

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

**HALKA BASMA DENEYİNDE PEKLEŞME
ÜSTELİNİN SÜRTÜNME KALİBRASYON EĞRİLERİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolga GÜNEŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ

Temmuz 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HALKA BASMA DENEYİNDE PEKLEŞME
ÜSTELİNİN SÜRTÜNME KALİBRASYON EĞRİLERİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ


Tolga GÜNEŞ

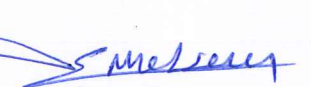
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 18.07.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.

Murat ÖZSOY
Jüri Başkanı


Dr. Öğr. Üyesi Sunal
Ahmet PARASIZ
Üye


Dr. Öğr. Üyesi Emre
ESENER
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Tolga GÜNEŞ

18.07.2018

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aŐamasında değerli fikir ve tecrübelerini benimle paylaŐarak desteğini esirgemeyen, lisans ve yksek lisans eğitimim boyunca araŐtırmalarımnda karŐılaŐtıęım tkm zorlukları özmemeye yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ'a

Eęitim hayatım boyunca beni her yönden destekleyen, en zor anlarımda yanımda olan ANNEME, BABAMA ve ABİME

Sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Metallere Şekil Verme Sırasında Sürtünme.....	4
2.1.1 Sürtünme modelleri.....	6
2.1.1.1. Amonton ve Coulomb sürtünme kanunu.....	6
2.1.1.2. Kayma sürtünme kanunu	7
2.2. Metallere Şekil Verme İşleminde Yağlama.....	8
2.2.1. Kuru durum.....	8
2.2.2. Hidrodinamik yağlama.....	9
2.2.3. Sınır yağlama.....	9
2.3. Halka Basma Deneyi ile İlgili Önceki Çalışmalar.	10
BÖLÜM 3.	
SAYISAL VE ANALİTİK YÖNTEMLER	23
3.1. Halka Basma Deneyi.....	23

3.2. Halka Basma Deneyinin Matematiksel Analizi.....	25
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	28
BÖLÜM 4.	
SAYISAL UYGULAMALAR.....	31
4.1. Halka Basma Numunesinin Boyutlandırılması ve Modellenmesi	31
4.2. Malzeme Modeli	34
4.3. Sınır Şartlarının Uygulanması ve Sonuçlar	35
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

P	: Sürtünme kuvveti
N	: Normal kuvveti
μ	: Sürtünme katsayısı
σ_n	: Normal gerilmesi
A	: Temas alanı
τ	: Sürtünme gerilmesi
k	: Kayma akma gerilmesi
σ_0	: Basit çekme halinde akma gerilmesi
μ_{max}	: Maximum sürtünme katsayısı
m	: Sürtünme faktörü
q	: Normal basıncı
OD	: Numunenin dış çapı
ID	: Numunenin iç çapı
H	: Numunenin yüksekliği
PMT	: Fiziksel model tekniği
α	: Eğilme açısı
f	: Fonksiyon
$\frac{l}{h}$: Plakanın genişliğinin yüksekliğe oranı
h_1	: Deformasyon sonrası yükseklik
k_f	: Akma gerilmesi
D	: Numune çapı
d	: Kalıp deliğinin çapı
h%	: Numune yüksekliğindeki yüzde değişim
ΔH	: Numunenin yüksekliğindeki değişim
id%	: Numunenin iç çapındaki yüzde değişim

ΔID	: Numunenin iç çapındaki değişim
R_n	: Nötr yarıçap
R_0	: Numunenin başlangıçtaki dış yarıçapı
R_i	: Numunenin başlangıçtaki iç yarıçapı
T	: Numunenin deformasyon sonrası yüksekliği
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
K	: Mukavemet katsayısı
n	: Pekleşme üsteli değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İki metal yüzey arasındaki temas	4
Şekil 2.2. Coulomb-Amonton sürtünme modeli	6
Şekil 2.3. Kayma sürtünme modeli	7
Şekil 2.4. Halka basma deneyi	10
Şekil 2.5. Male ve Cockroft sürtünme kalibrasyon eğrileri	11
Şekil 2.6. 6:4:2 boyut oranında alüminyum numune kullanılarak gerçekleştirilen teorik ve deneysel basma sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri	12
Şekil 2.7. 6:1,6:2 boyut oranında alüminyum numune kullanılarak gerçekleştirilen teorik ve deneysel basma sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri	12
Şekil 2.8. Lee-Altan sürtünme kalibrasyon eğrileri	13
Şekil 2.9. Beyaz plastisin için sürtünme kalibrasyon eğrisi.....	14
Şekil 2.10. Siyah plastisin için sürtünme kalibrasyon eğrisi	14
Şekil 2.11. Halka basma deneylerinin sonuçları	16
Şekil 2.12. Birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak sürtünme faktörünün değişimi	16
Şekil 2.13. 5 ve 0,05 birim şekil değiştirme hızları için sıcaklığa bağlı olarak sürtünme faktörünün değişimi.....	17
Şekil 2.14. Sürtünme kalibrasyon eğrileri ve deneysel veriler.....	18
Şekil 2.15. Asimetrik basma ve yanal yayılma sonucu numunenin üstten görünüşü	20
Şekil 2.16. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin sonlu elemanlar modeli	21
Şekil 2.17. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testi numunesinin sürtünme katsayısı 0,4 iken, sonlu elemanlar analizinde ilk ve deforme hali.....	22
Şekil 2.18. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri	22

Şekil 3.1. Standart bir halka numunenin şematik resmi	24
Şekil 3.2. Deney sonrası iç çaptaki değişime göre sürtünme durumlarının şematik olarak gösterilmesi	24
Şekil 3.3. Sürtünme kalibrasyon eğrisi	25
Şekil 3.4. Halka numunesinin basma testi ve nötr yarıçap	26
Şekil 3.5. Sonlu elemanlar yönteminde düğüm noktaları ve elemanlar.....	28
Şekil 3.6. Sonlu elemanlar metodundaki temel adımlar	29
Şekil 4.1. Benzeşimlerin gerçekleştirildiği halka basma deneyi numunesi ve boyutları	31
Şekil 4.2. Numunenin kesitini oluşturan eğrilerin gösterilişi.....	32
Şekil 4.3. Numune kesit alanı ve referans noktaları.....	32
Şekil 4.4. Numune kesit alanının ağ yapısı	33
Şekil 4.5. Marc yazılımı kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu deney numunesi	34
Şekil 4.6. 1100 Alüminyum alaşımı için basma testi sonucu elde edilmiş akma eğrisi	35
Şekil 4.7. Sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	36
Şekil 4.8. $\mu=0,1$ için sürtünme kalibrasyon eğrisi.....	37
Şekil 4.9. $\mu=0,3$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	38
Şekil 4.10. $\mu=0,2$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	38
Şekil 4.11. $\mu=0,15$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	39
Şekil 4.12. $\mu=0,1$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	39
Şekil 4.13. $\mu=0,05$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	40
Şekil 4.14. $\mu=0,02$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	40
Şekil 4.15. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$ iken pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrisine etkisi	41
Şekil 4.16. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$ iken %60 deformasyon anında pekleşme üstelinin iç çaptaki azalmaya etkisi	42
Şekil 4.17. $\mu=0,15$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	43
Şekil 4.18. $\mu=0,15$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	43
Şekil 4.19. $\mu=0,1$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	44
Şekil 4.20. $\mu=0,1$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	44

Şekil 4.21. Sürtünme katsayısı $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken pekleşme katsayısının sürtünme kalibrasyon eğrisine etkisi	45
Şekil 4.22. Sürtünme katsayısı $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken % 60 deformasyon anında pekleşme katsayısının iç çap artışına etkisi	46
Şekil 4.23. $\mu=0,06$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	47
Şekil 4.24. $\mu=0,06$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	47
Şekil 4.25. $\mu=0,04$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	48
Şekil 4.26. $\mu=0,04$ ve $n=0,245$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	48
Şekil 4.27. $\mu=0,04$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi	49
Şekil 4.28. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$, $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken pekleşme katsayısının sürtünme kalibrasyon eğrilerine etkisi	50
Şekil 4.29. Sürtünme katsayısı $\mu=0,2$ iken farklı dayanım katsayılarının sürtünme kalibrasyon eğrisine etkisi	50

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı şekillendirme koşulları için sürtünme katsayıları.....	7
Tablo 2.2. Farklı şekillendirme koşulları için sürtünme kayma faktörleri.....	8
Tablo 4.1. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$ iken % 60 deformasyon anında pekleşme katsayısının iç çap çap değişimine etkisi.....	42
Tablo 4.2. Sürtünme katsayısı $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken % 60 deformasyon anında pekleşme katsayısının iç çap değişimine etkisi	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Sürtünme Katsayısı, Sonlu Elemanlar Methodu, Halka Basma Deneyi, Metal Şekillendirme

Metallerin plastik şekillendirme işlemleri ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzeşimlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için sürtünme davranışlarının bilinmesi gereklidir. Sürtünme, plastik şekillendirme sırasında deformasyon kuvvetini, malzeme akışını, yüzey kalitesini ve malzemenin iç yapısı gibi birçok değişkeni etkiler. Bu sebepten temas yüzeyleri arasındaki sürtünmenin bilinmesi, deformasyon işlemini daha iyi anlayabilmemiz ve açıklayabilmemiz açısından önemlidir.

Kalıpla iş parçası arasındaki sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri halka basma deneyidir. Yaygın olarak kabul gören bu deneyde, sürtünmenin sayısal olarak belirlenmesi için deney numunesinin boyutlarında meydana gelen değişim dikkate alınır. Halka basma deneyi sonucunda numunenin yüksekliğindeki yüzde azalmaya karşılık iç çapında meydana gelen yüzde değişim mevcut sürtünmenin sayısal değeri hakkında bir bilgi verir.

Bu tez kapsamında halka basma deneyinin, sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar ortamında benzeşimi gerçekleştirilerek sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Malzeminin pekleşme davranışını gösteren pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur.

INVESTIGATION OF EFFECT OF THE STRAIN HARDENING EXPONENT ON THE FRICTION CALIBRATION CURVES IN RING COMPRESSION TEST

SUMMARY

Keywords: Friction Coefficient, Finite Element Method, Ring Compression Test, Metal Forming

Friction affects many variables such as deformation force, material flow, surface quality and microstructure of materials in metal forming operations. Thus, it is necessary to know friction behavior of materials in metal forming processes and to perform successful simulations of these forming processes. In order to understand and predict deformation in metal forming processes, the friction between the contact surfaces should be known.

Ring compression test is one of the methods that is used to determine the friction coefficient between the surfaces. In this widely accepted test, dimensional changes of the test sample are used to estimate the numerical value of the friction. As a result of the compression test, the percent change in the inner diameter with respect to the reduction in the height of the sample provides information about the numerical value of the existing friction.

In this thesis, simulation of the ring compression test is performed via finite element analysis and friction calibration curves were obtained. The effect of strain hardening exponent on the friction curves is shown.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Metal şekillendirme; dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi işlemlerle hammaddelerin bitmiş veya yarı mamul ürünlere, faydalı şekil ve mekanik özelliklerle dönüştürülmesi işlemidir. Şekil değiştirme plastik deformasyon sonucu meydana gelmektedir. Bu işlem kalıplar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir.

Şekillendirme işlemleri genel olarak metale uygulanan germe, eğme, kayma gerilmeleri sonucu meydana gelse de iş parçası plastik şekillendirme sırasında en çok basma gerilmelerine mahruz kalır. Dövme işlemi ise basma gerilmelerinin uygulandığı bir plastik şekil verme yöntemidir.

Basma işlemi sırasında sürtünme iş parçasının şeklini etkilemektedir. Kalıp metale temas ettiği anda basınç sonucu iş parçasının yüksekliği azalırken temas yüzeylerindeki sürtünmeden dolayı malzeminin dışa doğru akış hareketi kısıtlanır. Bu da temas yüzeylerinde yüksek gerilmelere yol açacağı için istenilmeyen sonuçlar doğurabilir. Metal bloğun şekillendirilebilirliği azalırken malzemedeki çatlaklar meydana gelebilir. Bu yüzden basma işlemiyle elde edilen ürünlerde istenilen kalitenin yakalanması için sürtünme durumu kontrol altında olmalıdır.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Sürtünme durumunun tespitinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri halka basma deneyleridir. Deney sırasında halka numunesinde meydana gelen boyutsal değişikliklerden yararlanılarak sürtünme katsayısı kolayca tayin edilir.

Halka basma deneyiyle sürtünme katsayısının ya da faktörünün belirlenmesi için bazı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen öncü çalışmalarla oluşturulan sürtünme

kalibrasyon eğrileri kullanılır. Bu eğriler söz konusu çalışmalarda sayısal olarak matematiksel hesaplamayla ya da sonlu elemanlar benzeşimleri ile oluşturulmuştur.

Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda kullanılan malzemeler için bu sürtünme kalibrasyon eğrilerinin kullanıldığı görülse de, bazı araştırmalar sürtünme kalibrasyon eğrilerinin malzemenin akma davranışından etkilendiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla, tüm malzemeler için aynı sürtünme kalibrasyon eğrilerinin kullanılması arayüzeydeki sürtünme durumunun belirlenmesinde yanıltıcı bir etkiye sahip olabilir.

Sofuoğlu ve arkadaşlarının farklı akma eğrisine sahip iki malzeme kullanılarak gerçekleştirdikleri halka basma deneyleri ve benzeşimleri, bu malzemelerin sürtünme kalibrasyon eğrilerinin açık bir şekilde farklı olduğunu göstermiştir [1]. Malzemenin plastik deformasyon sırasında nasıl davrandığını gösteren akma eğrilerini etkileyen değişkenler, sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerinde de etkilere sahip olabilir.

Pekleşme davranışı akma eğrileri üzerinde farklılaşmaya sebep olan önemli değişkenlerden biridir. Bu çalışmanın amacı halka basma deneyi ile gerçeğe daha yakın bir sürtünme durumunun tayin edilebilmesi için pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisinin incelenmesi ve ortaya konulmasıdır.

Çalışma kapsamında, sürtünme durumu tespitinde kullanılan halka basma deneyinin ticari bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal olarak bilgisayar ortamında benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzeşimler sonucu farklı pekleşme üsteli değerleri için sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş ve pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu incelenerek ortaya konmuştur. Bu kapsamda tez beş bölümden oluşmaktadır.

- a. Birinci bölümde metallere şekil verme sırasında sürtünme durumunun önemi ve bu bağlamda tez çalışmasının amacından ve kapsamından bahsedilmiştir.

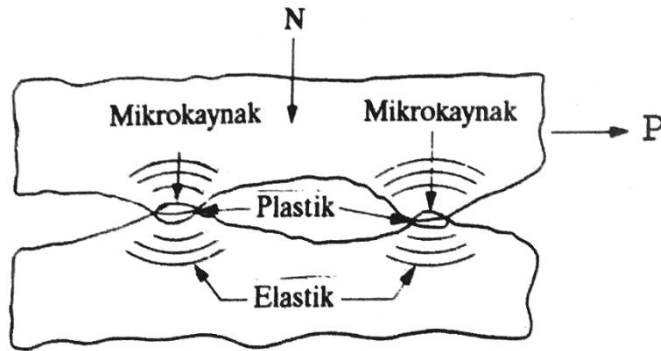
- b. İkinci bölümde sürtünmenin temel denklemleri ve sürtünme modelleri hakkında bilgiler verilirken aynı zamanda plastik şekillendirmede yağlama rejimlerinden bahsedilmiştir.
- c. Tez çalışmasının üçüncü bölümünde halka basma deneyinin nasıl gerçekleştirildiği hakkında bilgiler verilmiştir. Bunun yanında bu yöntemin daha iyi anlaşılması için literatürdeki bir matematiksel model incelenmiştir. Bu bölümde ayrıca sonlu elemanlar yönteminden bahsedilmiştir.
- d. Tez çalışmasının dördüncü bölümünde halka basma deneyinin sonlu elemanlar programında nasıl modellendiği anlatılmıştır. Kullanılan halka numunesinin literatürdeki standartlara göre boyutlandırılması ve modellenmesi, malzeme modelinin programa tanıtılması, sınır şartlarının uygulanması hakkında bilgiler verilmiştir. Analizler sonucu sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş ve pekleşme üstelinin bu eğriler üzerindeki etkileri incelenmiştir.
- e. Tez çalışmasının beşinci bölümünde ise sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler ortaya konulmuştur.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Metallere Şekil Verme Sırasında Sürtünme

Plastik şekillendirme sırasında metal akışı kalıplardan deforme iş parçasına aktarılan basınçtan kaynaklanır. Bu yüzden malzeme ve kalıp arayüzündeki sürtünme durumu; malzeme akışı, malzeme içi kusurları, kalıplarda oluşan gerilmeleri, kuvvet ve enerji ihtiyaçları gibi değişkenleri etkiler [2].

İki cisim N normal kuvveti ile birbirine bastırıldığında, arayüzeyde hareketin meydana gelebilmesi için teğetsel bir P kuvveti uygulanmalıdır (Şekil 2.1.). Buradaki P kuvveti sürtünme kuvveti olarak ifade edilir. P teğetsel kuvveti ve N normal kuvvetinin oranı sürtünme katsayısı olarak adlandırılır ve μ ile gösterilmektedir (Denklem 2.1, Denklem 2.2 ve Denklem 2.3) [2].



Şekil 2.1. İki metal yüzey arasındaki temas [1]

$$N = \sigma_n * A \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de N normal kuvvetini, σ_n normal gerilmeyi, A temas alanını ifade etmektedir.

$$P = \tau * A \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de P teğetsel kuvveti, τ sürtünme gerilmesini, A temas alanını ifade etmektedir.

$$\mu = \frac{P}{N} = \frac{\tau * A}{\sigma_n * A} = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'de μ sürtünme katsayısını, P teğetsel kuvveti, N normal kuvvetini, τ sürtünme gerilmesini, σ_n normal gerilmeyi, A temas alanını ifade etmektedir.

τ sürtünme gerilmesi ile σ_n normal gerilmesi doğrusal olarak değişirse μ sürtünme katsayısı sabit bir değer alır. Fakat sürtünme kayma gerilmesi, şekil verilen malzemenin kayma akma gerilmesi k' nin değerine ulaştığı zaman şekil verilen malzeme kalıp yüzeyinde kaymak yerine daha az enerji harcayarak kendi içinde akmaya başlar. Tresca kriterine göre $k = 0,5\sigma_0$ ve Von Mises kriterine göre ise $k = 0,577\sigma_0$ 'dir. Burada σ_0 iş parçasının basit çekme halindeki akma gerilmesini ifade eder. $\sigma_0 = \sigma_n$ olduğu zaman sürtünme katsayısı 0,577'i aşamaz ($\mu_{\max} = 0,577$). Sürtünme gerilmesi τ , kayma akma gerilmesi k değerinden büyük olması halinde sürtünme katsayısı anlamını yitirir. Kalıp ve iş parçası arasındaki arayüzeyde bağlı hareket oluşmadığı için yapışma sürtümesi meydana gelir. Bu yüzden sürtünme katsayısı bu üst değer ile sınırlandırılır [2, 3].

Yapışma sürtünmesi durumunda arayüzeydeki sürtünme hali ara yüzey sürtünme faktörü m ile ifade edilmektedir. Sıfır ve bir arasında bir değer alır (Denklem 2.4 ve Denklem 2.5) [2].

$$m = \frac{\tau}{k} ; 0 \leq m \leq 1 \quad (2.4)$$

$$\tau = mk = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

Denklem 2.4 ve Denklem 2.5’de m sürtünme faktörünü, τ sürtünme gerilmesini, k kayma akma gerilmesini, σ_0 akma gerilmesini ifade etmektedir.

2.1.1. Sürtünme modelleri

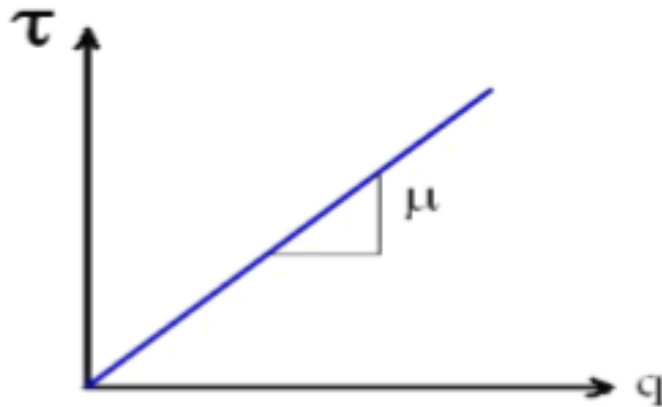
Metallere şekil verme sırasında sürtünme gerilmesini belirlemek için kullanılacak iki önemli yasa vardır. Bunlar Coulomb sürtünme yasası ve kayma sürtünme yasasıdır.

2.1.1.1. Amonton ve Coulomb sürtünme kanunu

Amonton ve Coulomb sürtünme modelinde sürtünme gerilmesi ve normal basıncı arasında doğru orantı vardır (Şekil 2.2.). Sürtünme katsayısı bu orantının bir ölçütüdür (Denklem 2.6). Tablo 2.1.’de bazı malzemelerin farklı koşullarda şekillendirilmesi sırasındaki sürtünme katsayıları verilmiştir [4].

$$\tau = \mu * q \quad (2.6)$$

Denklem 2.6’da τ sürtünme gerilmesini, μ sürtünme katsayısını, q normal basıncını ifade etmektedir.



Şekil 2.2. Coulomb-Amonton sürtünme modeli [4]

Tablo 2.1. Farklı şekillendirme koşulları için sürtünme katsayıları [1]

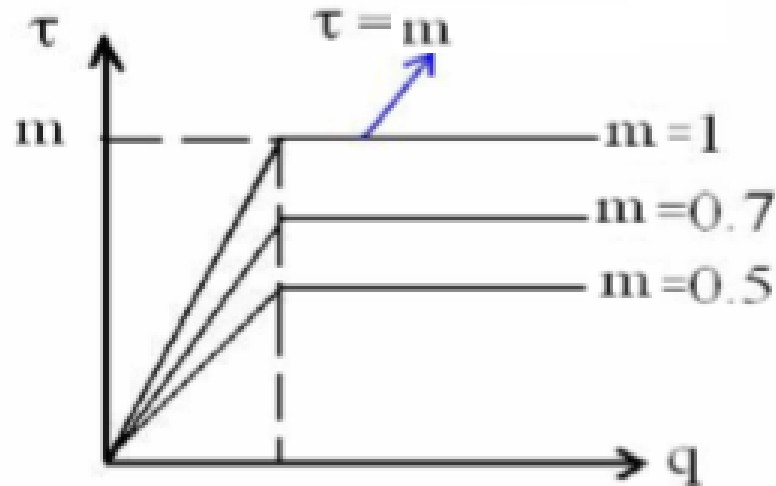
Şekil Verme Durumu	Sürtünme Katsayısı μ
Bakır, pirinç ve alüminyumun derin çekilmesi	0,08-0,15
Alüminyum ve çelik çubukların çekilmesi	0,02-0,20
Tel çekmede alüminyum ve çinko	0,02-0,20
Tel çekmede pirinç ve çelik	0,03-0,10
Tel çekmede bakır ve paslanmaz çelik	0,07-0,30

2.1.1.2. Kayma sürtünme kanunu

Bu yasada sürtünme gerilmesi kritik bir üst değere kadar normal basınç ile orantılıdır. Bu kritik değer aşıldığında sürtünme gerilmesi sabittir ve kayma akma gerilmesi k 'ya eşit olmaktadır (Denklem 2.7) [5].

$$\tau = mk ; 0 \leq m \leq 1 \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de τ sürtünme gerilmesini, m sürtünme kayma faktörünü, k kayma akma gerilmesini ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Kayma sürtünme modeli [4]

Tablo 2.2.'de bazı malzemelerin farklı koşullarda şekillendirilmesi sırasındaki sürtünme kayma faktörleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Farklı şekillendirme koşulları için sürtünme kayma faktörleri [2]

Şekil Verme Durumu	Sürtünme Kayma Faktörü μ
Çeliklerin, alüminyum alaşımlarının ve bakırın fosfat sabun yağlayıcılar veya sıvı yağlayıcılar ile soğuk şekillendirilmesi	0,05-0,15
Çeliklerin, alüminyum alaşımlarının ve bakırın grafit esaslı yağlayıcılar ile sıcak şekillendirilmesi	0,2-0,4
Titanyum ve refrakter alaşımların cam yağlayıcılar ile sıcak şekillendirilmesi	0,1-0,3
Levhaların sıcak haddelenmesi ve alüminyum alaşımlarının yağlamazsız ekstrüzyonu	0,7-1,0

2.2. Metallere Şekil Verme İşleminde Yağlama

Metallere şekil verme sırasında sürtünme durumunu oluşturan genel anlamda üç farklı yağlama durumu vardır;

- a. Kuru Durum
- b. Hidrodinamik Yağlama
- c. Sınır Film Yağlama

2.2.1. Kuru durum

Kuru durum, atmosfer şartları altında yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin sürtünme hali olarak tanımlanır. Ara yüzeyde herhangi bir yağlayıcı yoktur. Burdaki sürtünme çok yüksektir ve bu durumun kullanıldığı sadece bir kaç özel şekil verme operasyonu vardır [6]. Örneğin alüminyum alaşımlarının yağlayıcı kullanılmadan gerçekleştirilen ekstrüzyonu

2.2.2. Hidrodinamik yağlama

İş parçası ve kalıpların birbirlerinden kalın bir yağlayıcı tabaka ile ayrılmış olduğu durum olarak nitelendirilir. Buradaki sürtünme durumu yağlayıcının viskozitesine ve iş parçası ile kalıp arasındaki hıza bağlıdır. Artan sıcaklıkla birlikte çoğu yağlayıcının viskozitesi hızlı bir şekilde düştüğü için, şerit haddeleme ve tel çekme gibi pratikte uygulanan çoğu yüksek hızlı şekillendirme işleminde, hidrodinamik yağlama durumu, sadece arayüzey sıcaklıklarının nispeten düşük olduğu, belirli hızlarda geçerlidir [6]. Örneğin şerit haddeleme, tel çekme gibi

2.2.3. Sınır yağlama

Plastik şekil verme sırasında iş parçası ve kalıp arayüzeyinde oluşan yüksek basınç ve sıcaklıklar hidrodinamik yağlama rejiminin bozulmasına sebep olur. Bu durumda iş parçası ve kalıp bir kaç molekül kalınlığında çok ince bir yağ filmi (tabakası) tarafından ayrılır ve sınır yağlama durumu mevcuttur [6].

Metallere şekil verilmesinde sürtünme kontrolü, uygun yağlayıcının seçilmesiyle gerçekleştirilir. Yağlama durumunun iyileştirmesi için kullanılan bir yağlayıcının bazı karakteristik özelliklere sahip olması beklenilir;

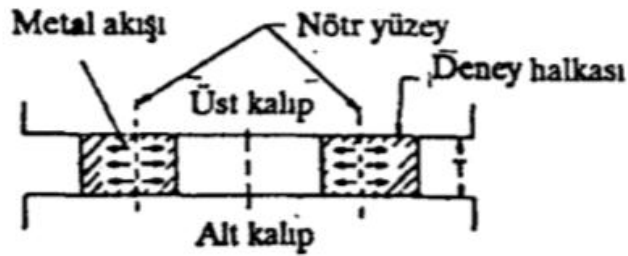
- a. İş parçası ve kalıp arasındaki kayma sürtünmesini azaltmalıdır. Yüksek yağlama özellikli yağlayıcılar kullanılarak bu durum başarılabilir.
- b. İş parçası ve kalıp arasında ayırıcı madde olarak sürtünme yapışmasını engellemelidir.
- c. Sıcak şekillendirme sırasında, iş parçasından kalıba ısı kaybını azaltmalıdır. Bunun için yağlayıcının iyi yalıtım özelliklerine sahip olması gerekir.
- d. İş parçası ve kalıp yüzeylerindeki erozyonu ve aşındırıcı etkiyi azaltmalıdır.
- e. Yağlayıcı çevreyi kirletici ve zehirli birleşikler içermemelidir ve tehlikeli gazlar üretmemelidir.
- f. İş parçası ve kalıp üzerine uygulaması ve temizlenmesi kolay olmalıdır.
- g. Ticari olarak makul fiyatlardan erişilebilmelidir [6].

2.3. Halka Basma Deneyi İle İlgili Önceki Çalışmalar

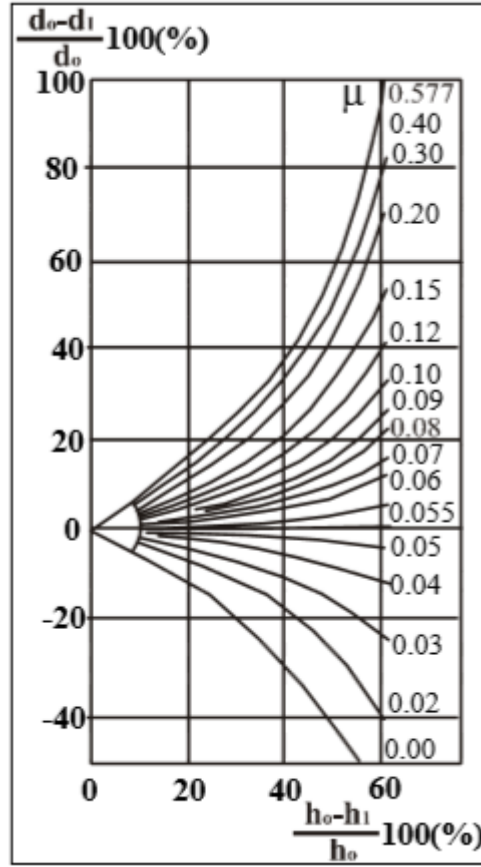
Sürtünme durumu, deformasyon sonucu şekil değişimine bağlı olarak belirlenebilir. Bu amaçla sürtünmenin belirlenmesi için yapılan bazı çalışmalarda, malzemenin homojen kaldığı, akma gerilmesinin sabit olduğu, sıcaklığın değişmediği gibi kabuller yapılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme katsayısının ya da faktörünün belirlenmesinde halka basma, açık kalıp-geri ekstrüzyon, dikdörtgen plakaların basılması gibi deneyler kullanılabilir.

Halka basma deneyi (Şekil 2.4.) 1954 yılında ilk olarak Kunogi tarafından yağlayıcıları karşılaştırmak amacıyla ortaya konulmuştur. Daha sonra Male ve Cockroft tarafından geliştirilerek sürtünme katsayısının belirlenmesi için kullanılabilir hale getirilmiştir [7, 8]. Bu deneyde halka şeklindeki bir numune iki düz kalıp arasında basılır. Meydana gelen deformasyon sonucu numunenin yükseklik ve iç çapındaki yüzde değişimler dikkate alınarak, temas yüzeylerindeki sürtünme katsayısı sürtünme kalibrasyon eğrileri kullanılarak belirlenebilir. İç çaptaki artış veya azalış kalıp ve numune arasındaki sürtünme katsayısı ile alakalıdır. Eğer deformasyon sırasında iç çap azalır ise sürtünme yüksek, iç çap artar ise sürtünme düşüktür [9]. Male ve Cockroft bu ilişkiden yararlanarak sürtünme kalibrasyon eğrilerini oluşturmuştur (Şekil 2.5.).

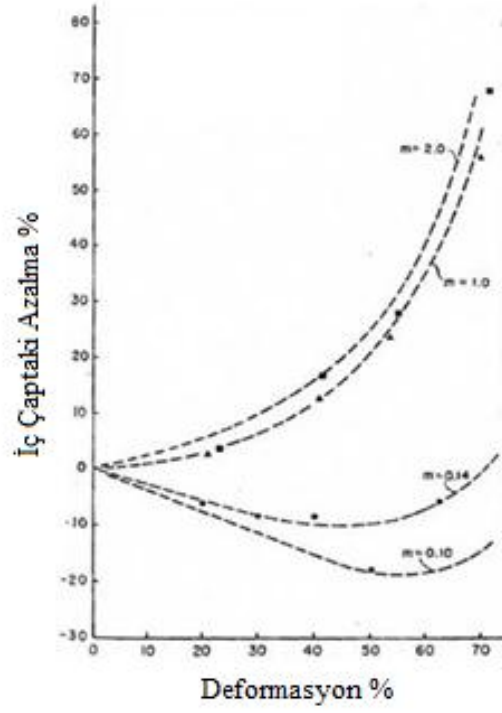


Şekil 2.4. Halka basma deneyi [2]

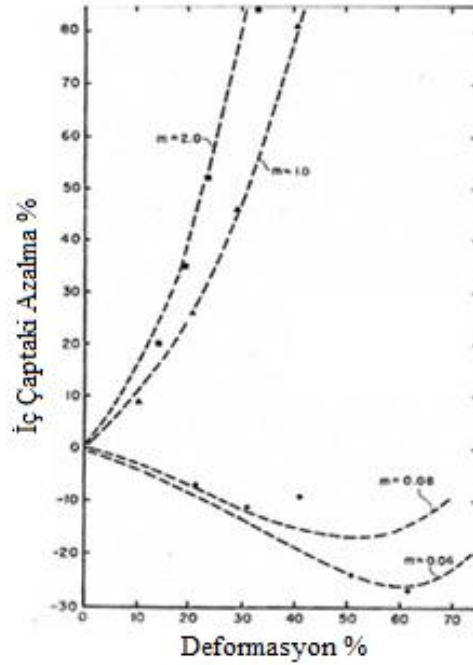


Şekil 2.5. Male ve Cockroft sürtünme kalibrasyon eğrileri [1]

1970 yılında Male ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği araştırmada, alüminyum malzeme kullanarak yürütülen simülasyonlar ile halka basma deneyindeki numune boyutlarının ya da boyut oranlarının etkisi gösterilmiştir. Dış çap (OD): iç çap (ID): yükseklik (H) boyut oranları halka numunenin davranışında kritik bir öneme sahiptir. Çalışma 6:4:2 (Şekil 2.6.) ve 6:1,6:2 (Şekil 2.7.) numunelere ait sürtünme kalibrasyon eğrilerinin açık bir şekilde farklı olduğunu göstermiştir [10].

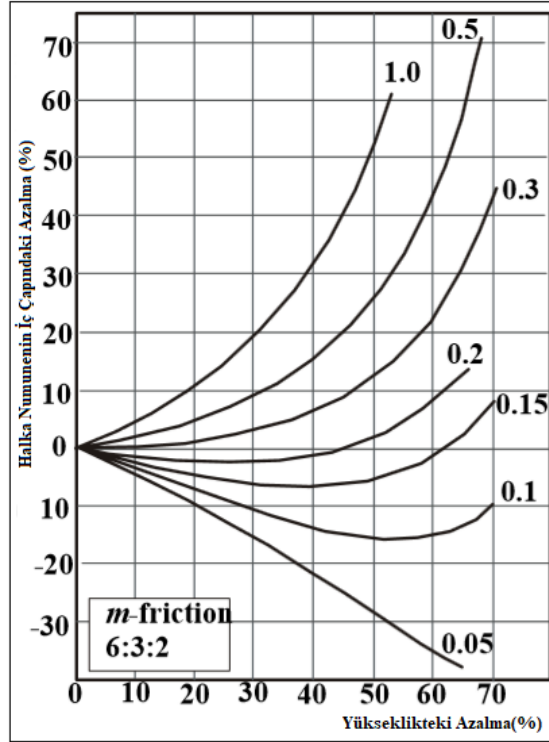


Şekil 2.6. 6:4:2 boyut oranında alüminyum numune kullanılarak gerçekleştirilen teorik ve deneysel basma sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri [10]



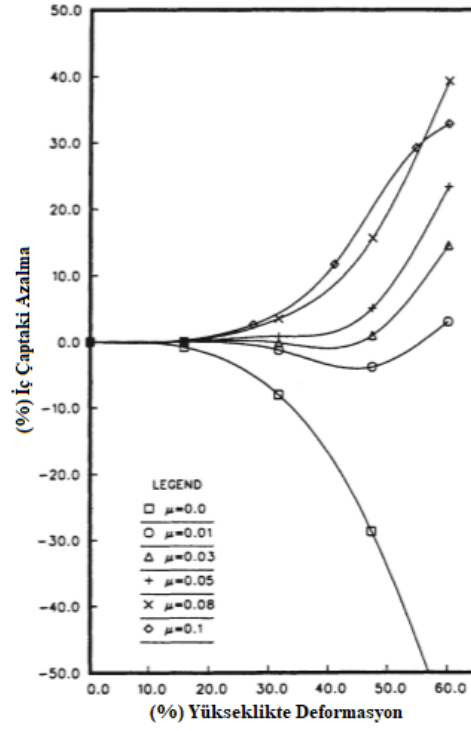
Şekil 2.7. 6:1,6:2 boyut oranında alüminyum numune kullanılarak gerçekleştirilen teorik ve deneysel basma sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri [10]

1972 yılında Lee ve arkadaşları halka basma deneyini numunenin iç ve dış profilindeki fiçilaşma etkisini göz önünde bulundurarak üst sınır metodu ile simule edip sürtünme kalibrasyon eğrilerini oluşturmuşlardır (Şekil 2.8.). Çalışmada kullanılan halka numunesi Male ve Cockroft'un standartlaştırdığı 6:3:2 oranındadır [11].

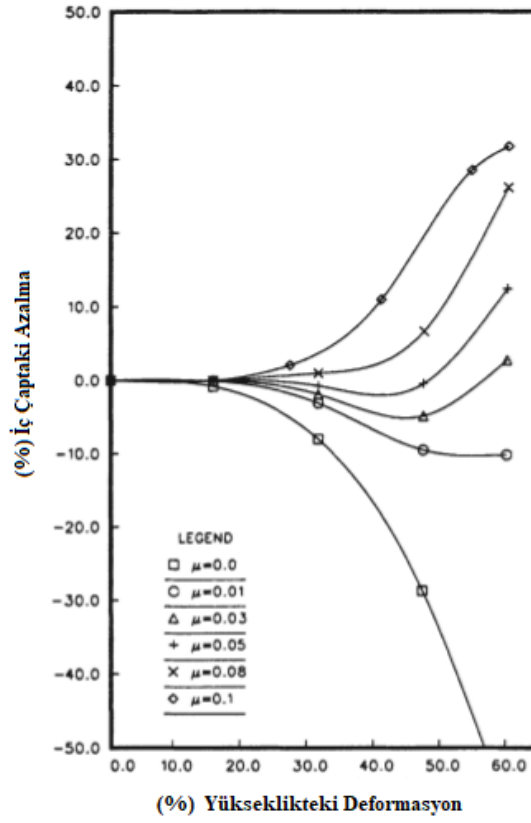


Şekil 2.8. Lee-Altan sürtünme kalibrasyon eğrileri [11]

1999 yılında Sofuoğlu ve arkadaşları literatürde kullanılan halka basma deneylerinden elde edilen geliştirilmiş sürtünme kalibrasyon eğrilerinin tüm malzeme ve deney durumları için kullanılabilirliğini araştırmıştır. Malzeme özellikleri, birim şekil değiştirme hızı duyarlılığı ve fiçilaşmanın sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Beyaz ve siyah plastisin malzemeleri kullanarak halka basma deneyleri ilk olarak Fiziksel Model Tekniği (PMT) ile yürütülmüş ve daha sonra sonu elemanlar yöntemi ile (ABAQUS) simule edilmiştir. Şekil 2.9. ve Şekil 2.10.'da sırasıyla beyaz ve siyah plastisin malzemeleri için sürtünme kalibrasyon eğrileri verilmiştir. Bu eğriler arasındaki fark açık bir şekilde görülmektedir [1].



Şekil 2.9. Beyaz plastisin için sürtünme kalibrasyon eğrisi [1]

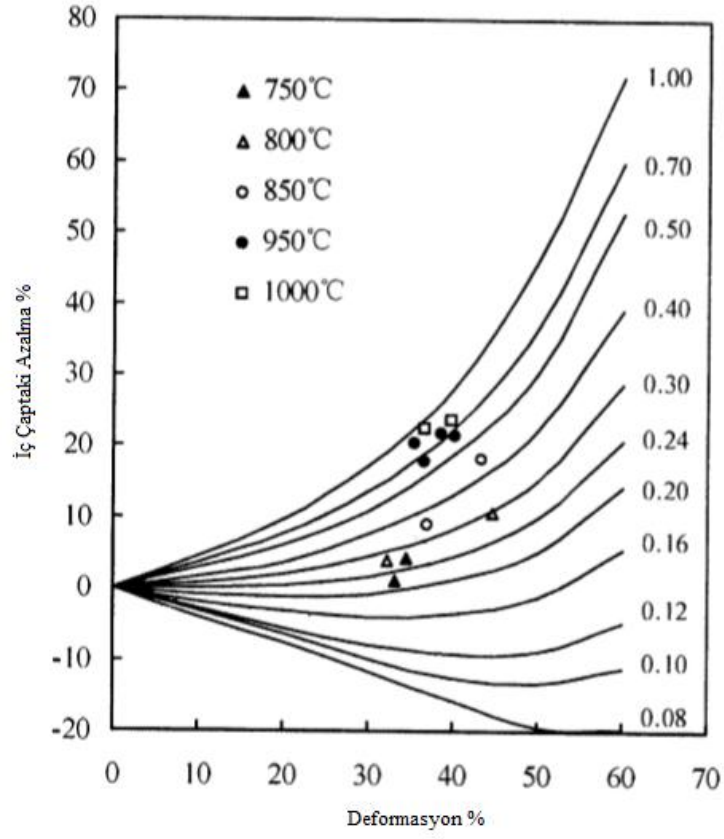


Şekil 2.10. Siyah plastisin için sürtünme kalibrasyon eğrisi [1]

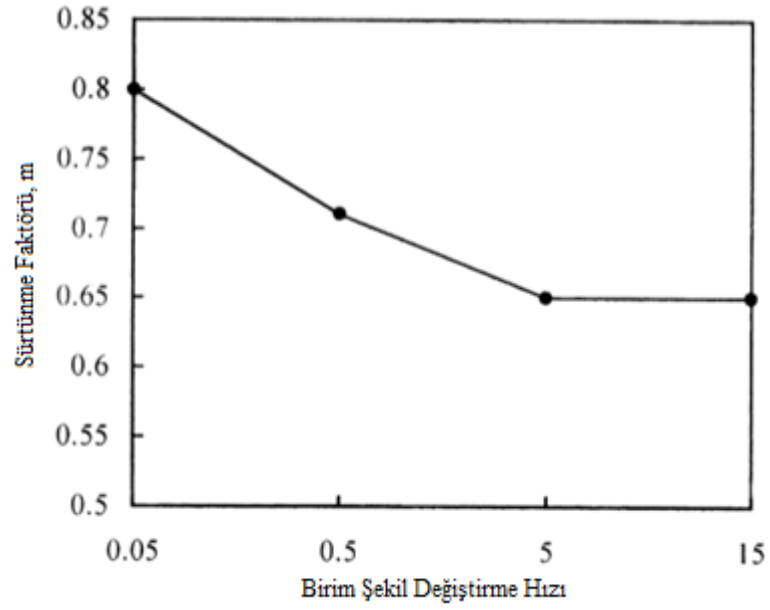
Bu çalışmada literatürde genelleştirilmiş olarak tüm malzeme çeşitleri için kullanılan sürtünme kalibrasyon eğrilerinin, malzeme özelliklerinden ve deney şartlarından etkilendiği ve her malzemenin kendine özel sürtünme kalibrasyon eğrilerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır [1].

2001 yılında Li ve arkadaşları çalışmalarında grafit yağlayıcının yağlama davranışını incelemek için halka basma deneyleri gerçekleştirmiştir. Halka numunesi olarak Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmıştır. Halka basma deneyleri farklı sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızlarında yürütülmüştür. Sıcak haddelenmiş 20mm çapındaki alaşım, halka basma deneyinde kullanılan standart geometri oranlarında numune elde etmek için işlenmiştir (15mm dış çap, 7,5mm iç çap ve 5mm yükseklik). Deneyleri gerçekleştirmek için bilgisayar kontrollü servohidrolik Gleeble test cihazı kullanılmıştır. Halka basma deneyleri $0,05-15 \text{ s}^{-1}$ arasındaki sabit bir birim şekil değiştirme hızı ile ve $750-1000^\circ\text{C}$ arasındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir [12].

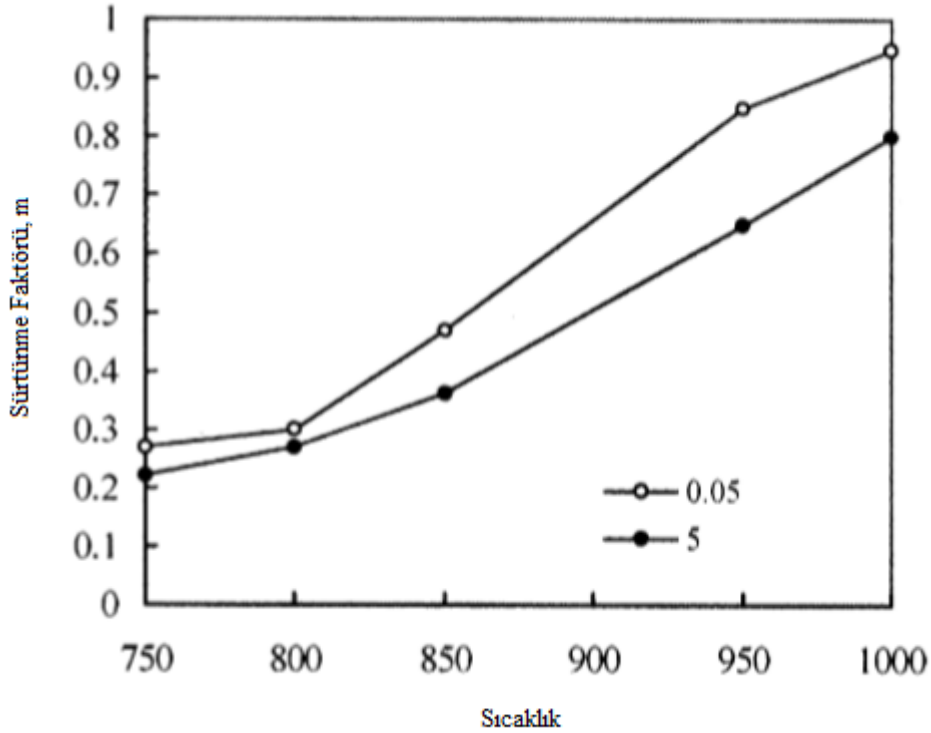
Şekil 2.11.'de $1000-950-850-800-750^\circ\text{C}$ 'de $0,05$ ve 5 s^{-1} birim şekil değiştirme hızı için gerçekleştirilen halka basma deneyi sonuçları sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerinde gösterilmiştir. 950°C 'deki deneyler ayrıca $0,5$ ve 15 s^{-1} şekil değiştirme hızı ile de gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12.). Şekil 2.13.'de sıcaklığa bağlı olarak sürtünme faktörünün değişimi $0,05$ ve 5 s^{-1} birim şekil değiştirme hızı için gösterilmiştir [12].



Şekil 2.11. Halka basma deneylerinin sonuçları [12]



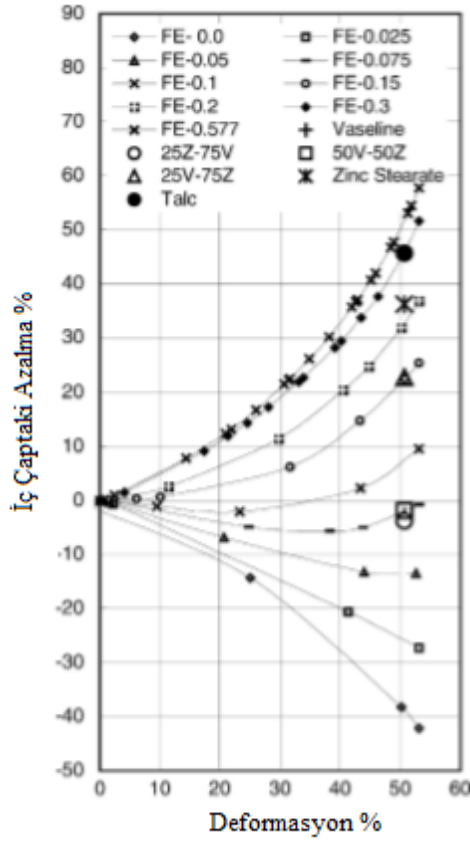
Şekil 2.12. Birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak sürtünme faktörünün değişimi [12]



Şekil 2.13. 5 ve 0,05 birim şekil değiştirme hızları için sıcaklığa bağlı olarak sürtünme faktörünün değişimi [12]

Sonuç olarak sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızı, kalıp ve iş parçası arasındaki grafit yağlayıcının performansını etkilemektedir. Sürtünme faktörü, sıcaklığın yükselmesiyle ve birim şekil değiştirme hızının düşmesiyle artmaktadır [12].

2004 yılında Robinson ve arkadaşları, çalışmalarında halka basma deneyini sonlu elemanlar yöntemiyle simule ederek sürtünme kalibrasyon eğrilerini oluşturmuşlardır. Farklı yağlayıcılar kullanılarak elde edilen sürtünme katsayı değerleri literatürdeki diğer çalışmalarla benzerlik taşımaktadır. Şekil 2.14.'de elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri ve deneysel sonuçlar görülmektedir. Sonlu elemanlar yöntemiyle deneysel verileri aynı çalışmada kullanmak plastik şekil verme sırasındaki sürtünme mekanizmasını anlamayı daha kolay ve efektif hale getirmiştir [13].



Şekil 2.14. Sürtünme kalibrasyon eğrileri ve deneysel veriler [13]

2008 yılında Joun ve arkadaşları çalışmalarında Coulomb sürtünme kanunu ve kayma sürtünme kanunu karşılaştırmak için iki farklı malzeme ile rijit-plastik malzeme davranışı kullanarak sonu elemanlar yöntemiyle halka basma deneyi simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Bu iki sürtünme kanunu kıyaslanılmış ve metal akış çizgileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sürtünmenin düşük ve buna ek olarak numunelerin en boy oranları ile temas alanları küçük olduğu durumlarda; bu iki sürtünme kanunu birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir. Fakat bahsedilen değişkenlerin tersi olduğunda önemli farklılıklar gözlemlenmiştir [14].

2014 yılında Kim ve arkadaşları çalışmalarında yüzey topografyasının, sürtünme ve oda sıcaklığındaki yağlama durumu (hem yağlı hemde kuru durum) üzerine etkileri incelemek için halka basma deneyleri gerçekleştirmiştir. Bunun yanı sıra deneylerde ayrıca, kalıp sıcaklığının sürtünme durumu üzerindeki etkisi ve farklı sıcaklıktaki kalıp ve halka numunelerinin, yağlama durumunu nasıl etkilediği incelenmiştir.

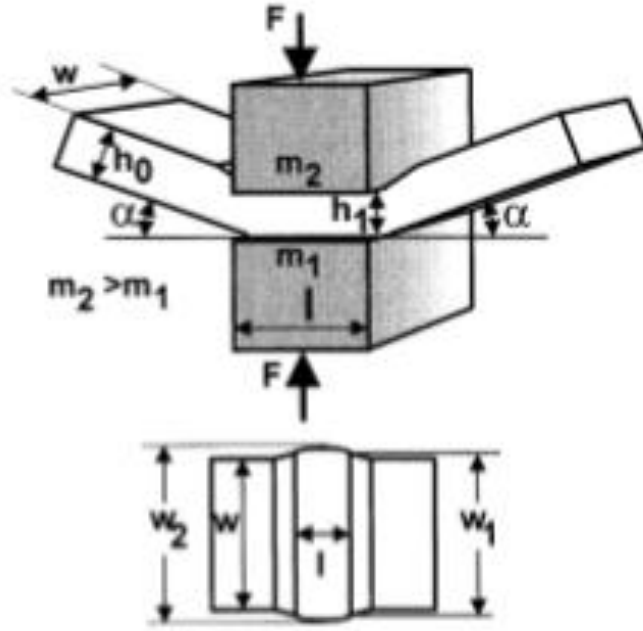
Deney ve simülasyonlar sonucu basınç bağımlı bir sürtünme modeli geliştirilmiştir. Bu model kuru ve yağlı deney koşullarında tutarlı sonuçlar vermektedir. Yapılan çalışmalarla birlikte ayrıca yağlayıcı performansının sıcaklıktan etkilendiği belirlenmiştir [15].

Literatürde şekil değişimine bağlı olarak sürtünme durumu tayini için kullanılan farklı çalışmalarda mevcuttur.

1988 yılında Pawelski ve arkadaşları, dikdörtgen bir plakanın basılmasıyla gerçekleştirilen çalışmalarında sürtünme durumunu incelemiştir. Bir plaka iki kalıp arasından basılıyorsa ve plaka ile kalıpların arayüzeyinde sürtünme durumu birbirinden farklıysa, plaka üst kalıba göre bir açı ile eğilir. Eğilme sonucu oluşan açı değişik parametrelere bağlı olan bir denklemle ifade edilir (Denklem 2.8) [16].

$$\alpha = f(m_1, m_2, \frac{1}{h}, h_1, k_f) \quad (2.8)$$

Bu ifadede α eğilme açısı, f fonksiyon, m_1 alt kalıp ve iş parçası arayüzeyinin sürtünme faktörü değeri, m_2 üst kalıp ve iş parçası arayüzeyinin sürtünme faktörü değeri, $\frac{1}{h}$ genişliğin yüksekliğe oranı, h_1 deformasyon sonrası yüksek, k_f akma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır [16].



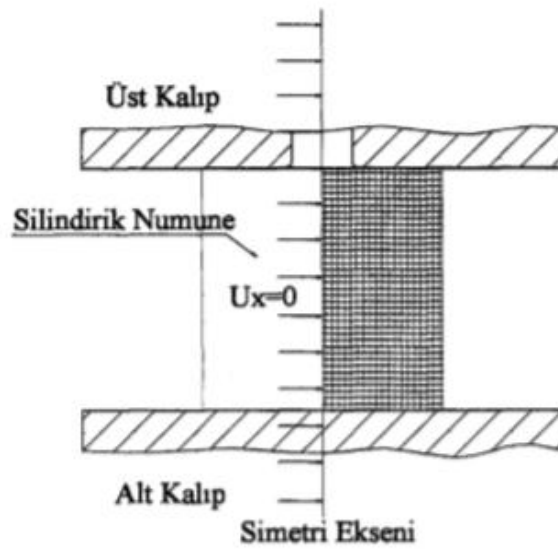
Şekil 2.15. Asimetrik basma ve yanal yayılma sonucu numunenin üstten görünüşü [16]

Bu gibi bir durumda sürtünmeyi incelemek için iki farklı yöntem bulunmaktadır.

- Maksimum Eğilme Metodu : Kalıp ve plaka arayüzeylerinden birinin sürtünme faktörün biliniyorsa, eğilme sonucu oluşan açı diğer yüzeyin sürtünme katsayısının bir ölçüsü olmaktadır.
- Karşılaştırma Metodu : Kalıp ve plaka arayüzeyindeki sürtünme faktörünün tespiti için diğer yüzeydeki farklı referans sürtünme durumları ile karşılaştırma yapılır. Buradaki referans sürtünme durumları, halka basma deneyi gerçekleştirilerek tespit edilir. Bu metod etkileşimli yüzeyler arasındaki küçük sürtünme farklarında oldukça keskin sonuçlar vermektedir [16].

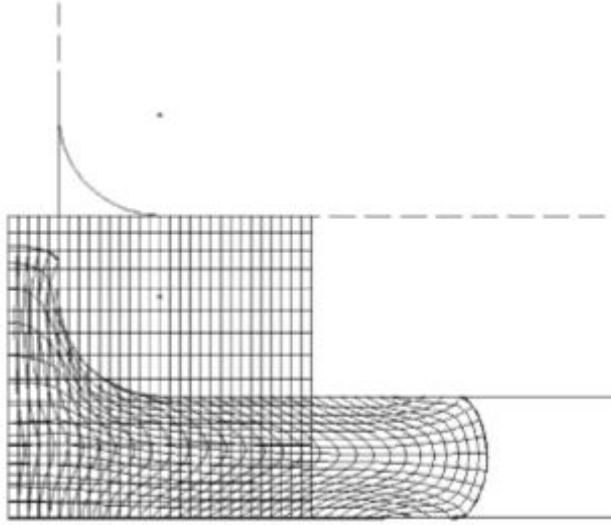
Çalışmada kullanılan matematiksel analiz, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar sonucunda, sürtünme durumunu tespit etmek için bu iki farklı metod kullanılabilir [16].

2001 yılında Sofuoğlu ve arkadaşları, iş parçası ve temas ettiği yüzeler arasındaki sürtünmenin sayısal değerini bulmak için halka basma deneyine alternatif bir deney olan açık kalıp-geri ekstrüzyon deneyini geliştirmişlerdir. Bu teknikte, içi dolu silindir bir iş parçası, üst kalıbının ortası delik olan iki düz levha kalıp arasında basılmıştır (Şekil 2.16.). Basma gerçekleşirken üst kalıp iş parçasına temas eder ve kalıpta bulunan deliğin iç kısmına doğru malzeme akışı başlar. Basma işleminin sonucunda, iş parçasının yüksekliğindeki yüzde azalama ve üst kalıp deliğindeki ekstrüze olan malzeme miktarı, sürtünme katsayısı hakkında bir sayısal değere ulaşmaya yardımcı olur [17].

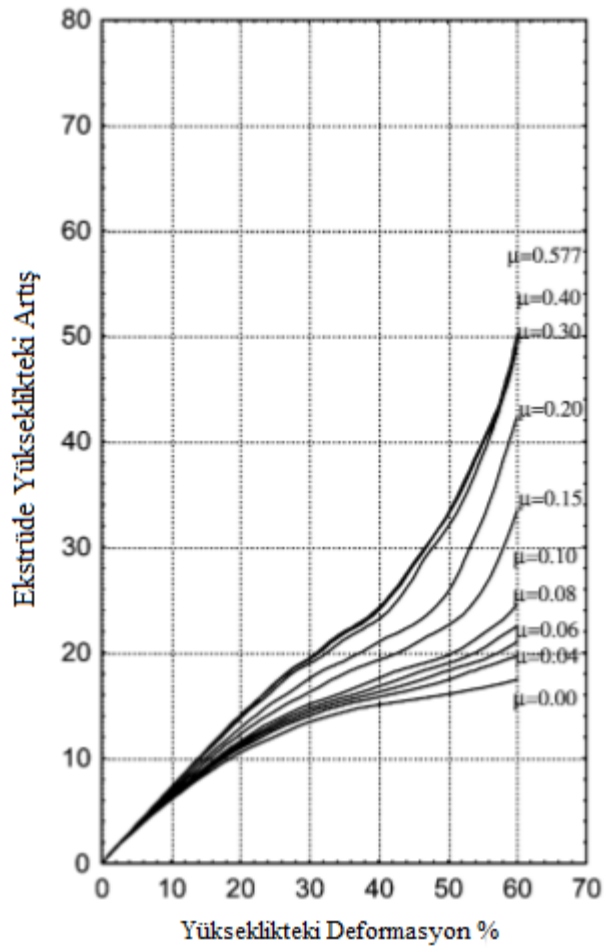


Şekil 2.16. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin sonlu elemanlar modeli [17]

Bu çalışmada açık kalıp ekstrüzyon deneyi, farklı numune (H/D) ve kalıp geometrileri (d/D) için elastik plastik sonlu elemanlar kodu kullanılarak Ansys paket programında simüle edilmiştir (Şekil 2.17.). Burada H numune yüksekliğini, D numune çapını, d ise kalıp deliğinin çapını ifade etmektedir. Simülasyonlar sonucu sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 2.18.). Deneyde ekstrüze olmuş malzeme yüksekliği, iş parçası ve kalıp arayüzündeki sürtünme durumuyla ilgilidir. Bu yüzden açık kalıp ekstrüzyon deneyi yüksek deformasyon işlemlerindeki sürtünme katsayısının belirlenmesinde ve sürtünme kalibrasyon eğrilerinin oluşturulmasında kullanılabilir [17].



Şekil 2.17. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testi numunesinin sürtünme katsayısı 0,4 iken, sonlu elemanlar analizinde ilk ve deforme hali [17]



Şekil 2.18. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri [17]

BÖLÜM 3. SAYISAL VE ANALİTİK YÖNTEMLER

3.1. Halka Basma Deneyi

Kalıp ve iş parçası arayüzeyindeki sürtünme durumu, basma işleminde numunedeki asıl deformasyonun oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Arayüzey sürtünme durumunu belirlemek için halka basma deneyleri gerçekleştirilerek sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulur. Bu eğriler halka numunlerinde meydana gelen deformasyonu gösterir. Halka basma deneyinde halka numunesinin yüksekliği (H) ve halka numunesinin iç çapı (ID) olan iki parametre deney öncesi ve sonrası ölçülerek sürtünme kalibrasyon eğrilerinde ifade edilir. Yükseklikteki azalma oranı sürtünme kalibrasyon eğrilerinde yatay ekseninde gösterilmektedir (Denklem 3.1) [18].

$$\%h = \Delta H/H \times \%100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de, %h numune yüksekliğindeki yüzde değişimi, ΔH numunenin ilk ve son yüksekliği arasındaki farkı, H numunenin ilk yüksekliğini ifade etmektedir.

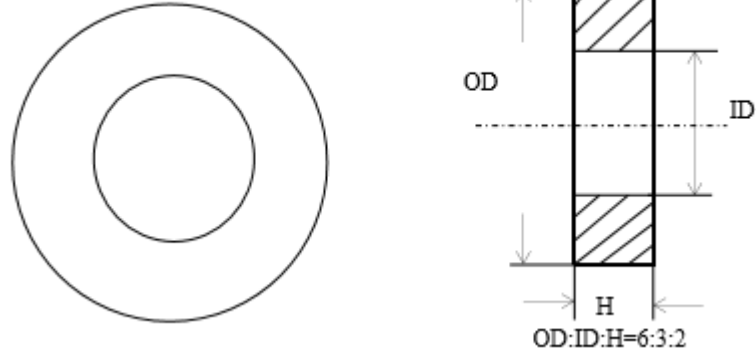
İç çaptaki değişim oranı sürtünme kalibrasyon eğrisinin dikey ekseninde gösterilmektedir (Denklem 3.2).

$$\%id = \Delta ID/ID \times \%100 \quad (3.2)$$

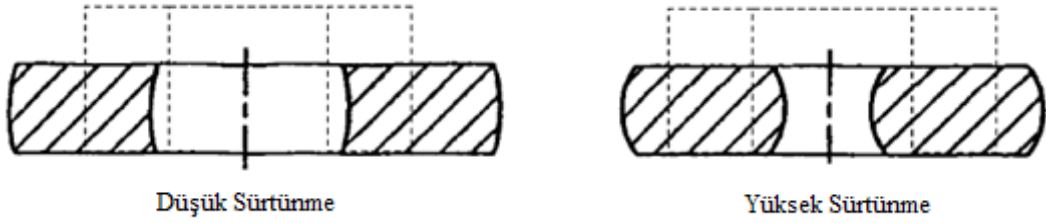
Denklem 3.2’de %id numunenin iç çapındaki yüzde değişimi, ΔID numunenin iç çapındaki değişimi, ID numunenin başlangıçtaki iç çapını ifade etmektedir.

Yükseklikteki deformasyona göre değişen iç çap, numunenin başlangıçtaki şekline bağlıdır. Şekil 3.1.’de standart boyutlarda (dış çap:iç çap:yükseklik 6:3:2) olan halka

numune şematik olarak gösterilmiştir. Deney sırasında numune iç çapının artması sürtünmenin düşük olduğunu gösterir. İç çap azalıyorsa arayüzeydeki sürtünmenin değeri büyüktür (Şekil 3.2.).

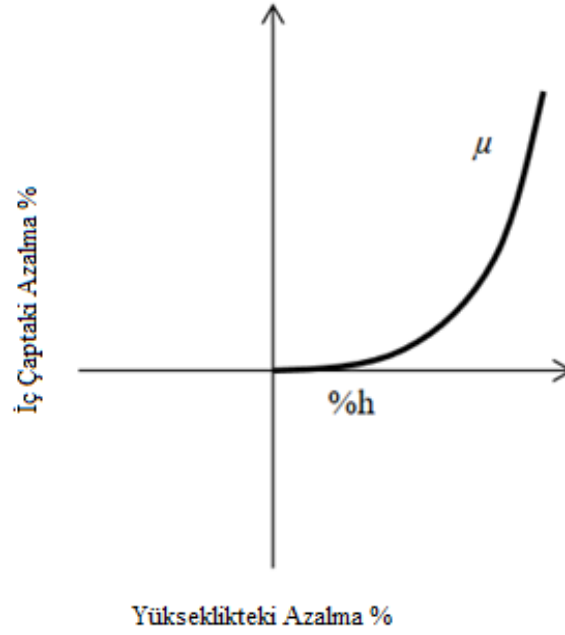


Şekil 3.1. Standart bir halka numunenin şematik resmi [18]



Şekil 3.2. Deney sonrası iç çaptaki değişime göre sürtünme durumlarının şematik olarak gösterilmesi [17]

Şekil 3.3., belirli bir sürtünme katsayısı için tipik bir sürtünme kalibrasyon eğrisini göstermektedir. Numune ve basma aparatının arayüzeyinde sabit bir sürtünme katsayısı olduğu varsayıldığında yükseklikteki yüzde azalmaya bağlı olarak iç çaptaki yüzde değişim, sürtünme kalibrasyon eğrisinde gösterilir. Grafikteki noktalar bir eğri oluşturacak kadar fazla olduğunda sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşmaktadır. Birden fazla sürtünme kalibrasyon eğrisi aynı grafikte gösterildiği zaman, bu grafik sürtünme kalibrasyon haritası olarak da adlandırılır. Sürtünme katsayısı, arayüzey sürtünme durumu sabit kabul edilerek; halka numunelerinin basılması ve belirli bir malzeme için sürtünme kalibrasyon eğrilerinin referans alınmasıyla belirlenir [18].



Şekil 3.3. Sürtünme kalibrasyon eğrisi [18]

3.2. Halka Basma Deneyinin Matematiksel Analizi

Halka basma deneyi ile ilgili ilk tatminkar analiz Avitzur tarafından üst sınır teorisi kullanılarak yapılan matematiksel çözümdür. Daha sonrasında Hawkyard ve Johnson gerilme analizi yöntemi kullanarak bu çözümü doğrulamıştır. Her iki çözümdede bazı kabuller mevcuttur.

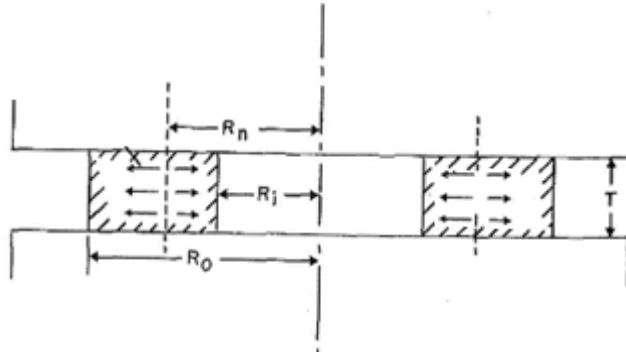
- Silindirik elemanların şekil değişimi uniformdur. Fıçılama yoktur.
- Halka malzemesi Von Mises gerilme şekil değiştirme kanuna uyar. Deformasyon sertleşmesi, elastik deformasyon ve hacimsel değişim olmaz.
- Malzeme ve kalıp arayüzeyinde sabit sürtünme faktörü mevcuttur ve bu, ara yüzeydeki kayma gerilmesi ile ilişkilidir (Denklem 3.3) [10].

$$\tau = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'de τ ara yüzeydeki kayma gerilmesini, m ara yüzeydeki sürtünme faktörünü, σ_0 halka malzemesinin akma gerilmesini ifade etmektedir.

Ara yüzeydeki sürtünme faktörünün (m) ve halka malzemesinin akma gerilmesinin (σ_0) sabit olduğunun kabulü, arayüzeydeki kayma gerilmesinide (τ) sabit yapar [10].

Avitzur, Hawkyard ve Johnson'ın teorik çözümlerinde, basma altındaki halka numunesinde bir R_n nötr yarıçap belirlenmiştir (Şekil 3.4.). Teorik çözümler bu değişkene bağlı olarak Denklem 3.4, Denklem 3.5, Denklem 3.6, Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'de ifade edilmiştir [10].



Şekil 3.4. Halka numunesinin basma testi ve nötr yarıçap [10]

Eğer $R_n \leq R_i$ ise;

$$\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\left(1 + \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4\right) X^2}{\sqrt{X(X-1) \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4 X\right]}} \quad (3.4)$$

$$X = \left(\frac{R_o}{R_i} \exp\left[-\frac{mR_o}{T} \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right)\right]\right)^2 \quad (3.5)$$

Denklem 3.4 R_n , R_i ve 0 arasında değer aldığı ve Denklem 3.6'yı sağladığı zaman geçerlidir.

$$\frac{mR_o}{T} \leq \frac{1}{2\left(1-\frac{R_i}{R_o}\right)} \ln \left[\frac{3\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2}{1+\sqrt{\left(1+3\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^4\right)}} \right] \quad (3.6)$$

Eğer $R_i \leq R_n \leq R_o$ ise;

$$\frac{mR_o}{T} = \frac{1}{2\left(1+\frac{R_i}{R_o}-2\frac{R_n}{R_o}\right)} \ln \left[\frac{\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2 \frac{1+\sqrt{\left(1+3\left(\frac{R_i}{R_o}\right)^4\left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4\right)}}{1+\sqrt{\left(1+3\left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4\right)}}}{1+\sqrt{\left(1+3\left(\frac{R_o}{R_n}\right)^4\right)}} \right] \quad (3.7)$$

Denklem 3.7 R_n , $\frac{R_o+R_i}{2}$ ile R_i arasında değerler aldığı ve Denklem 3.8'i sağladığı zaman geçerlidir.

$$\frac{mR_o}{T} \geq \frac{1}{2\left(1-\frac{R_i}{R_o}\right)} \ln \left[\frac{3\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2}{1+\sqrt{\left(1+3\left(\frac{R_o}{R_i}\right)^4\right)}} \right] \quad (3.8)$$

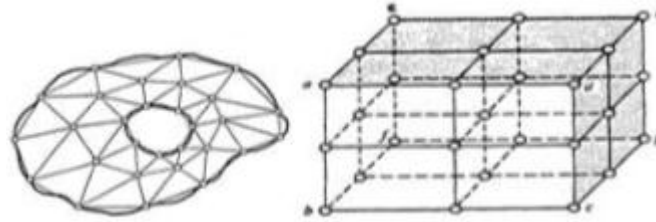
Denklem 3.4, Denklem 3.5, Denklem 3.6, Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'de R_o halka numunesinin başlangıçtaki dış yarıçapını, R_i halka numunesinin başlangıçtaki iç yarıçapını, R_n halka numunesinin başlangıçtaki nötr yarıçapını, m arayüzeydeki sürtünme faktörünü, T halka numunesinin deformasyon sonrası yüksekliğini ifade eder.

Denklemlerde malzemesinin akma gerilmesi (σ_0) ve arayüzeydeki kayma gerilmesi (τ) gözükmesine de bu değerler ara yüzeydeki sürtünme faktörünü (m) bir oranı olarak denklemlerde ifade edilmektedir. Denklemlerdeki temel varsayım bu oranın belirli bir malzeme ve deformasyon durumu için sabit kabul edilmesidir. Eğer analiz, deformasyonun çok küçük artışıyla yürütülürse malzemesinin akma gerilmesi (σ_0) ve etkileşimli yüzeylerdeki kayma gerilmesi (τ) bu artış için yaklaşık olarak sabit kabul edilebilir ve çözüm geçerli olur [10].

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu yöntem, analitik olarak çözümü çok zor olan fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntemdir. Gerilme analizi, ısı transferi, elektromanyetik, akışkanların akışı dahil geniş bir alanda karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılır. İlk defa olarak R. Clough' un çalışmaları sonucu yayınladığı makalesinde 'sonlu elemanlar metodu' ismini kullanmıştır [19, 20].

Sonlu elemanlar yönteminde problemin çözümü, sonlu boyutta çok küçük elemanlara bölünerek gerçekleştirilir. Bu elemanların birleştikleri köşe noktaları düğüm noktalarıdır (Şekil 3.5.). Çözüm sonrasında elde edilen gerilme, deplasman, sıcaklık gibi veriler düğüm noktalarına aittir [21].

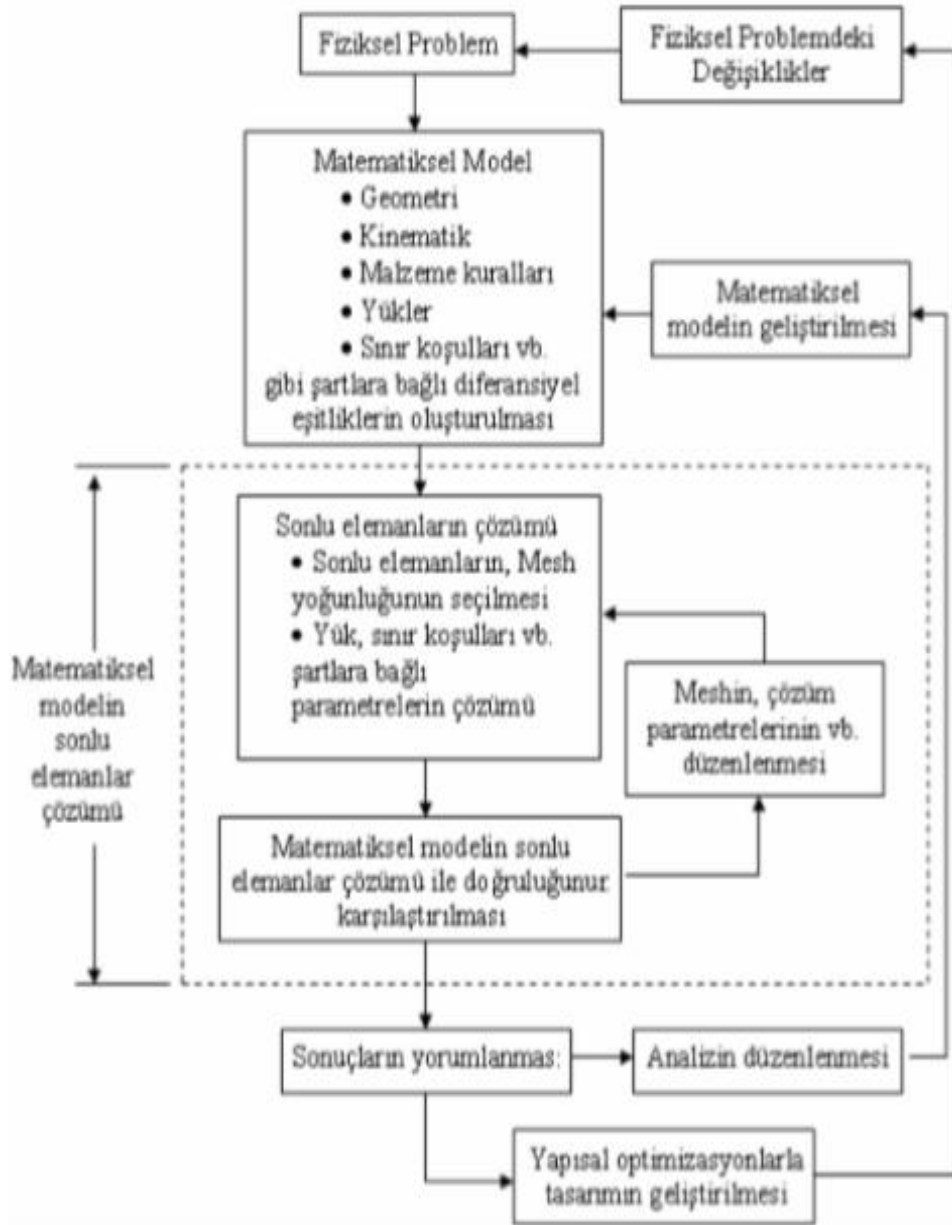


Şekil 3.5. Sonlu elemanlar yönteminde düğüm noktaları ve elemanlar [21].

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerdeki temel adımlar sırasıyla;

- Çözümü gerçekleştirilecek bölgenin oluşturulması ve elemanlara bölünmesi
- Sınır şartları, başlangıç şartları ve dış yüklerin sisteme tanımlanması
- Çözüm
- Verilen elde edilmesi 'dir [20].

Şekil 3.6.'da bir sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizin basamakları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Sonlu elemanlar metodundaki temel adımlar [22]

Sonlu elemanlar yönteminin diğer yöntemlere göre bazı avantajları bulunmaktadır.

Bunlar;

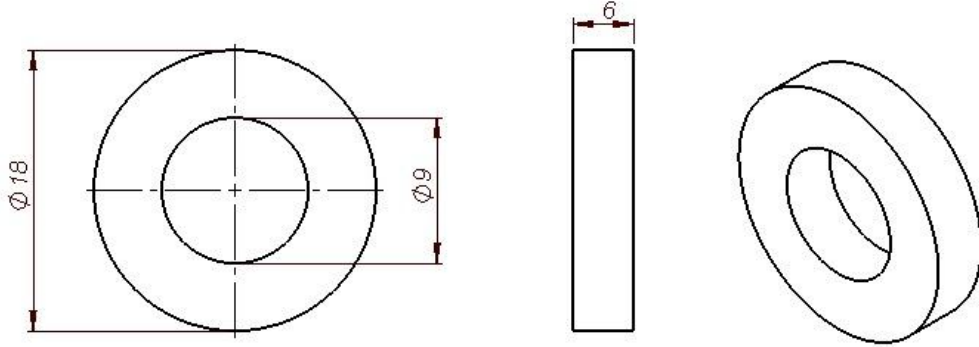
- Sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin esnekliği nedeniyle problemin geometrisi istenilen ölçütlerde oluşturulabilir.
- Karmaşık şekillerdeki çok bağlantılı bölgeler ve köşeler kolaylıkla incelenebilir.

- c. Malzeme özellikleri kolaylıkla tanımlanabilir.
- d. Sınır şartları basit bir şekilde uygulanabilir [21].

BÖLÜM 4. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde halka basma deneyi MSC Marc ticari sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

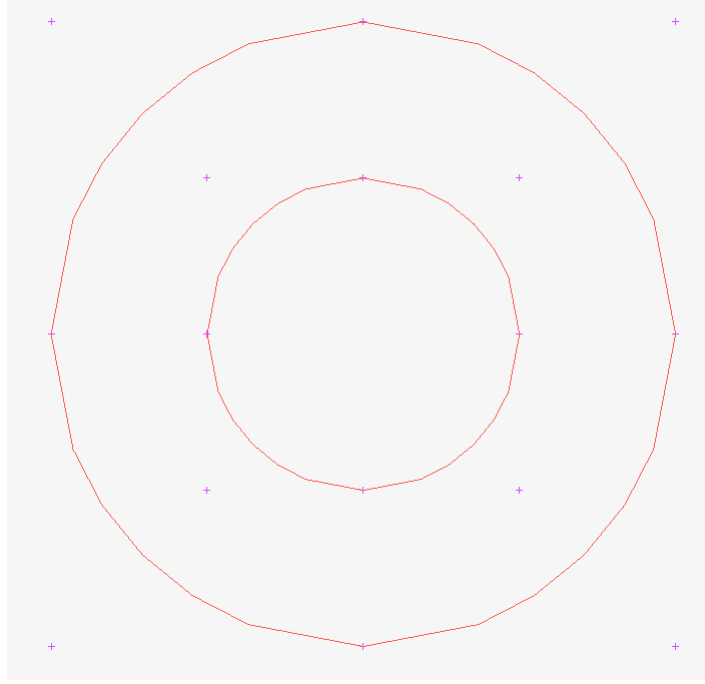
Benzeşimlerde kullanılan halka basma numunesi boyut oranı literatürdeki standart boyut oranı olan 6:3:2 (dış çap:iç çap:yükseklik) oranındadır. Numune dış çapı 18mm, iç çapı 9mm, yüksekliği 6mm olarak alınmıştır. Benzeşimlerde kullanılan deney numunesi ve boyutları Şekil 4.1.'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Benzeşimlerin gerçekleştirildiği halka basma deneyi numunesi ve boyutları

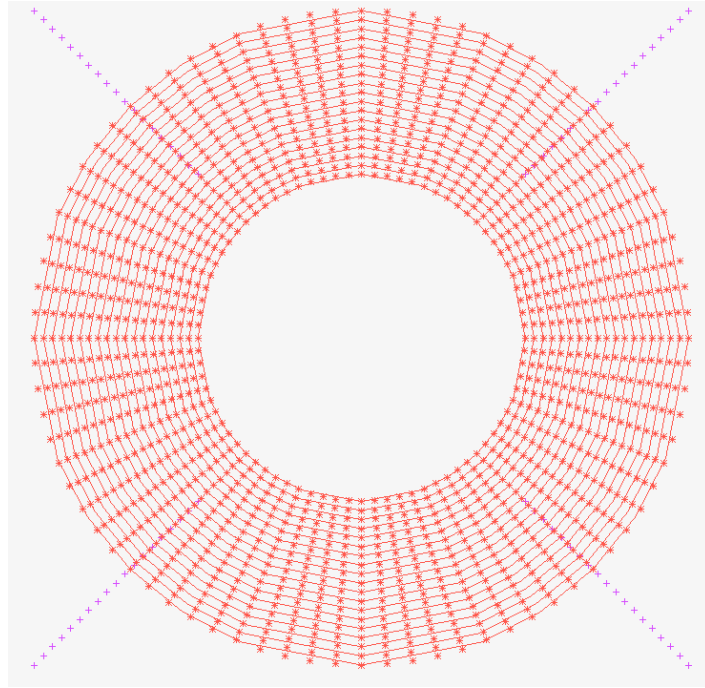
4.1. Halka Basma Numunesinin Boyutlandırılması ve Modellenmesi

Marc programı içinde bulunan Geometry&Mesh menüsünden halka numunesinin kesiti gerekli komutlar kullanılarak çizilmiştir (Şekil 4.2.).



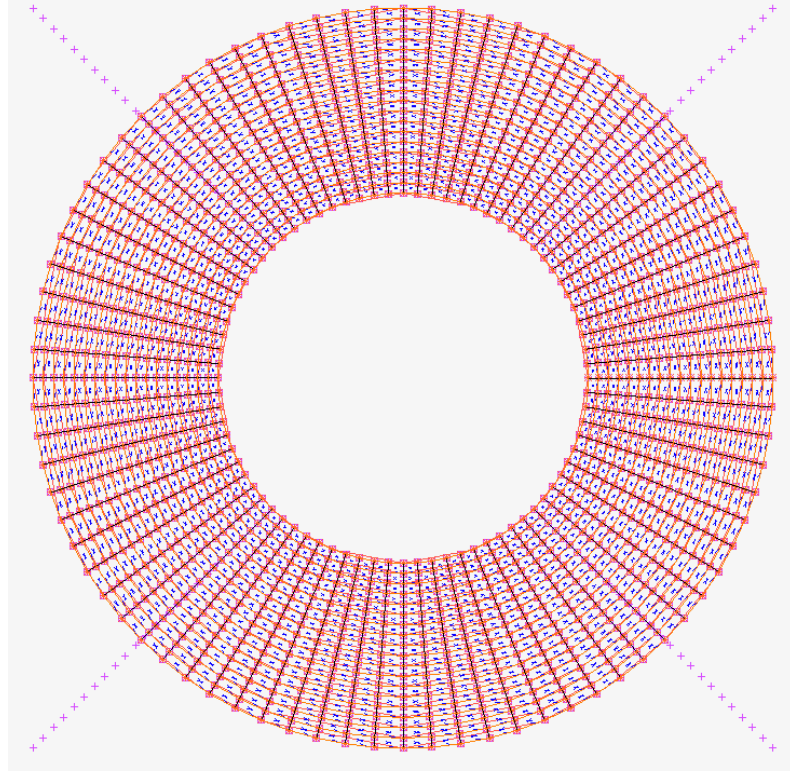
Şekil 4.2. Numunenin kesitini oluşturan eğrilerin gösterilişi

Ağ düzleminin düzgün olması amacıyla ara kısma referans çemberler çizilerek bunlar Curve Divisions komutu yardımıyla parçalara ayrılmıştır (Şekil 4.3.).



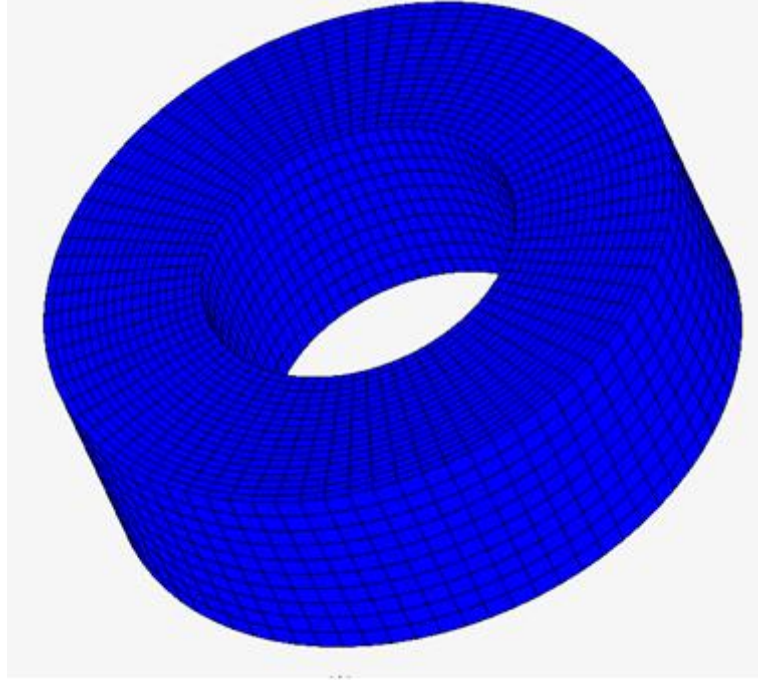
Şekil 4.3. Numune kesit alanı ve referans noktaları

Daha sonra referans çemberler ve üzerindeki referans noktalar kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Numune kesit alanının ağ yapısı

Son olarak Expand komutu kullanılarak ağ yapısı üç boyutlu hale getirilerek halka basma testi numunesi oluşturulmuştur. Bunun için sekiz düğüm noktalı ve her düğüm noktasında 3 serbestlik derecesi olan hex8 eleman tipi seçilmiştir. Halka numuneside oluşturulan ağ yapısı 14400 eleman sayısına ve 16720 düğüm sayısına sahip olup Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



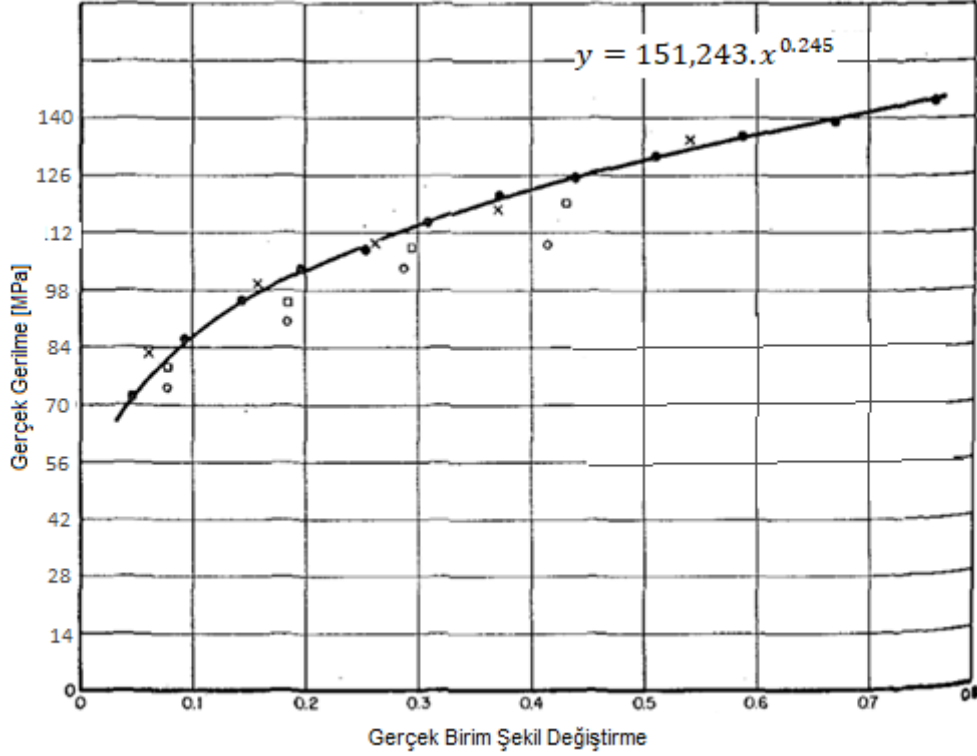
Şekil 4.5. Marc yazılımı kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu deney numunesi

4.2. Malzeme Modeli

Halka basma deneylerinde sürtünme katsayısının ya da sürtünme faktörünün belirlenmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından oluşturulan sürtünme kalibrasyon eğrileri kullanılmaktadır. Bu eğriler ya belirli kabullerin yapılmasıyla matematiksel olarak hesaplanarak ya da sonlu elemanlar benzeşimleri ile oluşturulmuştur. Konu üzerinde öncü çalışmalardan biri olan Lee ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği araştırmada, 1100 Alüminyum alaşımının basma deneyi ile elde edilen akma eğrisi, Holloman Bağıntısı ile sayısal olarak modellenmiş ve bu malzeme modeli kullanılarak çeşitli sürtünme faktörleri için halka basma deneyi benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerden sürtünme faktörünün belirlenebileceği sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.6.'da basma deneyi ile elde edilen 1100 Alüminyum alaşımının akma eğrisi gösterilmiştir [11].

Bu çalışmada kullanılacak malzeme modeli olarak Lee ve arkadaşlarının kullandığı malzeme referans olarak seçilmiştir (Şekil 4.6.). MSC Marc ticari programına malzeme özellikleri olarak elastisite modülü, E , 70000 MPa, poisson oranı, ν , 0,33 ve malzemenin plastik davranışını gösteren gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme

grafiğinden elde edilen dayanım katsayısı “K” değeri 151,243 MPa ve pekleşme üsteli değeri “n” 0,245 girilmiştir.



Şekil 4.6. 1100 Alüminyum alaşımı için basma testi sonucu elde edilmiş akma eğrisi [11]

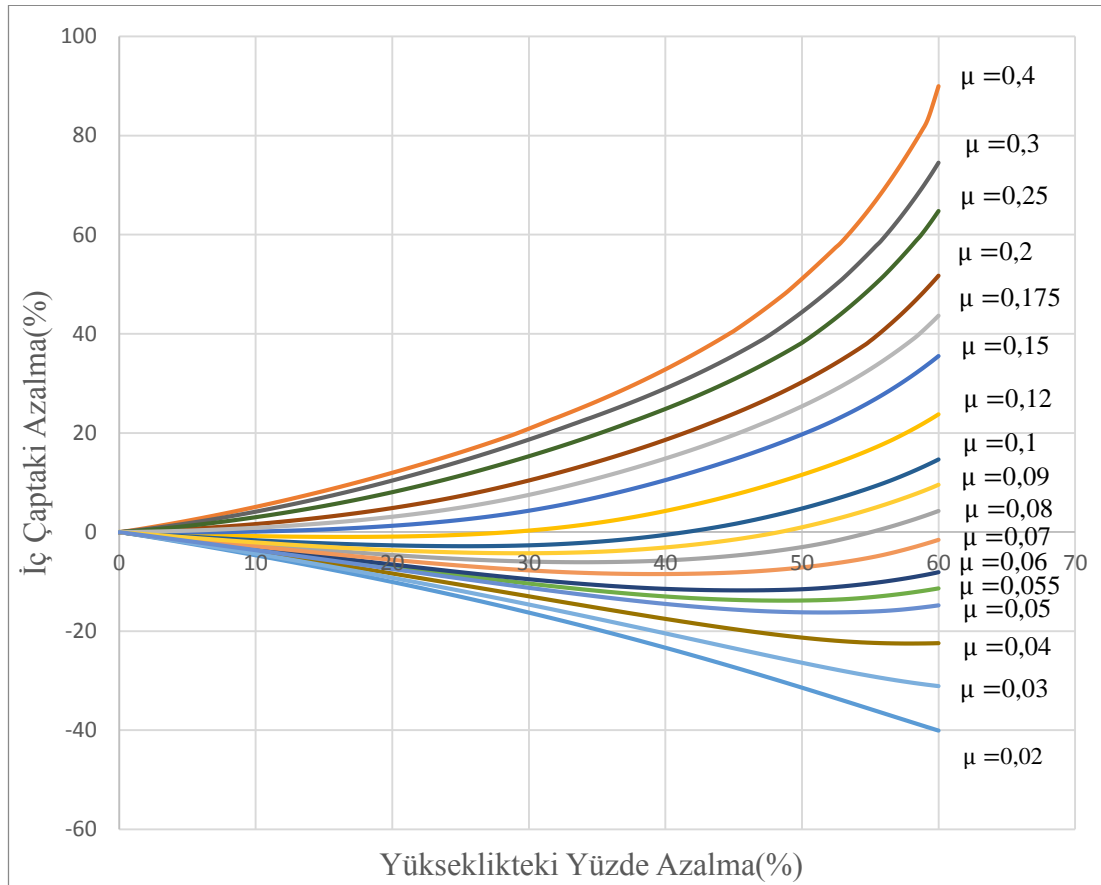
Farklı pekleşme üstel değerlerinin sürtünme kalibrasyon eğrilerini nasıl etkilediğini ortaya çıkarmak amacıyla diğer malzeme büyüklükleri aynı tutularak 0 ve 0,5 pekleşme üsteli (n) değerleri için de analizler gerçekleştirilmiştir.

4.3. Sınır Şartlarının Uygulanması ve Sonuçlar

Halka basma testinin bilgisayar ortamında benzeşiminin gerçekleştirilmesi için iki düz kalıp oluşturulmuştur. Numune ve kalıplar arasındaki sürtünme durumu Contact menüsü kullanılarak tanımlanmıştır. Malzeme kalıp arayüzeyinde $\mu = 0,02$ ve $\mu = 0,4$ arasında değişen belirli sürtünme katsayıları için benzeşimler gerçekleştirilmiştir. Halka numune alt kalıbın üzerine yerleştirilmiştir. Üst kalıp ile numune arasında ilk durumda temas yoktur. Üst kalıba verilen deplasmanla birlikte numune

deformasyona uğrattılır. Halka numesinin iç çapındaki ve yüksekliğindeki değişimin yüzdesi belirlenerek sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulur.

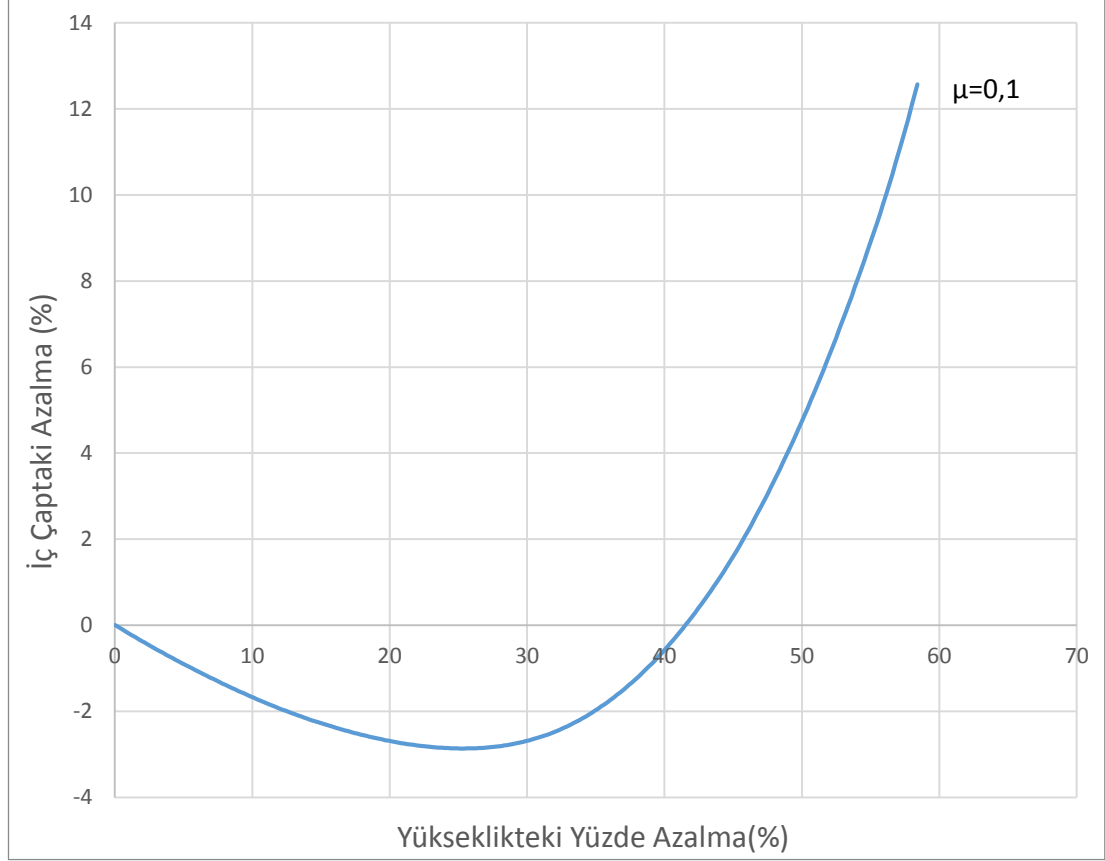
Şekil 4.7.'de $K=151,243$ MPa ve $n=0,245$ değerli kullanılarak farklı sürtünme koşulları için gerçekleştirilen benzeşimler sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.7. Sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 4.7.'de analiz sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrilerinde, oldukça düşük sürtünme katsayısı değerleri ($\mu = 0,02$ ve $\mu = 0,04$) için deformasyon (basma) sırasında halka numesinin iç çapının sürekli olarak arttığı görülmektedir. $\mu = 0,05$ ve $\mu = 0,12$ arasındaki sürtünme katsayısı değerleri için ise halka numesinin iç çapı önce belirli bir deformasyon oranına kadar artış göstermiş, bu deformasyon oranının üstündeki değerlerde ise halka numesinin iç çapı azalmıştır.

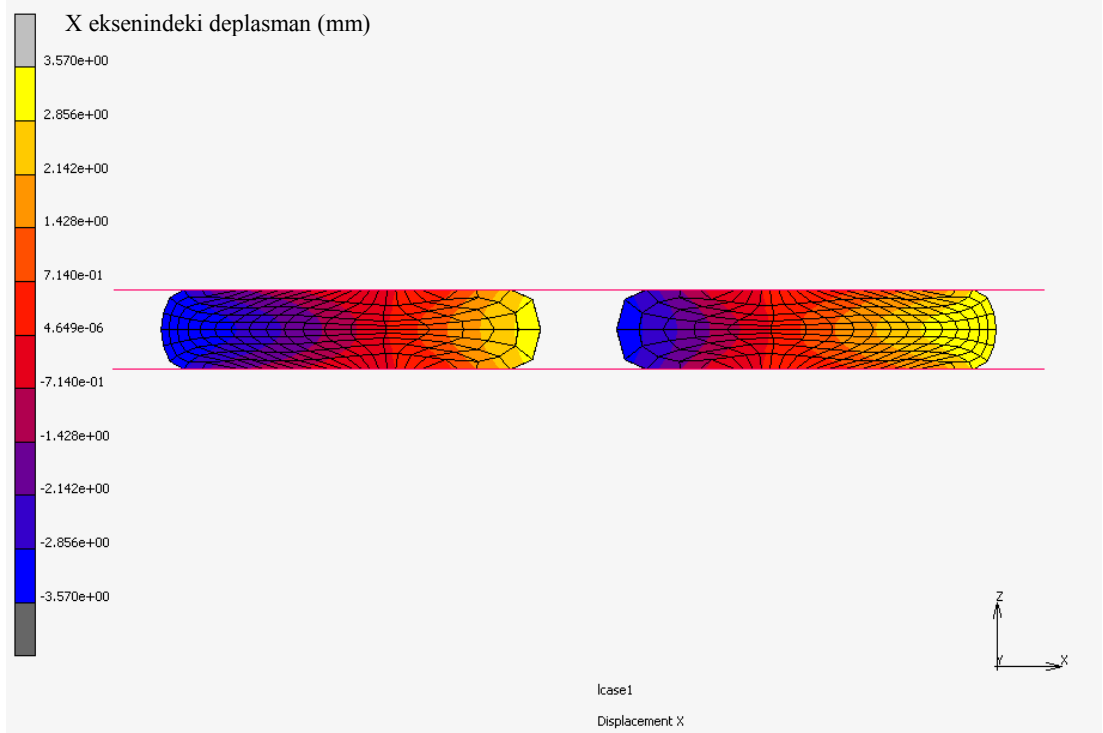
Sürtünme katsayısı $\mu = 0,1$ iken numunenin iç çapındaki artıştan azalışa geçiş, yükseklikte yaklaşık %27 azalma değerinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.8.).



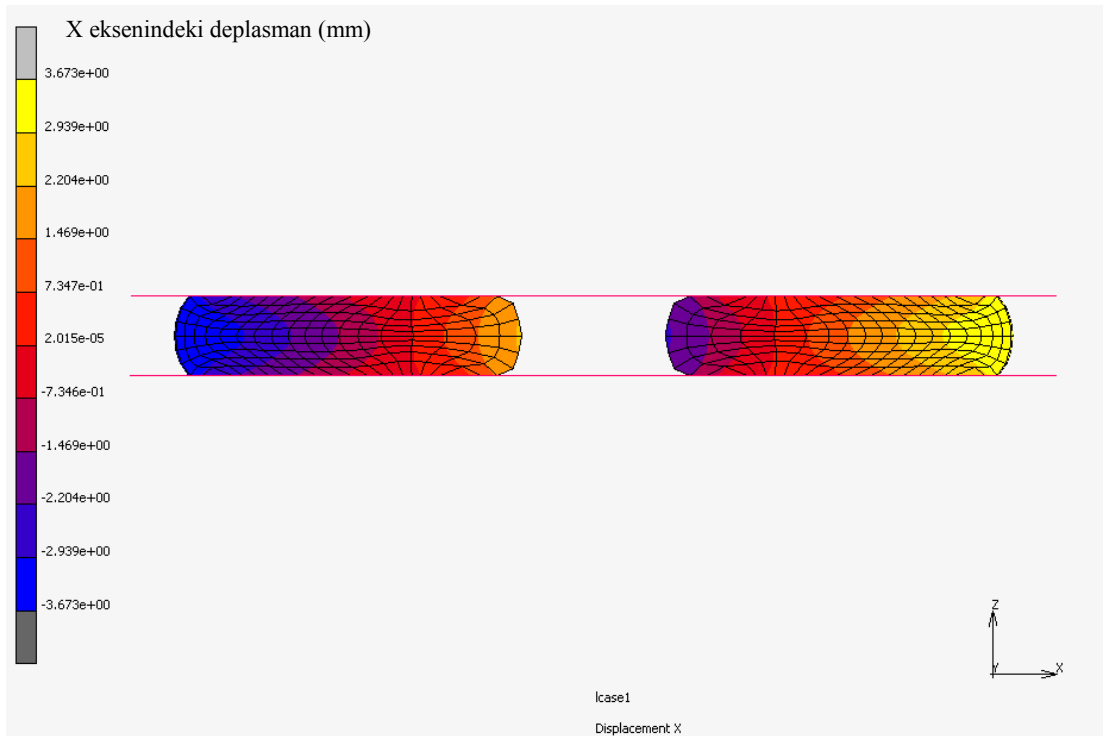
Şekil 4.8. $\mu=0,1$ için sürtünme kalibrasyon eğrisi

Sürtünme katsayısı $\mu = 0,12$ den daha büyük bir değer aldığıında, iç çaptaki artıştan azalışa geçiş ortadan kalkar. Bu değer üstündeki sürtünme durumlarında deformasyon boyunca iç çap sadece azalmaktadır.

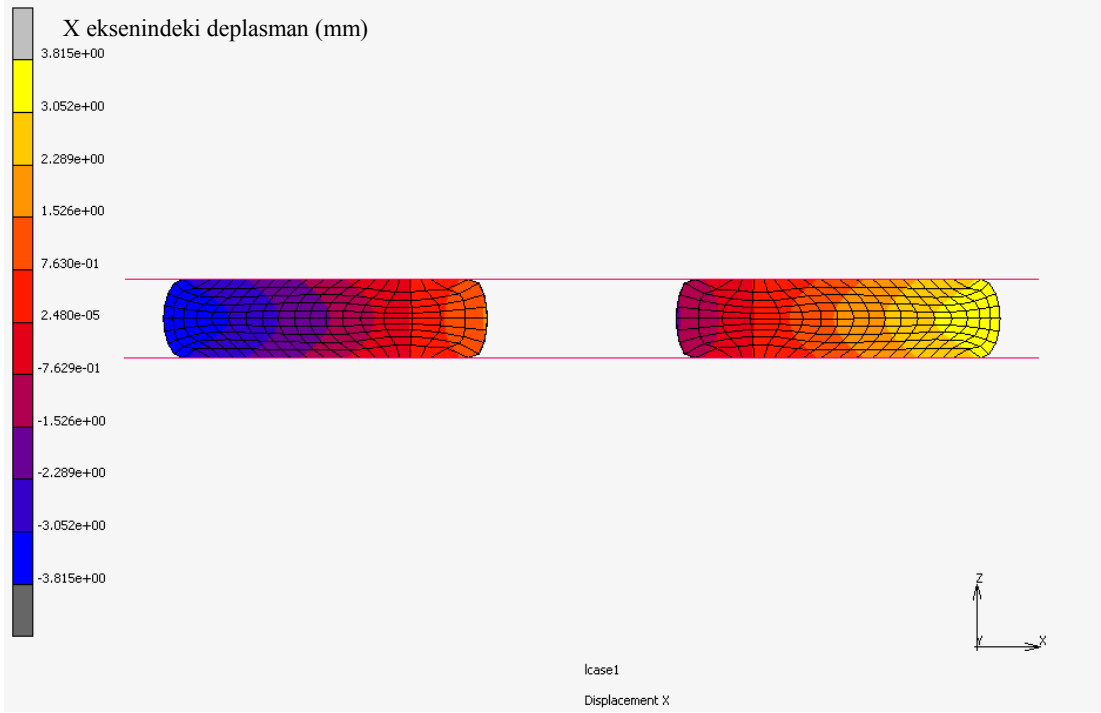
Şekil 4.9., Şekil 4.10., Şekil 4.11., Şekil 4.12., Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.'de farklı sürtünme durumlarında deformasyon sonrası numune iç çapındaki ve yüksekliğindeki değişimi gösteren sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen numune kesitleri gösterilmiştir.



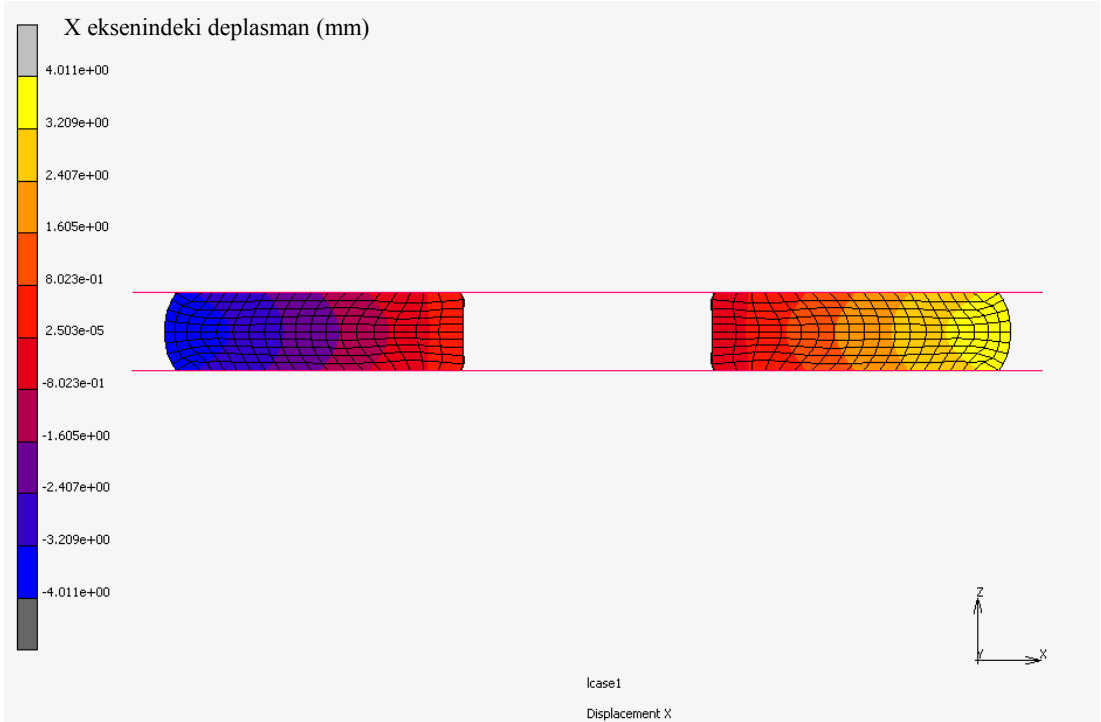
Şekil 4.9. $\mu=0,3$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



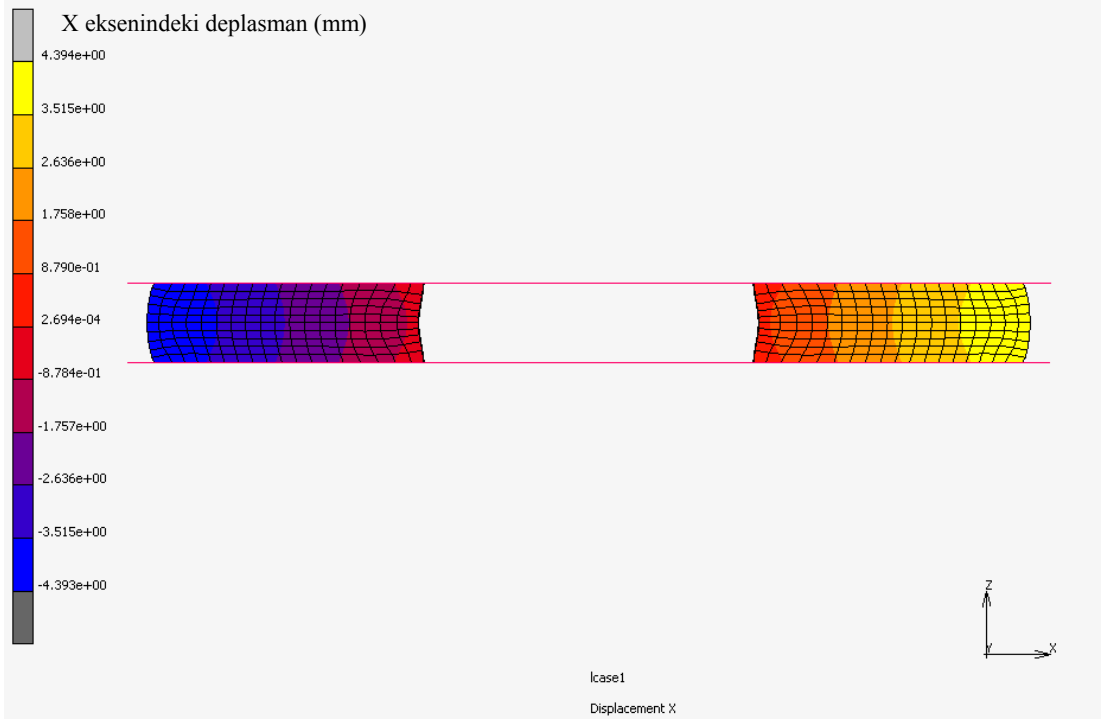
Şekil 4.10. $\mu=0,2$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



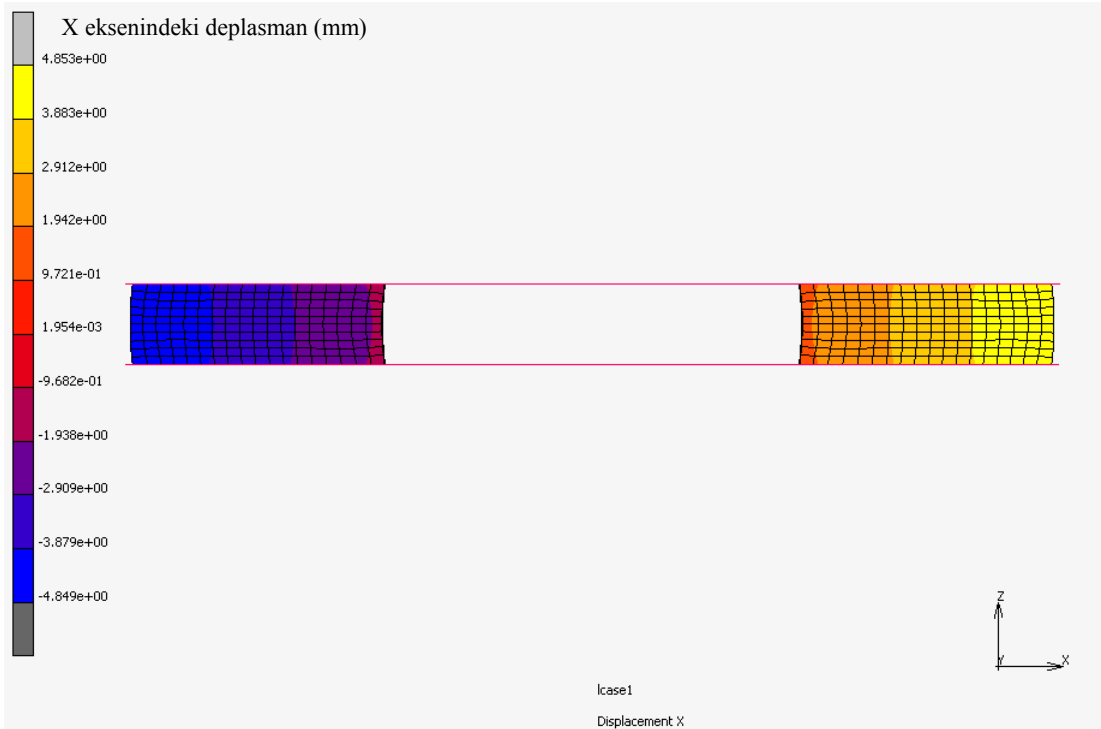
Şekil 4.11. $\mu=0,15$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



Şekil 4.12. $\mu=0,1$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi

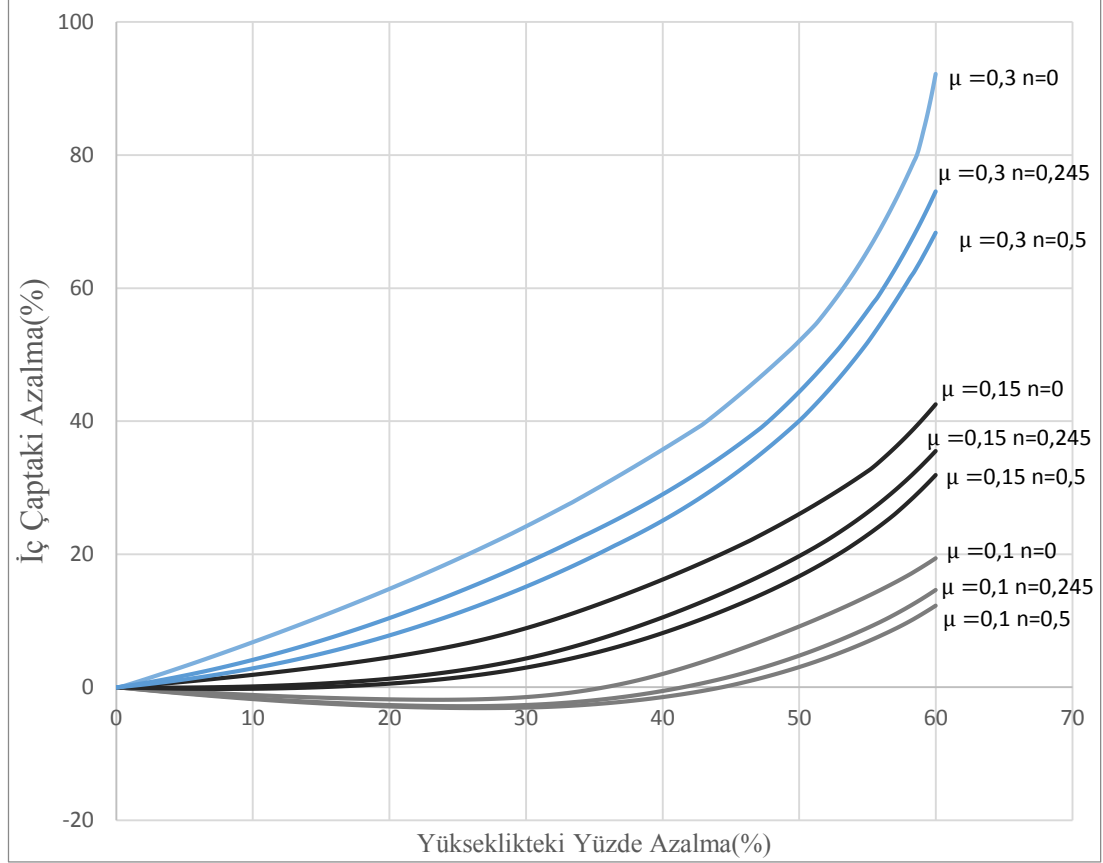


Şekil 4.13. $\mu=0,05$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



Şekil 4.14. $\mu=0,02$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi

Sürtünme katsayısı $\mu = 0,3$, $\mu = 0,15$, $\mu = 0,1$ için diğer malzeme büyüklükleri (elastiklik modülü, poisson oranı ve dayanım sabiti) sabit tutularak farklı pekleşme üsteli değerleri ile gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucunda, sürtünme kalibrasyon eğrileri çizilmiştir ve Şekil 4.15.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$ için pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrisine etkisi

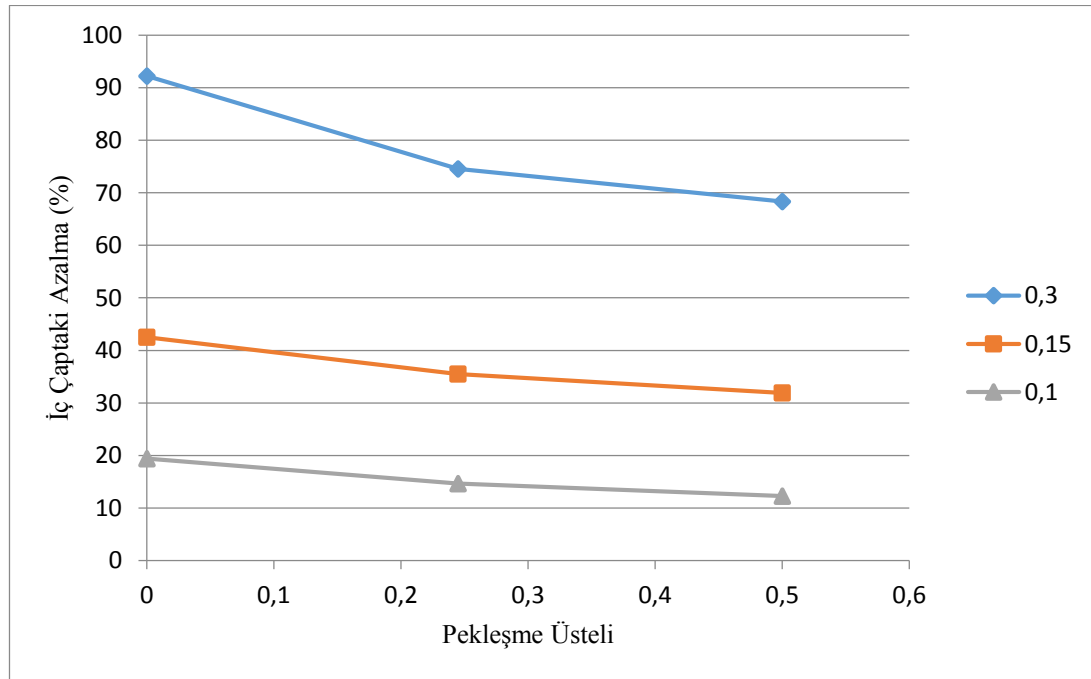
$\mu = 0,3$ ve $\mu = 0,15$ sürtünme katsayıları için pekleşme üsteli değeri arttıkça deformasyon sırasında iç çaptaki azalışta düşme meydana gelmektedir. $\mu = 0,1$ sürtünme katsayısı değeri için deformasyon sırasında iç çap ilk önce artar ve belirli bir deformasyon değerinden sonra ise azalır. Bu geçiş noktasına kadar pekleşme üsteli değeri yükseldikçe iç çaptaki artış yükselirken, bu noktanın üzerinde ise iç çaptaki azalış düşmektedir.

Tablo 4.1. ve Şekil 4.16.'da pekleşme üstelinin farklı sürtünme katsayıları için %60'lık deformasyon (yükseklikte azalma) sonucu iç çaptaki azalmayı yüzde kaç

değiştirdiği verilmiştir. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,3$ iken pekleşme değerleri $n = 0$ ve $n = 0,5$ pekleşme üsteli değerlerinde iç çaptaki azalma sırasıyla %92,2 ve %68,34'dır. Bu değerler arasında $92,2 - 68,34 = \%23,86$ fark vardır. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,15$ ve $\mu = 0,1$ olduğunda ise söz konusu fark sırasıyla %10,63 ve %7,13 olmaktadır. Pekleşme üstelinin artmasından kaynaklanan bu fark sürtünme katsayısı arttıkça belirginleşmektedir, yani artmaktadır.

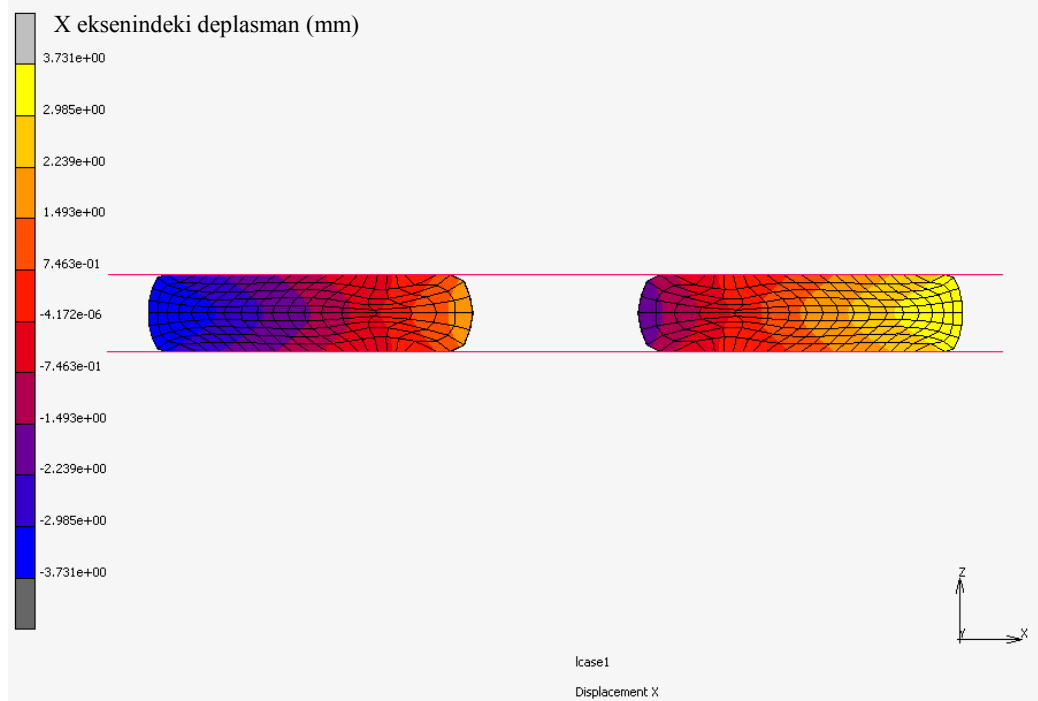
Tablo 4.1. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$ iken % 60 deformasyon anında pekleşme katsayısının iç çap değişimine etkisi

	n=0 ve %60 deformasyon sırasında iç çaptaki azalma	n=0,245 ve %60 deformasyon sırasında iç çaptaki azalma	n=0,5 ve %60 deformasyon sırasında iç çaptaki azalma
$\mu=0,3$	%92,20	%74,56	%68,34
$\mu=0,15$	%42,53	%35,48	%31,90
$\mu=0,1$	%19,40	%14,63	%12,27

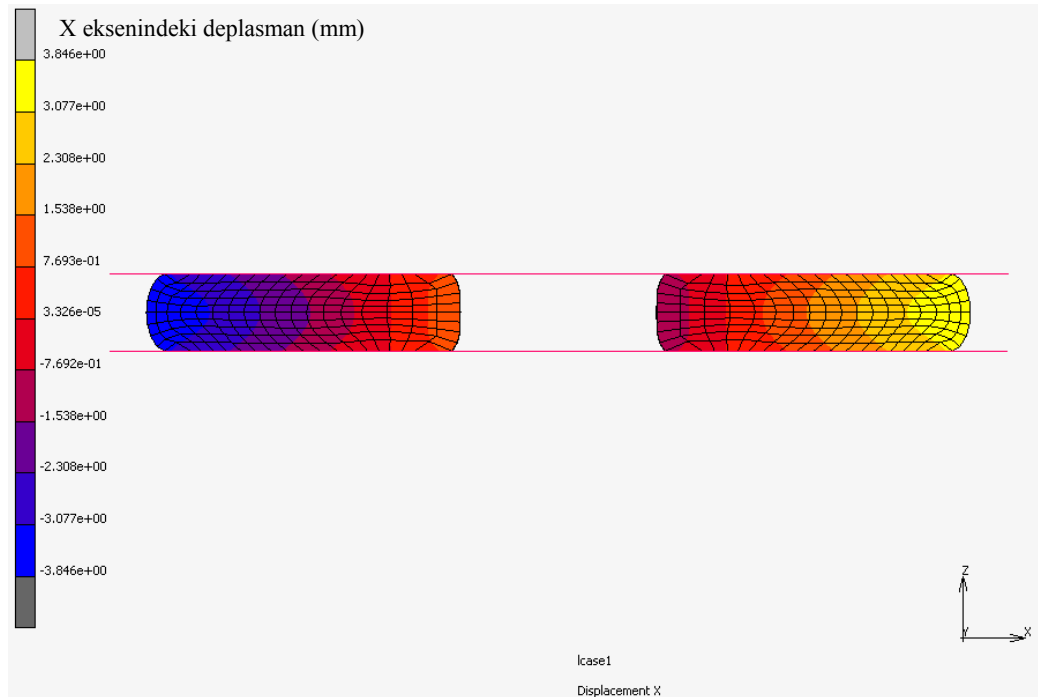


Şekil 4.16. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$ iken %60 deformasyon anında pekleşme üstelinin iç çaptaki azalmaya etkisi

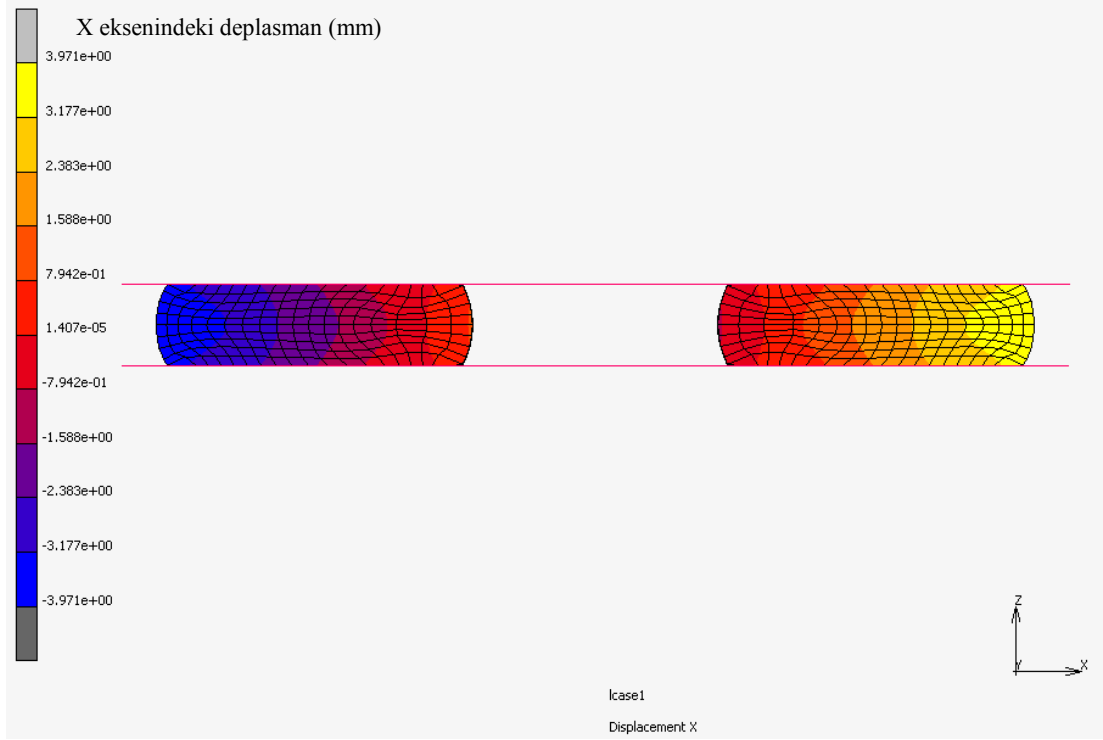
Şekil 4.17., Şekil 4.18., Şekil 4.19., ve Şekil 4.20.'de $\mu = 0,15$, $\mu = 0,1$ sürtünme katsayıları ve farklı pekleşme üsteli değerlerinde deformasyon sonrası numune iç çapındaki ve yüksekliğindeki değişimler gösterilmiştir.



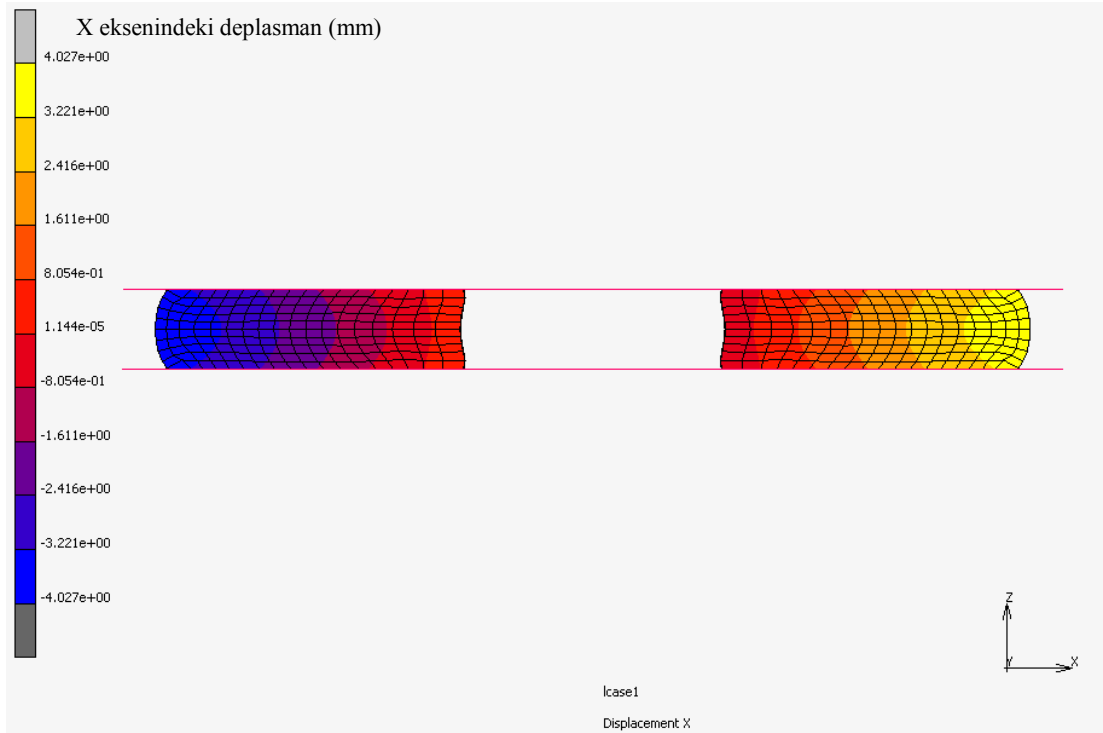
Şekil 4.17. $\mu=0,15$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



Şekil 4.18. $\mu=0,15$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi

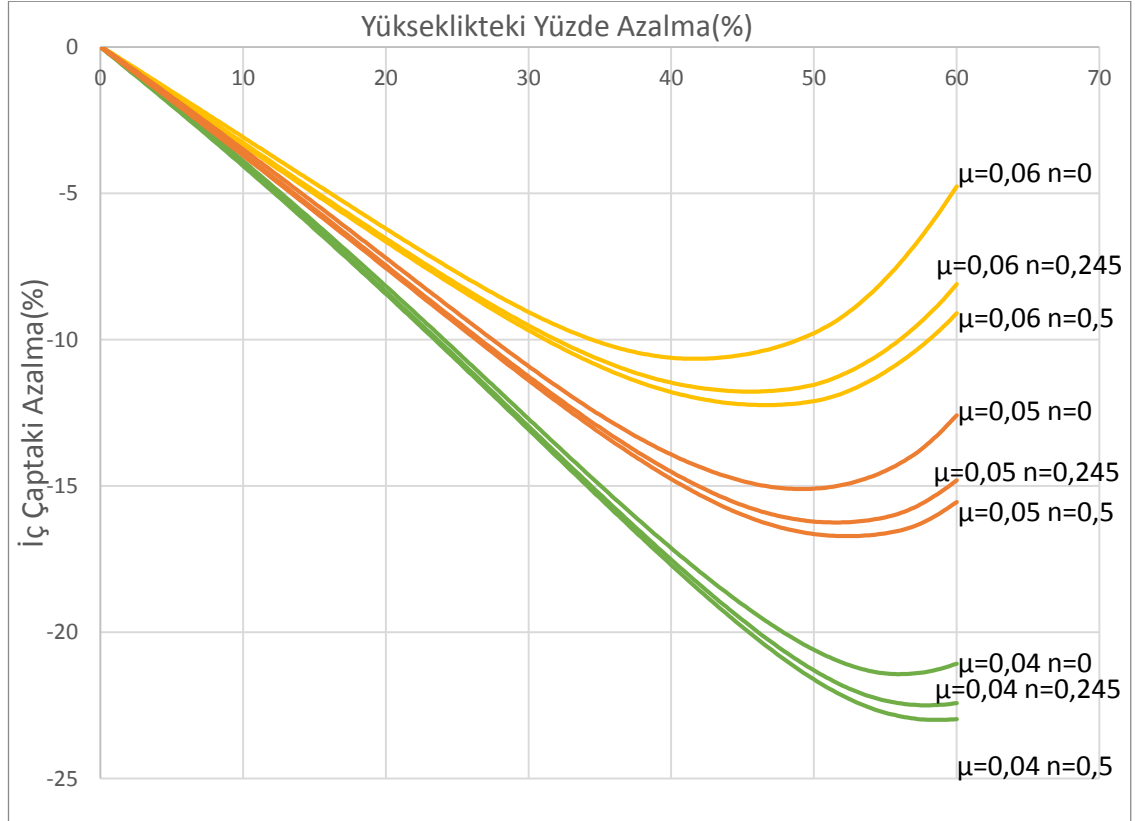


Şekil 4.19. $\mu=0,1$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



Şekil 4.20. $\mu=0,1$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi

$\mu = 0,06$, $\mu = 0,05$, $\mu = 0,04$ sürtünme katsayısı değerleri için de diğer malzeme büyüklükleri (elastiklik modülü, poisson oranı ve dayanım sabiti) sabit tutularak, farklı pekleşme üsteli değerleri için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve analizlerin sonucunda elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri Şekil 4.21.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Sürtünme katsayısı $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken pekleşme katsayısının sürtünme kalibrasyon eğrisine etkisi

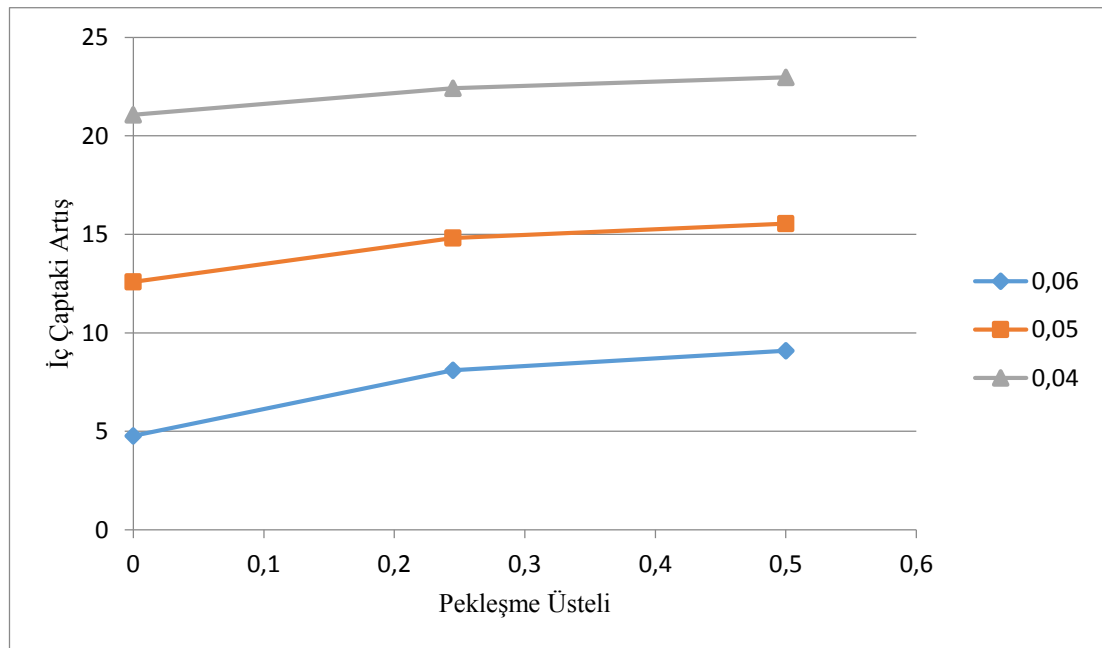
$\mu = 0,06$, $\mu = 0,05$, $\mu = 0,04$ sürtünme katsayısı değerleri için, pekleşme üsteli değeri arttıkça deformasyon sırasında meydana gelen iç çaptaki artış artmaktadır.

Tablo 4.2. ve Şekil 4.22.'de farklı sürtünme katsayılarında %60 deformasyon sonucu pekleşme üstelinin iç çaptaki artışı nasıl etkilediği gösterilmiştir. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,06$ $n = 0$ ve $n = 0,5$ pekleşme değerleri için iç çaptaki artış sırasıyla %4,77 ve % 9,1'dir. Bu iki değer arasındaki fark, $9,1-4,77=\%4,33$ 'tür. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,05$ ve $\mu = 0,04$ olduğunda ise söz konusu fark sırasıyla %2,97 ve %1,9

olmaktadır. Yani pekleşme üsteli arttıkça iç çaptaki artış artmaktadır. Daha yüksek pekleşme değerleri için iç çapta meydana gelen artış, söz konusu sürtünme katsayısı aralığında ($\mu=0,06-0,04$) sürtünme katsayısı arttıkça belirginleşmekte ve artmaktadır.

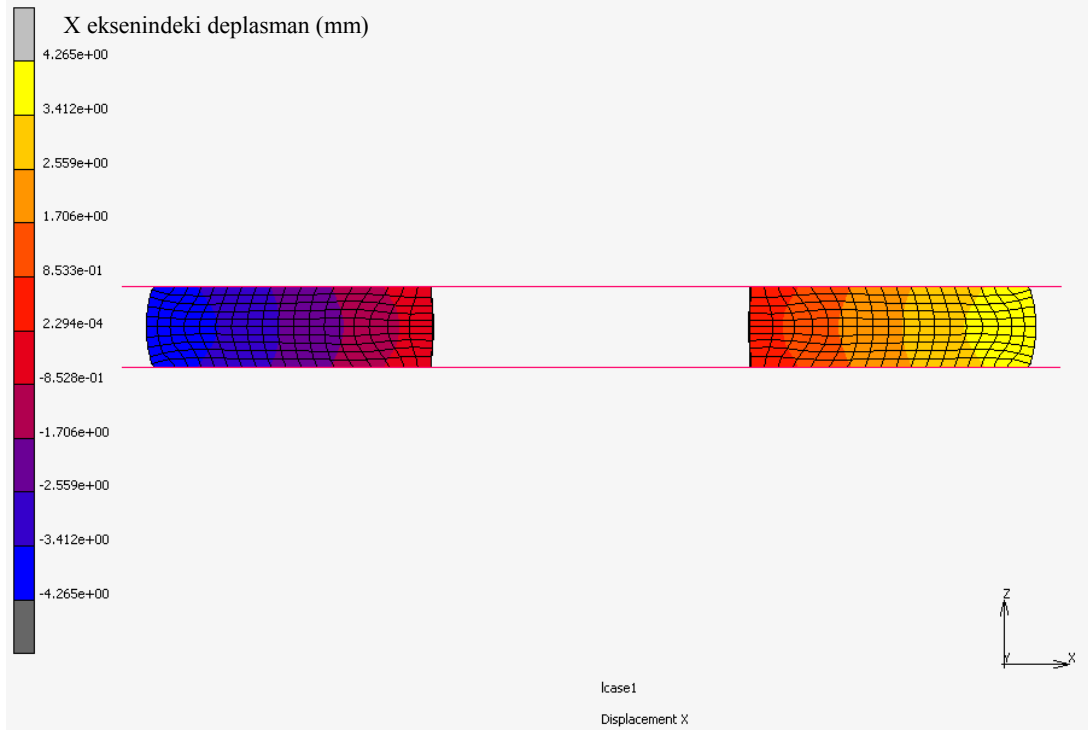
Tablo 4.2. Sürtünme katsayısı $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken % 60 deformasyon anında pekleşme katsayısının iç çap değişimine etkisi

	n=0 ve %60 deformasyon sırasında iç çaptaki artma	n=0,245 ve %60 deformasyon sırasında iç çaptaki artma	n=0,5 ve %60 deformasyon sırasında iç çaptaki artma
$\mu=0,06$	%4,77	%8,10	%9,10
$\mu=0,05$	%12,58	%14,81	%15,55
$\mu=0,04$	%21,07	%22,42	%22,97

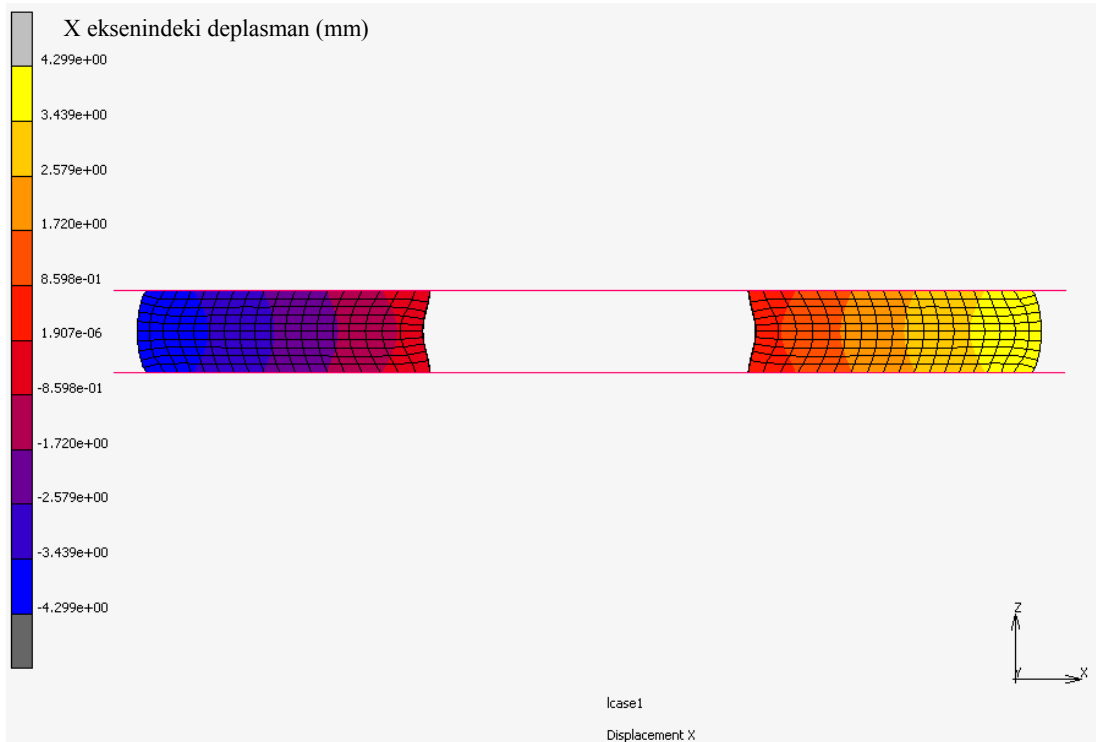


Şekil 4.22. Sürtünme katsayısı $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken % 60 deformasyon anında pekleşme katsayısının iç çap artışına etkisi

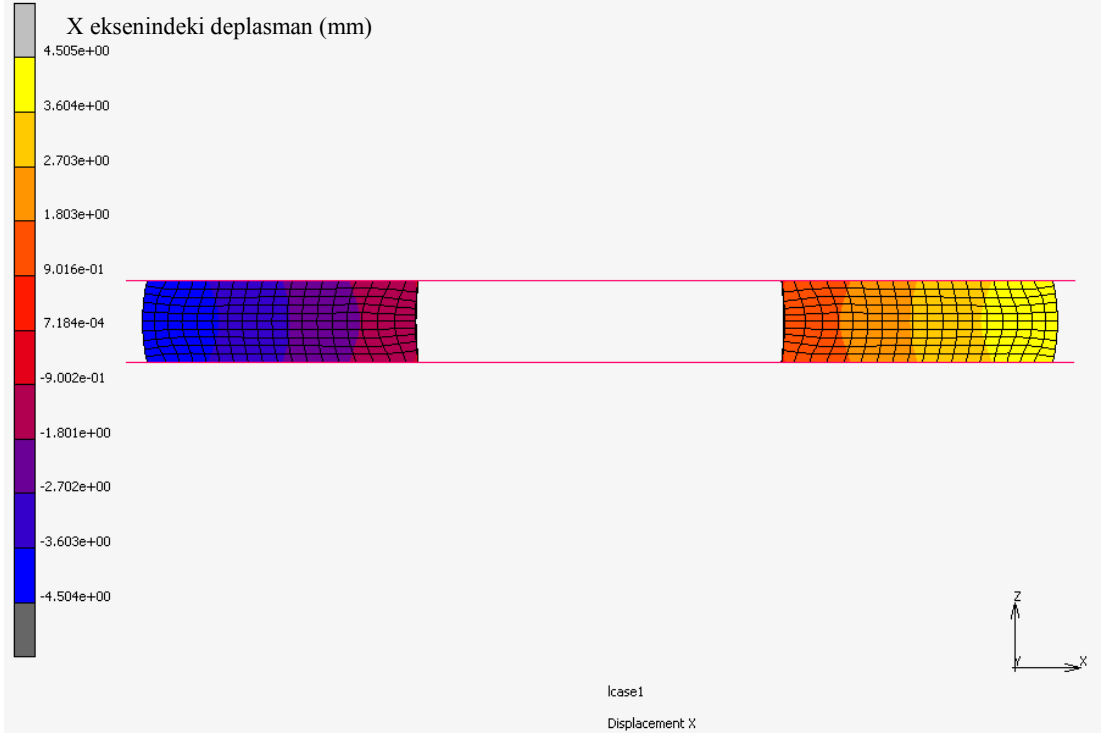
Şekil 4.23., Şekil 4.24., Şekil 4.25., Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de $\mu = 0,06$, $\mu = 0,04$ sürtünme katsayıları ve farklı pekleşme üsteli değerlerinde deformasyon sonrası numune iç çapındaki ve yüksekliğindeki değişimler gösterilmiştir.



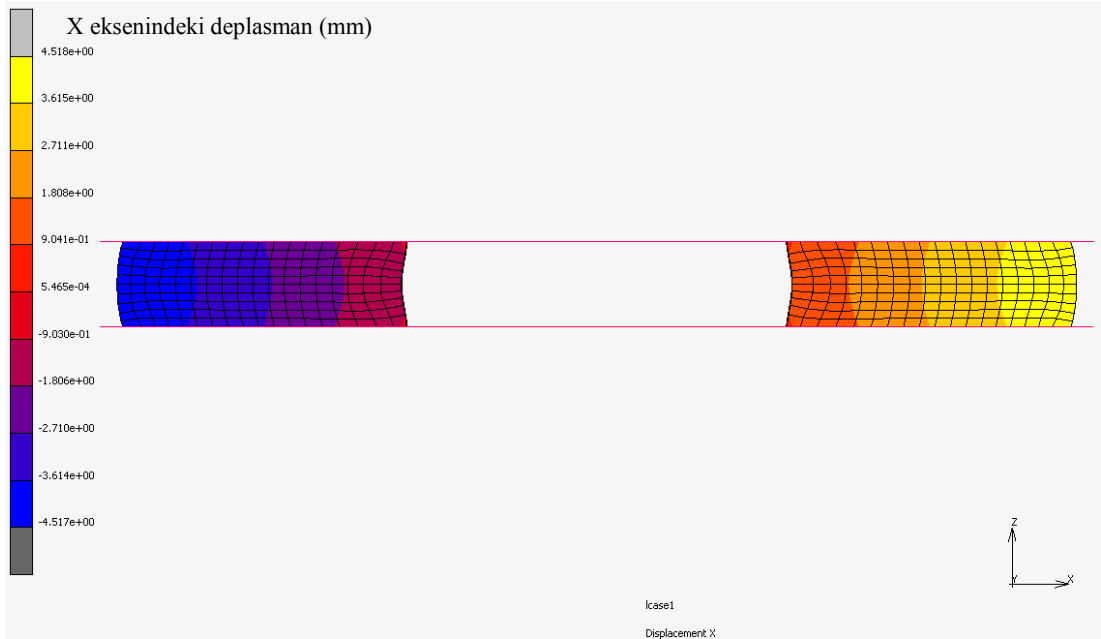
Şekil 4.23. $\mu=0,06$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



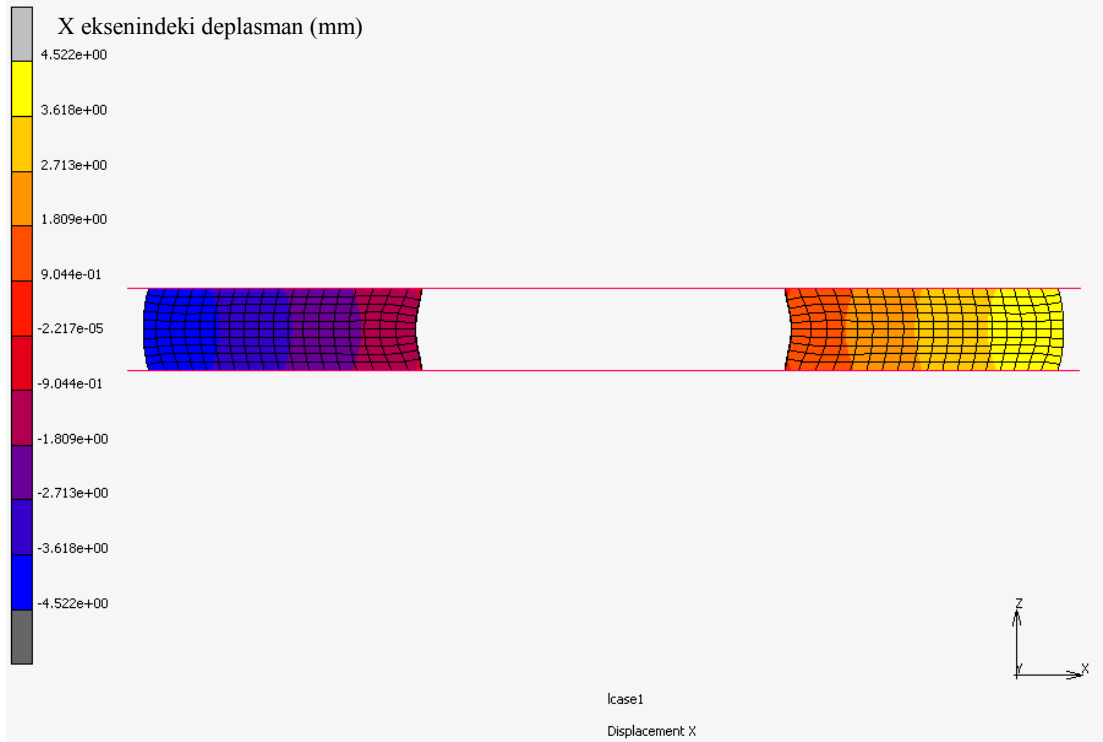
Şekil 4.24. $\mu=0,06$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



Şekil 4.25. $\mu=0,04$ ve $n=0$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi

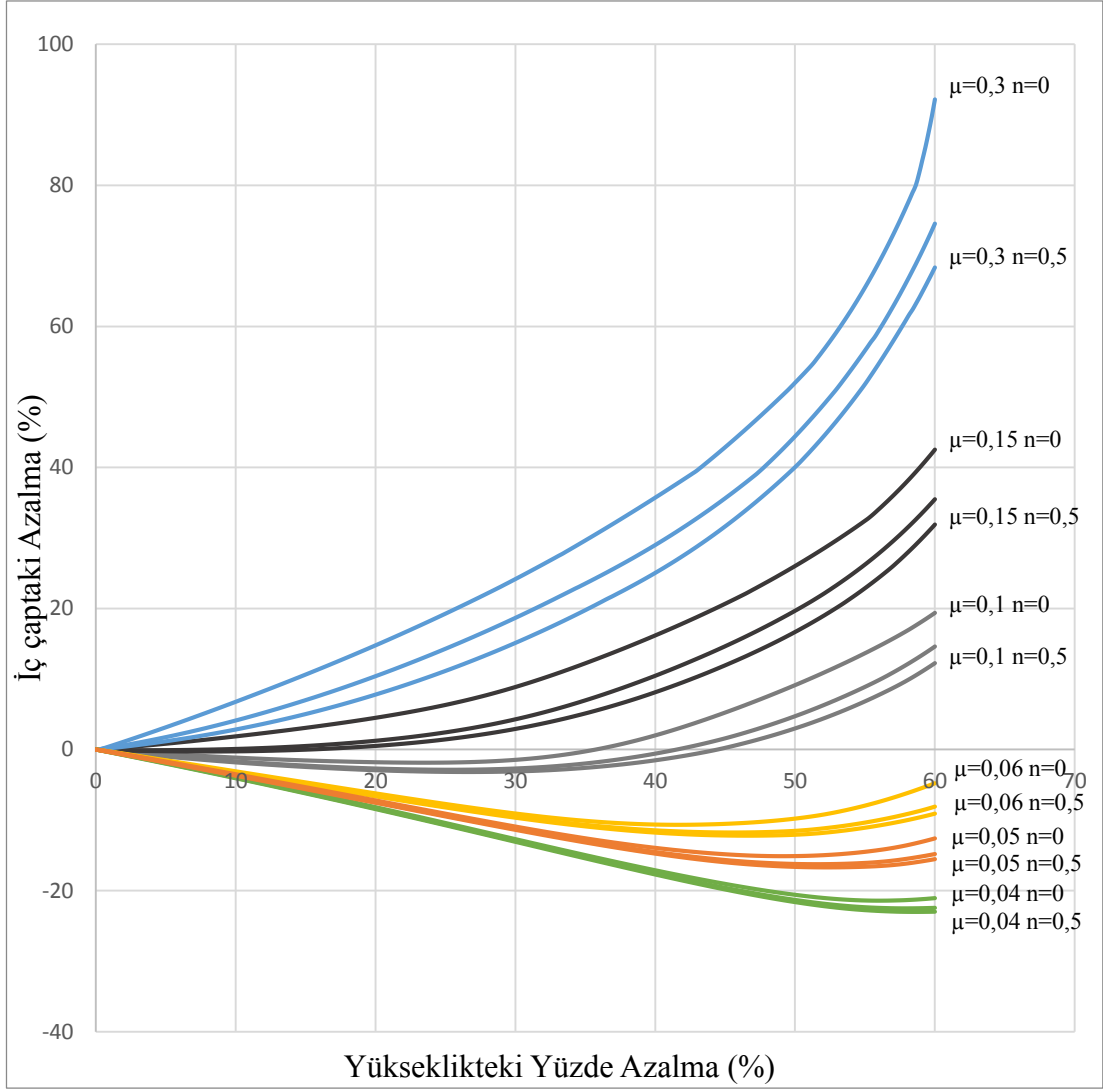


Şekil 4.26. $\mu=0,04$ ve $n=0,245$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi



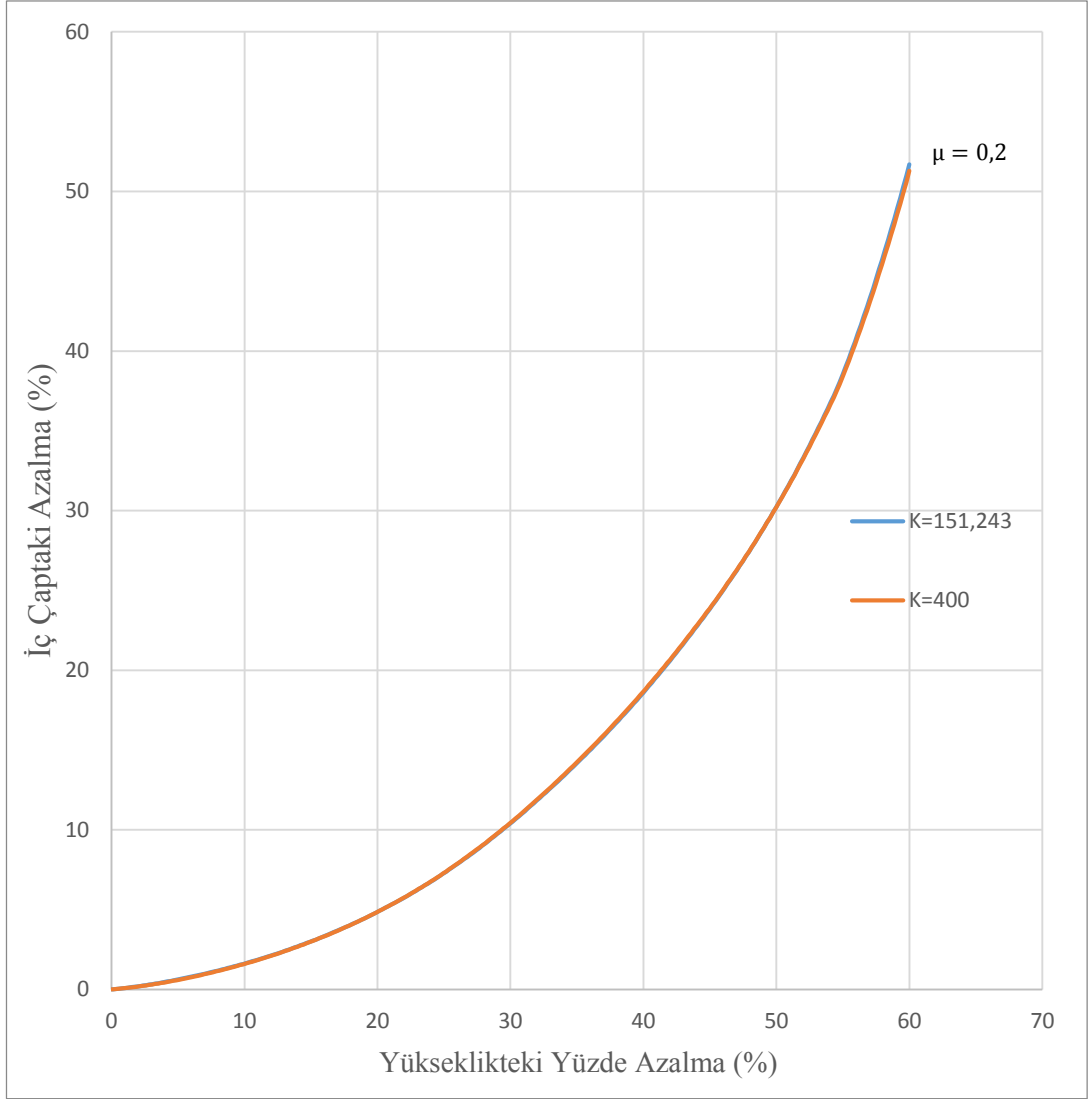
Şekil 4.27. $\mu=0,04$ ve $n=0,5$ için numunenin deformasyon sonrası kesidi

Şekil 4.15., Şekil 4.21.'de sırasıyla yüksek ve düşük sürtünme katsayılarına göre pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrilerini nasıl etkilediği verilmişti. Bu grafikler birleştirilerek Şekil 4.28.'de gösterilmiştir. Şekil 4.28.'de görüldüğü gibi sürtünme katsayısı arttıkça pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisi belirginleşmektedir.



Şekil 4.28. Sürtünme katsayısı $\mu=0,3$, $\mu=0,15$, $\mu=0,1$, $\mu=0,06$, $\mu=0,05$, $\mu=0,04$ iken pekleşme katsayısının sürtünme kalibrasyon eğrilerine etkisi

Farklı dayanım katsayı değerlerinin sürtünme kalibrasyon eğrilerini nasıl etkilediğini ortaya çıkarmak amacıyla diğer malzeme büyüklükleri aynı tutularak 151,243 MPa ve 400 MPa dayanım katsayısı (K) değerleri için de analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.29). Gerçekleştirilen benzeşimlerde dayanım katsayısı, K değerinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerine etkisinin olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.29. Sürtünme katsayısı $\mu=0,2$ iken farklı dayanım katsayılarının sürtünme kalibrasyon eğrisine etkisi

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Halka basma deneyi sırasında; halka numunenin yüksekliği azalırken numunenin iç çapında da bir değişiklik meydana gelir. Bu değişim sürtünme durumuyla ilişkilidir. Numune ve kalıp arasında sürtünme bulunmadığında (ideal koşullar) iç çap plastik deformasyon sırasında büyür. Sürtünme arttıkça iç çapın büyümesi gittikçe azalır. Yapılan benzeşimler sonucu elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrilerinde (Şekil 4.7.) düşük sürtünme katsayısı değerlerinde ($\mu = 0,02 - 0,04$) basma sırasında iç çap sürekli olarak artmaktadır. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,05$ ile $\mu = 0,12$ arasında bir değer aldığı anda ise, belirli bir deformasyona (yükseklikte azalmaya) kadar iç çapta artış, daha sonra ise iç çapta azalış meydana gelmiştir. İç çapta artıştan azalışa geçiş sürtünme katsayısı $\mu = 0,12$ 'den daha büyük olduğunda ortadan kalkmıştır ve iç çapta sadece azalış meydana gelmiştir. Literatürde oluşturulan bazı sürtünme kalibrasyon eğrilerinde (Şekil 2.5.) düşük sürtünme katsayısı değerleri için halka numunesi iç çapının sürekli arttığı, daha yüksek sürtünme katsayısı değerlerinde ise sürekli olarak azaldığı görülmektedir. Yani bu sürtünme kalibrasyon eğrilerinde, belirli sürtünme katsayısı aralığında deformasyon sırasında iç çap değişiminde meydana gelen artışından azalışa geçiş mevcut değildir. Yapılan çalışma ile literatürdeki sürtünme kalibrasyon eğrilerindeki bu farklılığın sebebi, halka basma deneyinin matematiksel olarak hesaplanmasında yapılan kabuller olabilir.

Bu çalışmada pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrilerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Sürtünme kalibrasyon eğrilerinin pekleşme üsteline duyarlı olduğu ortaya konmuştur. Yani, farklı pekleşme üsteline sahip malzemelerin sürtünme kalibrasyon eğrilerinin de farklı olduğu görülmüştür. Pekleşme üsteli değeri olarak $n = 0,245$ 'in yanında $n = 0$ ve $n = 0,5$ değerleri için de sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Deformasyon sonrası belirli sürtünme katsayısı için iç çapta meydana gelen azalma pekleşme üsteli değerinin artması ile düşüş göstermektedir.

Aynı deformasyona karşılık gelen $n = 0$ ve $n = 0,5$ için iç çaptaki değişim farkından kaynaklanan kuşağın kalınlığı, sürtünme katsayısı arttıkça büyümektedir (Şekil 4.15.). İç çapın arttığı sürtünme katsayısı değerlerinde ise pekleşme üsteli değeri arttıkça iç çaptaki artış fazlalaşmaktadır. $n = 0$ ve $n = 0,5$ arasındaki kuşak kalınlığı benzer şekilde sürtünme katsayısı arttıkça büyümektedir. Bazı sürtünme katsayısı değerlerinde ise belirli bir kritik deformasyona kadar iç çap artmakta, bu kritik deformasyon değeri üzerinde ise iç çap azalmaktadır. Bu durum söz konusu olduğunda pekleşme durumunun etkisi kritik değer öncesi ve sonra olmak üzere iç çapın azalış-artış durumuna göre değerlendirilir. Neticede sürtünme katsayısı arttıkça pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisinin arttığı, yani belirginleştiği görülmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda, malzemenin akma davranışı dikkate alınmaksızın genelleştirilmiş referans sürtünme kalibrasyon eğrilerinin sürtünme katsayısının tayini için kullanılmasının tam doğru sonuç vermediğini ortaya çıkarmıştır. Sürtünme durumunun belirlenmesi için sürtünme kalibrasyon eğrilerinden yararlanılması isteniyorsa her malzeme için kendine has eğriler oluşturulmalıdır. Burada sonlu elemanlar yönteminden yararlanılabilir. Sürtünme kalibrasyon eğrilerinin sağlıklı şekilde oluşturulması için malzemenin basma deneyi ile akma eğrisi elde edilmelidir. Deney sonucu elde edilen akma eğrisi ya da akma eğrisine göre oluşturulan malzeme modeli kullanılarak, farklı sürtünme katsayıları için sonlu elemanlar yöntemiyle halka basma deneyi simule edilir. Böylelikle malzeme için en doğru sürtünme kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş olur. Aynı malzeme ile farklı sürtünme (yağlama) koşullarında gerçekleştirilen halka basma deney sonuçlarının, oluşturulan eğrilerle karşılaştırılmasıyla, farklı sürtünme (yağlama) koşulları için sürtünme katsayısı değerleri gerçeğe en yakın şekilde tespit edilebilir.

Bunun dışında, bir malzemenin pekleşme üstelinin bilinmesi durumunda, farklı sürtünme (yağlama) koşulları için sürtünme katsayısının gerçeğe yakın bir biçimde belirlenmesinde, bu çalışma sonucu elde edilen pekleşme üstelinin etkisini gösteren sürtünme kalibrasyon eğrilerinden yararlanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sofuoglu, H., Rasty, J., On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. *Tribology International.*, Volume 32, 327-335, 1999.
- [2] Çapan, L., *Metallere plastik şekil verme*, 3. Cilt. Çağlayan Kitabevi Yayınları, 1999.
- [3] Gedikli, H., *Metal şekillendirme işlemlerinde sürtünme katsayısının deneysel ve sayısal yöntemlerle belirlenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2000.
- [4] Alkan, S. Ç., *Friction analysis in hot forging process*. Atılım University, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences, The Department of Manufacturing Engineering, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [5] Cora, Ö., N., *Friction analysis of cold forging*. The Middle East Technical University, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences, The Department of Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi, 2004.
- [6] Altan, T., Gegel, H. L., Oh, S. I., *Metal forming: fundamentals and applications*, Asm Intl, 1983.
- [7] Çetinarslan, C. S., *Farklı malzemelerin yığılmasında malzeme akışının incelenmesi*. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2003.
- [8] Rao, K. P., Sivaram, K., *A review of ring-compression testing and applicability of calibration curves*. *Journal of Materials Processing Technology.*, Volume 37, 295-318, 1993.
- [9] Rajesh, E., SivaPrakash, M., *Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants*. *International Journal of Scientific & Engineering Research.*, Volume 4, 2013.

- [10] Male, A. T., Depierre, V., The validity of mathematical solutions for determining friction from the ring compression test. *Journal of Lubrication Technology.*, 92(3), 389, 1970.
- [11] Lee, C. H., Altan, T., Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders. *Journal of Engineering for Industry.*, 1972.
- [12] Li, L. X., Peng D. S., Liu J. A., Liu Z. Q., An experiment study of the lubrication behavior of graphite in hot compression test of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology.*, Volume 112, 1-5, 2001.
- [13] Robinson, T., Ou, H., Armstrong, C. G., Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation. *Journal of Materials Processing Technology.*, 54-59, 2004.
- [14] Joun, M. S., Moon, H. G., Choi, I. S., Lee, M. C., Jun, B. Y., Effect of friction laws on metal forming processes. *Tribology International.*, Volume 42, 311-319, 2009.
- [15] Kim, H., Altan, T., Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging. *Procedia Engineering.*, Volume 81, 1848-1853, 2014.
- [16] Pawelski, O., Rasp, W., Wolff, C., Analysis of the asymmetric upsetting test with extremely high strain rate as tool for friction measurement. *Journal of Materials Processing Technology.*, Volume 80-81, 287-291, 1998.
- [17] Sofuoglu, H., Gedikli, H., Determination of friction coefficient encountered in large deformation processes. *Tribology International.*, Volume 35, 27-34, 2002.
- [18] Ke, X., FE simulation based friction coefficient factors for metal forming. Arizona State University, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [19] Kasımzade, A. A., Sonlu elemanlar metodu, 2. Baskı. Birsen Yayınevi.
- [20] Ayhan, A. O., Sonlu elemanlar analizi teori ve ansys ile uygulamalar, 4. Baskı. Palme Yayıncılık, 2015.
- [21] Günay, D., Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri, Sakarya Üniversitesi Yayınları, Adapazarı, 1993.

- [22] Şener, R., Elektrikli taşıtlar için lineer jeneratör tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Tolga GÜNEŞ 1991 yılında Giresun'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Giresun'da tamamladı. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladı.