



Ağır Silah Namlusunun Mekanik Otofretaj İşleminde Gerilme Dağılımının Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of Stress Distribution in Swage Autofrettage Process for Heavy Weapon Barrel

Doğan Baran*¹, Osman Bican¹, Yahya Doğu¹

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 21/09/2023

Kabul / Accepted: 7/10/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/12/2023

Öz

Otofretaj, kalın cidarlı silindirlerin basınç taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü artırmak için silindir et kalınlığında artık kalıcı gerilme oluşturma işlemidir. Bu artık gerilme, çalışma basıncının oluşturduğu gerilmenin bir kısmını nötr ederek, basınçlı kapların basınç taşıma kapasitesini artırır. Pratikte birçok otofretaj yöntemi olmakla beraber, özellikle ağır silah namlularında uygulanan iki otofretaj yöntemi mekanik ve hidrolik otofretaj işlemidir. Bu çalışmada, ağır silah namlusuna mekanik otofretaj uygulanması ile oluşan gerilmeler sonlu elemanlar metodu (SEM) ile sayısal olarak hesaplanmıştır. SEM modelinde iki boyutlu (2B) aksisimetrik geometri kullanılmıştır. SEM modeli literatürdeki veriler ile doğrulanmıştır. Otofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncı altında namlu iç çapında Von Mises eşdeğer gerilmenin değeri 1350,3 MPa olarak hesaplanmıştır. Otofretaj uygulanmış namluda ise Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri, namlunun et kalınlığının %63'ne karşılık gelen bölgede 1122,3 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu gerilme değerinin namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa'ın altında olduğu görülmektedir. Sonuç olarak çalışma basıncı altında otofretaj uygulanmış namluda Von Mises eşdeğer gerilmesi, otofretaj uygulanmayan namluya göre %16,88 oranında azalmıştır. Bu sebeplerden dolayı, ağır silah namlularında otofretaj işleminin uygulanması ve oluşan gerilmelerin hesaplanması namlu ömrü ve basınç taşıma kapasitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler

"Mekanik Otofretaj, Artık Gerilme, SEM Analizi"

Abstract

Autofrettage process is used to form residual stresses in order to increase the pressure carrying capacity and fatigue life of thick-walled cylinders. These residual stresses counteract some of the stresses during service pressure application and increase the pressure carrying capacity of pressure vessels. Although there are many techniques in practice, swage and hydraulic autofrettage processes have been mostly used in heavy gun barrel production process. In this study, the stresses developed at the end of the swage autofrettage process on a heavy gun barrel are numerically calculated by using an FEM (Finite Element Method) program. In FEM analysis, a two-dimensional (2D) axisymmetric model has been used. The FEM model is validated with data from the literature. The Von Mises stress under working pressure for non-autofrettaged barrel is calculated as 1350.3 MPa. The Von Mises equivalent stress for the autofrettaged barrel is 1122.3 MPa at 63% barrel thickness. It is seen that this stress is below the barrel yield strength of 1195 MPa. As a result, there is 16.88% reduction of Von Mises stress for autofrettaged barrel under the working pressure. Thus, the application of autofrettage process on heavy weapon barrels and the calculation of the resulting stresses are critical for barrel life and pressure carrying capacity.

Key Words

"Swage Autofrettage, Residual Stress, FEM Analysis"

1. Giriş

Genel olarak, darbeli ve değişken yüksek basınçlar altında çalışan kalın cidarlı silindirlere, kalıcı artık gerilme oluşturarak basınç taşıma kapasitesini artıran otofretaj işlemi uygulanmaktadır. Otofretaj işlemi ile oluşan kalıcı artık gerilme, silindirin yorulma ömrünü önemli seviyede artırmaktadır (Majzoobi & Ghomi, 2006a; Ali vd., 2010; Shim vd., 2010).

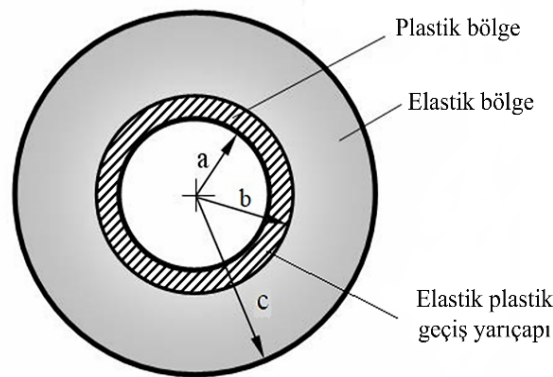
Otofretaj işleminin pratikteki uygulama örnekleri aşağıda listelenmiştir ve Şekil 1'de gösterilmiştir.

- 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).



Şekil 1. Otofretaj İşleminin Genel Uygulama Alanları

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 2). Uygulanan basınç kaldırıldığında silindir iç tarafı elastik-plastik geçiş yarıçapına (b yarıçapı) kadar plastik deformasyona uğrar. Silindirin dış çapında oluşan elastik toparlanma ise silindir cidarını içe doğru baskı altına alır. Dolayısıyla, iç yüzeye yakın bölgelerde bası (-) yönünde artık gerilme oluşurken dış yüzeyde ise çeki (+) yönünde artık gerilme oluşur. Oluşan bası (-) yönündeki artık gerilme, çalışma basıncı altında oluşan teğetsel gerilmeleri sönmüleyerek gerilmelerin seviyesini azaltır. Böylece, otofretaj işlemi silindirin basınç taşıma kapasitesini artırırken silindirin yorulma ömrünün de artmasını sağlar.



Şekil 2. Elastik-Plastik Geçiş Yarıçapı

Savunma sanayi özelinde, ağır silah namlusu üretimi için otofretaj işlemi çok önemli bir işlem adıdır. Ağır silah namlularının çalışma şartlarında tipik olarak barutun yanması ile oluşan namlu iç yüzey sıcaklığı 1100°C seviyesine kadar çıkmaktadır. 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 otofretaj işlemi önemli bir yer teşkil etmektedir.

Günümüzde ağır silah namlularına mekanik veya hidrolik otofretaj işlemi uygulanmaktadır. Genelde yüksek çaplarda hidrolik otofretaj işlemi uygulanırken, küçük çaplarda ise mekanik otofretaj işlemi daha yaygın kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ağır silah namlusuna uygulanan mekanik otofretaj işleminde oluşan gerilmeler sonlu elemanlar metodu (SEM) ile sayısal olarak hesaplanmıştır.

Mekanik otofretaj işleminde ağır silah namlusunun plastik deformasyonu, namlu eksenini boyunca boyda boya geçirilen iç çaptan daha büyük bir geometriye sahip, özel olarak imal edilmiş bir mandrel yardımıyla sağlanır.

Mandrel namlu içinde hareketini sağlayabilmek için namlu ile mandrel arasında oluşan 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.

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 namlularda bu işlemin uygulanması mümkün değildir.

Mekanik otofretaj işleminde oluşan gerilme dağılımlarının incelenmesi ile ilgili literatürde bulunan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

Alinezhad & Bihanta (2012), ABAQUS programı ile mandrel geometrisinde yapılan modifikasyonların, mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan artık gerilmeleri nasıl etkilediğini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel sonuçların sayısal sonuçları destekler yönde olduğu belirlenmiştir.

Hu & Penumarthy (2014) kalın cidarlı bir silindirdeki mekanik otofretaj işlemini ANSYS programı ile incelemiştir. Çalışmada, malzeme modeli olarak Bauschinger etkisini de içeren kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Mekanik otofretaj işlemi sonunda oluşan artık gerilmeler sayısal olarak hesaplanmış ve literatürde verilen deneysel artık gerilme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçların, numune üzerinde artık gerilme ölçümünden önce yapılan hazırlık işlemlerinden kaynaklı olumsuz etkilerden dolayı, sayısal sonuçlarla benzerlik göstermediği tespit edilmiştir. Ayrıca, Bauschinger etkisi ve sürtünme katsayısının, gerilme-gerinim dağılımları üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Nihai olarak optimum mandrel geometrisi ve buna bağlı olarak çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değeri hesaplanmıştır.

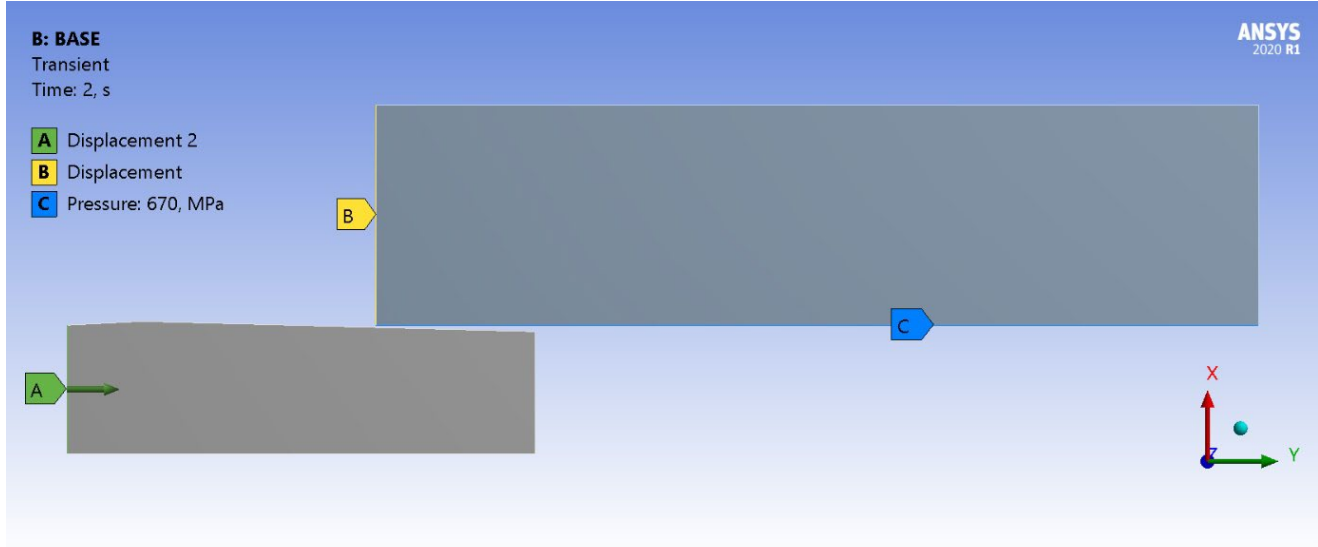
Gibson vd. (2014) mekanik otofretaj işleminde oluşan deformasyon mekanizmasını incelemek ve artık gerilmeleri hesaplamak için ANSYS programını kullanmıştır. Mandrel koniklik açısı, mandrel üzerindeki düz bölgenin uzunluğu ve sürtünme katsayısı parametrelerine göre analizler yapılmıştır. Sonuç olarak aksel gerilmelerin, artık teğetsel gerilme ve ikinci bir plastik akma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Chica vd. (2019) soğuk şekillendirme tabanlı düşünerek analizler gerçekleştirmiştir. Mandrel geometrik özelliklerinden olan ön konik açı, mandrel üzerindeki düz bölgesinin uzunluğu ve yüzde arakesit oranı değiştirilerek parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve bunların artık gerilmeler üzerindeki etkileri ANSYS programı ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki ağır silah namlusu mekanik otofretaj işleminde elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmada, daha küçük delik çapına sahip geometriler için dış/iç çap oranının mekanik otofretaj sonunda oluşan artık gerilmelere etkisi incelenmiştir.

Hu vd. (2021) A723 çeliği ile imal edilmiş kalın cidarlı bir silindirde mekanik otofretaj işlemini incelemek için Bauschinger etkisini de göz önünde bulundurarak geliştirdikleri fonksiyonları ANSYS programına entegre ederek analizler gerçekleştirmiştir. Analizlerde malzeme tanımlaması yapmak için, A723 çeliğindeki Bauschinger etkisini yansıtan çekme testleri gerçekleştirilmiş ve bu testlerin doğrulaması yapılmıştır. Geliştirilen malzeme modeli ile literatürde verilen malzeme modelleri arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Bunlara ek olarak Bauschinger etkisini de içeren mekanik otofretaj çözümleri ile buna eşdeğer hidrolik otofretaj çözümleri karşılaştırılmıştır. Mekanik otofretaj işlemi sonunda, silindir iç yüzeyine yakın bölgede oluşan teğetsel artık gerilme değerlerinin, hidrolik otofretaj işlemindeki sonuçlara nazaran daha derin ve bası (-) yönünde olduğu görülmüştür. Bununla beraber, mekanik otofretaj işlemi sonunda çeki (+) yönünde aksel gerilme oluşurken, hidrolik otofretaj işlemi sonunda bası (-) yönünde aksel gerilme oluştuğu tespit edilmiştir. Son aşamada, mekanik otofretaj işleminden sonra silindir üzerindeki talaş kaldırma işleminin, silindir iç yüzeyine yakın yerlerde oluşan gerilme dağılımlarını ciddi şekilde iyileştirdiği görülmüştür.

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).



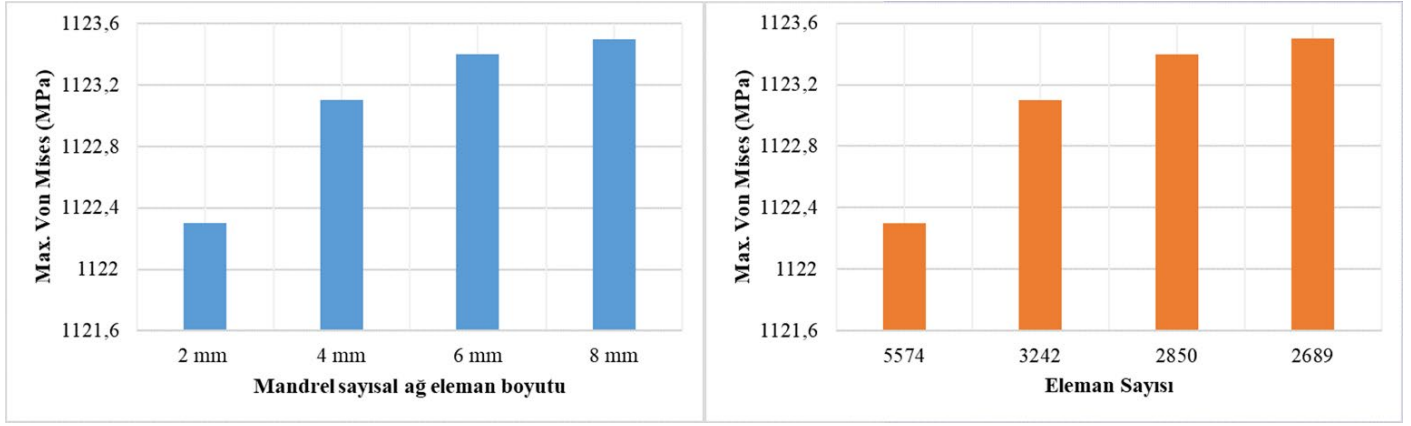
Şekil 7. SEM Modeli ve Sınır Şartları

SEM analizinde malzeme modeli olarak bilineer kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Namlu ve mandrel için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Namlu malzemesi olarak kullanılan Ç4340 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. Tablo 1’de verilen mandrel malzemesinin de mekanik özellikleri SEM modelinde tanımlanmıştır (Gibson, 2008).

Tablo 1. SEM Modelinde Tanımlanan Malzeme Özellikleri

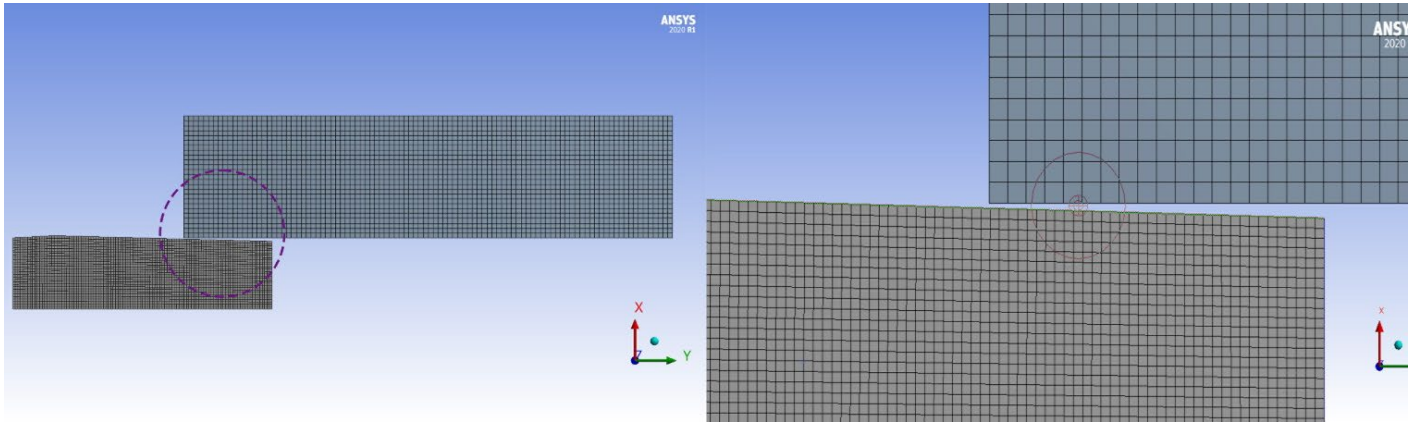
Namlu		Mandrel	
Parametre	Değer	Parametre	Değer
E (GPa)	200	E (GPa)	500
ν	0,3	ν	0,24
σ_y (MPa)	1195	σ_y (MPa)	-
T (MPa)	3723	T (MPa)	-

Literatürdeki bazı çalışmalarda, ağ yapısı oluşturulurken özellikle mandrel üzerindeki düz bölgenin (L_m) kaç parçaya bölüneceğinin elde edilen gerilme dağılımlarının hata oranını etkilediği ifade edilmektedir (Gibson vd. (2012, 2014). Analiz sonuçlarının ağ sayısından bağımsız olup olmadığını göstermek için analizler mandrel ağ yapısı eleman boyutu değiştirilerek tekrarlanmıştır. Mandrelin düz bölgesi için sırasıyla 2, 4, 6 ve 8 mm eleman boyutu kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu boyutlara karşılık gelen eleman sayıları sırasıyla 5574, 3242, 2850 ve 2689’dur. Şekil 8’de gösterildiği gibi değişen mandrel ağ yapısı eleman boyutuna bağlı olarak 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan maksimum Von Mises eşdeğer gerilme değerinin kayda değer seviyede değişmediği görülmüştür.



Şekil 8. Maksimum Von Mises Eşdeğer Gerilme Değerinin Farklı Ağ Eleman Boyutlarına Göre Değişimi

Bu sonuçlar göre, mandrel için 2 mm, namlu için ise 4 mm boyutunda elemanlar kullanılmış ve oluşan ağ yapısı Şekil 9'da gösterilmiştir. Namlu ve mandrel için düğüm/eleman sayısı (node/element) toplamda 17244/5574 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 9. SEM Modeli Ağ Yapısı

4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında, mekanik ofofretaj işlemi sonunda elde edilen gerilme dağılımı SEM programı ile sayısal olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan SEM modelinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla, literatürde verilen analizler tekrarlanmıştır (Gibson vd., (2012, 2014)). Ardından incelenen ağır silah namlusu için model/malzeme/sınır şartı tanımlamaları yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Ayrıca, doğrulama çalışmalarından sonra, SEM analizi ile referans geometri için ofofretajsız ve ofofretaj uygulanmış namluda çalışma basıncı altında hesaplanan gerilme değerleri karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

4.1. Doğrulama çalışmaları

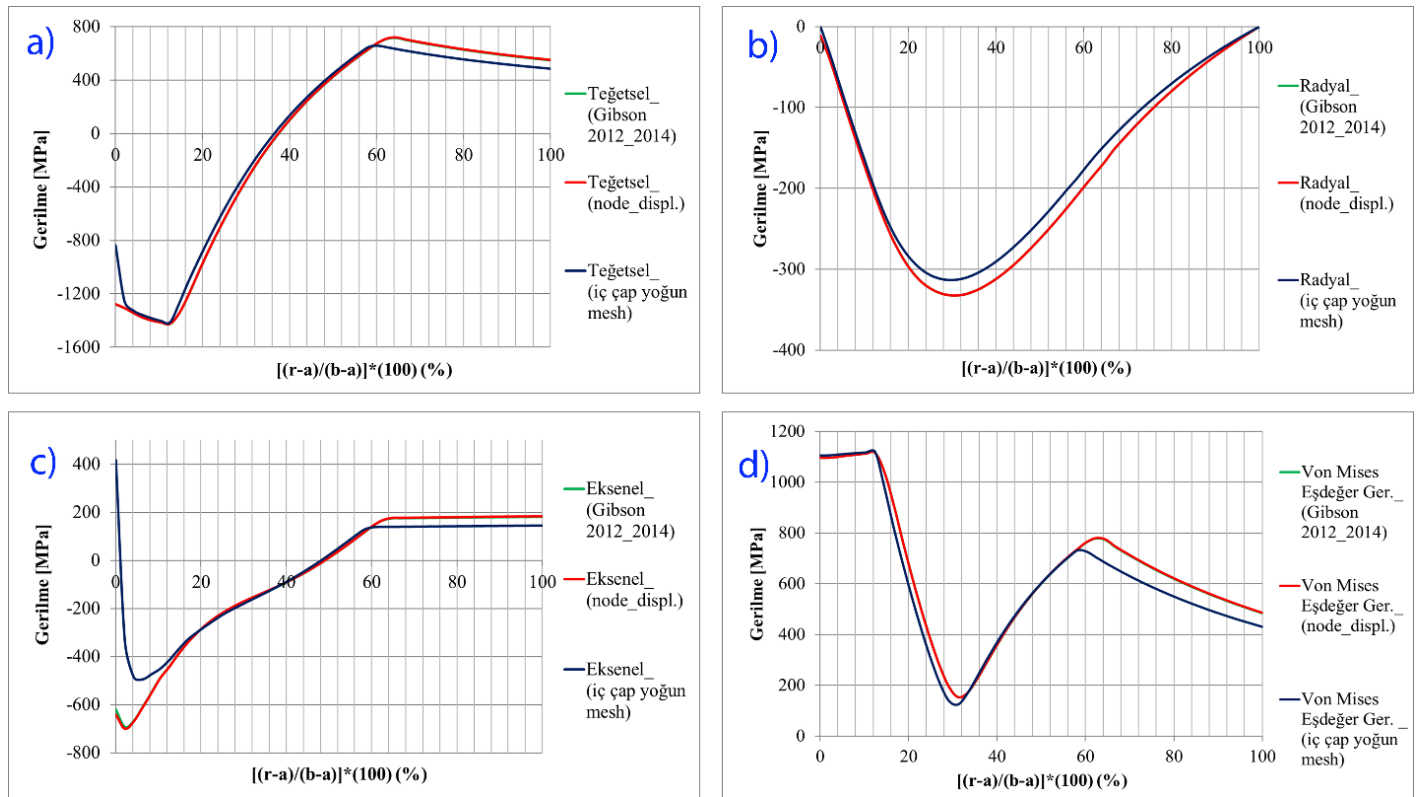
Çalışma kapsamında oluşturulan mekanik ofofretaj SEM modelinin doğruluğunu teyit etmek için Gibson'ın iki boyutlu (2B) modelleri referans olarak alınmıştır. Bu amaçla, Gibson vd. (2012, 2014)'nin 2B analizleri ilgili geometri, malzeme, ağ yapısı ve sınır şartları kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Yatay eksen namlunun iç ve dış çapına göre normalize edilmiş radyal namlu kalınlığını göstermektedir ($r^* = (r-a) / (b-a) * 100$). Şekil 10'da gösterildiği gibi, mevcut SEM modeli ile mekanik ofofretaj işlemi sonunda elde edilen teğetsel (a), radyal (b), aksenal (c) ve Von Mises eşdeğer (d) gerilme değerlerinin, Gibson vd., (2012, 2014)'nin elde ettiği gerilmelere çok yakın olduğu görülmüştür. Sadece, namlu iç çapına yakın yerde yoğun ağ yapısının kullanıldığı varyasyon için fark bir miktar fazla olmuştur.

Ayrıca, bu doğrulama çalışmasına ek olarak; O'hara, G.P. (1992)'nin yaptığı gibi, namlunun arka yüzeyi yerine, otofretaj işlemi esnasında namluyu tutan çenelerin bulunduğu dış çaptaki düğüm noktasından sabitlenerek de (node displacement) analiz yapılmıştır. Namlu arka yüzeyinin ve dış çaptaki düğümün sabitlenmesi ile elde edilen sonuçlar birbiri üzerine çakışmıştır.

4.2. Ağır Silah Namlusu Mekanik Otofretajında Oluşan Gerilme Dağılımları

İncelenen ağır silah namlusu için model/malzeme/sınır şartı tanımlamaları yapılarak analizler çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca mekanik otofretaj işlemi esnasında oluşan gerilmelere ait SEM görüntüleri de verilmiştir.

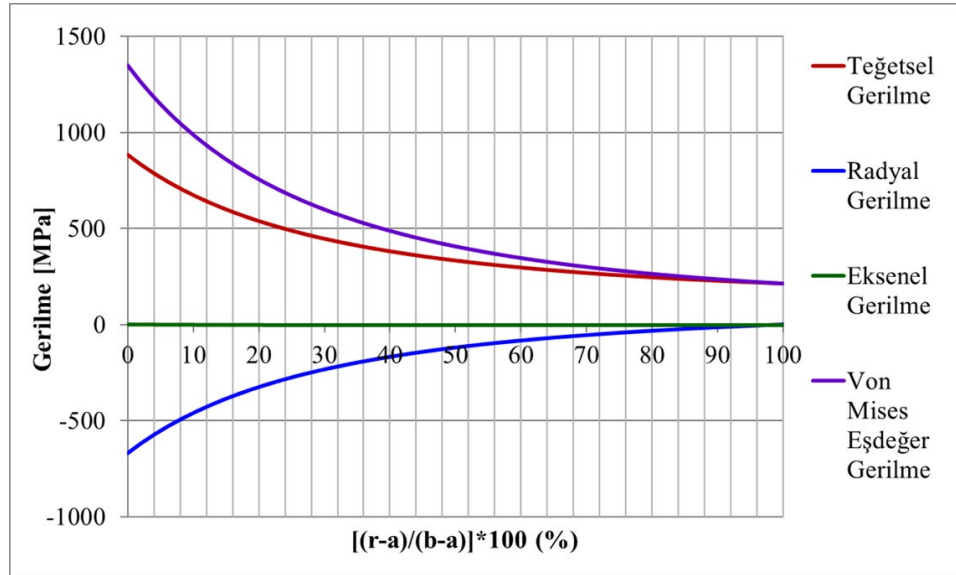
Aşağıda, karşılaştırma ve takip kolaylığı açısından sırasıyla otofretajsız namluda çalışma basıncında oluşan gerilme dağılımı, otofretaj esnasında ve bitiminde namluda oluşan gerilme dağılımı, otofretajlı namluda çalışma basıncında oluşan gerilme dağılımı ile otofretajsız ve otofretajlı namluda çalışma basıncında oluşan gerilme dağılımının karşılaştırılması verilmiş ve yorumlar yapılmıştır.



Şekil 10. Doğrulama Çalışmasında Elde Edilen Gerilme Dağılımları a) Teğetsel b) Radyal c) Eksenel d) Von Mises Eşdeğer

4.2.1. Otofretajsız Namluda Çalışma Basıncında Oluşan Gerilme Dağılımı

Öncelikle, otofretaj uygulanmamış namluda 670 MPa çalışma basıncı altında radyal yönde oluşan gerilme dağılımları referans olarak kullanılmak üzere Şekil 11'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 (a), radyal (b), eksenel (c) ve Von Mises eşdeğer (d) gerilme değerleri verilmiştir. Şekil 11'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 11. Otofretajsız Namluda Çalışma Basıncı Altında Oluşan Gerilme Dağılımları

4.2.2. Otofretaj Esnasında ve Bitiminde Namluda Oluşan Gerilme Dağılımı

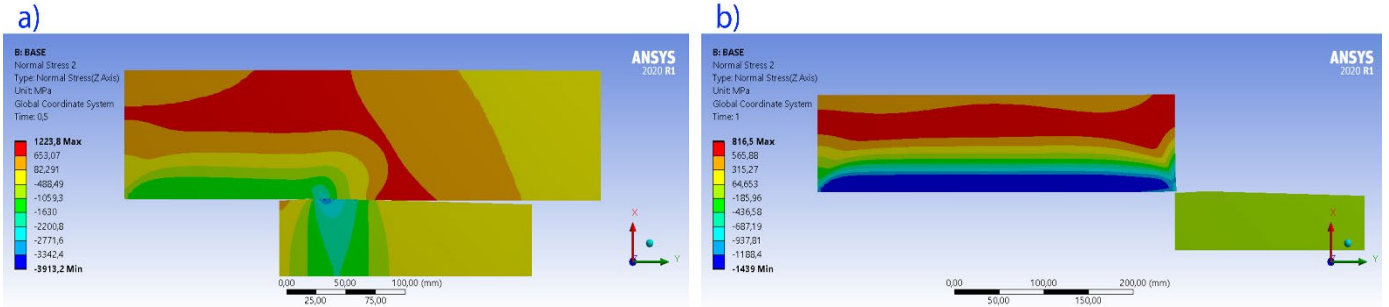
Şekil 12, 13, 14 ve 15'te mekanik ofofretaj işlemi esnasında (eksenel yönde namlu orta noktası) ve bitiminde elde edilen teğetsel, radyal, ekstenel ve Von Mises eşdeğer gerilmelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 16'da ise bu gerilmelerin ekstenel yöndeki namlunun orta noktasından alınan radyal yöndeki dağılım grafikleri verilmiştir.

Teğetsel gerilme: Şekil 12 ve 16'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.

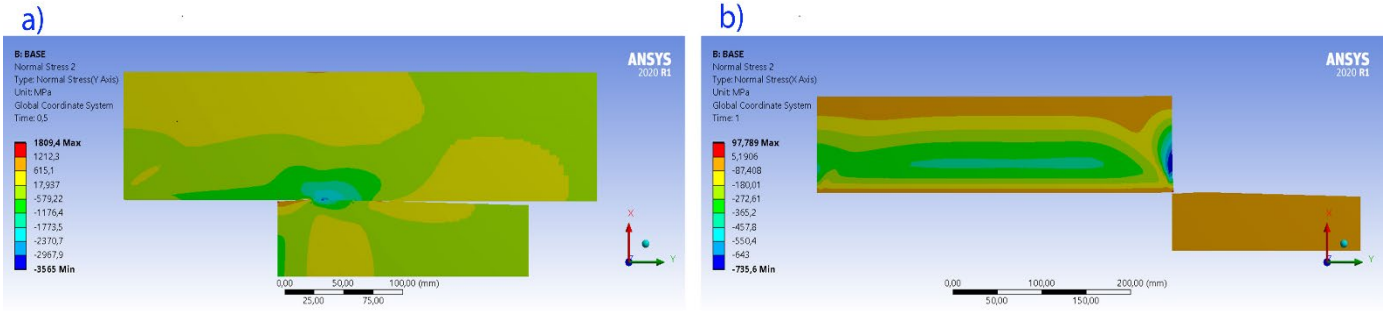
Radyal gerilme: Şekil 13 ve 16'da gösterilen radyal gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, temas bölgesinde mandrelin ekstenel hareketinden ve iç çapta meydana gelen genişlemeden kaynaklı olarak namlu iç yüzeyinde bası (-) yönünde kalıcı radyal bir gerilme meydana gelmektedir. Namlu iç ve dış çapında radyal gerilme değeri 0 MPa iken namlu et kalınlığının % 31'lik mesafesine denk gelen konumda radyal gerilme maksimum -377,08 MPa değerini almaktadır.

Eksenel gerilme: Şekil 14 ve 16'da gösterilen ekstenel gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mekanik ofofretaj işleminin aksisimetrik ve dinamik bir deformasyon türü olmasından dolayı, ekstenel 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 (-), dış çapta ise çeki (+) yönünde ekstenel gerilme oluşmaktadır. Namlu iç çapında bası (-) yönünde -733,36 MPa ekstenel gerilme oluşmaktadır. Namlu et kalınlığının %2'ne karşılık gelen bölgede ise -889,36 MPa ile en yüksek değerini alan ekstenel gerilme, namlu et kalınlığı boyunca azalmaktadır. Namlu et kalınlığının %50'lik kısmına denk gelen yerde çeki (+) olarak yönlendirilen ekstenel gerilmenin namlu dış çapındaki değeri 205,01 MPa olmaktadır.

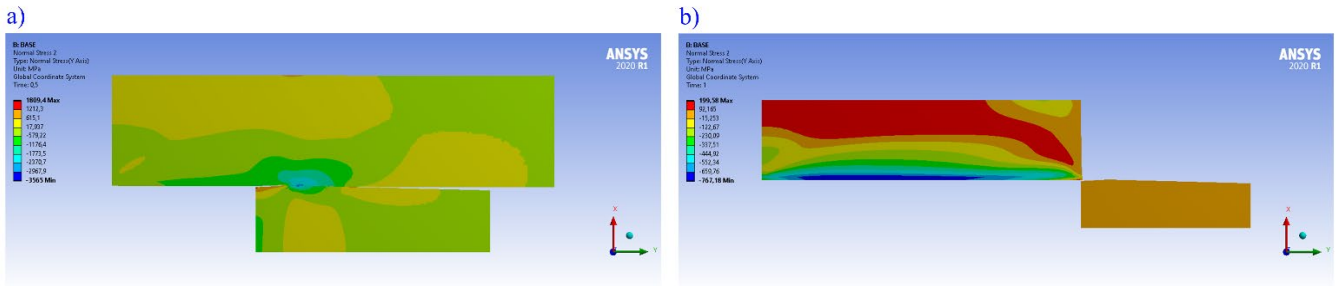
Von Mises eşdeğer gerilme: Şekil 15 ve 16'da gösterilen Von Mises eşdeğer gerilme grafiklerinde görüldüğü gibi, mekanik ofofretaj işleminin sonunda, gerilme bileşenlerinin iç yüzeyden dış yüzeye doğru çeki (+) yönünden bası (-) yönüne doğru yönlendirilmesinden kaynaklı olarak, Von Mises eşdeğer gerilmesi değerinin namlu iç çapından et kalınlığı boyunca yönlendirildiği görülmektedir. Von Mises eşdeğer gerilme değerinin namlu iç çapından namlu et kalınlığının %15'lik kısmına kadar yaklaşık 1092 MPa değerinde sabit olarak kaldığı görülmektedir. Ardından eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %33'lük kısmında 192,2 MPa ile minimum değerini almaktadır. Von Mises eşdeğer gerilme değeri minimum değerini aldıktan sonra artarak namlu et kalınlığının %65'lik kısmına denk gelen konumda 793,08 MPa olmaktadır. Ardından eşdeğer gerilme tekrar düşüşe geçerek namlu dış çapında 480,65 MPa değerinde oluşmaktadır.



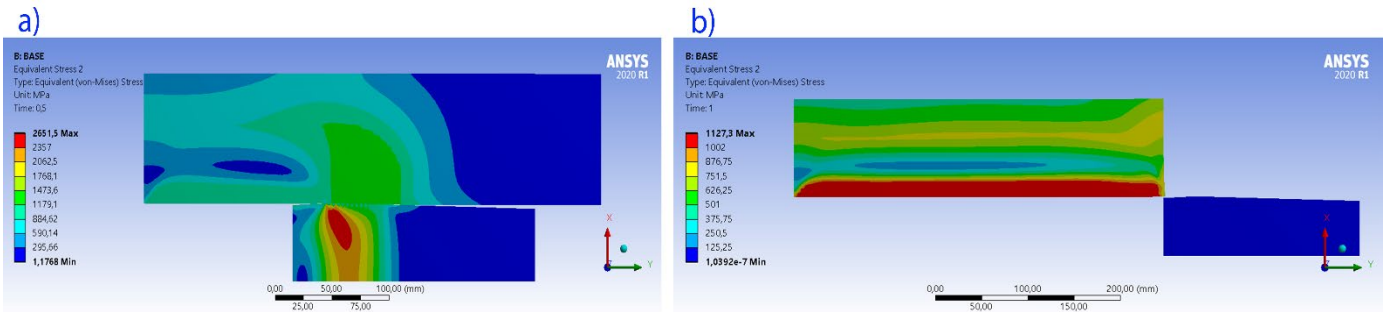
Şekil 12. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Teğetsel Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



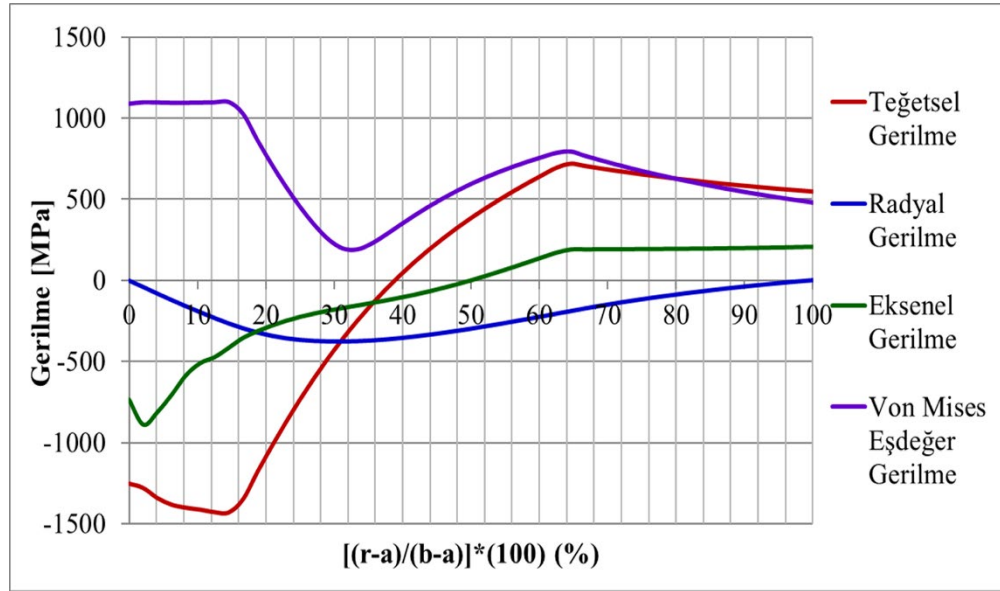
Şekil 13. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Radyal Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



Şekil 14. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Eksenel Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



Şekil 15. Mekanik Otofretaj İşlemi Esnasında Oluşan Von Mises Eşdeğer Gerilme: a) Eksenel Yönde Namlu Orta Noktası, b) Bitim Noktası



Şekil 16. Mekanik Otofretaj İşleminin Sonunda Elde Edilen Gerilme Dağılımları

4.2.3. Otofretajlı Namluda Çalışma Basıncında Oluşan Gerilme Dağılımı

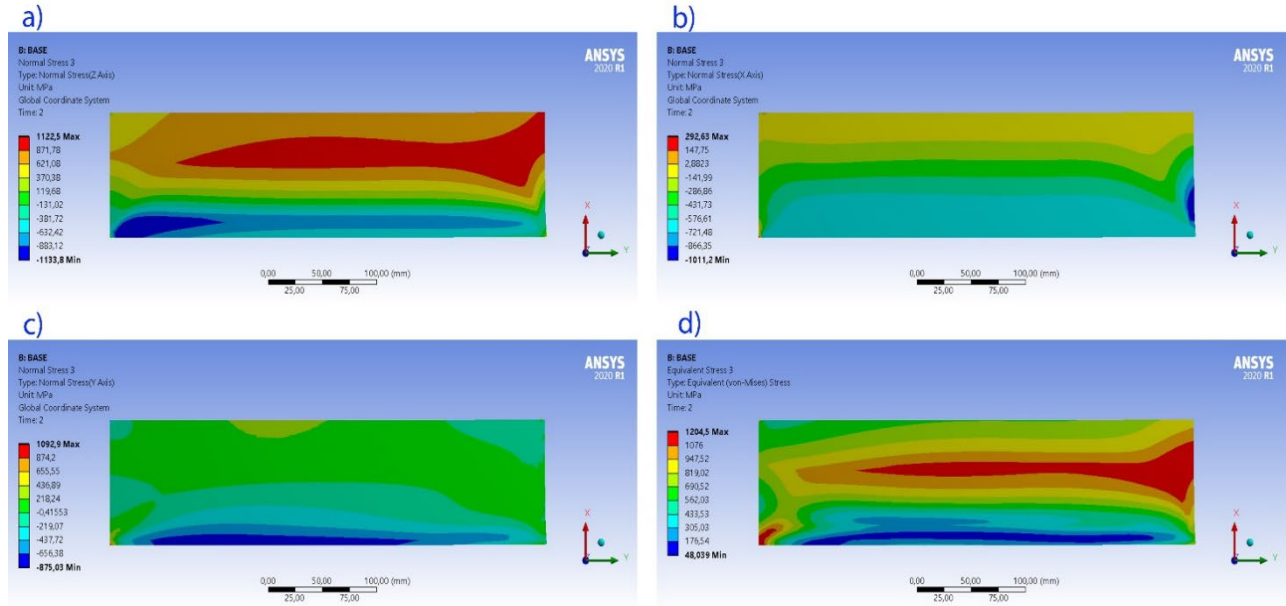
Mekanik ofofretaj işlemi uygulanmış namluda, 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan teğetsel, radyal, eksenel ve Von Mises eşdeğer gerilmelere ait SEM görüntüleri Şekil 17'de gösterilmiştir. Çalışma basıncı altında oluşan radyal doğrultudaki gerilme dağılımları ise Şekil 18'te gösterilmiştir.

Teğetsel gerilme: Namlu mekanik ofofretaj 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 ofofretaj uygulanmamış 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.

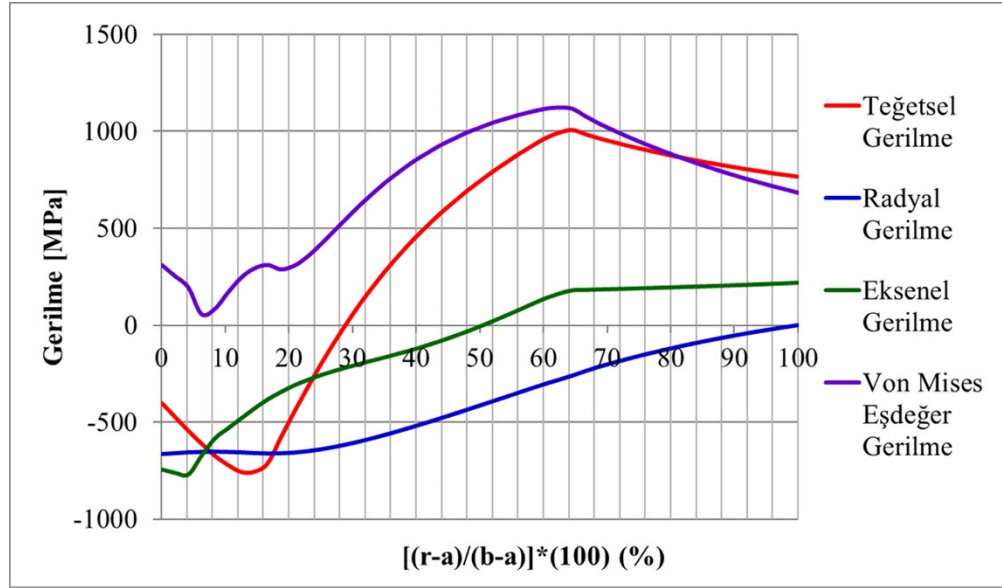
Radyal gerilme: Namlu et kalınlığı içerisinde oluşturulmuş kalıcı artık gerilmenin etkisiyle, radyal gerilmenin namlu iç çapında -666,4 MPa değeri ile maksimum seviyede olduğu ve dış çapa doğru ise nihai değerinin 0 MPa olacak şekilde düştüğü görülmektedir.

Eksenel gerilme: Eksenel gerilmenin mekanik ofofretaj 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 ofofretaj yapılmamış bir namluya göre makul seviyede azaldığı görülmektedir. Eşdeğer gerilme namlu et kalınlığının %63'ne denk gelen konumda 1122,3 MPa seviyesinde olmaktadır.



Şekil 17. Otofretajlı Namluda 670 MPa Çalışma Basıncı Altında Oluşan Gerilmelere Ait SEM Görüntüleri: a) Teğetsel b) Radyal c) Eksenel, d) Von Mises Eşdeğer Gerilme



Şekil 18. Otofretajlı Namluda 670 MPa Çalışma Basıncı Altında Oluşan Gerilme Dağılımları

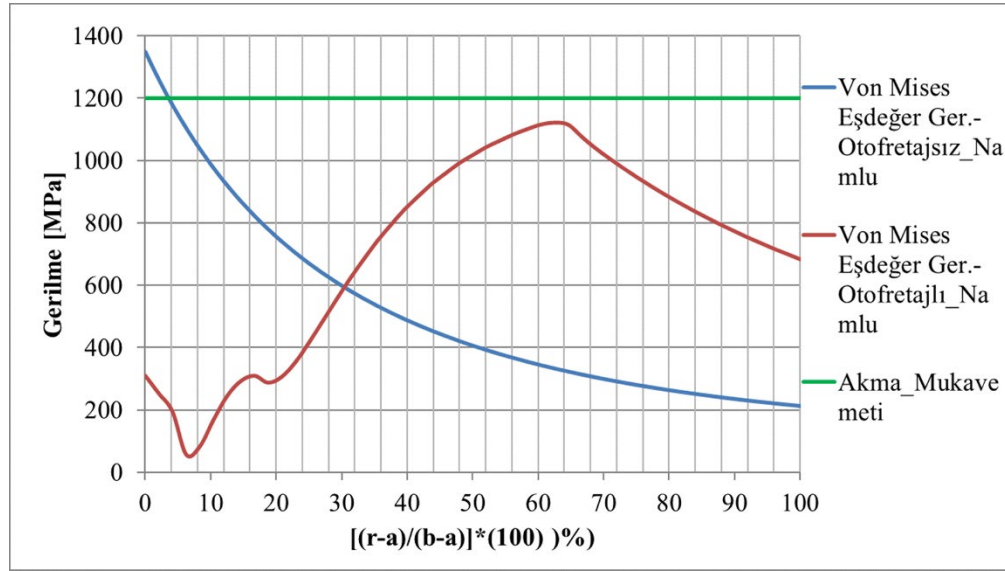
4.2.4. Otofretajsız ve Otofretajlı Namluda Çalışma Basıncında Oluşan Gerilme Dağılımlarının Karşılaştırılması

Şekil 19'da otofretajsız ve otofretaj uygulanmış namluda 670 MPa çalışma basıncı altında oluşan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri gösterilmiştir. Otofretaj uygulanmamış 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.

Otofretaj uygulanmış namluda Von Mises eşdeğer gerilme değeri, ofofretaj uygulanmamış bir namluya göre iç çapa yakın bölgelerde oldukça azalırken, ofofretaj uygulanmış namluda maksimum eşdeğer gerilme ofofretaj uygulanmayan 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 ofofretajsız namluya göre daha düşük bir eşdeğer gerilme değeri elde edilmesi, ofofretaj uygulanmış 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 19. Otofretajlı ve Otofretajsız Namluda Von Mises Eşdeğer Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması

5. Genel Değerlendirmeler

Bu çalışmada, bir ağır silah namlusu üzerinde mekanik ofofretaj işlemi sonunda oluşan gerilmeler bir SEM programı yardımıyla sayısal olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan SEM modelinin literatür tabanlı doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Otofretajsız namluda 670 MPa çalışma basıncında namlu iç çapında hesaplanan Von Mises eşdeğer gerilmenin değeri 1350,3 MPa iken, ofofretaj uygulanmış namluda iç çapta eşdeğer gerilmenin değeri ise 310,45 MPa olarak hesaplanmıştır.
- 2) Otofretaj uygulanmış namluda, Von Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri, namlunun et kalınlığının %63'ne karşılık gelen konumda 1122,3 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu gerilme değerinin, namlu akma mukavemeti olan 1195 MPa'nın altında olduğu görülmektedir.
- 3) Otofretaj uygulanmış namluda Von Mises eşdeğer gerilme değeri, ofofretaj uygulanmamış namluya göre iç çapa yakın bölgelerde oldukça azalırken, ofofretaj uygulanmış namluda maksimum Von Mises eşdeğer gerilme, ofofretaj uygulanmayan namluya göre %16,88 oranında azalmıştır.

Bu sebeplerden dolayı, ağır silah namlularında ofofretaj işleminin uygulanması ve oluşan gerilmelerin hesaplanması namlu ömrü ve basınç taşıma kapasitesi açısından kritik öneme sahiptir.

Referanslar

- Alegre, J.M., Bravo, P., & Preciado, M. (2006). Design of an autofrettaged high-pressure vessel, considering the Bauschinger effect. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 220(1), 7-16. doi: 10.1243/095440805X73645
- Ali, A.R.M, Ghosh, N.C. & Alam, T-E. (2010). Optimum design of pressure vessel subjected to autofrettage process. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering 4 (10), 1040-1045.
- Alinezhad, P., & Bihamta, R. (2012). A study on the tool geometry effects in the swage autofrettage. Advanced Materials Research Vols., 433-440, 2206-221. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.2206
- Bihamta, R., Movahhedy, M.R. & Mashreghi, A.R. (2007). A numerical study of swage autofrettage of thick-walled tubes. Materials and Design, 28 (3), 804-815. doi: 10.1016/j.matdes.2005.11.012
- Chica, C.J, Marin, M.M., Rubio, E.M., Teti, R., & 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., & Filiz, H., (2017). Optimum autofrettage pressure for a high pressure cylinder of a waterjet intensifier pump. Universal Journal of Engineering Science, 5(3), 44-55. doi: 10.13189/ujes.2017.050302
- Davidson, T.E., Barton, C.S., Reiner, A.N., & Kendall, D.P. (1962). New approach to the autofrettage of high-strength cylinders, Experiment Mech., 2, 33-40
- 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., & Hetherington, J.G. (2012). Investigation of driving force variation during swage autofrettage, using finite element analysis. Journal of Pressure Vessel Technology, 134:051203. doi: 10.1115/1.4006922
- Gibson, M.C., Hameed, A., & Hetherington, J.G. (2014). Investigation of residual stress development during swage autofrettage, using finite element analysis. Journal of Pressure Vessel Technology, 136:021206-1. doi: 10.1115/1.4025968
- Hu, Z., & Penumarthy, C. (2014). Computer modeling and optimization of swage autofrettage process of a thick-walled cylinder incorporating Bauschinger effect. American Transactions on Engineering & Applied Sciences, 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. 10.1177/0954406218770221
- Hu, Z., Gibson, M.C., & 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
- Iremonger, M.J., & Kalsi, G.S. (2003). A numerical study of swage autofrettage. Journal of Pressure Vessel Technology, 125 (3), 347-351. doi: 10.1115/1.1593073.
- Jain, A., Khanwelkar, S., Saurav, K., Landge, A., & Yadav, U. (2016). Design and performance of hydraulic autofrettage using universal testing machine. Int. J. of Research in Mechanical Eng. Tech., 6(2), 154-157.
- Kamal, S.M., & Dixit, U.S. (2015). Feasibility study of thermal autofrettage of thick-walled cylinders. Journal of Pressure Vessel Technology, 137:061207. doi: 10.1115/1.4030025
- 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
- Lawton, B. (2001). Temperature and heat transfer at the commencement of rifling a 155 mm gun. 19th International Symposium of Ballistics, Switzerland, 307-314.

- Majzoobi, G.H., & Ghomi, A. (2006). Optimization of autofrettage in thick-walled cylinders. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 16(1-2) 124-131.
- Majzoobi, G.H., & Ghomi, A. (2006). Optimization of compound pressure cylinders. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 15(1-2) 135-145.
- Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş (2021). <https://mke.gov.tr/tr/urunlerimiz/sayfalar/17-09-2021-urun-kataloglari>, İndirilme Tarihi: 01.10.2023.
- Malik, M.A, Knushnood, S., Khan, M., & Rashid, B. (2007). Analysis of autofrettaged metal tubes. 15th International Conference on Nuclear Engineering, Nagoya, Japan, 22-26 April.
- O'hara, G.P. (1992). Analysis of swage the swage autofrettage process, U.S. Army Armament Research, Development and Engineering Center, Benet Laboratories, Report No: ARCCB-TR-92016
- 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.
- Putti, A., Chopade, M.R., & Chaudhari, H.E. (2016) A review on gun barrel erosion. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4, 231-235.
- Shim, W.S., Kim, J.H., Lee, Y.S., Cha, K.U. & Hong, S.K. (2010). A study on hydraulic autofrettage of thick-walled cylinders incorporating Bauschinger effect. *Experimental Mechanics*, 50, 621-626. doi 10.1007/s11340-009-9255-4
- Trieb, F., Schedelmaier, J., & Poelzl, M. (2015). Autofrettage-Basic information and practical application on components for waterjet cutting. WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 21-23 August.