemesinde akma mukavemeti daha düşük değer olan 1150 MPa için, çalışma basıncı altında elastik-plastik geçiş yarıçapının namlu malzemesi cidar

kalınlığı boyunca dış çapa doğru yönlendiği, akma mukavemeti daha yüksek değer olan 1250 MPa için ise çalışma basıncı altında elastik-plastik geçiş yarıçapının namlu malzemesi cidar kalınlığı boyunca iç çapa doğru yönlendiği görülmüştür. Alt ve üst akma mukavemeti değerleri göz önüne alındığında, akma mukavemetine göre Von Mises eşdeğer gerilme değerinin değişimi 0,3 MPa/MPa olarak hesaplanmıştır.

- 16) Analiz matrisinde otofretaj basıncının etkisinin incelemesinde kullanılan 9 farklı basınç değeri sırasıyla 536,45, 600, 670, 720, 780, 840, 893,13, 954,84 ve 1000 MPa'dır. Belirlenen bu otofretaj basınç değerleri için, otofretaj operasyonu için kritik bölge olan elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin değişimi gösterilmiştir. 670 MPa otofretaj basıncına kadar Von Mises eşdeğer gerilme değerinin yaklaşık 1200 MPa civarında sabit olarak kaldığı görülmüştür. 670 MPa otofretaj basıncı değerinden sonra ise, 954,84 MPa optimum otofretaj basıncı değerine karşılık gelen yerde, elastik-plastik geçiş yarıçapı üzerinde Von Mises eşdeğer gerilmesi 962 MPa ile en düşük değerini almıştır.
- 17) Çalışma basıncının etkisi incelenirken, 470, 570 ve 670 MPa çalışma basıncı altında daha önce belirlenen 9 farklı otofretaj basınç değeri temel alınmıştır. Von Mises eşdeğer gerilmesinin çalışma basıncına bağlı olarak oluştuğu görülmüştür. Herhangi bir çalışma basıncında, optimum otofretaj basıncı akmanın namlu malzemesi iç yüzeyde başladığı basınç olan P_{y1} ile plastik deformasyonun namlu cidar kalınlığı boyunca yayıldığı basınç olan P_{y2} arasındadır.
- 18) Analitik ve sayısal olarak çalışmada elde edilen sonuçların deneysel olarak doğrulanması için, kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin (X-ışınımı kırınımı, nötron ışınımı kırınımı, delik delme vs.) uygulama ve süreçlerinin zorluğu göz önüne alındığında, halihazırda saha çalışmalarında otofretaj işleminin uygunluğunun teyidi için kullanılan iç ve dış çap kalıcı deformasyon miktarlarından yararlanılmıştır.

- 19)** Tez çalışmasında esas teşkil eden 120 mm bir ağır silah namlusunun SEM analizi sonucundan ve ölçümlerden elde edilen dış çap genişleme değerleri karşılaştırılmıştır.
- 20)** Analitik ve sayısal olarak hesaplanan sonuçların deneysel olarak doğrulanmasında dış çap kalıcı deformasyon miktarı kullanılmıştır. Sayısal olarak hesaplanan dış çaptaki değişim ile ve ölçümler karşılaştırıldığında, aralarında kalıcı dış çap genişleme miktarı olarak %32,3 oranında farklılık olduğu görülmüştür.



7. MEKANİK OTOFRETAJ İŞLEMİ İÇİN GENEL DEĞERLENDİRMELER

Bu tez çalışmasında mekanik otofretaj işlemi için yapılan değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. Mekanik otofretaj işleminde hidrolik otofretaj işleminde kullanılan 120 mm ağır silah namlusunda oluşan gerilme, mil kuvveti ve kalıcı deformasyon miktarları sayısal olarak hesaplanmıştır.
2. ANSYS paket programı ile literatürde bulunan iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) modeller tekrarlanarak mekanik otofretaj işleminin sayısal olarak ön doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
3. Doğrulama çalışmaları incelendiğinde, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizlerden elde edilen gerilme dağılımlarının gerek literatürdeki referans çalışmalarla gerekse kendi aralarında tutarlı ve hata payının düşük olduğu görülmüştür.
4. Daha yoğun mesh yapısının oluşturulması ve analizlerin hızlı bir şekilde yakınsaması amacıyla iki boyutlu (2B) eksenel-simetrik model temelinde sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.
5. Otofretajsız namluda 670 MPa basıncı altında namlu iç çapında oluşan Von Mises eşdeğer gerilmenin değeri 1350,3 MPa iken, otofretajlı namluda bu değer 368,36 MPa olmuştur.
6. Otofretajlı namluda, eşdeğer gerilmenin maksimum değeri, namlunun cidar kalınlığının %63'ne karşılık gelen bölgede 1136,2 MPa mertebesindedir. Bu gerilme, namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa değerinin altındadır.
7. Otofretajlı namluda, Von Mises eşdeğer gerilmenin maksimum değeri otofretajsız namluya göre %16,88 oranında azalmıştır.
8. Sayısal çalışmada referans analizde hesaplanan mil kuvveti 135,58 ton, deneysel çalışmada ise 142 ton olarak belirlenmiştir. İki çalışma arasındaki fark % 4,52 olmuştur.
9. Analiz matrisinde referans analiz temel alınarak farklı yüzde arakesit oranı, akma mukavemeti, sürtünme katsayısı, mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu ve mandrel konik açıları orantı faktörlerine göre gerilme ve mil

kuvveti analizleri yapıp sonuçlar grafik halinde verilmiş ve değerlendirilmiştir.

10. Referans çalışma olarak, %2,94 yüzde arakesit oranı temel alınmıştır. Ardından sırasıyla %0,5, 1,0, 2,0 ve 3,5 arakesit oranları seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen gerilme dağılımları ile ilgili sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Yüzde arakesit oranı arttıkça, teğetsel gerilmenin bası (-) yönünden çeki (+) yönüne geçiş yaptığı namlunun cidar kalınlığının yüzdelik oranına denk gelen konumunda da artış olmuştur.
- Artan yüzde arakesit oranı ile radyal gerilmelerin seviyesi namlu cidar kalınlığı içinde daha yüksek olmuştur.
- Eksenel gerilmeler, namlu iç çapından dış çapa doğru, bası (-) yönünden çeki (+) yönüne doğru yönlenmiştir. Daha büyük yüzde arakesit oranı daha geniş bir sıkışma alanı yarattığı için, eksenel gerilme değeri de büyük olmaktadır.
- Von Mises eşdeğer gerilme değerlerinin hem iç hem de dış çapta yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Gerilme değerlerinin bası (-) yönünden çeki (+) yönüne doğru yönlenmesinden kaynaklı olarak, Von Mises eşdeğer gerilme değerinin namlu cidar kalınlığı boyunca, iç çaptan belirli bir mesafede minimum değerini aldığı görülmüştür.

Analizler sonunda mil kuvvetleri incelendiğinde ise yüzde arakesit oranı arttıkça plastik deformasyon miktarının da aynı oranda arttığı; dolayısıyla daha yüksek bir mil kuvvetinin oluştuğu görülmüştür.

11. Akma mukavemeti için, sayısal çalışmada namlu malzemesi olarak tanımlanan AISI 4340 türü çeliğin değeri olan 1195 MPa referans olarak seçilmiştir. Diğer değerler ise 1000 MPa ve 1100 MPa'dır.

Analizler sonunda elde edilen gerilme dağılımları ile ilgili sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Artan akma mukavemeti ile namlunun mekanik otofretaj işlemi sonucunda oluşan plastik deformasyona karşı direnci artmıştır. Grafiklerde bu duruma paralel olarak bütün gerilme değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Artan akma mukavemeti ile namlu malzemesinin plastik deformasyona direnci artmış; dolayısı ile mil kuvvetinde de artış olmuştur.

12. Analiz matrisinde de sürtünme katsayısı değerleri, kullanılan yağlayıcıların cinsine göre 0,005, 0,010, 0,015, 0,030, 0,045, 0,060, 0,120 ve 0,180 μ olarak belirlenmiştir.

Elde edilen gerilme dağılımları ile ilgili sonuç aşağıda ifade edilmiştir:

- Artan sürtünme katsayısı ile teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmeleri çok küçük bir değişim göstermektedir.

Artan sürtünme kuvveti ile mandrel namlu içinde eksenel olarak hareket edebilmesi için gerekli mil kuvveti de önemli ölçüde artmaktadır.

13. Referans analizde mandrel üzerinde bulunan l_{db} ölçüsünün değeri 6,35 mm'dir. Analiz matrisinde düz bölge uzunluğu, 0,25, 0,50, 0,75, 1,5, 3,00 ve 4,50 katsayıları ile çarpılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen gerilme dağılımları ile ilgili sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Teğetsel gerilme değerleri 3,00 ve 4,50 l_{db} değerlerine sahip mandrel geometrileri hariç benzerlik göstermektedir.
- Radyal gerilmeler artan l_{db} oranı ile azalmaktadır.
- 3,00 ve 4,50 l_{db} değerleri için, bası (-) yönünde oluşan eksenel birim şekil değişiminden kaynaklı olarak, namlu cidar kalınlığının %20'lik bölümü içinde pozitif yönde bir artış olmaktadır.
- 3,00 ve 4,50 l_{db} değerlerinde radyal, eksenel ve teğetsel gerilmelerde oluşan farklılıkların bu üç gerilme değerinin bileşkesi olan Von Mises eşdeğer gerilme değerini etkilediği görülmüştür.

Mandrel üzerindeki düz bölge uzunluğu arttıkça, plastik deformasyon miktarının artmasına bağlı olarak mil kuvveti de artmıştır.

14. Analiz matrisinde, mandrel ön ve arka konik açıları (a_f ve a_b) sırasıyla 1,5° ve 3,0° 'dir. Analiz matrisinde verilen ön ve arka konik açıları orantılanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Orantılama için 1/2, 2/3, 1,5, 2,0 ve 2,5 orantı faktörleri seçilmiştir.

Elde edilen gerilme dağılımları ile ilgili sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Teğetsel gerilme değerlerinin 1/2 ve 2/3 değerinde orantı faktörüne sahip mandrel geometrisi için daha düşük olduğu görülmektedir.
- Artan orantı faktörü ile kontak basıncının arttığı, dolayısıyla mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan radyal gerilme değerinin de benzer şekilde artış gösterdiği görülmüştür.
- Eksenel gerilme grafiği incelendiğinde, iç çapa yakın bölgelerde eksenel gerilmelerin, daha düşük orantı faktörleri için ciddi değişim gösterdiği görülmüştür.
- Von Mises eşdeğer gerilme değerleri, eksenel gerilmelerden kaynaklı olarak özellikle 1/2 ve 2/3 orantı faktörleri için önem arz etmeyecek şekilde sapma göstermiştir.

Oluşan mil kuvvetleri değerlendirildiğinde, özellikle 2,0 ve 2,5 OF değerleri için, mandrel namluyla arayüz oluşturduğu konik bölgeye karşılık gelen temas alanında azalma olmaktadır. Dolayısıyla ilgili bölgedeki kayma gerilmelerinin ve radyal gerilmelerin artmasından dolayı mil kuvveti de ciddi oranda artmıştır. Daha düşük orantı faktörlerinde (1/2 ve 2/3 OF) ise, mandrel namlunun daha büyük bir alanını deforme etmesinden dolayı mil kuvvetlerinde de artış görülmüştür.

15. Çalışmada, mekanik otofretaj işlemi sonunda analitik hesaplamalar ile sayısal ve ölçümlerde elde edilen kalıcı iç çap deformasyonları belirlenmiştir.
16. Sonuçlar incelendiğinde, analitik hesaplamalardan elde edilen kalıcı iç çap deformasyon miktarının 1,6735 mm, sayısal çalışmada elde edilen değer 1,4989 mm olduğu görülmektedir. Ölçümler ile elde edilen değer ise ortalama 1,80 mm'dir.
17. Analitik ve ölçüm sonuçları arasında %7,03 oranında makul bir farklılığın olduğu görülmektedir.
18. Elde edilen sayısal sonucun, analitik sonuçtan %10,43, ölçüm sonuçlarından ise %16,73 farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ali, A.R.M., Ghosh, N.C. and Alam, T-E. (2010). Optimum design of pressure vessel subjected to autofrettage process. *Int J Mech Mechatron Eng*, 4 (10), 1040-1045.
- Alinezhad, P. and Bihamta, R. (2012). A study on the tool geometry effects in the swage autofrettage process. *Advanced Materials Research*, Vol 433-444, 2206-2211. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.2206
- ASM International (2002) Atlas of stress-strain curves. *United State of America: Materials Park OH 44073-0002*, 108.
- Ayob, A. and Elbasheer, M.K. (2007). Optimum autofrettage pressure in thick cylinders. *Jurnal Mekanikal*, 24, 1-14.
- Ayob, A., Tamin, M.M. and Elbasheer, M.K. (2009). Pressure limits of thick-walled cylinders. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. Hong Kong, China 18-20 March, 978-988.
- Babu, D.D. and Balaji, T.J. (2013). Theoretical and finite element analysis of high pressure components. *IOSR Journal of Engineering*, 3(2), 25-34.
- Barzanjy, M.J. (2011). Life cycle and performances progressing of artillery barrels. *Int J Mech Mechatron Eng*, 11(6), 19-22.
- Bastable, M.J. (1992). From breechloaders to monster guns: Sir William Armstrong and the invention of modern artillery, 1854-1880. *Technology and Culture*, 33(2), 213-247.
- Bihamta, R., Movahhedy, M.R. and Mashreghi, A.R. (2007). A numerical study of swage autofrettage of thick-walled tubes. *Materials and Design*, 28, 804-815. doi: 10.1016/j.matdes.2005.11.012
- Chica, C.J, Marín, M.M., Rubio, E.M., Teti, R. and Segreto, T. (2019). Parametric analysis of the mandrel geometrical data in a cold expansion process of small holes drilled in thick plates. *Materials*, 12 (24), (4105).
- Çandar, H. and Filiz, H. (2017). Optimum autofrettage pressure for a high pressure cylinder of a waterjet intensifier pump. *Univers J Eng Sci*, 5(3), 44-55. doi.org/10.13189/ujes.2017.050302.
- Davidson, T.E., Barton, C.S., Reiner A.N. and Kendall D.P. (1962). New approach to the autofrettage of high-strength cylinders, *Exp. Mech.*, 2, 33-40.
- Ezra, A. (1973). Method and apparatus for explosive autofrettage. U.S. Patent No 3,751,954.
- Germershausen, R. (1982). *Handbook of weaponry*. Düsseldorf: Rheinmetall GmbH.
- Gibson, M.C. (2008). Determination of residual stress distributions in autofrettaged thick-walled cylinders. PhD Thesis, *Department of Engineering Systems and Management, Cranfield University, Defence College of Management and Technology*, Cranfield.
- Gibson, M.C., Hameed, A. and Hetherington, J.G. (2012). Investigation of driving force variation during swage autofrettage, using finite element analysis. *J Press Vessel Technol*, 134, 1-7(051203). doi: 10.1115/1.4006922.

Gibson, M.C, Hameed, A. and Hetherington, J.G. (2014). Investigation of residual stress development during swage autofrettage, using finite element analysis. *J Press Vessel Technol*, 136, (021206-1). doi: 10.1115/1.4025968

Güngör, K. (2016). Sinterlenmiş bronz esaslı kaymalı yataklarda polimer kullanımının tribolojik özelliklere etkisi. Doktora Tezi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi ABD*, Sakarya.

Hill, R. (1950). *The mathematical theory of plasticity*. New York: Oxford University Press.

<https://www.atilim.edu.tr/tr/msmm/page/3142/stresstech-tasinabilir-xrd-kalinti-gerilme-analiz-sistemi>. (2023). Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi.

<https://www.machinedesign.com/news/article/21829593/understanding-the-basics-of-autofrettage>. (2023). MachineDesign.

<https://www.thiot-autofrettage.com/our-autofrettage-machines/>. (2023). Thiot-Ingenierie.

Hu, Z. and Penumarthy, C. (2014). Computer modeling and optimization of swage autofrettage process of a thick-walled cylinder incorporating Bauschinger effect. *Am J Eng Appl Sci*, 3(1), 31-63.

Hu, Z. (2019). Design of two-pass swage autofrettage processes of thick-walled cylinders by computer modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233 (4), 1312-1333. doi: 10.1177/0954406218770221

Hu, Z., Gibson, M.C. and Parker, A.P. (2021). Swage autofrettage FEA incorporating a user function to model actual Bauschinger effect. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, 104372. doi: 10.1016/j.ijpvp.2021.104372.

Hu, Z. and Parker, A.P. (2022). Numerical modeling of hydraulic autofrettage numerical modeling of hydraulic autofrettage fracture pumps based on true material model. *Int J Mech Prod Eng*, 10(5), 1-7.

Huang, X.P. (2005). A general autofrettage model of a thick-walled cylinder based on tensile-compressive stress-strain curve of a material. *J Strain Anal Eng Des*, 40(20), 599-607. doi.org/10.1243/030932405X16070.

Jain, A., Khanwelkar, S., Saurav, K., Landge, A. and Yadav, U. (2016). Design and performance of hydraulic autofrettage using universal testing machine. *Int J Sci Res Sci Eng Technol*, 6(2), 154-157.

Jabur, L.S., Radhi, H. I. and Mohsin, N.R. (2016). Finite element analysis of autofrettage process of thick-walled cylinders. *Int J Eng Technol*, 7(5), 184-192.

Kamal, S.M. and Dixit, U.S. (2015). Feasibility study of thermal autofrettage of thick-walled cylinders. *J Press Vessel Technol*, 137(6), 061207 (1-18). doi: 10.1115/1.4030025

Kamal, S.M. (2018). Analysis of residual stress in the rotational autofrettage of thick-walled. *J Press Vessel Technol*, 140 (6):061402. doi.org/10.1115/1.4041339

Kruczynski, D.L., & Hewitt, J.R. (1991). Temperature compensation techniques and technologies-an overview, *U.S. Army Laboratory Command, Ballistic Research Laboratory*, Report No: BRL-TR-3283

- Iremonger, M.J. and Kalsi, G.S. (2003). A numerical study of swage autofrettage. *J Press Vessel Technol*, 125, 347-351. doi: 10.1115/1.1593073.
- Lawton, B. (2001). Temperature and heat transfer at the commencement of rifling a 155 mm gun. *19th International Symposium of Ballistics*, Switzerland, 307-314.
- Lee, E.Y., Lee, Y.S., Yang, Q.M., Kim, J.H., Cha, K.U. and Hong, S.K. (2009). Autofrettage process analysis of a compound cylinder based on the elastic-perfectly plastic and strain hardening stress-strain curve. *J Mech Sci Technol*, 23(12), 3153-3160. doi.org/10.1007/s12206-009-1009-9.
- Li, G., Deng, X., Song, H. and Zhang, B. (2021). Research on autofrettage mechanism in ultra-high pressure thick-walled vessel. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer-Aided Design, Manufacturing, Modeling and Simulation (CDMMS 2020)*, South Korea, Busan. doi:10.1088/1742-6596/1802/2/022001.
- Majzoobi, G.H. and Ghomi, A. (2006). Optimization of autofrettage in thick-walled cylinders. *J Achiev Mater Manuf Eng*, 16(1-2) 124-131.
- Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş (2021) <https://mke.gov.tr/tr/urunlerimiz/sayfalar/17-09-2021-urun-kataloglari>, İndirilme Tarihi: 01.10.2023.
- O'hara, G.P. (1992). Analysis of swage the swage autofrettage process, Us Army Armament Research, Development and Engineering Center, *Benet Laboratories*, Report No: ARCCB-TR-92016
- Öztörün, D. (2013). Bir ağır silah namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile elastik-plastik gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü*, Ankara.
- Partovi, A. (2012). Analysis of autofrettaged high pressure components. Master's Degree Thesis, *Blekinge Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering*, Sweden.
- Perl, M. and Perry, J. (2013). The beneficial influence of bauschinger effect mitigation on the barrel's safe maximum pressure. *J Press Vessel Technol*, 135, 021404 (1-5). doi.org/10.1115/1.4007645.
- Perry, J. and Aboudi, J. (2003). Elasto-plastic stresses in thick walled cylinders. *J Press Vessel Technol*, 125, 248-252. <https://doi.org/10.1115/1.1593078>.
- Perry, J., and Perl, M. (2006). A 3-D model for evaluating the residual stress field due to swage autofrettage. *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Vancoucer, BC, Canada, 23-27 July.
- Perry, J. and Perl, M. (2017). The Effects of the material's exact yield point and its plastic properties on the safe maximum pressure of gun barrels. *J Press Vessel Technol*, 139, 051401 (1-6). doi.org/10.1115/1.4037121.
- Putti, A., Chopade, M.R. and Chaudhari, H.E. (2016) A review on gun barrel erosion. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4, 231-235.
- Repplinger, C., Kedziora, S., Cao, T.B., Maas, S., Sellen, S. and Zürbes, A. (2020). Numerical determination and experimental verification of the optimum autofrettage pressure for a complex aluminum high-pressure valve to foster crack closure. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 43, 2183-2199. doi.org/10.1111/ffe.13227.
- Roy, A.K., Kamal, S.M., Patil, R.U., Rao, V.V. (2023). Practicing hydraulic autofrettage for strengthening a gun barrel: critical issues and challenges. In: Dixit,

U.S., Echempati, R., Dey, S. (eds) *Engineering Pedagogy*. Springer, Singapore. doi.org/10.1007/978-981-19-8016-9_13

Rupali and Mondal, S.C. (2015). Finite element analysis for predicting residual stresses of autofrettaged spherical vessels considering bauschinger effect. *Int J Sci Eng Res*, 6(8), 912-919.

Shim, W.S., Kim, J.H., Lee, Y.S., Cha, K.U. and Hong, S.K (2010). A study on hydraulic autofrettage of thick-walled cylinders incorporating Bauschinger effect. *Experimental Mechanics*, 50, 621-626. doi.org/10.1007/s11340-009-9255-4.

Shufen, R. and Dixit, U. S. (2018). A review of theoretical and experimental research on various autofrettage processes. *J Press Vessel Technol*. 140(5): 050802. doi.org/10.1115/1.4039206

Srivastava, A.K. and Gope, P.C. (2012). *Strength of materials*. New Delhi: PHI Learning Private Limited.

Trieb, F., Schedelmaier, J. and Poelzl, M. (2015). Autofrettage-Basic information and practical application on components for waterjet cutting. *WJTA American Waterjet Conference*, Houston, Texas, 21-23 August.

Troiano, E., Parker, A.P., Underwood, J. and Mossey, C. (2003). Experimental data, numerical fit and fatigue life calculations relating to the Bauschinger effect in high-strength armament steels. Us Army Armament Research, Development and Engineering Center, *Benet Laboratories*, Report No: ARCCB-TR-03006

Troiano, E., Underwood, J. and Parker, A.P. (2006). Finite element investigation of bauschinger effect in high-strength a723 pressure vessel steel. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 128 (2), 185-189.

Understanding the basics of autofrettage. Retrieved from <https://www.machinedesign.com/>

Zare, H. R. and Darijani, H. (2016). A novel autofrettage method for strengthening and design of thick-walled cylinders. *Materials and Design*, 105, 366–374. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.062.

Zhu, W. and Yang, J. (1998). Autofrettage of thick cylinders. *Int J Press Vessel Pip*, 75, 443-446.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Doğan BARAN

Eğitim durumu:

Doktora: : Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019-2024

Tez Konusu: Ağır Silah Namlularında Otofretaj İşlemlerinin İncelenmesi

Y. Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2015-2018

Tez Konusu: Namlularda Kendi Kendine Ateşleme (cook-off) Süresinin Hesaplanması

Lisans : Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2013

Tez Konusu: Panel Radyatör Konvektör Geometrisinin Deneysel ve Sayısal Analizi

Lise : Kırıkkale Atatürk Anadolu Lisesi, 2004-2008

Askerlik:

MSÜ Deniz Harp Okulu, Makine Mühendisliği Bölümü, Öğretim Görevlisi (Yedek Subay), 2018-2019

İş Tecrübesi:

- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, İl Sanayi ve Teknoloji Müdürlüğü / Kırıkkale (2022 – Devam)
- MKE Ağır Silah Fabrikası / Kırıkkale (2015-2022)
- Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı / Lüleburgaz-Kırklareli (2014-2015)

Yabancı Dil:

İngilizce (YDS 2023 Eylül, Puan: 90,00)

(YÖKDİL 2023 Ağustos, Puan: 90,00)

Yayınları:

Diğer indekslerde taranan bilimsel dergilerde yayımlanan makaleler:

(IM, DI, CMCI, EI, E-SCI vb.)

Baran, D., Bican, O., Doğu, Y., 2023, “Ağır Silah Namlusunun Mekanik Otofretaj İşleminde Gerilme Dağılımının Sayısal Olarak İncelenmesi”, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, Cilt 15, Sayı 3, sayfa 194-208. (<https://doi.org/10.29137/umagd.1364476>)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

Baran, D., Bican, O., Doğu, Y., “Ağır Silah Namlusunun Hidrolik Otofretaj İşleminde Oluşan Gerilme-Gerinim Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi”, III. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, Online, 7-9 Ekim 2021.

Baran, D., Doğu, Y. “Ağır Silah Namlusunda Kendi Kendine Ateşleme Süresinin Hesaplanması”, III. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, Online, 7-9 Ekim 2021.

Araştırma Alanları

Basıncılı Kaplar

SEM Analizi

İç Balistik

Ağır Silah Namluları

