

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

**ELASTİK-PLASTİK SIKI GEÇME ELEMANLARININ ANALİTİK VE
SONLU ELEMANLAR MODELLERİ İLE MEKANİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**



İlyas BOZKURT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ MEKANİK ANABİLİM DALI**

TEMMUZ 2017

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

**ELASTİK-PLASTİK SIKI GEÇME ELEMANLARININ ANALİTİK VE
SONLU ELEMANLAR MODELLERİ İLE MEKANİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**



İlyas BOZKURT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ MEKANİK ANABİLİM DALI**

TEMMUZ 2017

Tezin Başlığı : Elastik-Plastik Sıkı Geçme Elemanlarının Analitik ve Sonlu Elemanlar Modelleri ile Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Tezi Hazırlayan : İlyas BOZKURT

Sınav Tarihi : 04.07.2017

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Makine Mühendisliği mekanik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Mete Onur KAMAN
Fırat Üniversitesi

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Eray ARSLAN**
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Elastik-Plastik Sıkı Geçme Elemanlarının Analitik ve Sayısal Modeller ile Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakça yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İlyas BOZKURT



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELASTİK-PLASTİK SIKI GEÇME ELEMANLARININ ANALİTİK VE SONLU ELEMANLAR MODELLERİ İLE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İlyas BOZKURT

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekanik Anabilim Dalı

78+x sayfa

2017

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Eray ARSLAN

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, içi boş ya da içi dolu millerden oluşan, montaj aşamasında milin tamamıyla elastik davrandığı ancak göbek malzemesinin radyal doğrultuda üçte birinin plastikleştiği durum için sıkı geçmenin mekanik davranışını tarif eden analitik ve sayısal modeller geliştirilmiştir. Ardından, bu modeller ile elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk olarak, elastik mil ve elastik-plastik göbek elemanlarının deformasyon davranışlarını tarif eden analitik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller geliştirilirken, Elastisite teorisi temel alınmıştır. Problemin bir düzlem gerilme durumunda olduğu ve küçük deformasyonlar durumu varsayılmıştır. Plastik davranış için Tresca akma kriteri ve ilgili akma kuralı kullanılmıştır. Bu çözüm aşamasında, farklı boyuttaki ve farklı malzemelerden üretilmiş mil ve göbek elemanları için, göbeğin üçte birinin plastikleşmesine sağlayacak yarıçap farkları tespit edilmiştir. Bu yarıçap farkları düşünülerek monte edilen elemanlarda oluşacak gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanmıştır. Ayrıca yarıçap farkının arayüzey basıncına etkileri incelenmiştir.

İkinci aşamada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, ABAQUS programı yardımıyla, mil ve göbeğe ait elastik ve elastik-plastik davranışlar incelenmiştir. Bu yöntemde, plastikleşmenin von Mises akma kriterine göre ve ilgili akma kuralına bağlı olarak gerçekleştiği varsayılmıştır.

Sonuç olarak, analitik ve sayısal modeller kullanılarak içi boş ve içi dolu mil için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken yarıçap farklarının ve malzeme kompozisyonlarının etkileri de göz önünde bulundurulmuştur. Yarıçap farklarının plastikleşmeye ve göbek iç basıncına etkileri her iki model yardımıyla incelenmiştir. İçi boş ve içi dolu mil-göbek için çelik-alüminyum, çelik-bakır, çelik-çelik, bakır-çelik ve alüminyum-çelik malzeme kompozisyonları kullanıldığında elde edilecek kritik sonuçlar sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Sıkı geçme, Elastik, Elastik-plastik, Analitik Model, Sonlu Elemanlar, ABAQUS

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIORS OF ELASTIC-PLASTIC SHRINK FITTING ELEMENTS WITH ANALYTICAL AND NUMERICAL MODELS

İlyas BOZKURT

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanics

78+x pages

2017

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Eray ARSLAN

In this master thesis study, analytical and numerical models which describe mechanical behaviors of shrink fits consisting of solid or hollow shafts are developed for the case of totally elastic shaft and partially plastic hub during assembly. Then, the numerical results obtained with these models are compared.

Firstly, analytical models which describe the deformation behaviors of elastic shafts and elastic-plastic hub elements have been developed. These models are based on Elasticity Theory. Plane stress state and small deformations have been assumed. For the plastic behavior, Tresca yield criterion and corresponding flow rule are used. During this solution phase, interferences are determined to cause plasticization of one third of the hub for the shaft and hub produced for different dimensions and by different materials. As considering these interferences, the elastic and elastic-plastic stresses produced in the assembled elements are calculated.

In the second stage, by using the methods of Finite elements and with help of ABAQUS program, elastic and elastic-plastic behaviors which belong to shaft and hub are investigated. In this method, it has been assumed that the plasticization occurs according to von Mises yield criterion and corresponding flow rule.

As a result, numerical results which are obtained by analytical and numerical models are compared. The effects of interference and material compositions are taken into account during the comparisons. Effects of interference on plasticization and interface pressure are analyzed. The critical results which are obtained by the use of the compositions as steel-aluminum, steel-copper, steel-steel, copper-steel, and aluminum-steel are presented.

KEYWORDS: Shrink fit, Elastic, Elastic-plastic, Analytical model, Finite Elements, ABAQUS.

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği bulunan bütün hocalarıma, özellikle tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Eray ARSLAN’a teşekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. SIKI GEÇME BAĞLANTILARI	4
3. LİTERATÜR	7
3.1. Elastik Sıkı Geçme için Analitik Modeller	7
3.2. Elastik Sıkı Geçme için Sonlu Elemanlar Modelleri	7
3.3. Elastik-Plastik Sıkı Geçme için Analitik Modeller	8
3.4. Elastik-Plastik Sıkı Geçme için Sonlu Elemanlar Modelleri	9
4. PROBLEMİN TANIMI VE ÇÖZÜMÜ İÇİN UYGULANAN YÖNTEMLER	11
5. ANALİTİK MODEL	13
5.1. Genel Kabuller ve Temel Denklemler	13
5.2. Elastik Bölge	13
5.3. Plastik Bölge	15
5.3.1. Plastik Bölge 1	15
5.3.2. Plastik Bölge 2	17
5.4. İçi Dolu Mil-Göbek için Analitik Çözüm	18
5.4.1. Tamamiyla Elastik Durum	18
5.4.2. Elastik-Plastik Durum I	20
5.5. İçi Boş Mil-Göbek için Analitik Çözüm	21
5.5.1. Tamamiyla Elastik Durum	21
5.5.2. Elastik-Plastik Durum I	22
5.5.3. Elastik-Plastik Durum II	23
6. SONLU ELEMENLAR MODELİ	26
7. SAYISAL SONUÇLAR VE BULGULAR	29
7.1. İçi Dolu Mil-Göbek için Sayısal Sonuçlar	30

7.2.	İçi Boş Mil-Göbek için Sayısal Sonuçlar.....	53
8.	SONUÇ	72
9.	KAYNAKLAR	75
	ÖZGEÇMİŞ.....	79



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Uygulamada kullanılan bazı mil çeşitleri	5
Şekil 2.2	Bazı sıkı geçme uygulamaları	6
Şekil 4.1	Çalışmada kullanılan mil-göbek sıkı geçmenin geometrisi	11
Şekil 4.2	Mil-Göbek sıkı geçme montaj görüntüsü (1.Mil, 2. Göbek)	11
Şekil 5.1	Tamamıyla elastik içi dolu mil-göbek sıkı geçme için elastik bölgelerin kesit gösterimi	19
Şekil 5.2	İçi dolu mil-göbek sıkı geçme için elastik ve plastik bölgelerin kesitte gösterimi.....	20
Şekil 5.3	Tamamıyla elastik içi boş mil-göbek sıkı geçme için elastik bölgelerin kesitte gösterimi	21
Şekil 5.4	İçi boş mil-göbek sıkı geçme Elastik-Plastik Durum I için elastik ve plastik bölgelerin kesitte gösterimi	23
Şekil 5.5	İçi boş mil-göbek sıkı geçme Elastik-Plastik Durum II için elastik ve plastik bölgelerin kesitte gösterimi.....	24
Şekil 6.1	Çalışmada kullanılan a) İçi dolu mil-göbek ve b) içi boş mil-göbek kesitlerinin çeyrek daire görüntüsü	26
Şekil 6.2	Abaqus'te sınır koşullarının belirlenmesi a) x eksenine göre simetri (XSYMM) ve b) y eksenine göre simetri (YSMM) durumları.....	27
Şekil 6.3.	Abaqus'te a) İçi dolu mil ve b) İçi boş mil için sıkı geçmenin montaj hali ve ağ yapısı	28
Şekil 7.1	İçi dolu mil-göbek bağlantısında Sonlu Elemanlar Modeli ile elde edilen elastik gerilme dağılımı ($\bar{d}=0.1$)	30
Şekil 7.2	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede Sonlu Elemanlar modeli ile elde edilen elastik limit değerindeki ($\bar{d}=1.1498$) gerilme dağılımı.....	31
Şekil 7.3	İçi dolu mil-göbek bağlantısında elastik-plastik gerilme dağılımı ($\bar{d}=2.2$)	32
Şekil 7.4	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.2$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	33
Şekil 7.5	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.4$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	34
Şekil 7.6	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.6$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	35
Şekil 7.7	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.8$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	36
Şekil 7.8	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	37
Şekil 7.9	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede akma anında $\bar{d}=1.1498$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	38
Şekil 7.10	İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik bölgede göbekteki ara yüzey basıncı, Tresca ve von Mises gerilmeleri	39

Şekil 7.11	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.3$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	41
Şekil 7.12	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.4$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	42
Şekil 7.13	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.6$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	43
Şekil 7.14	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.8$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	44
Şekil 7.15	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.9$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	45
Şekil 7.16	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 2.1$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	46
Şekil 7.17	İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 2.2$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	47
Şekil 7.18	İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik bölgelerde göbekteki ara yüzey basıncı, Tresca ve von Mises gerilmeleri.....	48
Şekil 7.19	İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantılarında plastikleşme noktalarının yarıçapsal farka göre değişimi	49
Şekil 7.20	İçi boş mil-göbek bağlantısında sonlu elemanlar modeli ile elde edilen elastik gerilme dağılımı ($\bar{d} = 0.1$)	53
Şekil 7.21	İçi boş mil-göbek bağlantısında sonlu elemanlar modeli ile elde edilen akma anındaki gerilme dağılımı ($\bar{d} = 1.143$)	54
Şekil 7.22	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede milin tamamı plastikleştiği andaki gerilme dağılımı ($\bar{d} = 2.1$)	55
Şekil 7.23	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 0.2$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları.....	56

Şekil 7.24	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.4$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları.....	57
Şekil 7.25	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.6$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları.....	58
Şekil 7.26	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.8$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları.....	59
Şekil 7.27	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları.....	60
Şekil 7.28	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1.1429$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı.....	61
Şekil 7.29	İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik bölgede göbekteki iç basınç ve mildeki Tresca-von Mises gerilmelerinin yarıçapsal fark ile değişimi	62
Şekil 7.30	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1.1429$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı,	63
Şekil 7.31	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1.23$ için (a) Analitik model ve (b)SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	64
Şekil 7.32	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1.2860$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	65
Şekil 7.33	İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1.4$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.....	66
Şekil 7.34	İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik bölgelerde göbekteki iç basınç ve mildeki Tresca-von Mises gerilmeleri	67
Şekil 7.35	İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik arayüzey koordinatlarının yarıçapsal farka göre değişimi	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 6.1	Sıkı geçme işleminde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerle.....	29
Çizelge 7.1	Malzeme çiftleri farklı olan içi dolu mil-göbek sıkı geçme işleminin analitik modeli sonuçları	52
Çizelge 7.2	Malzeme çiftleri farklı olan içi dolu mil-göbek sıkı geçme işleminin sonlu elemanlar modeli sonuçları	53
Çizelge 7.3	İçi boş mil-göbek için malzeme çiftleri farklı olan sıkı geçme işleminin analitik model sonuçları.....	70
Çizelge 7.4	İçi boş mil-göbek için malzeme çiftleri farklı olan sıkı geçme işleminin sonlu elemanlar modeli sonuçları	72



SİMGELER VE KISALTMALAR

a	Göbeğin iç yarıçapı
b	Göbeğin dış yarıçapı
c	Milin iç yarıçapı
C_i	Keyfi integrasyon sabiti
d	Yarıçapsal fark
e	Elastik üst indeksi
E	Elastisite modülü
g	Göbek alt indeksi
m	Mil alt indeksi
p	Plastik üst indeksi
r	Radyal koordinat
u	Radyal doğrultudaki yer değiştirme
z	Eksenel koordinat
σ_i	Gerilme bileşeni
σ_y	Akma gerilmesi
ε_r	Radyal şekil değiştirme bileşeni
ε_θ	Teğetsel şekil değiştirme bileşeni
ε_i	Şekil değiştirme bileşeni
ε_i^e	Elastik şekil değiştirme bileşeni
ε_i^p	Plastik şekil değiştirme bileşeni
r_p	Plastik arayüz koordinatı
θ	Açısal koordinat
ν	Poisson oranı

1.GİRİŞ

Mühendislikte çok fazla kullanım alanı bulunan sıkı geçme bağlantıları, kuvvet odaklı bağlantı yöntemidir. Mil ve göbek arasındaki yarıçapsal fark yardımıyla oluşan, torku yüksek verim ve düşük kayıp ile aktarmak için kullanılan bir bağlantı çeşididir [1]. Bağlantının yapılma prensibine göre şekil bağlı, kuvvet bağlı ve malzeme bağlı bağlantılar olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Şekil Bağlı Bağlantılar: Kuvvet ve hareket iletimi bağlantı elemanının şekli ile sağlanır. Örneğin bir pim bağlantısında pimin şekli bozulmadıkça bağlantı devam eder. Pim ve pernolar, paralel yüzlü kamalar şekil bağlantı elemanlarıdır. *Kuvvet Bağlı Bağlantılar:* Parçalar uygun şekilde sıkılarak temas yüzeylerinde normal kuvvetler (ön gerilme) oluşturulur. Hareket ve kuvvet iletimi halinde, harekete zıt yönde etkiyen sürtünme kuvvetleri bağlantının devamını sağlar. Sıkı geçmeler, konik geçmeler, pres geçmeler tipik örnekleridir. *Malzeme Bağlı Bağlantılar:* Parçalar bağlantı yerinde malzemenin birleşmesi ile çözülemeyecek bir şekilde bağlanır. Bağlantıda ilave malzeme de (elektrot, lehim malzemesi, yapıştırıcı vb.) kullanılabilir [2].

Bağlantılar çözülebilen ve çözülemeyen bağlantılar olarak da sınıflandırılabilir: *Çözülebilen Bağlantılar:* Gerek bağlanan parçada ve gerekse bağlantı elemanında bir hasar, bozulma olmadan istenildiği kadar sökülüp takılabilir. Cıvatalar, kamalar, konik geçmeler vb. bu gruba girerler. *Çözülemeyen Bağlantılar:* Parça veya bağlantı bölgesi bozularak bağlantı çözülür ve bağlantının tekrar yapılması mümkün olmaz. Perçin, kaynak, lehim bu bağlantılar için iyi birer örnektir [2].

Mil ve göbek elemanlarından oluşan sıkı geçmeler kuvvet bağlı çözülebilen bağlantılardandır. Mil-göbek bağlantılarında montaj yapılacak milin çapının göbeğin çapından büyük olması gerekir. Bu yarıçapsal fark yardımıyla mil ve göbek yüzeyi arasında bir arayüzey basıncı meydana gelir. Oluşan bu basınç sayesinde momentin iletilmesi sağlanabilmektedir. Burada mil ile göbek arasındaki basıncın ve iletilen torkun büyüklüğü yarıçapsal fark'a (interference) bağlıdır [1].

Sıkı geçme bağlantıları yüksek basınçlarda diğer bağlantı yöntemlerine nazaran daha verimlidir. İmalatı kolay ve maliyeti diğer bağlantı yöntemlerine

nazaran makul olduğu için mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Sıkı geçme bağlantıları, dişli çark, kayış kasnağı, şaft dişlisi, bilyalı rulman, makaralı rulman elektrik motorları, trbn diskleri, şaft direksiyon mafsalı, tekerlekler ve demiryolu araçları vb. gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Mühendislikte sıklıkla kullanılan bu bağlantı elemanlarının mekanik davranışlarının analizi araştırmacıların her zaman dikkatini çekmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, içi boş ve içi dolu millerden oluşan, montaj aşamasında milin tamamıyla elastik davrandığı ancak göbeğin radyal doğrultuda en fazla % 30'unun plastikleştiği sıkı geçme modelinin mekanik davranışı için analitik ve sayısal zmler elde edilmiştir. Ardından, bu modeller ile elde edilen sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modeller farklı malzemelerden oluşan mil ve göbek elemanlarına uygulanabilecek şekilde tanımlanmıştır.

Çalışmada, iki farklı yöntem takip edilmiştir. İlk olarak, elastik mil ve elastik-plastik göbek elemanlarının deformasyon davranışlarını tarif eden analitik modeller geliştirilmiştir. Problemin bir düzlem gerilme durumunda olduğu ve küçük deformasyonların oluştuğu varsayılmıştır. Elastisite teorisi temel alınarak geliştirilen diferansiyel denklemler, milin içi boş ve içi dolu olması durumları için çözülmüş ve her iki elemanın elastik gerilme ve deformasyonları belirlenmiştir. Plastik deformasyon için Tresca akma kriteri ve ilgili akma kuralı kullanılarak plastik gerilme ve deformasyon denklemleri türetilmiştir. Farklı yarıçap farkları için (içi dolu ya da içi boş) mil ve göbek elemanlarını tamamıyla elastik ve elastik-plastik davranışları incelenmiştir. Farklı boyuttaki mil ve göbek elemanları için, göbeğin üçte birinin plastikleşmesini sağlayacak yarıçap farkları tespit edilmiştir. Yarıçap farklarının değişiminin ara yüzeyde oluşacak basına ve malzemelerde gelişecek elastik ve plastik gerilmelere etkileri incelenmiştir. Ayrıca, mil ve göbek elemanları için kullanılacak farklı malzeme kompozisyonlarının sonuçlara nasıl bir etkisinin olduğu araştırılmıştır.

İkinci aşamada, problemin çözümü için Sonlu Elemanlar (SE) yöntemi kullanılarak, ABAQUS programı yardımıyla, mil ve göbeğe ait elastik ve elastik-plastik davranışlar incelenmiştir. Plastik davranışında, analitik modelin aksine von Mises akma kriteri göz onunda bulundurulmuştur. Ayrıca modelde iki eksene göre

simetrisinin olduğu kabul edilmiş ve elastik ve plastik gerilmeler elde edilmiştir. Sonuç olarak, analitik ve sayısal modeller ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın içeriği genel olarak řu şekilde oluşturulmuştur: Bölüm 2’de sıkı geçme bağlantıları, çalışma prensipleri ve uygulama alanları tanıtılmıştır. Bölüm 3’de sıkı geçme bağlantıları ve problemleri ile ilgili literatürde bulunan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 4’de problemin tanımı ve çözümü ile ilgili uygulanan yöntemler tanıtılmıştır. Bölüm 5’de problemin analitik modeli oluşturularak çözümü için uygulanacak temel denklemler belirlenmiştir. Bölüm 6’da problemin sonlu elemanlar yöntemi ile modellemesinden detaylıca bahsedilmiştir. Bölüm 7’de analitik model ile sonlu elemanlar yöntemi ile modelinden elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar yardımıyla sunulmuştur. Bölüm 8’de sonuç ve öneriler ve Bölüm 9’da ise kaynaklar gösterilmiştir.

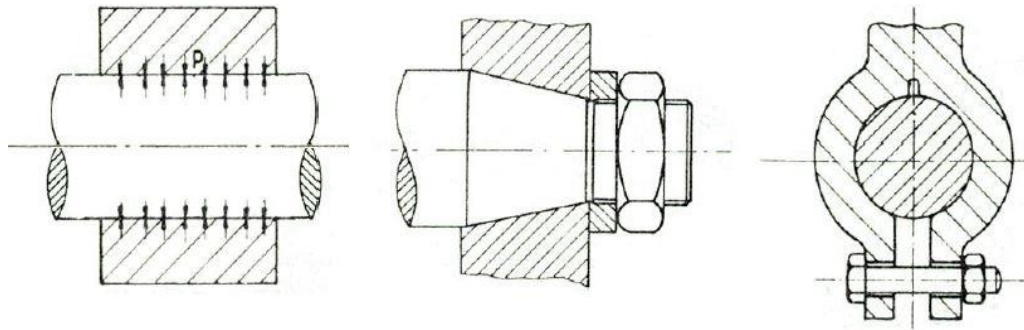
2. SIKI GEÇME BAĞLANTILARI

Sıkı geçmelerde mil ve göbek arasında moment ve hareket iletimi kesişme yüzeyleri arasında oluşan sürtünme etkisiyle sağlanmaktadır. Parçaların birbiri üzerinde kayma yapmamaları için ayrıca kama kullanılmaz. Kullanılırsa da ek bir emniyet olarak düşünülmelidir. Hesaplamalar kama yok kabul edilerek yapılır [1].

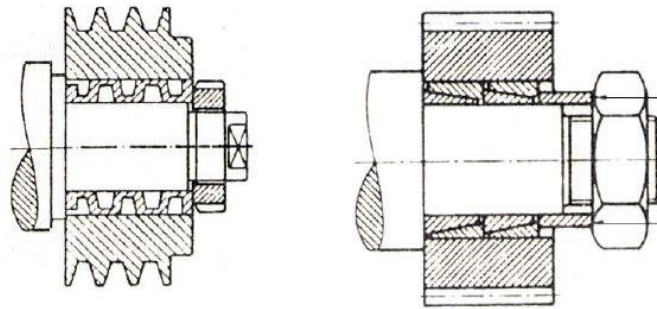
Sıkı geçmeler, mil ve göbek toleransına bağlı olarak ya oda sıcaklığında mil ve göbeğe kuvvet uygulanarak ya da mil soğutulurken veya göbek ısıtılarak veya mil soğutulup göbek ısıtılarak gerçekleştirilir.

Montaj sonrası sıkı geçmede, göbek elemanının delik çapı bir miktar büyür, milin çapı ise bir miktar küçülür. Bu şekil değişimi elastik sınırlar içinde kaldığı sürece temas yüzeyleri arasında bir basınç ve dolayısıyla sürtünmeye bağlı olarak hareket iletimi olacaktır. Bağlantı aksel yönde zorlanırsa sürtünme kuvveti, radyal yönde zorlanırsa moment iletecektir [1].

Uygulamada birçok sıkı geçme bağlantı çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 1.2’de görülmektedir.



(a) Düz pres geçme bağlantısı (b) Konik pres geçme bağlantısı (c) Sıkma pres geçme



(d) Germe Halkaları

(e) Germe Bilezikleri

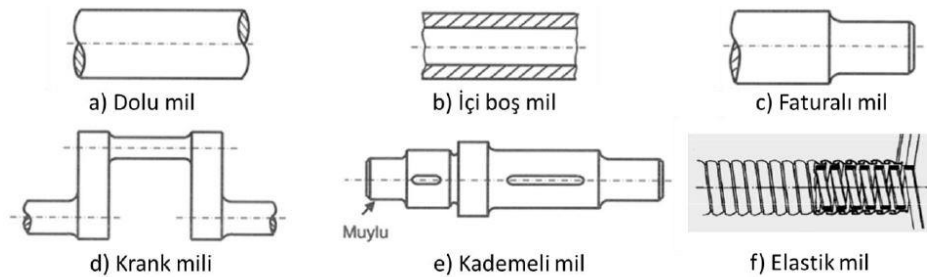
Şekil 2.1. Uygulamalarda kullanılan bazı sıkı geçme bağlantı çeşitleri [3].

Makinalarda, dönme hareketi yapan makine elemanlarının kullanılması konstrüksiyon açısından birçok avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle gerek motor elemanında, gerek güç iletim hatlarında ve gerekse makinanın asıl işlevini yerine getirildiği bölümlerde mümkün olduğu kadar dönme hareketi yapan parça ve makine elemanları kullanılmaya çalışılır. Bu makine elemanlarının dönmelerine izin verecek şekilde desteklenmeleri (yataklanmaları) gerekmektedir.

Bunlara ilaveten, dönen bir makine elemanından bir diğerine güç iletimi söz konusu olacaktır. Bu durumda en çok kullanılan çözüm ise dönen parça ve elemanları üzerinde taşıyan ve taşıdığı bu parçalar arasında enerji akışına da imkân veren ayrı bir elemanın kullanılmasıdır. Bu elemana mil adı verilir [2]. Bir başka deyişle mil, dişli çark, kayış-kasnak, zincir dişlisi, kavrama, volan, rotor gibi birçok makine elemanını üzerinde taşıyan ve bunların kendisiyle birlikte dönebilmelerini sağlamak için genellikle en az iki yerinden yataklanmış olan çok önemli bir makine elemanıdır.

Genelde dişli, kasnak, kam ve zincir dişlisi gibi bir ya da birden fazla makine elemanları pim, kama ve emniyet segmanı gibi elemanlar kullanılarak millerin üzerine monte edilir.

Miller genel olarak görünüşlerine ve eksenlerine göre düz, içi boş, içi dolu, faturalı, dirsekli (krank mili), mafsallı ve esnek miller (otomobillerin hız göstergeleri gibi az güç iletimi istenen yerlerde) diye adlandırılırlar. Millerin yatak içinde kalan kısmına muylu adı verilir.



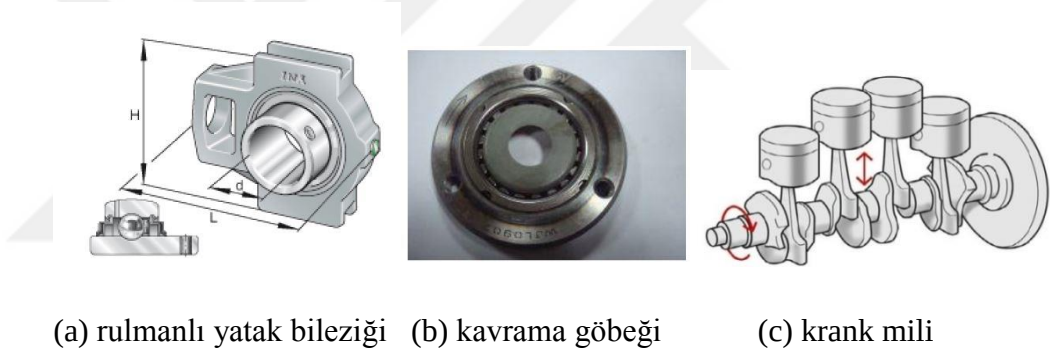
Şekil 2.2. Uygulamada kullanılan bazı mil çeşitleri [1]

Göbek ise ortasında milin yerleştirilmesi için bir delik işlenmiş dişli çark, volan ve kasnak gibi çeşitli makine elemanlarıdır.

Mil ve göbeğin tek parça halinde imal edilmesinin yüksek maliyete yol açacağı durumlarda mil ve göbek ayrı parçalar halinde imal edilebilir. Bu durumda mildeki momenti, göbeğe aktaracak bir bağlantı temin edilmelidir.

Sıkı geçme bağlantıları, uygulamasının kolay olmasından ve konstrüksiyonunda sağladığı avantajlardan dolayı tercih edilmektedir. Göbek üst toleransının milin alt toleransından daha küçük olması sonucu, geçme yapıldıktan sonra, mil ve göbek arasında bir basınç meydana gelmektedir. Bu çalışmada bu tolerans farkı ‘yarıçapsal fark’ olarak adlandırılmıştır. Mil ile göbek arasındaki basınç, sürtünmenin ve buna bağlı olarak tork iletiminin temelini oluşturmaktadır [4].

Uygulama alanları olarak çoğunlukla bir mil ile bir göbeğin dişli çark, kayış kasnağı, zincir çarkı, kavrama göbeği, varyatör çarkı, fan gövdesi, türbin çarkı gibi moment aktaracak şekilde birbirine bağlanmasıdır.



Şekil 2.3. Bazı sıkı geçme uygulamaları [5]

Pratikte birçok makine elemanının farklı sebeplerle sökülmesi gerekebilir. Bakımı yapılan makinede rulman, dişli çark gibi parçaların değiştirilmesi gerekebilir. Aynı zamanda hasara uğrayan makinenin sağlam parçaları sökülüp, tekrar kullanılarak tamir maliyetleri azaltılabilir. Bu sebeple çözülebilen bağlantı şekilleri tercih edilir. Sıkı geçme çözülebilen bir bağlantı şeklidir.

Bu bilgiler doğrultusunda mil-göbek sıkı geçme işleminde mil ile göbek arasındaki yarıçapsal fark, gerilmeler ve yer değiştirmeler verimli tork iletimi için önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin belirlenmesi ve analizi ile sonradan oluşacak planlanmayan plastikleşme, burkulma gibi problemlerin engellenmesi sağlanabilir. Bu amaçla literatürde konuyla ilgili birçok araştırma bulunmaktadır.

3. LİTERATÜR

Sıkı geçme bağlantıları, montajının ve uygulamasının kolay olmasından ve konstrüksiyonunda sağladığı avantajlardan dolayı mühendislik uygulamalarında çok tercih edilmektedir. Dolayısıyla literatürde bu makine elemanlarının elastik ya da elastik-plastik deformasyon davranışları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Literatürdeki bu çalışmaları problemin çözüm yöntemine göre 4 bölümde incelemek mümkündür.

- 1-Elastik sıkı geçme için analitik modeller
- 2-Elastik sıkı geçme için sonlu elemanlar modelleri
- 3-Elastik-plastik sıkı geçme için analitik modeller
- 4-Elastik-plastik sıkı geçme için sonlu elemanlar modelleri

3.1. Elastik Sıkı Geçme için Analitik Modeller

Aleksandrova [6], deformasyona maruz kalan sıkı geçme işlemini analitik bir model kullanarak incelemiş radyal gerilmelerin sistem üzerindeki etkilerini ele almıştır. Elastik sıkı geçmelerin üç boyutlu gerilme analizi Sun ve ekibi tarafından [7] gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sıkı geçme işleminden önce sıcaklığın optimizasyonu, sıkı geçme işlemindeki çapsal farkın temas davranışı, sıkı geçme sonunda oluşan yapısal bozukluklar ve bağlanma kuvveti olmak üzere dört temel nokta baz alınarak sistemin simülasyonu yapılmıştır. Doležell [8] çalışmasında sıkı geçme işleminde ısıya maruz kalan sistemde en uygun çapsal farkın von Mises akma kriterine göre belirleme işlemini gerçekleştirmiştir. Sackfield vd. [9] sıkı geçme işleminde dönmeye maruz kalan sistemin burkulma sonucunda ortaya çıkan artık gerilmeleri sayısal olarak incelemiştir. Lippmann [10], döngüsel ısıl yüklemenin, sıkı geçmede oluşacak elastik gerilmeler üzerindeki etkilerini, geliştirdiği analitik bir modelle incelemiştir.

3.2. Elastik Sıkı Geçme için Sonlu Elemanlar Modelleri

Truman ve Booker [11], elastik mil ve dişliden oluşan sıkı geçmenin analizini ABAQUS programı yardımıyla yapmıştır. Öztürk ve Tse-Chien Woo [12], 3 farklı diskin sıkı geçme işlemini sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiş ve yüzey gerilmelerini elde etmiştir. Bu çalışma sonunda farklı çapsal farklar kullanarak aynı yüzey basıncının elde edilebileceği gösterilmiştir. Sen ve Aksakal [13], sonlu

elemanlar yöntemini kullanarak ısıl yük gerilmeleri altında mil ile göbek arasındaki etkileşimi incelemiştir. Bu çalışma sonunda çift yüklemelere, tolerans değerlerine, dişli çark sisteminin boyutsal analizine yardımcı olacak veriler elde edilmiştir. Wanga ve Hao Leea [14], genellikle mobilyalarda kullanılan ahşap sıkı geçme işleminin sonlu elemanlar modeli analizini yapmıştır. White ve Humpherson [15] ise sonlu elemanlar yöntemini kullanarak mil ve göbekteki gerilme dağılımını incelemiştir.

3.3. Elastik-Plastik Sıkı Geçme için Analitik Modeller

Gamer [16], elastik-plastik davranan sıkı geçme elemanlarının arasındaki çap farkının mekanik davranışlara etkisini incelemiş pekleşen malzeme için gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik gerinim hesaplanmıştır. Doğrusal olarak pekleşen dönen plastik göbek için analitik model yine Gamer tarafından [17, 18] elde edilmiş, doğrusal olmayan pekleşme davranışını tarif eden analitik model Orçan ve Gamer [19] tarafından sunulmuştur. Baykara ve Güven [20] lineer izotropik plastikleşen göbek ile ortotropik içi boş milin Tresca akma kriteri temel alınarak plastik bölgeler ve yüzey basınçları incelenmiştir. Elastik mil ile plastikleşen göbeğin sıkı geçme işlemini Gao ve Atluri [21] ele almıştır. Bu çalışmada ise Hencky deformasyon teorisi ve von Mises akma kriteri temel alınarak çözüm yapılmıştır. Yine Gamer [22] dönen milin Tresca akma kriterleri altında yer değiştirme dağılımlarını incelemiştir. Kollmann [23] araştırmasında, göbek elemanının monteleme aşamasında üçte birinin plastikleşmiş olması, moment aktarma verimini ciddi seviyede arttırırken, malzemenin kalıcı deformasyonunda mukavemet açısından bir sorun oluşturmadığı sonucuna ulaşmıştır. Kovacs [24] Tresca akma kriterini baz alarak sıkı geçme işleminde homojen olmayan ısıl yük etkisini incelemiştir. Güven [25] ise elastik mil ile kısmen plastikleşen göbek için analitik çözüm sunmuştur. Kararlı ve kararsız rejim ısıl yükleme altında çalışan sıkı geçmelerin elastik-plastik davranışlarını tarif eden analitik modeller sırasıyla Mack ve Bengeri [26] ile Mack ve Plöchl [27] tarafından geliştirilmiştir. Arslan ve Mack [28] Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme'den (FGM) imal edilen göbek ile sıkı geçme problemini ele alarak çalışmalara farklı bir boyut kazandırmıştır. Çalışma sonunda hem sistemin toplam ağırlığı azaltılmış hem de yüksek performans eldesi sağlanmıştır. Güven [29] ise çalışmasında, değişken kalınlığa sahip göbeğin bulunduğu sıkı geçmelerin elastik-plastik analitik çözümünü sunmuştur. Ancak, bu çalışmalar göstermiştir ki,

elemanlara uygulanan her iki yük durumunda da (dönme ve/veya ısıtma yük) iki eleman arasındaki (mil ve göbek) radyal gerilme azalır ve bu da moment aktarma verimini ciddi seviyede düşürür.

3.4. Elastik-Plastik Sıkı Geçme için Sonlu Elemanlar Modelleri

Elastik-plastik katı milden oluşan sıkı geçme için sonlu elemanlar modeli Zhang vd. [30] oluşturmuş ve sonuçları Lamé denklemleri ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda geliştirilen iki güvenlik faktörlü model sayesinde sıkı geçme işleminin kalite değerlendirmesi noktasında yeni yöntem geliştirilmiştir. Özel vd. [31], farklı geometrilerin sıkı geçmeye etkilerini sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelemiş ve bu analizde elastik-plastik davranan malzemeyi göz önünde bulundurmışlardır. Bu çalışmada da sonuçlar Lamé denklemleri ile karşılaştırılmıştır. McMillan vd. [32] çapsal fark, iletilen tork gücü ve sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi ele almışlardır. Vasilya ve Anton [33] ise çalışmasında sıkı geçme işleminde meydana gelen gerilme dağılımını Lamé denklemlerini ve Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Golbakhshi vd. [34] sıkı geçme işlemini iki ana başlık altında (birinci olarak ısıtma ve montaj prosesi ikinci olarak da çevre koşullarına uyum prosesi) ele alarak sonlu elemanlar modelleme yöntemi ile en uygun sıkı geçme tasarımını yapmayı amaçlamıştır. Buczkowski ve Kleiber [35] çalışmasında sıkı geçme bağlantılarının tasarım ve verimliliğini artırmak için iki amaca odaklanmıştır. Bunların birincisi sistemin yüzey pürüzlülüğünün önemi diğeri ise açısal olarak mikro yer değiştirmelerin dikkatli bir şekilde incelenmesidir. Wachsmuth ve arkadaşları [36] ise çoklu sıkı geçme için analitik model oluşturup sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırmıştır. Kim vd. [37] çalışmasında otomobil dişlilerinde meydana gelen titreşim ve gürültü gibi sorunların çözümü için dişli çarkları ele almıştır. Bunun için sıkı geçme dişli çarkın termal analizi yapılmış sonuçlar analitik modellerle karşılaştırılmıştır. Öztürk [38] ise çalışmasında elastik-plastik sıkı geçme problemini incelenmiş ve problemle ilgili bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Döngüsel radyal yük altında katı bir tahrik mili vasıtasıyla modifiye edilmiş bir sıkı geçmenin davranışını incelemek için silindirik parçaların sonlu elemanlar yöntemi ile modeli Haykel ve Hassine [39] tarafından yapılmıştır.

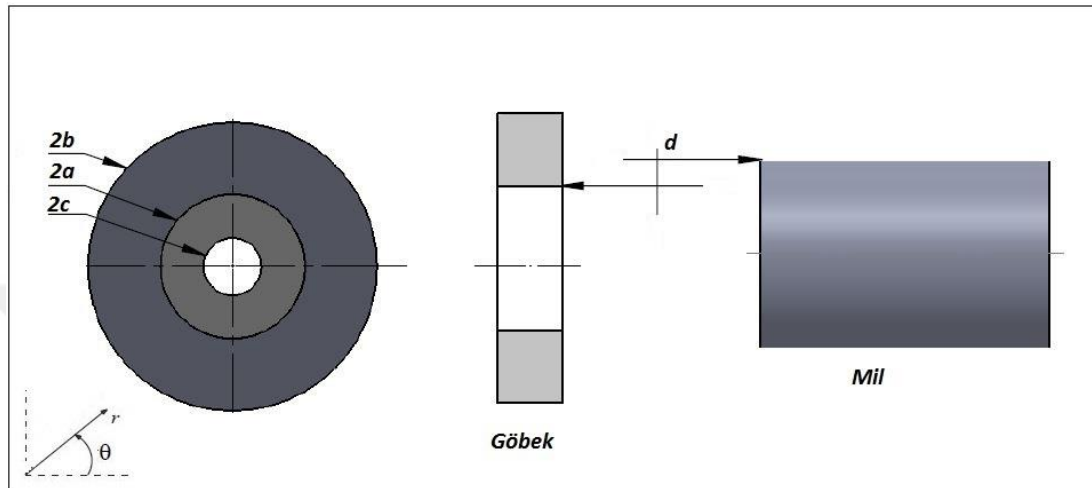
Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında ise; içi boş ve içi dolu millerden oluşan, montaj aşamasında milin tamamıyla elastik davrandığı ancak

göbeğin radyal doğrultuda en fazla % 30'unun plastikleştiği içi dolu ve içi boş millerden oluşan sıkı geçmenin mekanik davranışlarının tarifi için analitik ve sayısal modeller geliştirilmiştir. Çalışmada yapıların plastik bölgelerinin bütün elemanın %30'unu aşmamaya özen gösterilmiştir. Bu durumun, mühendislik uygulamalarına uygunluğu Kollmann tarafından gerçekleştirilen araştırmada detaylı bir şekilde incelenmiştir [40]. Genellikle pratik uygulamalarda malzemelerin tamamıyla elastik davranması tercih edilmesi bilinen bir gerçektir. Ancak Kollmann araştırmasında bu problem için gövde elemanın belli bir oranda (en fazla % 30'u) plastikleşmesiyle arayüzey basıncını artırmayı sağladığı avantaj olarak düşünüldüğünde, malzemenin dayanımında oluşacak dezavantajın kabul edilebilir olduğunu vurgulanmıştır.



4. PROBLEMİN TANIMI VE ÇÖZÜMÜ İÇİN UYGULANAN YÖNTEMLER

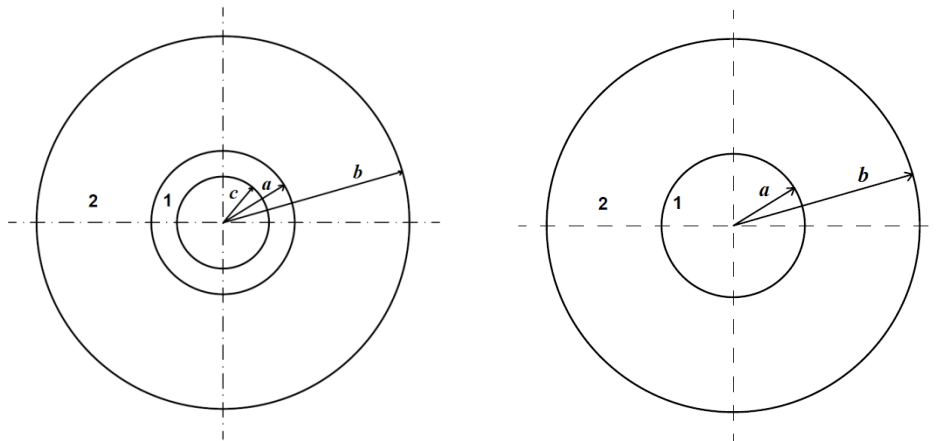
Mil-göbek sıkı geçme işleminin genel görüntüsü ve montaj sonrası görüntüsü sırayla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Göbeğin dış yarıçapı b , içi dolu milin dış yarıçapı a , içi boş milin ise iç yarıçapı c dış yarıçapı a olarak tanımlanmıştır. Mil ile göbek arasındaki yarıçapsal fark ise d olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Mil-göbek sıkı geçmenin geometrisi

(a) İçi boş mil-göbek

(b) İçi dolu mil-göbek



Şekil 4.2. Mil-göbek sıkı geçme montaj görüntüsü (1. Mil, 2. Göbek)

Çalışmada, iki farklı yöntem takip edilmiştir. İlk olarak, elastik mil ve elastik-plastik göbek elemanları için analitik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller geliştirilirken, Elastisite Teorisi temel alınmıştır. Problemin bir düzlem gerilme durumunda olduğu varsayılmıştır yani bu durumda aksenal yöndeki (z) gerilme için

$\sigma_z = 0$ kabulü yapılmıştır. Ayrıca, küçük deformasyonlar durumu göz önünde bulundurulmuştur.

Silindirik simetri durumu kullanılarak geliştirilen diferansiyel denklemler, milin içi boş ve içi dolu olması durumları için çözülmüştür. Plastik davranış için Tresca akma kriteri ve ilgili akma kuralı kullanılmıştır. Bu çözüm aşamasında, farklı boyuttaki mil ve göbek için, göbeğin üçte birinin plastikleşmesini sağlayacak yarıçap farkları (interference) tespit edilmiştir. Bu yarıçap farkları düşünülerek monte edilen elemanlarda oluşacak elastik ve elastik-plastik gerilmeler hesaplanmıştır.

İkinci aşamada, problemin çözümü için sonlu elemanlar (SE) yöntemi kullanılarak, ABAQUS programı yardımıyla, mil ve göbeğe ait elastik ve elastik-plastik davranışlar tespit edilmiştir. Plastikleşme durumları için von Mises akma kriteri kullanılmıştır.

5. ANALİTİK MODEL

5.1. Genel Kabuller ve Temel Denklemler

Düzlem gerilme halinde aksenal yöndeki gerilme bileşeninin oluşmadığı ve bu durumda;

$$\sigma_z = 0 \quad (1)$$

olduğu kabul edilir. Genelleştirilmiş Hooke yasasına göre şekil değiştirme ve gerilme ifadeleri aşağıdaki gibi bir bağlantıya sahiptir:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)], \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)]. \quad (3)$$

Burada ε_i şekil değiştirme bileşenini ($i: r, \theta, z$), σ_i gerilme bileşenini, E Elastisite modülünü ve ν Poisson oranını temsil etmektedir. Herhangi bir gövde kuvvetinin olmadığı durum için radyal doğrultudaki denge denklemi;

$$\frac{d(r\sigma_r)}{dr} - \sigma_\theta = 0 \quad (4)$$

şeklinde tarif edilir. Geometrik ilişki (yer değiştirme ilişkileri ve birim şekil değiştirme) için;

$$u' = \varepsilon_r, \quad (5)$$

$$\frac{u}{r} = \varepsilon_\theta. \quad (6)$$

denklemleri kullanılmaktadır. Burada u radyal doğrultudaki yer değiştirmeyi ve u' radyal yer değiştirmenin radyal koordinata göre türevini temsil etmektedir.

5.2. Elastik Bölge için Formülasyon

Denklemler (2), (3), (5) ve (6) yardımıyla radyal ve açısall gerilmeler, radyal yer değiştirme ve onun radyal koordinata göre türevi cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\sigma_r = \frac{E}{r(1-\nu^2)} (\nu u + r u'), \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{r(1-\nu^2)} (u + r \nu u'). \quad (8)$$

Denklemler (7) ve (8), denge denkleminde (4) yerine yazılırsa;

$$r^2 u'' + r u' - u = 0 \quad (9)$$

alan denklemi elde edilmiş olur. Bu diferansiyel denklemin çözümüyle;

$$u = \frac{C_1}{r} + C_2 r \quad (10)$$

elde edilir. Burada C_1 ve C_2 keyfi integrasyon sabitleridir. Böylece, denklemler (7) ve (8) kullanılarak radyal ve açısıl gerilme ifadeleri elde edilmiş olur:

$$\sigma_r = -\frac{C_1 E}{r^2(1+\nu)} + \frac{C_2 E}{1-\nu}, \quad (11)$$

$$\sigma_\theta = \frac{C_1 E}{r^2(1+\nu)} + \frac{C_2 E}{1-\nu}. \quad (12)$$

Denklemler (10)-(12) kullanılarak mil ve göbek için genel ifadeler elde edilebilir.

Aşağıda verilen ve mil için kullanılacak gerilme ve yer değiştirmeler için, m alt indisi kullanılmıştır. Ayrıca, bu denklemlerdeki e üst indisi elastik bölge denklemleri olduğu anlamına gelmektedir.

$$u_m^e = \frac{C_{1m}}{r} + C_{2m} r, \quad (13)$$

$$\sigma_{rm}^e = -\frac{C_{1m} E_m}{r^2(1+\nu_m)} + \frac{C_{2m} E_m}{1-\nu_m}, \quad (14)$$

$$\sigma_{\theta m}^e = \frac{C_{1m} E_m}{r^2(1+\nu_m)} + \frac{C_{2m} E_m}{1+\nu_m}. \quad (15)$$

Benzer şekilde, göbek için kullanılacak gerilme ve yer değiştirme ifadelerinde, g alt indeksi kullanılmıştır:

$$u_g^e = \frac{C_{1g}}{r} + C_{2g}r, \quad (16)$$

$$\sigma_{rg}^e = -\frac{C_{1g}E_g}{r^2(1+\nu_g)} + \frac{C_{2g}E_g}{(1-\nu_g)}, \quad (17)$$

$$\sigma_{\theta g}^e = \frac{C_{1g}E_g}{r^2(1+\nu_g)} + \frac{C_{2g}E_g}{(1+\nu_g)}. \quad (18)$$

Burada, E_m ve E_g sırasıyla mil ve göbek elemanlarının Elastisite modülünü, ν_m ve ν_g ise mil ve göbek elemanlarının Poisson oranını temsil etmektedir. Burada özellikle belirtilmelidir ki geliştirilen denklemler mil ve göbek elemanlarının farklı malzemeden üretilmiş oluşması durumunda da kullanılabilir.

5.3. Plastik Bölge

Teorik olarak, yüksek moment aktarım verimi elde etmek için yüksek yüzey basıncı oluşturulmalıdır. Bunun için de büyük yarıçapsal fark kullanılabilir. Ancak bu durumda göbek ya da mil üzerinde oluşacak yüksek gerilmeler, malzemelerin akmasına yani plastikleşmesine neden olacaktır. Plastikleşme olduğu takdirde uygulanacak denklem ve formüller elastik denklemlerden farklı olacaktır. Bu denklemlerin analitik olarak türetilmesi ve çözülmesi ancak Tresca akma kriterini ve ilgili akma kuralını kullanarak mümkün olmaktadır. Bu durumda, elemanlarda oluşacak asal gerilmelerin büyüklüğüne bağlı olarak farklı plastik bölge denklemleri türetmek gerekmektedir. Elastik limit davranışlar incelendiğinde (bunula ilgili sonuçlar ilerleyen bölümlerde sunulacaktır) milde ya da göbekte 2 farklı gerilme dağılımına göre plastik bölge oluşabildiği gözlenmiştir. Bu iki plastik bölge (plastik bölge 1 ve plastik bölge 2) için türetilen denklemler aşağıda sunulmuştur.

5.3.1. Plastik Bölge 1

Bu bölgede, akma anındaki gerilme durumu;

$$\sigma_{\theta} > \sigma_z (=0) > \sigma_r \quad (19)$$

şeklinde dir. Tresca akma kriterine göre;

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \sigma_y \quad (20)$$

şartı için, plastik deformasyon formülasyonu yapılmıştır. Burada σ_y akma gerilmesini temsil eder ve ideal plastik davranışı inceleneceği için sabit kabul edilir. Tresca altıgenindeki bu kenar rejimi için ilgili akma kuralı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\varepsilon_{\theta}^p = -\varepsilon_r^p, \quad (21)$$

$$\varepsilon_z^p = 0. \quad (22)$$

Açısal gerilme bileşeni, akma koşulu yardımıyla (20), akma gerilmesi ve radyal gerilme cinsinden tanımlanabilir.

$$\sigma_{\theta} = \sigma_y + \sigma_r \quad (23)$$

Bu plastik bölge için denge denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$r\sigma_r' - \sigma_y = 0 \quad (24)$$

Denge denklemi (24) çözüldüğünde radyal gerilme aşağıdaki şeklini alır

$$\sigma_r = C_3 + \sigma_y \ln r \quad (25)$$

ve denklem (23) açısal gerilme bileşenin bulunması için kullanılır.

$$\sigma_{\theta} = C_3 + \sigma_y(1 + \ln r) \quad (26)$$

Plastik bölge için Hooke yasasına (elastik bölgedekinden farklı olarak) plastik şekil değiştirme ifadeleri ($\varepsilon_r^p, \varepsilon_{\theta}^p$) eklenmelidir.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^p + \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu (\sigma_{\theta})], \quad (27)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta}^p + \frac{1}{E} [\sigma_{\theta} - \nu (\sigma_r)]. \quad (28)$$

Denklemler (27) ve (28) toplandığında aşağıdaki sonucu verir.

$$\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_r = \frac{1}{E} (1 - \nu) (2C_3 + \sigma_y (1 + 2 \ln r)) \quad (29)$$

Burada, geometrik ilişkiyi kullanarak radyal yer değiştirme için aşağıdaki diferansiyel denkleme ulaşılır:

$$u' + \frac{u}{r} = \frac{1}{E} (1 - \nu) (2C_3 + \sigma_y (1 + 2 \ln r)) \quad (30)$$

Bu denklemin çözümüyle;

$$u = \frac{C_4}{r} + \frac{1 - \nu}{E} (C_3 + \sigma_y \ln r) r \quad (31)$$

elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında plastik şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi olur:

$$\varepsilon_r^p = -\frac{C_4}{r^2} + \frac{\sigma_y}{E}, \quad (32)$$

$$\varepsilon_\theta^p = \frac{C_4}{r^2} - \frac{\sigma_y}{E}. \quad (33)$$

5.3.2. Plastik Bölge 2

Plastik Bölge 2 için asal gerilme durumu $\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$ şeklindedir. Bu bölge için aşağıdaki formülasyon takip edilmiştir. İçi boş milin iç yüzeyindeki Tresca akma şartı aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_z - \sigma_\theta = \sigma_y \quad (34)$$

Tresca altıgenindeki bu kenar rejimi için plastik şekil değiştirme ilişkileri aşağıdaki gibi bulunur.

$$\varepsilon_\theta^p = -\varepsilon_z^p, \quad (35)$$

$$\varepsilon_r^p = 0. \quad (36)$$

Düzlem gerilme durumunda

$$\sigma_z = 0 \quad (37)$$

açılal gerilme, akma koşulu yardımıyla aşağıdaki formu alır:

$$\sigma_{\theta} = -\sigma_y \quad (38)$$

Bu plastik bölge için denge denklemi aşağıdaki şekilde oluşur.

$$\sigma_y + \sigma_r + r\sigma_r' = 0 \quad (39)$$

Burada, denklemler (34)-(37) yardımıyla radyal gerilme aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\sigma_r = \frac{C_5}{r} - \sigma_y \quad (40)$$

Geometrik ilişki (birim şekil değiştirme ve yer değiştirme ilişkileri) için yer değiştirmenin türevi radyal şekil değiştirmeye eşittir.

$$u' = \varepsilon_r \quad (41)$$

Buradan (radyal doğrultudaki Hooke yasası yardımıyla (26)) radyal yer değiştirme aşağıdaki gibi bulunur.

$$u = C_6 + \frac{1}{E} (C_5 \ln r - r(1-\nu)\sigma_y) \quad (42)$$

Diğer doğrultudaki Hooke yasası ve geometrik ilişkiler kullanılarak eksenel ve açılal yöndeki plastik şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi elde edilir.

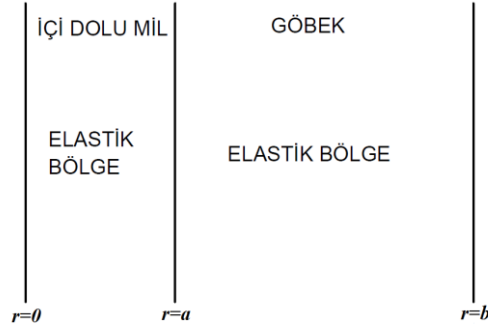
$$\varepsilon_z^p = -\varepsilon_{\theta}^p = -\frac{C_6}{r} - \frac{C_5}{Er} (\nu + \ln r) \quad (43)$$

5.4. İçi Dolu Mil-Göbek için Analitik Çözüm

Bu bölümde, içi dolu mil ve göbekten oluşan sıkı geçme elemanının tamamiyle elastik ve elastik-plastik davranışları tarif edilmiştir. Bunu için yukarıda elde edilen genel gerilme ve yer değiştirme ifadeleri ve gerekli sınır koşulları kullanılır, böylece integrasyon sabitleri hesaplanır.

5.4.1. Tamamiyle Elastik Durum

İlk olarak içi dolu milin ve göbek elemanın tamamının elastik davrandığı durum incelenmiştir. Bu durumda her iki elemanda da tamamen elastik davranacağı bilinmektedir (bkz. Şekil 5.1). Bu nedenle, Bölüm 5.2'de türetilen gerilme ve yer değiştirme ifadeleri kullanılacaktır.



Şekil 5.1. Tamamiyla elastik içi dolu mil-göbek sıkı geçme kesiti

İçi dolu mil ve göbekten oluşan sıkı geçmenin elastik davranışını tarif eden denklemler (13)-(18) kullanılır. Bu denklemlerdeki C_{1m} , C_{2m} , C_{1g} , C_{2g} integrasyon sabitlerini hesaplamak için aşağıda verilen sınır koşulları kullanılır.

$$u_m^e(0) = 0, \quad (44)$$

$$\sigma_{rg}^e(b) = 0, \quad (45)$$

$$\sigma_{rm}^e(a) = \sigma_{rg}^e(a), \quad (46)$$

$$u_g^e(a) - u_m^e(a) = d. \quad (47)$$

Bu sınır koşulları yardımıyla sabitler aşağıdaki gibi analitik olarak hesaplanır.

$$C_{1m} = 0, \quad (48)$$

$$C_{2m} = \frac{(a^2 - b^2)dE_g(1 - \nu_m)}{aS_1}, \quad (49)$$

$$C_{1g} = \frac{ab^2dE_m(1 + \nu_g)}{S_1}, \quad (50)$$

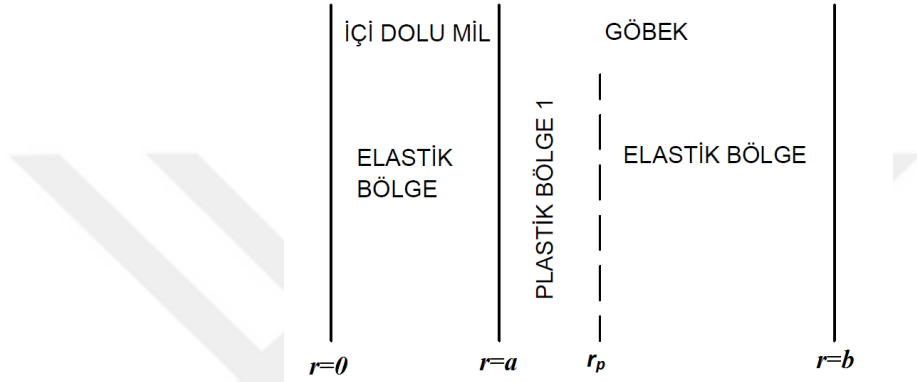
$$C_{2g} = \frac{adE_m(1 - \nu_g)}{S_1}. \quad (51)$$

Burada S_1 aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S_1 = a^2[E_m(1 - \nu_g) - E_g(1 - \nu_m)] + b^2[E_m(1 + \nu_g) + E_g(1 - \nu_m)] \quad (52)$$

5.4.2. Elastik-Plastik Durum I

Sayısal sonuçlar göstermiştir ki (Bölüm 5.3.1 'de detayları sunulmuştur), içi dolu mil-göbek elemanlarında akma her zaman ilk olarak göbeğin iç yüzeyinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, akmanın gerçekleşmesinden sonra mil tamamıyla elastik davranırken, göbeğin iç yüzeyinden başlayan Plastik bölge 1 (bkz. Bölüm 4.5.2) göbeğin dışına doğru ilerlemektedir. Böylece, mil ve göbek kesitindeki elastik ve plastik bölgelerin dağılımı Şekil 5.2.'de gösterildiği gibi oluşmaktadır.



Şekil 5.2. İçi dolu mil-göbek sıkı geçme için elastik ve plastik bölgelerin kesitte gösterimi

İçi dolu mil ve göbekten oluşan sıkı geçmenin elastik bölgeleri için denklemler (13)-(18), plastik bölgeler için ise denklemler (25), (26), (31)-(33) kullanılır. Bu bölgelerdeki gerilme ve yer değiştirme ifadelerini elde etmek için C_{1m} , C_{2m} , C_{1g} , C_{2g} , C_3 ve C_4 integrasyon sabitleri ve r_p (elastik-plastik bölge arayüz koordinatı) hesaplanmalıdır. Denklemlerdeki bu sabitleri hesaplamak için aşağıdaki sınır koşulları kullanılır.

$$u_m^e(0) = 0, \quad (53)$$

$$\sigma_{rg}^e(b) = 0, \quad (54)$$

$$\sigma_{rm}^e(a) = \sigma_{rm}^p(a), \quad (55)$$

$$u_g^p(a) - u_m^e(a) = d, \quad (56)$$

$$\sigma_{rg}^p(r_p) = \sigma_{rg}^e(r_p), \quad (57)$$

$$u_g^p(r_p) = u_g^e(r_p), \quad (58)$$

$$\sigma_{\theta g}^e(r_p) - \sigma_{rg}^e(r_p) = \sigma_{yg}. \quad (59)$$

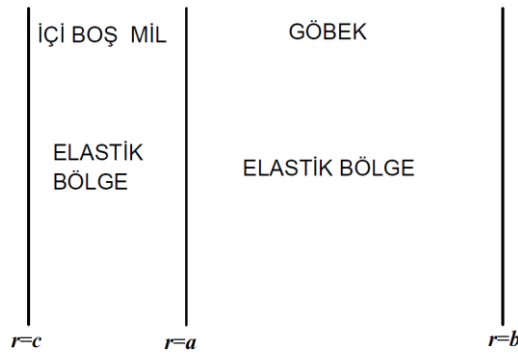
Denklemlerdeki arayüzey koordinatı r_p doğrusal olmayan bir ifade olduğu için denklem takımı analitik olarak çözülemez. O nedenle denklem takımı, sayısal bir yöntem kullanılarak çözülmüştür.

5.5. İçi Boş Mil-Göbek için Analitik Çözüm

Bu bölümde, içi boş mil ve göbekten oluşan sıkı geçme elemanının sırasıyla tamamıyla elastik ve elastik-plastik davranışlarının tarif eden çözümler sunulmuştur. Burada özellikle belirtilmelidir ki, içi boş milden oluşan sıkı geçmede, yarıçap farkının büyüklüğüne bağlı olarak iki farklı plastik bölge oluşabilmektedir. Bu plastik bölgelerin oluşma durumları Elastik-Plastik Durum I ve Elastik-Plastik Durum II başlığı altında ayrı ayrı incelenmiştir.

5.5.1. Tamamiyla Elastik Durum

Bu bölümde içi boş milin ve göbek elemanın tamamının elastik davrandığı durum incelenmiştir. Bu durumda her iki elemanda da tamamen elastik davranacağı bilinmektedir ve duruma ait kesit Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Tamamiyla elastik içi boş mil-göbek sıkı geçme kesiti

İçi boş mil ve göbekten oluşan sıkı geçmenin elastik davranışını tarif eden çözümde de, denklemler (13)-(18) kullanılır. Bu durum için gerekli sınır koşulları aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_{rm}^e(c) = 0, \quad (60)$$

$$\sigma_{rg}^e(b) = 0, \quad (61)$$

$$\sigma_{rm}^e(a) = \sigma_{rg}^e(a), \quad (62)$$

$$u_g^e(a) - u_m^e(a) = d. \quad (63)$$

Sınır koşulları (60)-(63) yardımıyla içi boş mil ve göbek elemanlarının gerilme ve yer değiştirme ifadelerindeki sabitler aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_{1m} = \frac{a(a^2 - b^2)c^2 d E_g (1 + \nu_m)}{S_2}, \quad (64)$$

$$C_{2m} = \frac{a(a^2 - b^2)d E_g (1 - \nu_m)}{S_2}, \quad (65)$$

$$C_{1g} = \frac{ab^2(a^2 - c^2)d E_m (1 + \nu_g)}{S_2}, \quad (66)$$

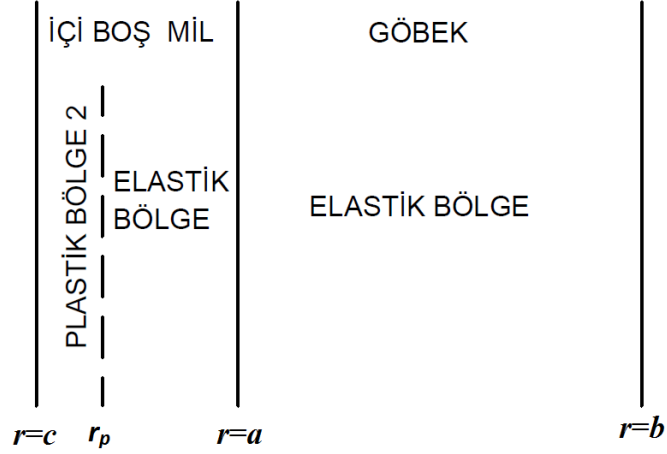
$$C_{2g} = \frac{a(a^2 - c^2)d E_m (1 - \nu_g)}{S_2}. \quad (67)$$

Buradaki S_2 aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$S_2 = a^4 [E_m (1 - \nu_g) - E_g (1 - \nu_m)] - b^2 c^2 [E_m (1 + \nu_g) - E_g (1 + \nu_m)] + a^2 \{ b^2 [E_m (1 + \nu_g) + E_g (1 - \nu_m)] - c^2 [E_m (1 - \nu_g) + E_g (1 + \nu_m)] \} \quad (68)$$

5.5.2. Elastik-Plastik Durum I

Bölüm 5.5.1’de verilen sonuçlara ve elastik akmanın incelenmesine bağlı olarak plastikleşme ilk olarak milin iç yüzeyinde Plastik Bölge 1 formunda gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum Şekil 5.4’deki kesitte gösterildiği şekilde oluşmaktadır.



Şekil 5.4. İçi boş mil-göbek sıkı geçme Elastik-Plastik Durum I için elastik ve plastik bölgelerin kesitte gösterimi

Bu elastik-plastik durumda, içi boş mil ve göbekten oluşan sıkı geçmenin elastik bölgeleri için denklemler (13)-(18), plastik bölgeler için ise denklemler (38), (40), (42), (43) kullanılır. Denklemlerdeki $C_{1m}, C_{2m}, C_{1g}, C_{2g}, C_5, C_6$ ve r_p sabitlerini sınır koşulları yardımıyla bulunur.

$$\sigma_{rm}^p(c) = 0 \quad (69)$$

$$\sigma_{rg}^e(b) = 0 \quad (70)$$

$$\sigma_{rm}^e(a) = \sigma_{rg}^e(a) \quad (71)$$

$$u_g^e(a) - u_m^e(a) = d \quad (72)$$

$$\sigma_{rm}^p(r_p) = \sigma_{rm}^e(r_p) \quad (73)$$

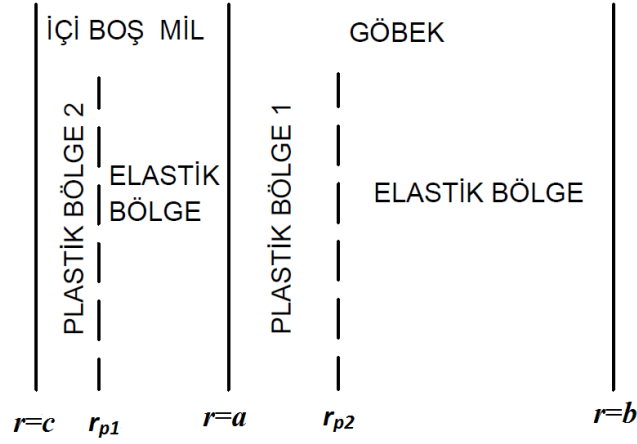
$$u_m^p(r_p) = u_m^e(r_p) \quad (74)$$

$$-\sigma_{\theta m}^e(r_p) = \sigma_{ym} \quad (75)$$

5.5.3. Elastik-Plastik Durum II

Bölüm 5.5.2’de bahsedilen durumda yarıçapsal farkın arttırılmasıyla Elastik-Plastik Durum II gözlemlenir. Bu durumda, milin iç bölgesinde plastik bölge 2, dış

bölgesinde elastik bölge oluşurken, göbeğin iç bölgesinde plastik bölge 1 ve dış bölgesinde elastik bölge oluşmaktadır. (bkz. Şekil 5.5)



Şekil 5.5. İçi boş mil-göbek sıkı geçme Elastik-Plastik Durum II için elastik ve plastik bölgelerin kesitte gösterimi

Bu elastik-plastik durumda, içi boş mil ve göbekten oluşan sıkı geçmenin elastik bölgeleri için denklemler (13)-(18), plastik bölgeler için ise denklemler (25), (26), (31)-(33), (38), (40), (42), (43) kullanılır. Bu denklemlerdeki bilinmeyen sabitleri ($C_{1m}, C_{2m}, C_{1g}, C_{2g}, C_3, C_4, C_5, C_6, r_{p1}$ ve r_{p2}) hesaplamak için aşağıdaki sınır ve ara yüzey koşulları kullanılmıştır.

$$\sigma_{rm}^{p2}(c) = 0, \quad (76)$$

$$\sigma_{rg}^e(b) = 0, \quad (77)$$

$$\sigma_{rm}^e(a) = \sigma_{rg}^{p1}(a), \quad (78)$$

$$u_g^{p1}(a) - u_m^e(a) = d, \quad (79)$$

$$\sigma_{rm}^{p2}(r_{p1}) = \sigma_{rm}^e(r_{p1}), \quad (80)$$

$$u_m^{p2}(r_{p1}) = u_m^e(r_{p1}), \quad (81)$$

$$-\sigma_{\theta m}^e(r_{p1}) = \sigma_{ym}, \quad (82)$$

$$\sigma_{rg}^{p1}(r_{p2}) = \sigma_{rg}^e(r_{p2}), \quad (83)$$

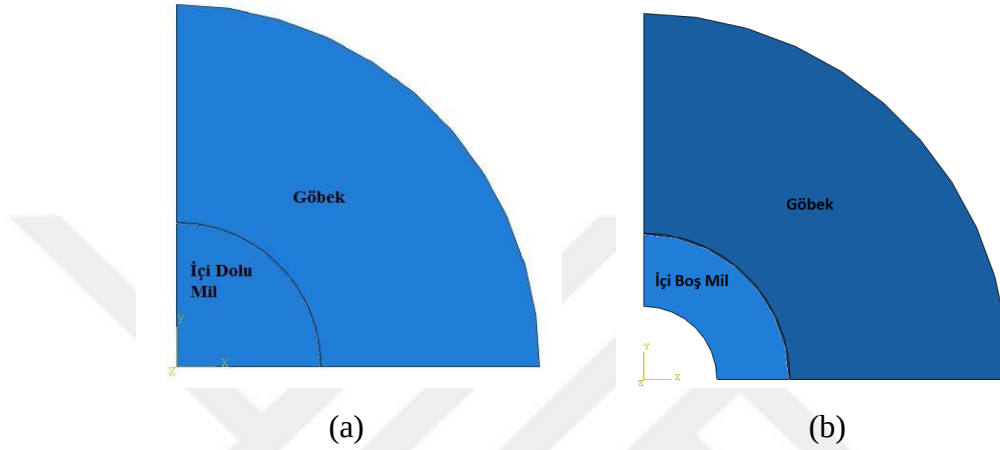
$$u_g^{p1}(r_{p2}) = u_g^e(r_{p2}), \quad (84)$$

$$\sigma_{\theta g}^e(r_{p2}) - \sigma_{rg}^e(r_{p2}) = \sigma_{yg}. \quad (85)$$

Buradaki üst indeksler $p1$ ve $p2$ sırasıyla plastik bölge 1 ve plastik bölge 2' yi temsil ederken r_{p1} mildeki Plastik bölge 2 ile elastik bölge arasındaki arayüz koordinatını; r_{p2} ise göbekteki Plastik bölge 1 ile elastik bölge arasındaki arayüz koordinatını temsil etmektedir (bkz. Şekil 5.5).

6. SONLU ELEMENLAR MODELİ

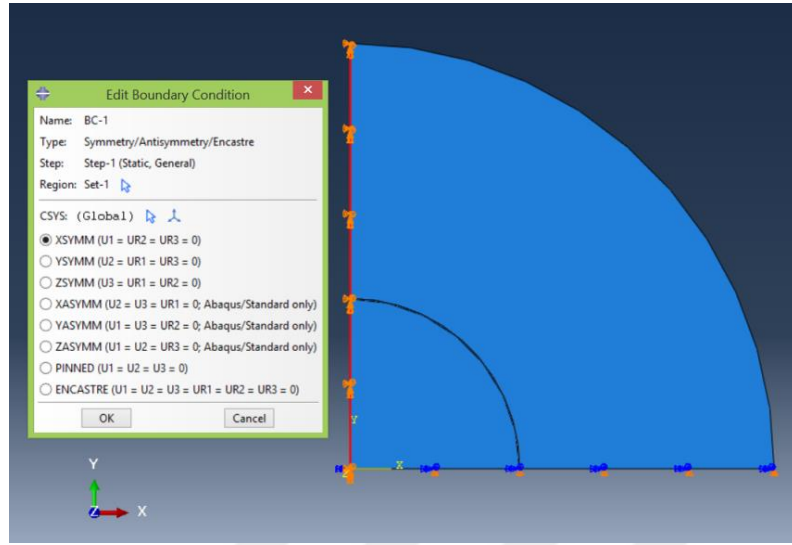
Mil ve göbek elemanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ABAQUS programı yardımıyla yapılmıştır. Elastik ve elastik-plastik sonlu elemanlar modelleri içi dolu mil ve içi boş mil olmak üzere iki farklı milin göbek ile sıkı geçmesi için gerçekleştirilmiştir. Bu modelde de (analitik modelde olduğu gibi) düzlem gerilme durumu kabul edilmiştir.



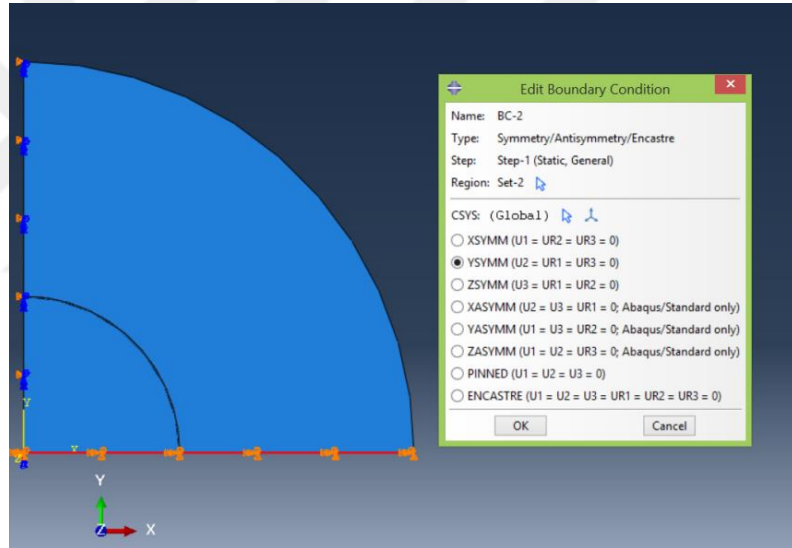
Şekil 6.1. a) İçi dolu mil-göbek ve b) içi boş mil-göbek kesitlerinin çeyrek daire görüntüsü

Simetri sınır şartlarından dolayı her bir mil için dörtte bir montaj hali modellenmiştir (bkz. Şekil 6.1). Bu durumu temsilen, *XSMM* ve *YSMM* sınır koşulları uygulanmıştır (Bkz. Şekil.6.2). Modelde milin dış çapı göbeğin iç çapından çok az büyüktür. Bu durumda problem kontak problemine dönüşür [39]. Burada mil ile göbek arasındaki yarıçapsal fark yüzey basıncını doğrudan etkilemektedir.

(a)

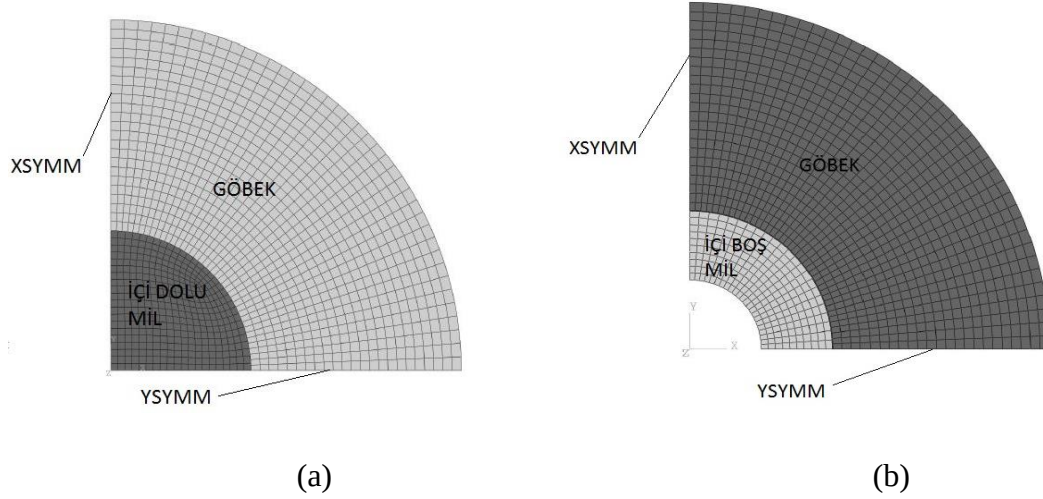


(b)



Şekil 6.2. ABAQUS'te simetrik sınır koşullarının belirlenmesi a) x eksenine göre simetri (XSYMM) ve b) y eksenin göre simetri (YSMMM) durumları

Mil ve göbek parçasına uygun boyutta ağ yapısı elde edilmiştir ve bu ağ yapısı montajlı eleman için Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Analiz işlemi sırasında görülmüştür ki mesh işleminde bir noktaya kadar iki düğüm arasındaki mesafe ne kadar küçük ise elde edilecek sonuçlar o kadar hassas olmaktadır. Bu çalışmada mesh eleman şekli olarak Quad-Free-Medial Axis seçilmiştir. Mesh işleminin ikinci kısmı ise eleman tipidir. Bu çalışmada plane stress-quad-CPS4R seçilmiştir.



Şekil 6.3. Abaqus'te a) İçi dolu mil ve b) İçi boş mil için sıkı geçmenin montaj hali ve ağ yapısı

Yapılan çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 6.1.'de gösterilmektedir [40].

Çizelge 6.1. Sıkı geçme işleminde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri [40]

Malzeme	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Akma gerilmesi (MPa)
AISI 1045 Çelik	200000	0.29	200
Alüminyum 7075 -T6	72000	0.33	503
Bakır,UNSC62300 (Alüminyum Bronz 9%)	115000	0.33	305

Her bir yüzey arasında 'surface to surface' kontak problemi tanımlanır. Yüzeylerden biri master surface buna karşılık gelen yüzey ise slave surface seçilir. Kontak etkileşim özelliği olarak sürtünmesiz (frictionless) kabul edilir. İlk adımda yarıçap farkı (interference) 'otomatik olarak kademeli kaldır' özelliği uygulanır ve problem analizi tamamlanmış olur. Mil ile göbek arasındaki yüzey basıncı belirlenmiştir. Son olarak da göbek ve mil üzerindeki gerilme dağılımı hesaplanmıştır.

7. SAYISAL SONUÇLAR VE BULGULAR

Bu bölümde, bir sonlu elemanlar modelleme programı olan ABAQUS kullanılarak elde edilen sonuçlar ile analitik model kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla farklı malzeme kompozisyonları ve farklı yarıçapsal farklar değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar içi boş ve içi dolu millerden oluşan elemanlar için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Yarıçapsal farkın değişmesine karşılık yüzey basıncında meydana gelen değişimler hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemleriyle gözlemlenmiştir. Mil ve göbek malzemesi olarak çelik, bakır ve alüminyum seçilmiş ve bu malzemeler farklı kompozisyonlarda incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile analitik model sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Mil ve göbekte meydana gelen gerilmeler grafiklerle gösterilmiştir.

Teorik olarak yüksek yüzey basıncı elde etmek için büyük yarıçapsal farklar girilebilir ama göbek üzerindeki yüksek gerilmeler malzemenin akmasına yani plastikleşmesine neden olabilir. Göbek üzerindeki yarıçapsal farktan kaynaklanan gerilmeler hesaplanmalıdır. Bu sebepten ötürü hem içi dolu mil hem de içi boş mil için von Mises ve Tresca gerilmeleri hesaplanmıştır.

Mil-göbek sıkı geçme bağlantılarında yarıçapsal farka (d) karşılık değişen yüzey basıncını bulmak için ilk olarak analitik denklemler ele alınmıştır. Analitik denklemler, sonlu elemanlar çözümünün doğruluğunu tespit etmekte yardımcı olacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme işlemi birçok yarıçapsal fark değerine göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar içi dolu mil-göbek ve içi boş mil-göbek olmak üzere iki ayrı başlık altında ele alınmıştır. Sayısal sonuçları daha düzenli ve anlaşılır bir şekilde göstermek için boyutsuzlaştırma işlemi yapmak gerekir. Bunun için aşağıdaki yöntem takip edilmiştir.

$$\bar{r} = r / a, \quad q = b/a \quad (86)$$

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_i / \sigma_{y,m} \quad (87)$$

$$\bar{u} = uE_m / (a\sigma_{y,m}) \quad (88)$$

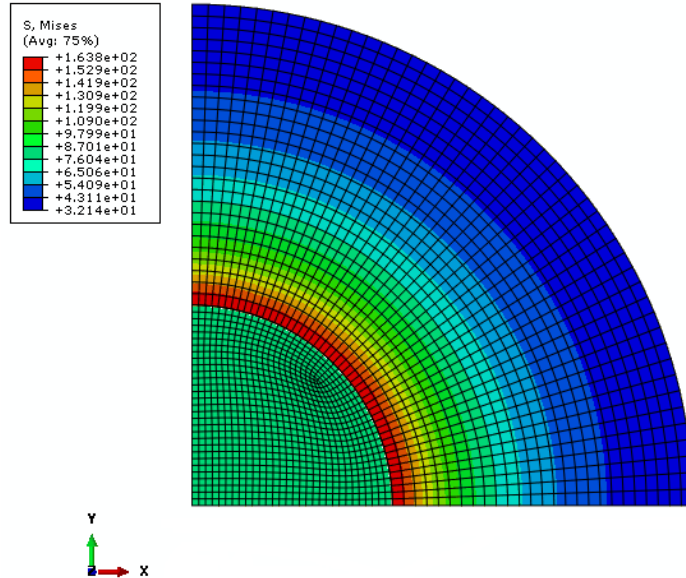
$$\bar{E} = E/E_m \quad (89)$$

Burada $\bar{r}$ boyutsuz radyal koordinatı, $\bar{\sigma}_i$ boyutsuz gerilmeleri ($i:r,\theta,z$), $\bar{u}$ boyutsuz radyal yer değiştirmeyi ve $\bar{E}$ ise boyutsuz Elastisite modülünü göstermektedir. Sayısal sonuçlarda $q = b/a$ oranı 0.25 ve c/a oranı 0.5 alınmıştır.

7.1. İçi Dolu Mil-Göbek için Sayısal Sonuçlar

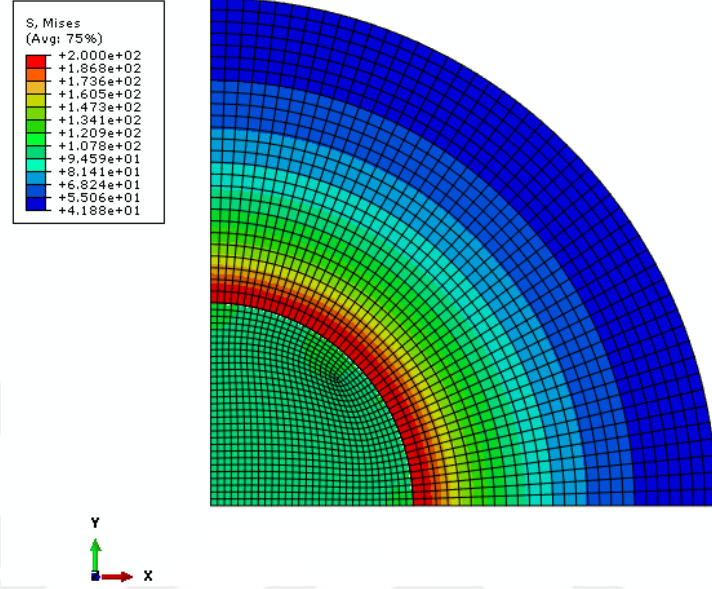
İlk olarak, tamamıyla elastik davranan, akma anında bulunan ve elastik-plastik davranan içi dolu mil-göbek sıkı geçme için sonlu elemanlar modelleme programı olan Abaqus'te analizi yapıp analitik sonuçlarla karşılaştırma işlemi yapılmıştır. Yarıçapsal farkın değişmesine karşılık yüzey basıncında meydana gelen değişimler hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemiyle gözlemlenmiştir. Mil ve göbek malzemesi olarak çelik-çelik malzeme çifti kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar analitik sonuçlara çok yakın çıkmıştır. Mil ve göbekte meydana gelen gerilmeler grafiklerle gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar modelleme programı Abaqus'te farklı yarıçapsal farklar için elde edilen gerilme dağılımı Şekil 7.1-3'de gösterilmektedir. Şekil 7.1'de akmanın henüz gerçekleşmediği, tamamıyla elastik durum (boyutsuz yarıçap farkının $\bar{d} = 0.1$ olduğu durum) için von Mises gerilmelerinin elemanlar üzerindeki dağılımı gösterilmiştir.



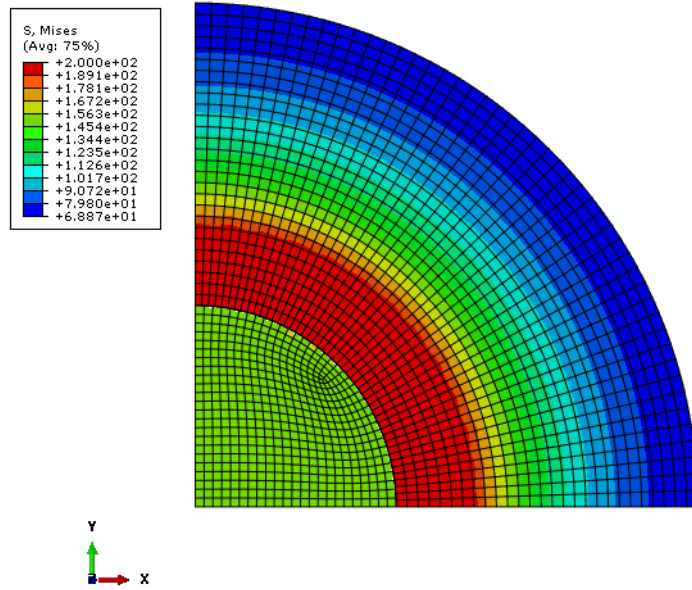
Şekil 7.1. İçi dolu mil-göbek bağlantısında sonlu elemanlar modeli ile elde edilen elastik gerilme dağılımı ($\bar{d} = 0.1$)

Sonlu elemanlar modeline göre $\bar{d}=1.1498$ değerine ulaşıldığında plastik akma von Mises akma kriterine göre göbek elemanın iç yüzeyinde gerçekleşmektedir. Bu durumda oluşan von Mises gerilmelerinin dağılımı Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede sonlu elemanlar modeli ile elde edilen elastik limit değerindeki ($\bar{d}=1.1498$) gerilme dağılımı

Yarıçap farkı $\bar{d}=2.2$ alındığında, artık gövde elemanının yaklaşık % 30’u plastikleşmiştir. Bu durum için ABAQUS’de elde edilen von Mises gerilmelerinin dağılımı Şekil 7.3’de sunulmuştur.

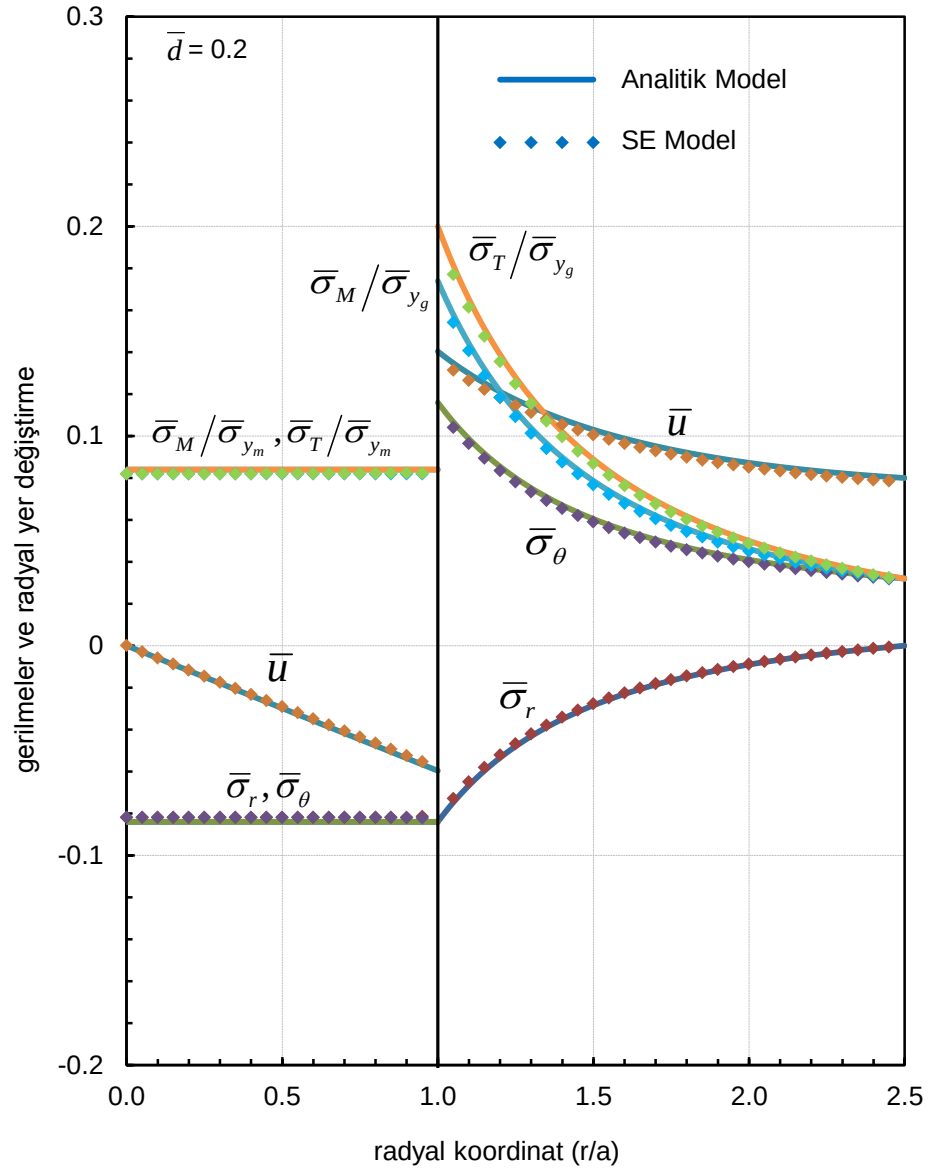


Şekil 7.3. İçi dolu mil-göbek bağlantısında elastik-plastik gerilme dağılımı ($\bar{d}=2.2$)

Yukarıdaki şekillerde içi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısında mil ve göbekte meydana gelen gerilme dağılımları gösterilmektedir. Gerilmeler ve buna bağlı olarak plastikleşme göbeğin iç yüzeyinde meydana gelmektedir. Yarıçapsal fark büyüdükçe yüzey basıncının arttığı gözlemlenmiştir. Sayısal sonuçların analitik modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmaları aşağıdaki grafiklerde gösterilecektir.

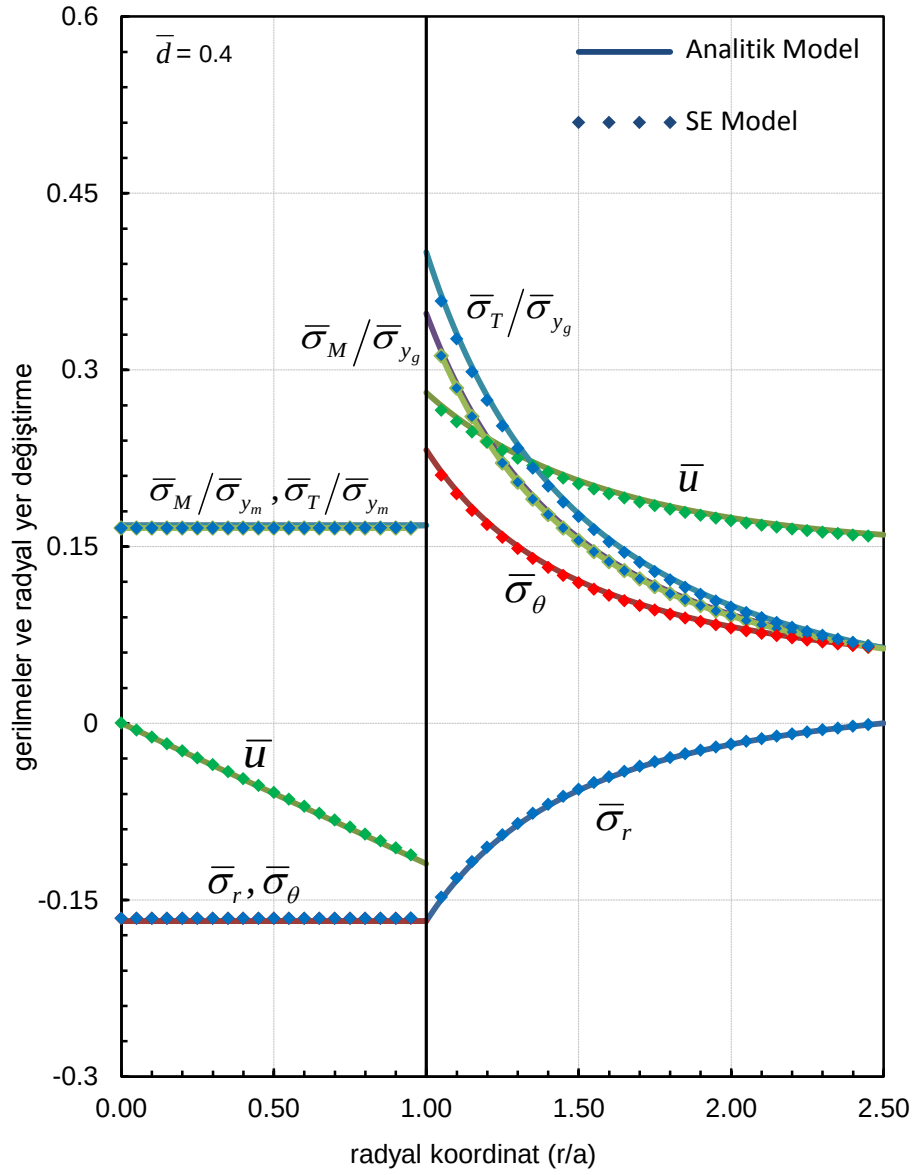
İçi dolu mil-göbek sıkı geçme işleminde $\bar{d}=0.2$ yarıçapsal fark için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı Şekil 7.4’de gösterilmektedir. Şekillerdeki düz çizgiler analitik model sonuçlarını, noktalar ise sonlu eleman modeli sonuçlarını temsil etmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi analitik modelle elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlara çok yakındır. Gerilmenin en yüksek olduğu yer mil ile göbeğin temas ettiği yüzeydir ve daha sonradan göbeğin dış yüzeyine doğru kademeli bir şekilde azalmaktadır. Bu yarıçapsal fark değeri için henüz plastikleşme meydana gelmemektedir ve iki eleman tamamiyle elastik davranmaktadır. Şekilde, plastikleşmenin gerçekleşip gerçekleşmemesi analitik model için σ_T/σ_{yg} , Sonlu elemanlar sonuçları için σ_M/σ_{yg} oranlarının kontrolü ile belirlenmektedir. Burada σ_T Tresca akma gerilmesini, σ_M von Mises akma gerilmesini, σ_{yg} ise gövde malzemesinin akma gerilmesini temsil etmektedir.

σ_T/σ_{yg} yada σ_M/σ_{yg} oranların gövdenin herhangi bir yerinde 1'e eşit olduğu durumda, akmanın gerçekleştiği tespiti yapılmıştır.

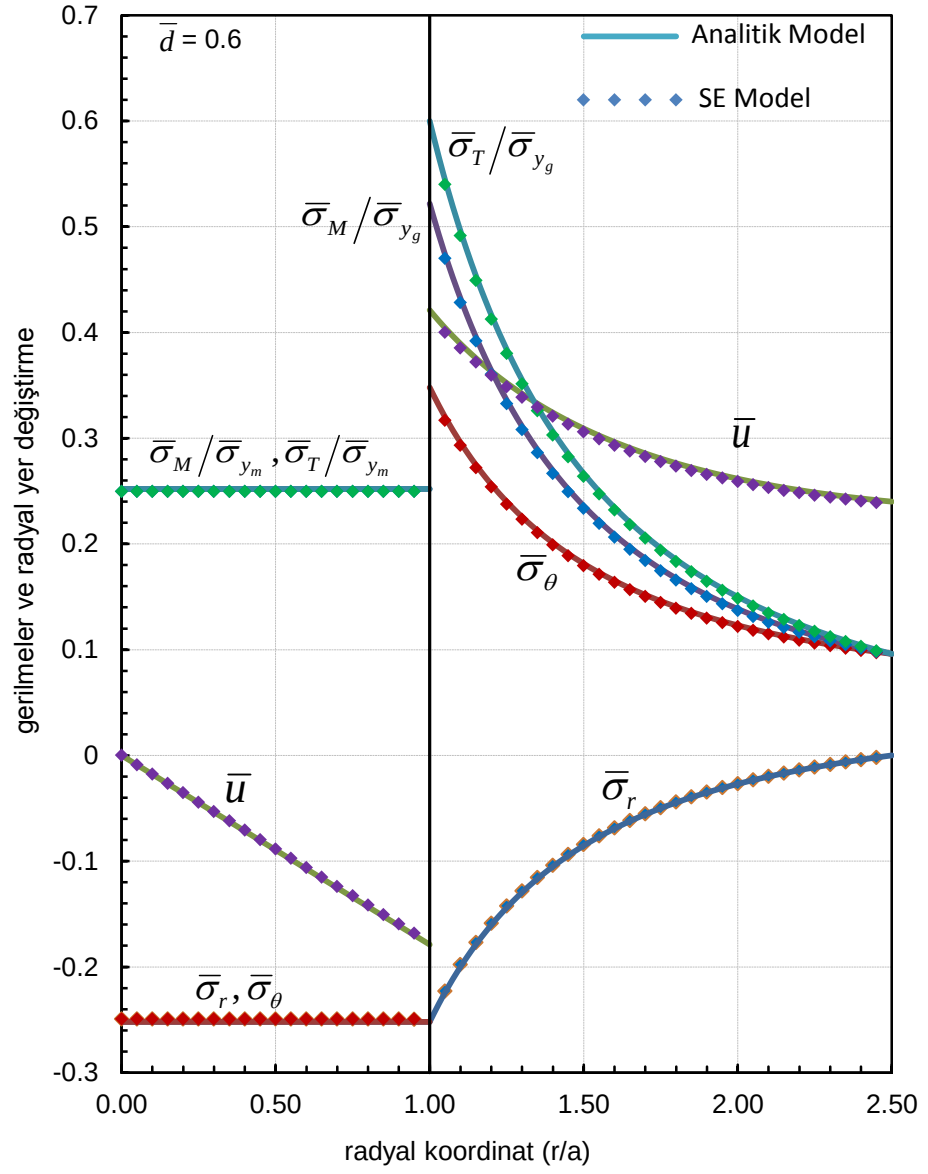


Şekil 7.4. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.2$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı

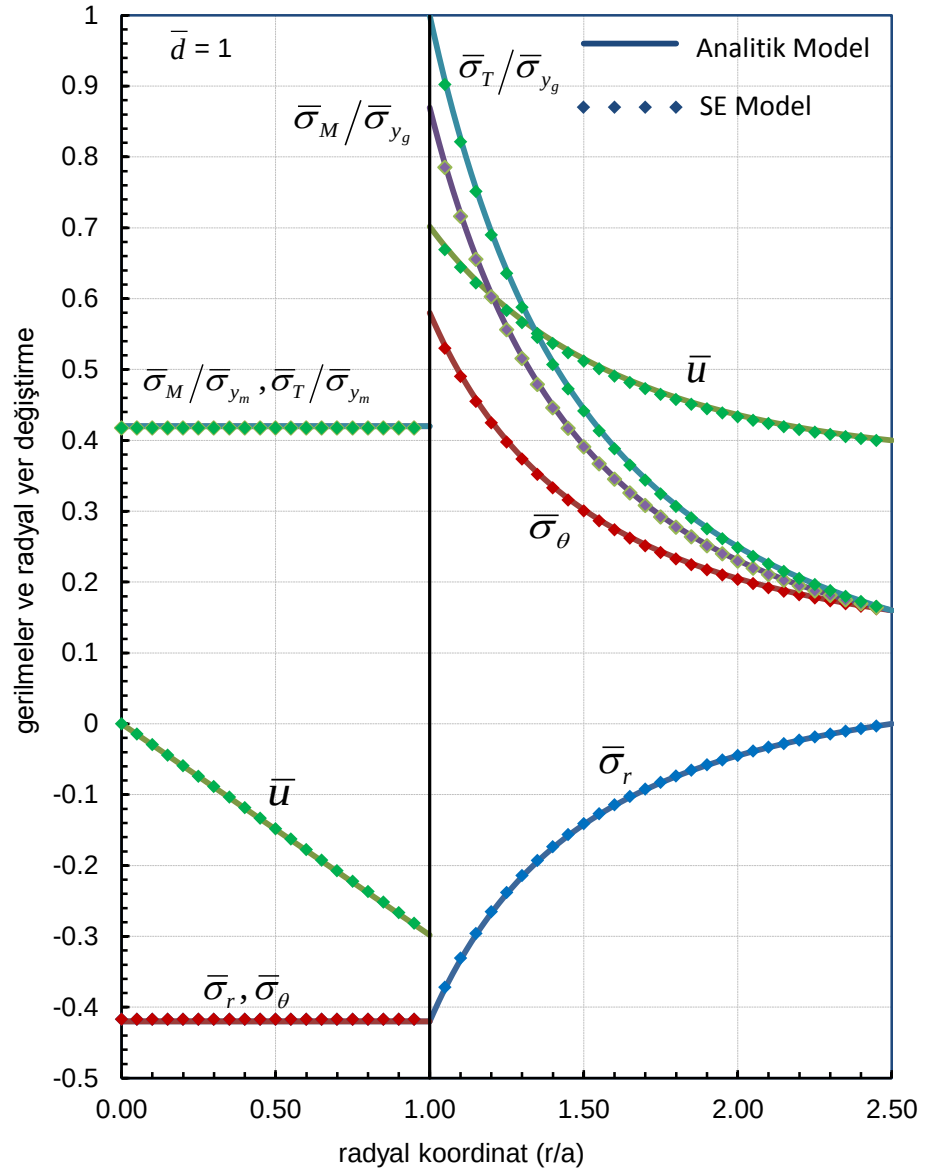
Şekiller 7.5-7.7'de de mil ve göbek elemanlarının yine tamamiyle elastik davrandığı fakat farklı yarıçap farklarının kullanılmasıyla oluşan gerilme ve yer değiştirme dağılımları gösterilmiştir. Şekillerdeki düz çizgiler analitik model sonuçlarını, noktalar ise sonlu eleman modeli sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 7.5. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 0.4$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı

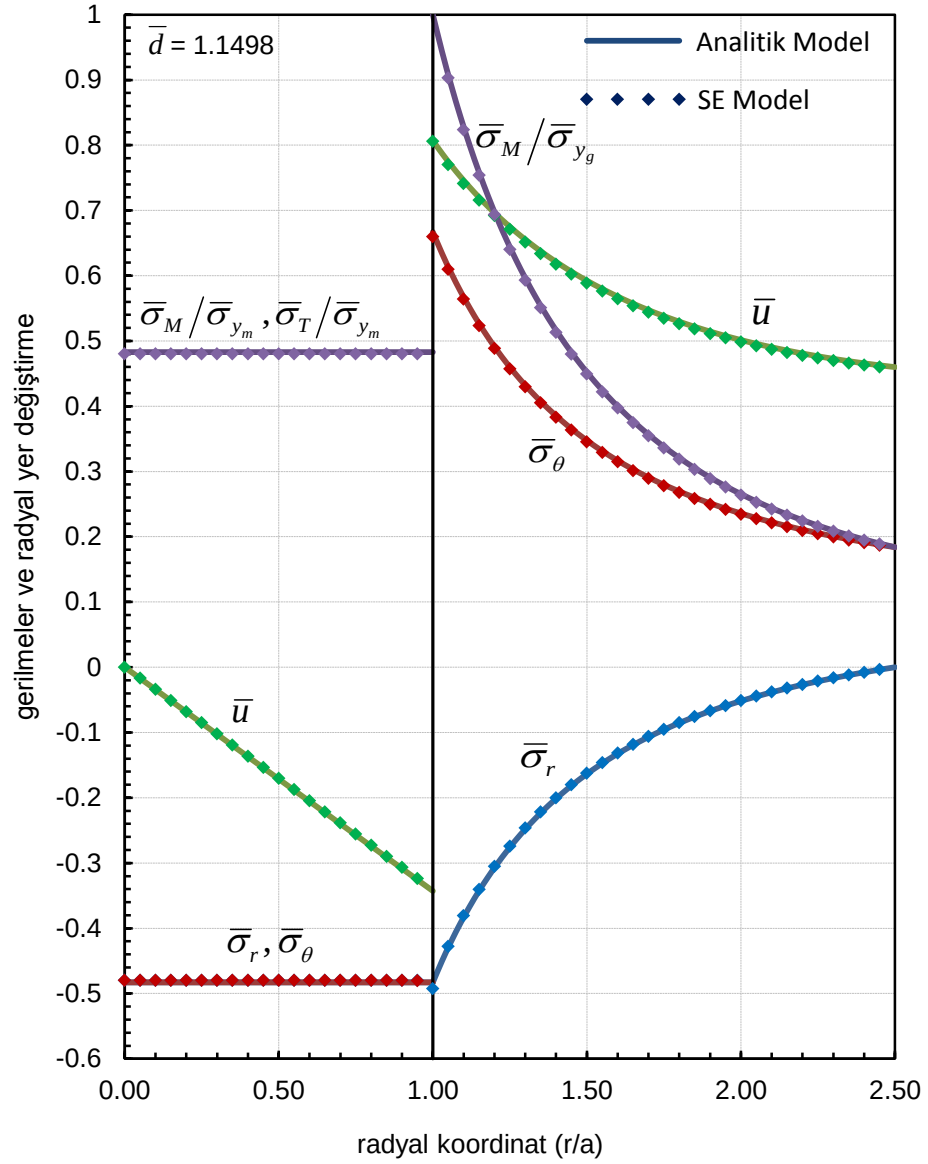


Şekil 7.6. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 0.6$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı



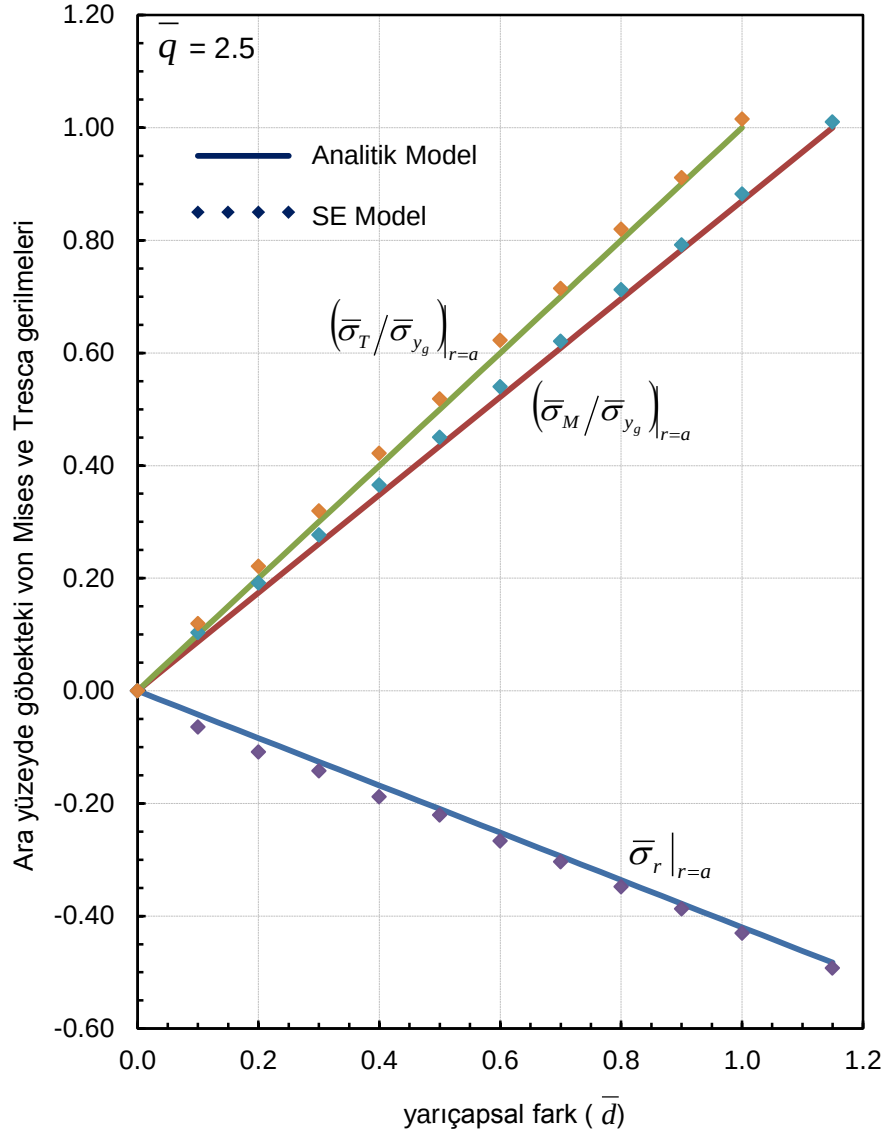
Şekil 7.8. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı

Boyutsuz yarıçapsal farkın $\bar{d}=1.1498$ seçilmesi ile sonlu elemanlar modelinde kullanılan von Mises gerilmesi gövde elemanın iç yüzeyinde malzemenin akma gerilmesine eşitlenir. Bu durumda bu modele göre akma gerçekleşmiş olur. Bu durumu temsil eden gerilme dağılımları Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



Şekil 7.9. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede akma anında $\bar{d}=1.1498$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı

İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik bölgede göbekteki arayüzey basıncı ve Tresca ile von Mises gerilmelerinin akma gerilmesine oranının değişimi Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Elastik bölgede göbeğin iç yüzeyinde meydana gelen Tresca, von Mises gerilmeleri ile iç basınç değerleri analitik modelde ve sonlu elemanlar modelinde birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Yarıçapsal fark arttıkça arayüzey basıncının arttığı bariz bir şekilde gözlenmektedir.

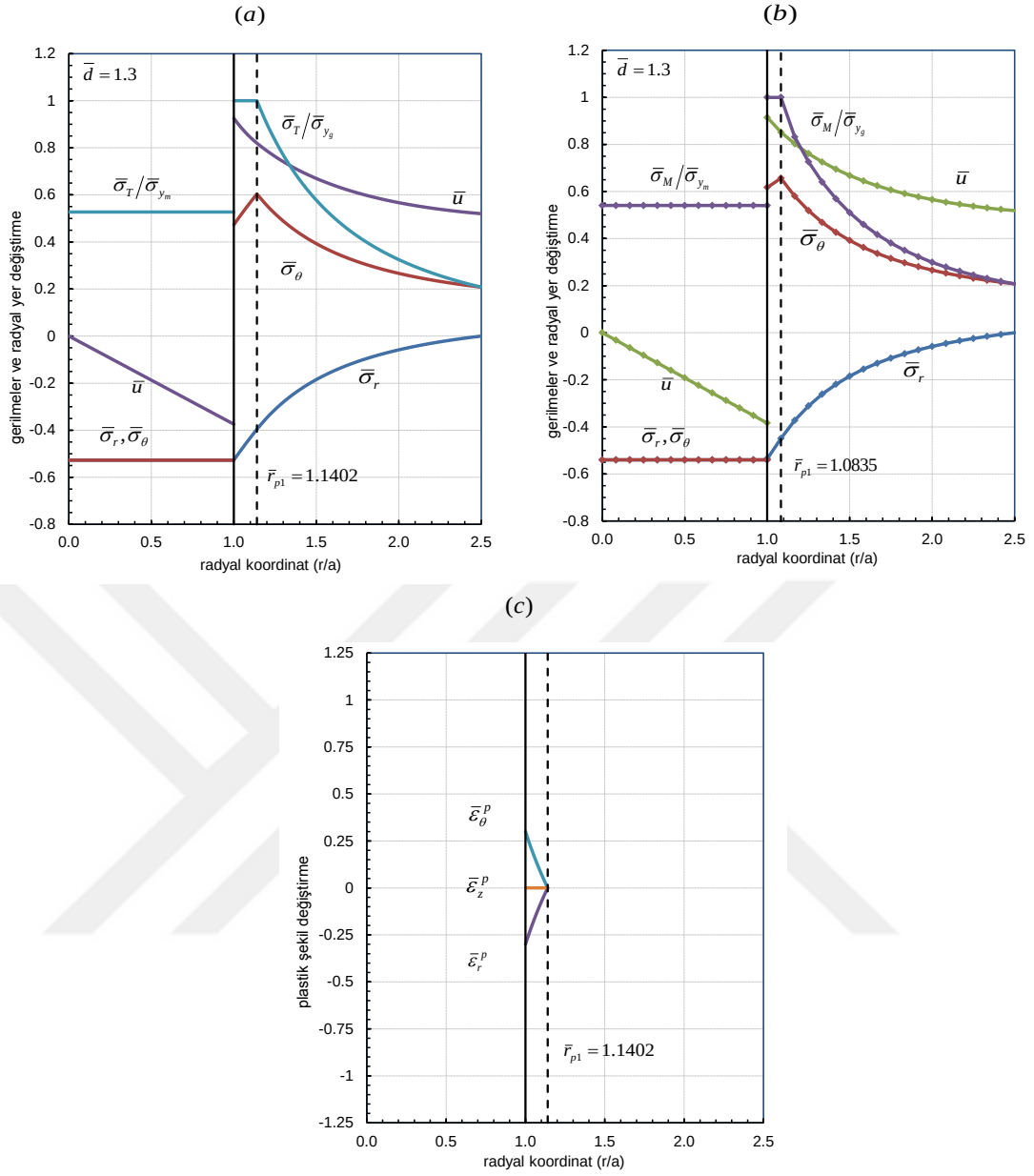


Şekil 7.10. İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik bölgede göbekteki ara yüzey basıncı, Tresca ve von Mises gerilmeleri $\bar{d}$

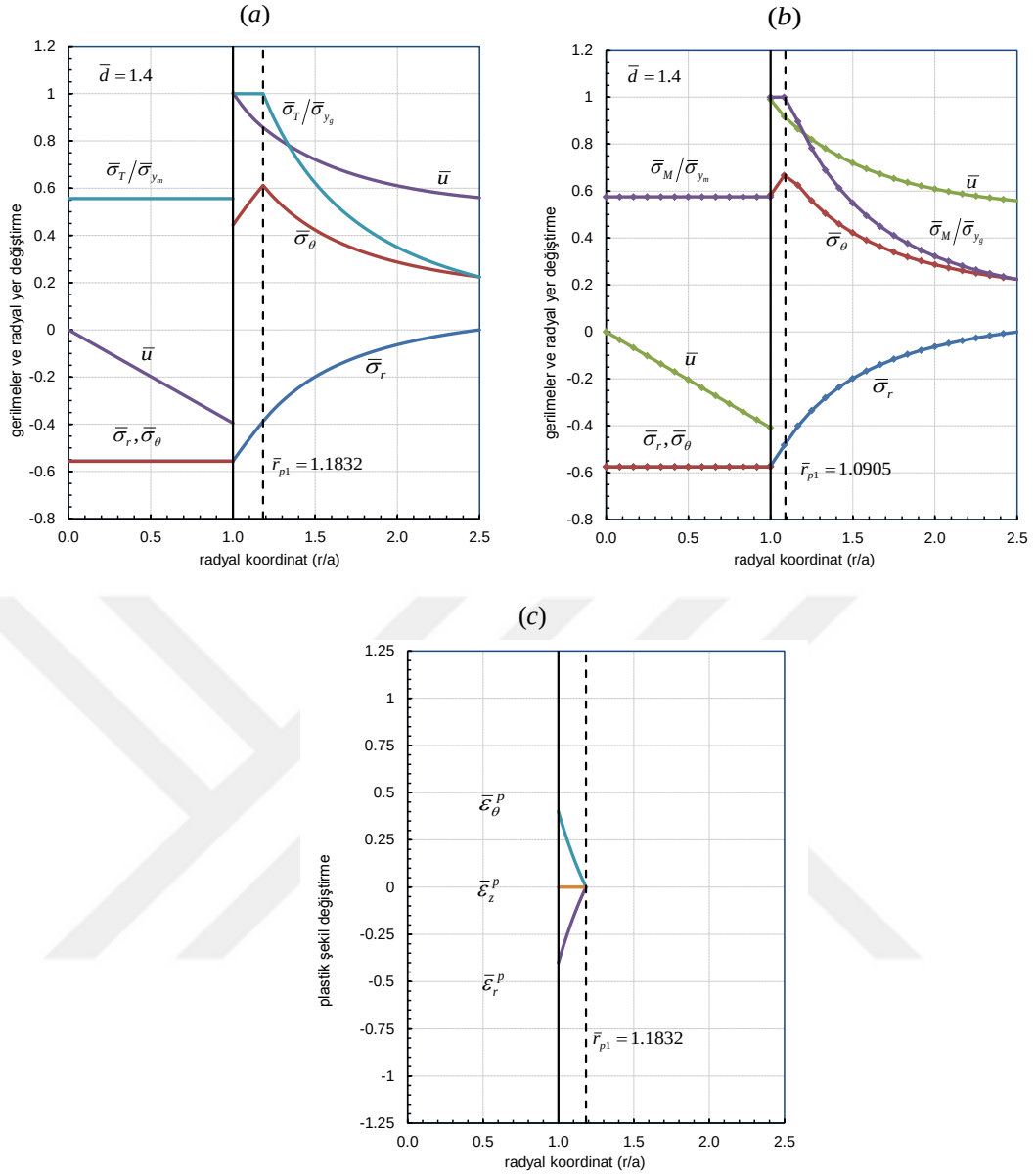
İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik durumda çelik-çelik malzeme kompozisyonu için sonlu elemanlar (SE) modeli ve analitik model sonuçları Şekiller 7.11-17’de sunulmuştur. Bu şekillerde mil ve göbekte meydana gelen gerilme dağılımları farklı yarıçap farkı (d) değerleri için gösterilmiştir. Şekillerde, tıpkı elastik sonuçlarda olduğu gibi sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile analitik model sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekillerde ayrıca, plastik şekil değiştirme bileşenleri de sunulmuştur. Malzeme çiftlerinin içi dolu mil-göbek sıkı geçme işleminde meydana getirdiği gerilmeler plastik bölge için aşağıdaki

grafiklerde detaylı bir şekilde görülmektedir. Şekilde görülen $\bar{r}_{p1}$ değeri plastikleşmenin başladığı boyutsuz radyal koordinatı göstermektedir.

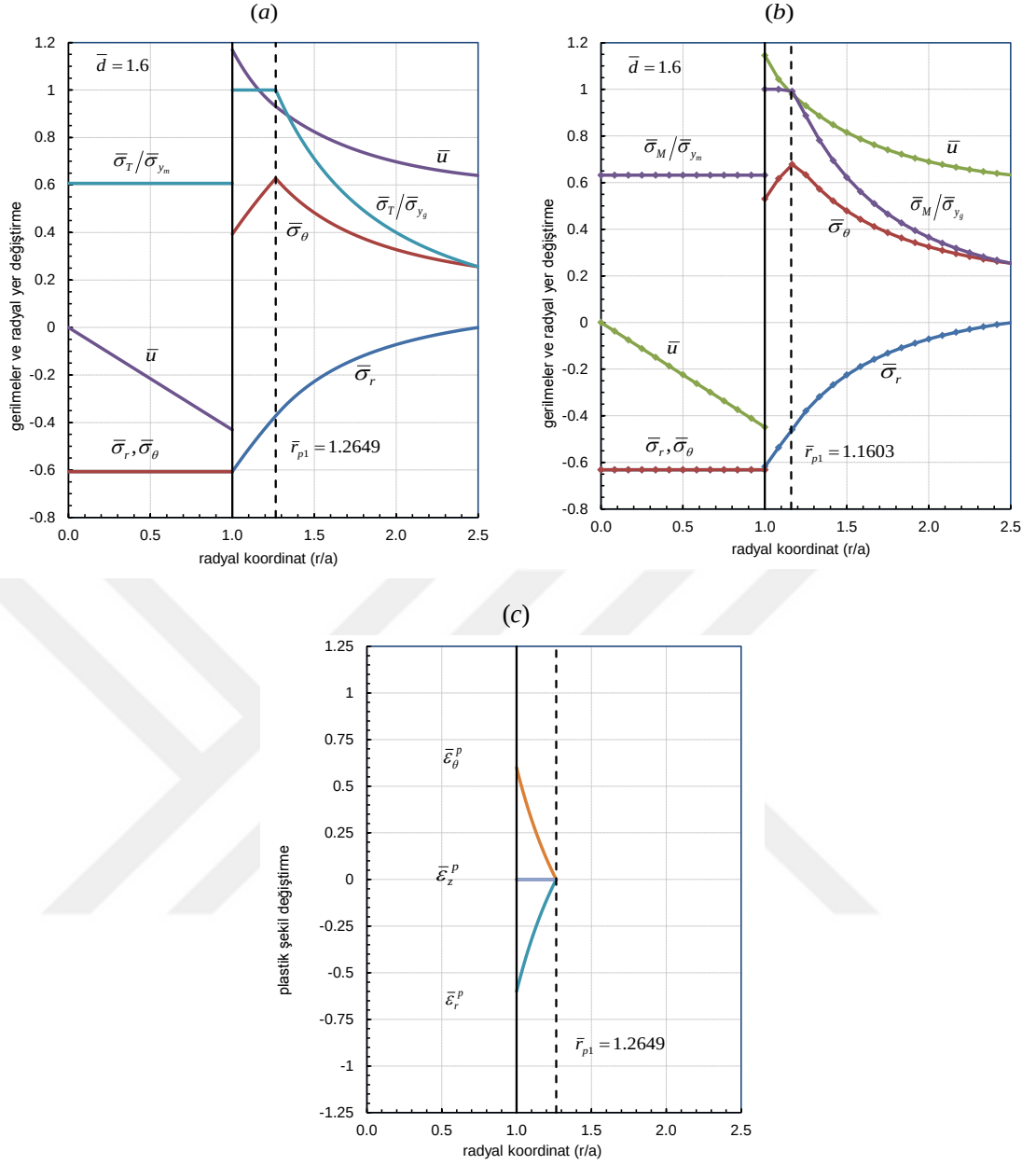
Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, analitik model için elde edilen sonuçlarda, göbek elemanının iç bölgesinde Plastik bölge 1 gözlenmektedir. Bu durumda, maksimum asal gerilme açısai gerilme bileşeni σ_θ iken, minimum asal gerilme radyal gerilme bileşeni σ_r 'dır. Grafiklerdeki kesik çizgiler, plastik bölge 1 ile elastik bölge arasındaki sınırı belirlemektedir. Sonlu elemanlar ile elde edilen plastik bölgelerin von Mises kriterine bağılı olarak gelişmesinden dolayı aynı d değerinde bile Tresca `ya göre daha küçük bir bölgeyi kapladığı vurgulanmalıdır. Plastik bölgelerde farklı akma kriterleri kullanılmasına rağmen, her iki modelde de gerilme dağılımları için birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.



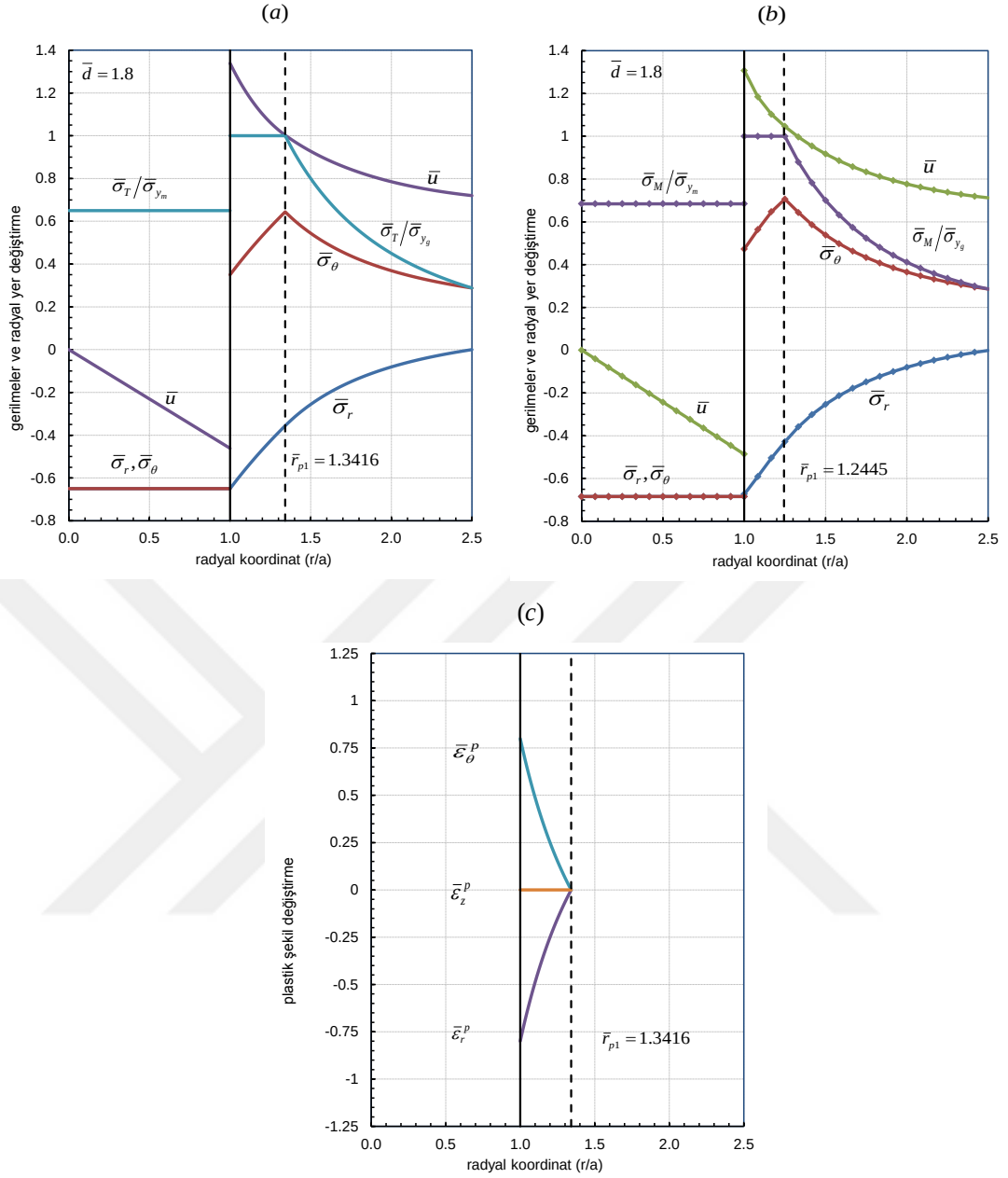
şekil 7.11. İçi dolu mil-göbük sıkı geemede $\bar{d} = 1.3$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



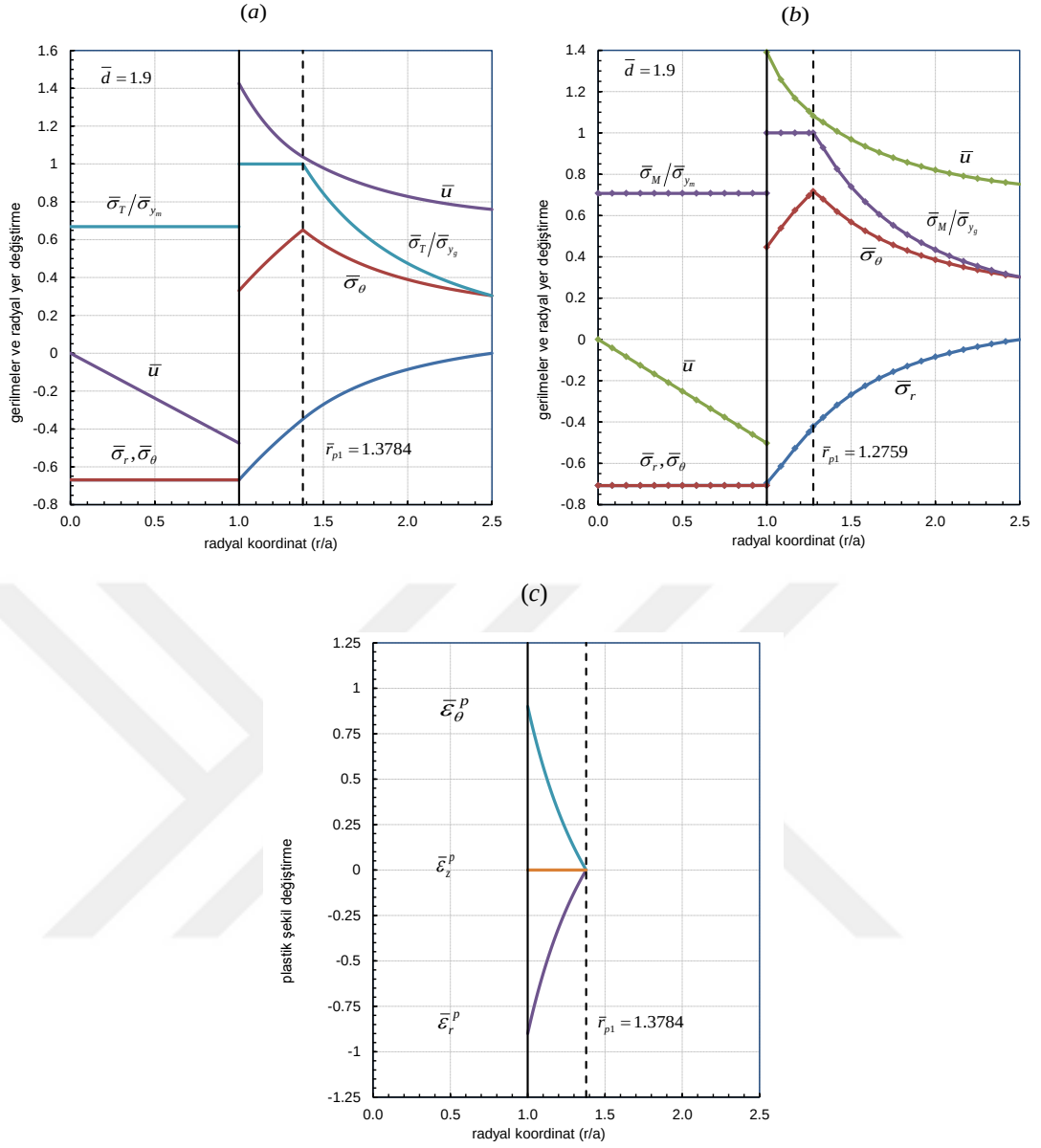
şekil 7.12. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.4$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



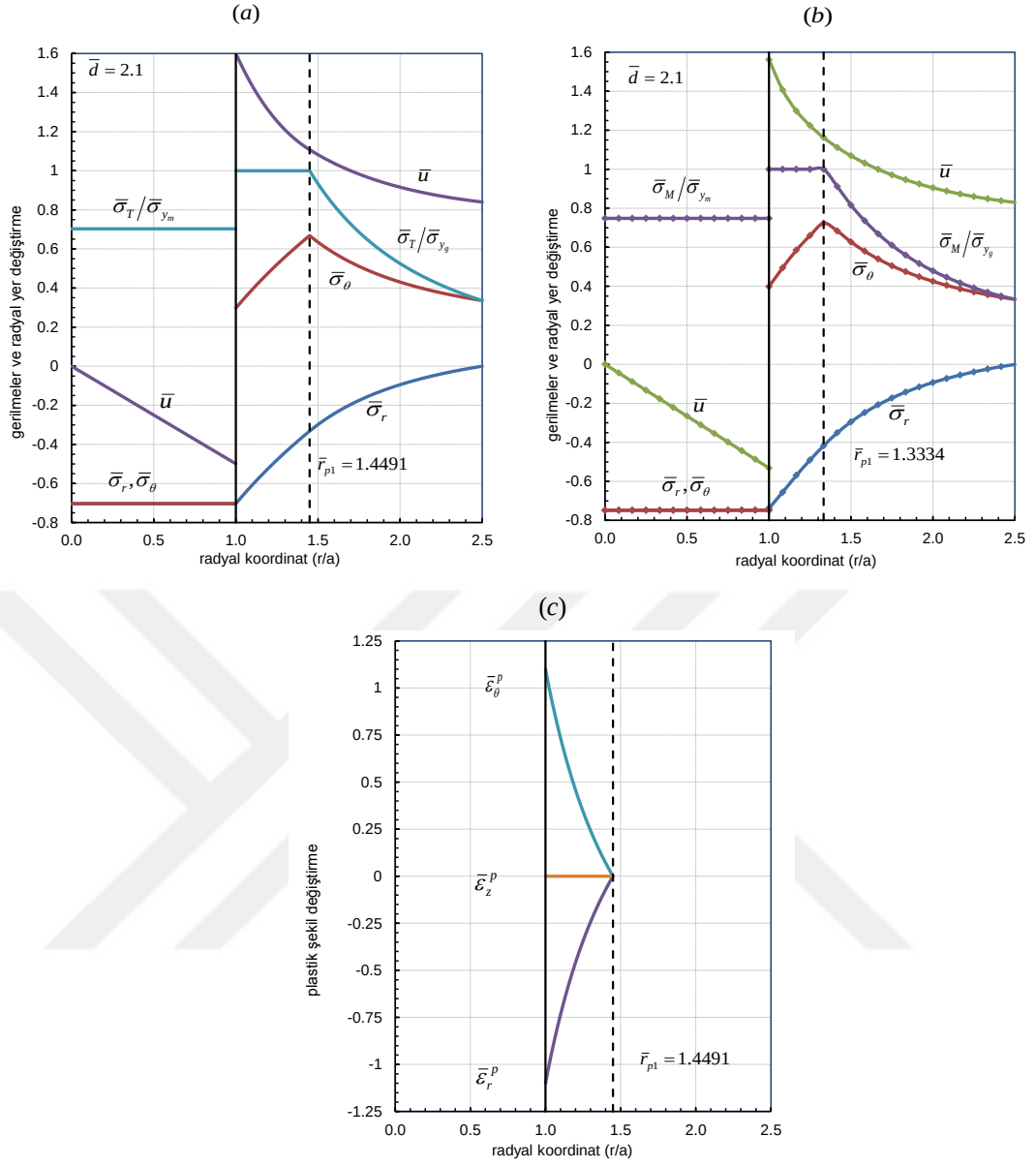
Şekil 7.13. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.6$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



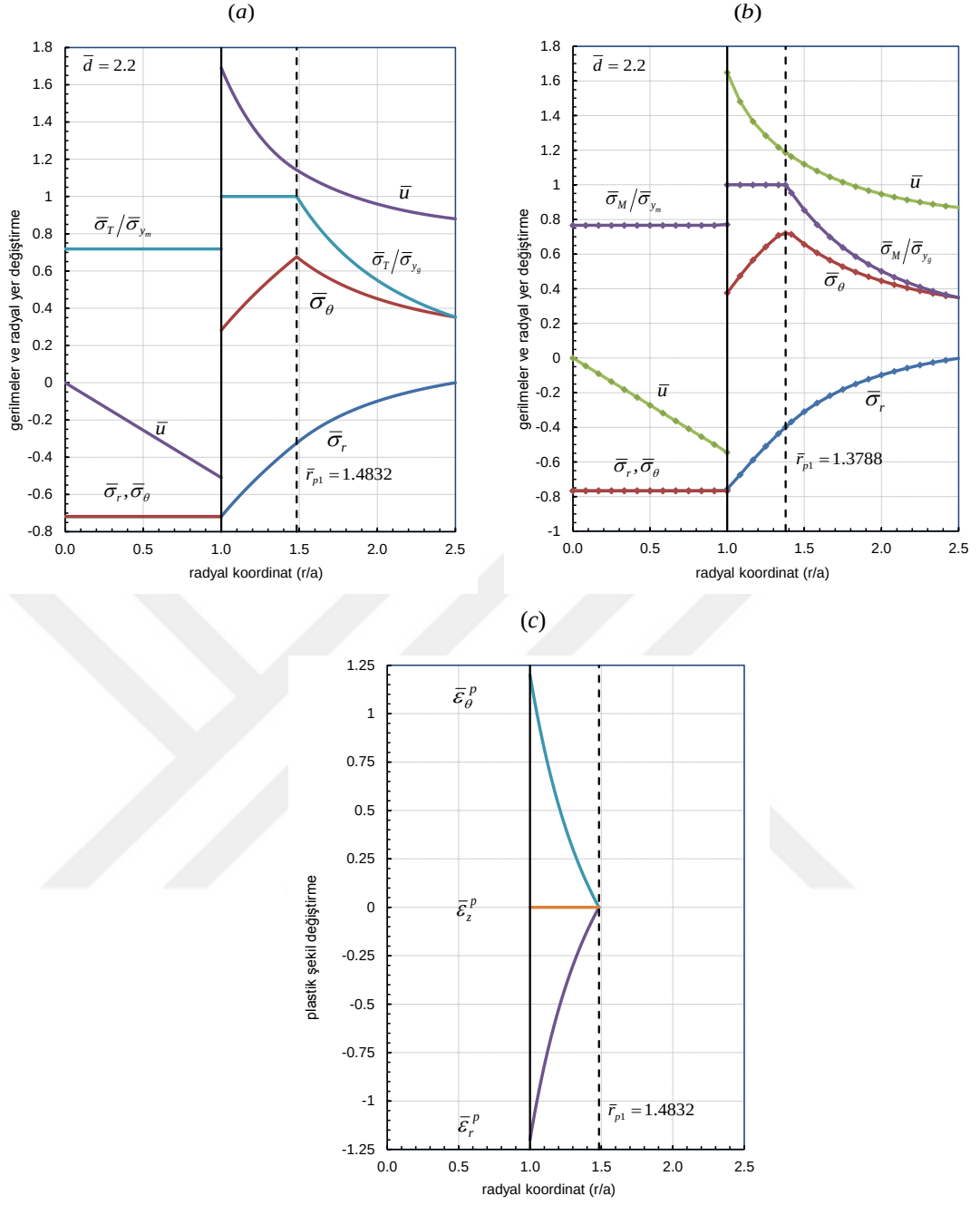
Şekil 7.14. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.8$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 7.15. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.9$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 7.16. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 2.1$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.

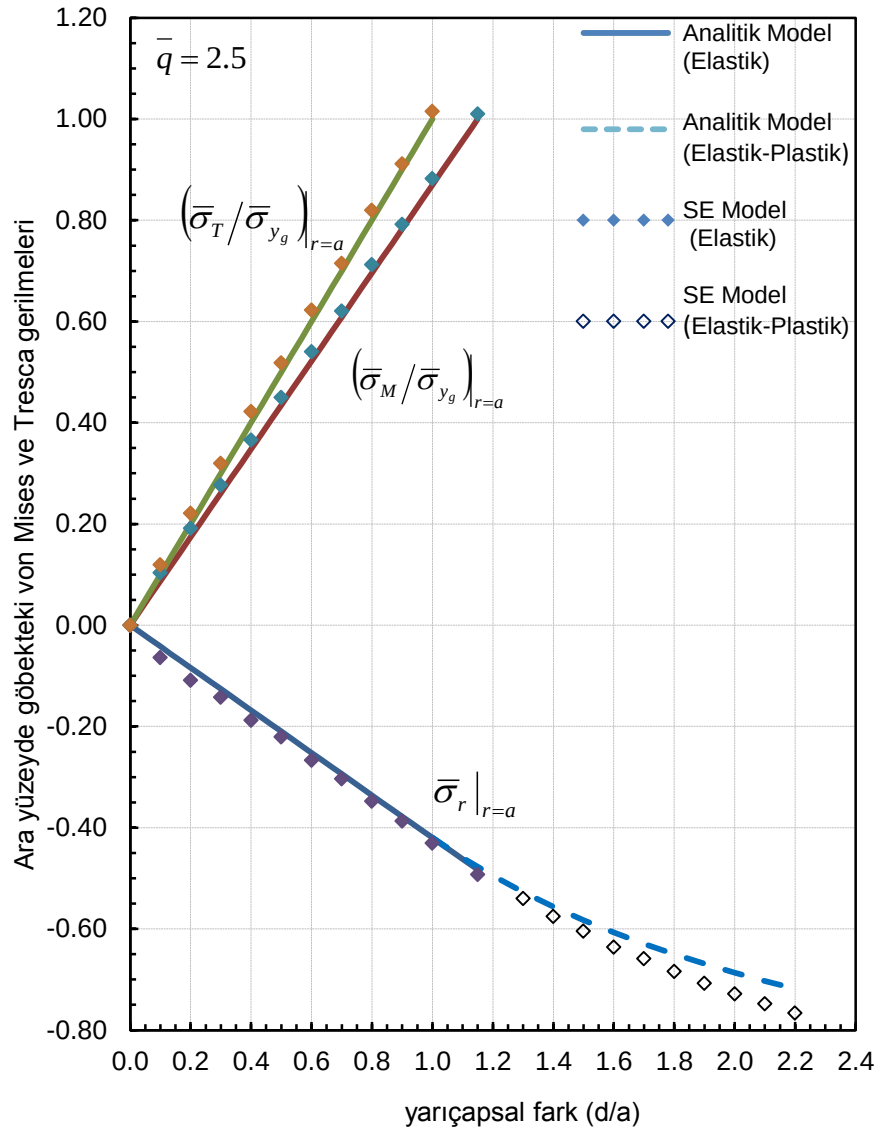


şekil 7.17. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 2.2$ için (a) Analitik model ve (b) SE modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.

Yukarıdaki şekillerde, gövde elemanındaki plastik bölgenin bütün elemanın %30'unu asmamasına özen gösterilmiştir [40].

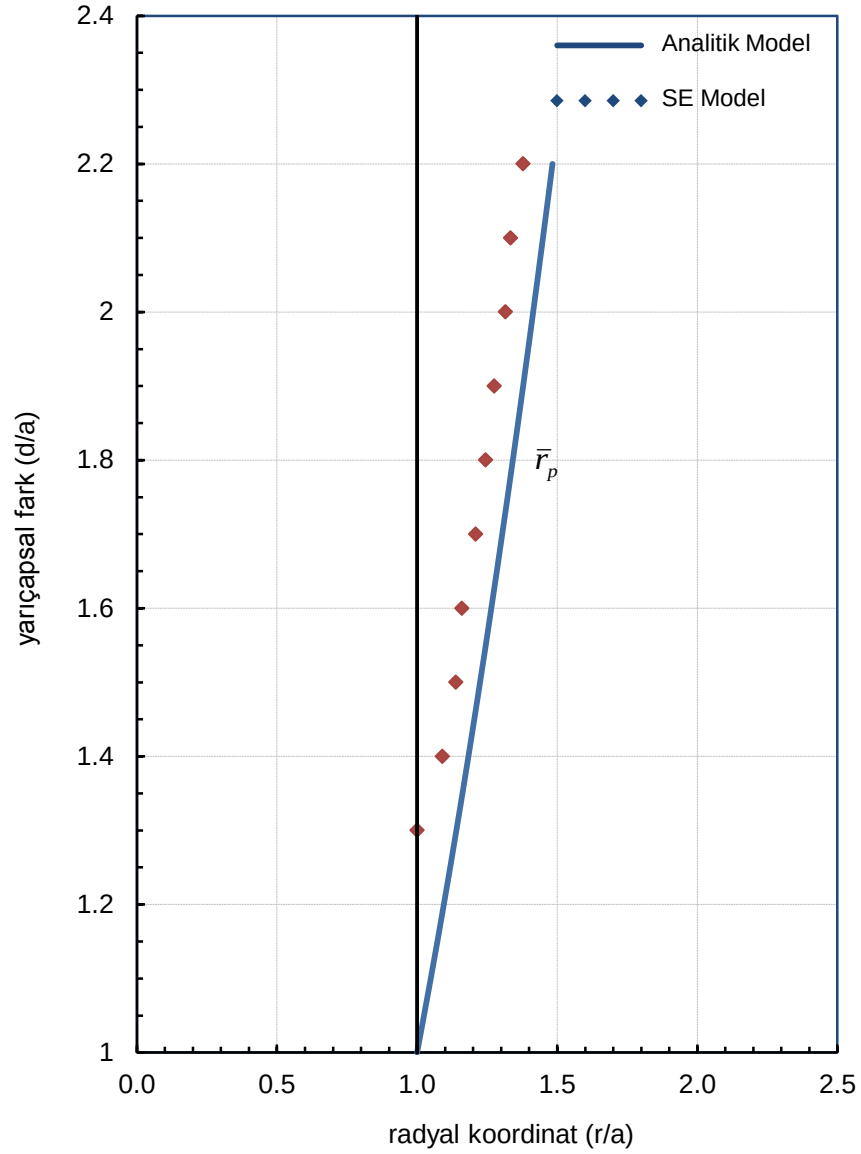
şekil 7.18'de verilen yarıçapsal fark d değerlerin daha yüksek değerlerin kullanılmasıyla arayüzey basıncının elastik-plastik bölgelerde nasıl değiştiği

gösterilmiştir. Şekilde kesik çizgiler elastik-plastik analitik modeli kapsarken, içi boş noktalar elastik-plastik sonlu elemanlar modeli temsil etmektedir. Her iki modelde elastik bölgelerde birbirine yakın sonuçlar edilmesine rağmen, elastik-plastik bölgede bu benzerlik azalmıştır. Bunun temel sebebi, analitik modelde Tresca akma kriteri kullanılırken, sonlu elemanlar modelinde von Mises modelinin kullanılmasıdır.



Şekil 7.18. İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik bölgelerde göbekteki ara yüzey basıncı, Tresca ve von Mises gerilmeleri

Şekil 7.19’da gövde elemanında, plastik bölge ile elastik bölge arasındaki ara yüzey koordinatının $(\bar{r}_{p1})$ yarıçapsal fark ile değişimi sunulmuştur. Analitik model ve sonlu elemanlar model sonuçların birbirlerine yakın oldukları görülmektedir.



Şekil 7.19. İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantılarında plastikleşme noktalarının yarıçapsal farka göre değişimi

Yukarıdaki sonuçlar, mil ve göbek elemanlarının aynı malzemeden üretilmesi ile oluşacak sonuçları göstermekteydi. Bu malzemelerin farklı olması durumunda, bazı örnek malzemeler için elde edilecek kritik parametreler analitik model için Çizelge 7.1’ de ve sonlu elemanlar modeli için Çizelge 7.2’de sunulmuştur. Malzeme çiftleri olarak çelik-alüminyum, çelik-bakır, çelik-çelik, bakır-çelik, alüminyum-çelik malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan malzeme çiftlerindeki yarıçapsal farklar analitik ve sayısal modeller için aynıdır. Ayrıca b/a oranı 2.5 alınmıştır.

İçi dolu milin analitik model sonuçları için; bütün malzeme çiftlerinde Elastik-Plastik Durum I gerçekleşmiştir. Yani sadece göbekte plastikleşme meydana geldiği görülmektedir. Milde herhangi bir akma söz konusu değildir.

Tabloya bakıldığında göbekte meydana gelen akmanın bütün malzeme çiftleri için hedeflendiği gibi %30 plastikleşme meydana gelecek şekilde gerçekleştirildiği görülmektedir.

Analitik model sonuçlarında bütün malzeme çiftlerinde aynı yarıçapsal farka bakıldığında çelik-çelik malzeme çiftinde ki Tresca gerilmesi diğer malzeme çiftlerindeki gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir. Diğer sıkı geçme işlemleri için yarıçapsal farklar aynı olsa dahi mil ile göbek arasındaki yüzey gerilmesi farklı değerlerde ortaya çıkmıştır. Bu da gösteriyor ki çelik-çelik malzeme çiftinin sahip olduğu yüzey basıncı diğer kompozisyonlarda meydana gelen yüzey basıncından daha büyüktür.

Çizelge 7.1. Malzeme çiftleri farklı olan içi dolu mil-göbek sıkı geçme işleminin analitik modeli sonuçları

İçi Dolu Mil-göbek Bağlantısında Kullanılan Malzeme Çifti	E_m/E_g	σ_{ym}/σ_{yg}	$\bar{d}$	Durum	Boyutsuz Yüzey Basıncı	Plastikleşme		
						σ_T/σ_Y	$\bar{r}_{pl}$	Göbekteki Plastikleşme % si
Çelik - Alüminyum	2.778	1.09	0.48484	Elastik durum	-0.089	0.23107	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.969696	Elastik durum	-0.178	0.46215	-	-
$E_g = 72$ GPa			1.454552	Elastik durum	-0.266	0.69322	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			2.098252	Elastik d. ($r = a$ da akma)	-0.384	1	1	-
$\sigma_{yg} = 503$ MPa			2.797576	Elastik-Plastik durum 1	-0.488	1	1.15	%10
$v_m = 0.29$			3.633939	Elastik-Plastik durum 1	-0.574	1	1.3	%20
$v_g = 0.33$			4.600787	Elastik-Plastik durum 1	-0.643	1	1.45	%30
Çelik-Bakır	1.74	1.80	0.242424	Elastik durum	-0.066	0.28241	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.484848	Elastik durum	-0.132	0.56483	-	-
$E_g = 115$ GPa			0.727273	Elastik durum	-0.197	0.84724	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			0.858404	Elastik D. ($r = a$ da akma)	-0.233	1	-	-
$\sigma_{yg} = 305$ MPa			1.141212	Elastik-Plastik durum 1	-0.296	1	1.15	%10
$v_m = 0.29$			1.472727	Elastik-Plastik durum 1	-0.348	1	1.3	%20
$v_g = 0.33$			1.850909	Elastik-Plastik durum 1	-0.390	1	1.45	%30
Çelik-Çelik	1	1.00	0.4	Elastik durum	-0.168	0.4	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.6	Elastik durum	-0.252	0.6	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.8	Elastik durum	-0.336	0.8	-	-
$\sigma_{ym} = 200$ Mpa			1	Elastik D. ($r = a$ da akma)	-0.420	1	-	-
$\sigma_{yg} = 200$ MPa			1.323333	Elastik-Plastik durum 1	-0.534	1	1.15	%10
$v_m = 0.29$			1.696667	Elastik-Plastik durum 1	-0.629	1	1.3	%20
$v_g = 0.29$			2.103333	Elastik-Plastik durum 1	-0.703	1	1.45	%30
Bakır-Çelik	0.575	0.55	0.251366	Elastik durum	-0.154	0.20351	-	-
$E_m = 115$ GPa			0.502732	Elastik durum	-0.308	0.40703	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.754098	Elastik durum	-0.462	0.61054	-	-
$\sigma_{ym} = 305$ Mpa			1.235129	Elastik D. ($r = a$ da akma)	-0.757	1	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			1.623825	Elastik-Plastik durum 1	-0.963	1	1.15	%10
$v_m = 0.33$			2.048508	Elastik-Plastik durum 1	-1.131	1	1.3	%20
$v_g = 0.29$			2.512153	Elastik-Plastik durum 1	-1.268	1	1.45	%30
Alüminyum-Çelik	0.36	0.91	0.143141	Elastik durum	-0.113	0.24513	-	-
$E_m = 72$ GPa			0.286282	Elastik durum	-0.225	0.49025	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.429423	Elastik durum	-0.338	0.73538	-	-
$\sigma_{ym} = 503$ Mpa			0.583949	Elastik D. ($r = a$ da akma)	-0.459	1	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			0.762704	Elastik-Plastik durum 1	-0.584	1	1.15	%10
$v_m = 0.33$			0.949503	Elastik-Plastik durum 1	-0.686	1	1.3	%20
$v_g = 0.29$			1.146561	Elastik-Plastik durum 1	-0.769	1	1.45	%30

Sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlara bakıldığında; farklı malzeme çiftleri için farklı yarıçapsal farklardaki sonuçlar Çizelge 7.2’de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelleme programı olan ABAQÜS’te plastikleşme oranları analitik model sonuçlarındaki gibi istenilen oranda elde edilememektedir. Dolayısıyla plastikleşme yüzdeleri farklı değerler alabilmektedir.

Analitik model sonuçlarında bütün malzeme çiftlerinde aynı yarıçapsal farka bakıldığında çelik-çelik malzeme çiftinde ki von Mises gerilmesi diğer malzeme çiftlerindeki gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir. Çelik-çelik malzeme çifti

hem analitik hem de sayısal model sonuçlarında en yüksek yüzey gerilmesine sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.2. Malzeme çiftleri farklı olan içi dolu mil-göbek sıkı geçme işleminin sonlu elemanlar modeli sonuçları

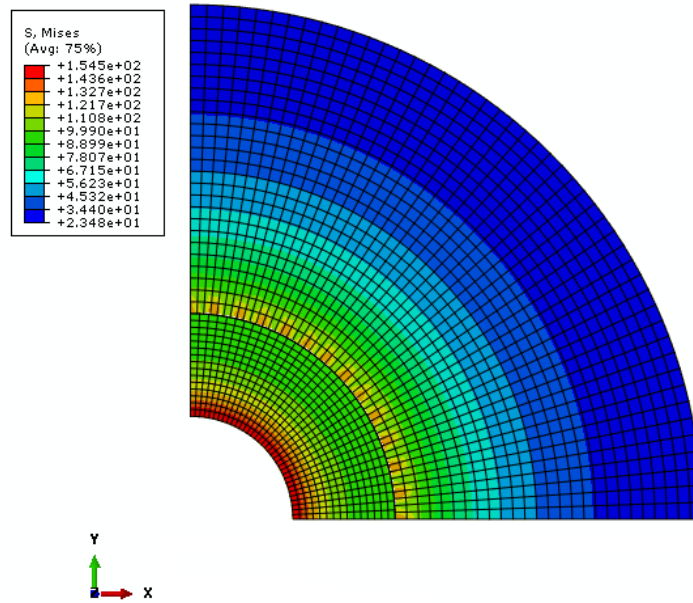
İçi Dolu Mil-göbek Bağlantısında Kullanılan Malzeme Çifti	E_m/E_g	σ_{ym}/σ_{yg}	İçi Dolu Mil					
			$\bar{d}$	Boyutsuz Yüzey basıncı	Plastikleşme			
					σ_r/σ_y	Durum	r_{p1}	Göbekteki Plastikleşme % si
Çelik - Alüminyum	2.778	1.09	0.48484	-0.090256545	0.201296223	Elastik durum	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.969696	-0.177033818	0.397335984	Elastik durum	-	-
$E_g = 72$ GPa			1.454552	-0.264043636	0.594465209	Elastik durum	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			2.0982518	-0.380605455	0.857667992	Elastik durum	-	-
$\sigma_{yg} = 503$ MPa			2.7975757	-0.498252727	1	Elastik-Plastik durum 1	1.07	%5
$v_m = 0.29$			3.6339393	-0.603921818	1	Elastik-Plastik durum 1	1.22	%14
$v_g = 0.33$								
Çelik-Bakır	1.74	1.80	0.242424242	-0.072910182	0.254787869	Elastik durum	-	-
$E_s = 200$ GPa			0.484848485	-0.134507091	0.49524918	Elastik durum	-	-
$E_h = 115$ GPa			0.727272727	-0.198956364	0.734803279	Elastik durum	-	-
$\sigma_{ys} = 550$ MPa			0.858403636	-0.233827273	0.86492459	Elastik durum	-	-
$\sigma_{ys} = 305$ MPa			1.141212121	-0.298738182	1	Elastik-Plastik durum 1	1.07	%5
$v_s = 0.29$			1.472727273	-0.362883636	1	Elastik-Plastik durum 1	1.21	%14
$v_h = 0.33$			1.850909091	-0.413812727	1	Elastik-Plastik durum 1	1.33	%22
Çelik-Çelik	1	1.00	0.4	-0.1566	0.2387	Elastik durum	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.6	-0.2361	0.3596	Elastik durum	-	-
$E_g = 115$ GPa			0.8	-0.3152	0.4803	Elastik durum	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			1	-0.3946	0.6011	Elastik durum	-	-
$\sigma_{yg} = 305$ MPa			1.323333333	-0.56999	1.166545	Elastik-Plastik durum 1	1.07	%4
$v_m = 0.29$			1.696666667	-0.72318	1.48179	Elastik-Plastik durum 1	1.21	%14
$v_g = 0.33$			2.103333333	-0.891115	1.82703	Elastik-Plastik durum 1	1.34	%23
Bakır-Çelik	0.575	0.55	0.25136612	-0.170160328	0.183387273	Elastik durum	-	-
$E_m = 115$ GPa			0.50273224	-0.315238361	0.358685455	Elastik durum	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.754098361	-0.465822951	0.530494545	Elastik durum	-	-
$\sigma_{ym} = 305$ Mpa			1.235128781	-0.759829508	0.867872727	Elastik durum	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			1.6238251	-0.964668852	1	Elastik-Plastik durum 1	1.07	%4
$v_m = 0.33$			2.048508197	-0.979681967	1	Elastik-Plastik durum 1	1.07	%5
$v_g = 0.29$			2.512153005	-0.989262295	1	Elastik-Plastik durum 1	1.09	%6
Aluminyum-Çelik	0.36	0.91	0.143141153	-0.117447117	0.217443636	Elastik durum	-	-
$E_m = 72$ GPa			0.286282306	-0.225996024	0.425056364	Elastik durum	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.429423459	-0.335681909	0.632543636	Elastik durum	-	-
$\sigma_{ym} = 503$ MPa			0.583949105	-0.443065606	0.836236364	Elastik durum	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			0.762703777	-0.582210736	1	Elastik-Plastik durum 1	1.06	%4
$v_m = 0.33$			0.949502982	-0.703691849	1	Elastik-Plastik durum 1	1.19	%13
$v_g = 0.29$			1.146560636	-0.803693837	1	Elastik-Plastik durum 1	1.33	%22

7.2. İçi Boş Mil-Göbek için Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde içi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için sonlu elemanlar modelleme programı olan ABAQUS'te deformasyon analizi yapılmış ve sonuçlar analitik model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yarıçapsal farkın değişmesine karşılık yüzey basıncında meydana gelen değişimler hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemiyle gözlemlenmiştir. Mil ve göbek malzemesi olarak da çelik-çelik malzeme çifti kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlar analitik sonuçlara çok yakın çıkmıştır. Mil ve göbekte meydana gelen gerilmeler grafiklerle gösterilmiştir. Sonuçlarda $b/a=2.5$ ve $c/a=0.5$ alınmıştır.

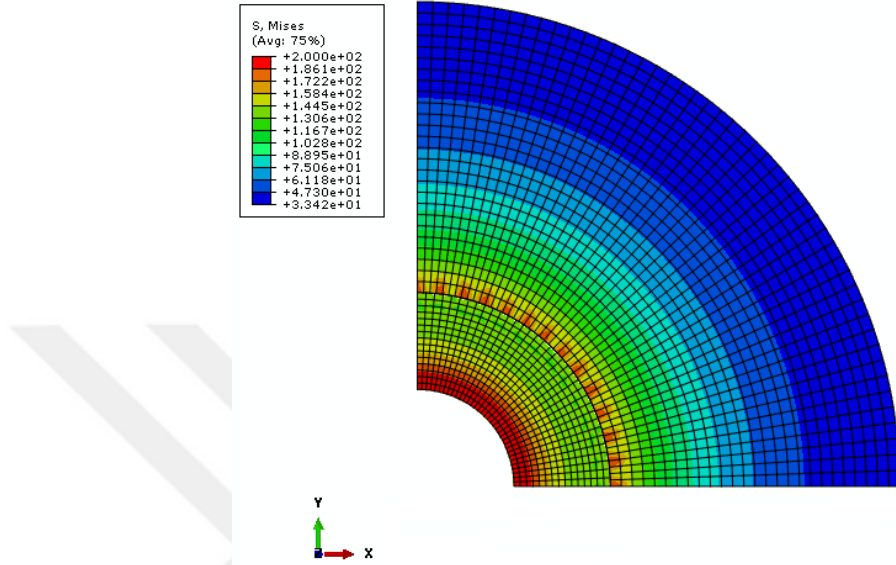
Sonlu elemanlar modelleme programı ABAQUS'te farklı yarıçapsal farklar için elde edilen gerilme dağılımları Şekiller 7.20-22'de gösterilmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi içi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısında gerilmeler ve buna bağlı olarak plastikleşme ilk olarak milin iç yüzeyinde yani $r=c$ 'de (bkz. Şekil 5.4) meydana gelmektedir. Yarıçapsal fark büyüdükçe yüzey basıncının arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7.20'de akmanın henüz gerçekleşmediği, tamamiyle elastik durum (boyutsuz yarıçap farkının 0.1 olduğu durum) için von Mises gerilmelerinin elemanlar üzerindeki dağılımı gösterilmiştir.



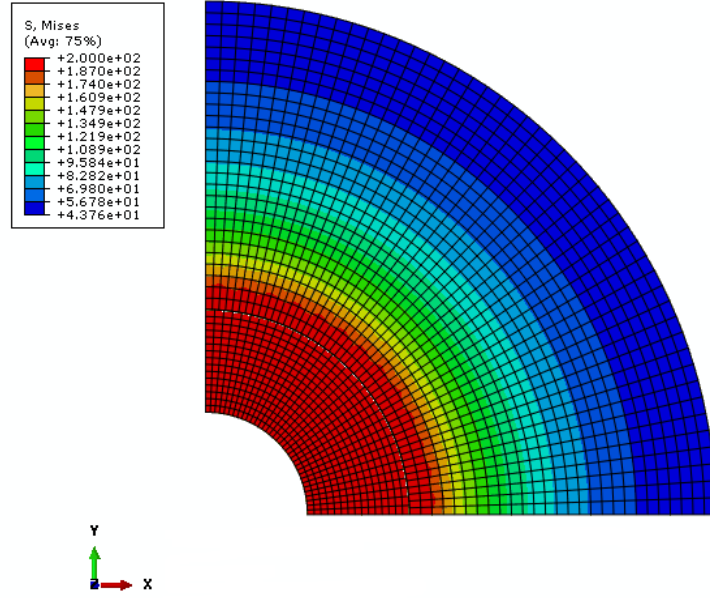
Şekil 7.20. İçi boş mil-göbek bağlantısında sonlu elemanlar modeli ile elde edilen elastik gerilme dağılımı ($\bar{d}=0.1$)

Sonlu elemanlar modeline göre $\bar{d}=1.143$ değerine ulaşıldığında plastik akma mil elemanın iç yüzeyinde gerçekleşmektedir. Bu durumda oluşan von Mises gerilmelerinin dağılımı Şekil 7.21’de gösterilmiştir.



Şekil 7.21.İçi boş mil-göbek bağlantısında sonlu elemanlar modeli ile elde edilen akma anındaki gerilme dağılımı ($\bar{d}=1.143$)

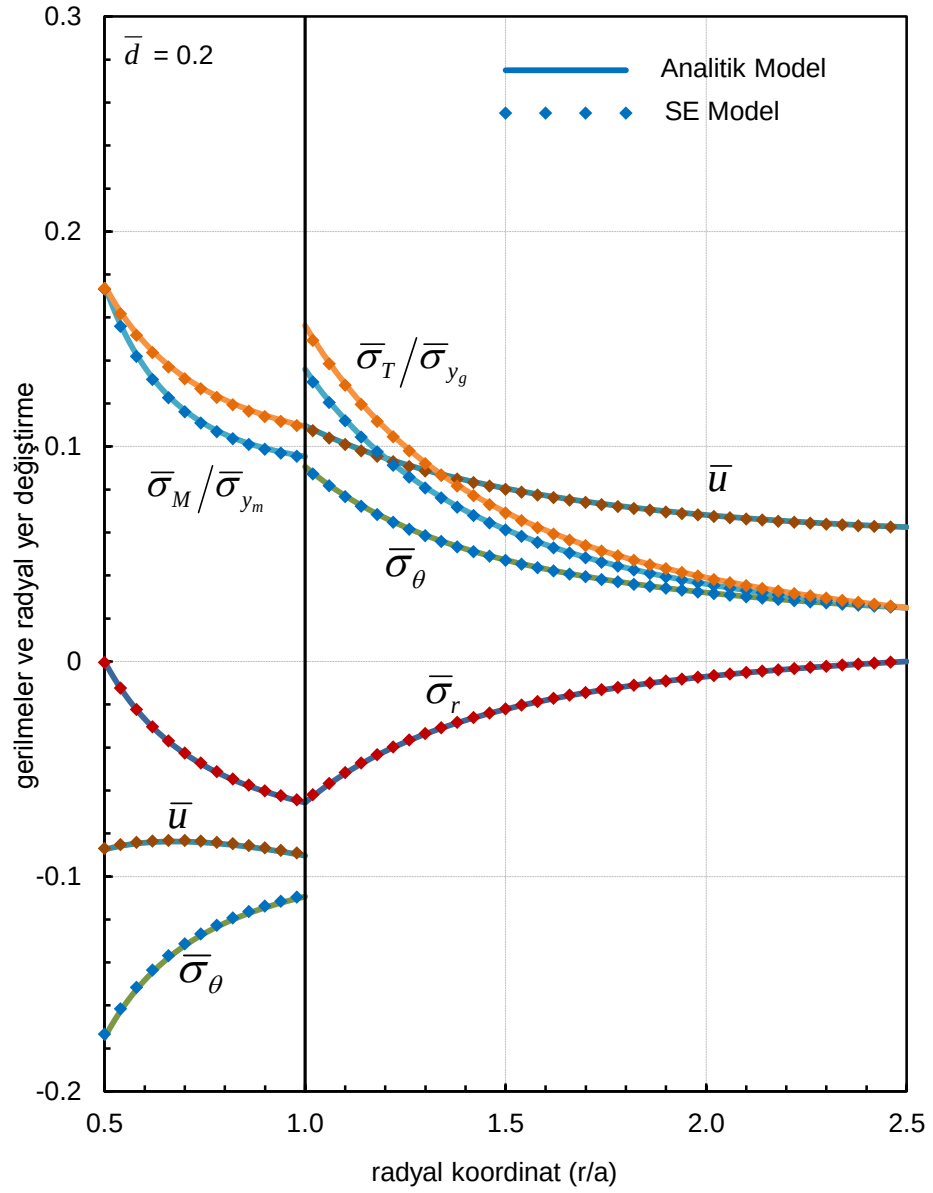
Yarıçap farkı örnek olarak $\bar{d}=2.1$ alındığında, mil elemanının tamamı ve göbek elemanının küçük bir kısmı plastikleşmiştir. Bu durum için ABAQUS’te elde edilen von Mises gerilmelerinin dağılımı Şekil 7.22’de sunulmuştur.



Şekil 7.22. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede milin tamamı plastikleştiği andaki gerilme dağılımı ($\bar{d}=2.1$)

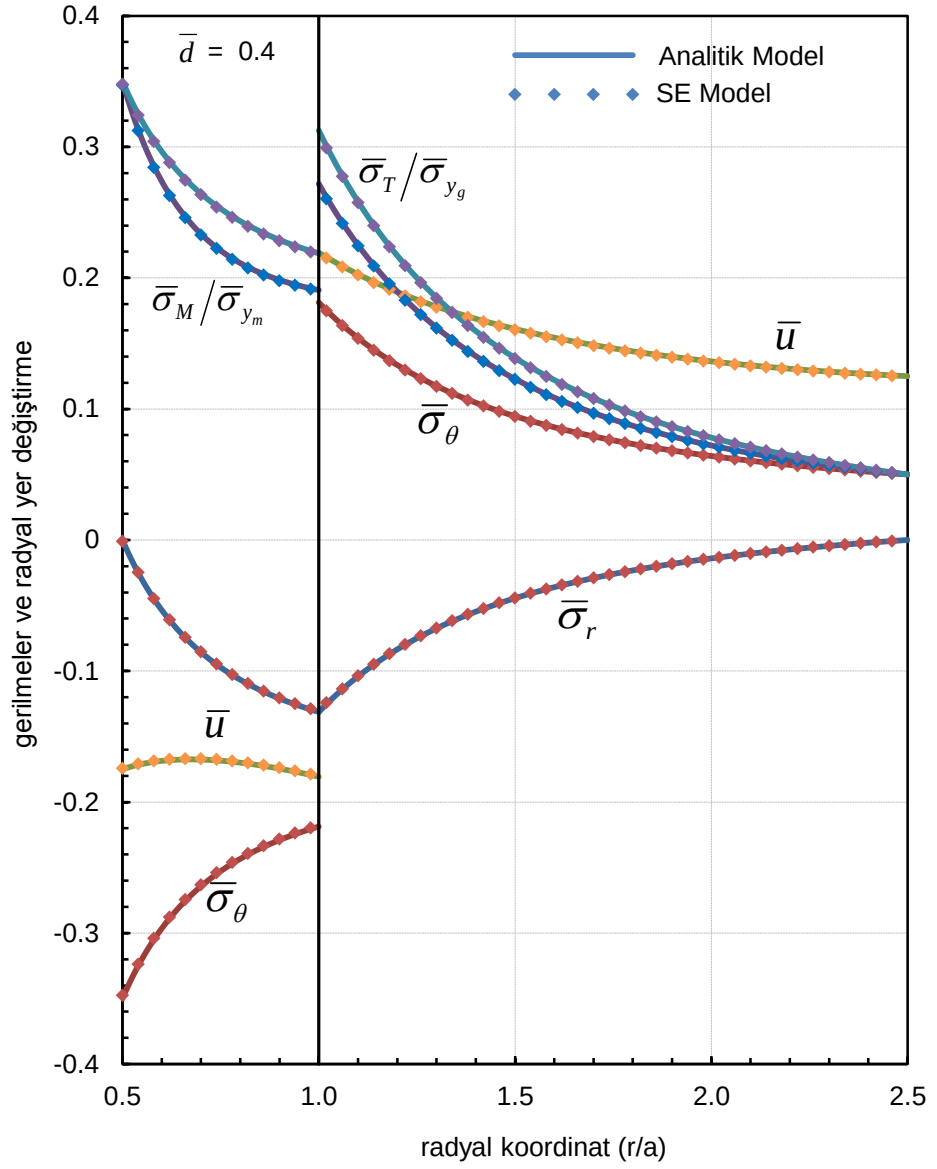
İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısında mil ve göbekte meydana gelen gerilme dağılımları yukarıda gösterilmektedir. İçi dolu milde plastikleşme göbeğin iç yüzeyinde meydana gelirken, içi boş milde plastikleşme ilk olarak milin iç yüzeyinde meydana gelir. Yarıçapsal fark büyüdükçe gerilme değerleri artar ve gövdenin iç yüzeyi de akar. Daha detaylı sonuçlar ve analitik modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir.

İçi boş mil-göbek sıkı geçme işleminde $\bar{d}=0.2$ yarıçapsal fark için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları Şekil 7.23’de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen düz çizgiler analitik model sonuçlarını, noktalar ise sonlu eleman modeli sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü gibi analitik model ile elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlara çok yakındır. Gerilmenin en yüksek olduğu yer milin iç yüzeyi yani $r=c$ ’dir. Daha sonra mil ile göbeğin temas ettiği yere kadar azalmakta, temas ettiği noktada yani $r=a$ ’da bir daha yüksek değere ulaşmaktadır. Temas yüzeyi ile göbeğin dış yüzeyine doğru kademeli bir şekilde gerilme tekrar azalmaktadır. Bu durum için henüz plastikleşme meydana gelmemekte ve bu iki elemanda tamamen elastik davranmaktadır.

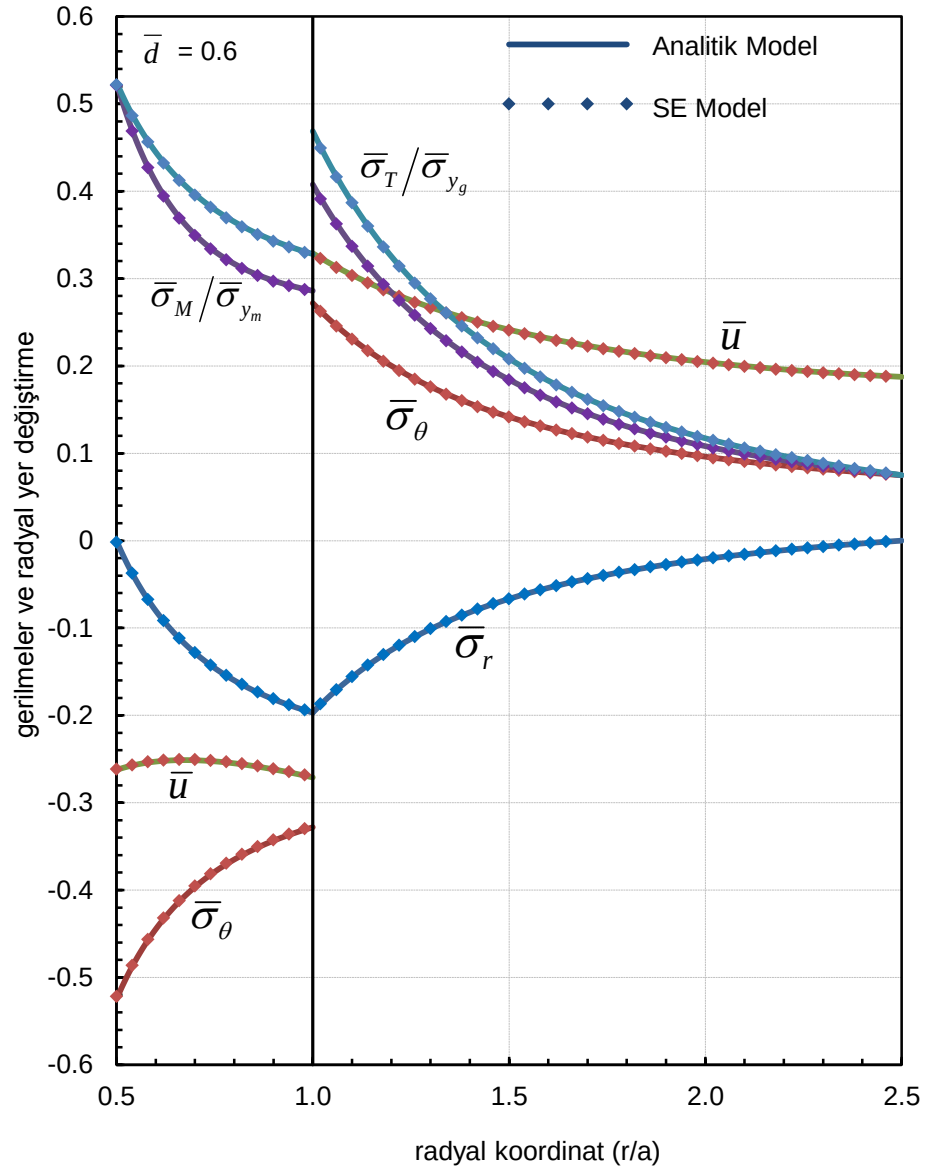


Şekil 7.23. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 0.2$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları

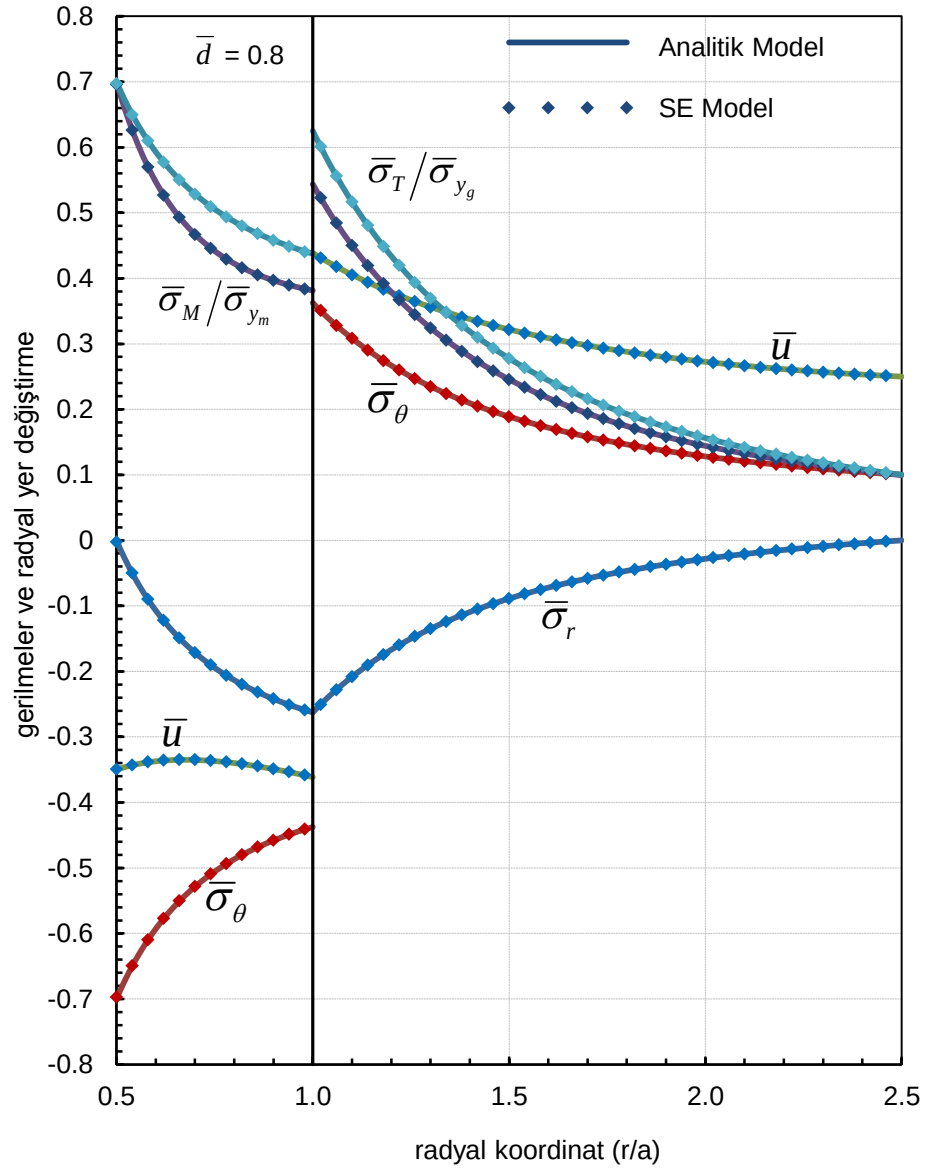
Şekiller 7.24-7.27’de de mil ve göbek elemanlarının yine tamamıyla elastik davrandığı fakat farklı yarıçap farklarının kullanılmasıyla oluşan gerilme ve yer değiştirme dağılımları gösterilmiştir. Yarıçapsal fark artıkça gerilme değerleri de artmaktadır.

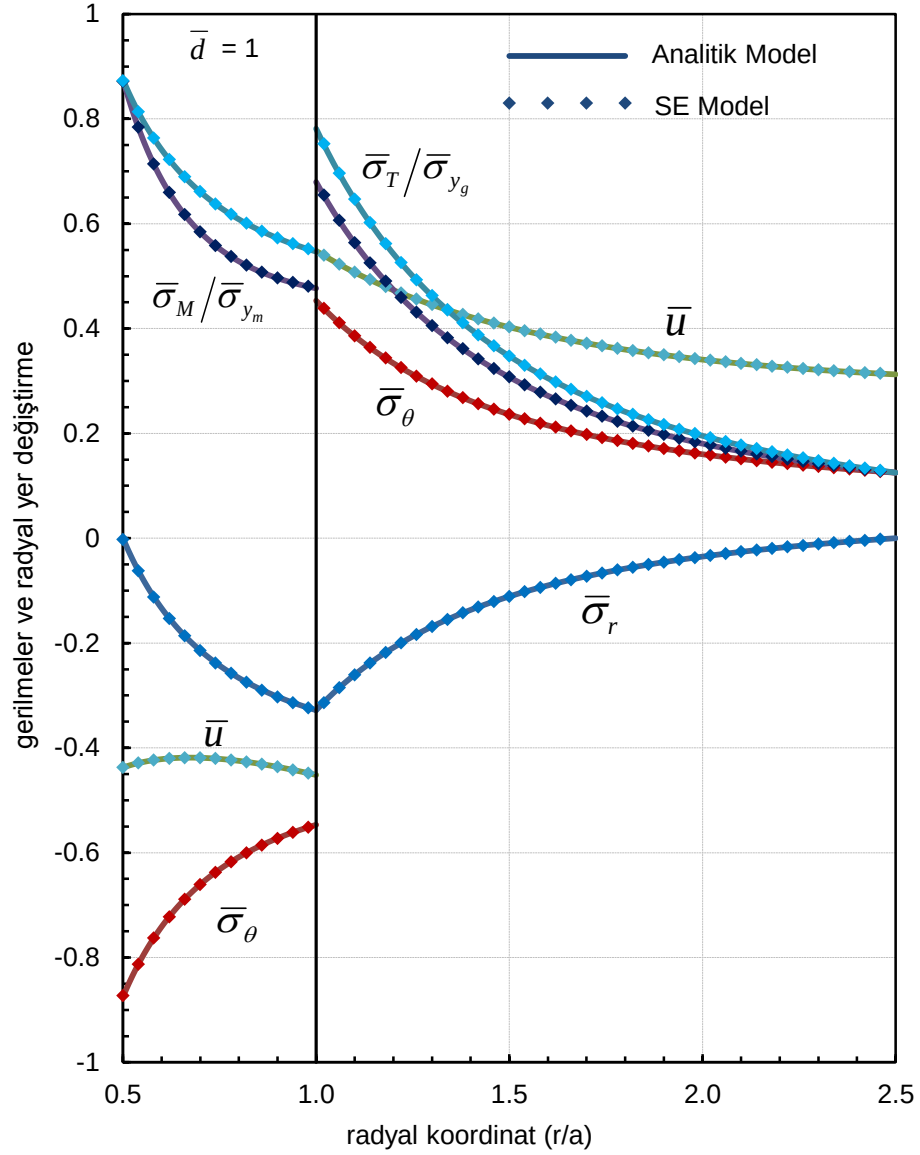


Şekil 7.24. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=0.4$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları



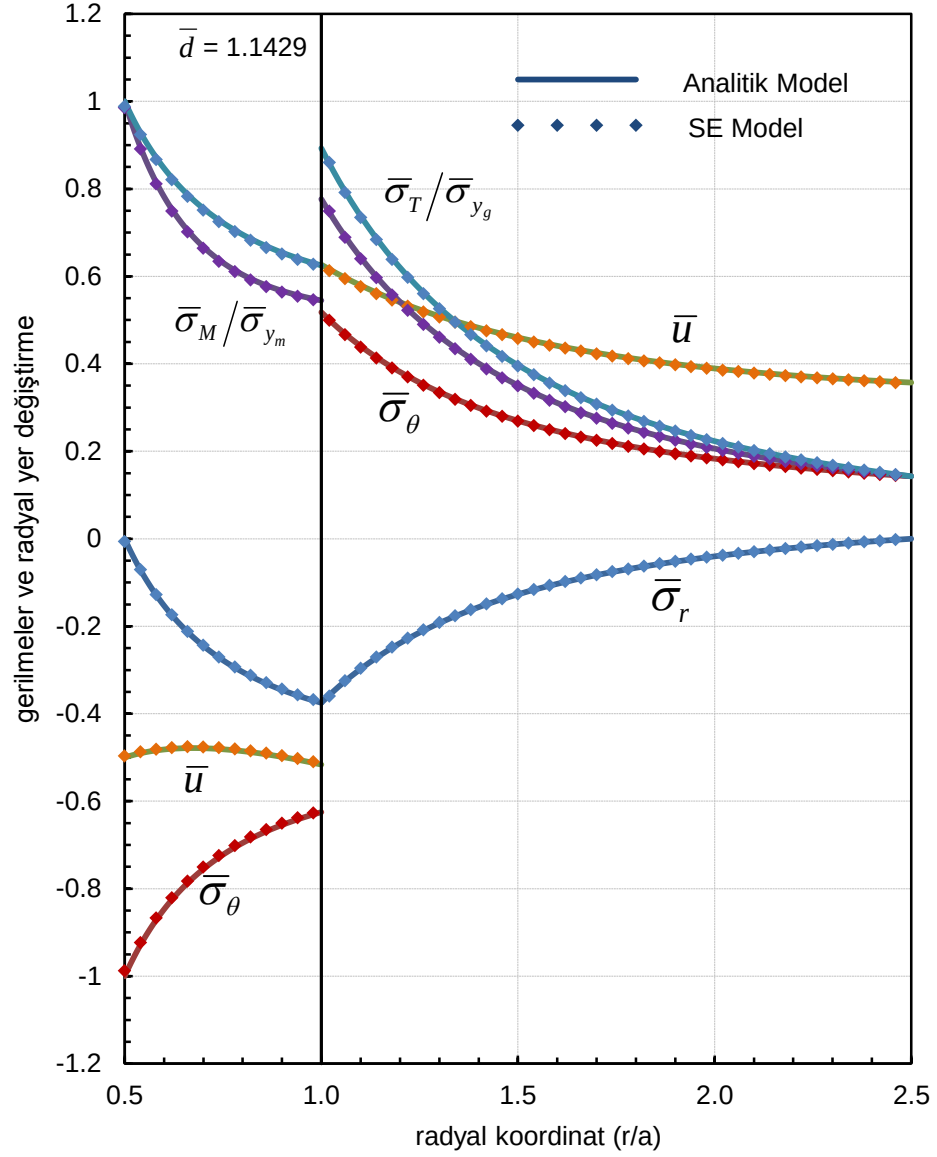
Şekil 7.25. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 0.6$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları





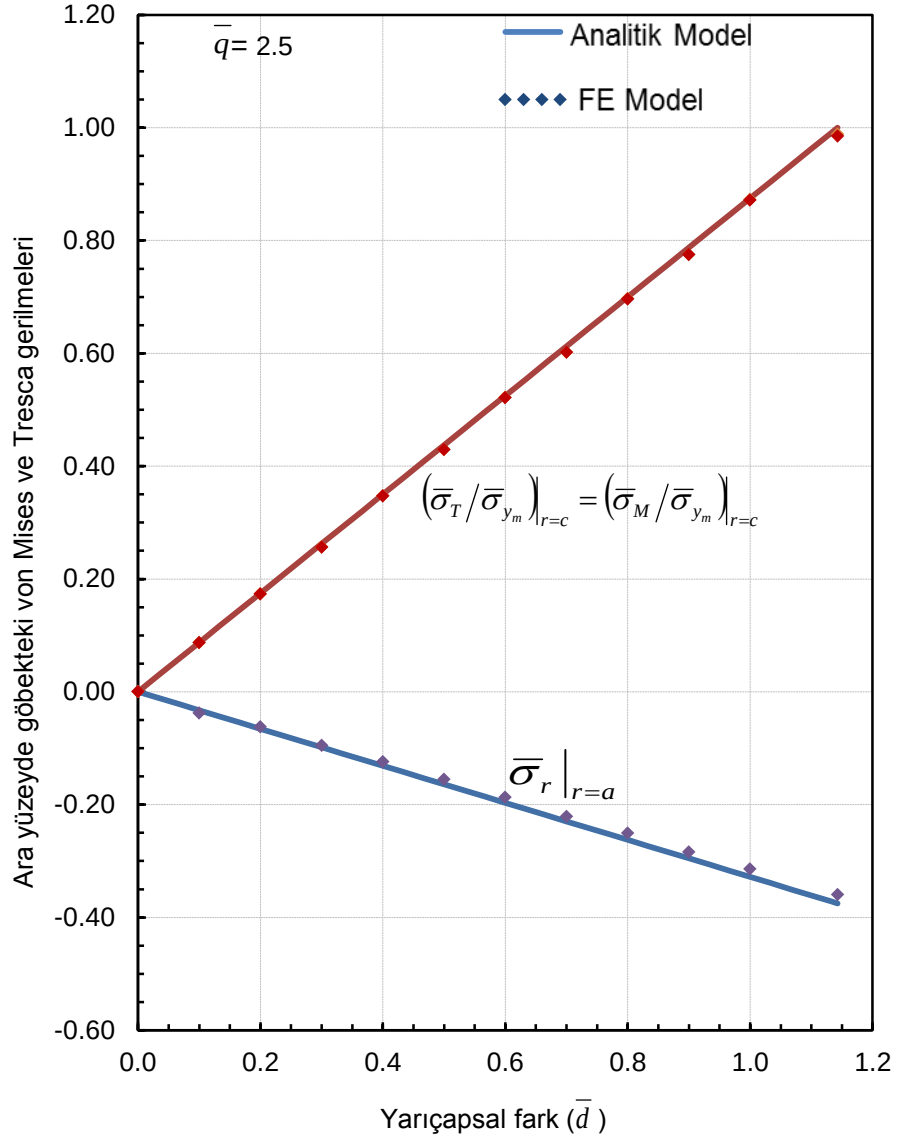
Şekil 7.27. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d}=1$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımları

Yarıçapsal fark $\bar{d}=1.1429$ olduğunda von Mises ve Tresca akma kriterlerine göre göbeğin iç yüzeyinde akma gerçekleşmektedir. Bu iki akma kriterine göre akmanın gerçekleşmesi Tresca akma altıgenin köşe rejimine denk geldiğini göstermektedir. Bu rejimde iki asal gerilme değeri birbirine eşittir. Bu problem ve yükleme durumunda aksenal gerilme ve radyal gerilme $r = a$ 'da sıfırdır. Bu durumda oluşacak gerilme ve yer değiştirme dağılımları Şekil 7.28'de gösterilmiştir. Ayrıca, önceki şekillerde de olduğu gibi, analitik model sonuçları ile sonlu elemanlar sonuçları birbirlerine çok yakındır.



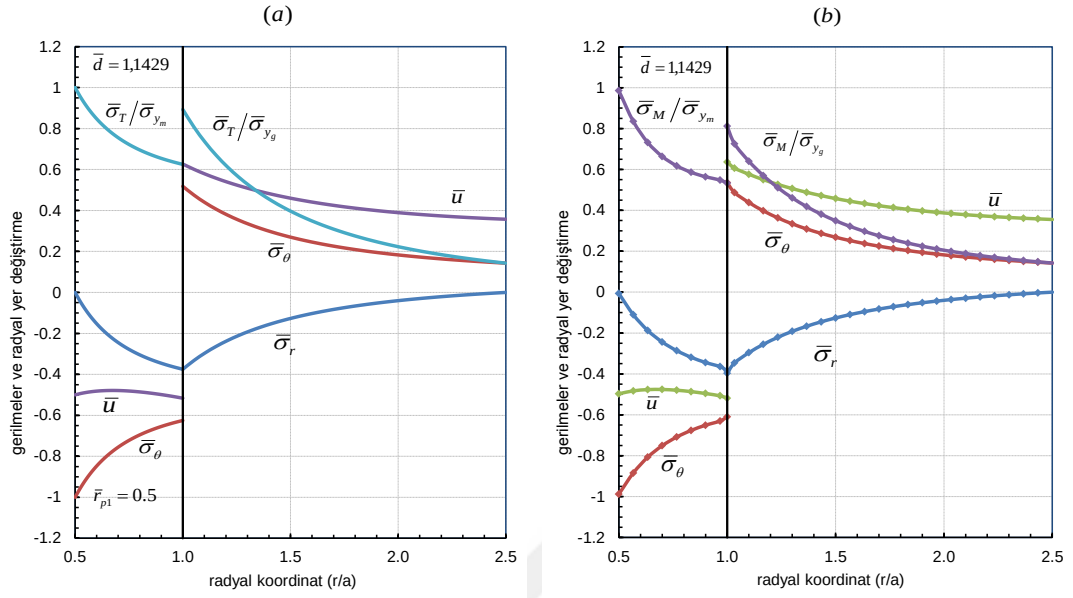
Şekil 7.28. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.1429$ için elastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı

İçi boş mil-göbek sıkı geçme için elastik bölgede göbekteki arayüzey basıncı ve Tresca ile von Mises gerilmelerinin akma gerilerine oranının değişimi Şekil 7.29’da gösterilmiştir. Elastik bölgede milin iç yüzeyinde meydana gelen Tresca, von Mises gerilmeleri ile göbek ve milin temas ettiği noktadaki iç basınç değerleri analitik modelde ve sonlu elemanlar modelinde birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Yarıçapsal fark arttıkça iç basıncın artışı bariz bir şekilde görülmektedir.

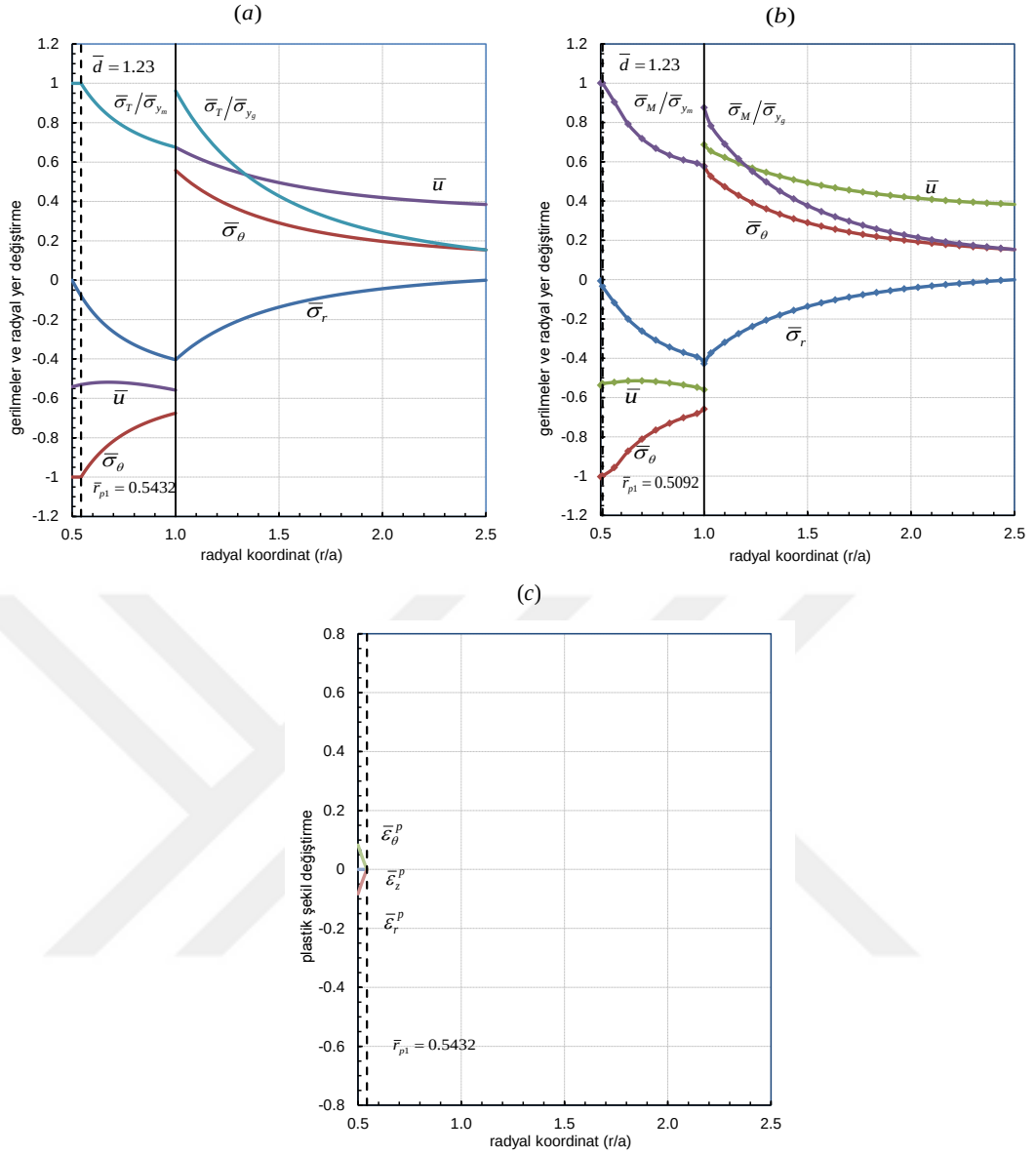


Şekil 7.29. İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik bölgede göbekteki iç basınç ve mildeki Tresca-von Mises gerilmelerinin yarıçapsal fark ile değişimi

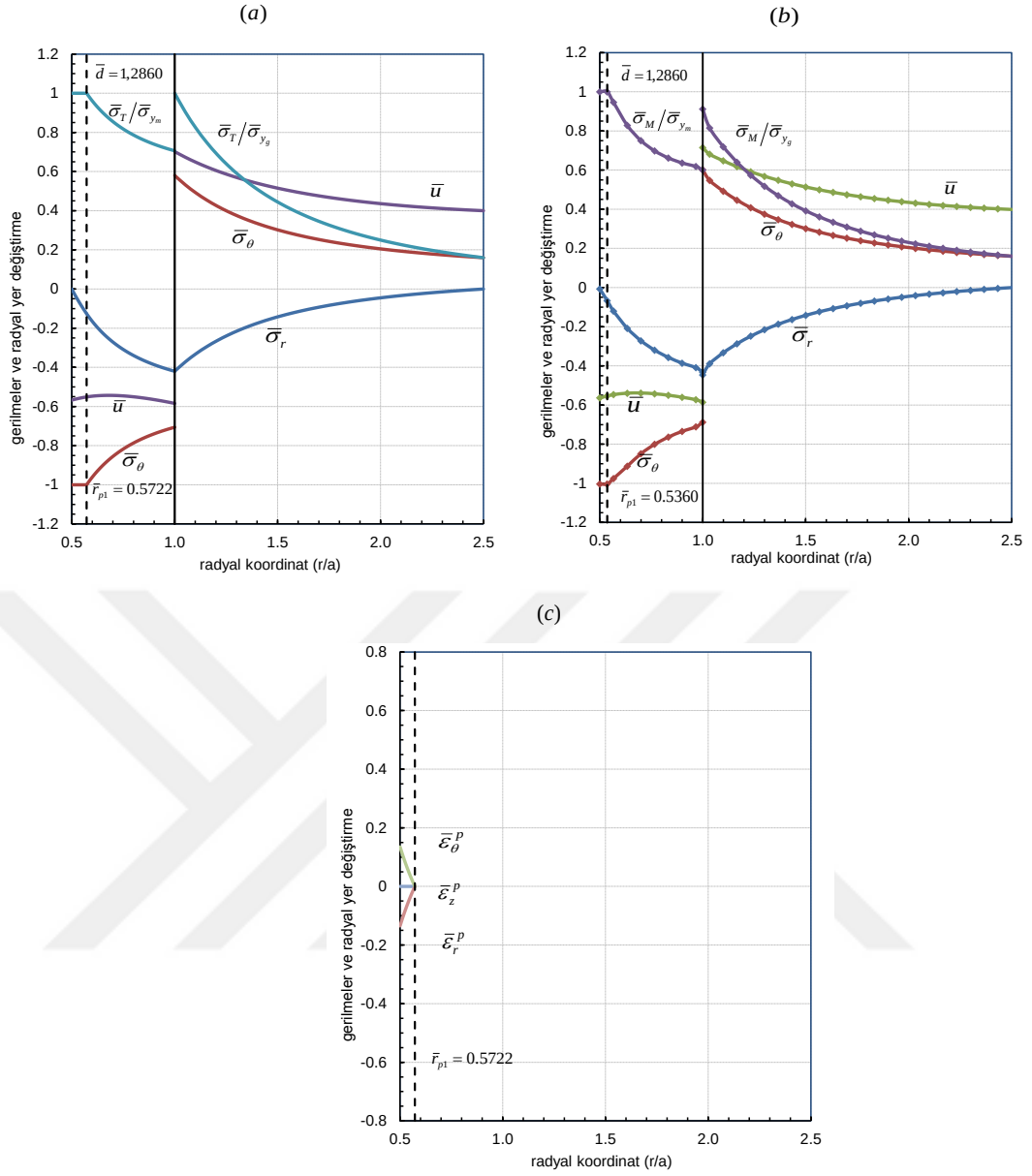
Plastikleşme ilk olarak milin iç yüzeyinde yani $r=c$ 'de meydana gelir. Daha sonra gerilmeler artıkça $r=a$ 'da da akma oluşur. Şekiller 7.30-33'de içi boş mil-göbek sıkı geçmede analitik model ve Sonlu Elemanlar modeli ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Burada r_{p1} milin plastik bölgesi ile elastik bölgesi arasındaki sınır radyal koordinatı göstermektedir. Şekildeki r_{p2} ise göbeğin plastik bölgesi ile elastik bölgesi arasındaki arayüzey koordinatı temsil etmektedir.



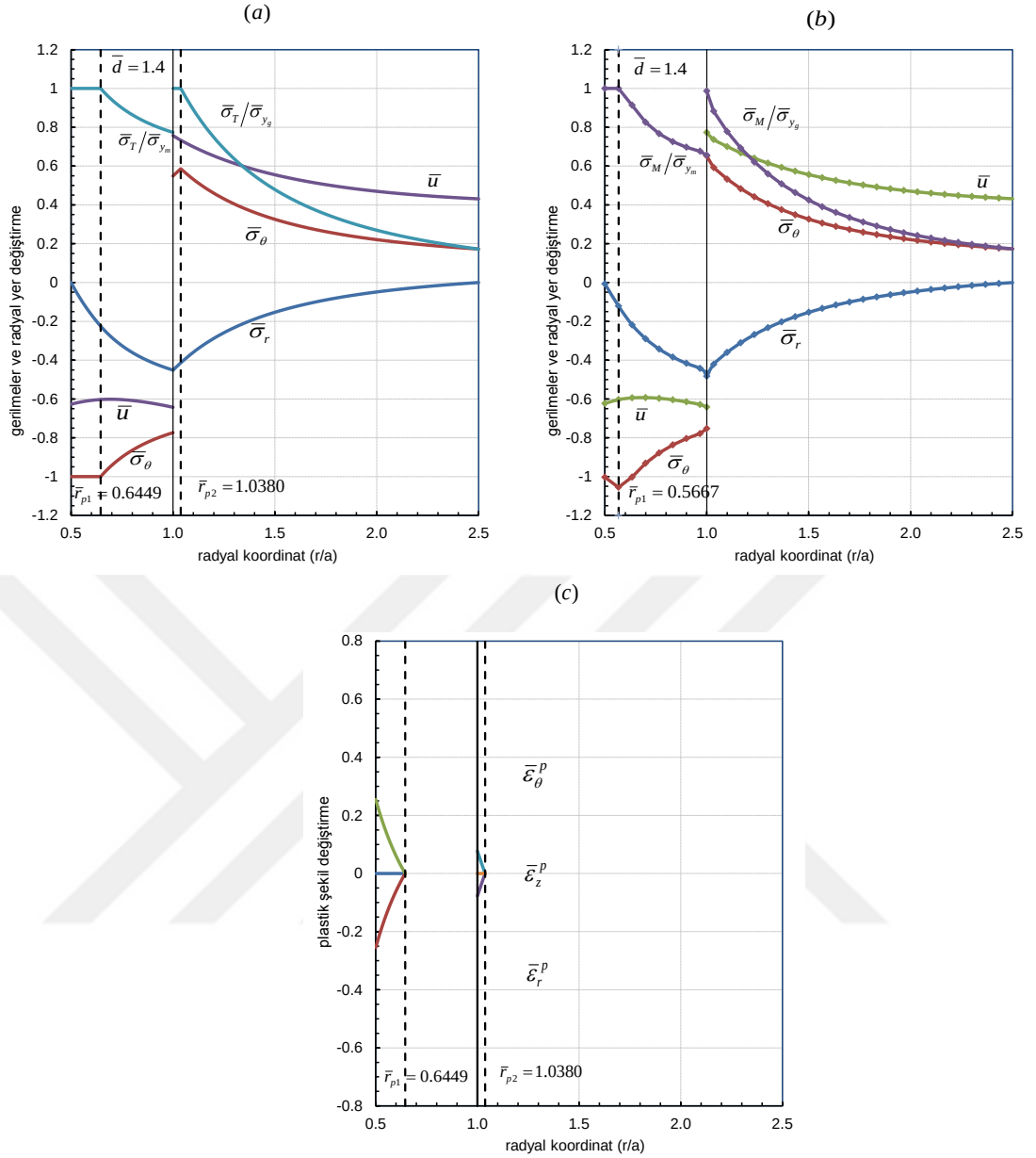
Şekil 7.30. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.1429$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı,



şekil 7.31. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.23$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



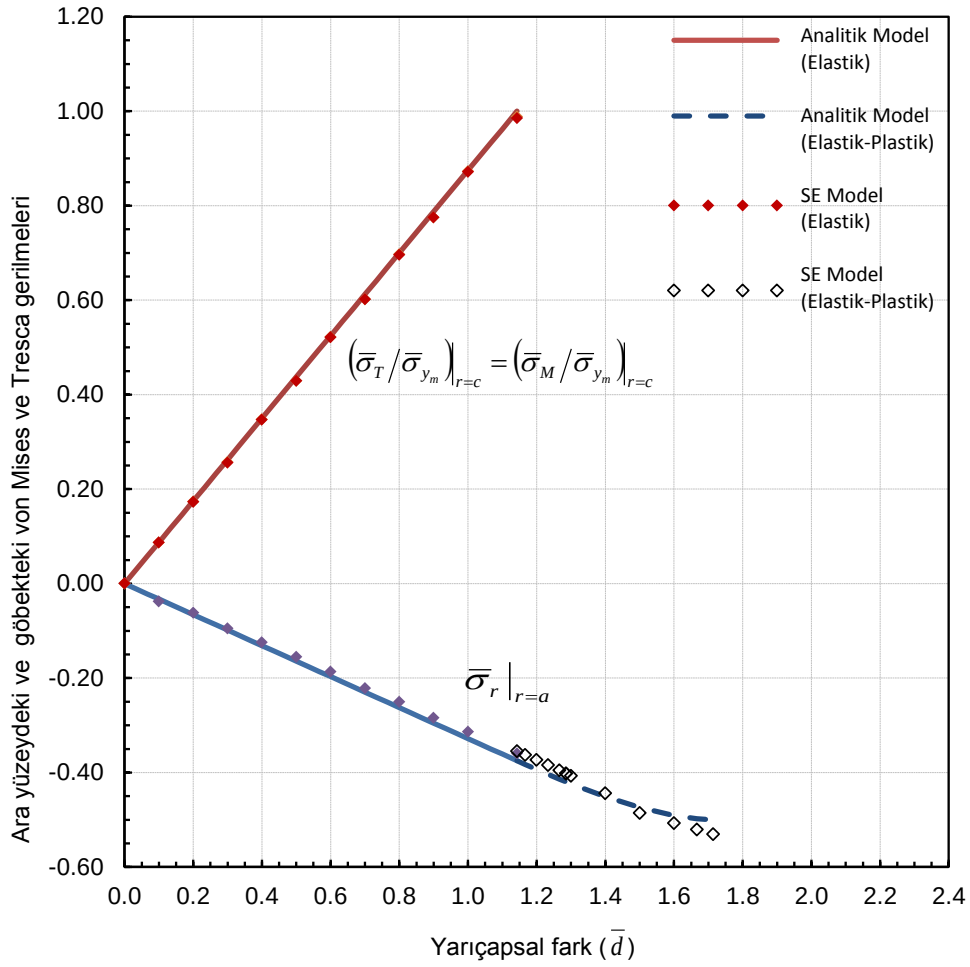
şekil 7.32. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.2860$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 7.33. İçi boş mil-göbek sıkı geçmede $\bar{d} = 1.4$ için (a) Analitik model ve (b) SE model ile elde edilen elastik-plastik gerilme ve radyal yer değiştirme dağılımı, (c) Analitik model için plastik şekil değiştirme dağılımı.

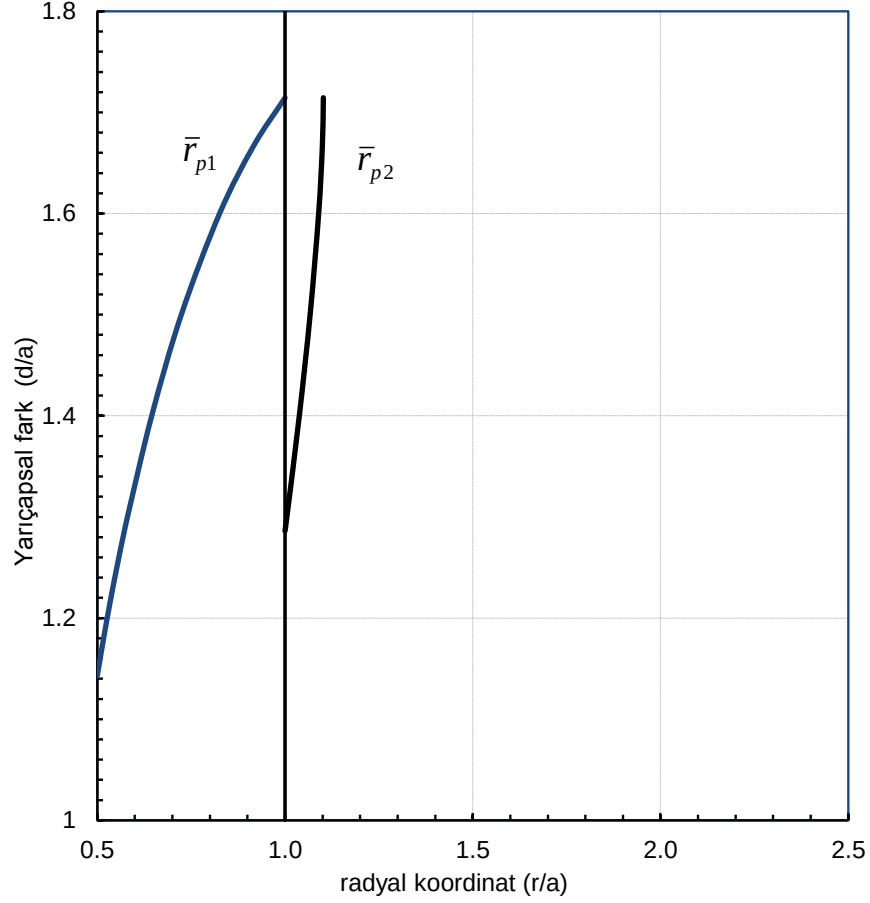
İçi boş mil-göbek sıkı geçme için elastik-plastik bölgelerde göbekteki iç basınç ve mildeki Tresca-von Mises gerilmeleri Şekil 7.34’de gösterilmiştir. Elastik bölgede milin iç yüzeyinde meydana gelen Tresca, von Mises gerilmeleri ile iç basınç değerleri analitik model de ve sonlu elemanlar modelinde birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Fakat plastik bölgeye bakıldığında, iç basınç değerlerinin yarıçapsal fark artıkça analitik modelde ve sonlu elemanlar modelinde birbirlerinden farklı değerler aldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni içi dolu milde olduğu gibi

analitik modelde Tresca akma kriteri kullanılırken, sonlu elemanlar modelinde von Mises modelinin kullanılmasıdır.



Şekil 7.34. İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik bölgelerde göbekteki iç basınç ve mildeki Tresca-von Mises gerilmeleri

İçi boş mil-göbek sıkı geçme için elastik-plastik arayüzey koordinatlarının (r_{p1} ve r_{p2}) yarıçapsal farka göre değişimi Şekil 7.35’de göstermektedir. Grafiğe bakıldığında yarıçapsal fark yaklaşık olarak 1.7 olduğunda milin tamamının plastikleştiği görülmektedir.



Şekil 7.35. İçi boş mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için elastik-plastik arayüzey koordinatlarının yarıçapsal farka göre değişimi

İçi boş mil-göbek sıkı geçmede maksimum gerilmeler milin iç yüzeyinde yani $r=c'$ 'de görülmektedir ve akma ilk olarak burada gerçekleşmektedir. Burada gerilme dağılımı bütün yarıçapsal farklara göre benzer şekilde oluşmaktadır. Milin iç yüzeyinde maksimum olan gerilmeler milin merkezinden mil ile göbeğin temas noktasına doğru azalmaktadır. Bu durum aynı şekilde göbekte de görülmektedir yani temas noktasında maksimum değere ulaşır ve bu bölgeden göbeğin yüzeyine doğru gidildikçe gerilme değeri kademeli bir şekilde azalır. İçi dolu mil-göbek sıkı geçmede ise gerilmeler ve buna bağlı olarak plastikleşme göbeğin iç yüzeyinde yani $r=a'$ 'da meydana gelmektedir. Yarıçapsal fark büyüdükçe yüzey basıncının arttığı gözlemlenmiştir. Yukarıdaki sonuçlar mil ve göbek elemanlarının aynı malzemeden üretilmesi ile oluşacak sonuçları göstermektedir. Bu malzemelerin farklı olması durumunda, örnek bazı malzemeler için elde edilecek kritik parametreler Çizelge 7.1'de ve Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

Malzeme çiftleri olarak içi dolu mil-göbekte olduğu gibi çelik-alüminyum, çelik-bakır, çelik-çelik, bakır-çelik, alüminyum-çelik malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan malzeme çiftlerindeki yarıçapsal farklar analitik ve sayısal model için aynıdır.

Analitik model sonuçlarında; her malzeme çifti için farklı yarıçapsal farklarda Tresca akma kriterine göre milin tamamının plastikleştiği görülmektedir. Tabloya bakıldığında bakır-çelik malzeme çifti için Elastik-Plastik Durum II oluşmadığı görülmektedir. Yani bu malzeme çifti için göbekte akma meydana gelmemektedir.

Bütün malzeme çiftlerinde aynı yarıçapsal farka bakıldığında çelik-çelik malzeme çiftindeki Tresca gerilmesi diğer malzeme çiftlerindeki gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir. Diğer sıkı geçme işlemleri için yarıçapsal farklar aynı olsa dahi mil ile göbek arasındaki yüzey gerilmesi farklı değerlerde ortaya çıkmıştır. Bu da gösteriyor ki çelik-çelik malzeme çiftinin sahip olduğu yüzey basıncı diğer malzeme çiftlerinde oluşan yüzey basıncından daha büyüktür. Farklı malzeme çiftlerinden aynı yüzey basıncı elde etmek için farklı yarıçapsal farklar kullanılabilir. Daha öncede belirtildiği gibi sıkı geçme bağlantılarında gerilme değerini etkileyen en önemli faktörler yarıçapsal fark ve malzemelerin mekanik özellikleridir.

Çizelge 7.3. İçi boş mil-göbek için malzeme çiftleri farklı olan sıkı geçme işleminin analitik model sonuçları

İçi Boş Mil-Göbek Bağlantısında Kullanılan Malzeme Çifti	E_m/E_g	σ_{ym}/σ_{yg}	$\bar{d}$	Durum	Boyutsuz Yüzey Basıncı	Plastikleşme				
						σ_r/σ_y	$\bar{r}_{p1}$	Mildeki Plastikleşme % si	$\bar{r}_{p2}$	Göbekteki Plastikleşme % si
Çelik - Alüminyum	2.778	1.09	0.606061	Elastik durum	-0.09888	0.26368	-	-	-	-
$E_m = 200$ GPa			1.212121	Elastik durum	-0.19776	0.52735	-	-	-	-
$E_g = 72$ GPa			1.818182	Elastik durum	-0.29664	0.79103	-	-	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			2.298497	Elastik D. ($r = c'$ 'de akma)	-0.375	1	0.5	%0	-	-
$\sigma_{yg} = 503$ MPa			2.354545	Elastik-Plastik durum 1 ve $r=a'$ 'da yeni akma	-0.384	1	0.513	%3	1	-
$v_m = 0.29$			3.2	Elastik-Plastik durum 2	-0.488	1	0.806	%61	1.15	%10
$v_g = 0.33$			3.395127	Elastik-Plastik durum 2 ve milin tamamı plastik	-0.5	1	1	%100	1.169	%11
Çelik-Çelik	1	1.00	0.6	Elastik durum	-0.19687	0.525	-	-	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.8	Elastik durum	-0.2625	0.7	-	-	-	-
$E_g = 200$ GPa			1	Elastik durum	-0.32813	0.875	-	-	-	-
$\sigma_{ys} = 200$ Mpa			1.142857	Elastik D. ($r = c'$ 'de akma)	-0.375	1	0.5	%0	-	-
$\sigma_{ys} = 200$ MPa			1.286077	Elastik-Plastik durum 1 ve $r=a'$ 'da yeni akma	-0.42	1	0.572	%14	1	-
$v_m = 0.29$			1.714467	Elastik-Plastik durum 2 ve milin tamamı plastik	-0.5	1	1	%100	1.102	%7
$v_g = 0.29$										
Bakır-Çelik	0.575	0.55	0.251366	Elastik durum	-0.10941	0.29176	-	-	-	-
$E_m = 115$ GPa			0.502732	Elastik durum	-0.21882	0.58352	-	-	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.754098	Elastik durum	-0.32823	0.87528	-	-	-	-
$\sigma_{ym} = 305$ Mpa			0.861549	Elastik D. ($r = c'$ 'de akma)	-0.375	1	0.5	%0	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			0.940292	Elastik-Plastik durum 1	-0.40795	1	0.55	%10	-	-
$v_m = 0.33$			1.005464	Elastik-Plastik durum 1	-0.43289	1	0.6	%20	-	-
$v_g = 0.29$			1.06358	Elastik-Plastik durum 1	-0.45289	1	0.65	%30	-	-
	0.36	0.91	1.156447	Elastik-Plastik durum 1	-0.47917	1	0.75	%50	-	-
			1.315273	Elastik-Plastik durum 1 ve milin tamamı plastik	-0.5	1	1	%100	-	-
Alüminyum-Çelik			0.238569	Elastik durum	-0.12309	0.32823	-	-	-	-
$E_m = 72$ GPa			0.477137	Elastik durum	-0.24617	0.65646	-	-	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.715706	Elastik durum	-0.36926	0.9847	-	-	-	-
$\sigma_{ym} = 503$ Mpa			0.726829	Elastik D. ($r = c'$ 'de akma)	-0.375	1	0.5	%0	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			0.793732	Elastik-Plastik durum 1	-0.40795	1	0.55	%10	-	-
$v_m = 0.33$			0.85102	Elastik-Plastik durum 1	-0.43334	1	0.6	%20	-	-
$v_g = 0.29$			0.9188	Elastik-Plastik durum 1 ve $r=a'$ 'da yeni akma	-0.45924	1	0.67	%34	1	%0
			0.98474	Elastik-Plastik durum 2	-0.47917	1	0.75	%50	1	%0
			1.137706	Elastik-Plastik durum 2 ve milin tamamı plastik	-0.5	1	1	%100	1.046	%3

Sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlara bakıldığında; milde ve göbekte akma sadece Çelik-Alüminyum çiftinde meydana gelmiştir yani Elastik-Plastik Durum II sadece bu malzeme çiftinde oluşmaktadır. Diğerlerinde ise akma milde gerçekleşmiştir.

Analitik model sonuçlarında bütün malzeme çiftlerinde aynı yarıçapsal farka bakıldığında Çelik-Çelik malzeme çiftindeki von Mises gerilmesi diğer malzeme çiftlerindeki gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir. Çelik-Çelik malzeme çifti hem analitik hem de sayısal model sonuçlarında en yüksek yüzey gerilmesine sahip olduğunu göstermektedir. Diğer sıkı geçme işlemleri için çapsal farklar aynı olsa dahi mil ile göbek arasındaki yüzey gerilmesi farklı değerde olduğu tabloda görülmektedir. Tabloda en fazla plastikleşme yüzdesine sahip olan malzeme çifti ise alüminyum-çeliktir.

Çizelge 7.4. İçi boş mil-göbek için malzeme çiftleri farklı olan sıkı geçme işleminin sonlu elemanlar modeli sonuçları

İçi Boş Mil-Göbek Bağlantısında Kullanılan Malzeme Çifti	E_m/E_g	σ_{ym}/σ_{yg}	İçi Boş Mil						
			$\bar{d}$	Boyutsuz Yüzey basıncı	Plastikleşme				
					σ_T/σ_Y	Durum	$\bar{r}_{p1}$	$\bar{r}_{p2}$	Plastikleşme %' si
Çelik - Alüminyum	2.778	1.09	0.606060606	-0.090956182	0.190903636	Elastik durum	-	-	-
$E_m = 200$ GPa			1.212121212	-0.179264545	0.3784	Elastik durum	-	-	-
$E_g = 72$ GPa			1.818181818	-0.270961818	0.56998	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			2.29849697	-0.344310909	0.722665455	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{yg} = 503$ MPa			2.35454545	-0.353958182	0.812242545	Elastik durum			
$\nu_m = 0.29$			3.2	-0.473978182	1	Elastik-Plastik durum 2	0.68	1.08	%5
$\nu_g = 0.33$			3.395127	-0.495783636	1	Elastik-Plastik durum 2	0.74	1.1	%7
Çelik-Çelik	1	1.00	0.6	-0.1868495	0.39106	Elastik durum	-	-	-
$E_m = 200$ GPa			0.8	-0.2505645	0.523045	Elastik durum	-	-	-
$E_g = 115$ GPa			1	-0.3139695	0.654425	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{ym} = 550$ MPa			1.14285715	-0.3598635	0.74854	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{yg} = 305$ MPa			1.286076667	-0.406466	1	Elastik-Plastik durum 1	0.52	-	%5
$\nu_m = 0.29$			1.714466667	-0.5507	1	Elastik-Plastik durum 1	0.72	-	%44
$\nu_g = 0.33$									
Bakır-Çelik	0.575	0.55	0.25136612	-0.104318689	0.119404545	Elastik durum	-	-	-
$E_m = 115$ GPa			0.50273224	-0.20786623	0.239683636	Elastik durum	-	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.754098361	-0.307157377	0.355841818	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{ym} = 305$ Mpa			0.861549145	-0.347763934	0.404332727	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			0.9402915	-0.376963934	1	Elastik-Plastik durum 1	0.51	-	%2
$\nu_m = 0.33$			1.005464	-0.399940984	1	Elastik-Plastik durum 1	0.55	-	%11
$\nu_g = 0.29$			1.06358	-0.419301639	1	Elastik-Plastik durum 1	0.57	-	%13
			1.156447	-0.448144262	1	Elastik-Plastik durum 1	0.63	-	%26
	1.315273	-0.487488525	1	Elastik-Plastik durum 1	0.75	-	%51		
Aluminyum-Çelik	0.36	0.91	0.238568588	-0.116010537	0.220890909	Elastik durum	-	-	-
$E_m = 72$ GPa			0.477137177	-0.22384493	0.432323636	Elastik durum	-	-	-
$E_g = 200$ GPa			0.715705765	-0.334964215	0.647034545	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{ym} = 503$ Mpa			0.726828596	-0.340318091	0.657203636	Elastik durum	-	-	-
$\sigma_{yg} = 550$ MPa			0.793732	-0.373212724	1	Elastik-Plastik durum 1	0.52	-	%3
$\nu_m = 0.33$			0.85102	-0.398457256	1	Elastik-Plastik durum 1	0.56	-	%11
$\nu_g = 0.29$			0.9188	-0.426047714	1	Elastik-Plastik durum 1	0.59	-	%18
			0.9847395	-0.45244334	1	Elastik-Plastik durum 1	0.63	-	%27
	1.137706	-0.508747515	1	Elastik-Plastik durum 1	0.77	-	%53		

8. SONUÇ

Bu çalışmada sıkı geçme yapısına ait mil ve göbek elemanlarının farklı yarıçapsal fark ile oluşacak elastik ve elastik-plastik deformasyon davranışları için analitik ve sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada sadece içi boş değil aynı zamanda içi dolu mil kullanılarak elde edilen yapı için analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli için Abaqus Programı kullanılmıştır. Yarıçapsal farkın değişmesine karşılık yüzey basıncında meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir. Mil ve göbek malzemesi olarak da çelik-çelik malzeme çifti seçilmiş ve sonuçlar grafikler halinde detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bununla birlikte mil ve göbek malzemesi olarak çelik, bakır ve alüminyum seçilip sonuçlar tablo halinde sunulmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçları ile analitik model sonuçları birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Mil ve göbekte meydana gelen gerilmeler grafiklerle detaylıca gösterilmiş ve analizi yapılmıştır.

İçi boş mil-göbek sıkı geçme işleminde elde edilen grafiklerde uniform olmayan bir gerilme dağılımı gözlemlenmektedir. İçi boş mil göbek bağlantısında maksimum gerilmeler milin iç yüzeyinde yani $r=c$ 'de görülmektedir ve akma ilk olarak burada gerçekleşmektedir. Artan yarıçapsal farkın etkisiyle milin iç yüzeyinde Plastik bölge 2 oluşur ve dış yüzeye doğru ilerler. Seçilen malzemelere bağlı olarak yüksek yarıçapsal fark değerlerinde gövdenin iç yüzeyinde oluşan plastik bölge plastik bölge 1 olarak tanımlanan bir bölgedir.

İçi dolu mil-göbek bağlantısında ise maksimum gerilmeler göbeğin iç yüzeyinde yani $r=a$ 'da görülmektedir. Plastik bölge, yarıçapsal farkın artması ile gövdenin dış yüzeyine doğru ilerlemektedir ve bu bölge analitik modelde tanımlanan Plastik bölge 1'dir. Burada elde edilen grafiklerde gerilme dağılımı bütün yarıçapsal farklara göre benzer şekildedir. İçi boş mil-göbek bağlantısında milin iç yüzeyinde maksimum olan gerilmeler kontak noktasına doğru azalmaktadır. Bu durum aynı şekilde göbekte de görülmektedir yani kontak noktasında maksimum değere ulaşır ve bu bölgeden göbeğin yüzeyine doğru gidildikçe gerilme değeri azalır.

İçi dolu mil-göbek sıkı geçme bağlantısı için gerilme şiddeti yarıçapsal fark artıkça artar. Sıkı geçme bağlantılarında gerilme değerini etkileyen en önemli

faktörler yarıçapsal fark ve seçilen malzemelerin mekanik özellikleridir. Farklı yarıçapsal farklarla elde edilen aynı basıncı, malzeme özellikleri değiştirilerek elde edilebilir.

İçi dolu mil-göbek için çelik-alüminyum, çelik-bakır, çelik-çelik, bakır-çelik, alüminyum-çelik malzeme çiftleri için sıkı geçme işleminin analitik ve sonlu elemanlar modeli sonuçlarına bakıldığında; hem analitik hem de sonlu elemanlar model sonuçlarında bütün malzeme çiftleri için Elastik-Plastik Durum I gerçekleşmiştir. Yani sadece göbekte plastikleşme meydana geldiği görülmektedir. Milde herhangi bir akma söz konusu değildir.

Analitik model için göbekte meydana gelen akmanın bütün malzeme çiftleri için hedeflendiği gibi göbekte %30 plastikleşme meydana gelecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Ancak sonlu elemanlar modeli için Abaqus sonuçlarında göbeğin plastikleşme yüzdeleri farklı olmaktadır. Hem analitik hem de Sonlu elemanlar model sonuçlarında bütün malzeme çiftlerinde aynı yarıçapsal farka bakıldığında çelik-çelik malzeme çiftinde ki gerilmeler diğer malzeme çiftlerindeki gerilmelerden yüksek olduğu görülmektedir.

İçi boş mil-göbek için çelik-alüminyum, çelik-bakır, çelik-çelik, bakır-çelik, alüminyum-çelik malzeme çiftleri için sıkı geçme işleminin analitik ve sonlu elemanlar modeli sonuçlarına bakıldığında; Analitik model sonuçlarında her malzeme çifti için farklı yarıçapsal farklarda Tresca akma kriterine göre milin tamamının plastikleştiği görülmektedir. Göbekte ise bakır-çelik çifti hariç diğerlerinde plastikleşme meydana gelmiştir. Yani Elastik-Plastik Durum II bakır-çelik çifti hariç diğerlerinde oluşmuştur. Sonlu elemanlar model sonucunda ise Elastik-Plastik Durum II sadece çelik-alüminyum çiftinde meydana gelmiştir. Yani sadece bu malzeme çiftinde hem milde hem de göbekte plastikleşme meydana gelmiştir. Diğer malzeme çiftleriyle yapılan sıkı geçme de Elastik-Plastik Durum I oluşmaktadır. Analitik model ve sonlu elemanlar model sonuçlarına bakıldığında çelik-çelik malzeme çiftindeki yüzey gerilmesinin en fazla olduğu görülmektedir.

Daha öncede belirtildiği gibi sıkı geçme bağlantılarında gerilme değerini etkileyen en önemli faktörler (iç ve dış çapların sabit olduğu göz önüne tutulduğunda) yarıçapsal fark ve malzemelerin mekanik özellikleridir.

Montaj aşamasından sonra gerilmeler, ısı yük ve dönme gibi etkilere maruz kalan mil göbek sisteminin daha fazla plastikleşmemesi çok önemlidir. Analitik modellerle bütün bu değişkenlerin durumunu sağlıklı bir şekilde tespit etmek mümkün değildir. Fakat sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bütün faktörleri bütün değişkenleri kapsamlı ve hassas bir şekilde doğru verilerle elde etmek mümkündür.

Geometri basit olduğu zaman analitik denklemler yardımıyla mil ile göbek arasındaki ilişkiyi ve yüzey basıncın tespiti mümkündür. Ama daha öncede belirtildiği gibi montaj yapısı delik, çentik, kama yuvası gibi karışık bir yapıya sahipse sonlu elemanlar modelleme yöntemi ile daha hassas sonuçlar elde edilebilir.



9. KAYNAKLAR

- [1] I. Cayiroglu, **Makine Elemanları ders notu**, Karabük Üniversitesi.
- [2]http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/49092/34881/5_s%C4%B1k%C4%B1_ge%C3%A7meler.pdf (sayfa ziyareti, pdf dosyası 18.01.2017)
- [3] Akkurt, M. **Makina Elemanları Cilt: 1-2**. Birsen Yayınevi, İstanbul, (2000).
- [4] Rende, Hikmet; Güven, Fatih. **Sıkı Geçme Bağlantılarında Malzemeye Bağlı Yüzey Pürüzlülüğü Kayıp Katsayısının Belirlenmesi**. Engineer & The Machinery Magazine, 2015, 56.665.
- [5][https://Sayfam.Btu.Edu.Tr/Upload/Dosyalar/14549713728.Bolum\(Mil-Gobek-Baglantilari\)_8_12_2014.Pdf](https://Sayfam.Btu.Edu.Tr/Upload/Dosyalar/14549713728.Bolum(Mil-Gobek-Baglantilari)_8_12_2014.Pdf) (sayfa ziyareti, pdf dosyası 18.01.2017)
- [6]Aleksandrova, Nelli. **Analytical Modeling in Deformation Analysis of Interference-Fit Structures**. Structures 6, 2016, 30-36.
- [7] M.Y. Sun, S.P. Lu, D.Z. Li, Y.Y. Li, X.G. Lang, S.Q. Wang, **Three-dimensional finite element method simulation and optimization of shrink fitting process for a large marine crankshaft**, Materials & Design 31, 2010, 4155–4164.
- [8]Doležel, Ivo; Kotlan, Václav; Ulrych, Bohuš. **Design of joint between disk and shaft based on induction shrink fit**. Journal of Computational and Applied Mathematics 270,2014, 52-62.
- [9]Sackfield, A. **A shrink-fit shaft subject to torsion**. European Journal of Mechanics-A/Solids 21, 2002, 73-84.
- [10]H. Lippmann, **The effect of a temperature cycle on the stress distribution in a shrink fit**, International Journal of Plasticity 8, 1992, 567-582.
- [11]C.E. Truman, J.D. Booker, **Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly**, Engineering Failure Analysis 14, 2007, 557-572.
- [12]Öztürk, Fahrettin; Tse-Chien, W. O. O. **Simulations of Interference and Interfacial Pressure for Three Disk Shrink Fit Assembly**. Gazi University Journal of Science 23, 2010, 233-236.
- [13]Wang, Yiren; Lee, Shih-Hao. **Design and Analysis on Interference Fit in the Hardwood Dowel-glued Joint by Finite Element Method**. Procedia Engineering 79, 2014, 166-172.
- [14] Sen S, Aksakal B. **Stress analysis of interference fitted shaft-hub system under transient heat transfer conditions**. Mater Des 25, 2004,407–17.
- [15] White, D. J.; Humpherson, J. **Finite-element analysis of stresses in shafts due to interference-fit hubs**. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 4, 1969, 105-114.
- [16]U. Gamer, **The elastic-plastic shrink fit with supercritical interference**, Acta Mechanica 61, 1986, 1–14.

- [17] U. Gamer, **The Rotating Elastic-Plastic Shrink Fit with Hardening**, Acta Mechanica 61, 1986, 15–27.
- [18] U. Gamer, **The shrink fit with nonlinearly hardening elastic-plastik hub**, Trans. ASME 54, 1987, 474–476.
- [19] Y. Orçan, U. Gamer, **The shrink fit consisting of elastic hollow shaft and nonlinearly hardening elastic-plastic hub**, Acta Mechanica 81, 1990, 97–108.
- [20] Guven U. **The shrink fit with elastic-plastik hub exhibiting variable thickness**. ActaMech 89, 1991;65–72.
- [21] Gao X-L, Atluri SN. **An elasto-plastic analytical solution for the shrink-fit problem with a thin strain-hardening hub and an elastic solid shaft**. MathMech Solids 2, 1997,335–49.
- [22] Gamer, U.; Lance, Richard H. **Stress distribution in a rotating elastic-plastic tube**. Acta Mechanica 50, 1983, 1-8.
- [23] Kollmann, F.G.: **Die Auslegung elastisch-plastisch beanspruchter Querverbindungen**. Forsch. Ing.-Wes. 44, 1978, 1-11.
- [24] Kovacs A. **Thermal stresses in a shrink fit due to an inhomogeneous temperature distribution**. Acta Mech 105, 1994,173–87.
- [25] U. Guven, **Stress distribution in shrink fit with elastic-plastik hub exhibiting variable thickness**, Int. J. Mech. Sci., 35, 1993, 39–46.
- [26] Mack W, Bengeri M. **Thermal assembly of an elastic-plastik shrink fit with solid inclusion**. Int J Mech Sci 36, 1994, 699–705.
- [27] W. Mack, M. Plöchl, **Transient heating of a rotating elastic-plastic shrink fit**, International Journal of Engineering Science 38, 2000,921-938.
- [28] E. Arslan, W. Mack, **Shrink fit with solid inclusion and functionally graded hub**, Composite Structures 121, 2015, 217-224.
- [29] Baykara, C.; Güven, U. **The shrink fit with plastik orthotropic hollow inclusion**. Journal of Reinforced Plastics and Composites 25, 2006, 1117-1123.
- [30] Y. Zhang, B. McClain, X.D. Fang, **Design of interference fits via finite element method**, International Journal of Mechanical Sciences 42, 2000, 1835-1850.
- [31] A. Özel, Ş. Temiz, M.D. Aydin, S. Şen, **Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method**, Materials and Design 26, 2005, 281–289
- [32] Mcmillan, M. D., et al. **Analysis of increasing torque with recurrent slip in interference-fits**. Engineering Failure Analysis 62, 2016, 58-74.
- [33] Vasilya, Sinitsyna; Anton, Sinitsyn. **Finite-Element Analysis of Parts Stress State of Tight Joint Assembled by Press Fitting**. Modern Mechanical Engineering 4, 2014,198.

- [34] Golbakhshi, Hossein; Namjoo, Moslem; Mohammadi, Meisam. **A 3D comprehensive finite element based simulation for best Shrink Fit design process.** Mechanics & Industry 14, 2013,: 23-30.
- [35] Buczkowski, Ryszard; Kleiber, Michal. **A study of the surface roughness in elasto-plastic shrink fitted joint.** Tribology International 98, 2016, 125-132.
- [36] Wachsmuth, Gerd; Lätzer, Michael; Leidich, Erhard. **Analytical computation of multiple interference fits under elasto- plastic deformations.** ZAMM- Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 94, 2014, 1058-1064.
- [37] Kim, H. Y., et al. **Development of optimization technique of warm shrink fitting process for automotive transmission parts (3D FE analysis).** Journal of materials processing technology 187, 2007, 458-462.
- [38] F. Ozturk, **Finite-element modelling of two-disc shrink fit assembly and an evaluation of material pairs of discs,** Proc.ImechE Vol.225 PartC: J. Mechanical Engineering Science, 2011, 263-273.
- [39] Marouani, Haykel; Hassine, Tarek. **Finite Element Investigations of the Shrink-Fit Assembly with Radial Cyclic Load.** In: Design and Modeling of Mechanical Systems-II. Springer International Publishing, 2015,213-220.
- [40] Kollmann F.G. **Welle-Nabe-Verbindungen. Konstruktionsbücher,** Bd. 32. Berlin: Springer; (1984).
- [41] Abaqus 6.9 Documentation, **Abaqus Analysis User's Manual,** 24.1.1. Solid (Continuum) elements.(2009).
- [42] <http://www.matweb.com> (MatWeb) (sayfa ziyareti, 18.01.2017)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İlyas BOZKURT

Doğum Yeri ve Tarihi: Adıyaman-1990

Adres: Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği

E-Posta : ilyasbozkurtQ02mail.com

Lisans: Aksaray Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü (2008-2012)

