

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

**6061 T6 ALAŞIMININ HALKA BASMA DENEYİNDE
NUMUNE BOYUTUNUN KALİBRASYON EĞRİLERİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Cihan SARAÇ

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

Ocak 2022

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

**6061 T6 ALAŞIMININ HALKA BASMA DENEYİNDE
NUMUNE BOYUTUNUN KALİBRASYON EĞRİLERİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Cihan SARAÇ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 17.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Üye

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.

Ali Cihan SARAÇ

17.01.2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, çalışmanın her aşamasında bilgi ve desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Sunal Ahmet PARASIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Halka basma deneylerinin gerçekleştirilmesi sırasında anlayış ve yardımlarını esirgemeyen İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde görevli Araş.Gör. İsmail Cem AKGÜN'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca beni destekleyen zor zamanlarımda yanımda olan ANNEME, BABAMA ve ABLAMA sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Metallerin Plastik Şekillendirilmesi Sırasında Sürtünme.....	3
2.2. Halka Basma Deneyinde Önceki Çalışmalar.....	6
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLER	22
3.1. Halka Basma Deneyi.....	22
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	24
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR	27
4.1. Malzeme	27
4.2. Halka Basma Deneyi	28
4.3. Sayısal Uygulamalar	30

4.3.1. Halka basma numunesinin boyutlandırılması ve modellenmesi.....	31
4.3.2. Malzeme modeli	32
4.4. Sonuçlar	34
BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	48



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\%h$	: Numune yüksekliğindeki yüzde değişim
$\%id$	: Numune iç çapındaki yüzde değişim
τ	: Sürtünme gerilmesi
ν	: Poisson oranı
σ_0	: Akma gerilmesi
μ	: Sürtünme katsayısı
E	: Elastisite modülü
H_0	: Halka numunenin ilk yüksekliği
H_i	: Halka numunenin deformasyon sonrası yüksekliği
ID_0	: Halka numunenin ilk iç çap değeri
ID_i	: Halka numunenin deformasyon sonrası iç çap değeri
K	: Dayanım katsayısı
m	: Kayma sürtünme faktörü
N	: Normal kuvveti
n	: Pekleşme üsteli
P	: Teğetsel kuvveti
q	: Normal basıncı
R_0	: Halka numunenin dış yarıçapı
r_a	: Halka numunenin iç yarıçapı
r_b	: Halka numunenin dış yarıçapı
R_i	: Halka numunenin iç yarıçapı
r_n	: Nötr yarıçap
T	: Halka numunenin yüksekliği

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İki kuru metal yüzey arasındaki temas	3
Şekil 2.2. Kalıp ile malzeme arasında sürtünmenin olmadığı basma durumu	4
Şekil 2.3. Kalıp ile malzeme arasında sürtünmenin yüksek olduğu basma durumu	4
Şekil 2.4. Coulomb-Amonton sürtünme modeli	5
Şekil 2.5. Kayma sürtünme modeli	5
Şekil 2.6. Male ve Cockcroft sürtünme kalibrasyon eğrileri	7
Şekil 2.7. İç ve dış doğru akışın olduğu halka numune kesiti	7
Şekil 2.8. Sadece dış doğru akışın olduğu halka numune kesiti	8
Şekil 2.9. 6:1,6:2 geometrisine sahip alüminyum halkanın deneysel ve teorik eğrilerinin karşılaştırılması	9
Şekil 2.10. 6:4:2 geometrisine sahip alüminyum halkanın deneysel ve teorik eğrilerinin karşılaştırılması	9
Şekil 2.11. Alüminyum 1100 silindir numunenin şişme profili	10
Şekil 2.12. Sürtünme kayma faktörünün farklı birim şekil değiştirme hızlarıyla değişimi	11
Şekil 2.13. Rudkins ve arkadaşlarının halka basma deneyi ile elde ettikleri sürtünme kalibrasyon eğrileri ile deney verilerinin karşılaştırılması	12
Şekil 2.14. $\mu=0,01$ sürtünme katsayısı için siyah ve beyaz plastisinin sürtünme kalibrasyon eğrileri	13
Şekil 2.15. Fıçılamanın sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisi	14
Şekil 2.16. Sıcaklığa bağlı olarak kayma sürtünme faktörünün değişimi	15
Şekil 2.17. Fiziksel deney ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen veriler ...	16
Şekil 2.18. Alüminyum numunelerin halka basma deney verileri	17
Şekil 2.19. Farklı yağlayıcılar için sürtünme katsayısının sıcaklık ile değişimi	18

Şekil 2.20. Farklı iç çap değerlerine sahip halka numunelerin sürtünme kalibrasyon eğrileri a) 30:12:10 mm, b) 30:15:10 mm, c) 30:18:10 mm	18
Şekil 2.21. Farklı yükseklik değerlerine sahip halka numunelerin sürtünme kalibrasyon eğrileri a) 30:15:8 mm, b) 30:15:10 mm, c) 30:15:12 mm	19
Şekil 2.22. Gerçek gerinim-fiçılama faktörü a) $m=0,1$ b) $m=0,5$	20
Şekil 2.23. Farklı pekleşme üstellerinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisi	21
Şekil 3.1. Standart halka geometrisinin şematik olarak gösterimi	22
Şekil 3.2. Alüminyumun sonlu elemanlar yöntemi ile ve deneysel olarak elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri	23
Şekil 3.3. Farklı sürtünme durumlarında deforme olmuş halka numunelerinin kesitleri	24
Şekil 3.4. Sonlu elemanlar analizinin adımları	26
Şekil 4.1. Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları	28
Şekil 4.2. Halka basma numuneleri	29
Şekil 4.3. 600kN kapasiteli servohidrolik kontrollü Dartec çekme makinası	29
Şekil 4.4. Deney sırasında çekilmiş, numune ve basma aparatlarını gösteren bir fotoğraf	30
Şekil 4.5. Basma numunesinin iki boyutlu modeli	31
Şekil 4.6. Modelin ağ yapısı	32
Şekil 4.7. Basma numunesi	33
Şekil 4.8. Alüminyum 6061-T6'nın akma eğrisi	33
Şekil 4.9. Alüminyum 6061-T6'nın Marc sonlu elemanlar programına tanımlanan akma eğrisi	34
Şekil 4.10. Alüminyum 6061-T6'nın sürtünme kalibrasyon eğrileri	35
Şekil 4.11. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,02$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	36
Şekil 4.12. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,05$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	37

Şekil 4.13. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,08$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	37
Şekil 4.14. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,1$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	38
Şekil 4.15. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,12$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	38
Şekil 4.16. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,15$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	39
Şekil 4.17. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,17$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	39
Şekil 4.18. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,2$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	40
Şekil 4.19. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,3$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti	40
Şekil 4.20. Halka basma deneyi sonucunda halka numuneler a) kuru durum b) yağlı durum	41
Şekil 4.21. Yağlı ve kuru durumda basılan halka numunelerin yaklaşık %50'lik deformasyonu sonucu kesitlerini gösteren fotoğraflar	42
Şekil 4.22. Al6061-T6'nın sonlu elemanlar yöntemi ve fiziksel deney sonucu verileri	43

ÖZET

Anahtar kelimeler: Halka basma deneyi, Sonlu elemanlar metodu, Sürtünme kalibrasyon eğrileri, Sürtünme katsayısı.

Metallerin plastik şekillendirme işlemlerinde malzeme yüzeylerindeki sürtünme durumu büyük bir önem taşımaktadır. Yüzeyler arasında oluşan sürtünme deformasyon için gereken kuvvetin artmasına, kalıp yüzeylerinin erken aşınmasına, zarar görmesine neden olur ve deformasyona uğrayan malzemenin akışını etkiler. Bu nedenle metallerin plastik şekillendirme işlemlerinde sürtünme durumuna hakim olunmalıdır.

Plastik şekillendirme işlemlerine yönelik metallerin yüzeylerindeki sürtünme durumunu incelemek amacıyla kullanılan deneylerden birisi halka basma deneyidir. Halka şeklindeki numunenin bir presin düz kalıpları arasında ezilmesiyle gerçekleştirilen deneyde belirli aralıklarla numune boyutları kaydedilir. Deneyler sonucu elde edilen boyutsal veriler, teorik olarak elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrilerinin bulunduğu grafiğe yerleştirilerek sürtünme katsayısının sayısal değeri elde edilir.

Bu tez çalışmasında bilgisayar ortamında ticari bir yazılım kullanılarak sonlu elemanlar analizi ile 6061-T6 Alüminyum alaşımı için halka basma deneyi sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilmiş ve yine aynı alaşımdan farklı boyutlardaki numunelerle gerçekleştirilen halka basma deneyleri sonucunda numune boyutunun halka basma deneyi üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen numune boyutları için halka basma deney sonuçlarının numune boyutundan etkilenmediği görülmüştür.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SPECIMEN SIZE ON THE CALIBRATION CURVES OF 6061-T6 ALLOY IN RING COMPRESSION TEST

SUMMARY

Keywords: Ring compression test, Finite element method, Friction calibration curves, Friction factor.

Friction on the material surfaces is of great importance in the plastic forming processes of metals. The friction between the surfaces causes the force required for deformation to increase, which in turn causes the tool surfaces to wear out early and to be damaged, and it effects the flow of the deformed material, as well. For this reason friction should be controlled in the plastic forming processes of metals.

One of the experiments used to examine the friction between surfaces for metal forming operations is the ring compression test. The test is performed by compressing the annular specimen between the flat dies of a press in which the specimen dimensions are recorded at regular intervals. The numerical value of the friction coefficient is determined by placing and comparing the measured dimensional data that are obtained by the experiments on the graph containing the friction calibration curves which are obtained theoretically.

In this thesis, the friction calibration curves of the ring compression test for 6061-T6 Aluminium alloy were calculated with the finite element analysis by using commercial software in the computer environment, and the effect of specimen size on ring compression tests were examined via performing tests with specimens of different sizes which were produced from the same material. For the specimen sizes examined, it was seen that the ring compression test results were not affected by the specimen size.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Malzemelerin istenilen şekillere getirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan plastik şekil verme işlemlerinde, malzemelerin dış kuvvetlerin etkisiyle plastik deformasyona uğratılıp şekillendirilmesi sırasında, malzemelerin şekil değiştirmesi malzeme-kalıp arasında oluşan sürtünmeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bir plastik şekil verme prosesinde, parça yüzeylerindeki sürtünme, proses değişkenleri olan deformasyon hızı, malzeme özellikleri ve yağlama gibi değişkenlerden etkilenmektedir. Malzeme yüzeyindeki sürtünme durumu şekil değişimini etkilediği gibi iş makinasının temas yüzeylerinin aşınmasına, plastik deformasyon için gereken kuvvetin artmasına ve malzeme akışının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle yüzeyler arasındaki sürtünme durumu plastik şekil verme işlemlerinde büyük bir öneme sahiptir.

Malzemelerin şekillendirilmesi sırasında yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının tespiti ile ilgili deneylerden birisi halka basma deneyidir. Halka basma deneyi karmaşık matematiksel hesaplamalara ihtiyacın bulunmaması, numuneye etki eden kuvvetlerin bilinmesine gerek duyulmaması ve yüksek maliyet gerektirmemesi nedeniyle araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Halka basma deneyinde halka şeklindeki numune bir pres yardımıyla basılır ve numunenin belirli aralıklarla yükseklik ve iç çap ölçüleri kaydedilir. Dikey ekseninde iç çaptaki yüzde azalma, yatay ekseninde yükseklikte yüzde azalma olacak şekilde sayısal veya analitik yöntemler ile eğriler oluşturulur. Oluşturulan eğriler sürtünme kalibrasyon eğrileri olarak adlandırılmaktadır. Teorik olarak elde edilmiş eğriler ile deney sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırılmasıyla sürtünme katsayısı belirlenir.

Halka basma deneyi sırasında kullanılan numunelerin iç çapları, kalıp ve numune yüzeyi arasında yüksek sürtünmenin mevcut olduğu durumda daralır, düşük sürtünmenin mevcut olduğu durumda ise genişler. Genel olarak halka numunelerinin

iç çaplarındaki değişim kalıp ile halka numune arasındaki sürtünme durumu hakkında bilgi vermektedir.

Sürtünme katsayısının değerini tespit etmek amacıyla sürtünme kalibrasyon eğrileri kullanılır. Sürtünme kalibrasyon eğrileri sayısal veya analitik yöntemler ile teorik olarak elde edilir. Halka basma deneyi sonucu elde edilen boyutsal veriler sürtünme kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılır, farklı sürtünme katsayılarını temsil eden eğrilerin bulunduğu sürtünme kalibrasyon eğrilerini içeren grafikte, verilerin çakıştığı eğri tespit edilerek sürtünme katsayısının değeri belirlenir.

Yapılan araştırmalar sonucunda sürtünme kalibrasyon eğrilerinin malzemelerin akma eğrisine duyarlı olduğu ortaya konmuş, bu nedenle ihtiyaç duyulması halinde malzemenin kendisine ait akma eğrisi ile sonlu elemanlar benzeşimleri gerçekleştirilerek sürtünme kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması sürtünme katsayısı değerinin belirlenmesinde daha doğru sonuç verecektir.

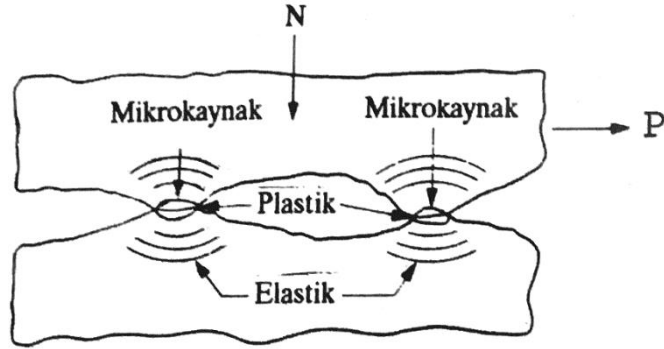
Geçmişte yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda 60 mm gibi büyük numune boyutları kullanılmıştır. Numunenin boyutlarının artması deformasyon için gereken kuvvetin artmasına neden olmakta ve deney için gerekli kapasiteyi sağlayan deney makinasının laboratuvar ortamında bulunmasını zorlaştırabilmektedir. Aynı zamanda farklı boyut oranlarına sahip numunelerle gerçekleştirilen deneyler sonucunda sürtünme kalibrasyon eğrilerinin değişiklik gösterdiği ortaya konmuştur. Bu bulgular nedeniyle değişen yüzey alanı-hacim oranı ile halka basma deney sonuçları değişir mi? Laboratuvar ortamında bulunan test makinaları ile daha küçük numune boyutlarıyla deneylerin gerçekleştirilmesi halka basma deneyi sonuçlarını etkiler mi? Bu tez çalışmasında bu sorulara cevap aranmıştır.

Bu çalışmada numune boyutlarının halka basma deneyindeki olası etkisi deneysel olarak incelenmiş, elde edilen deneysel sonuçlar gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleriyle elde edilmiş kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılmış ve 6061-T6 Alüminyum alaşımında incelenen numune boyutları için numune boyutunun halka basma deneyi sonuçları üzerine bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Metallerin Plastik Şekillendirilmesi Sırasında Sürtünme

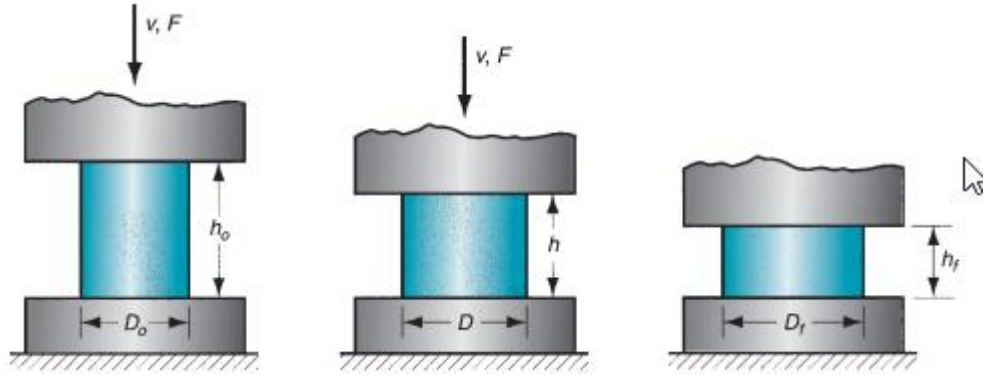
Metallere plastik şekil verme sırasında sürtünme kaçınılmaz bir olgudur. Bir N kuvvetiyle birbirlerine doğru bastırılan iki metal yüzey arasında temasın gerçekleştiği bölgede malzemenin özelliklerine göre belirli N değerine kadar elastik gerilmeler bulunur. Bu N değerinin artması ve elastik sınırın aşılması sonucu malzemede plastik şekil değişimi gerçekleşir. Bu şekilde birbirlerine bastırılan iki metal yüzey arasındaki hareketin meydana gelmesi Şekil 2.1.'de gösterilen P teğetsel kuvveti ile gerçekleşecektir. Buradaki P teğetsel kuvvet sürtünme kuvveti olarak tanımlanmaktadır ve N normal kuvveti ile arasındaki oran sürtünme katsayısı olarak adlandırılmaktadır (Denklemler 2.1) [1].



Şekil 2.1. İki kuru metal yüzey arasındaki temas [1]

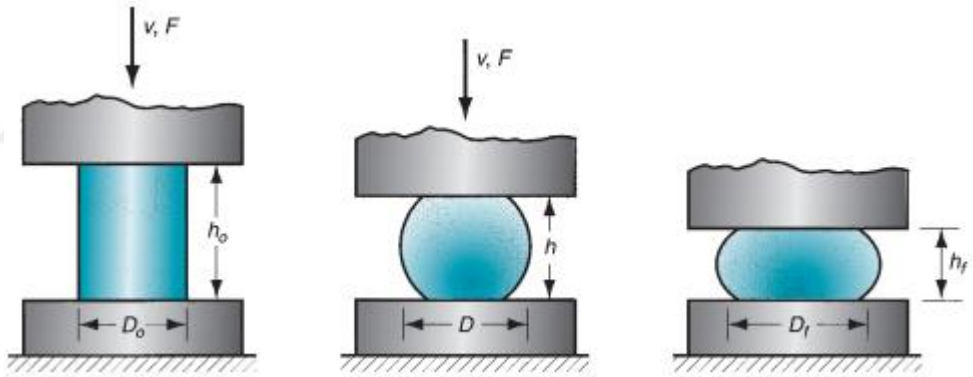
$$\mu = \frac{P}{N} \quad (2.1)$$

İki kalıp arasında sıkıştırılan bir malzemede, kalıp ve malzeme arasında sürtünme olmadığında deformasyon homojen bir şekilde gerçekleşecektir (Şekil 2.2.) [2].



Şekil 2.2. Kalıp ile malzeme arasında sürtünmenin olmadığı basma durumu [2]

Gerçekte, yüzeyler arasındaki sürtünme nedeniyle deformasyon Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi gerçekleşmez. Sürtünmenin bulunduğu kısımlarda malzeme akışı sürtünme kuvveti nedeniyle bir dirençle karşılaşacak ve bunun sonucunda, homojen olmayan bir şekilde deformasyon gerçekleşir (Şekil 2.3.) [2].



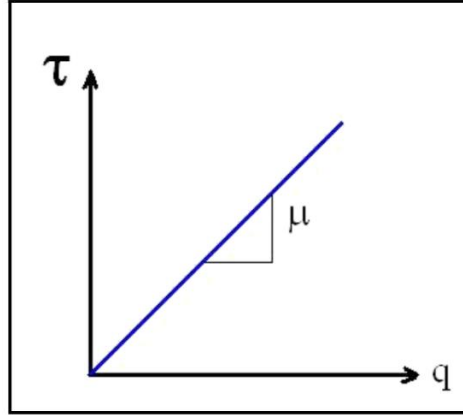
Şekil 2.3. Kalıp ile malzeme arasında sürtünmenin yüksek olduğu basma durumu [2]

Metal şekillendirme işlemlerinin matematiksel çözümlerinde kullanılan sürtünme modellerinden biri Coulomb sürtünme modelidir. Coulomb sürtünme modelinde sürtünme gerilmesi normal gerilme ile doğru orantılıdır (Şekil 2.4.) [3].

$$\tau = \mu \times q \quad (2.2)$$

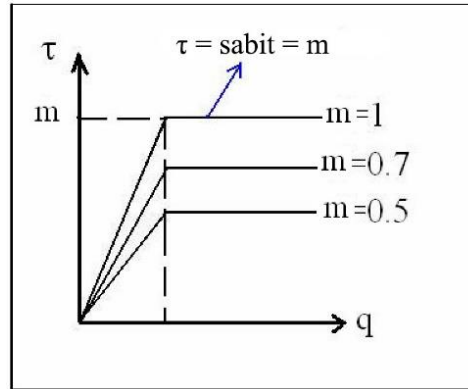
Denklemden τ sürtünme gerilmesi, μ sürtünme katsayısı ve q normal basıncıdır. τ sürtünme gerilmesi ve q normal basıncı birbirleri ile doğru orantılı olmasından dolayı

τ sürtünme gerilmesinin doğrusal olarak artması durumunda μ sürtünme katsayısı sabit kalacaktır.



Şekil 2.4. Coulomb-Amonton sürtünme modeli [3]

Kullanılan diğer sürtünme modeli ise kayma sürtünme modelidir. Sürtünme gerilmesi ile arayüzey gerilmesi, arayüzey gerilmesinin kritik değerine kadar birbiri ile doğru orantılıdır (Şekil 2.5.). Kritik değer üzerinde kayma sürtünme gerilmesi kayma akma gerilmesine eşit olacaktır ve sabit kalacaktır [3].



Şekil 2.5. Kayma sürtünme modeli [3]

$$\tau = m \times k \quad (2.3)$$

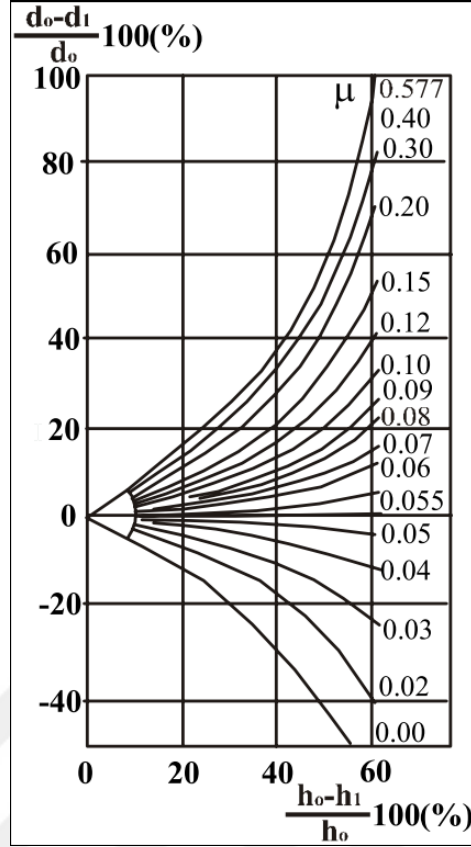
τ kayma sürtünme gerilmesi, k kayma akma gerilmesi ve m kayma sürtünme faktörüdür. m değeri 0 ile 1 arasında bir değere sahip olabilir. $m = 0$ olduğunda bu

sürtünmesiz durumu ifade etmektedir. $m = 1$ olduğunda ise numune ile kalıp arasında yapışma olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum Denklem 2.3'ten görüleceği üzere τ kayma sürtünme gerilmesinin k kayma akma gerilmesine eşit veya daha fazla olması sonucunda gerçekleşecektir. Tresca kriterlerine göre maksimum kayma akma gerilmesi $k=0,5\sigma_0$ ve Von Mises kriterlerine göre $k=0,577\sigma_0$ 'dır. Buradaki σ_0 malzemenin akma gerilmesidir [1].

2.2. Halka Basma Deneyinde Önceki Çalışmalar

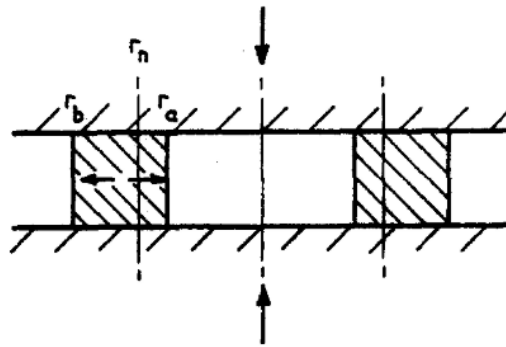
Plastik şekil verme işlemlerinde kalıplar ve iş parçası arasında her zaman bir sürtünme meydana gelir. Daha önce değinildiği gibi, sürtünmenin büyüklüğü, malzeme akışını etkilediği gibi, başka birçok etkiye de sahiptir. Bu nedenle iş parçası ve kalıplar arasında oluşan sürtünmenin tespiti oldukça önemlidir ve günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Sürtünme durumunun incelenmesi için araştırmacılar tarafından tercih edilen yöntemlerden biri halka basma deneyidir.

Halka basma deneyi olarak adlandırılan, halka şeklindeki numunenin bir pres yardımıyla ezilmesiyle gerçekleştirilen söz konusu deney ilk olarak 1954 yılında soğuk ekstrüzyon için yağlayıcıların karşılaştırılması amacıyla Kunogi tarafından kullanılmış, sonrasında ise 1964 yılında Male ve Cockcroft tarafından sürtünme katsayısını hesaplamak amacıyla geliştirilmiştir. Male ve Cockcroft'un sırasıyla dış çap, iç çap ve yükseklikleri 6:3:2 oranına sahip halka numuneler ile gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda sürtünme katsayısına göre halka boyutlarında meydana gelen değişimleri gösteren sürtünme kalibrasyon eğrileri olarak adlandırılan eğrileri oluşturmuştur, Şekil 2.6. 6:3:2 oranında geometriye sahip halka basma numuneleri Male ve Cockcroft'un çalışmalarından sonra standart halka basma numune geometrisi haline gelmiştir [4]. Sürtünme katsayısının (ya da faktörünün) sürtünme kalibrasyon eğrilerine göre, halka basma deneyi ile nasıl belirlendiği Bölüm 3.1'de açıklanmıştır.

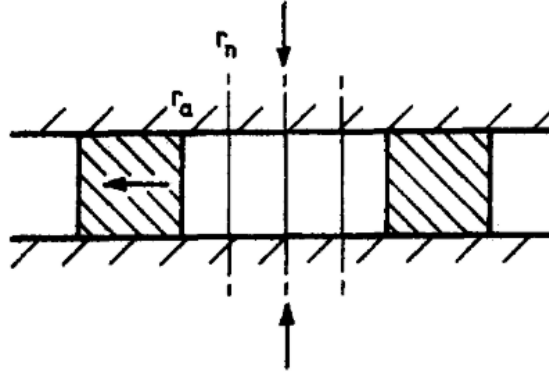


Şekil 2.6. Male ve Cockcroft sürtünme kalibrasyon eğrileri [4]

1964 yılında halka basma deneyi hakkında tutarlı ilk matematiksel çözümü Avitzur tarafından numunede basma sırasında üniform deformasyon olduğu varsayılarak yapılmıştır. Avitzur tarafından yapılan çözüm 1967 yılında Hawkyard ve Johnson tarafından doğrulanmış ve malzeme akışının içe ve dışa doğru olarak ikiye ayrıldığı yeri gösteren nötr yarıçapın konumu hesaplanmıştır [5].



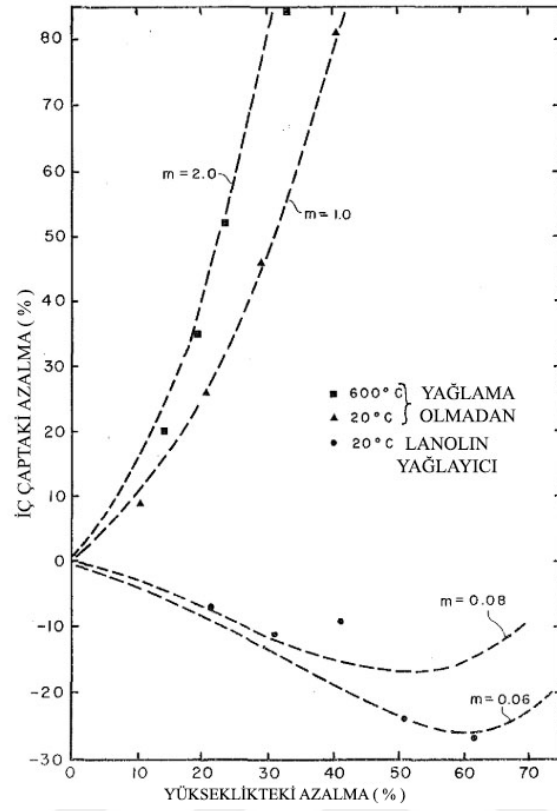
Şekil 2.7. İçe ve dışa doğru akışın olduğu halka numune kesiti [5]



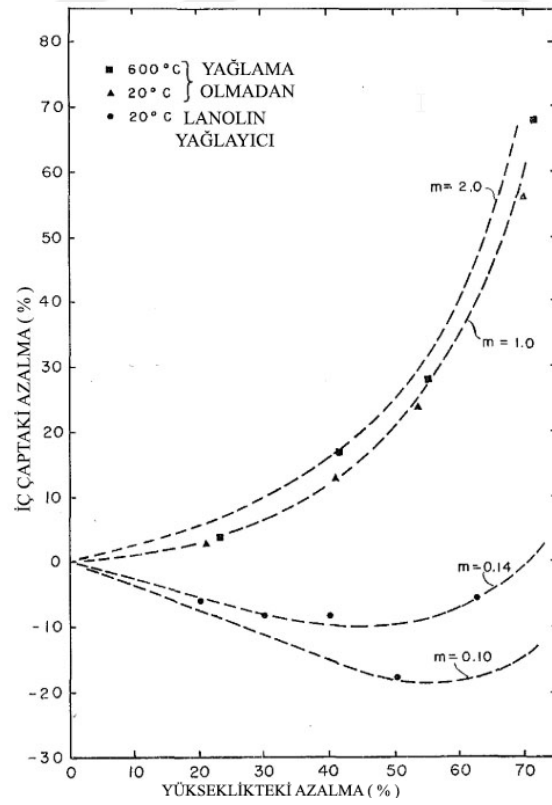
Şekil 2.8. Sadece dışa doğru akışın olduğu halka numune kesiti [5]

r_n nötr yarıçapının konumu halka numune içindeki malzeme akışının yönünü belirlemektedir. Eğer r_n nötr yarıçapı, r_a numune iç yarıçapından büyük ve r_b numune dış yarıçapından küçük olursa numunenin deformasyonu sırasında akış içe ve dışa doğru oluşacaktır (Şekil 2.7.). Eğer nötr yarıçap numune iç çapından daha küçük olursa akış sadece dışa doğru oluşacaktır (Şekil 2.8.) [5].

1970 yılında Male ve DePierre deformasyon sürecini küçük deformasyonlara bölerek farklı halka geometrileri için kalibrasyon eğrilerini bilgisayar yardımıyla elde etmiştir. Male ve DePierre kayma sürtünme faktörü yaklaşımının geçerliliğini araştırmışlardır. Avitzur, Hawkyard ve Johnson'ın matematiksel çözümlerinin farklı halka geometrileri için tutarlı sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Bununla beraber, Male ve DePierre yapmış olduğu deneylerde, Avitzur'un yöntemiyle elde edilen m değerlerinin 6:3:2 geometrisine sahip deney numuneleri için yüksek sürtünme katsayısı değerlerinde tutarlı olmadığını tespit etmişlerdir. Bu duruma fiçilaşmanın neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.9. ve Şekil 2.10.'da Male ve DePierre'in farklı numune geometrileri ile gerçekleştirdikleri deneyler sonucu elde ettiği verilerin, teorik veriler ile uyum içinde olduğu görülmektedir [6].

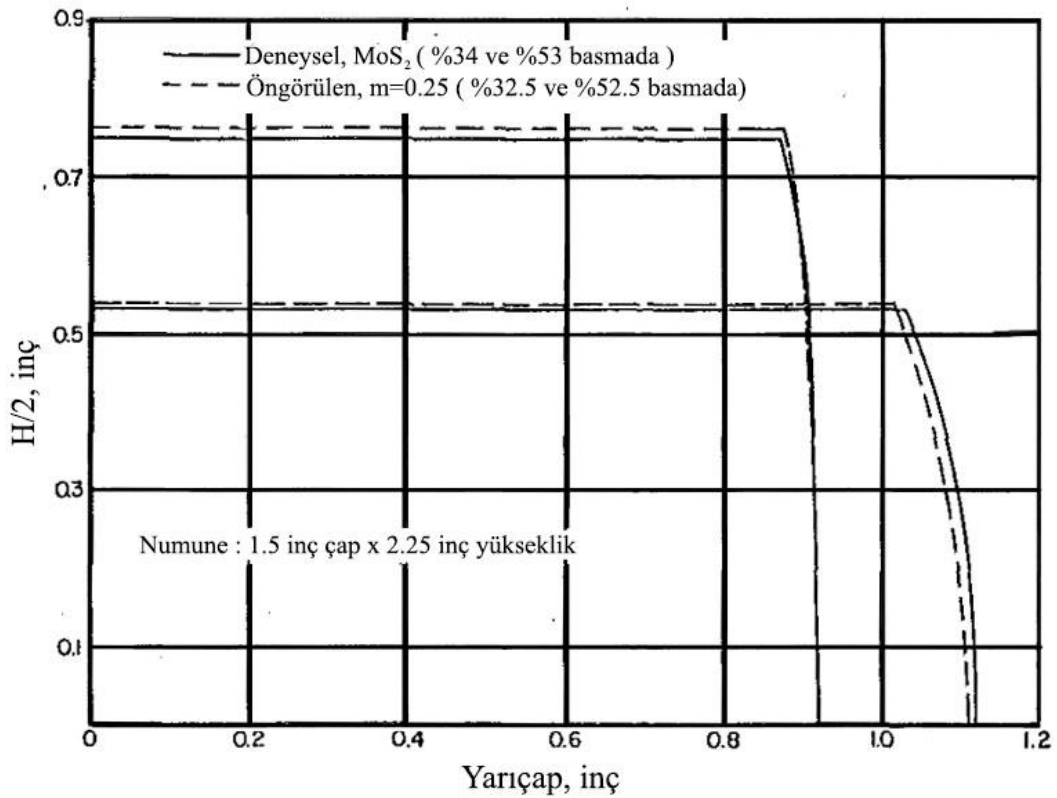


Şekil 2.9. 6:1,6:2 geometrisine sahip alüminyum halkanın deneysel ve teorik eğrilerinin karşılaştırılması [6]



Şekil 2.10. 6:4:2 geometrisine sahip alüminyum halkanın deneysel ve teorik eğrilerinin karşılaştırılması [6]

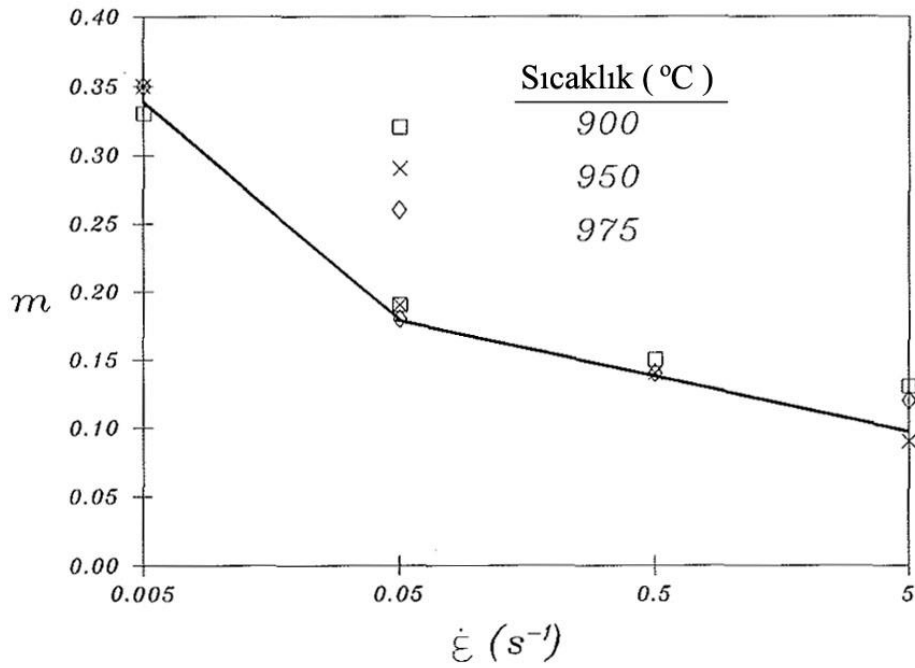
Teorik ve deneysel verilerin arasındaki farkın azaltılması amacıyla üniform olmayan deformasyon sonucu oluşan fiçilaşmanın etkileri dikkate alınmalıdır. 1972 yılında Liu, Lee ve Altan, söz konusu bu etkileri dikkate alarak sürtünme kalibrasyon eğrilerini elde etmiştir. Şekil 2.11.'de Lee ve Altan'ın geliştirdikleri yöntem ile elde ettikleri silindir numune kesitleri görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile elde ettikleri kesitlerin deney sonucu elde edilen kesitlere oldukça yakın olduğu görülmektedir [7,8].



Şekil 2.11. Alüminyum 1100 silindir numunenin kesiti [8]

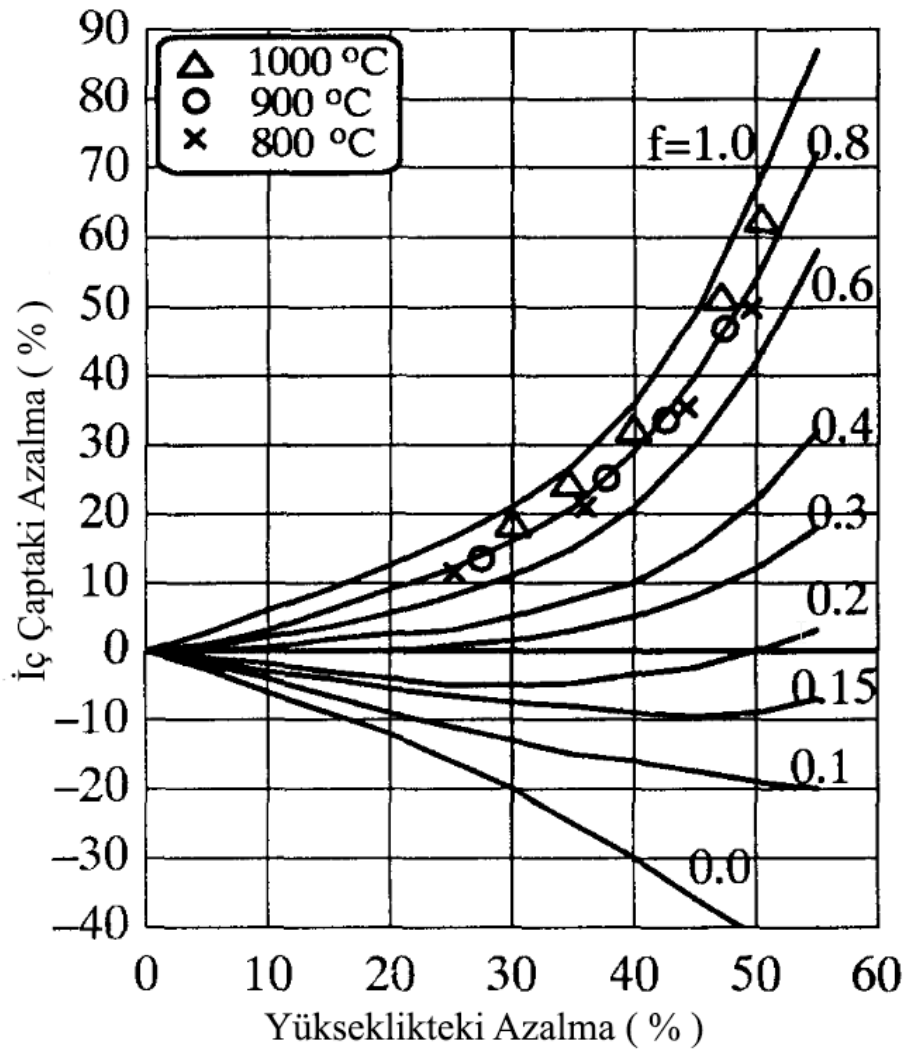
1974 yılında DePierre ve Gurney fiçilaşmanın olduğu ve olmadığı halka basma deneyleri için güvenilir bir yöntem geliştirmişlerdir. Halka geometrisindeki ve arayüzey sürtünme kayma faktöründeki önceki sınırlamalar ortadan kaldırılmıştır. Farklı geometrideki halkaların kullanılmasını mümkün kılmıştır [9].

1992 yılında Wang ve Lenard sıcak halka basma deneyinde birim şekil değiştirme hızının sürtünme kayma faktörü üzerinde etkisinin oldukça büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.12.'de görüldüğü üzere 975 °C, 950 °C ve 900 °C sıcaklıklarda ve farklı birim şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilen deneylerde artan şekil değiştirme hızıyla sürtünme kayma faktörünün azaldığı tespit edilmiştir [10].



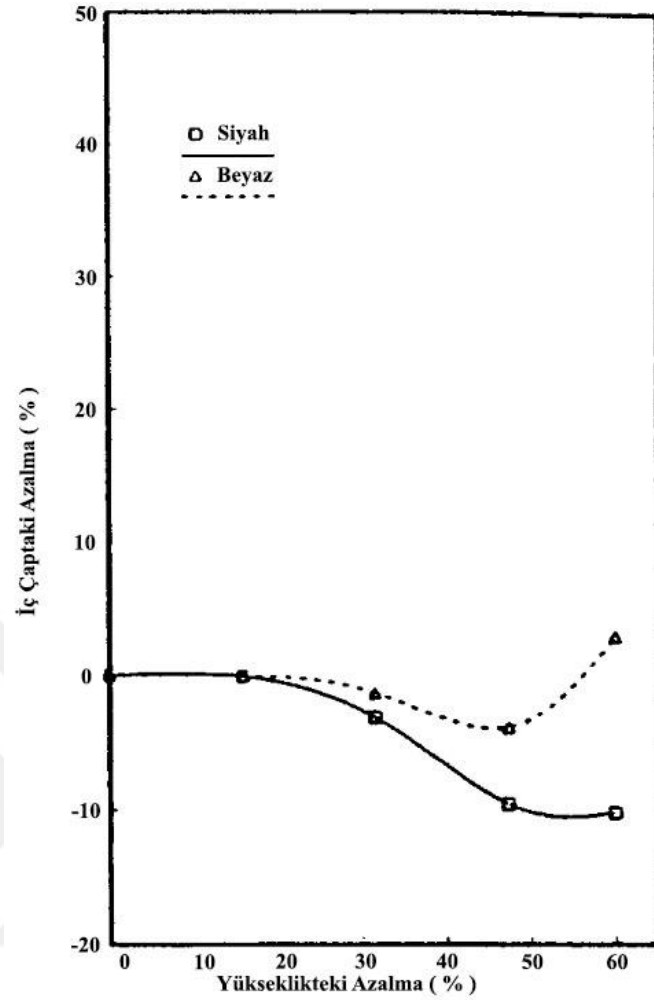
Şekil 2.12. Sürtünme kayma faktörünün farklı birim şekil değiştirme hızlarıyla değişimi [10]

1996 yılında Rudkins ve arkadaşları orta karbonlu çelikler ile gerçekleştirdiği halka basma deneylerinde sürtünme katsayısına sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. 800 °C, 900 °C ve 1000 °C 'de gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda Şekil 2.13.'te görülen sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir. Deneyler standart halka geometrisiyle ve kuru durumda gerçekleştirilmiştir. Artan sıcaklığın sürtünme katsayısının artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir [11].



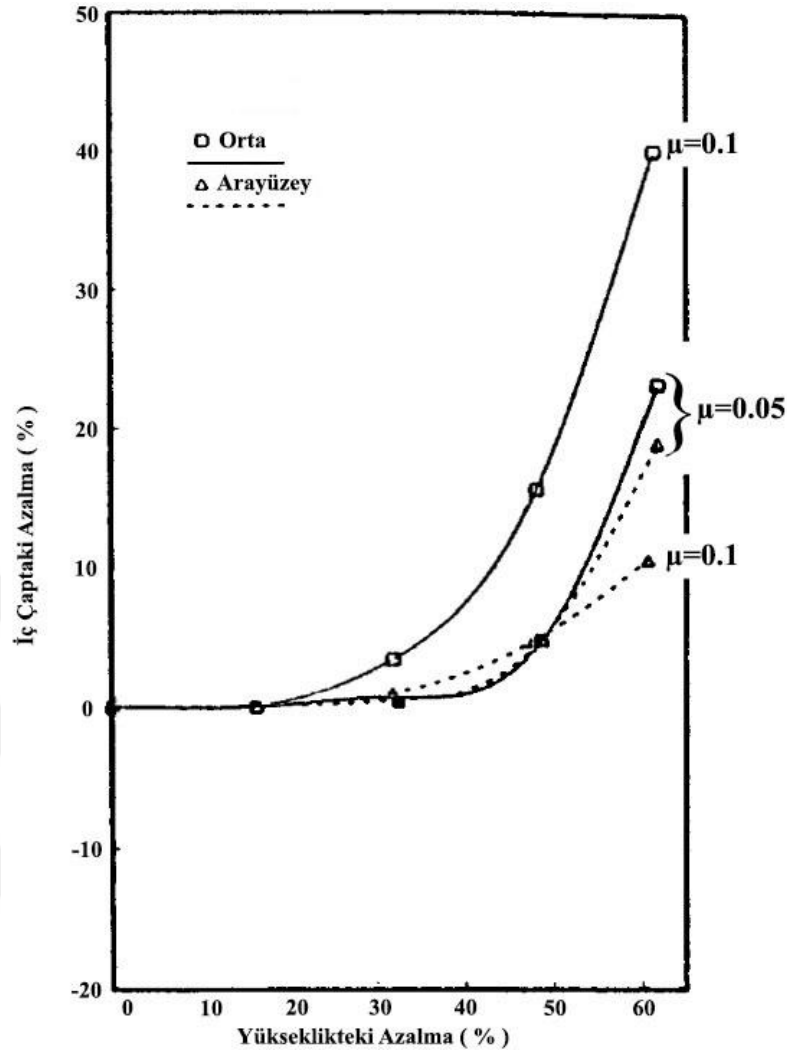
Şekil 2.13. Rudkins ve arkadaşlarının halka basma deneyi ile elde ettikleri sürtünme kalibrasyon eğrileri ile deney verilerinin karşılaştırılması [11]

Sofuoğlu ve arkadaşları 1999 yılında farklı malzemelerle yapmış olduğu fiziksel ve sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirdiği deneyler sonucunda sürtünme kalibrasyon eğrilerinin malzeme özelliklerine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 2.14.'te görüldüğü üzere siyah ve beyaz plastisinin sürtünme kalibrasyon eğrileri birbirinden oldukça farklıdır [4].



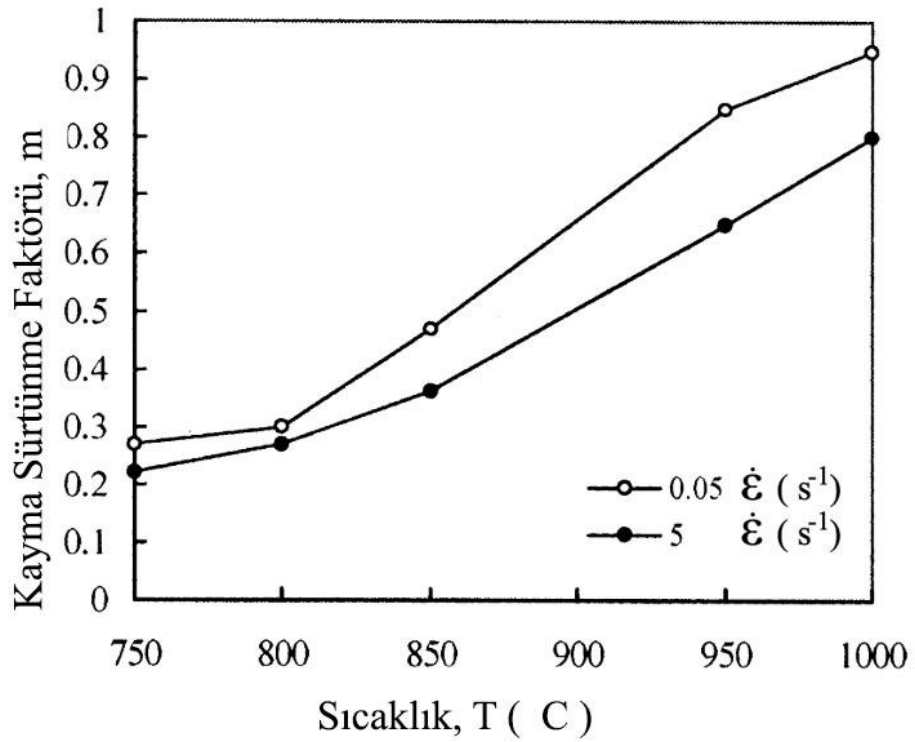
Şekil 2.14. $\mu=0,01$ sürtünme katsayısı için siyah ve beyaz plastisinin sürtünme kalibrasyon eğrileri [4]

Sofuoğlu ve arkadaşları ayrıca fiçilaşmanın kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Artan sürtünme katsayısıyla fiçilaşma etkisinin arttığını gözlemlemiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, halka numunelerin iç çaplarının, numunenin yüksekliği boyunca orta noktadan ve kalıpla temas ettiği kenar noktasından ölçülmesi sonucunda Şekil 2.15.'teki sürtünme kalibrasyon eğrileri Sofuoğlu tarafından elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı değerinin $\mu = 0,1$ olduğu durumda oluşan fiçilaşmanın sürtünme katsayısı değerinin $\mu = 0,05$ olduğu durum için oluşan fiçilaşmadan daha fazla olduğu görülmektedir. Ek olarak beyaz ve siyah plastisin için deformasyon hızının kalibrasyon eğrilerini etkilediği de görülmüştür [4].



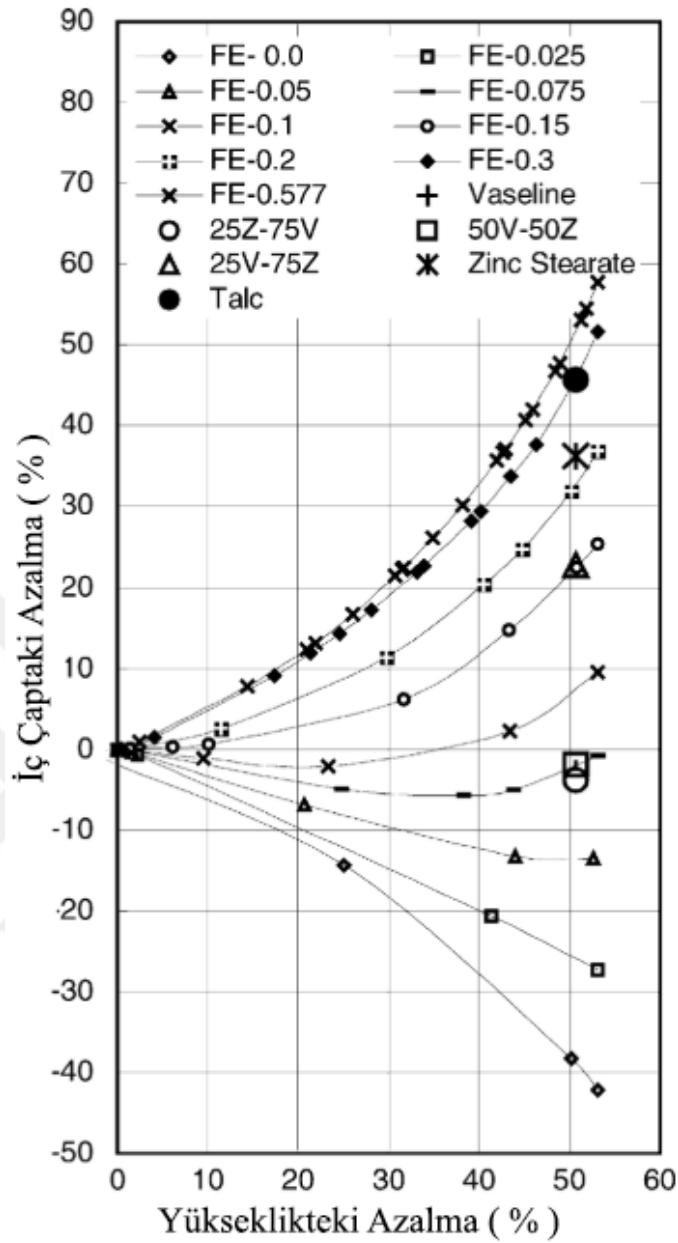
Şekil 2.15. Fıçılamanın sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisi [4]

2001 yılında Li ve arkadaşları sıcak halka basma deneyi sırasında Ti-6Al-4V numune kullanarak grafit yağlayıcıların davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda birim şekil değiştirme hızının 0.05 s^{-1} ve 5 s^{-1} olduğu deneyler sırasında m kayma sürtünme faktörünün sıcaklık $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında olduğunda $m = 0,3$ 'ten düşük, sıcaklık $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselirken $m = 0,95$ olduğu görülmüştür. $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üstünde grafit yağlayıcının performansını kaybettiği ve içine grafit karıştırılmış olan motor yağının $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Artan sıcaklık ile kayma sürtünme faktörünün arttığı, artan birim şekil değiştirme hızıyla azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.16.) [12].



Şekil 2.16. Sıcaklığa bağlı olarak kayma sürtünme faktörünün değişimi [12]

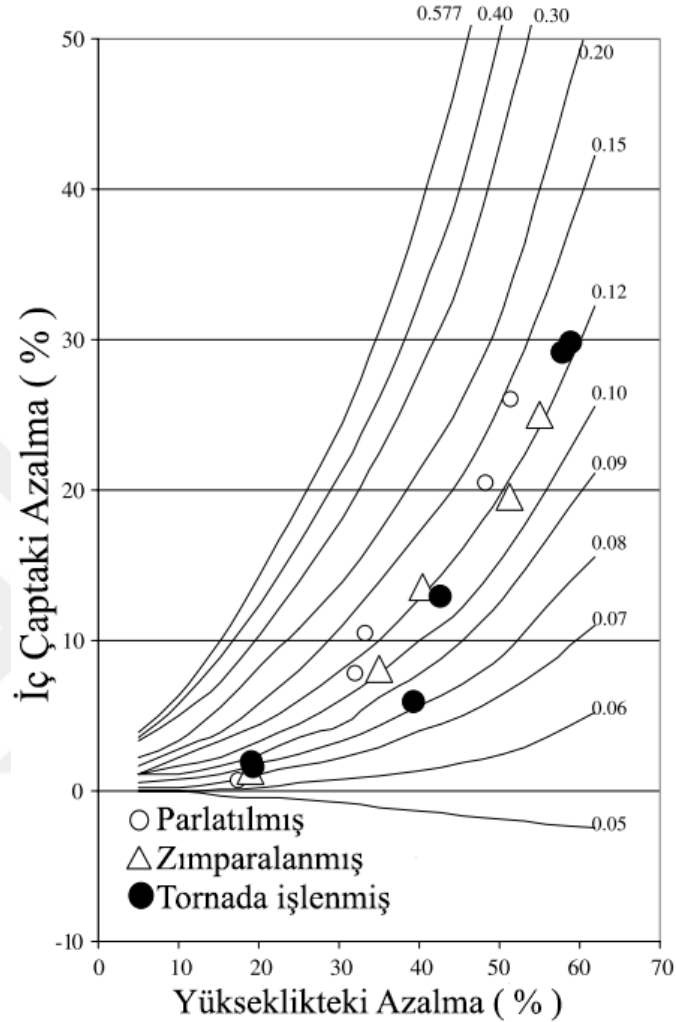
2004 yılında Robinson ve arkadaşları halka basma deneyleri gerçekleştirmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile benzeşimler yapmıştır. Deney numuneleri fiziksel özelliklerinin elverişliliği ve düşük maliyete sahip olması bakımından kilden yapılmıştır. Farklı yağlayıcılar ile gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sürtünme kalibrasyon eğrileri ile deney sonucu elde edilen verilerin uyum içinde olduğu görülmektedir (Şekil 2.17.) [13].



Şekil 2.17. Fiziksel deney ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen veriler [13]

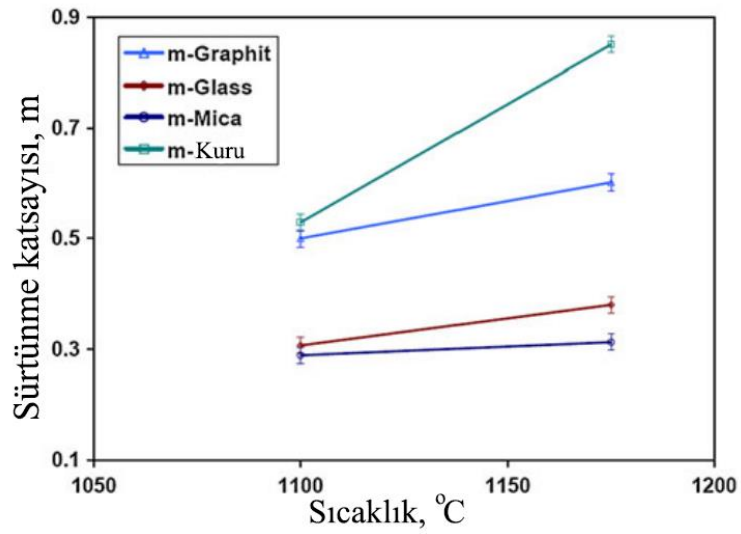
2005 yılında Sahin ve arkadaşları standart halka basma numunesi geometrisine sahip dış çap boyutu 24 mm olan farklı malzemelerden oluşan ve farklı yüzey işlemleri ile işlenmiş numuneler ile yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısı üzerine etkisini incelemişlerdir. Daha pürüzlü yüzeylere sahip olan numunelerin sürtünme katsayılarının daha düşük olduğu Şekil 2.18.'de görülmektedir. Pürüzlü olan yüzeylerde deformasyon ilerledikçe sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Bunun

nedeninin numune ve presin kalıpları arasındaki temas alanının başlangıçta daha az olup sonrasında artması olduğu düşünülmektedir [14].



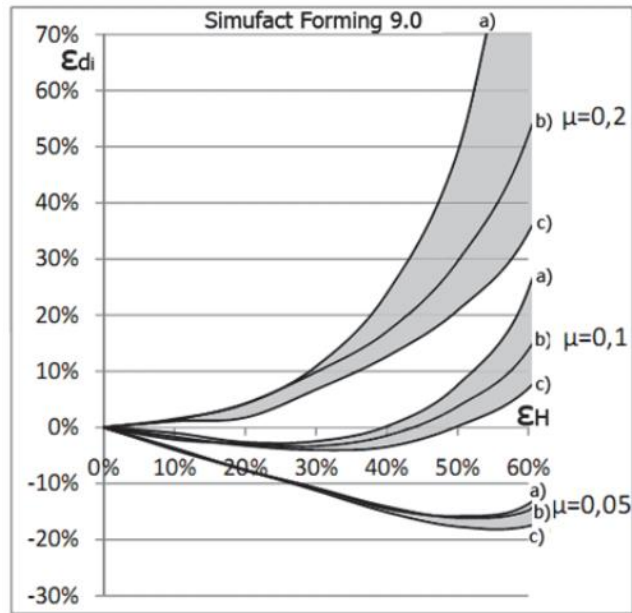
Şekil 2.18. Alüminyum numunelerin halka basma deney verileri [14]

2010 yılında Shahriari ve arkadaşları nikel alaşımı halka numuneler ile 1100 °C ve 1175 °C 'de halka basma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Standart halka numunesi yerine 11mm, 6mm, 6mm boyutlarında numune kullanmış, deneyleri mika, glass, grafit yağlayıcılar kullanılarak yapmışlardır. Şekil 2.19.'da görüldüğü üzere deneyler sonucunda artan sıcaklıkla en yüksek performansı mika yağlayıcıların, en düşük performansı ise grafit yağlayıcıların verdiği görülmüştür. Artan sıcaklık ile sürtünme katsayısının arttığını gözlemlemişlerdir [15].



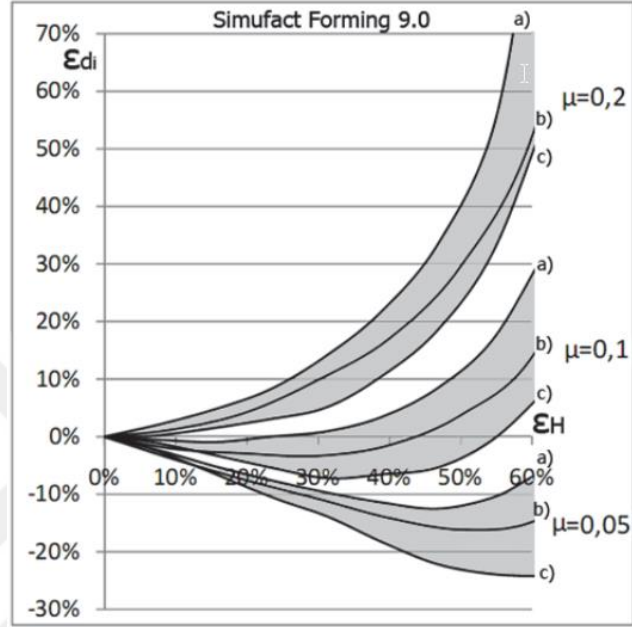
Şekil 2.19. Farklı yağlayıcılar için sürtünme katsayısının sıcaklık ile değişimi [15]

2011 yılında Kačmarčík ve arkadaşları alüminyum alaşımı için sonlu elemanlar yöntemi ile farklı boyutsal oranlara sahip halka numunelerinin sürtünme kalibrasyon eğrilerini oluşturmuşlardır. Şekil 2.20.'de dış çap ve yükseklik oranı sabit tutulup sadece iç çap değerinin değiştiği numunelerin sürtünme kalibrasyon eğrileri görülmektedir. İlk geometri iç çapının küçülmesiyle iç çaptaki daralmanın aynı sürtünme katsayısı için daha fazla olduğu görülür [16].



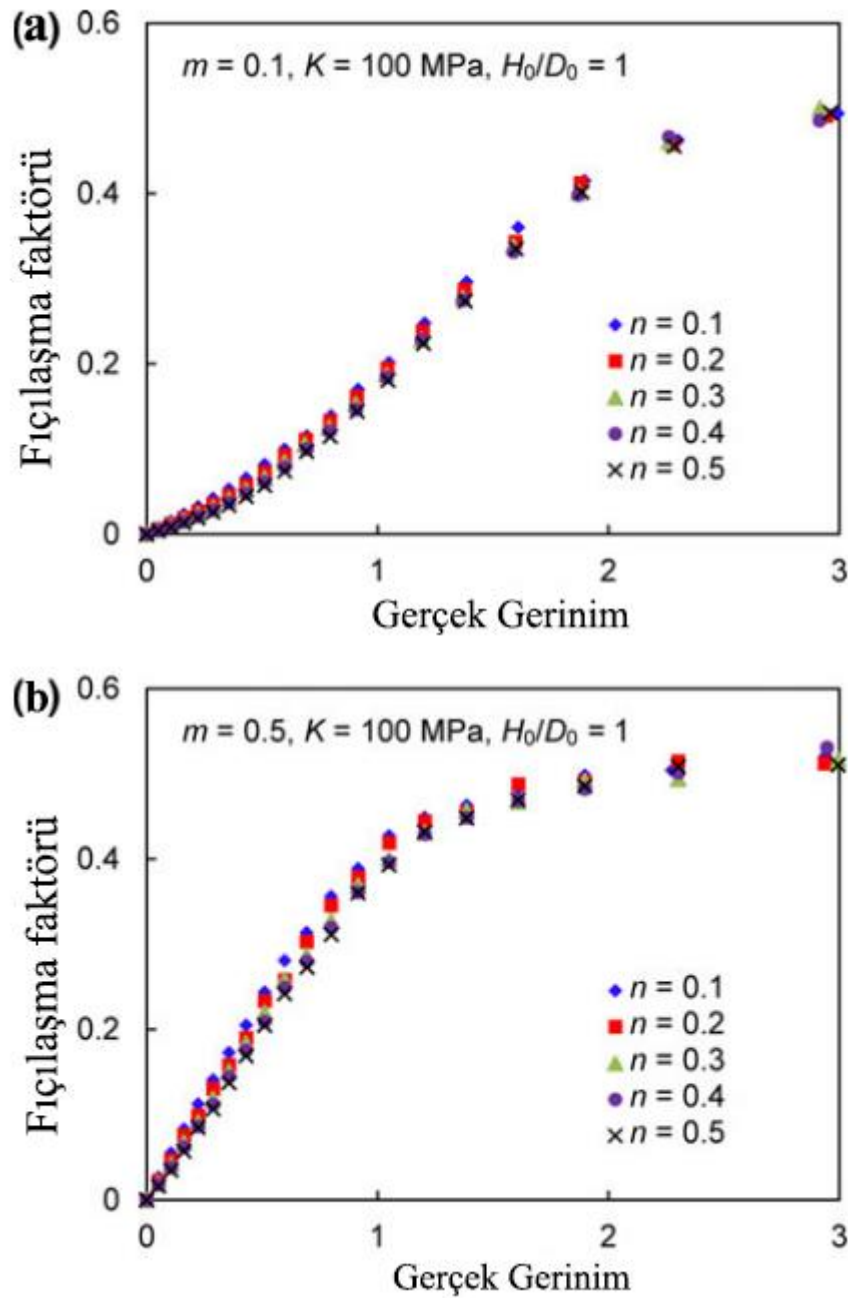
Şekil 2.20. Farklı iç çap değerlerine sahip halka numunelerin sürtünme kalibrasyon eğrileri a)30:12:10 mm, b)30:15:10 mm, c) 30:18:10 mm [16]

Şekil 2.21.'de dış ve iç çap oranı sabit tutulup yükseklik oranının değiştiği numuneler ile oluşturulan sürtünme kalibrasyon eğrileri görülmektedir. Başlangıç geometrisinde azalan kalınlık ile iç çaptaki daralmanın aynı şekilde daha fazla olduğu görülmektedir [16].



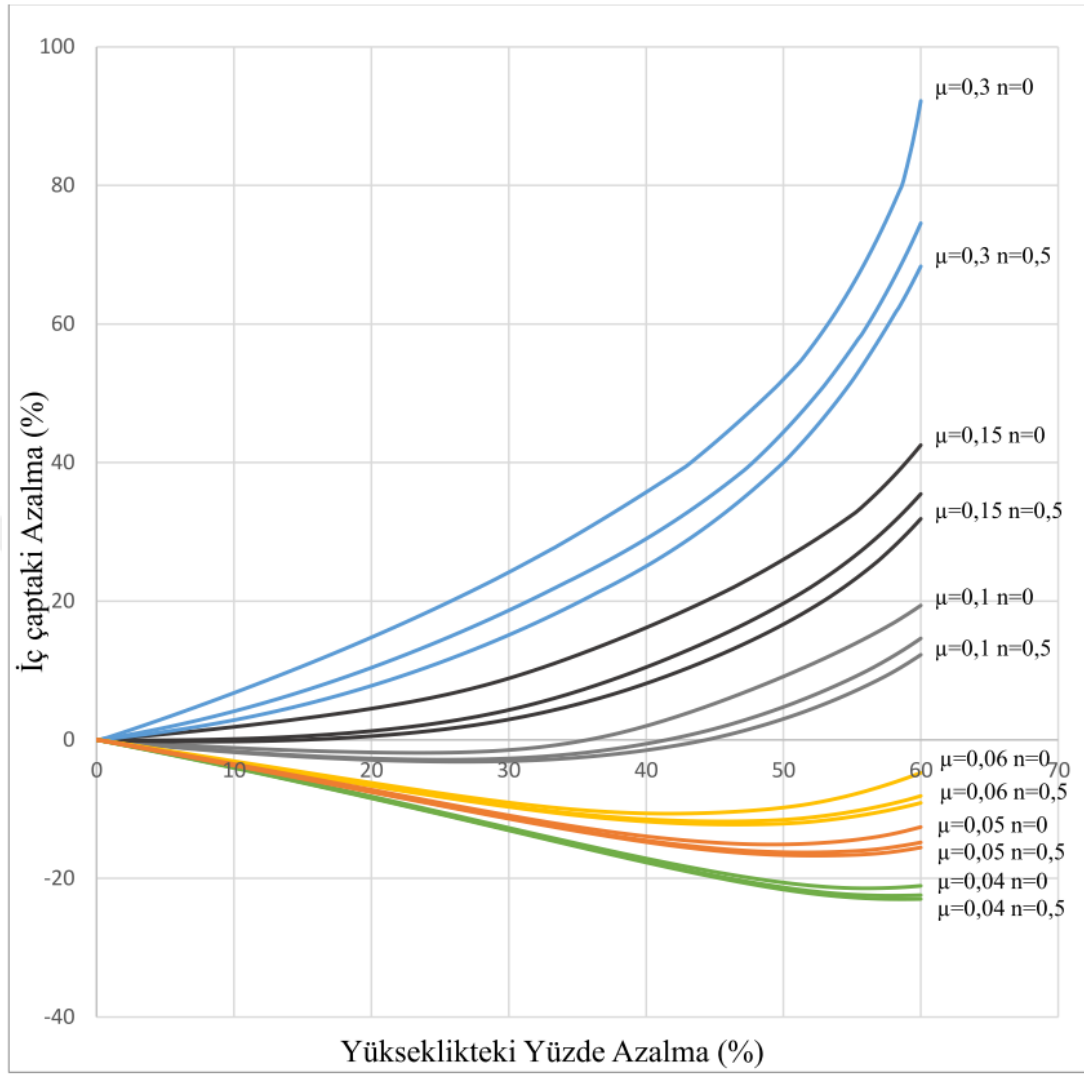
Şekil 2.21. Farklı yükseklik değerlerin sahip halka numunelerin sürtünme kalibrasyon eğrileri a)30:15:8 mm, b)30:15:10 mm, c)30:15:12 mm [16]

2013 yılında Yao ve arkadaşları sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bilgisayar ortamında gerçekleştirdikleri halka basma deney benzeşimleri ile halka numunelerde farklı sürtünme katsayılarındaki fiçilaşmayı incelemişlerdir. Çaptaki değişimin yüksekliğe oranı olarak tanımlanan fiçilaşma katsayısını incelemişlerdir. Artan sürtünme katsayısıyla fiçilaşma faktörünün arttığını, artan pekleşme üsteli ile fiçilaşma faktörünün azaldığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.22.) [17].



Şekil 2.22. Gerçek gerinim-fıçılama faktörü a) $m=0,1$ b) $m=0,5$ [17]

2018 yılında Güneş pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrilerine etkisini incelemiştir. MARC Ticari sonlu elemanlar programında gerçekleştirdiği benzeşimler sonucunda Şekil 2.23.'deki sürtünme kalibrasyon eğrilerini elde etmiştir. Artan pekleşme üsteliyle yüksek sürtünme durumunda iç çaptaki daralmanın azaldığı, düşük sürtünme durumunda iç çaptaki artışın arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca dayanım sabiti olan K 'nın sürtünme kalibrasyon eğrilerini etkilemediğini gözlemlemiştir [18].

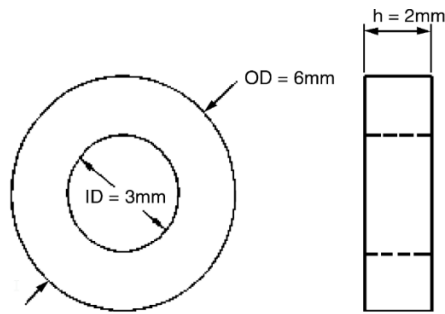


Şekil 2.23. Farklı pekleşme üstellerinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerindeki etkisi [18]

BÖLÜM 3. DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLER

3.1. Halka Basma Deneyi

Halka basma deneyi halka şeklindeki bir numunenin düz kalıplar arasında basılmasıyla gerçekleştirilir (Şekil 3.1.). Yağlayıcı performansı karşılaştırmak ya da yüzeyler arasındaki sürtünme durumunu incelemek amacıyla kullanılır. Deney boyunca elde edilen yükseklik ve iç çap değerleri ölçülür. Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 yardımıyla Şekil 3.2.’deki iç çaptaki azalmanın yükseklikteki azalmaya göre değişimini gösteren eğri oluşturulur. Bu veri noktalarının sürtünme kalibrasyon eğrisiyle karşılaştırılmasıyla sürtünme katsayısı tespit edilir. Sürtünme kalibrasyon eğrileri analitik veya sayısal yöntemler ile elde edilir. Hawkyard ve Johnson’ın çalışması ile onayladığı ilk tutarlı matematiksel çözüm olan Avitzur’un çalışması analitik yöntemle örnektir. Sayısal yöntemlere örnek ise sonlu elemanlar yöntemidir. Teknolojinin gelişmesi ve bilgisayarların kabiliyetinin artmasıyla sonlu elemanlar yönteminin kullanımı artmış, günümüzde genel olarak sürtünme kalibrasyon eğrileri sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmaktadır.



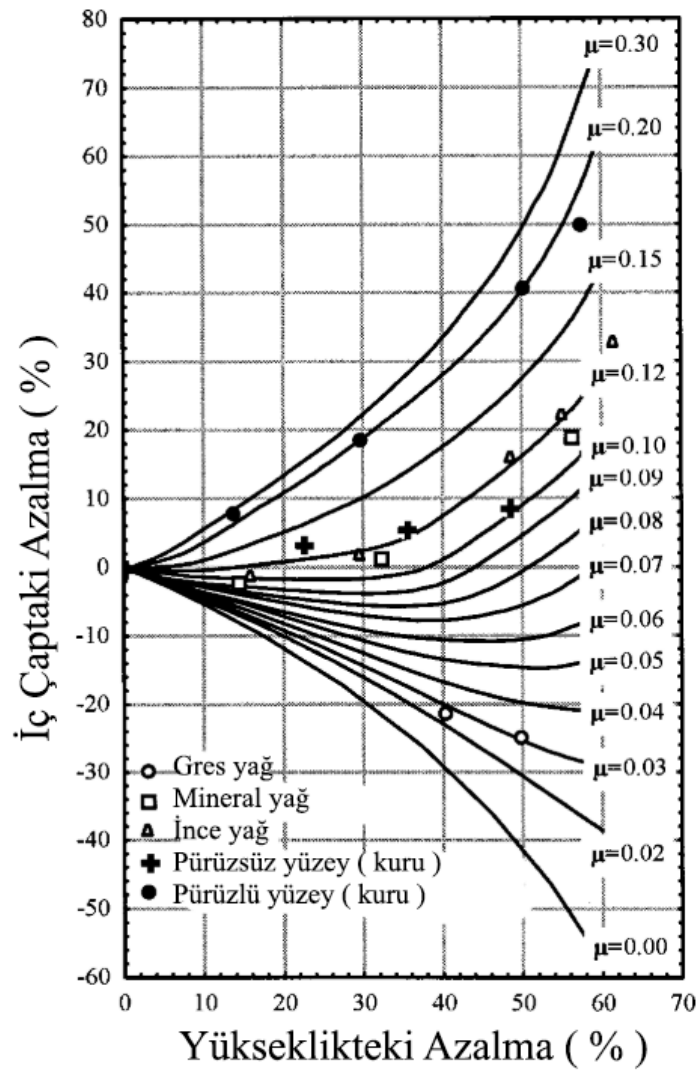
Şekil 3.1. Standart halka geometrisinin şematik olarak gösterimi

$$\%h = (H_0 - H_i)/H_0 \times 100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de %h numune yüksekliğindeki yüzde değişim, H_i numunenin deformasyonu sonrasındaki yüksekliği, H_0 numunenin ilk yüksekliğidir.

$$\%id = (ID_0 - ID_i)/ID_0 \times 100 \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de %id iç çaptaki yüzde değişim, ID_i numunenin deformasyon sonrasındaki iç çap değeri ve ID_0 numunenin başlangıçtaki iç çap değeridir.

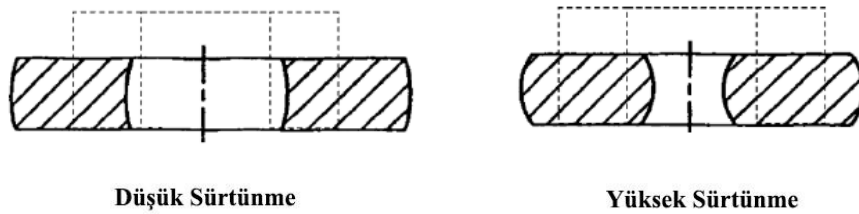


Şekil 3.2. Alüminyumun sonlu elemanlar yöntemi ile ve deneysel olarak elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri [4]

Sofuoğlu ve arkadaşları alüminyum malzeme için sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirdiği halka basma benzeşimleri ve halka basma deneyleri sonucunda

elde ettiği sürtünme kalibrasyon eğrileri Şekil 3.2.'de görülmektedir. Grafikte bulunan her bir eğri farklı sürtünme katsayısını temsil eder ve deneyler sırasındaki sürtünme katsayısı sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılarak tespit edilir. Ayrıca sürtünme kalibrasyon eğrilerinde, örneğin Şekil 3.2.'deki 0,12; 0,15; 0,2 ve 0,3 sürtünme katsayıları değerlerine ait eğrilerde görüldüğü gibi, yüksek sürtünme katsayıları için, artan sürtünme katsayısı ile numune iç çapındaki daralma artmakta, buna mukabil, Şekil 3.2.'deki 0,0; 0,02; 0,03 ve 0,04 sürtünme katsayıları değerlerine ait eğrilerdeki görüldüğü gibi, çok düşük sürtünme katsayı değerlerinde ise, azalan sürtünme katsayısı ile numune iç çapındaki genişleme artmaktadır. Şekil 3.2.'de verilen 0,07; 0,08; 0,09; 0,1 sürtünme katsayısı değerlerine ait eğrilerde olduğu gibi, bazı yüksek sayılamayacak sürtünme katsayısı değerlerinde ise, iç çap deformasyonun kritik bir değerine kadar sürekli olarak artmakta, bu değerden sonra iç çaptaki artış durmakta ve sonrasında devam eden deformasyonla iç çap daralmaktadır.

Şekil 3.3.'te düşük ve yüksek sürtünme durumunda deforme olmuş numunelerin kesitleri gösterilmiştir. Yüksek sürtünme durumunda iç çap azalır. Bu durum ayrıca fışılama olarak da adlandırılır. Düşük sürtünmede ise akış dışı doğru olur ve iç çap artar. Numune, iç çap boyunca malzemeye göre hafifçe iç bükey, dış çap boyunca ise hafifçe dış bükey bir profil alır ve bu durum mantarlaşma olarak adlandırılır [4].



Şekil 3.3. Farklı sürtünme durumlarında deforme olmuş halka numunelerinin kesitleri [13]

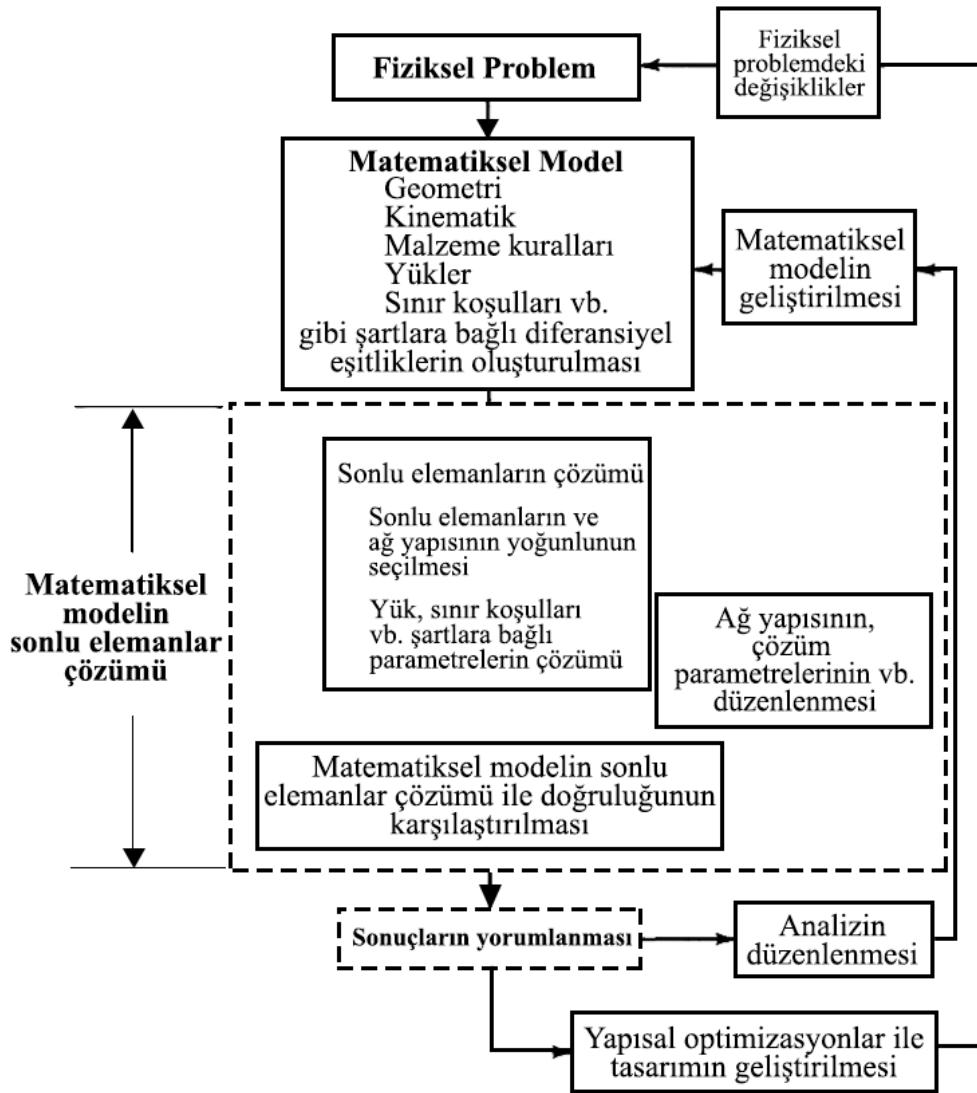
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi geniş ölçekteki mühendislik problemlerinin yaklaşık çözümünü veren sayısal analiz tekniğidir. Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde mühendislik analizlerinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Sonlu elemanlar bilgisayar

programları yapıların, katıların ve sıvıların mühendislik analizlerinde kullanılmaktadır. Çözümü oldukça zor olan problemler, sonlu boyutta küçük elemanlara bölünerek gerçekleştirilir. Yöntem ismini R.W. Clough'ın çalışmasında “sonlu elemanlar” olarak ifade etmesi sonucunda almıştır. Başlarda yapısal mekanik problemlerin çözümü için geliştirilmiştir. Daha sonrasında birçok alandaki problemin çözümünde kullanılabileceği keşfedilmiştir [19].

Metal şekillendirme işlemlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanımının avantajları, deformasyona uğrayan bir malzemenin hız, gerilme, gerinim, sıcaklık, kesit ve temas alanlarındaki basınç dağılımını elde etme yeteneği ve modelleme yapıldıktan sonra aynı modelin tekrar tekrar kullanılabilmesi ve aynı modelin değişiklikler yapılarak kolayca kullanılabilmesidir [20].

Fiziksel bir problemin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilirken izlenen adımlar Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Fiziksel problem belirli bir yüke maruz kalan gerçek bir yapıyı ya da yapısal bir parçayı içerir. Fiziksel modelin matematiksel bir modele dönüştürülebilmesi için gerekli varsayımlar yapılmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel bir yöntem olduğundan çözüm de matematiksel olarak tutarlı olmalıdır. Tutarlı sonucun elde edilemediği durumda parametreler yeniden düzenlenir. Tutarlı matematiksel çözüm elde edildikten sonra çözüm değerlendirilir ve daha iyi bir sonuç almak amacıyla matematiksel modelin düzenlenmesine gidilebilir [19].



Şekil 3.4. Sonlu elemanlar analizinin adımları [19]

BÖLÜM 4. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan deney malzemesi 6061-T6 alüminyum alaşımıdır. Alüminyum sahip olduğu özellikler bakımından günümüzde en fazla kullanılan metallerden birisidir. 6061-T6 alaşımı savunma, uzay ve uçak sanayisinde, gemi inşaatı sektöründe, köprülerde, boru ve kazan imalatı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Öz kütlesinin düşük, dayanımının yüksek olması ve işlenebilmesinin kolaylığı nedeniyle sıkça tercih edilmektedir.

Genel olarak alüminyum alaşımları sahip oldukları saflık değerini veya içerdiği farklı elementleri temsil eden dört basamaklı bir sayı ile belirtilir. Dökme alaşımlarda son iki basamak arasında ondalık işareti bulunur. Bu rakamlardan sonra kısa çizgi, kısa çizgi sonrasında alaşımın maruz kaldığı temper işlemini belirten bir harf ve mekanik veya ısıtıl işlemini gösteren bir ila üç basamaklı sayı bulunur [21]. Şekil 4.1.'de bu temper işlem kısaltmaları ve tanımları bulunmaktadır.

Alüminyum 6061-T6 alaşımında, 6061 ifadesi alaşımın magnezyum, silisyum ve bakır elementlerini içerdiğini, T6 ifadesi alaşıma yapay yaşlandırma uygulandığını ifade eder. Isıl işleme uygun alüminyum alaşımlarında, ısıtıl işlem üç ana bölümden oluşur. Bunlar çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırmadır. Çözeltiye alma işleminde malzeme içinde bulunan mukavemet arttırıcı elementler katı eriyik içine alınması sağlanır. Daha sonrasında gelen su verme işlemiyle çözeltiye alma işleminde ısıtılan malzeme hızlı bir şekilde soğutulur. Su verme işleminden sonra malzeme oda sıcaklığında veya belirli bir sıcaklıkta bekletilir. Bu işlem yaşlandırma olarak adlandırılır. Oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinde doğal yaşlandırma, daha yüksek bir sıcaklıkta gerçekleştirildiğinde yapay yaşlandırma olarak adlandırılır. Su verme sonrasında

yeterli sertlik ve mukavemete ulaşamayan malzeme, genellikle maksimum sertlik ve mukavemet elde etme amacıyla yaşlandırılır [22].

Temper no	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavllanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, O ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, O ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavllanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısıtma işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözelti ısıtma işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözelti ısıtma işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısıtma işlemi görmüş ve kararlılaştırılmış
T8	Çözelti ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısıtma işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

Şekil 4.1. Alüminyum alaşımları için temper seri numaralarının tanımları [23].

4.2. Halka Basma Deneyi

Halka basma deneyleri iki farklı boyuta sahip Alüminyum 6061-T6 numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin dış çap, iç çap ve yükseklikleri sırasıyla 6:3:2 oranında olup, büyük numune boyutları sırasıyla 24 mm, 12 mm, 8 mm ve küçük numune boyutları ise sırasıyla 12 mm, 6 mm, 4 mm'dir (Şekil 4.2.). Numunelerin hepsi torna tezgahında aynı alüminyum çubuktan işlenmiştir.

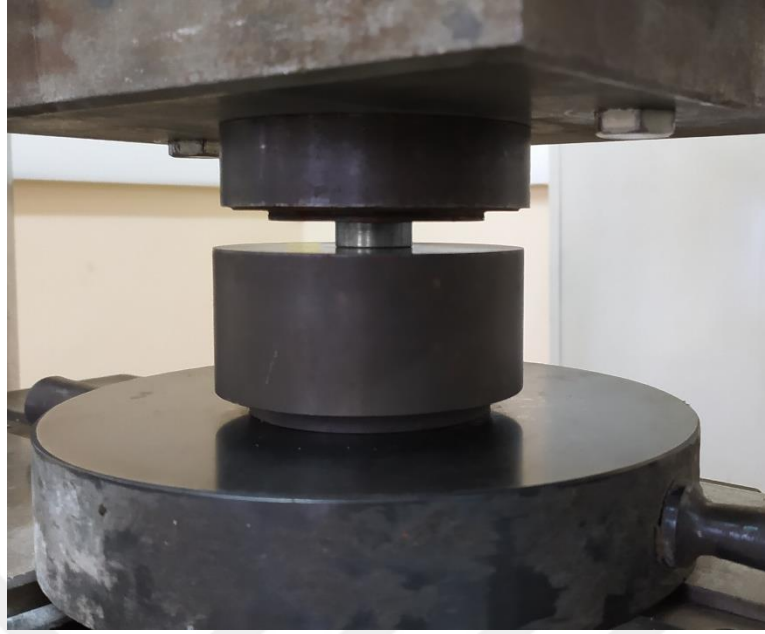


Şekil 4.2. Halka basma numuneleri

Halka basma deneyleri İTÜ Makine Mühendisliği Fakültesi Mekanik Deneyler Laboratuvarında bulunan 60 ton kapasiteli servohidrolik Dartec Çekme Makinası yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3.). Kalıplar arasına yerleştirilen halka numune 1 mm/dk hareketli kafa hızında basılmış, belli aralıklarla durularak numunelerin yükseklik ve iç çap değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.4.). Numunelerin ölçümleri dijital kumpas ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler yağlı ve kuru durumda olmak üzere iki farklı şekilde basılmıştır. Yağlayıcı olarak vazelin kullanılmıştır.



Şekil 4.3. 600kN kapasiteli servohidrolik kontrollü Dartec çekme makinası



Şekil 4.4. Deney sırasında çekilmiş, numune ve basma aparatlarını gösteren bir fotoğraf

4.3. Sayısal Uygulamalar

Halka basma deneyinin sonlu elemanlar analiz benzeşimleri MSC Marc ticari sonlu elemanlar yazılımı ile yapılmıştır.

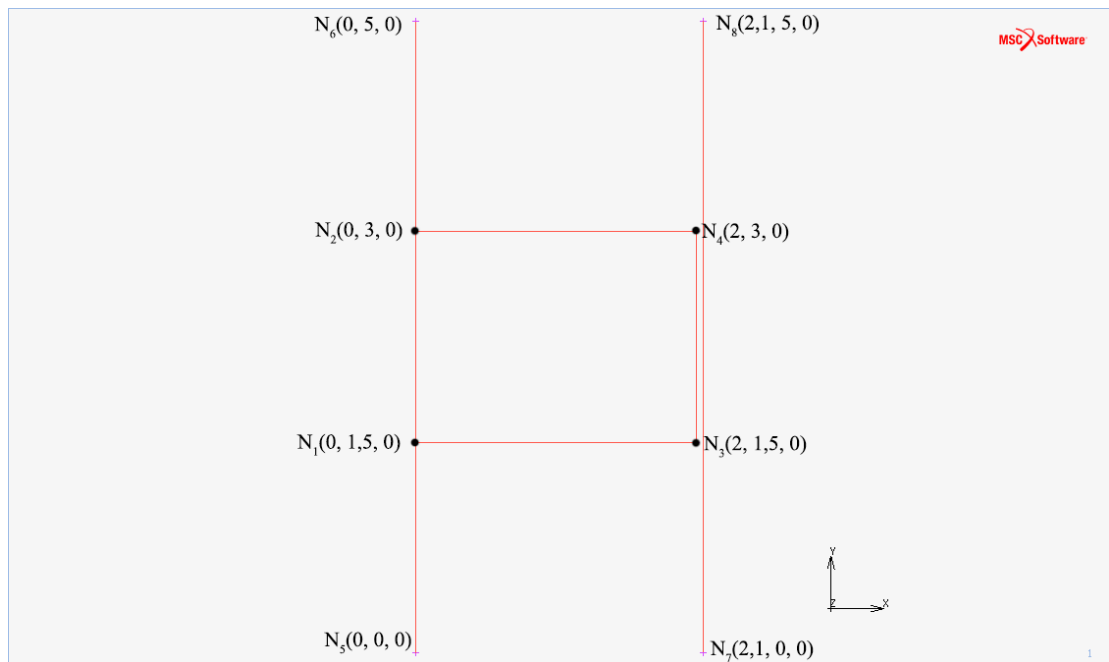
FEM analizde kullanılan model Şekil 4.6.'da verilmiştir. Parça ve deformasyon eksenel simetrik olduğu için, iki boyutlu eksenel simetrik olarak modellenmiş ve analizde dört düğüm noktalı ve her düğüm noktasında iki serbestlik derecesine sahip quad4 eleman tipi kullanılmıştır. Model 22801 düğüm noktası ve 22500 eleman sayısına sahiptir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi model alt ve üst basma aparatı ve halka basma numunesinden oluşmaktadır. Alt ve üst basma aparatları rijit geometri olarak, malzeme ise deforme olabilen cisim olarak modellenmiştir. Rijit geometri ile halka basma numunesi arasında Coulomb sürtünmesi tanımlanmış ve seçilen belirli sürtünme katsayısı değerleri ($\mu = 0,02$, $\mu = 0,05$, $\mu = 0,08$, $\mu = 0,1$, $\mu = 0,12$, $\mu = 0,15$, $\mu = 0,17$, $\mu = 0,2$ ve $\mu = 0,3$) için FEA benzeşimleri gerçekleştirilmiştir.

İlave olarak, Sonlu elemanlar analizleri, boyut oranları sabit kalması şartıyla, numune boyutundan etkilenmediği için, diğer bir deyişle, boyuttan bağımsız olduğu için,

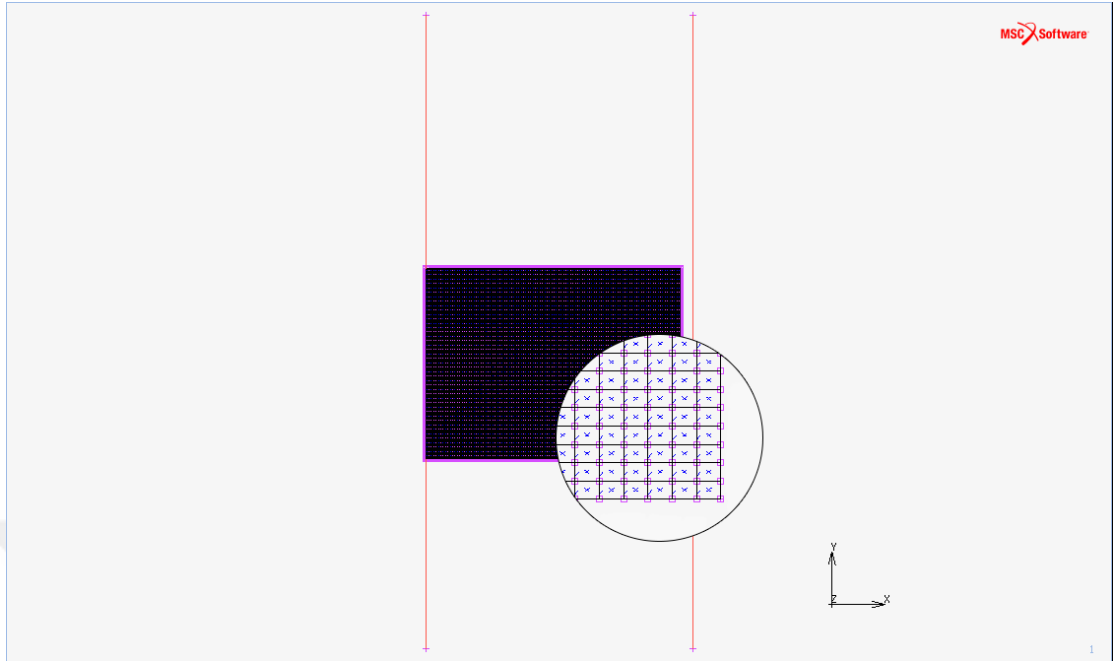
benzeşimlerde halka basma numuneleri 6:3:2 oranı korunarak dış çap 6 mm, iç çap 3 mm ve yüksekliği 2 mm olarak modellenmiştir.

4.3.1. Halka basma numunesinin boyutlandırılması ve modellenmesi

Halka numunesini oluşturmak için öncelikle Geometry&Mesh menüsü içinde bulunan Point komutuyla köşe noktaları olan N_1 , N_2 , N_3 ve N_4 çizilmiştir (Şekil 4.5.). Curve komutu ile bu noktalar birleştirilmiş, Element komutu ile eleman olarak tanımlanmıştır. Daha sonrasında Subdivide komutuyla parçalara ayrılmıştır. Ağ yapısı 22801 düğüm noktasına ve 22500 elemana sahiptir. Dört düğüm noktalı ve her düğüm noktasında 2 serbestlik derecesine sahip olan quad4 eleman tipi kullanılmıştır. Modelin ağ yapısı Şekil 4.5.'te görüldüğü gibidir. Ek olarak Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi sabit ve hareketli basma aparat yüzeylerini tanımlayan N_5 , N_6 , N_7 ve N_8 noktaları çizilip bu noktalar birleştirilmiştir. Contact Bodies menüsü içinde bulunan Meshed(Deformable) komutu ile malzeme modeli deforme olabilen cisim olarak, sabit ve hareketli yüzeyi temsil eden eğriler Geometric komutuyla rijit geometri olarak tanımlanmıştır. Contact menüsü kullanılarak numune modeli ve basma aparatları arasındaki ilişki ve sürtünme durumu tanımlanmıştır.



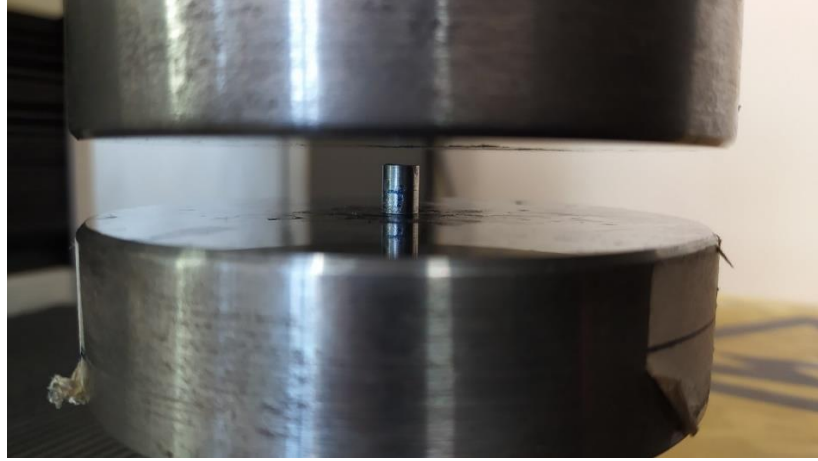
Şekil 4.5. Basma numunesinin iki boyutlu modeli



Şekil 4.6. Modelin ağ yapısı

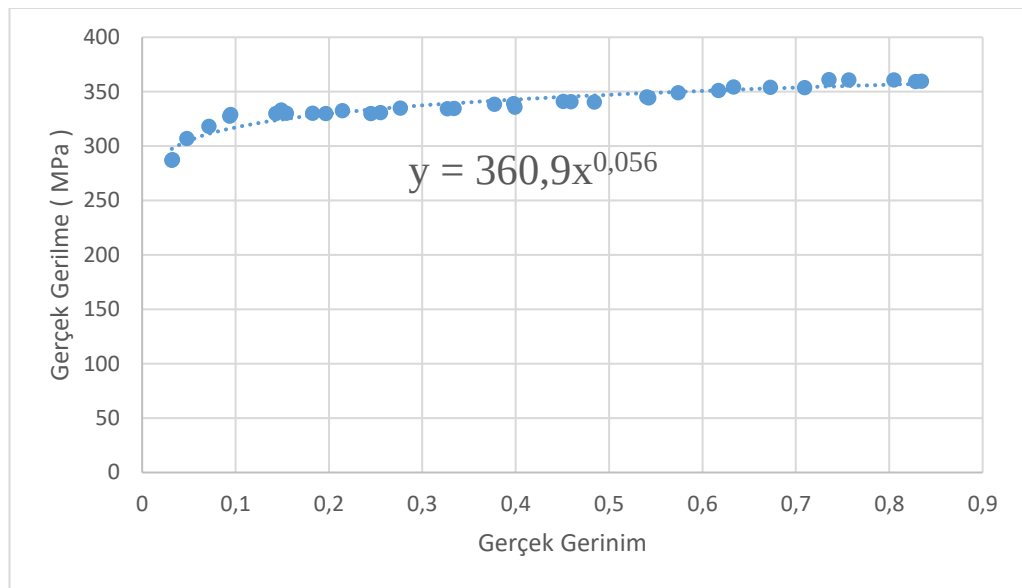
4.3.2. Malzeme modeli

Sonlu elemanlar benzeşimlerinin gerçekleştirilebilmesi için malzemelerin plastik davranışlarını tanımlayan akma eğrisinin analizden önce tanımlanması gerekmektedir. Bu eğriyi elde etmek amacıyla deney malzemesinden yüksekliği 9 mm, çapı 6 mm olan numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler ASTM E9 standartına uygun bir şekilde Shimadzu AG-I 50 kN vida tahrikli çekme cihazı ile Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi 1 mm/dk hareketli kafa hızında basılmış, üç basma numunesiyle gerçekleştirilmiş ve belli aralıklarla kuvvet ve yükseklik değerleri kaydedilmiştir.



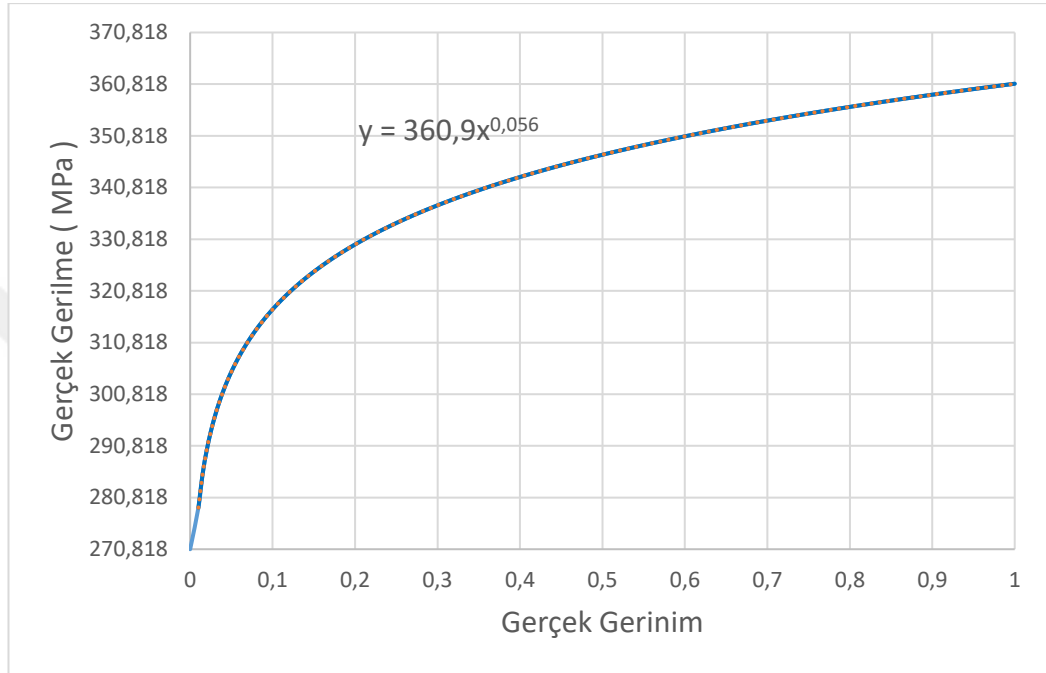
Şekil 4.7. Basma numunesi

Her üç deney sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman değerlerinden, gerilme-gerinim değerleri hesaplanmış ve tüm deneyler için elde edilen gerilme-gerinim değerleri aynı grafiğe yerleştirilmiştir (Şekil 4.8.). Daha sonra bu gerilme-gerinim veri noktalarına denklemi Holloman Bağıntısını veren bir eğri uydurulmuş. Oluşturulan bu eğrinin denklemine göre, malzemenin dayanım katsayısı değeri $K = 360,9 \text{ MPa}$ ve pekleşme üsteli değeri $n = 0,056$ olarak belirlenmiştir. Literatürde Alüminyum 6061-T6'nın dayanım katsayısı değeri $K = 410 \text{ MPa}$ ve pekleşme üsteli değeri $n = 0,05$ olarak verilmektedir [24]. Elde edilen dayanım katsayısı ve pekleşme üsteli değeri literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 4.8. Alüminyum 6061-T6'nın akma eğrisi

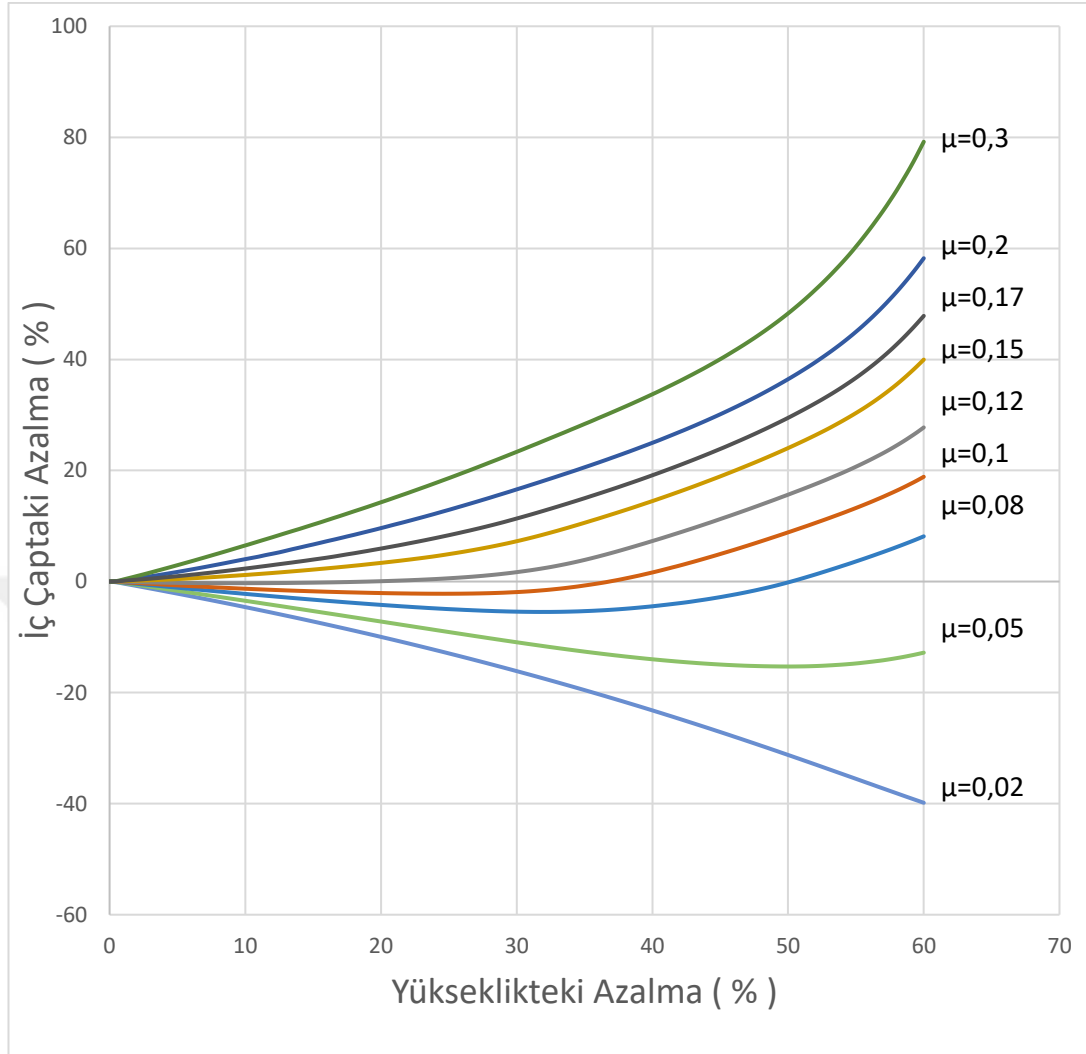
Alüminyum 6061-T6 numune için programa malzeme özellikleri tanımlanırken elastisite modülü, E, 68,9 GPa, poisson oranı, ν , 0,33 ve dayanım katsayısı değeri, K, 360,9 MPa ve pekleşme üsteli değeri, n, 0,056 olarak girilmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Alüminyum 6061-T6'nın Marc sonlu elemanlar programına tanımlanan akma eğrisi

4.4. Sonuçlar

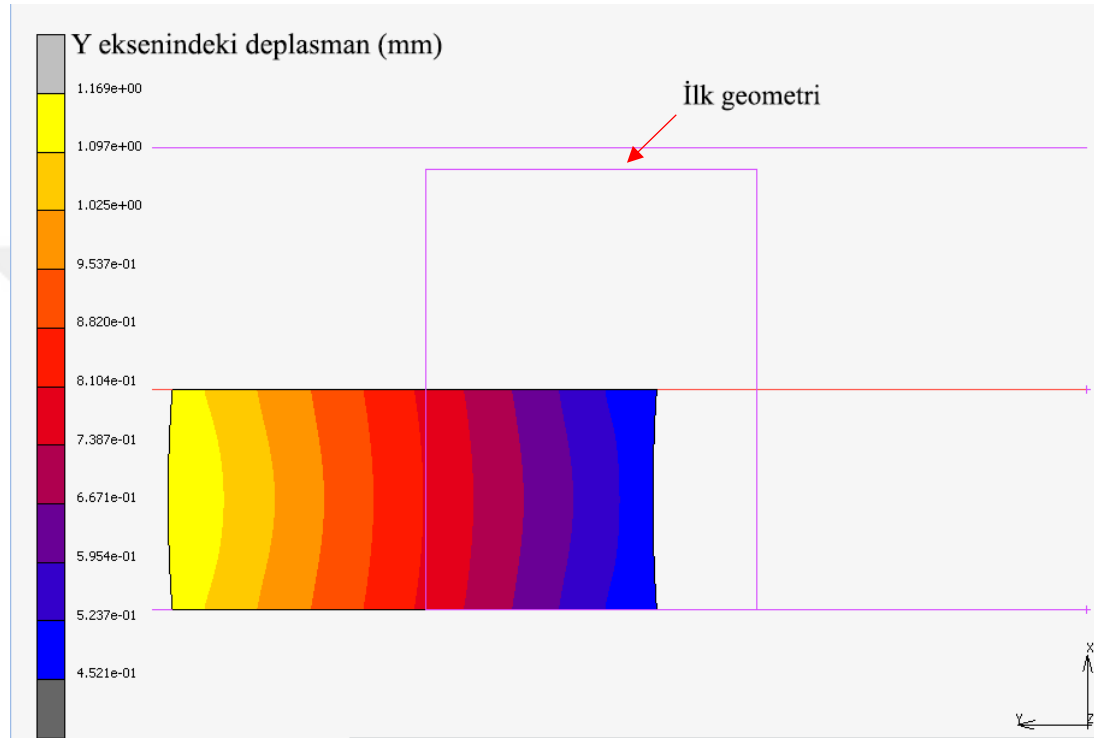
Halka basma deneylerinin bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan benzeşimleri farklı sürtünme katsayıları ile gerçekleştirilmiştir. Benzeşimler sırasıyla $\mu = 0,02$, $\mu = 0,05$, $\mu = 0,08$, $\mu = 0,1$, $\mu = 0,12$, $\mu = 0,15$, $\mu = 0,17$, $\mu = 0,2$ ve $\mu = 0,3$ sürtünme katsayıları için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzeşimler sonucunda Al6061-T6'nın sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.10.).



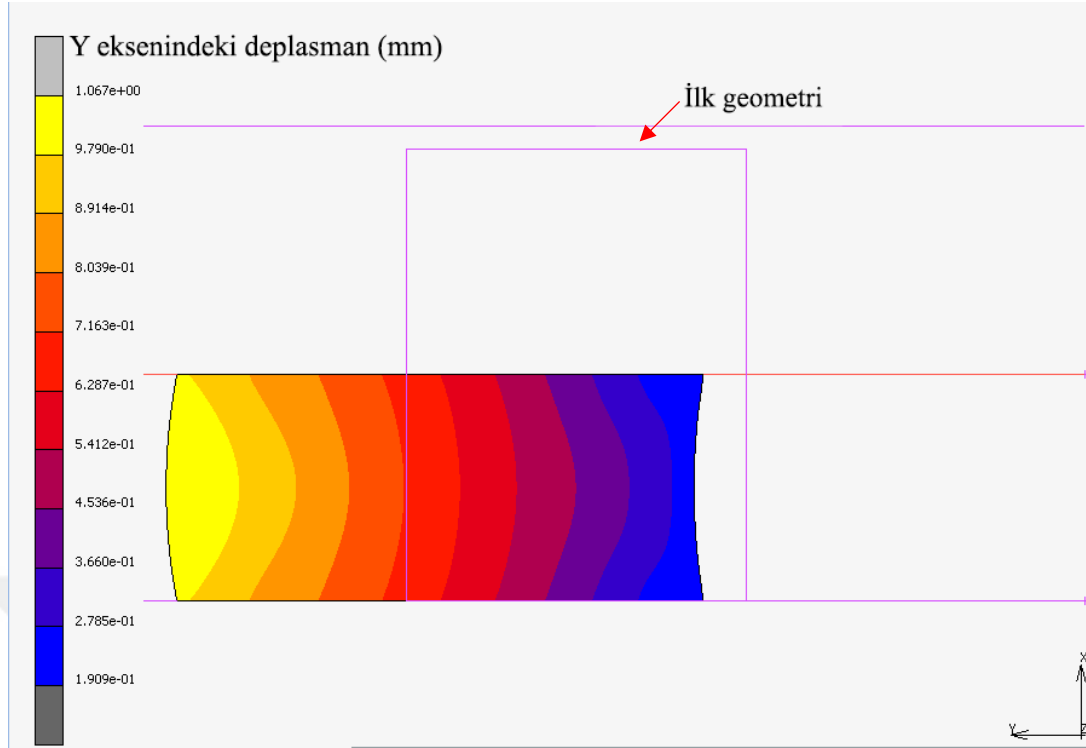
Şekil 4.10. Alüminyum 6061-T6'nın sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 4.10.'da gösterilen sürtünme kalibrasyon eğrileri incelendiğinde sürtünme katsayısının $\mu = 0,02$ olduğu durumda deformasyon boyunca halka numunesinin iç çapının sürekli olarak arttığı görülmektedir. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,05$ olduğunda belirli bir deformasyon değerine kadar iç çapta sürekli bir artış meydana gelmekte ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra iç çaptaki artışın azalmaya başladığı görülmektedir. Sürtünme katsayısının $\mu = 0,08$ olması durumunda ise belirli bir deformasyon değerine kadar iç çapta sürekli bir artış meydana gelmekte ve belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra iç çaptaki artışın azalmaya başladığı ve hatta belirli bir noktadan sonra iç çapın, ilk iç çap boyutuna göre daralmaya başladığı görülmektedir. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,12$ 'den büyük değerlere sahip olduğunda ise iç çapta artışın olmadığı, deformasyon boyunca iç çapın devamlı azaldığı görülmektedir.

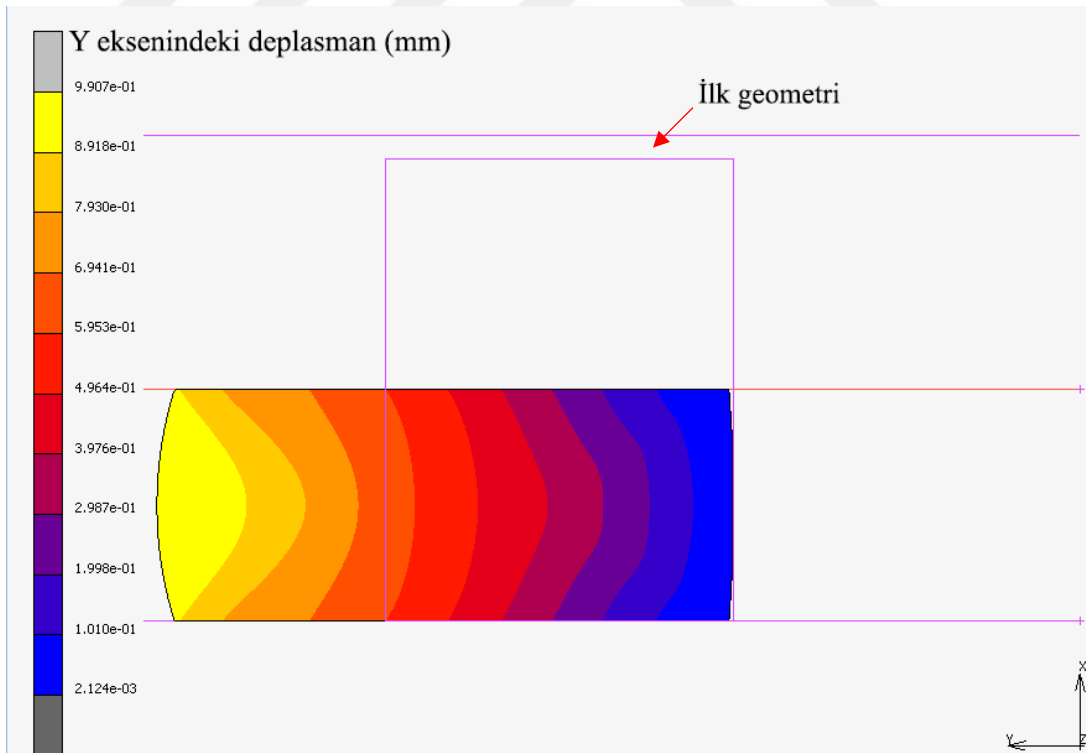
Sonlu elemanlar analizi sonucunda farklı sürtünme durumlarında deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası numune geometrisini ve deformasyon sonucu iç çaptaki değişimi gösteren numune kesit görüntüleri Şekil 4.11., Şekil 4.12., Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15., Şekil 4.16., Şekil 4.17., Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.’da gösterilmiştir.



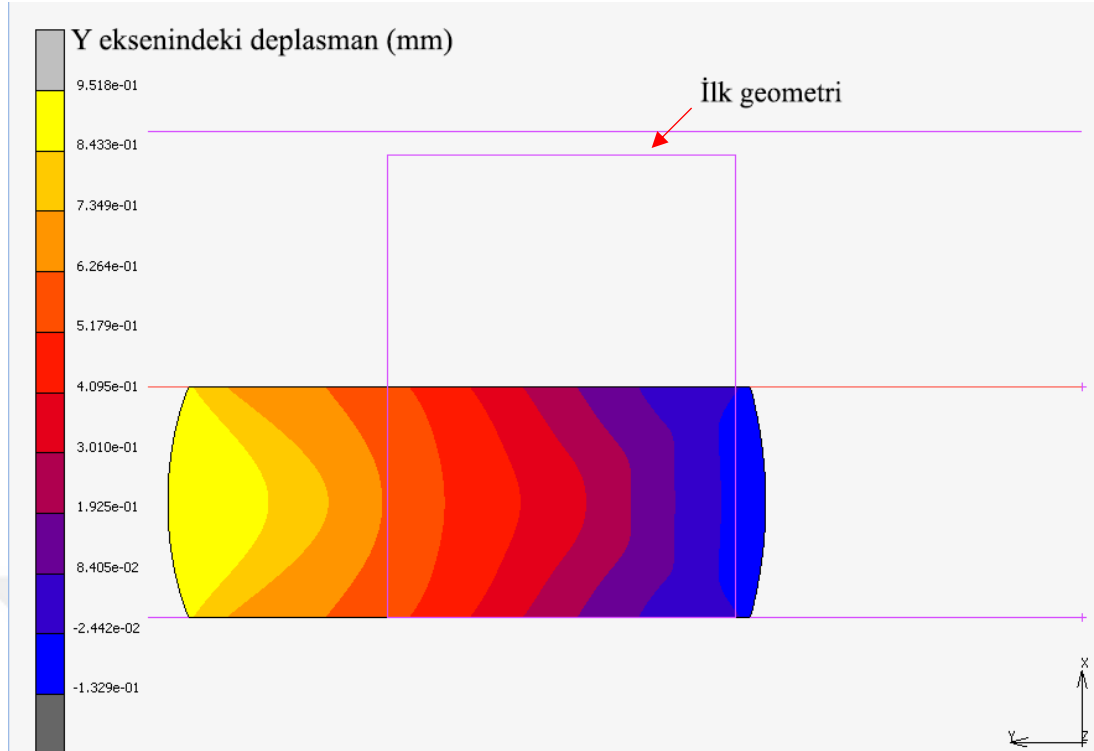
Şekil 4.11. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,02$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



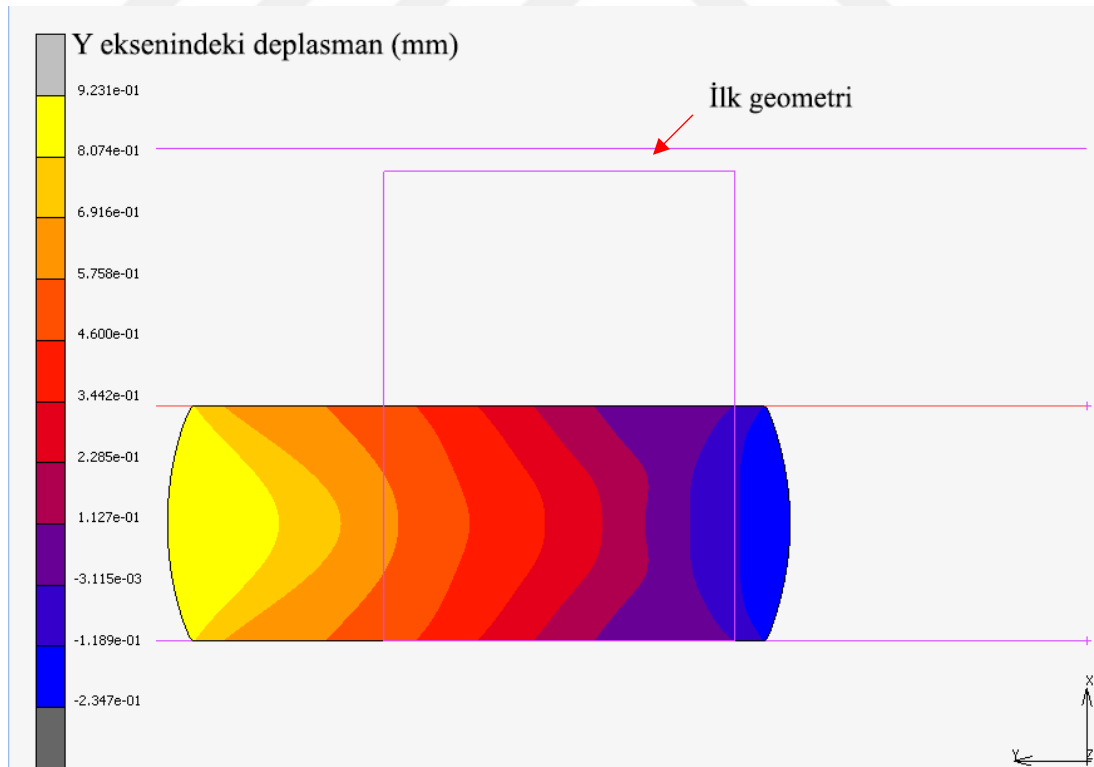
Şekil 4.12. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,05$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



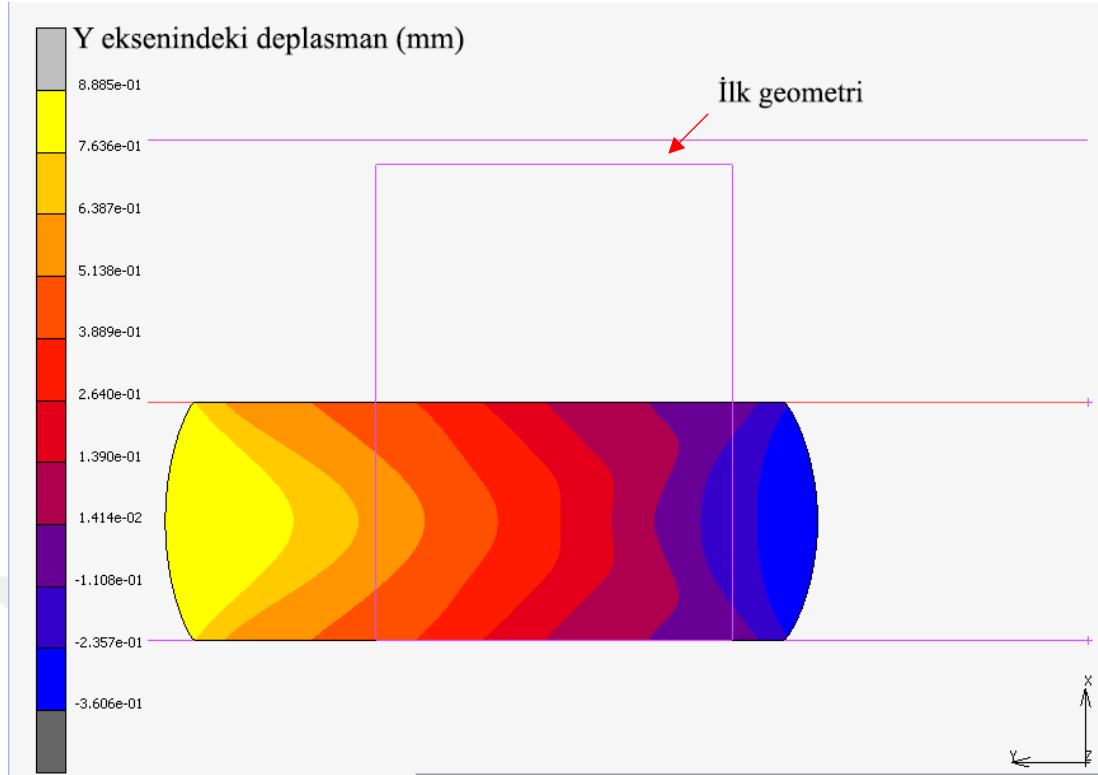
Şekil 4.13. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,08$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



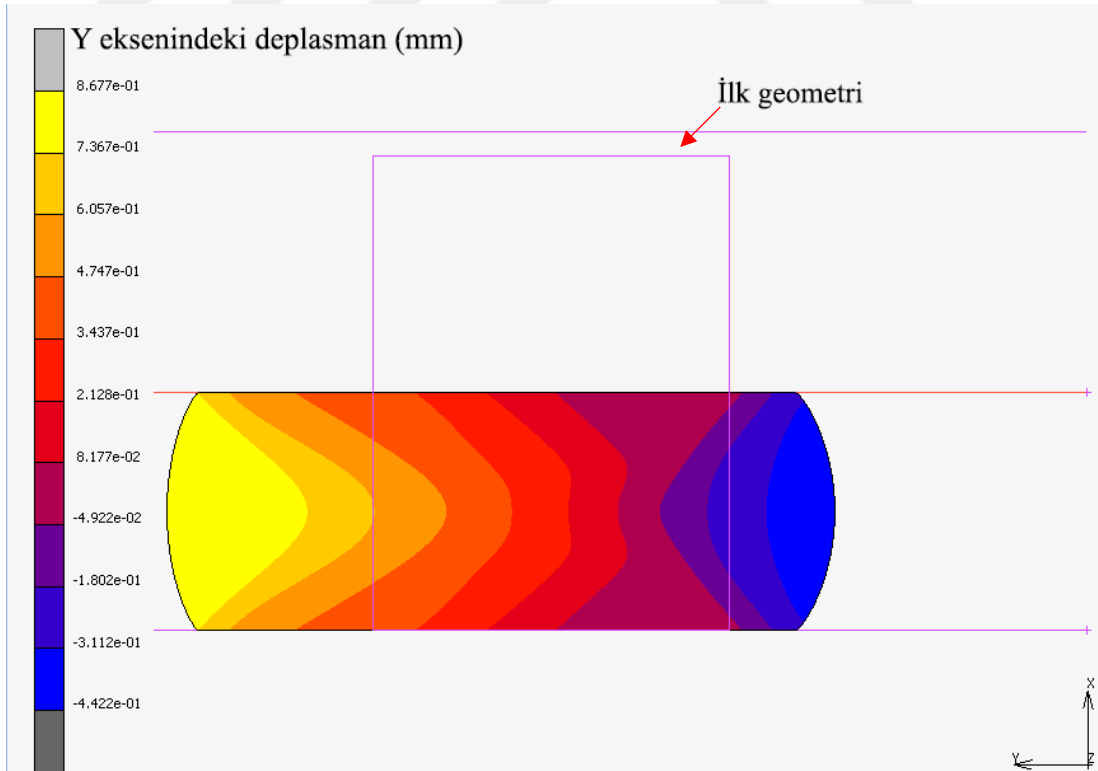
Şekil 4.14. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,1$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



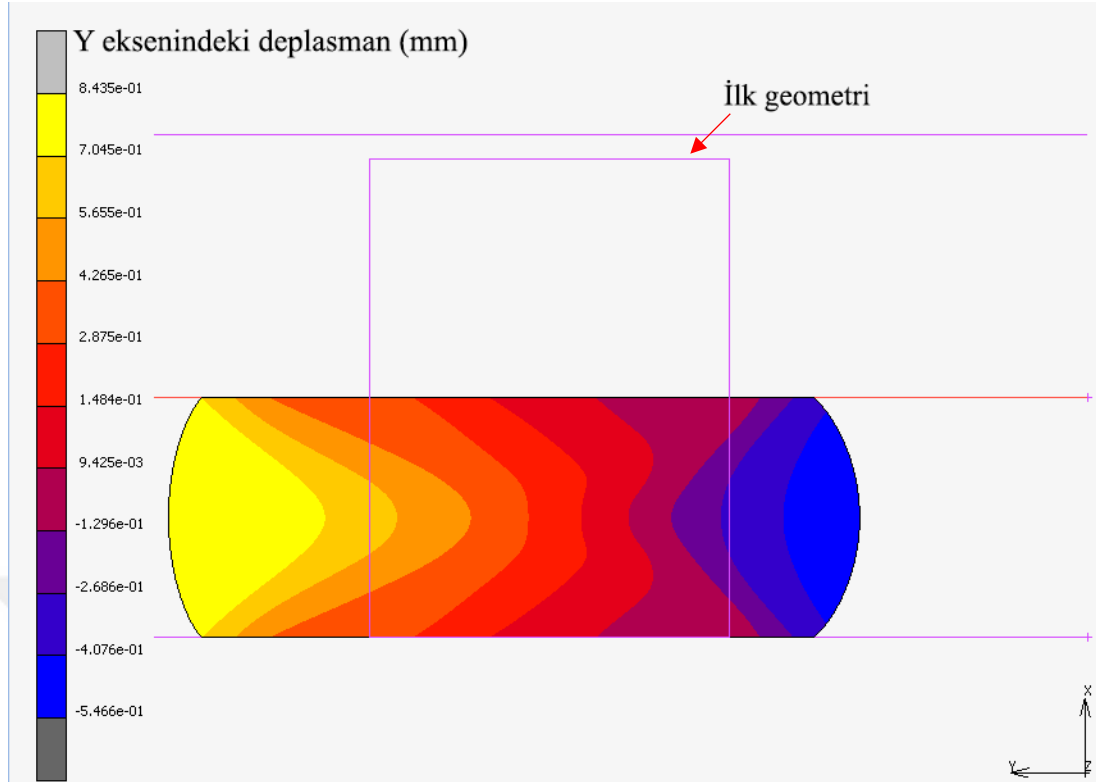
Şekil 4.15. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,12$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



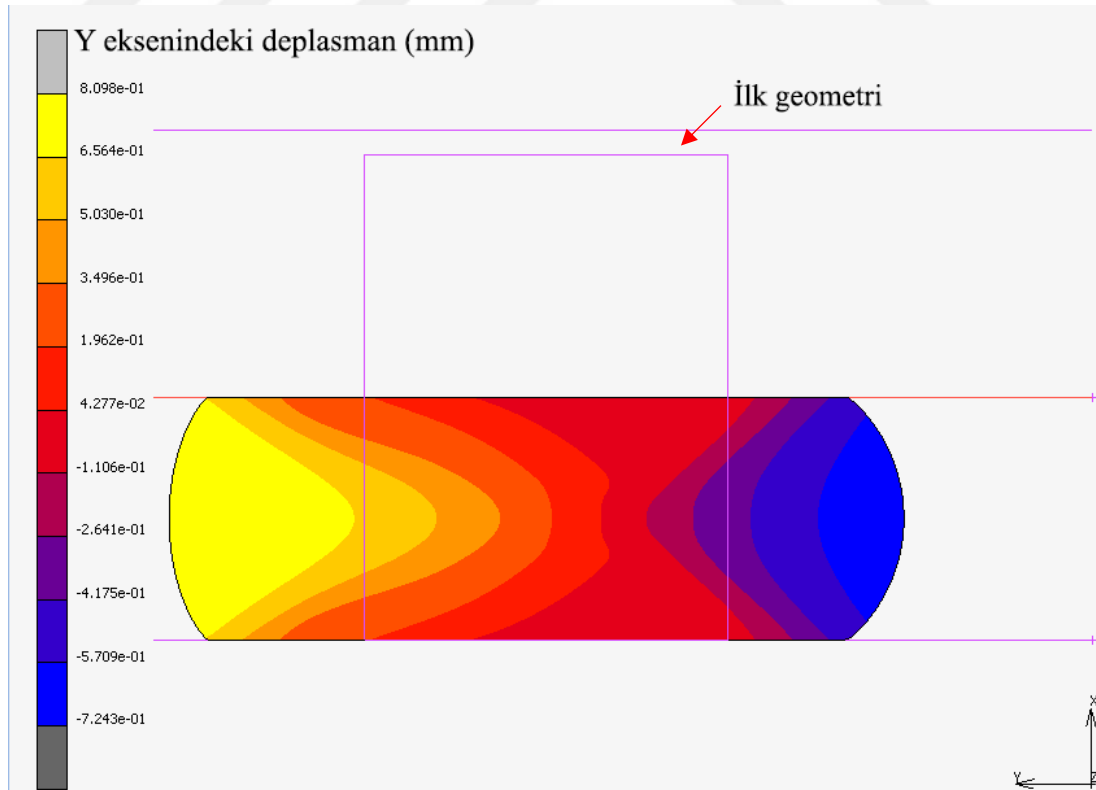
Şekil 4.16. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,15$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



Şekil 4.17. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,17$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



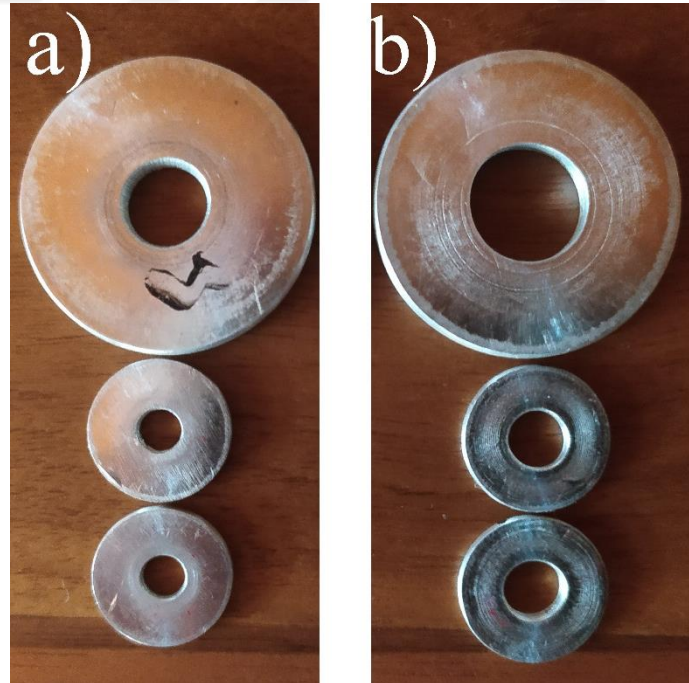
Şekil 4.18. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,2$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti



Şekil 4.19. Alüminyum 6061-T6'nın $\mu=0,3$ için deformasyon öncesi ve %50 deformasyon sonrası kesiti

Şekil 4.11. ve 4.12.'de görüldüğü üzere alüminyum 6061-T6'nın $\mu = 0,05$ sürtünme katsayısına kadar %50'lik deformasyonu sonucu kesitinde mantarlaşma gerçekleşmiştir. Şekillerde deformasyon sonucu, malzeme kesit geometrisinin iç çap boyunca malzemeye göre hafifçe iç bükey, dış çap boyunca ise hafifçe dış bükey bir profil aldığı görülmektedir. Sürtünme katsayı $\mu = 0,08$ 'den itibaren %50'lik mertebesinde bir deformasyon sonucu elde edilen kesit görüntülerinden (Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15., Şekil 4.16., Şekil 4.17., Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.) görüldüğü üzere numunelerde fiçilaşma meydana geldiği görülmektedir.

Halka basma deneyinde kullanılan numunelerin deformasyon sonucu durumları Şekil 4.20.'de görülmektedir. Kuru durum ile yağlı durumda kullanılan numuneler arasındaki fark direkt göze çarpmaktadır. Yağlı durumda sürtünme daha az olduğundan kuru durumda basılan numunelere göre iç çapları daha büyüktür. Öte yandan kuru durumdakiler içinse sürtünme katsayısı yüksek olduğundan iç çapları daha küçük olduğu söylenebilir.



Şekil 4.20. a) Kuru durum b) Yağlı durum için halka basma deneyleri sonrasında farklı boydaki bazı halka numuneleri gösteren fotoğraflar

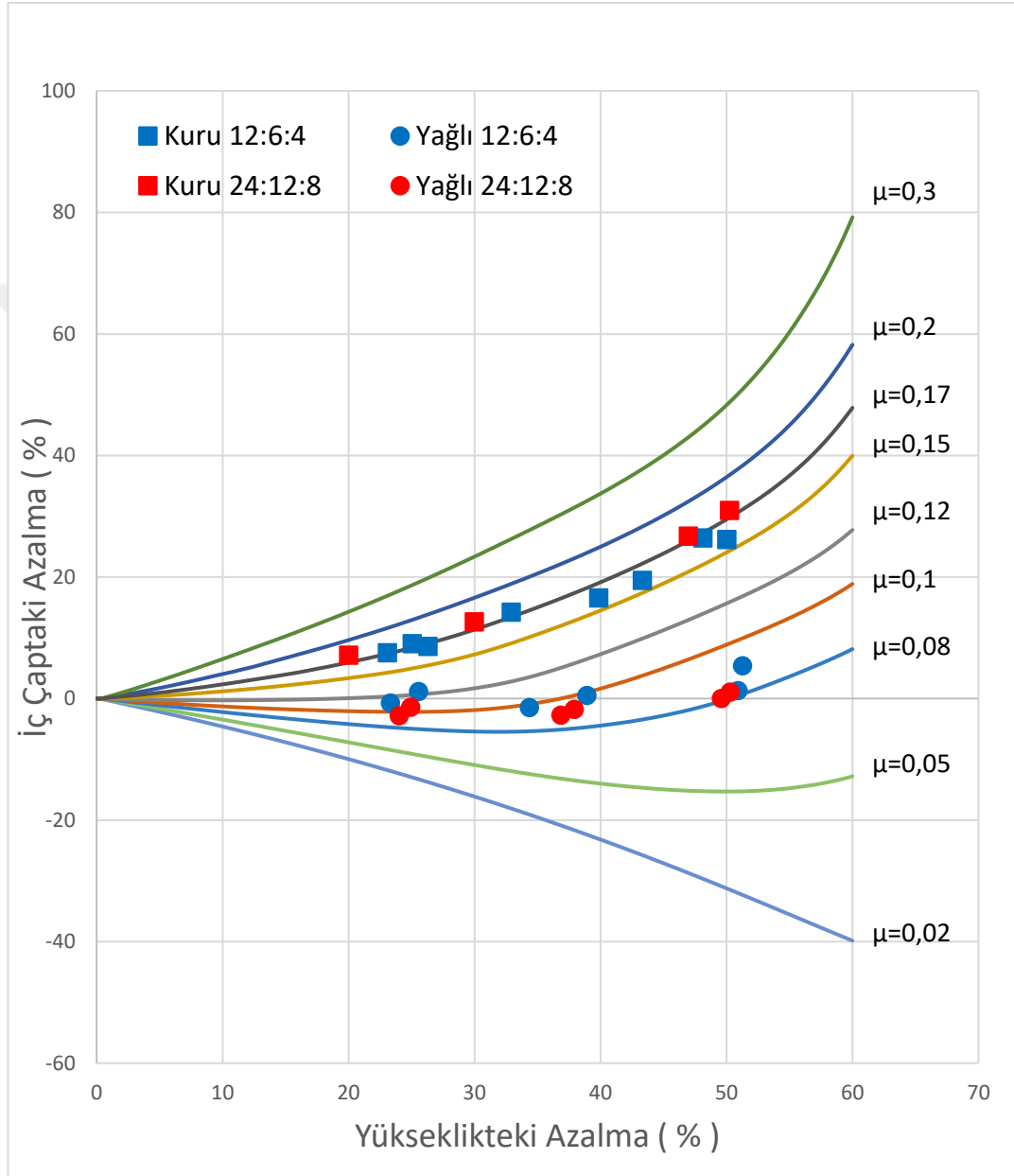
Halka basma numunelerinin deney sonrası kesit görüntüleri Şekil 4.21.'de verilmiştir. Numuneler deneylerden sonra kesilerek iki parçaya ayrılmış ve kesit görüntüleri elde edilmiştir. Kesitlerden görüldüğü üzere kuru durumda fiçilaşma oluştuğu görülürken, yağlı durumda halka numunenin yaklaşık olarak %50 deformasyonu sonucunda neredeyse düz bir profil oluştuğu ve kuru duruma göre iç çapının daha geniş olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21. Yağlı ve kuru durumda basılan halka numunelerin yaklaşık %50'lik deformasyonu sonucu kesitlerini gösteren fotoğraflar

Kuru ve yağlayıcı uygulanarak gerçekleştirilen halka basma deneylerinde meydana gelen sürtünme durumları ile ilgili sürtünme katsayısının belirlenmesi için, deneysel veriler, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.22.). Kuru durumda basılmış olan halka numunelerin iki boyut için de sonuçları birbirlerine oldukça yakın olduğu ve yaklaşık olarak sürtünme katsayısının $\mu = 0,17$ olduğu görülmektedir. Yine aynı şekilde yağlı durumda iki farklı boyuttaki deney numuneleriyle gerçekleştirilen deney sonuçlarının da birbirlerine oldukça yakın olduğu gözükmemektedir. Fakat kuru durumda deney sonuçları $\mu = 0,17$ eğrisini takip ederken, yağlı durumda bu durum görülmemektedir. Yağlı durumda deformasyon ilerledikçe sürtünme katsayısının azaldığı, yaklaşık $\mu = 0,1$ değerinin biraz üzerinden $\mu = 0,08$ değerine düştüğü görülmektedir. Görünüşe göre artan deformasyonla birlikte yağlamanın etkisi az da olmaktadır. Bu başlangıçta numune yüzeylerinin pürüzlü olmasından, yani girintili çıkıntılı olmasından kaynaklanıyor olabilir. Başlangıçta yüzey pürüzlülüğü nedeniyle, yüzeylerin tepeler ve çukurlardan oluştuğu ve yağlayıcının yüksek tepe bölgelerini yağlamada yetersiz kaldığı, kalıp yüzeyiyle temas eden yüksek tepe bölgeleri yüzünden, sürtünmenin, dolayısıyla, sürtünme katsayısının bir miktar yüksek olduğu, buna karşın ilerleyen deformasyonla birlikte, düzgün kalıp yüzeyler üzerinde deformasyona uğrayan numune yüzeyinin düzleşmesi ve deneylerin kesintili yapılması ve yağlamalı deneylerde yağlayıcının tekrar tatbiki sonucu, numune kalıp yüzeyi arasında nispeten

kesintisiz bir yağ filminin oluştuğu, bir başka deyişle yağlamanın kalıp ve numune yüzeyini daha etkin bir şekilde ayırdığı söylenebilir. Bunun da artan deformasyonla birlikte sürtünmenin, dolayısıyla sürtünme katsayısının az da olsa düşmesine yol açtığı söylenebilir.



Şekil 4.22. Al6061-T6'nın sonlu elemanlar yöntemi ve fiziksel deney sonucu verileri

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Halka basma deneyinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri incelendiğinde sürtünme katsayısı değeri $\mu = 0,02$ 'de iç çaptaki boyutsal değişim sadece artış yönündedir. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,05$ ile $\mu = 0,12$ arasında bir değere sahip olduğunda numune iç çapındaki değişim ilk olarak artış gösterip, devamında azalışa geçmiştir. Sürtünme katsayısı $\mu = 0,15$ ve üzerindeki değerlere sahip olduğunda ise iç çapta sadece azalış gözükmemektedir.

Bu çalışmada halka basma deneyinde numune boyut etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda iki farklı boyuta sahip numunelerle, iki farklı sürtünme durumunda halka basma deneyleri ve bu deneylerdeki sürtünme katsayılarının belirlenmesi için gerekli sürtünme kalibrasyon eğrilerinin elde edilebilmesi içinse, bilgisayar ortamında farklı sürtünme katsayıları için halka basma deneylerinin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı boyut için gerçekleştirilen halka basma deneyleri sonucunda elde edilen verilerin birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kuru durumda gerçekleştirilen deneylerde sürtünme katsayısının yağlı duruma göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Kuru durumda gerçekleştirilen deney verilerinin, $\mu = 0,17$ için elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrisiyle uyumlu bir şekilde ilerlediği görülürken yağlı durumda gerçekleştirilen deney verilerinin tek bir eğriyi takip etmediği deformasyon boyunca sürtünme katsayısının az da olsa azaldığı, yaklaşık $\mu = 0,1$ değerinin biraz üzerinden $\mu = 0,08$ değerine düştüğü görülmüştür. Yapılan çalışmada bu iki boyutla gerçekleştirilen halka basma deneylerinde, numune boyutlarının halka basma deney sonuçları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Halka basma deneyi yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısını tespit etme konusundaki etkinliğini yıllar boyunca gerçekleştirilen araştırmalar yardımıyla kanıtlamıştır. Halka basma deneyi sonucunda deformasyona uğrayan halka numuneler incelendiğinde yağlı

durumda basılanların kuru durumda basılanlara göre iç çaplarının daha büyük olduğu gözükmemektedir (Şekil 4.20.). Sürtünme kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırıldığında Alüminyum 6061-T6'nın çelik kalıplara karşı çalıştığında, kuru durumda sürtünme katsayısının yaklaşık olarak $\mu = 0,17$, vazelin ile yağlanması durumunda ise yaklaşık $\mu = 0,1 - 0,08$ aralığında olduğu tespit edilmiştir.

İleride yapılacak çalışmalarda daha küçük numune boyutları da kullanılarak aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de dikkate alarak basma kalıpları ve numunelerin yüzeyleri oldukça düşük pürüzlülüğe sahip olacak şekilde hazırlanıp deneyler gerçekleştirilerek yağlama etkisi ve boyut etkisi hakkında daha fazla bilgi edinilebilir. Daha küçük numune boyutlarına inildiğinde de numune boyut etkisinin olup olmadığı araştırılabilir. Farklı yağlayıcılar kullanılarak malzemenin farklı yağlayıcılara karşı davranışı incelenebilir. Ek olarak malzeme çeşitliliği arttırılarak farklı malzemeler için de bu davranışlar incelenebilir ve farklı malzemeler için sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çapan, L., Metallerde plastik şekil verme, 3. Cilt. Çağlayan Kitabevi Yayınları, 1999.
- [2] Groover M.P., Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems, 4th Edition. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] 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.
- [4] Sofuoğlu, H., Gedikli, H., Rasty, J., Determination of friction coefficient by employing the ring compression test. J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME, 123, 338-348, 2001.
- [5] Hawkyard, J.B., Johnson, W., An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression. Int. J. Mech. Sci., 9(4), 163-182, 1967.
- [6] Male, A.T., Depierre, V., The validity of mathematical solutions for determining friction from the ring compression test. J. Lubr. Technol., 92(3), 389, 1970.
- [7] Liu, J.Y., An analysis of deformation characteristics and interfacial friction conditions in simple upsetting of rings. J. Eng. Ind., 1149-1155, 1972.
- [8] Lee, C.G., Altan, T., Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders. J. Eng. Ind., 94(3), 775, 1972.
- [9] DePierre, V., Gurney, F., A method for determination of constant and varying friction factors during ring compression tests. J. Lubr. Technol., 96(3), 482, 1974.
- [10] Wang, F., Lenard, J.G., An experimental study of interfacial friction-hot ring compression. J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME, 114(1), 13-18, 1992.
- [11] Rudkins, N.T., Hartley, P., Pillinger, I., Petty, D., Friction modelling and experimental observations in hot ring compression tests. J. Mater. Process. Technol., 60, 1-4, 349-353, 1996.

- [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 tests of Ti-6Al-4V alloy. *J. Mater. Process. Technol.*, 112(1), 1-5, 2001.
- [13] Robinson, T., Ou, H., Armstrong, C.G., Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation. *J. Mater. Process. Technol.*, 153–154, 1–3, 54–59, 2004.
- [14] Sahin, M., Çetinarslan, C.S., Akata, H.E., Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials. *Mater. Des.*, 28, 633-640, 2007.
- [15] Shahriari, D., Amiri, A., Sadeghi, M.H., Study on hot ring compression test of ninomic 115 superalloy using experimental observations and 3d fem simulation. *J. Mater. Eng. Perform.*, 19(5), 633-642, 2010.
- [16] Kačmarčík, I., Movrin, D., Ivanišević, A., One contribution to the friction investigation in bulk metal forming. *J. Technol. Plast.*, 36, 35-48, 2011.
- [17] Yao, Z., Mei, D., Shen, H., Chen, Z., A friction evaluation method based on barrel compression test. *Tribol. Lett.*, 51, 3, 525–535, 2013.
- [18] Güneş, T., Halka basma deneyinde pekleşme üstelinin sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerine etkisinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, 2017.
- [19] Bathe, K., *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [20] Kobayashi, S., Oh, S., Altan, T., *Metal Forming and The Finite-Element Method*. Oxford University Press, 1989.
- [21] Callister, W.D., *Fundamentals of materials science and engineering*. John Wiley & Sons, 2001.
- [22] Ak, M., AA206 Alüminyum döküm alaşımında empürite demirin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi, *İTÜ, Yüksek Lisans Tezi*, 2012.
- [23] Başer, T.A., Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı, *Mühendis ve Makine*, cilt 53, sayı 635, s. 51-58, 2012
- [24] Kalpakjian, S., Schmid, S.R., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 5th Edition. Pearson, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali Cihan SARAÇ

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Kocaeli Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	2017
Lise	Atılım Anadolu Lisesi	2013