

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNDE SÜRTÜNME KATSAYISININ  
DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Mak. Müh. Hasan GEDİKLİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"Makina Yüksek Mühendisi"  
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

96791

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11. 01. 2000

Tezin Savunma Tarihi : 11. 02. 2000

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Ü. C. KÜTÜPHANESİ  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

Trabzon 2000

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında yapılmıştır.

Çalışmanın, metallere plastik şekil verme işlemlerinde sürtünme faktörünün incelenmesi ve belirlenmesiyle, bu işlemlerin geliştirilmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla konuyla uğraşan meslektaşlarıma ve sanayide plastik şekil verme üzerine üretim yapan işletmelere yararlı olmasını diler, çalışmalarımı yönlendiren danışmanım sayın Hasan SOFUOĞLU'na teşekkür ederim.

Trabzon, Ocak 2000

Hasan GEDİKLİ



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Metal Şekillendirme İşlemleri .....	1
1.2. Metal Şekillendirme İşlemlerinin Analizi .....	2
1.3. Metal Şekillendirme İşlemlerinde Sürtünme .....	4
1.4. Sürtünme Katsayısının Ölçülmesi .....	7
1.4.1. Sürtünmenin Katsayısının Doğrudan Ölçülmesi .....	7
1.4.2. Teoriyle Olan İlişkiden Elde Edilen Sürtünme Katsayıları .....	8
1.4.3. Şekil Değişimine Bağlı Ölçümler ile Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi....	9
1.5. Metal Şekillendirme İşlemlerinde Yağlama.....	12
1.5.1. Kalın (Tam Akışkan) Film Yağlama .....	13
1.5.2. İnce Film Yağlama.....	14
1.5.3. Karışık Yağlama Rejimi .....	14
1.5.4. Sınır Film Yağlama .....	15
1.6. Çalışmanın Amacı .....	18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	19
2.1. Deneysel Çalışmalar .....	19
2.1.1. Basma Deneyi.....	19
2.1.2. Disk Basma Deneyi .....	21
2.1.3. Açık Kalıp-Geri Ekstrüzyon Deneyi .....	22
2.2. Sayısal Çalışmalar .....	23
2.2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelleme.....	23
2.2.1.1. Modelin Kurulması .....	24

2.2.1.2. Yüklerin Uygulanması ve Çözüm .....	24
2.2.2. Disk Basma Testinin Modellenmesi .....	25
2.2.2.1. FORTRAN Programlama Dili ile Çözüm .....	28
2.2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözüm .....	28
2.2.3. Açık Kalıp-Geri Ekstrüzyon Testinin Modellenmesi .....	29
3. BULGULAR.....	32
3.1. Basma Deneyi Bulguları.....	32
3.2. Disk Basma Testi Bulguları.....	36
3.2.1. Deneysel Bulgular.....	36
3.2.2. FORTRAN Programlama Yöntemi ile Elde Edilen Bulguları .....	39
3.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Bulgular .....	41
3.3. Açık Kalıp-Geri Ekstrüzyon Modeli Bulguları .....	48
3.3.1. Deneysel Bulgular.....	48
3.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Bulgular .....	54
4. İRDELEME .....	61
5. SONUÇLAR .....	73
6. ÖNERİLER .....	74
7. KAYNAKLAR .....	75
8. EKLER.....	78
9. ÖZGEÇMİŞ.....	89

## ÖZET

Bu çalışmanın ilk kısmında, deney malzemesi olarak kullanılan alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemelerinin mekanik özellikleri basma deneyleriyle belirlenmiştir. Daha sonra disk basma testleri, hazırlanan standart boyutlu numunelerle değişik yağlama şartları altında yapılmıştır.

Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinde ise; numune yine iki düz levha kalıp arasında basılmıştır, ancak burada üst kalıbın ortası delik, numune ise içi dolu bir silindir şeklindedir. Numune ve kalıp geometrilerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemek için üç farklı H/D (numune yüksekliği/numune çapı) ve iki farklı d/D (üst kalıp delik çapı/numune çapı) oranlarında üç farklı yağlayıcı kullanılarak sadece alüminyum numune için bu deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci kısmında ise; FORTRAN programlama dili ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek farklı malzemelerin, farklı yağlama şartlarının ve fiçilaşmanın sürtünme kalibrasyon eğrileri üzerine etkileri incelenmiştir. Son olarak; sürtünme katsayısını belirlemek için alternatif bir yöntem olarak geliştirilen açık kalıp-geri ekstrüzyon testi, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve yağlama şartlarının ve kalıp geometrisinin sürtünme kalibrasyon eğrilerine etkileri araştırılmıştır. Bu geometrilerin sürtünme kalibrasyon eğrilerini etkilediği belirlenmiştir.

Bu çalışmalar neticesinde; her malzemenin kendine has sürtünme kalibrasyon eğrilerine sahip olduğu belirlenmiştir. Disk basma testi için yapılan teorik analizler yetersiz kalmaktadır. Sürtünme katsayıları, şekil değişimine bağlı sürtünme katsayıları ölçüm yöntemleriyle, kesin bir şekilde belirlenememektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme Katsayısının Ölçülmesi, Plastik Şekillendirme İşlemleri, Sonlu Elemanlarla Modelleme, Doğrusal Olmayan Çözüm

## **SUMMARY**

### **Experimentally and Numerically Determination of the Coefficient of Friction in Metal Forming Processes**

In the first part of this work, the mechanical properties of aluminium, copper, bronze and brass materials were determined by compression tests. Later, ring compression tests were made with standard sized specimens prepared under different lubricating conditions.

Also, in the open-die backward extrusion test; the specimen is compressed between the two flat plates, but here, the upper die has a hole in the middle and the specimen is in the form of solid cylinder. In order to determine the effects of the geometries of the specimen and die on friction coefficient, for only aluminium specimen using three different lubrication in three different rates of  $H/D$  and in two different rates of  $d/D$ , these experiments were performed.

In the second part of the work, the effects of different materials, different lubrication conditions and barreling on calibration curves were investigated by means of FORTRAN programming language and finite element modeling. Finally, to determine friction coefficient, open-die backward extrusion test which was developed as an alternative method and the effects of lubrication conditions and die geometries on friction calibration curve were investigated. It has determined that these geometries has affected the friction calibration curves.

As a result of this study, each material have its own proper friction calibration curves. Theoric analyses that was done for ring compression test was insufficient. Coefficient of friction could not be determined definitely by coefficient of friction measurement technique which depends on metal forming.

**Key Words:** Measurement of Coefficient of Friction, Metal Forming Processes,  
Finite Element Modeling, Nonlinear Solution

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Kapalı kalıp dövme kullanılarak metal şekillendirmenin şematik gösterimi... 3	3
Şekil 2. Metal şekillendirme işlemlerinde kalıp-iş parçası yüzeyindeki pürüzler ve gerçek temas yüzey alanı ..... 6	6
Şekil 3. Uygulanan yük ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki..... 8	8
Şekil 4. Disk basma deneyinin şematik gösterilişi ..... 10	10
Şekil 5. Sürtünme katsayısı $\mu'$ ye göre sürtünme kalibrasyon eğrileri ..... 10	10
Şekil 6. Sürtünme faktörü $m'$ e göre sürtünme kalibrasyon eğrileri..... 11	11
Şekil 7. Açık kalıp-geri ekstrüzyon deneyinin şematik gösterilişi ..... 12	12
Şekil 8. Tam akışkan film yağlama ..... 13	13
Şekil 9. İnce film yağlama..... 14	14
Şekil 10. Karışık film yağlama..... 15	15
Şekil 11. Sınır film yağlama ..... 15	15
Şekil 12. Döverek şişirme işleminde sıkışmış film oluşması ve ezilmesi ..... 17	17
Şekil 13. Basma deney numuneleri..... 20	20
Şekil 14. Basma deneyinin yapılışı..... 21	21
Şekil 15. Disk basma testi numuneleri..... 21	21
Şekil 16. Açık kalıp-geri ekstrüzyon deney numuneleri ve üst kalıpları ..... 22	22
Şekil 17. Disk basma deneyinin sonlu elemanlar modeli..... 29	29
Şekil 18. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin sonlu elemanlar modeli ..... 31	31
Şekil 19. Pirinç ve bronz numunelerin basma deneyi öncesi ve sonrası görüntüleri... 32	32
Şekil 20. Alüminyum ve bakır numunelerin basma deneyi öncesi ve sonrası görüntüleri ..... 32	32
Şekil 21. Alüminyum malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ..... 34	34
Şekil 22. Bakır malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı..... 34	34
Şekil 23. Bronz malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı.... 35	35
Şekil 24. Pirinç malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı .... 35	35

Şekil 25. a) Deforme olmamış b) Gres yağlı c) İnce yağlı d) Yağsız (pürüzlü kalıp yüzeyli) yağlama şartı altında deforme olmuş alüminyum numuneleri.....	36
Şekil 26. Alüminyum numune için disk basma testi deney bulguları .....	37
Şekil 27. Bakır numune için disk basma testi deney bulguları.....	37
Şekil 28. Bronz numune için disk basma testi deney bulguları.....	38
Şekil 29. Pirinç numune için disk basma testi deney bulguları .....	38
Şekil 30. Standart geometrili diskten, m için elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	40
Şekil 31. Standart geometrili diskten, $\mu$ için elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	41
Şekil 32. a) $\mu=0.0$ ve b) $\mu=0.57$ için alüminyum numunesinin deformasyondan önceki ve sonraki hali .....	42
Şekil 33. Alüminyum malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	43
Şekil 34. Bakır malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri .....	44
Şekil 35. Alüminyum ve bakırın sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	44
Şekil 36. Bronz malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri .....	45
Şekil 37. Pirinç malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	46
Şekil 38. FORTRAN ve sayısal çözümlerden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	46
Şekil 39. Disk basma testi modelinin fiçilaşması .....	47
Şekil 40. Disk basma testinde, $\mu'$ nin fiçilaşmaya etkileri .....	48
Şekil 41. $H/D=0.8$ ve $d/D=0.25$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	49
Şekil 42. a) Deforme olmamış b) Yağsız c) Motor yağlı d) İnce yağlı yağlama şartı altında deforme olmuş açık kalıp-geri ekstrüzyon deney numuneleri..	49
Şekil 43. $H/D=0.8$ ve $d/D=0.42$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	50
Şekil 44. $H/D=1.0$ ve $d/D=0.25$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	51
Şekil 45. $H/D=1.0$ ve $d/D=0.42$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	51



Şekil 46. $H/D=1.2$ ve $d/D=0.25$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	52
Şekil 47. $H/D=1.2$ ve $d/D=0.42$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	53
Şekil 48. Açık kalıp-geri ekstrüzyon test modelinde $H/D=1.0$ , $d/D=0.25$ ve $\mu=0.04$ için deformasyon geometrisi .....	55
Şekil 49. $H/D=0.8$ ve $d/D=0.25$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	56
Şekil 50. $H/D=0.8$ ve $d/D=0.42$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	56
Şekil 51. $H/D=1.0$ ve $d/D=0.25$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	57
Şekil 52. $H/D=1.0$ ve $d/D=0.42$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	58
Şekil 53. $H/D=1.2$ ve $d/D=0.25$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	59
Şekil 54. $H/D=1.2$ ve $d/D=0.42$ için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	59
Şekil 55. Alüminyum için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri .....	62
Şekil 56. Bakır için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri .....	62
Şekil 57. Bronz için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri .....	63
Şekil 58. Pirinç için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	63
Şekil 59. $H/D=0.8$ , $d/D=0.25$ ve $\mu=0$ için numunenin deformasyona uğramış hali....	66
Şekil 60. Numune boyutlarına göre ekstrüzyondaki yükselme miktarının değişimi ...	67
Şekil 61. $H/D=0.8$ , $d/D=0.42$ ve $\mu=0.08$ için numunenin deformasyona uğramış hali .....	67
Şekil 62. $H/D=0.8$ , $d/D=0.25$ ve $\mu=0.08$ için numunenin deformasyona uğramış hali .....	68
Şekil 63. $H/D=0.8$ ve $\mu=0'$ de ekstrüzyon yükselme miktarının $d/D'$ ye göre değişimi.....	68
Şekil 64. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin, $H/D=1.2$ , $d/D=0.42$ ve $\mu=0.0$ için % 30 deformasyona uğramış hali .....	69

Şekil 65. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin, $H/D=1.2$ , $d/D=0.42$ ve $\mu=0.12$ için % 30 deformasyona uğramış hali .....	70
Şekil 66. $H/D=0.8$ ve $d/D=0.25$ için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	71
Şekil 67. $H/D=0.8$ ve $d/D=0.42$ için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	71
Şekil 68. $H/D=1.2$ ve $d/D=0.25$ için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	72
Şekil 69. $H/D=1.2$ ve $d/D=0.42$ için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri.....	72



## **TABLULAR DİZİNİ**

	Sayfa No
Tablo 1. Açık kalıp-geri ekstrüzyon test yönteminden, % 60 deformasyon değeri için, elde edilen deney bulguları.....	53
Tablo 2. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testi için sonlu elemanlar yöntemi bulguları.....	60



## SEMBOLLER DİZİNİ

- $A_0$  : Numunenin ilk kesit alanı.
- $d$  : Açık kalıp-geri ekstrüzyonda üst kalıbın delik çapı.
- $D$  : Silindirik numunenin çapı.
- $e_b$  : Mühendislik şekil değiştirme oranı.
- $F$  : Sürtünme kuvveti.
- $h_0$  : Basma deney numunesinin ilk yüksekliği.
- $h_i$  : Basma deney numunesinin  $i$ . noktasındaki yüksekliği.
- $H$  : Silindirik numunenin yüksekliği.
- $N$  : Normal kuvvet veya yük.
- $P$  : Normal gerilme.
- $P_i$  : Herhangi bir  $i$ . noktasındaki basma yükü.
- $R_0$  : Disk numunesinin başlangıçtaki dış yarıçapı.
- $R_i$  : Disk numunesinin başlangıçtaki iç yarıçapı.
- $R_{i1}$  : Disk numunesinin deformasyondan sonraki iç yarıçapı.
- $R_n$  : Disk numunesinin nötr yarıçapı.
- $T_0$  : Disk numunesinin ilk yüksekliği.
- $T_1$  : Disk numunesinin deformasyondan sonraki yüksekliği.
- $m$  : Ara yüzey sürtünme faktörü.
- $\mu$  : Sürtünme katsayısı.
- $\epsilon_b$  : Gerçek şekil değiştirme oranı.
- $\Delta D_i$  : % deformasyon değeri.
- $\sigma_{g, b}$  : Gerçek basma gerilmesi.
- $\sigma_{m, b}$  : Mühendislik basma gerilmesi.
- $\tau$  : Sürtünme gerilmesi.
- $M\dot{S}\dot{I}$  : Metal şekillendirme işlemleri.

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Metal Şekillendirme İşlemleri

Üretim işlemleriyle, genellikle basit geometrili veya şekilsiz (toz vb) bir malzeme, kullanılabilir bir parça haline dönüştürülür. Bu parça; şekli, boyutu, toleransları, görünümü ve özellikleri tanımlanmış karmaşık bir geometriye sahiptir. Üretim işlemleri basitleştirilmiş hali ile; temel şekillendirme işlemleri (döküm, kalıp döküm ve metal tozunun preslenmesi), metal işleme işlemleri (ısıl işlem ve yüzey sertleştirilmesi), birleştirme işlemleri (kaynak ve lehimleme gibi metalurjik bağ ile birleştirmeler, perçinleme ve cıvata ile birleştirmeler gibi mekaniksel birleştirmeler), metal kesme işlemleri (frezeleme, tornalama ve testere ile kesme) ve MŞİ olarak beş temel kategoriye ayrılabilir (Kienzle, 1956, Lahoti, Altan, 1975).

Metal şekillendirme işlemleri (MŞİ); kesme, haddeme, dövme, derin çekme ve ekstrüzyon gibi beş temel kategoriye ayrılabilir. Bu işlemler, pres veya uygun bir şekillendiricinin bir veya bir kaç hareketi ile olur. MŞİ' nin diğer işlemlere göre avantajları ise şöyle sıralanabilir;

- a) Yüksek ürün hızı sağlar.
- b) Dövülen parçalarda, iyi bir boyut toleransı ve işlem sonu düzgün parça yüzeyi elde edilir.
- c) Malzemenin hemen hemen tamamı kullanıldığı için malzemedan ve enerjiden tasarruf sağlanır.
- d) Deformasyon sertleşmesinden dolayı işlem gören parçanın, ilk haline göre, akma mukavemeti yükselir.

Bu önemli işlem avantajlarından dolayı MŞİ otomobil endüstrisi, ağır şantiye makina parçaları, bisiklet, motosiklet ve tarım makinaları gibi geniş uygulama alanlarında kullanılırlar (Kobayashi vd, 1989).

## 1.2. Metal Şekillendirme İşlemlerinin Analizi

Bir metal şekillendirme işleminde meydana gelen deformasyonlar ile gerilmeler arasındaki ilişkiyi Hooke kanunu gibi basit ilişkilerle açıklamak zordur. Malzeme akışı; kalıp-iş parçası arasındaki sürtünme, ısı oluşumu ve plastik akma boyunca transferi, işlem şartları ve iç yapı arasındaki ilişkileri tahmin etmek ve analiz etmek gerekir. Bununla beraber bir analiz için (Altan vd, 1981) aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır:

a) Parçanın deformasyondan önceki ve sonraki hali arasındaki kinematik (şekiller, hızlar, şekil değiştirme oranları, şekil değişimleri gibi) ilişkiler kurulmalı ve malzeme akışı tahmin edilmelidir.

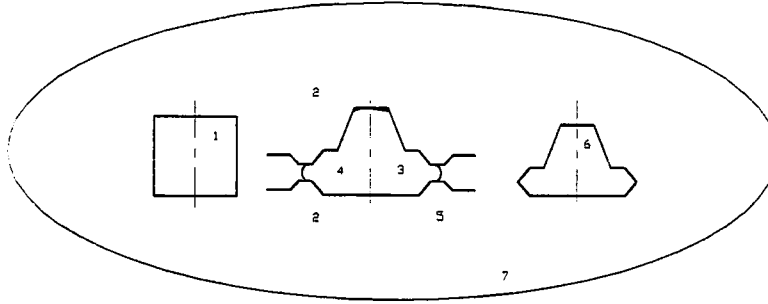
b) Malzemeden, yüzey ve iç kusurları olmaksızın bir parça üretilebilmesi için şekillendirilebilme ve üretilebilme özellikleri tahmin edilmelidir.

c) Şekillendirme operasyonlarının yapılabilmesi için gerekli kuvvetler ve gerilmeler tahmin edilmelidir

Metal şekillendirme işlemleri analizlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için, Şekil 1' de verilen diğer faktörlerin de göz önünde tutulması gerekir. Bunlar; kalıp-iş parçası ara yüzeyindeki sürtünme şartları, kalıp ve iş parçası malzemesi ve geometrisi, plastik deformasyon mekaniği (malzemenin gerilme şekil değiştirme özelliği), kullanılan ekipmanları, ürün özellikleri ve sistemin çevresiyle olan ilişkileri gibi değişkenleri kapsar (Altan vd, 1983).

Metal şekillendirme işlemlerinin analizi için analitik, sayısal ve fiziksel modelleme diye üç temel yöntem mevcuttur. Analitik yöntemlerde iş parçasına; sürtünme şartları, gerekli şekillendirme yükleri, akış bölgesi gibi gerekli bilgileri sağlamak için plastisite kavramları ve denklemleri uygulanır. Ancak denklemlerin analitik çözümündeki zorluklardan dolayı slıpline, potansiyel akış teorisi ve üst ve alt sınır teorisi gibi analitik yöntemler sadece basit geometri ve basit sınır şartları içeren problemlere uygulanabilirler. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, karmaşık geometri ve sınır şartlı proseslerin deformasyonu ve analitik yöntemlerle çözümü zor ve uzun olan karmaşık plastisite denklemlerini çözmek için sayısal yöntemlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bunlardan sonlu elemanlar yöntemi,

uygulanabilirliği ve daha yaklaşık çözümler vermesi açısından en yaygın olarak kullanılanıdır (Kobayashi vd, 1984). Özellikle rijit-plastik deformasyon modeli, elastik etkinin ihmal edildiği veya deformasyonun düzlem şekil değiştirme yada aksenal simetrik kabul edilebildiği MŞİ' nin analizinde, başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Sato, 1984). Diğer taraftan malzemenin elastik davranışını da hesaba katan elastik-plastik sonlu elemanlar formülasyonu da geliştirilmiş ve MŞİ' nde kullanılmaktadır (Rebelo vd, 1988).



1. İş parçası, 2. Kalıplar, 3. Ara yüzey, 4. Deformasyon mekaniği,
5. Şekillendirme makinası, 6. Ürün, 7. Çevre.

Şekil 1. Kapalı kalıp dövme yöntemi kullanılarak metal şekillendirmenin şematik gösterimi (ASM, 1961)

Metal şekillendirme problemlerinin sonlu elemanlar modelini yapmak için iki ana adım vardır. Birincisi, deformasyon mekaniğini ve malzeme davranışını doğru bir şekilde gösterecek matematiksel formülasyondur. İkincisi ise, birbirine temas eden parçalar arasındaki (kalıp ile numune) sürtünme şartları gibi değişken sınır şartlarının modellenebileceği bir algoritmadır. Son yıllarda bu formülasyon ve algoritmalarla birlikte karmaşık geometrili ve sınır şartlı problemleri çözebilen MARC, ABAQUS, ANSYS gibi paket programlar geliştirilmiştir. Paket programların kullanılabilmesi için; güçlü bilgisayarların yanında modellenen deformasyon işlemlerinin mekaniğini bilen ve sonlu elemanlar yöntemine uygulayabilen eğitilmiş elamanlara ihtiyaç vardır.

### 1.3. Metal Şekillendirme İşlemlerinde Sürtünme

Sürtünme olgusunu bilinmesi insanlık tarihi kadar eskidir. O zamanlardan beri sürtünmeyi azaltabilmek için yağlayıcılar kullanılmaktadır.

Leonardo da Vinci (1452-1519) yaptığı çalışmalar sonucunda sürtünme kuvvetinin, kayan kütlelerde normal yük ile ilişkili, kontak alanından bağımsız olduğunu gözlemlemiştir. Amontons (1663-1705), Leonardo' nun tespitini teyit ederek 1699' da ilk sürtünme kanununu tarif etmiş ve malzemelerden bağımsız olarak, sürtünme katsayıları için sabit değerler elde etmiştir (Zum Gahr, 1989). Coulomb, 1785' te statik sürtünme ile kinetik sürtünmeyi birbirinden ayırarak mevcut sürtünme kanunlarını geliştirmiş ve bunlara bir yenisini ilave etmiştir. Bu sürtünme kanunları kısaca şöyle ifade edilebilir:

- a) Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır.
- b) Sürtünme kuvveti kontak alanından bağımsızdır. Çünkü normal gerilme ve sürtünme gerilmesinin aynı kontak alanına etki ettiği kabul edilir. Çoğu metallerde yüzey pürüzlülüğü nedeniyle kontak alanı karmaşık bir yapıya sahiptir.
- c) Kinetik sürtünme kayma hızından ve statik sürtünmeden bağımsızdır.

Metal şekillendirme işlemlerinde, iş parçasını deforme etmek için uygulanan normal kuvvet, kalıp yüzeyinde normal bir gerilme oluşturur. Ayrıca, iş parçasının kalıba göre hareketi sürtünme gerilmesi meydana getirir. Böylelikle, sürtünme kanunları tanımları da kullanılarak, sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau}{P} \quad (1)$$

Sürtünme kanunlarına göre sürtünme kayma gerilmesi ( $\tau$ ), sabit bir sürtünme katsayısı için normal gerilme (P) ile aynı oranda büyür. Ancak bu ilişki, MŞİ' nde geçerli değildir. Sürtünme kayma gerilmesi, kayma akma gerilmesi k' nın değerine ulaştığı zaman, malzeme kalıp yüzeyinde kaymak yerine daha az enerji harcayarak kendi içinde kayma akmasını tercih



eder. Dolayısıyla iş parçası-kalıp ara yüzeyinde rölâtif hareket oluşmaz. Buna yapışma sürtünmesi adı verilir. Bu yapışma sürtünmesi şartı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Schey, 1983):

$$\tau = \mu \cdot p > k \quad (2)$$

Von Mises kriterine göre,  $k = 0.577\sigma_{Ak}$ , Tresca' ya göre  $k = 0.5\sigma_{Ak}$  dır. Burada  $\sigma_{Ak}$  iş parçasının akma gerilmesidir.  $P = \sigma_{Ak}$  ve  $\tau = k$  olduğu zaman sürtünme katsayısı 0.577 (0.5)' i aşamaz. Sürtünme kayma gerilmesi  $\tau$ , kayma akma gerilmesi  $k$  ya eşit olduğu zaman, ara yüzeydeki yapışmadan dolayı basınç artar ve eşitlik (1) den hesaplanan sürtünme katsayısının önemi kalmaz. Sürtünme katsayısı çok yüksek olabilir. Buna karşılık derin çekme ve tel çekme gibi işlemlerde iş parçasına yüksek çekme gerilmesi uygulanırsa, ara yüzey basıncı akma gerilmesi altına düştüğünde,  $\mu$  çok yüksek çıkabilir. Dolayısıyla yapışma sürtünmesinde, sürtünme katsayısı önemsiz olur. Çünkü ara yüzeyde, yüzeylerin birbirine göre kayma hareketi yoktur.

Yapışma sürtünmesini daha iyi açıklayabilmek için ara yüzey sürtünme faktörü  $m$  tanımlanmıştır. Ara yüzey sürtünme faktörü sıfır ile bir arasında değişir ve aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

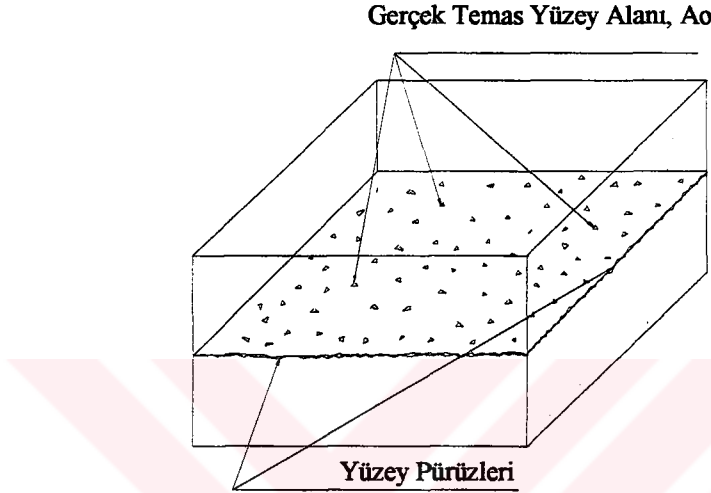
$$m = \frac{\tau}{k} \text{ buradan,}$$

$$\tau = mk = m \frac{\sigma_{Ak}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

elde edilir.

Her bir malzeme için, kayma akma gerilmesi  $k$  bilindiğinden sürtünmenin belirlenmesi için  $m$ ' in kullanılması  $\mu$ ' ye göre daha uygundur, çünkü normal gerilme  $P$ ' nin kendisi  $\mu$ ' ye bağlıdır.

Bowden ve Tabor, adhezyonu ana sebep gösterip, plastisite teorisini de kullanarak modern sürtünme teorisini geliştirmişlerdir (Bowden, Tabor, 1964). Bu teoriye göre sürtünme, gerçek temas alanındaki pürüz tepelerinin yapışması (temas sırasında) ile açığa çıkar. Kontak, temas alanının sadece belli bir kısmında oluşur. Yük böylelikle bir kaç pürüz tarafından taşınır. Yükün taşındığı toplam alana gerçek alan ( $A_o$ ) denir (Şekil 2).



Şekil 2. Metal şekillendirme işlemlerinde kalıp-iş parçası yüzeyindeki pürüzler ve gerçek temas yüzey alanı

Metal şekillendirme işlemlerinde sürtünme, kalıbın-iş parçası arasındaki hareketten dolayı, deforme olan iş parçası ile kalıp arasında oluşur. Bu sürtünmenin sonucunda;

- Toplam deformasyon yükü artar.
- Numunenin, iç yapı ve yüzey özellikleri değişerek yüzey hataları meydana gelir.
- Kalıp malzemesinin kullanılabilir ömrü, aşınmadan dolayı azalır.
- İşlemlerdeki bütün parçalarda boyut değişimleri oluşur.

Bu etkiler; işlemlerin kendisinde ve üretilen parçalarda büyük hasarlar meydana getirirler. Bu nedenle sürtünme, titizlikle incelenip etkilerinin tam belirlenmesi gerekir. Bu durumda sürtünme, bu etkilerin belirlenmesinden sonra, arzu edilen bir iç yapı, geometri ve ürünlerin

ekonomikliği için yeterli derecede kontrol altına alınabilir (Male vd, 1969).

#### 1.4. Sürtünme Katsayısının Ölçülmesi

Sürtünmeyi sayısal olarak karakterize etmenin en kabul edilir yolu, kalıp-iş parçası ara yüzeyinde sürtünme katsayısı tanımlamaktır. Sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ile normal kuvvet arasındaki veya bütün MŞİ'nde olduğu gibi kalıp-iş parçası ara yüzeyindeki teğetsel gerilme  $\tau$  ile normal gerilme  $P$  arasındaki bir orantı olarak (eşitlik 1) kabul edilir ve genellikle  $\mu$  ile gösterilir. Bununla birlikte teğetsel gerilme, metalin kendi kayma akma gerilmesi  $k'$  ya eşit bir değerle sınırlıdır. Burada  $k$ , malzemeden malzemeye değişen bir sabittir. Tam yapışma sürtünme şartı için sürtünme katsayısının maksimum değeri  $k/\sigma_{Ak}$  oranı ile verilir.  $\sigma_{Ak}$ , tek eksenli bir gerilmeye plastik akmaya neden olan en küçük normal gerilme değeridir. Bu  $k/\sigma_{Ak}$  oranı, akma kriteriyle ilişkilidir ve Von Mises kriteri için  $\mu_{mak} = 0.577$ , Tresca kriteri için  $\mu_{mak} = 0.5$ 'dir.

Sürtünme katsayısı, gerçekte yüzeyin büyümesi ve yağ filminin incilmesiyle değişebilir. Çünkü bu etkiler film tabakasını bozabilirler. Ancak deneysel çalışmalar, iyi yağlanmış yüzeylerde bunun ihmal edilebileceğini göstermiştir (Rowe, 1990).

Sürtünme katsayısı değeri ölçümünde, verilen bir yağlama şartı ve yüzey için kullanışlı, genel bir yöntem henüz geliştirilememiştir. Mevcut yöntemler, sürtünme katsayısının yaklaşık değerlerini belirlemek veya belirli işlemlerde kullanılmak için geliştirilmiştir. Ayrıca bu yöntemler için yüzey geometrisi, sıcaklık, hız, deformasyon oranı ve çevre faktörleri olabildiğince gerçek şartlara uygun olmalıdır.

##### 1.4.1. Sürtünme Katsayısının Doğrudan Ölçülmesi

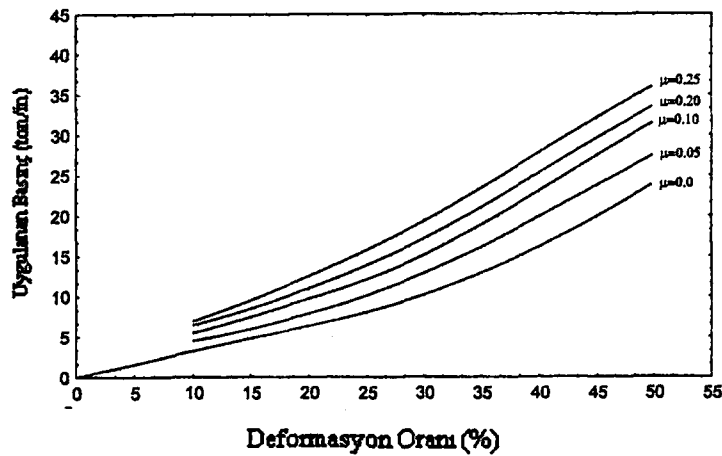
Sürtünme katsayısı değerinin doğrudan ölçülerek belirlenmesi eşitlik (1) yardımıyla yapılır. Bunun için kalıp yüzeyine iki algılayıcı yerleştirilir. Bunlar öyle yerleştirilir ki biri kayma yönünde yer değiştirme ile kayma gerilmesini belirlerken diğeri, normal yöndeki yer değiştirme ile normal gerilmeyi belirler. Böylece elde edilen ölçümler eşitlik (1)'e konularak

sürtünme katsayısı değeri doğrudan belirlenmiş olur. Bu yöntemle daha kesin sonuçlar elde edilmesine karşın tel çekme kalıpları gibi, küçük kalıplara uygulanmalarındaki zorluklar yöntemin dezavantajını oluşturmaktadır.

#### 1.4.2. Teoriyle Olan İlişkiden Elde Edilen Sürtünme Katsayıları

Bu yöntemle sürtünme katsayıları, çalışma yüklerinin ölçülmesi ile belirlenir. İşlem boyunca  $\mu'$  in değeri ölçülen yükler ile karşılaştırılır. Şekil 3' te bu yaklaşım gösterilmektedir. Sürtünme katsayısı artması ile sürtünme kuvveti artar. Çünkü aynı deformasyon değeri için, artan sürtünme katsayısı ile sürtünmeye daha fazla güç harcanır. Böylece sürtünme katsayısının artması ile uygulanan yük de artar. Bu ilişkiden yararlanılarak sürtünme katsayıları belirlenmeye çalışılır.

Teorideki akma gerilmesinin asıl akma gerilmesi olduğu kabul edildiği zaman yükün doğru ölçümünü yapmak kolay olur. Ancak, ısıl işlem ve deformasyon görmüş malzemeler kullanıldığında yapılan ölçümler hatalı olabilirler. Çünkü ısıl işleme ve deformasyon sertleşmesine uğramış malzemenin başlangıçtaki akma değeri yüksektir. Malzemenin akma gerilmesi, şekil değiştirme miktarı ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3. Uygulanan yük ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki

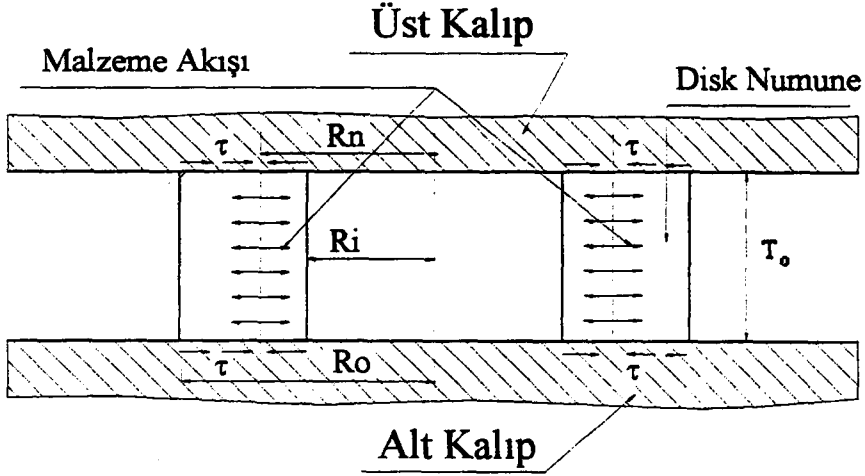
### 1.4.3. Şekil Değişimine Bağlı Ölçümler ile Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Bu yöntemde sürtünme katsayısı, deformasyona uğrayan bir parçadaki şekil değişimi ile sürtünme arasındaki ilişkiden yararlanılarak belirlenir. Yöntemde, malzemenin homojen kaldığı, sıcaklık değişimlerinin önemli olmadığı ve akma gerilmesinin sabit olduğu varsayımları yapılarak ölçümler yapılmaktadır.

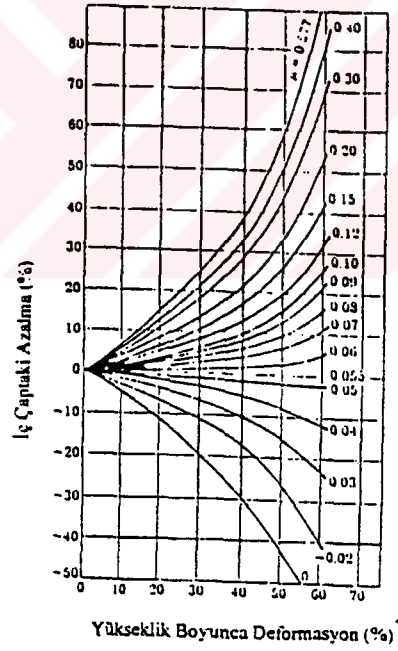
Bu amaçla Hill, uzunluğu genişliğinden 10 kat daha büyük olan bir dikdörtgen şeklindeki bir plaka tasarlamıştı (Hill, 1950). Daha sonra bu plakayı düz yüzeyler arasında basma testine tabii tuttu. Sürtünmenin, iki büyük yönde yayıldığı ve şekil değişimi ile sürtünme katsayıları arasında basit bir ilişki olduğunu ortaya çıkardı. Böylelikle şekil değişimine bağlı ilk ölçümler geliştirilmiştir. Bu test, sürtünme katsayısı yaklaşık 0.05' i aşan değerlerde uygun değerler vermemektedir.

Bundan başka, Kudo ve Kunogi tarafından ortaya atılan (Kudo, 1955 ve Kunogi, 1954) ve Male ve Cockcroft tarafından geliştirilen ve kullanılabilir hale getirilen (Male, Cockcroft, 1964) disk basma testi mevcuttur. Bu yöntemde sürtünme katsayısı değeri, disk numunesinin boyut değişiminden yararlanılarak belirlenir. Şekil 4' te verildiği gibi disk basma testi, iki plaka arasında basma işlemine tabii tutulur ve plastik deformasyona uğratılır. Bu işlemde malzeme; sürtünme yüksekse radyal yönde disk eksenine doğru, küçükse dışa doğru akar. Bu testte; disk numunesinin yükseklik boyunca % deformasyonu için disk numunesinin % iç çap değişimi, kalıp-iş parçası ara yüzeyinde sürtünme katsayısının nicel değerini verir. İşlem boyunca numunenin iç çapı artıyorsa sürtünme düşük, azalıyorsa sürtünme büyüktür. Bu ilişki kullanılarak daha sonra sürtünme kalibrasyon eğrileri olarak adlandırılan eğriler, Male ve Cockcroft tarafından oluşturulmuştur. Sürtünme kalibrasyon eğrileri; ara yüzey sürtünme faktörü veya sürtünme katsayısı değeri için disk yüksekliği boyunca % deformasyonu ile iç çaptaki % azalma arasındaki ilişki olarak tarif edilir.

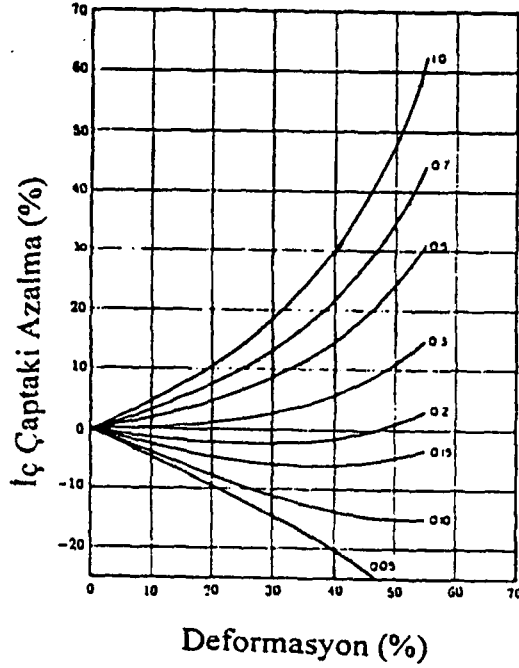
Şekil 5' te, standart geometri disk için (6:3:2) sürtünme katsayısı  $\mu'$  e göre ve Şekil 6' da ara yüzey sürtünme faktörüne  $m'$  e göre elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. Disk basma deneyinin şematik gösterilişi



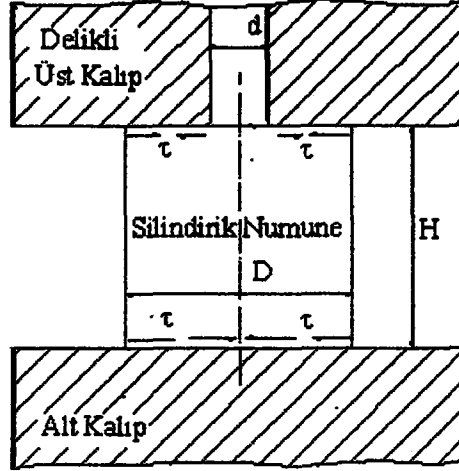
Şekil 5. Sürtünme katsayısı  $\mu$ 'ye göre sürtünme kalibrasyon eğrileri (Male, Cockcroft, 1964)



Şekil 6. Sürtünme faktörü  $m$ ' e göre sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil değişimine bağlı yöntemlerden bir diğeri ise; disk basma testinin tersi olduğu söylenebileceği açık kalıp-geri ekstrüzyon test yöntemidir (Sofuoğlu, 1993). Şekil 7' de gösterildiği gibi sürtünme, silindirik numunenin deformasyonuna göre numunenin delikli üst kalıptan yükselme miktarı ile ilişkilidir ve numunenin % deformasyonu ile delikli üst kalıptan % yükselme miktarı arasındaki fonksiyon sürtünme kalibrasyon eğrilerini vermektedir. Burada, üst kalıp ve numuneler için standart geometrili boyutlar henüz geliştirilememiştir. Disk basma testinde olduğu gibi numune boyutlarına göre benzer karakterler gösterir fakat değişik sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilir.

Şekil değişimine bağlı ölçümler ile sürtünme katsayısının belirlenmesi yönteminin üstünlüğü, numunelere uygulanan basma kuvveti ve malzemelerinin akma değerinin bilinmemesidir. Yöntemin dezavantajı ise; tatmin edici teorik analizlerinin henüz uygulanabilir olmamasıdır. Çünkü mevcut analizlerde numunelerin fiçlaşma etkileri ihmal edilmiştir (Çapan, 1991).



Şekil 7. Açık kalıp-geri ekstrüzyon deneyinin şematik gösterilişi

### 1.5. Metal Şekillendirme İşlemlerinde Yağlama

Metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan yağlayıcıların çoğu sıvıdır. Bu yağlayıcılar, uygun koşullarda, kalıp ile iş parçası arasındaki temas alanlarını birbirinden ayırmaya yarar. Ayrıca sınır temasına da izin verirler (karışık film yağlama). Kalıp-iş parçası ara yüzeyindeki şartlar, yağlayıcının özellikleri (viskozite gibi) tarafından düzenlenirler. Yağlayıcıların ve yüzeylerin kimyasal yapısı ve reaktivitesi önemsizdir (Ersoy, Göksel, 1999).

Metal şekillendirme işlemlerinde normal yönde yüklenmiş elemanlar arasında bir film tabakası oluşması için aşağıdaki tedbirlerden biri alınmalıdır.

a) Kalıp ile iş parçası arasındaki yükü dengelemek için, temas alanına yeterli basınçta bir yağlayıcı gönderilmelidir. Buna hidrostatik yağlama da denilir. Kayma hızı ile sistemin yük taşıma kapasitesi azalır.

b) Yağlayıcı bölgede hareket doğrultusunda daralan bir form oluşturularak basınç ortaya çıkartılabilir. Hareket eden yüzey, yağı aralık içerisine belirli bir hızla çeker. Sıvı sıkıştırılmaz ve kenarlarından da sızdırmaz ise daralan aralık içerisinde dirençle karşılaşır ve uygulanan yükü dengeleyen bir basınç oluşur.

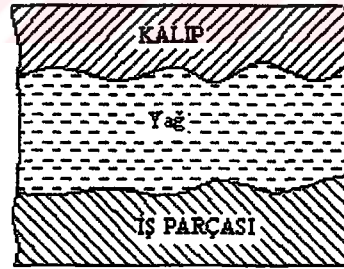
Yağlama ve yüzey pürüzleri arasındaki etkileşimlerin anlaşılması, MŞİ'nde sürtünme



şartlarının geliştirilmesi için önemlidir. Kalıp-iş parçası ara yüzeyinde dört farklı yağlama durumu tanımlanmıştır (Wilson, 1979). Bunlar; kalın film, ince film, karışık film ve sınır yağlama rejimleridir. Kalın, ince ve karışık yağlama rejimlerinde yüklerin hepsi veya bir bölümü yağ filmi tarafından taşınır. Sınır yağlama durumunda ise, yükler sınır filmlerinin kısa parçalar boyunca sürtünmenin olduğu pürüzlü kontak tarafından taşınır. Bu rejimde, Amontons-Coulomb kanunu, yüksek ara yüzey basıncı ve pürüzlerin sertliğindeki değişikliklerden dolayı geçerli değildir.

### 1.5.1. Kalın (Tam Akışkan) Film Yağlama

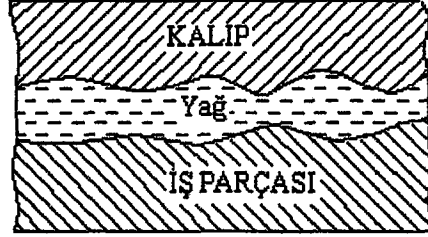
Kalın film yağlama ile kalıp-iş parçası ara yüzeyleri, yüzey pürüzlülüğü etkilerinin giderilebilmesi için yeterince kalın bir film tabakası tarafından birbirinden ayrılırlar. Temas yüzeylerindeki elemanların rijit kaldığı kabul edilir. Oluşan film kalınlığı, yağlayıcının moleküler boyutunun veya yüzeylerin içerdiği pürüzlerin ortalama kare kökünden 10 kat daha büyüktür (Şekil 8). Bu rejimde ortalama sürtünme katsayısı 0.05 ile 0.1 arasında değişir. Yağ, toplu olarak bütün yüzeyleri ayırdığı için kalıp aşınması hemen hemen yoktur.



Şekil 8. Tam akışkan film yağlaması

### 1.5.2. İnce Film Yağlama

Yağlama film tabakasının ortalama kalınlığı, pürüzlerin ortalama kare kökünün üç ile on katı arasında ise bu yağlama rejimine ince film yağlama rejimi adı verilir (Şekil 9).

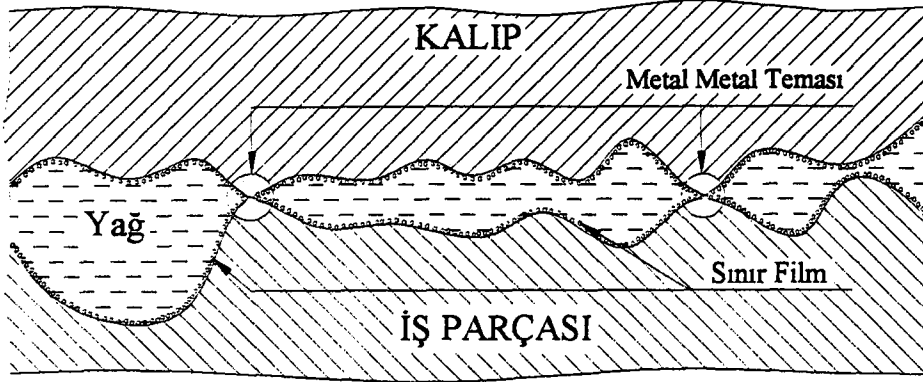


Şekil 9. İnce film yağlama

Bu rejimde, toplam yükün küçük bir miktarı yüzey pürüzleri tarafından taşınır. Deformasyon boyunca iş parçasında, sürtünmeyi etkileyen yüzey pürüzlenmeleri oluşabilir. Burada pürüzler, ya sabit kalır veya kalıp aşınmasında olduğu gibi azalır.

### 1.5.3. Karışık Yağlama Rejimi

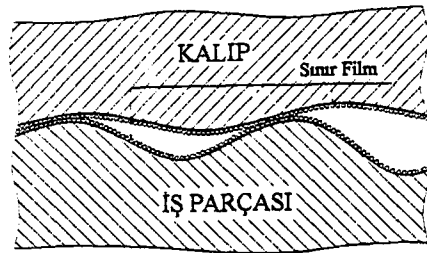
Eğer ortalama film kalınlığı, yüzeylerin içerdiği pürüzlerin ortalama kare kökünün üç katından daha az ise karışık yağlama rejimi oluşur (Şekil 10). Karışık yağlama rejiminde yükün bir bölümü iş parçası yüzeyindeki çukurlara girmiş yağlama film basıncı ile taşınır. Geriye kalan yük pürüzler arasındaki temaslarla taşınır. Yağlayıcıdaki bileşimler sınır yağlama filmleri oluşturabilirler. Böylelikle metal ve sürtünme zararları, soğuk kaynak ve metal-metal teması, en aza indirilir. Oluşan filmler, yağlayıcının molekül boyutundan kalındırlar. Genellikle işlem boyunca iş parçası yüzey pürüzlülüğü azalır. İnce sınır filmlerinin yırtılmasından dolayı iş parçası pürüzleri kalıba kaynak olabilirler. Bu da yüzey kusurlarına sebebiyet verebilir. Sürtünme katsayıları, 0.05 ile 0.4 arasında değişirler.



Şekil 10. Karışık film yağlama

#### 1.5.4. Sınır Film Yağlama

Eğer kalıp-iş parçası ara yüzeyleri arasındaki bütün yükler, temastaki pürüzler tarafından taşıyorsa sistem tam olarak sınır yağlama rejimidir (Şekil 11).



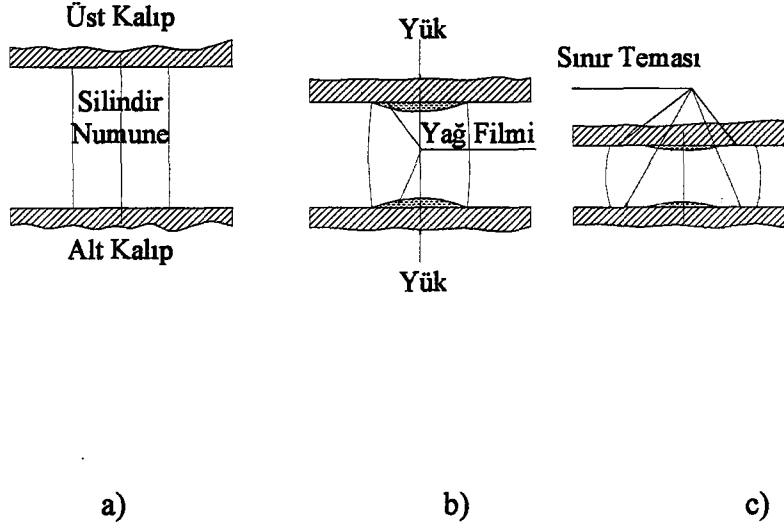
Şekil 11. Sınır film yağlama

Metal teması, kalın yağlama filminin bir veya bir kaç molekül katmanı tarafından sağlanır. Sürtünme katsayıları, 0.1' den (ideal şartlarda) 0.4' e kadar veya sınır filmleri yırtıldığında daha yüksek değerlere çıkabilirler.

Uygulamada yağlayıcılar izoviskoz sıvılar değildirler. Artan basınç ile artan bir viskozite gösterirler. Ayrıca hiç bir malzeme yüzeyinin de rijit olmadığı ve elastik deformasyona uğrayabileceği göz önüne alınmalıdır. Bu durum, elastohidrodinamik yağlama adı altında incelenir. Burada yağlayıcı film kalınlığı ve sürtünme kuvveti, Reynolds denklemi ve piezoviskoz sıvı (basınca bağlı viskozite) için düzgün elastik bir yüzeyin deformasyonuna ait denklemlerin çözülmesi ile hesaplanır. Hatta elastohidrodinamik yağlama; hidrodinamik yağlama ve plastik deformasyon denklemleri de göz önüne alınarak genişletilebilir. Bu duruma plastohidrodinamik yağlama adı verilir (Hutchings, 1992).

Şekil 12' de verilen bir metal şekillendirme işlemi incelenirse; döverek şişirme gibi sabit pozisyonlu olmayan proseslerde normal yönde yaklaşma sonucu sıkışık bir plastohidrodinamik film tabakası oluşur. Şekil 12b' de gösterildiği gibi sıkışmış film tabakası kenarlara doğru inceler. Numunenin elastik deformasyonu yararlıdır. Bu durum normal yöndeki düşük hızlarda yağlayıcının yakalanmasını kolaylaştırır.

Deformasyon ilerledikçe yağlayıcı büyük bir cepte sıkışır ve ideal durumda viskozitesine bakılmaksızın yüzeyin genişlemesine uyar. Gerçek durumda; sıkışmış film tabakası çok daha az büyür ve kalıp ile iş parçası arasında yağlanmamış bir disk oluşturur (Şekil 12c). Yağlayıcının yakalanması ve taşınması yüzeydeki kontrollü bir pürüzlülük tarafından sağlanır. Yağ, deformasyon sırasında yüzeyde ceplerin gelişmesiyle taşınır. Kalıbın sabit yüzeyinde yağlayıcı akışı, hızının kesilmesiyle ve yağlayıcı filminin ısınmasıyla azalır.



Şekil 12. Döverek şişirme işleminde sıkışmış film oluşması ve ezilmesi

Gerçekte sabit bir sürtünme katsayısı, sadece basıncın düşük olduğu şartlar altında gerçekleşebilir. Sınır film rejiminde kalıp aşınması yüksek seviyelerde olur. Yüzey pürüzlülüğü, film bozulmadıkça azalır.

Kalın ve ince yağlama tipleri, kalıp-iş parçası ara yüzeylerinde pürüz teması içermediği için tercih edilir. Böyle durumlarda sürtünme ve kalıp aşınması azalır. Ancak MŞİ'nde genellikle karışık film yağlaması oluşur. Çünkü kalın film yağlama, yüksek yüzey basınçları altında sürekliliğini koruyamaz.

## 1.6. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı; kalıp-iş parçası ara yüzeyinde oluşan sürtünme katsayısını hem sayısal hem de deneysel olarak, disk basma testi ve açık kalıp-geri ekstrüzyon testi teknikleri kullanılarak belirlemektir.

Disk basma testinin analitik çözümü sonucunda verilen denklemler, FORTRAN programlama dili kullanılarak çözdürülerek ve sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilecektir. Ayrıca disk basma testini, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm yapan ANSYS paket programı ile modellemektir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilecek sürtünme kalibrasyon eğrilerini, Male ve Cockcroft tarafından elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileriyle karşılaştırmaktır. Bunların yanında disk basma testi deneyleri, standart geometri alüminyum, bakır, bronz, pirinç numuneleri ve değişik yağlama şartları (gres yağı, motor yağı, ince yağ ve yağlamasız şartlar) altında yapılacaktır. Disk basma testi için sayısal yöntemlerle elde edilecek sürtünme kalibrasyon eğrileri, deneysel sonuçlarla elde edilecek sürtünme kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılarak, bu karşılaştırmada; çeşitli yağlama şartları ile elde edilecek sürtünme kalibrasyon eğrilerinin hangi sürtünme katsayısına tekabül ettiğini belirlemektir.

Açık kalıp-geri ekstrüzyon testi diye adlandırılan bir diğer yöntem geliştirilerek, sürtünme katsayılarının belirlendiği sürtünme kalibrasyon eğrileri elde etmeye çalışılacaktır. Açık kalıp-geri ekstrüzyon test yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değişik sürtünme katsayıları için modellenecektir. Ayrıca açık kalıp-geri ekstrüzyon deneyleri yapılarak, farklı yağlama şartları için yeni sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilecektir. Değişik yağlama şartları altında (yağsız, motor yağı ve ince yağ) elde edilecek sürtünme kalibrasyon eğrileri, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemelerden elde edilecek sürtünme kalibrasyon eğrileri ile karşılaştırılıp, hangi sürtünme katsayısına tekabül ettiğini belirlemektir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneysel Çalışmalar

İlk önce; bu çalışmalarda kullanılacak metal numunelere basma deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda; alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemelerinin yük-uzama diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen bu diyagramlar, bulgular bölümünde 10 ve 11 denklemleri kullanılarak, gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiklerine dönüştürülmüştür. Daha sonra disk basma ve açık kalıp-geri ekstrüzyon deneyleri yapılmıştır. Disk basma deneylerinde, metal şekil verme işlemleri boyunca malzeme ve yağlama çeşitlerinin sürtünmeye etkisi, açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinde ise; yağlama çeşitleri, üst kalıp ve numune geometrisinin sürtünmeye etkisi incelenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmaların her ikisinde de sürtünme kalibrasyon eğrileri, şekil değişimi ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılmıştır.

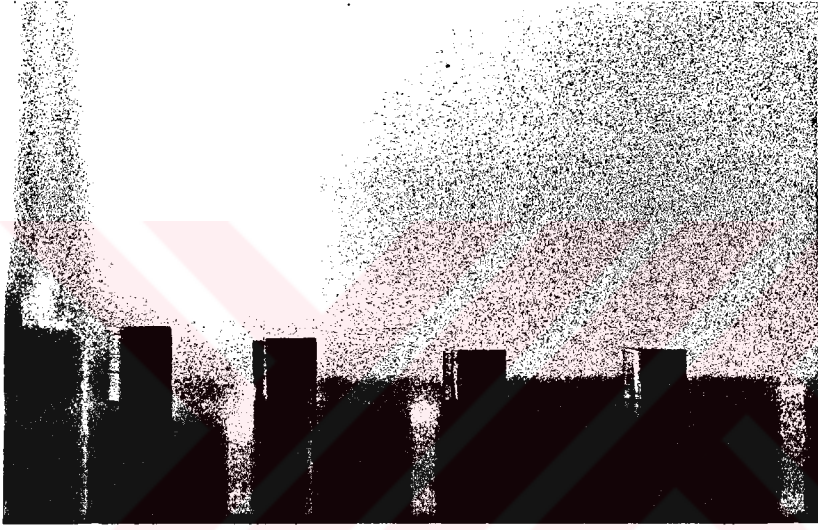
#### 2.1.1. Basma Deneyi

Basma deneyleri, sonlu elemanlar modellemelerinde kullanılacak olan malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde basma deneyinin tercih edilmesinin sebebi ise, disk basma ve açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinin basma işlemine tabii tutulacak olmalarıdır. Böylece basma deneyleri yapılarak (çekme deneyine karşı), mümkün mertebede benzer mekanik davranışlar (elastik ve plastik bölge davranışı) elde edilmeye çalışılmıştır. Bu deneylerde, değişik çap ve uzunlukta alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemeleri kullanılmıştır.

Bu basma deneylerinde, numune çapı ( $d_0$ ) ile yüksekliği ( $h_0$ ) arasındaki ilişki deney sonuçlarını etkileyecek özelliğe sahiptir. Deneylerde  $h_0/d_0$  oranı çok büyük olursa numune, deney sırasında burkulabilir ve gerilmelerin numune üzerinde homojen dağılmasına neden olabilir. Eğer bu oran çok küçük olursa, numune ile basıldığı plakalar arasındaki sürtünme, deney sonuçlarını etkileyecek derecede artabilir. Bu durum göz önünde tutularak numune

boyutları için ASTM standardına uyulmaya çalışılmıştır. Buna göre; pirinç ve bronz gibi yarı gevrek metaller için  $h_0/d_0=0.9$  olan kısa numuneler, alüminyum ve bakır gibi yumuşak metallerde ise  $h_0/d_0>1.5$  olan orta boylu numuneler kullanılmıştır (Kayalı vd, 1990).

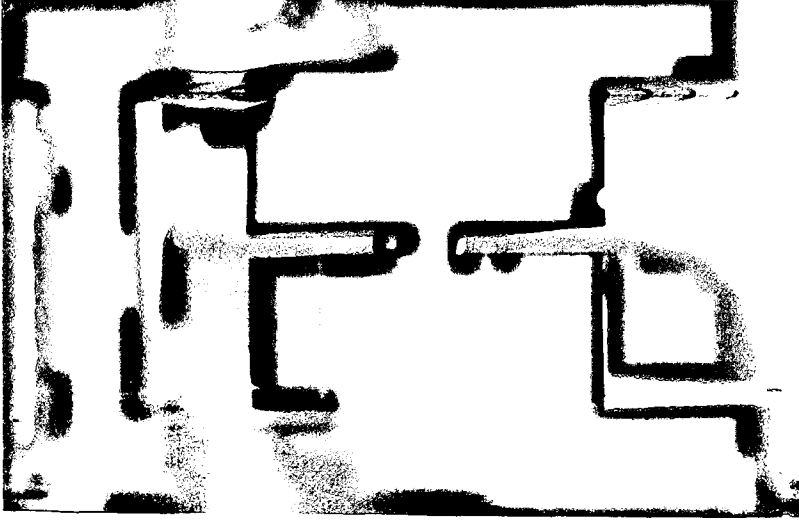
Şekil 13' te görüldüğü gibi, yukarıda verilen boyut sınırlamaları göz önünde tutularak pirinç ve bronz malzemelerinden; çapı  $d_0=10$  mm ve yüksekliği  $h_0=9$  mm ( $h_0/d_0=0.9$ ), alüminyum ve bakır malzemelerinden ise;  $d_0=10$  mm,  $h_0=15$  mm ( $h_0/d_0=1.5$ ) boyutlarında numuneler, torna tezgahında hassas bir şekilde işlenerek hazırlanmıştır.



Şekil 13. Basma deney numuneleri

Hazırlanmış malzemelerden deneyi yapılacak numune, Şekil 14' te gösterildiği gibi Trebel çekme-basma makinasındaki düz plakalar arasına yerleştirilmiştir. Sonra makina, numuneyi deforme edebilecek maksimum yükleme durumuna getirildi. Daha sonra çekme-basma makinası, en düşük sabit basma hızına ayarlanarak tek eksenli basma deneyi gerçekleştirilmiştir.



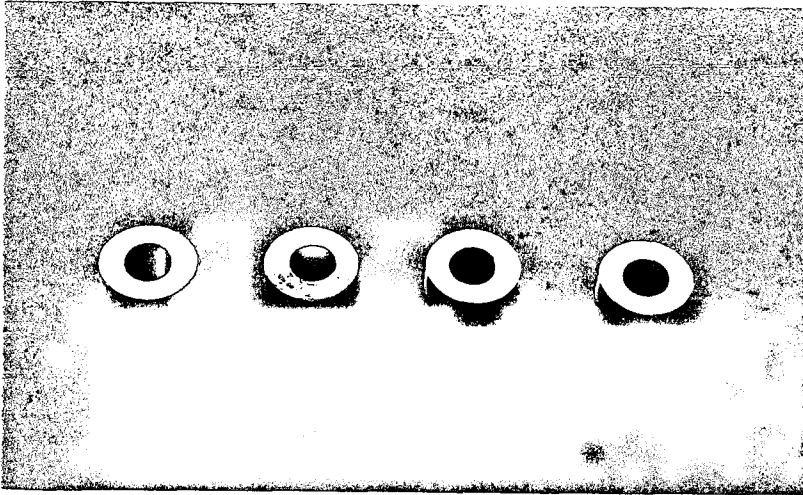


Şekil 14. Basma deneyinin yapılışı

### 2.1.2. Disk Basma Deneyi

Disk basma deneyleriyle sürtünme kalibrasyon eğrileri (sürtünme katsayıları için), değişik yağlama ve malzeme tipleri için belirlenmiştir. Basit bir basma işlemini içeren bu yöntem, disk şeklinde standart boyutlu numuneler (6:3:2) kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 15’ de verilen ve bu deneylerde kullanılan standart boyutlu numunelerin dış çapı 18 mm, iç çapı 9 mm ve yüksekliği 6 mm dır.

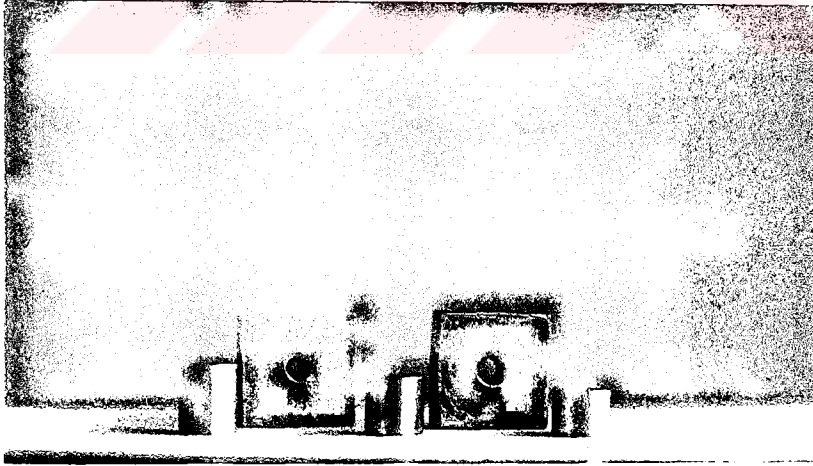


Şekil 15. Disk basma testi numuneleri

Deneyi yapılacak malzeme, numune hazırlandıktan sonra çekme-basma makinasına yerleştirilmiştir. Deneyler, iki kalıp arasında 20 ton' a kadar çıkabilen basma yükü ile oda sıcaklığında ve sabit deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemeler için gres yağlı, motor yağlı, ince yağlı, yağsız (düzgün yüzeyle yağsız ve düzgün olmayan yüzeyle yağsız) kalıp şartları altında deneyler yapılmıştır. Her bir deney için, farklı deformasyon kademelerinde işlem durdurularak ölçümler yapılmış ve numune tekrar başlangıç yağlama şartlarına getirilerek işleme devam edilmiştir. Böylelikle diskin, deformasyona göre iç çapındaki değişim miktarları belirlenmiştir.

### 2.1.3. Açık Kalıp-Geri Ekstrüzyon Deneyi

Açık kalıp-geri ekstrüzyon deneyi ile sürtünme kalibrasyon eğrileri, sabit numune çapında ( $D=12$  mm) değişik yağlama şartları, farklı numune ( $H/D$ ) ve kalıp geometrileri ( $d/D$ ) için elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler alüminyumdan, kalıp ise çelikten yapıp Şekil 16' da gösterildiği gibi üç değişik  $H/D$  (0.8, 1.0 ve 1.2) ve iki değişik  $d/D$  (0.25 ve 0.42) ebatları kullanılarak hazırlanmıştır.



Şekil 16. Açık kalıp-geri ekstrüzyon deney numuneleri ve üst kalıpları

İlk deneye, numune  $H/D=1.0$ , kalıp boyutu  $d/D=0.25$  ve yağsız yağlama şartlarında başlanmıştır. Numune ve kalıplar, eksenlerinin çakışmasına özen gösterilerek makineye yerleştirilmiştir. Numune, oda sıcaklığında ve düşük sabit deformasyon hızında belirli bir deformasyon oranına kadar şekillendirildikten sonra ölçüleri (deformasyon oranı ile ekstrüzyon yükselme miktarı) alınmıştır. Sonra tekrar aynı yağlama şartı sağlanarak deformasyon oranı %60' a kadar işleme devam edilmiştir. Bu işlemler; diğer  $H/D$ ,  $d/D$  ve farklı yağlama şartları için de yapılmıştır. Ölçümler ile numunenin, deformasyonu ile üst delikli kalıptan yüzde yükselme miktarları tespit edilmiştir.

## 2.2. Sayısal Çalışmalar

Bu bölümde, disk basma testi ve açık kalıp geri ekstrüzyon testlerinin, bir sonlu elemanlar paket programı olan ANSYS' de nasıl modelleneceği anlatılacaktır. Ayrıca disk basma testinin teorik analizi ile FORTRAN programlama dilindeki akış diyagramı EK.1' de verilmiştir.

### 2.2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelleme

Bu bölümde, ANSYS sonlu elemanlar programında, lineer olmayan statik bir analizin yapılış adımları ANSYS kullanıcı kılavuzundan (ANSYS, 1992) yararlanılarak anlatılmıştır. Burada incelenen problemlerin hepsi eksenel simetrik olup deforme olan numuneler için PLANE 82 (8-noktalı lineer olmayan kuadratik) eleman kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle teması modellemek için ara yüzey elemanları (kontak elemanları) kullanılır ve numunenin PLANE 82 elemanı ile temasa girebilecek dış yüzeylere atanır. TARGET 169 ise numunenin kalıpla olan temasında, kalıbı modellemek için kullanılan, iki boyutlu rijit temas elemanıdır. Bu elemanlar rijit-esnek temas davranışını modellerler. Kontakta eleman rijitlik matrisinin oluşması için gerekli parametreler; sürtünmeyi karakterize eden Coulomb sürtünme modeli  $\tau_{max}$  değeri ( $\sigma_0/\sqrt{3}$  değeri) "Real Constant" bölümüne, sürtünme katsayısı  $\mu$  ise, "Material Properties" opsiyonu kullanılarak programa girilmiştir.

Modelde, çizgi şeklindeki TARGET 169 elemanını oluşturan noktalara, disk numunesinin %60 deformasyonunu sağlayacak bir yer değiştirme verilmiştir. Buradaki bütün çözümler statik olarak yapılmıştır.

Lineer olmayan statik analiz, statik analizin özel bir formudur. Bu analiz, herhangi bir statik analizde olduğu gibi üç ana adımdan oluşur:

1. Modelin kurulması
2. Yükleme ve çözüm
3. Sonuçlar

#### **2.2.1.1. Modelin Kurulması**

Öncelikle problemin geometrisi oluşturulur. Daha sonra programa malzeme özellikleri: elastisite modülü  $E$ , poisson oranı  $\nu$ , yoğunluk  $\rho$ , sürtünme katsayısı  $\mu$  ve malzemenin plastik deformasyonunda nasıl davranacağını modelleyen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme değerleri girilir.

#### **2.2.1.2. Yüklerin Uygulanması ve Çözüm**

Bu adımda analiz tipi ve opsiyonları, uygulanan yükler, özel yük adım opsiyonları kullanılarak çözüm yapılır. Bir lineer olmayan çözümde daima, yükleme adımları ve iterasyonlar gerekir. Bu adımlar:

- a) SOLU, komutunun uygulanması ile çözüme girilir.
- b) STATIC analiz ve onun opsiyonları ekrandan tıklanmak suretiyle seçilir. Bu analiz tipi ve opsiyonları ilk yükleme adımından sonra değiştirilemez.
- c) Modele yükler uygulanır.
- d) Yükleme adım opsiyonları belirlenir. Bir lineer olmayan statik analizdeki bu opsiyonlar:

Genel Opsiyonlar: TIME komutu ile bazı gerçek fiziksel verilere dayanılarak, yükleme adımı sonundaki zaman girilir. NSUBST veya DELTIME komutları kullanılarak yükleme adımları alt bölümlere veya alt zaman adımlarına bölünür. KBC komutu ile uygulanan yük tipi seçilir. Uygulanan yük zamanla artış eğiliminde ise “Ramp”, zamanla yük değişmiyorsa “stepped” opsiyonları açılır.

Lineer Olmayan Opsiyonlar: CNVTOL; program, yakınsama kriteri tamamlanıncaya kadar denklem iterasyonlarını yapmaya devam edecektir. Bu komut ile yakınsama tipi seçilir. Yapılan plastik deformasyonda yakınsama kriteri yer değiştirmeye göredir ve gerektiğinde (yakınsama olmadığı zaman) değiştirilebilir. Burada yakınsama kontrolü i. ve (i-1). iterasyon arasındaki fark üzerine,  $\Delta U = U_i - U_{i-1}$ , yapılır. Daha sık yakınsama kriteri kullanılarak sonuçların doğruluğu artırılabilir. NEQIT ile denklem iterasyonlarının maksimum sayısı belirlenir. PRED, lineer olmayan bir problemde bu özellik kullanılırsa yakınsama hızlanır.

Sonuç Kontrolü: Hesaplanan verilerin ne kadar sıklıkla saklanacağı veya hangi adım da saklama yapılacağı belirlenir.

SAVE komutu ile verilen bir isim dosyasına saklama yapılır. SOLVE komutu ile çözüm yapılır. FINISH komutu ile çözümden çıkılır.

Lineer olmayan statik bir analizde sonuçlar; yer değiştirmeleri, gerilmeleri, şekil değiştirmeleri ve reaksiyon kuvvetlerini kapsar. Bu sonuçlara, POST 1’ de zaman bağımsız, POST 26’ da ise zaman bağımlı olarak ulaşılabilir. Bu komut (POST 26) ile lineer olmayan bir yapının yük–zaman grafiği çizdirilebilir.

### 2.2.2. Disk Basma Testinin Modellenmesi

Disk basma testinin ilk teorik analizleri; Avitzur tarafından üst sınır teorisi kullanılarak (Avitzur, 1968) ve Hawkyard ve Johnson tarafından gerilme analizi yöntemi kullanılarak (Hawkyard, Johnson, 1967) yapılmıştır. Her iki çözüm de aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır:

a) Silindirik elemanların şekil değişimi üniformdur. Yani numunede fiçilaşma oluşmaz.

b) Disk malzemesi, Von Mises gerilme şekil değiştirme kanunlarına uyar. Numunede; deformasyon sertleşmesi, elastik deformasyon ve hacimsel değişme oluşmaz.

c) Sabit ara yüzey sürtünme faktörü  $m'$  nin var olduğu ve bunun ara yüzey kayma gerilmesiyle ilişkili olduğu varsayılır. Burada  $\sigma_{Ak}$ , disk malzemesinin akma gerilmesi olup,  $m'$  nin sabit olduğu kabulü,  $\tau'$  yu da sabit yapar (Van Rooyen vd, 1966, Peterson vd, 1966 ve Kasuga vd, 1967).

Basma deneyine maruz kalan bir disk numunesinin, her iki yöntemle yapılan analiz sonuçlarında bir  $R_n$  nötr yarıçap belirlenmiştir. Bu nötr yarıçapın pozisyonu, diskin iç yarıçap değişimi ve ara yüzeydeki sürtünmeyle doğrudan ilişkilidir. Teorik sonuçlar,  $R_n$ ' e bağlı olarak aşağıdaki gibidir:

1. Eğer  $R_n < R_i$  ise;

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

$$x = \left\{ \frac{R_o}{R_i} \exp\left[-\frac{mR_o}{T} \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right)\right] \right\}^2 \quad (5)$$

Denklem (4),  $R_n$ ,  $R_i$  ile sıfır arasında değerler aldığı ve

$$\frac{mR_o}{T} \leq \frac{1}{2 \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right)} \ln \left[ \frac{3 \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^2}{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_o}{R_i}\right)^4}} \right] \quad (6)$$

olduğunda geçerlidir.

2. Eğer  $R_i \leq R_n \leq R_o$  ise;

$$\frac{mR_o}{T} = \frac{1}{2 \left( 1 + \frac{R_i}{R_o} - 2 \frac{R_n}{R_o} \right)} \ln \left[ \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3 \left( \frac{R_i}{R_o} \right)^4 \left( \frac{R_o}{R_n} \right)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3 \left( \frac{R_o}{R_n} \right)^4}} \right] \quad (7)$$

veya aşağıdaki gibi yaklaşık bir formülle de  $R_n$ 'e bağlı olarak verilebilir;

$$\frac{R_n}{R_o} \approx \frac{2\sqrt{3} \left( \frac{mR_o}{T} \right)}{\left( \frac{R_o}{R_i} \right)^2 - 1} \left\{ \sqrt{1 + \frac{\left( 1 + \frac{R_i}{R_o} \right) \left[ \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^2 - 1 \right]}{2\sqrt{3} \left( \frac{mR_o}{T} \right)}} - 1 \right\} \quad (8)$$

Denklem (8),  $R_n$ ,  $\frac{R_o + R_i}{2}$  ile  $R_i$  arasında değerler aldığı ve

$$\frac{mR_o}{T} > \frac{1}{2 \left( 1 - \frac{R_i}{R_o} \right)} \cdot \ln \left[ \frac{3 \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^2}{1 + \sqrt{1 + 3 \left( \frac{R_o}{R_i} \right)^4}} \right] \quad (9)$$

olduğunda geçerlidir.

Bu denklemlerde, akma gerilmesi  $\sigma_{Ak}$ , ve ara yüzey kayma gerilmesi  $\tau$ , görülmemekte ve bu değerler,  $m'$  nin bir oranı gibi denklemlerde yer almıştır. Bu  $m$  değerleri, deformasyon miktarı ve belirli bir malzeme için sabit kabul edilmiştir. Eğer analiz küçük artışlarla yapılırsa bu kabul doğrudur, yani  $\sigma_{Ak}$  ve  $\tau$  bu küçük artışlar için sabit kabul edilebilir.

### 2.2.2.1. FORTRAN Programlama Dili ile Çözüm

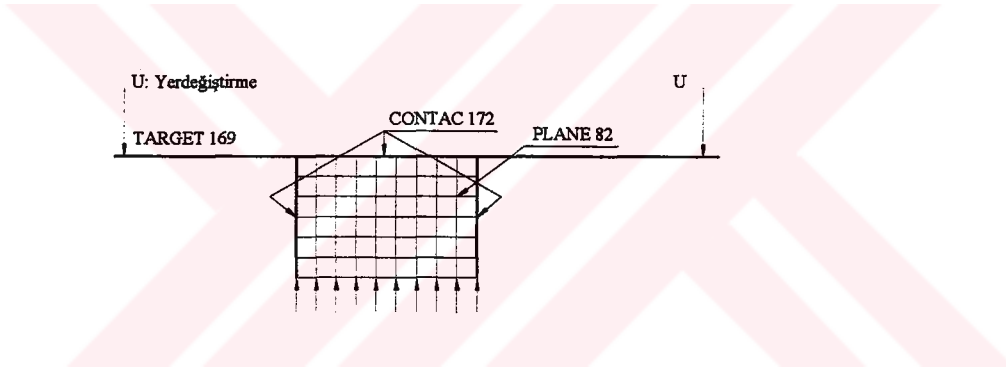
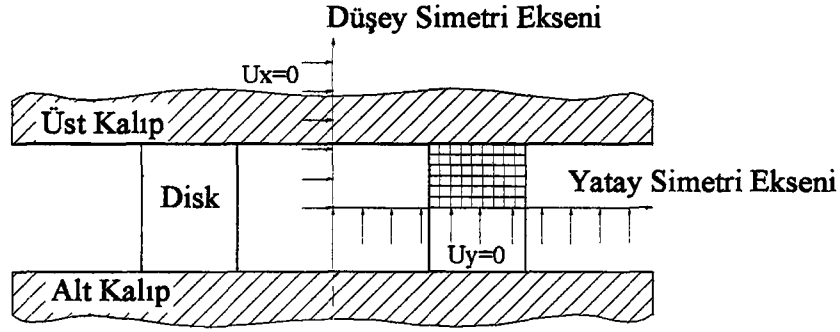
Bu bölümde, yukarıda disk basma testinin deformasyonu ile ilgili verilen denklemler, standart boyutlardaki (6:3:2) bir disk numuneye uygulanmış ve denklemlerin çözümleri FORTRAN programlama dili yardımıyla yapılmıştır (EK.1). Bu çözümlerin sonucunda her deformasyon oranına karşılık gelen diskin iç çap değişimleri belirlenmiştir. Bu değişimler farklı  $m$ ' ler ( $m=0\sim 1$ ) için yapılarak sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler STATISTICA grafik programı yardımıyla çizilmiştir. Burada; dış çapı 18 mm, iç çapı 9 mm ve yüksekliği 6 mm olan standart geometrili disk kullanılmıştır.

### 2.2.2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Çözüm

Bu modellemeler ile sürtünme kalibrasyon eğrileri, belirli sürtünme katsayılarında, alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemelerinden yapılan disk modellemeleri için çizdirilmiştir. Model, dış çapı 18 mm, iç çapı 9 mm ve yüksekliği 6 mm olan standart geometrili bir disk numunesidir.

Problem aksenal simetrik olduğundan dolayı, Şekil 17' de görüldüğü gibi numunenin dörtte birinde, 54 adet 8-noktalı PLANE 82 kuadratik eleman kullanılmış ve üzerine, 21 adet 3-noktalı CONTAC 172 elemanı kullanılarak modellenmiştir. Kalıbı modellemek için ise, çizgi şeklinde rijit bir yüzey olan bir adet TARGET 169 kontak elemanı kullanılmıştır. Daha sonra her bir değişik malzeme için kendine has malzeme özellikleri, sabitler ve gerekli yüklemeler girilerek çözüm yapılmıştır. EK.2' de bronz malzemesi için yapılan bir çözümün input dosyası yer almaktadır.





Şekil 17. Disk basma deneyinin sonlu elemanlar modeli

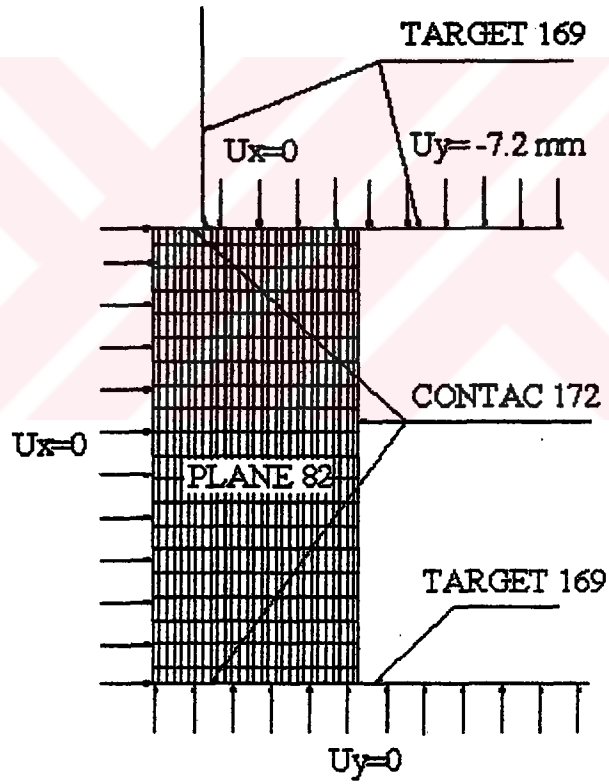
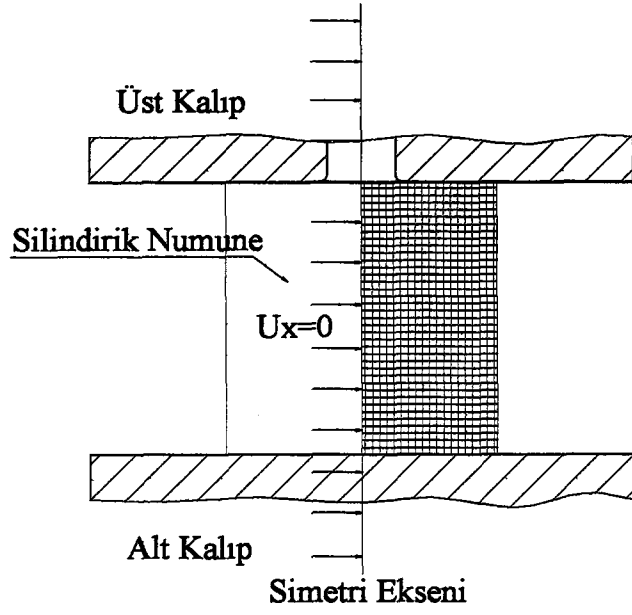
### 2.2.3. Açık Kalıp-Geri Ekstrüzyon Testinin Modellenmesi

Bu bölümde açık kalıp-geri ekstrüzyon testi, ekstrüzyon yükselme miktarı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi belirlemek için numune çapı sabit ( $D=12$  mm) üç farklı numune ( $H/D=0.8$ ,  $1.0$  ve  $1.2$ ) ve bunların her biri için iki farklı üst kalıp geometrisi ( $d/D=0.25$  ve  $0.42$ ) kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS paket programında modellenmiştir. Modellemelerde,  $H/D=0.8$  için yüksekliği  $9.44$  mm çapı  $12$  mm,  $H/D=1.0$  için yüksekliği  $12$  mm çapı  $12$  mm ve  $H/D=1.2$  için yüksekliği  $14.4$  mm çapı  $12$  mm olan üç farklı silindirik

numuneler kullanılmıştır. Ayrıca üst kalıp için; delik çapı 3 mm (üst delik çapı / numune çapı;  $d/D=0.25$ ) ve 5 mm (üst delik çapı / numune çapı;  $d/D=0.42$ ) olan kalıplar kullanılmıştır.

Şekil 18' de görüldüğü gibi numunenin yarısı, aksenal simetrik olarak modellenmiştir. Her bir numune için, 600 adet (30 x 20) PLANE 82 (8-noktalı liner olmayan kuadratik) elemanı kullanılmıştır. Bunun üzerine 70 adet 3-noktalı CONTAC 172 elemanı (dış yüzey üzerine) atanmıştır. Kalıp için ise çizgi formunda TARGET 169 elemanı kullanılmıştır. Daha önce analiz için verilen işlemler diğer H/D ve d/D oranları için de tekrarlanarak modellemeler yapılmıştır. Sürtünme katsayısı  $\mu=0.3$  ve boyutları;  $H/D=1.0$  ve  $d/D=0.25$  olan bir modellemenin input dosyası EK.3' te verilmiştir.





Şekil 18. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin sonlu elemanlar modeli

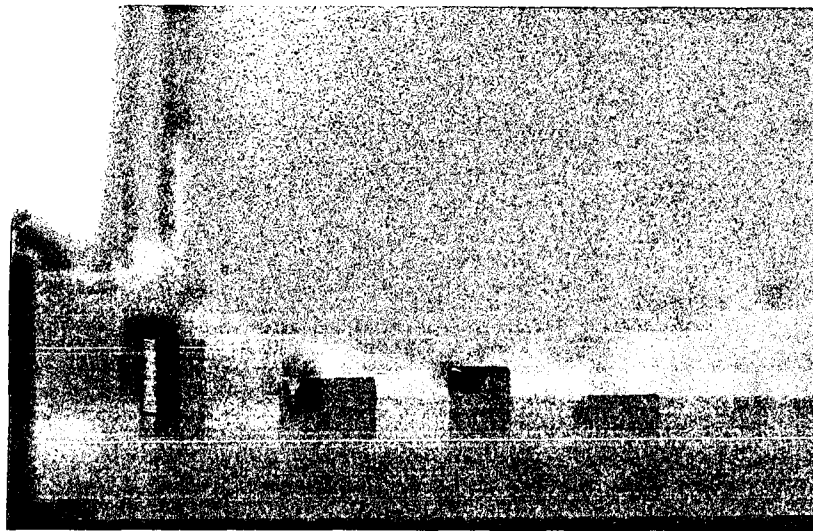
### 3. BULGULAR

#### 3.1. Basma Deneyi Bulguları

Yapılan basma deneylerinde; Şekil 19' da gösterildiği gibi pirinç ve bronz malzemelerinden yapılan numunelerin kırıldığı, Şekil 20' deki alüminyum ve bakır malzemeli numunelerin bombeleşerek deforme olduğu görülmüştür.



Şekil 19. Pirinç ve bronz numunelerin basma deneyi öncesi ve sonrası görüntüleri



Şekil 20. Alüminyum ve bakır numunelerin basma deneyi öncesi ve sonrası görüntüleri

Alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemeleri için çekme-basma makinasından elde edilen yük-uzama diyagramı aşağıdaki bağıntılar kullanılarak (10 ve 11), gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme değerlerine dönüştürülmüştür.

Gerçek gerilme,

$$\sigma_{g,b} = \sigma_{m,b} (1 + e_b) \text{ veya,}$$

$$\sigma_{g,b} = \frac{P_i}{A_0} \left( 1 + \frac{h_i - h_0}{h_0} \right) \quad (10)$$

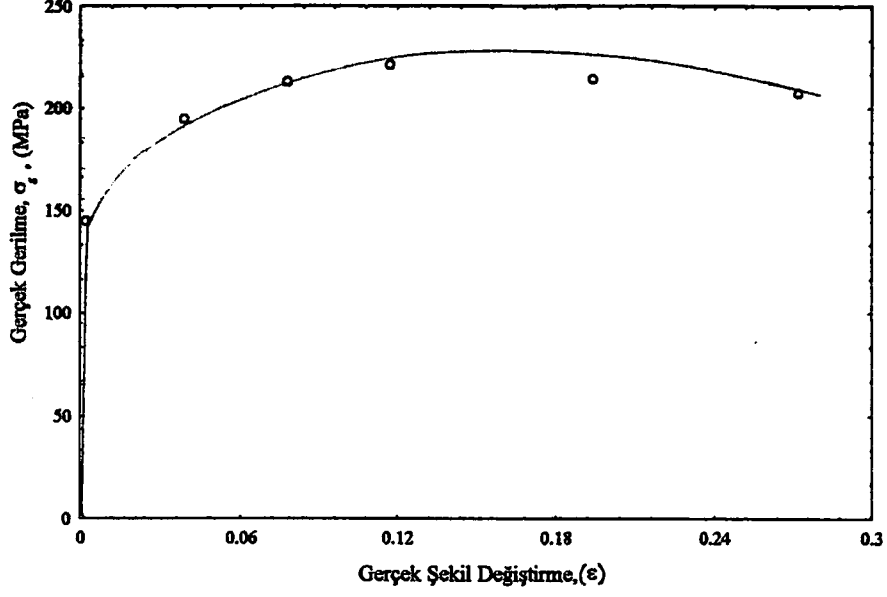
(10) denklemleri bulunur. Gerçek şekil değiştirme ise,

$$\varepsilon_b = \ln(1 + e_b) \text{ veya,}$$

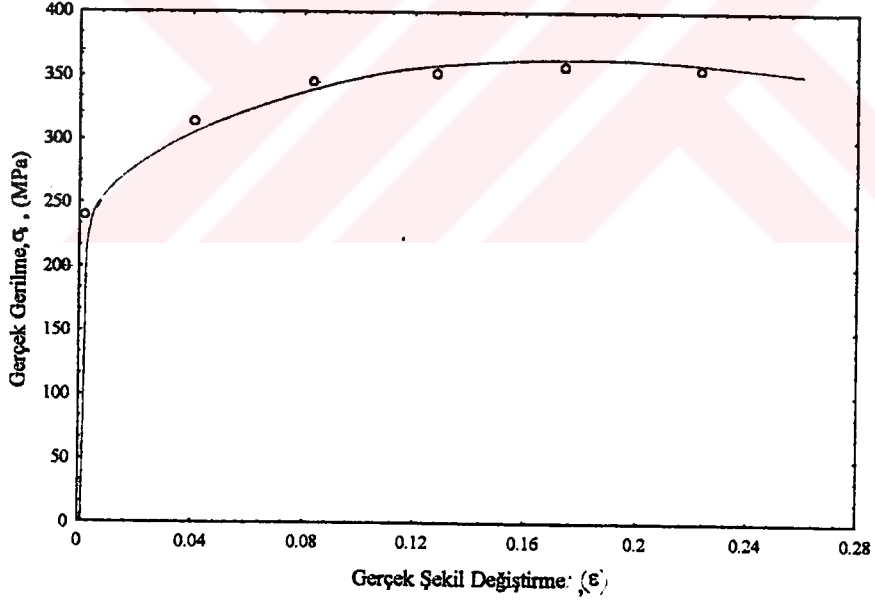
$$\varepsilon_b = \ln \left( 1 + \frac{h_i - h_0}{h_0} \right) \quad (11)$$

(11) denklemleri hesaplanır.

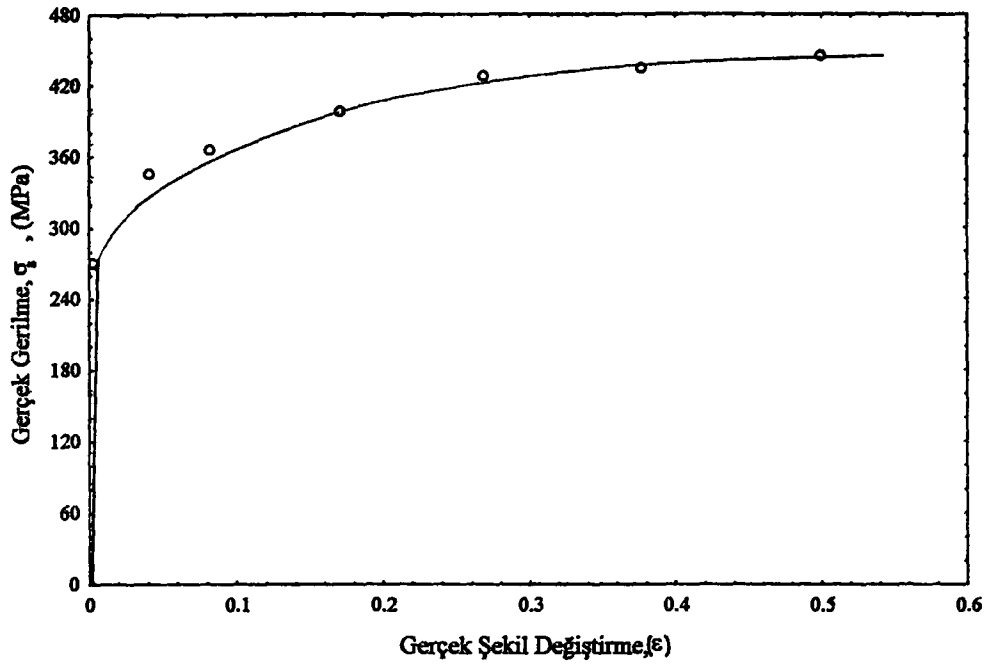
Yukarıdaki bağıntılardan elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme verileri STATISTICA paket programı kullanılarak, alüminyum için Şekil 21, bakır için Şekil 22, bronz için Şekil 23 ve pirinç için Şekil 24' te görüldüğü gibi grafik halinde çizdirilmiştir. Alüminyum ve bakır numuneleri için elde edilen grafiklerde, şekil değiştirme oranının artması ile gerilme değerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.



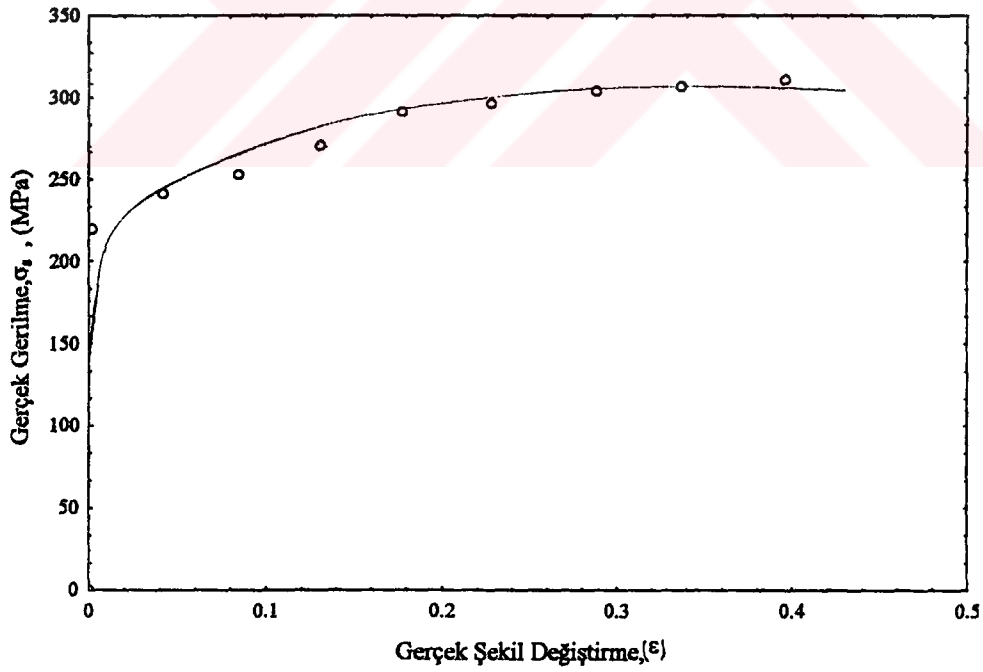
Şekil 21. Alüminyum malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı



Şekil 22. Bakır malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı



Şekil 23. Bronz malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı

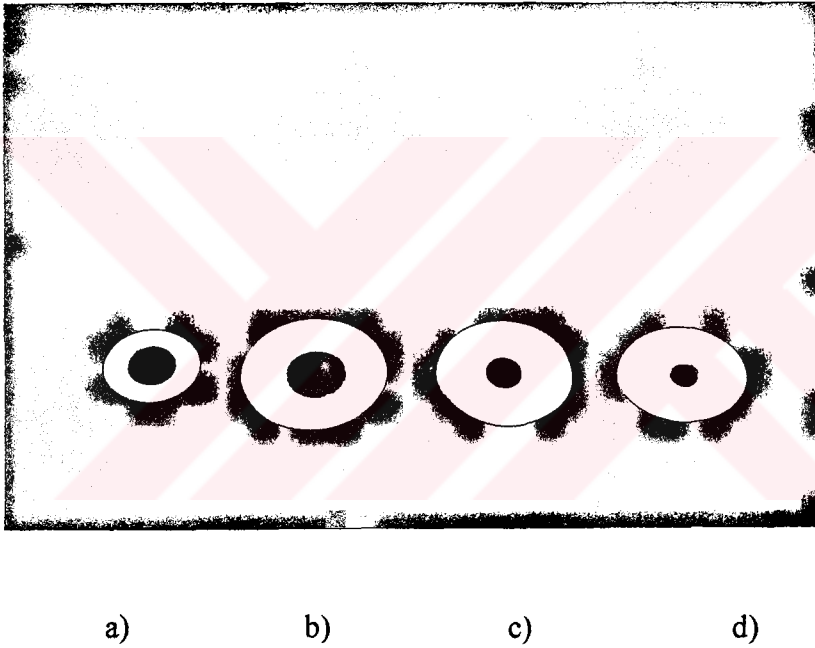


Şekil 24. Pirinç malzemesi için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı

### 3.2. Disk Basma Testi Bulguları

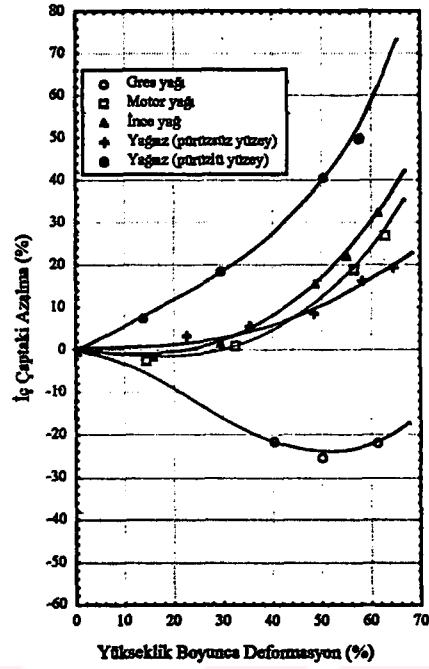
#### 3.2.1. Deneysel Bulgular

Disk basma testi deneyleri, farklı yağlama şartları ve farklı malzemeler kullanılarak yapılmış ve Şekil 25' te gösterilmiştir. Elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri; alüminyum için Şekil 26' da, bakır için Şekil 27' de, bronz için Şekil 28' de ve pirinç için Şekil 29' da verilmiştir.

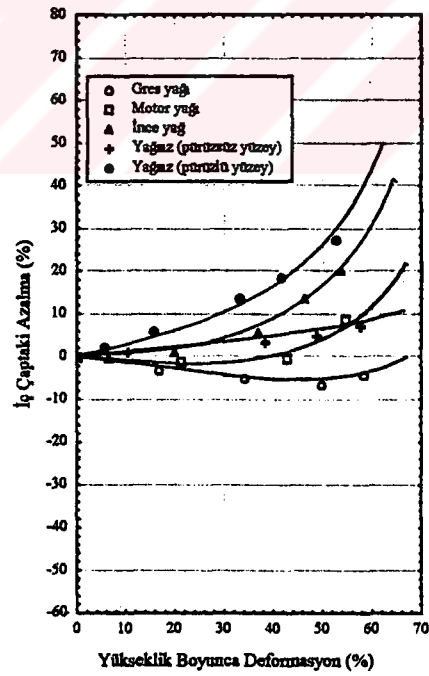


Şekil 25. a) Deforme olmamış b) Gres yağlı c) İnce yağlı d) Yağsız (pürüzlü kalıp yüzeyli) yağlama şartı altında deforme olmuş alüminyum numuneleri

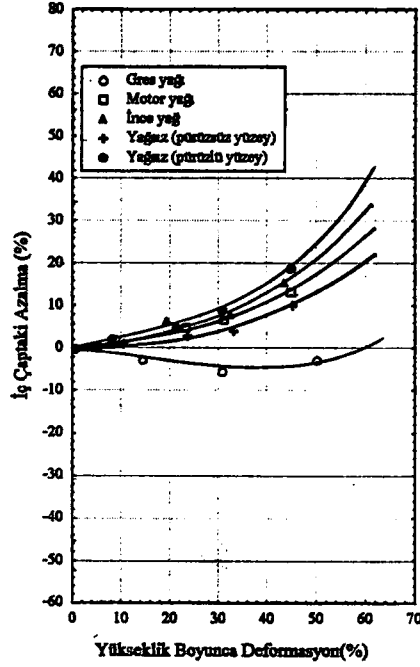




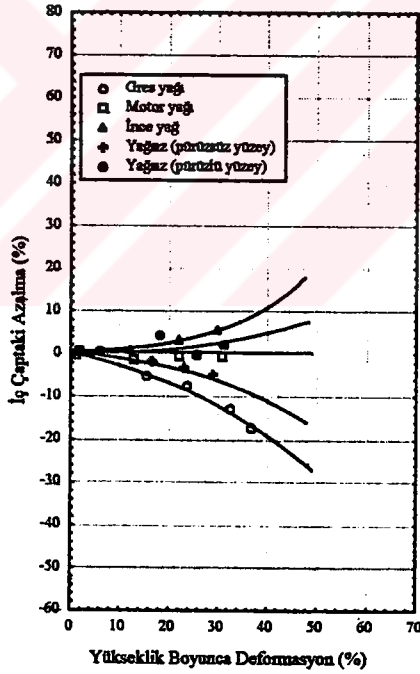
Şekil 26. Alüminyum numune için disk basma testi deney bulguları



Şekil 27. Bakır numune için disk basma testi deney bulguları



Şekil 28. Bronz numune için disk basma testi deney bulguları



Şekil 29. Pirinç numune için disk basma testi deney bulguları

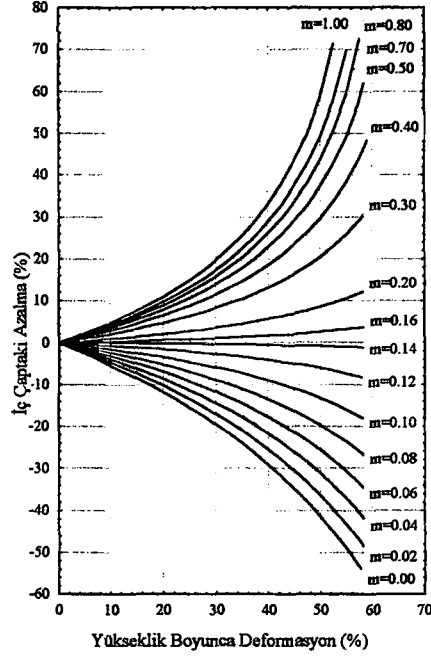
Bu grafiklerden; hangi malzeme kullanılırsa kullanılsın, kalıp-iş parçası ara yüzeyindeki yağlama çeşidine göre sürtünme katsayısının büyükten küçüğe doğru sırasıyla; yağsız

(düzgün yüzeyli kalıp), ince yağlı, motor yağlı ve gres yağlı şartlarda elde edildiği görülmüştür. Kaba yüzeyli üst kalıp ile yapılan deneylerde, pirinçten yapılan numune hariç, alüminyum, bakır ve bronz kullanılarak elde edilen sürtünme katsayıları en yüksek değerleri vermiştir. Alüminyum ve bakır numuneleri kullanılarak elde edilen sürtünme katsayısı değerleri yağsız-pürüzsüz yüzeyli üst kalıp ile yapılan deneylerde; kaba yüzeyli şartlarda elde edilen değerlerden düşük çıkmıştır. Ayrıca bronz ve pirinç malzemesi kullanılarak elde edilen sürtünme katsayıları ise motor yağı kullanılarak elde edilen sürtünme katsayılarından dahi düşük çıkmıştır. Disk numunelerin iç çapındaki azalış ve artış, alüminyum ve bakır için gres yağlı ve motor yağlı şartlarda, bronz için sadece gres yağlı şartlarda gerçekleşmiştir. Pirinç numunesinin gres yağlı yağlama şartı altında, iç çap azalmasının daima azaldığı (maksimum deformasyon % 40), motor yağlı yağlama şartında ise iç çapta hemen hemen bir değişme olmadığı görülmüştür.

### 3.2.2. FORTRAN Programlama Yöntemiyle Elde Edilen Bulgular

Disk basma testi analitik sonuçları, FORTRAN programlama dilinde değerlendirilerek (EK.1) elde edilen sürtünme kalibrasyon verileri STATISTICA paket programı yardımıyla, Şekil 30' da ara yüzey sürtünme faktörü  $m'$  e göre, Şekil 31' de ise sürtünme katsayısı  $\mu'$  ye göre çizdirilmiştir. Burada, sürtünme katsayısı  $\mu$  ile ara yüzey sürtünme faktörü  $m$  arasındaki bağıntıların (Male, Cockcroft, 1964) aşağıdaki şekilde olduğu kabul edilmiştir.

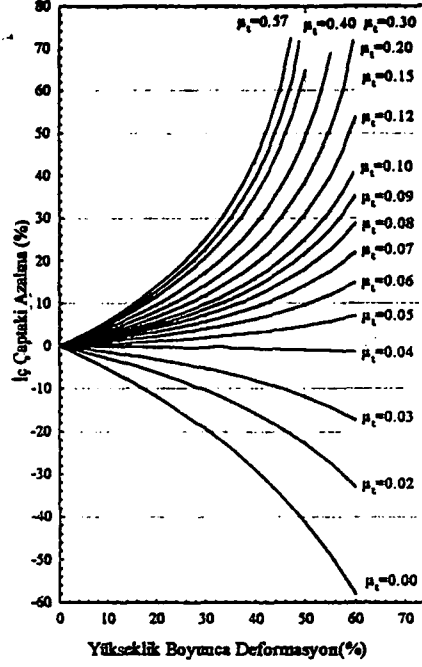
$$\mu = \frac{m}{2\sqrt{3}} \quad (12)$$



Şekil 30. Standart geometrili diskten,  $m$  için elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 30' da;  $m=0$ ' dan  $m=0.14$ ' e kadar disk numunesinin yükseklik boyunca yüzde deformasyonuna göre iç çapındaki yüzde azalmanın, doğrusal olmayan bir şekilde, negatif olarak azaldığı görülmektedir. Değerin negatif olması, disk iç çapının büyüdüğünü gösterir. Belirli bir ara yüzey sürtünme faktörü  $m$  değerinde, deformasyon oranı ne olursa olsun iç çaptaki azalmanın sıfır olacağı görülebilir ( $m=0.14$  ve  $m=0.15$  arasında). Yani iç çap azalması deformasyona göre sabit kalır. Bu  $m$  değerinden sonra,  $m=1.0$ 'a kadar, deformasyon oranına göre diskin iç çapındaki azalmanın arttığı (değerler pozitif) görülmektedir. Değerlerin pozitif olması, numunenin iç çapının küçüldüğünü gösterir.

Şekil 31' de, denklem 12' de verildiği gibi sürtünme katsayısı  $\mu$  ile ara yüzey sürtünme faktörü  $m$  arasında doğru bir orantı olduğu kabul edilmiştir. Bu grafikte  $\mu=0.0$ ' dan  $\mu=0.04$ ' e kadar deformasyonun artmasıyla diskin iç çapındaki azalmanın negatif olduğu, bu değerden sonra pozitif olarak arttığı görülmüştür.

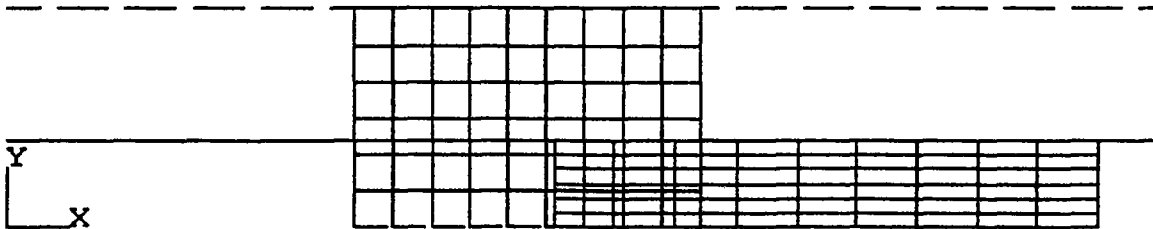


Şekil 31. Standart geometrili diskten,  $\mu$  için elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

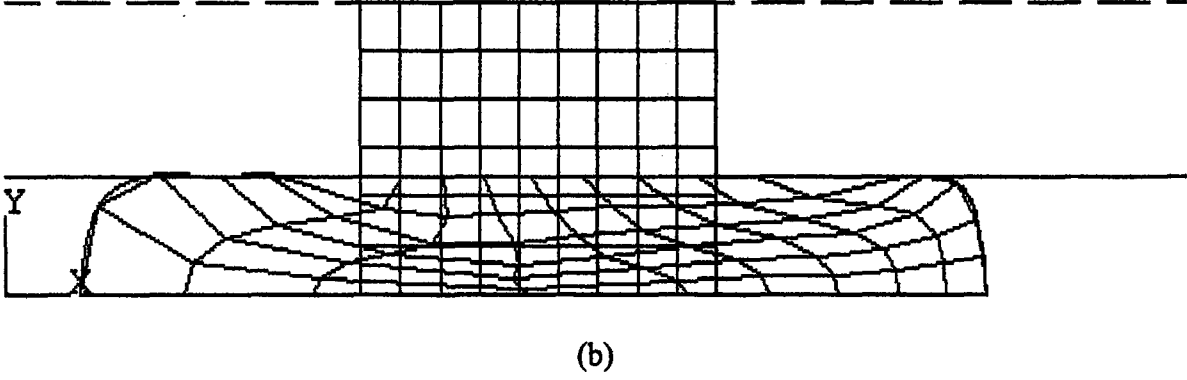
### 3.2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak alüminyum, bakır, bronz ve pirinç malzemelerine ait sürtünme kalibrasyon eğrileri verileri elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler, STATISTICA grafik programı yardımıyla grafik haline dönüştürülmüştür.

Şekil 32a ve b' de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak alüminyum numunelerin iki farklı  $\mu$  için deformasyonları gösterilmiştir. Diğer malzemeler için yapılan modellemelerde de benzer deformasyon şekilleri elde edilmiştir.



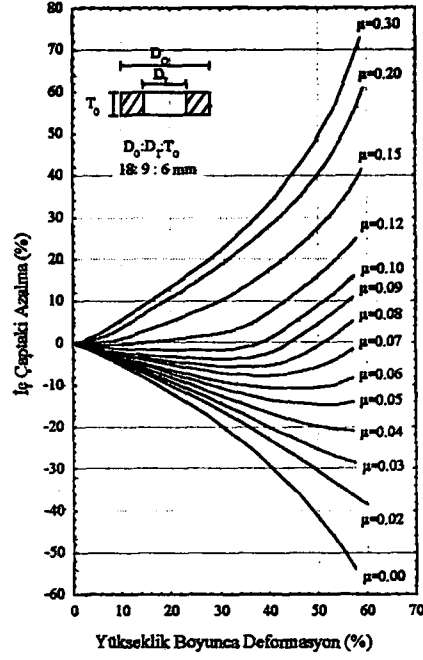
(a)



Şekil 32. a)  $\mu=0.0$  ve b)  $\mu=0.57$  için alüminyum numunesinin deformasyondan önceki ve sonraki hali

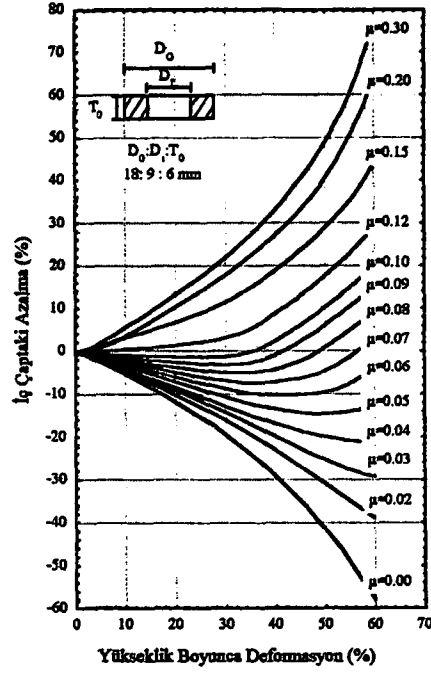
Sürtünme kalibrasyon eğrileri ve deformasyona uğramış numuneler, alüminyum malzemesi için Şekil 33, bakır için Şekil 34, bronz için Şekil 36 ve pirinç için Şekil 37' de gösterilmiştir. Bu grafiklerde eğrilerin birbirine benzer çıktığı görülmüştür.

Şekil 33' teki alüminyum numune için elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrilerinde iç çaptaki azalma,  $\mu=0.0$  dan  $\mu=0.04$ ' e kadar bütün deformasyon oranları boyunca azalış şeklinde olmakta, yani iç çap sürekli olarak büyümektedir. İç çaptaki bu azalma  $\mu=0.05$  den  $\mu=0.10$ ' e kadar olan değerler için önce azalış şeklinde ve sonra artış şeklinde olmakta; yani iç çap küçülmektedir. Bu azalış–artış geçiş noktasının karşılık geldiği deformasyon oranının her bir sürtünme katsayısı için ( $\mu=0.05$  den  $\mu=0.10$ ' e kadar) farklı deformasyon oranlarında oluşmuştur. Örnek olarak, sürtünme katsayısı  $\mu=0.05$  için bu oran  $\sim\%54$  iken,  $\mu=0.10$  için  $\sim\%30$  dir. Sürtünme katsayısı  $\mu=0.10$  dan sonra bu özelliğin (geçiş noktasının) kalktığı ve bundan sonra artan sürtünme katsayılarında, deformasyona göre iç çaptaki azalmanın sürekli olarak arttığı, yani iç çapın devamlı olarak küçüldüğü görülmüştür.

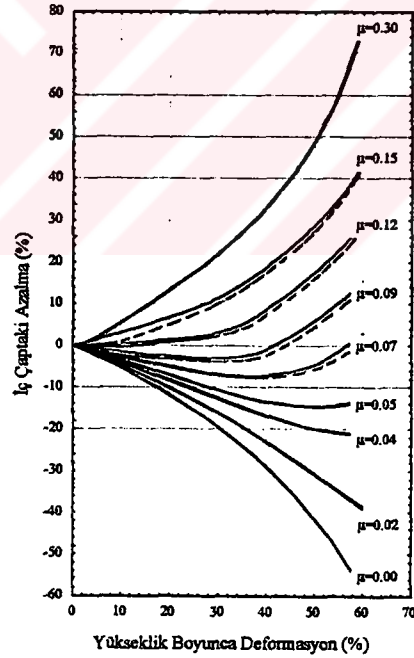


Şekil 33. Alüminyum malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 34' te bakır malzemesi için verilen sürtünme kalibrasyon eğrilerinin, sürtünme katsayısı  $\mu=0.05$  değerine kadar alüminyum malzemesi ile aynı değerleri verdiği, bu sürtünme katsayısı değerinden sonra elde edilen değerlerin, grafiklerde, alüminyum malzemesi değerlerinden biraz yukarıda olduğu görülmüştür (Şekil 35). Burada, bakır malzemesi sürekli çizgilerle alüminyum malzemesi ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 34. Bakır malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri

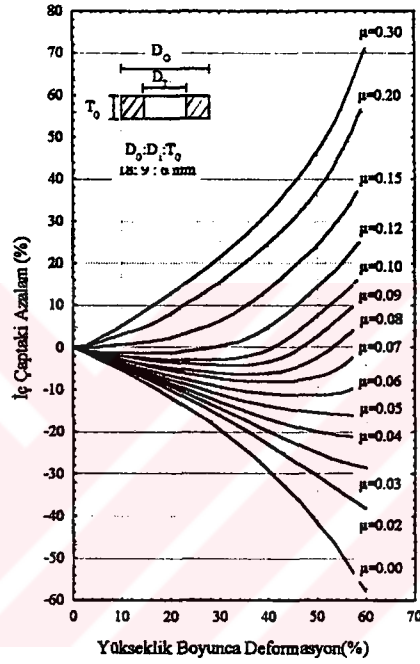


Şekil 35. Alüminyum ile bakırın sürtünme kalibrasyon eğrileri

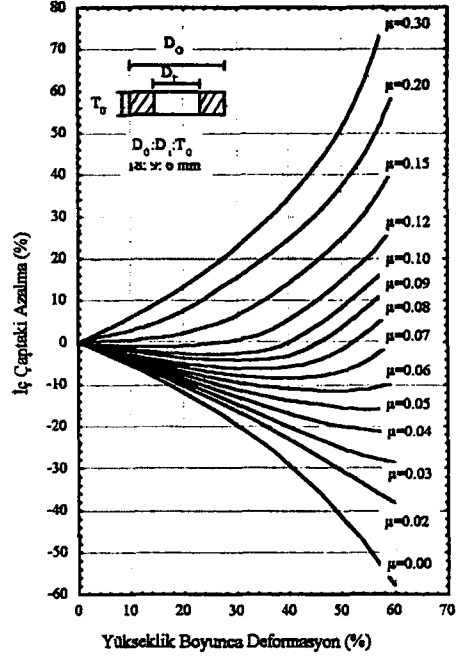
Bronz (Şekil 36) ve pirinç (Şekil 37) malzemeleri ile elde edilen değerler, sürtünme katsayısı  $\mu=0.04$  değerine kadar, alüminyum malzemesi ile elde edilen değerler ile aynı çıkmıştır. Bu sürtünme katsayısından sonra elde edilen değerler, alüminyumun değerlerine



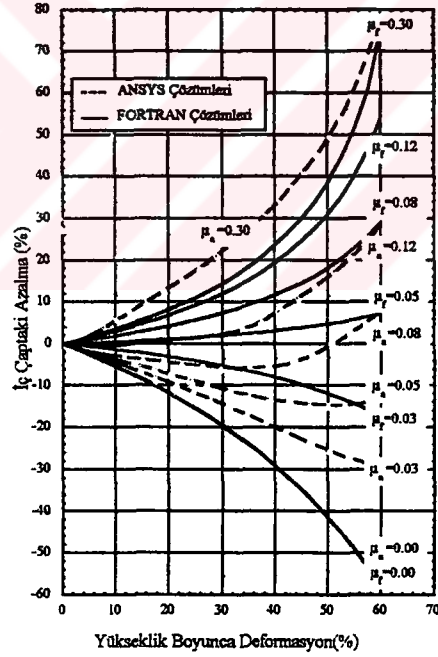
göre düşüktür. Azalış-artış geçiş noktası bronz ve pirinç malzemeleri için sürtünme katsayısı  $\mu=0.06$ ' dan sonra başlamaktadır. Ancak Şekil 38' de görüldüğü gibi, Male ve Cockcroft tarafından FORTRAN programlama dili kullanılarak elde edilen (bu çalışmada da yapılan) sürtünme kalibrasyon eğrileri ile sayısal çözümler arasında farklar vardır. Alüminyum numunesi için ANSYS çözümleri kesikli çizgilerle, FORTRAN çözümleri ise sürekli çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 36. Bronz malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 37. Pirinç malzemesi için sürtünme kalibrasyon eğrileri

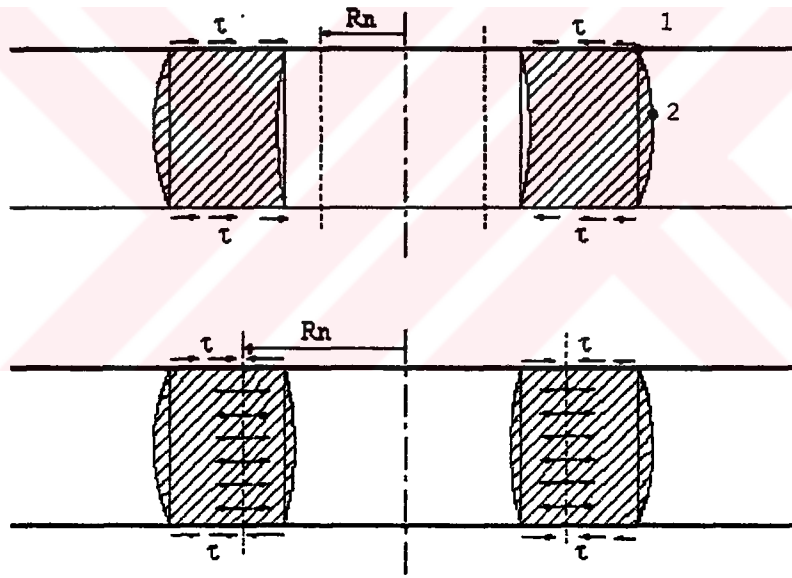


Şekil 38. FORTRAN ve sayısal çözümlerden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

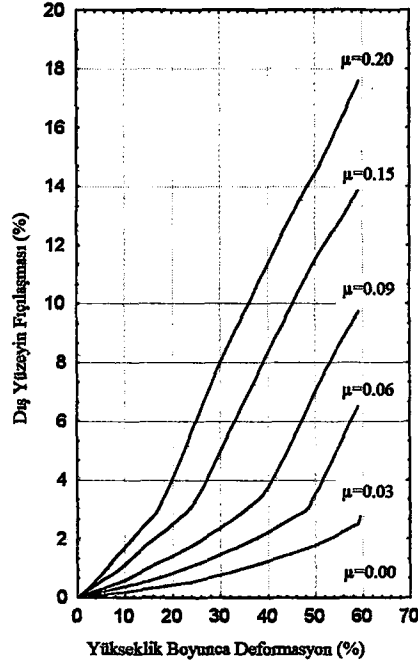
Ayrıca disk basma testi modellemelerinde fiçlaşma etkileri de incelenmiştir. Şekil 39' da verildiği gibi, kalıp-iş parçası arasındaki sürtünme etkilerinden dolayı diskin deforme olan serbest yüzeylerinde malzeme akışı yönünde bombeleşmeler veya fiçlaşmalar oluşur. Bu

fiçilaşmalar, disk üzerinde uniform olmayan gerilme ve şekil değişimlerine neden olurlar. Teorik çözümlerde, diskin orta kısmındaki çap azalmaları uç noktadaki çap azalmalarına göre daha doğru sonuçlar verirler (Hawkyard vd, 1967).

Fiçilaşma etkileri, Şekil 39' da verildiği gibi numunenin en üst sağ noktası (1) ve orta kısmındaki uç noktası (2) referans noktaları alınmıştır. Bu noktalar arasındaki fark (dış çapın bir yüzdesi gibi), yükseklik boyunca deformasyonun bir fonksiyonu şeklinde çizdirilmiştir. Şekil 40' ta gösterildiği gibi fiçilaşma davranışı, alüminyum malzemeli modellerden yapılan çözümler kullanılarak sürtünme katsayısı ve deformasyon oranına göre verilmiştir. Bu grafikten; sürtünme katsayısı  $\mu=0.0$  için fiçilaşma oluşmamıştır. Ancak artan (sıfırdan farklı diğer sürtünme katsayılarında) sürtünme katsayısı ve deformasyon oranları için oluştuğu ve gittikçe arttığı görülmüştür.



Şekil 39. Disk basma testi modelinin fiçilaşması



Şekil 40. Disk basma testinde,  $\mu$ 'nin fiçlaşmaya etkileri

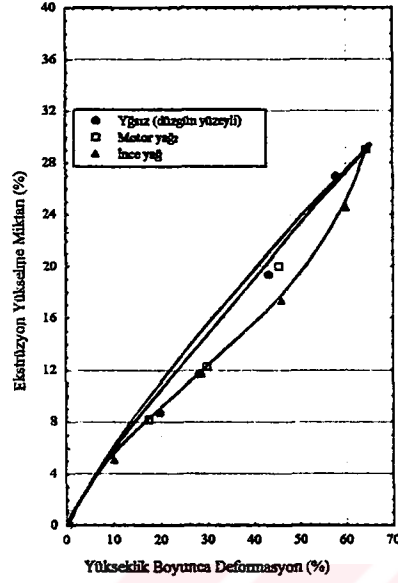
### 3.3. Açık Kalıp-Geri Ekstrüzyon Modeli Bulguları

#### 3.3.1. Deneysel Bulgular

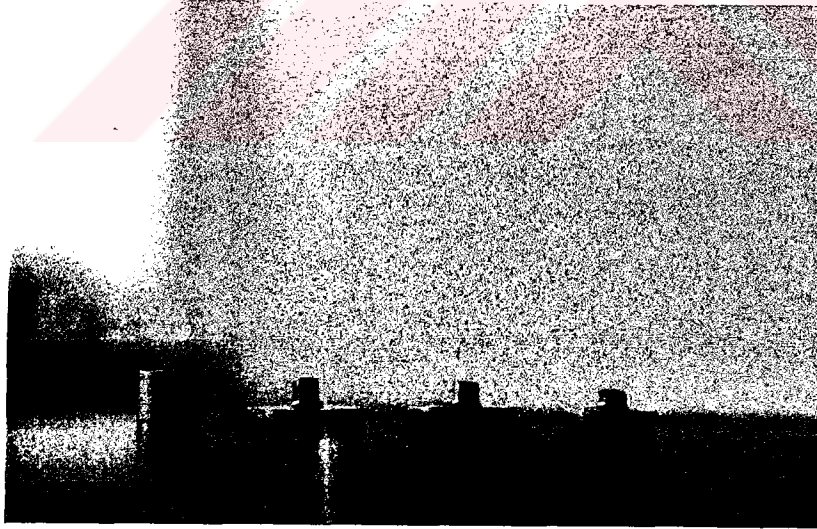
Deneysel;  $H/D=0.8$ ,  $1.0$  ve  $1.2$ ;  $d/D=0.25$  ve  $0.42$  ebatlarında ( $D$  sabit olup:  $12$  mm) alüminyum numune ve çelik kalıplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda; numunenin yükseklik boyunca yüzde deformasyonuna göre model malzemesinin delikli üst kalıptan yüzde yükselme miktarları belirlenmiştir. Böylelikle her bir  $d/D$  ve  $H/D$  boyutları için sürtünme kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir.

Şekil 41' de verilen  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.25$  durumu için deformasyona göre ekstrüzyondaki artış miktarı büyükten küçüğe doğru sırasıyla; yağsız (düzgün yüzeyli kalıp), motor yağı ve ince yağlı yağlama şartlarında elde edilmiştir. Şekil 42' de verilen  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.42$  için deney numuneleri ve Şekil 43' te verilen deney bulgularında, bir önceki çap oranına ( $d/D=0.25$ ) göre motor yağı kullanılarak elde edilen ekstrüzyon yükselme miktarı (% 60 deformasyon oranları için ekstrüzyon yükselme miktarı yaklaşık % 28) daha fazla olmuştur (% 60 deformasyon oranları için yaklaşık % 40). Deformasyon

oranı % 10 için ekstrüzyon yükselme miktarı farkı % 2 iken, % 60 deformasyon oranı için bu fark % 12' ye çıkmıştır.

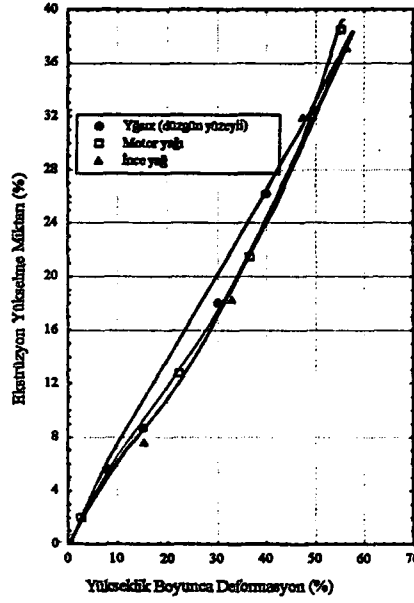


Şekil 41.  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.25$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri



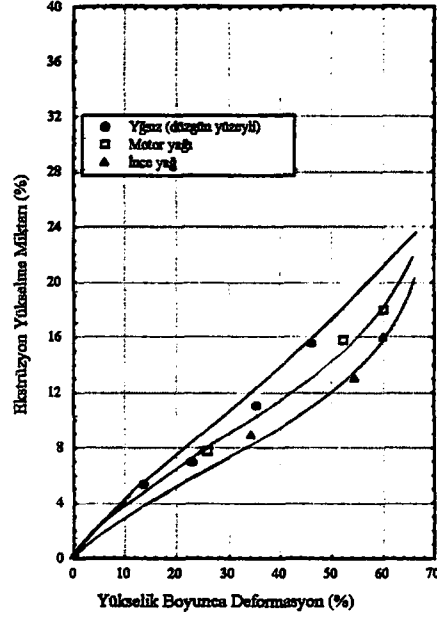
a) b) c) d)

Şekil 42. a) Deforme olmamış b) Yağsız c) Motor yağlı d) İnce yağlı yağlama şartı altında deforme olmuş açık kalıp-geri ekstrüzyon testi numuneleri

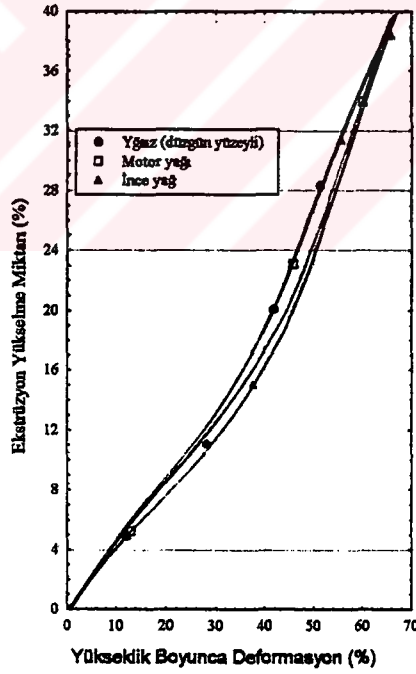


Şekil 43.  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.42$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 44` te verilen;  $H/D=1.0$  ve  $d/D=0.25$  için yapılan deneylerde malzemenin delikli kalıptan yükselme miktarı sırasıyla büyükten küçüğe doğru; yağsız (düzgün yüzeyli kalıp), motor yağlı ve ince yağlı yağlama şartlarında elde edilmiştir.  $H/D=1.0$  ve  $d/D=0.42$  değeri için yağsız, motor yağlı ve ince yağlı yağlama şartlarında yapılan deney bulguları birbirlerine yakın çıkmıştır. Motor yağı için  $H/D=1.0$  ve  $d/D=0.42$  değerlerinde (Şekil 45) elde edilen yükselme miktarı (%60 deformasyon oranı için ekstrüzyon yükselme miktarı yaklaşık %40)  $d/D=0.25$  değerinde elde edilenin (%60 için yaklaşık %18) yaklaşık iki katıdır. Bu ikisi arasındaki fark deformasyon oranlarının artışı ile artar. Şekil 42, 43, 44 ve 45` te verildiği gibi deformasyona göre  $d/D=0.42$  ile 0.25 arasındaki fark  $H/D=1.0$ 'de  $H/D=0.8$  `e göre daha fazla olmuştur.  $H/D=1.0$ 'de; %10 deformasyon oranı için bu fark %2 iken, %60 deformasyon oranı için %16 dır.



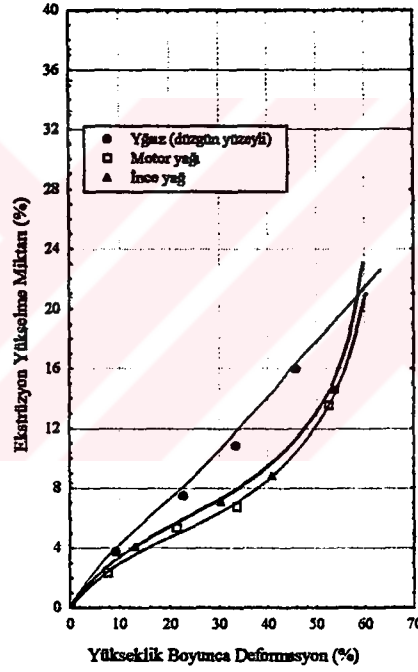
Şekil 44. H/D=1.0 ve d/D=0.25 için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 45. H/D=1.0 ve d/D=0.42 için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

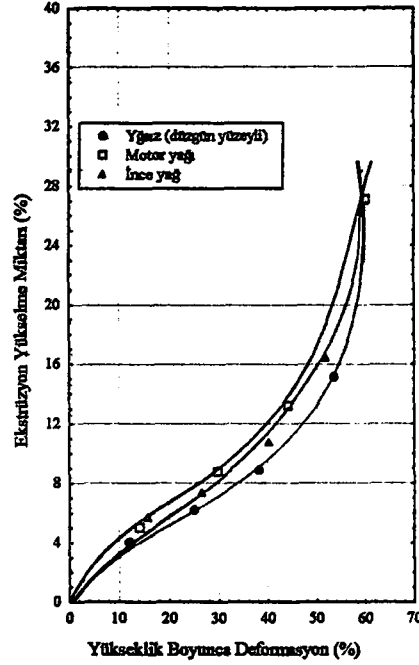
Şekil 46` da verilen;  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.25$  durumu için en yüksek değerler yağsız (düzgün yüzeyli kalıp) yağlama şartlarında oluşur. Motor yağı ve ince yağlı yağlama şartlarında ise değerler birbirlerine yakın çıkmıştır.

$H/D=1.2$  ve  $d/D=0.42$  değeri için (Şekil 47) yapılan deneylerde bir öncekilerin ( $H/D=0.8$  ve  $1.0$ ) aksine deformasyon oranına göre ekstrüzyon yükselme miktarı büyükten küçüğe doğru sırasıyla; motor yağı, ince yağlı ve yağsız yağlama şartlarında elde edilmiştir. Şekil 46 ve 47` den;  $d/D=0.42$  ile  $d/D=0.25$  arasında bir fark olduğu ancak bu farkın en küçükleri olduğu görülmüştür. Bu fark; % 10 deformasyon oranı için % 1 iken, % 50 deformasyon oranı için yaklaşık % 2 dir.



Şekil 46.  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.25$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri





Şekil 47.  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.42$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

Yukarıda; açık kalıp-geri ekstrüzyon testi deneyi ile elde edilen bulgular Tablo 1'de verilmiştir.

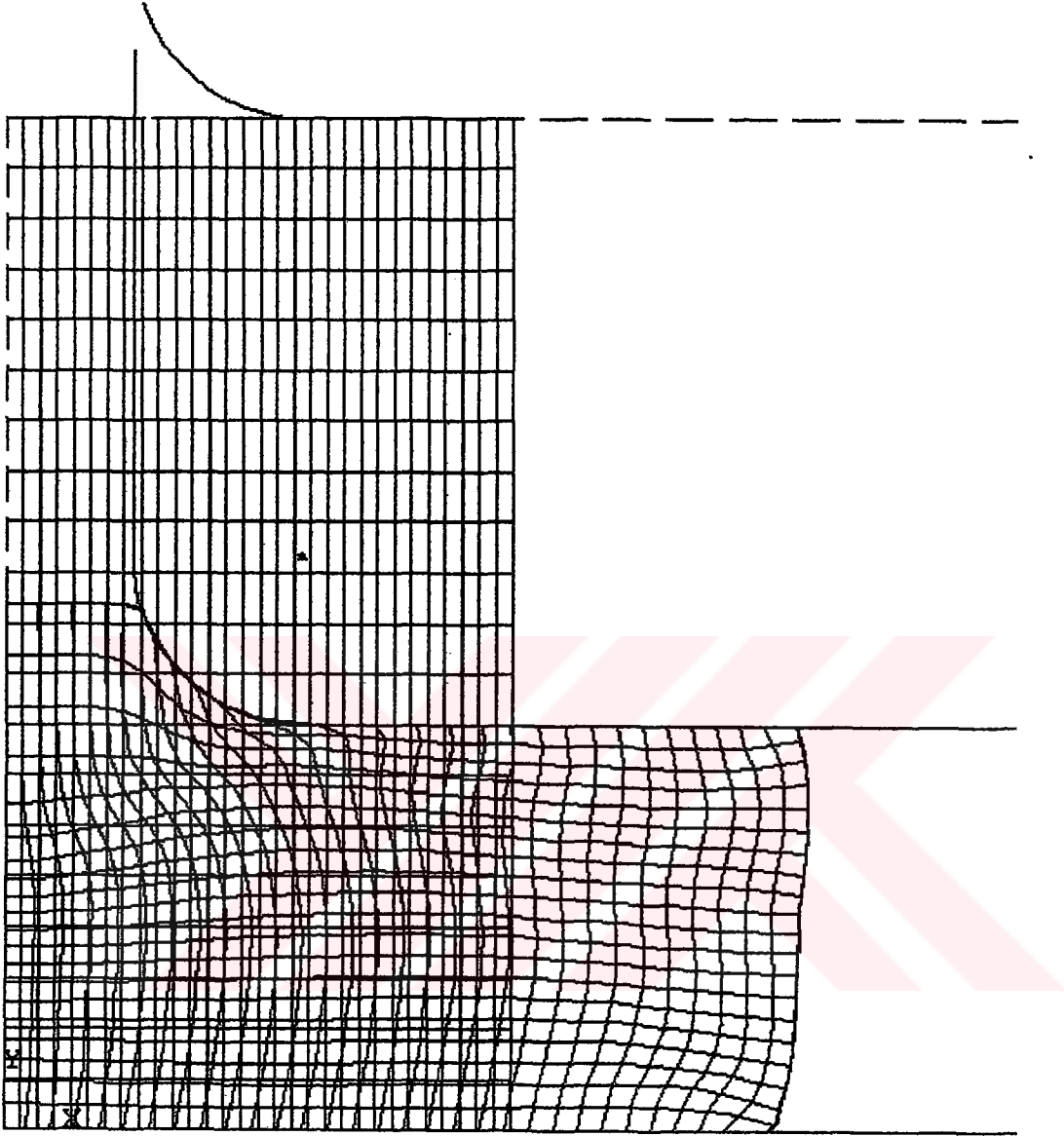
Tablo 1. Açık kalıp-geri ekstrüzyon test tekniğinde, % 60 deformasyon oranı için, elde edilen deney bulguları

H/D	Yağlama Tipi	Ekstrüzyon Yükselme Miktarı (%)	
		$d/D=0.25$	$D/D=0.42$
0.8	Yağsız	29	44
	Motor Yağı	28	40
	İnce Yağ	25	39
1.0	Yağsız	22	36
	Motor Yağı	18	34
	İnce Yağ	16	34
1.2	Yağsız	24	18*
	Motor Yağı	19	27
	İnce Yağ	18	22

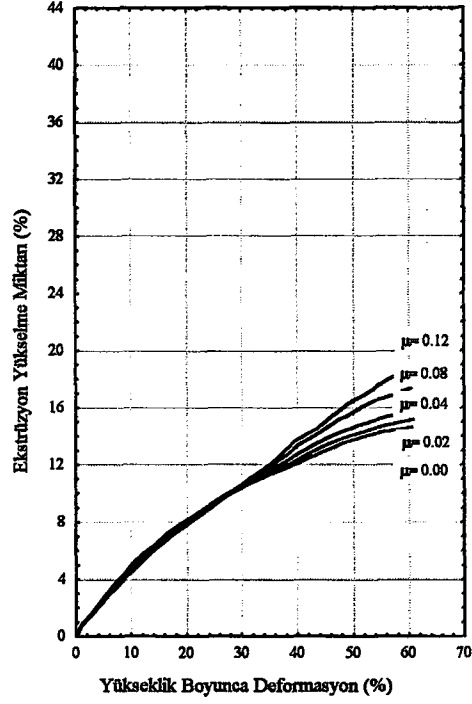
### 3.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Bulgular

Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin sonlu elemanlar modeli üç farklı numune geometrisi ( $H/D=0.8$ ,  $1.0$  ve  $1.2$ ) ve iki farklı kalıp geometrisi ( $d/D=0.25$  ve  $0.42$ ) kullanılarak yapılmıştır. Burada numune çapı sabittir ( $D=12$  mm).

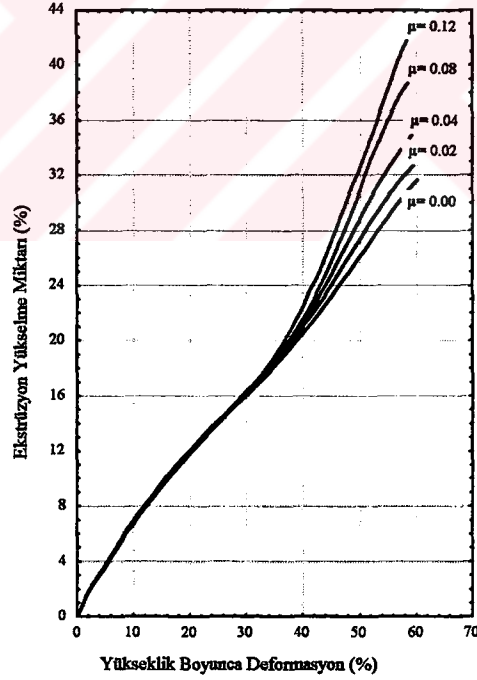
Şekil 48' de  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.25$  ve sürtünme katsayısı  $\mu=0.04$  için, numunenin deformasyondan önceki ve sonraki şekli verilmiştir. Şekil 49' da  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.25$ , Şekil 50' de ise  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.42$  için kalibrasyon eğrileri verilmektedir.  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.25$  için sürtünme kalibrasyon eğrilerinin kesişme noktası % 28 deformasyon oranı ile %10 yükselme miktarı noktasında olmuştur. Bu kesişme noktasından düşük deformasyon oranlarında, ekstrüzyon yükselme miktarının diğer sürtünme katsayıları da dahil, bir birine yakın olduğu ve bu noktadan sonra farkın belirgin bir şekilde arttığı saptanmıştır. Sürtünme katsayıları;  $\mu=0.0$  için %20 deformasyon oranlarında yükselme miktarı %8 iken, %60 deformasyon oranı için yükselme miktarı %14,  $\mu=0.12$  de %20 için %8 iken, %60 için %19 dur.  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.42$ ' de bu kesişme noktası, %26 deformasyon oranı ile %14.5 yükselme miktarı noktasında elde edilmiştir. Bu kesişme noktasından önceki deformasyonlardaki ekstrüzyon yükselme miktarının, değişik sürtünme katsayıları arasında, bir birine çok yakın çıktığı ve bu noktadan sonra, aradaki farkın daha da belirgin hale geldiği ( $d/D=0.25$ ' e göre) tespit edilmiştir. Sürtünme katsayıları;  $\mu=0.0$  da %20 için %12 bulunmuşken, %60 için %31 bulunmuştur,  $\mu=0.12$ ' de; %20 için %11.9 iken, %60 için %43 dır (Şekil 50).



Şekil 48. Açık kalıp-geri ekstrüzyon test modelinde  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.25$  ve  $\mu=0.04$  için deformasyon geometrisi

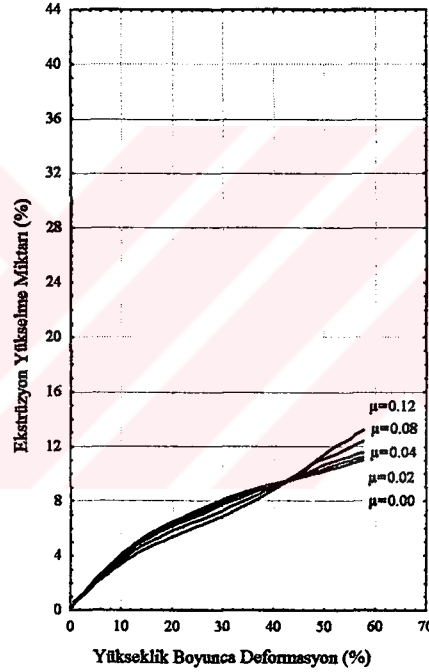


Şekil 49.  $H/D=0.8$ ,  $d/D=0.25$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 50.  $H/D=0.8$ ,  $d/D=0.42$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

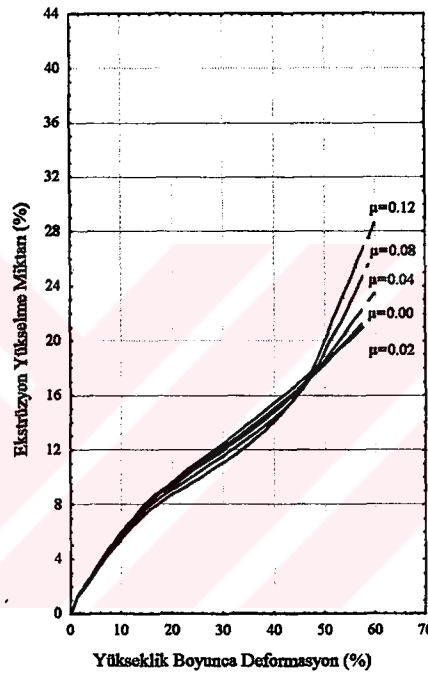
Şekil 51' de  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.25$  ve sürtünme katsayıları için kalibrasyon eğrileri görülmektedir. Burada sürtünme katsayısı  $\mu=0.0$  için, deformasyona göre ekstrüzyondaki değişim oranının başlangıçta fazla, artan deformasyon oranlarında bu değişim oranının azaldığı, ancak ekstrüzyondaki artışın devam ettiği görülmüştür. %20 deformasyon oranı için bu yükselme miktarı %6 iken, %60 deformasyon için %11 dir. Sürtünme katsayısı  $\mu=0.12$  için deformasyona göre ekstrüzyondaki değişimin %30 deformasyon oranına kadar,  $\mu=0.0$  da ki değerlere göre daha düşük olduğu, bu deformasyon oranından sonra değişimin artarak devam ettiği saptanmıştır.  $\mu=0.12$  de, %20 deformasyon oranı için yükselme miktarı %5 iken, %60 için %13 dür. Sürtünme katsayılarının bu davranışından dolayı bütün eğriler, deformasyon oranı %43 ve ekstrüzyon yükselme miktarı %9 noktasında kesişirler.



Şekil 51.  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.25$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 52' de  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.42$  ve değişik sürtünme katsayıları için kalibrasyon eğrileri verilmektedir. Sürtünme katsayısı  $\mu=0.0$  değerinde deformasyon oranı %15' e kadar ekstrüzyon yükselme miktarı artmıştır. Bu deformasyon oranından sonra daha düşük bir eğimle ekstrüzyon yükselme miktarı artışı devam etmiştir (%60 deformasyon oranı için %22). Sürtünme katsayısı  $\mu=0.12$  için, %15 deformasyon oranı yükselme miktarını %7' ye kadar artırmıştır ( $\mu=0.0$  değerine göre biraz düşük). Deformasyon oranı %35' e kadar

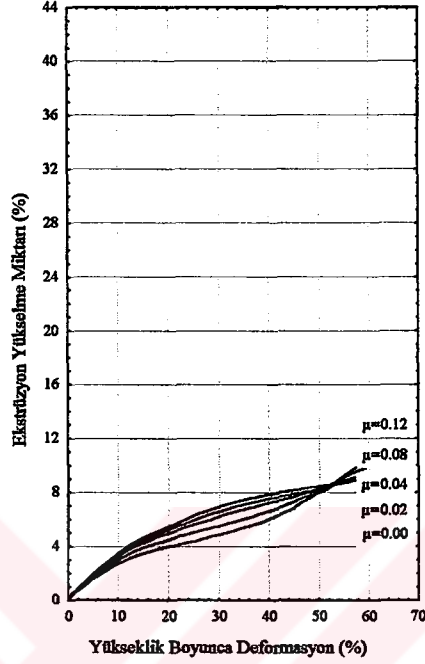
ekstrüzyon yükselme miktarı artışının %12' ye kadar devam ettiği fakat artış eğiminin azaldığı görülmüştür. Bu deformasyon oranından sonra ekstrüzyon yükselme miktarı daha düşük bir eğimle %60 deformasyon oranı için %28 değerine çıkmıştır. Bu iki sürtünme katsayıları arasındaki diğer sürtünme katsayıların (0.0~0.12) benzer karakterler gösterdiği ve %46 deformasyon oranına karşılık ekstrüzyon yükselme miktarının %17.5 olduğu bir noktadan geçtiği görülmüştür.  $\mu=0.12$ 'de;  $d/D=0.25$  için deformasyon oranı %60' da ekstrüzyondaki yükselme miktarı %14 iken,  $d/D=0.42$  de bu yükselme miktarı %28 olup iki katı kadardır.



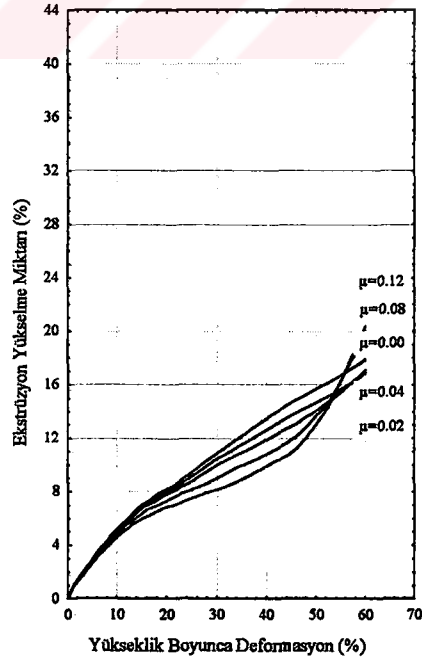
Şekil 52.  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.42$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

Şekil 53' te  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.25$ , Şekil 54' te ise  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.42$  değerleri için sürtünme kalibrasyon eğrileri verilmiştir.  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.25$  için bütün sürtünme katsayıları, deformasyon oranı %53, %9 yükselme miktarının kesiştiği bir noktadan geçerler. Sürtünme katsayısı  $\mu=0.0$  için, %20 deformasyon oranında yükselme miktarı %5.5 iken, %60 için %9 dur.  $\mu=0.12$  için bu değerler; %20 için %4 ve %60 için %10 dur.  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.42$  değeri için ise değişik sürtünme katsayıları değişik kesişme noktalarından geçerler. Sürtünme katsayısı  $\mu=0.02$  ve  $\mu=0.04$  değerlerinde bu nokta; %58 deformasyon oranına

karşılık %16 yükselme miktarı iken,  $\mu=0.08$  ve  $\mu=0.12$  değerleri için %54' e karşı %15 dır.  $d/D=0.25$  için sürtünme katsayısı  $\mu=0.12$  de %60 deformasyon oranındaki yükselme miktarı %10 iken,  $d/D=0.42$  için bu yükselme miktarı %20' ye çıkmıştır. Buradan görüleceği gibi %60 deformasyon oranı için yükselme miktarı  $d/D=0.42$ ,  $d/D=0.25$ ' in iki katı kadardır.



Şekil 53.  $H/D=1.2$ ,  $d/D=0.25$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 54.  $H/D=1.2$ ,  $d/D=0.42$  için açık kalıp-geri ekstrüzyon testinden elde edilen sürtünme kalibrasyon eğrileri

Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen bulgular Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testi için sonlu elemanlar yöntemi bulguları

H/D	$\mu$	Ekstrüzyon Yükselme Miktarı (%)							
		d/D = 0.25				d/D = 0.42			
		Deformasyon Oranı (%)		Kesişme Noktası		Deformasyon Oranı (%)		Kesişme Noktası	
		20	60	D.O. (%)	E.Y.M. (%)	20	60	D.O. (%)	E.Y.M. (%)
0.8	0.00	8	14	28	10	12	31	26	14.5
	0.12	8	19			11.9	43		
1.0	0.00	6	11	43	9	9.5	21	46	17.5
	0.12	5	13			8	29		
1.2	0.00	5.5	9	53	9	8	17	58	17
	0.12	4	10			6	20		

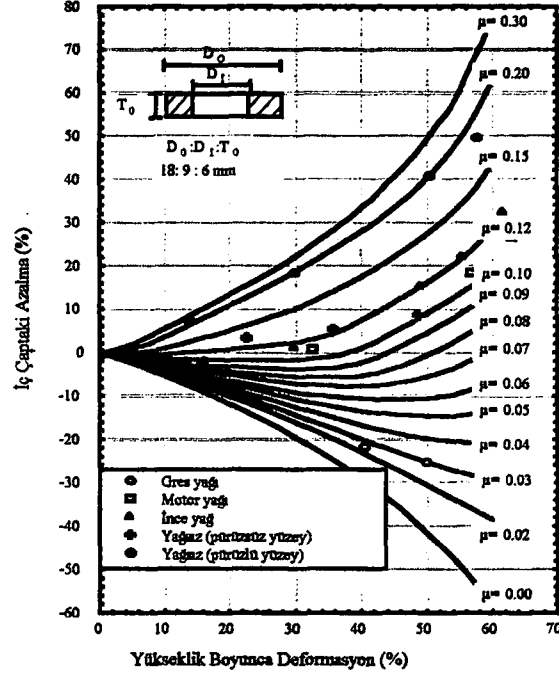


#### 4. İRDELEME

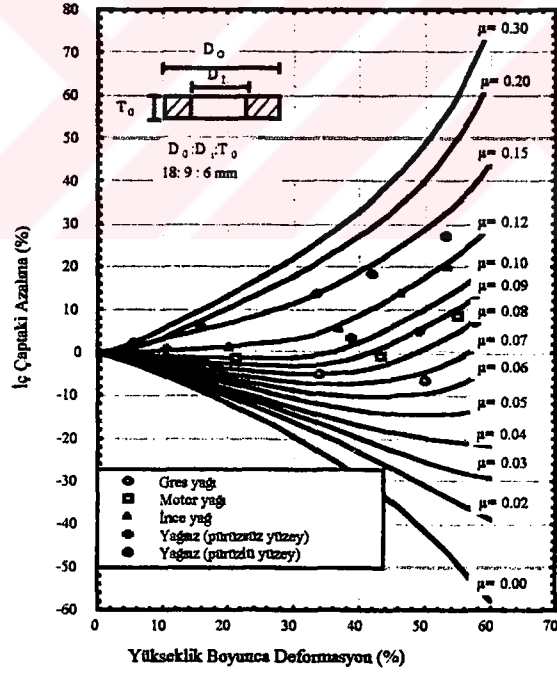
Bu bölümde, metal şekillendirme işlemlerinde kalıp-iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını belirlemek için mevcut iki yöntemin sayısal ve deneysel sonuçları irdelenmiştir.

Disk basma testinde; aksenal doğrultuda belirli bir birim şekil değiştirme için diskin iç çapındaki değişme, kalıp-iş parçası ara yüzeyindeki sürtünmeye büyük ölçüde bağlıdır (Male, Cockcroft, 1964). Sayısal çalışmalarda; sürtünmesiz halde diskin iç çapı büyümektedir. Sürtünme arttıkça iç çapın büyümesi giderek azalır. Diskin deformasyonu için  $\mu$  sürtünme katsayısının kritik bir değerden küçük olması halinde ( $\mu=0\sim 0.06$ ) iç çapın başlangıç değerine kıyasla büyüdüğü, kritik değerden (% 40 deformasyon oranına kadar  $\mu=0.06$ ) büyük olması halinde ise ( $\mu=0.06\sim 0.3$ ) iç çapın başlangıç değerine kıyasla küçüldüğü görülmüştür (Şekil 55 ve 56). Disk basma testlerinin, Şekil 30 ve Şekil 31' de verildiği gibi, FORTRAN programlama dilinde yapılan çözümlerinde ise; diskin iç çapının daima büyüdüğü veya küçüldüğü görülmüştür. Bu sonuçlar arasındaki farklılığın sebebi, disk basma testinin modellenmesi konusunda verilen ve sistemi basitleştirmesi açısından yapılan kabullerdir. Ayrıca FORTRAN programlama dilindeki çözümlerde  $m$  ile  $\mu$  arasında doğrusal bir ilişki ( $\mu = cm$ ) olduğu kabul edilmiştir. Bu kabulün yapılmasının sebebi; FORTRAN programlama dilinde, deformasyona göre iç çaptaki azalma oranını  $\mu'$  ye bağlı elde etmektir. Bu bir yaklaşımdır ve daha çok düşük sürtünme katsayılarında geçerlidir (Male, De Pierre, 1969).

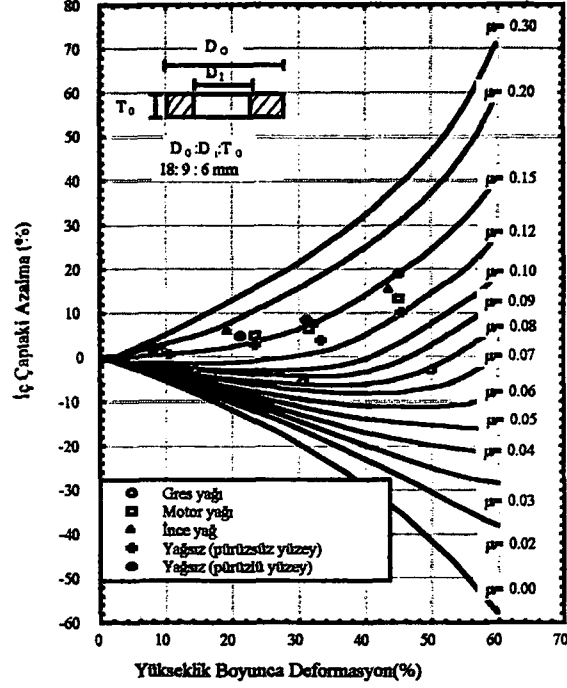
Disk basma testleri için sayısal ve deneysel sonuçlar, Şekil 55' de alüminyum, Şekil 56' da bakır, Şekil 57' de bronz ve Şekil 58' de pirinç malzemeleri için verilmiştir. Bu grafiklerden görülmüştür ki, hangi tip malzeme kullanılırsa kullanılsın benzer kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir. Ancak bu eğrilerden elde edilen sürtünme katsayıları farklı olmaktadır.



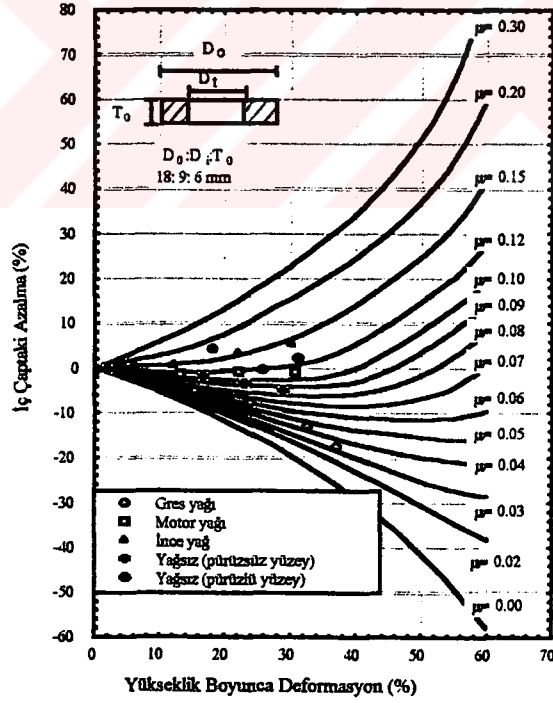
Şekil 55. Alüminyum için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 56. Bakır için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 57. Bronz için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 58. Pirinç için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri

Disk basma testinde deformasyona uğrayan malzemenin akışı en az direncin olduğu yöne doğru olmaktadır. Akma yönü, radyal yönde disk ekseninden dışa doğrudur. Eğer kalıp-ış

parçası arasındaki sürtünme katsayısı sıfır ise; disk dolu bir silindir gibi deforme olmaktadır. Bu durumda bütün malzeme radyal doğrultuda eksenden dışa doğru akar (Male, Cockcroft, 1964). Eğer kalıp-iş parçası arasındaki sürtünme katsayısı sıfırdan büyükse akma hareketine karşı kalıp-iş parçası arasında bir sürtünme kuvveti oluşur. Bu sürtünme kuvveti malzemenin akışını engellemeye çalıştığı için, her artan sürtünme katsayısında disk, bir önceki konumuna göre daha az dışa doğru akmaktadır. Yani artan sürtünme katsayısı ile diskin iç çapı bir önceki değerine göre daha da küçülmüştür. Sürtünme katsayısı (sürtünme kuvveti), belirli bir değere ulaştığı zaman diskin dışa doğru olan akma direncini yener. Bu durumda diskin iç çapındaki artış durur ve bu kritik sürtünme değerinden sonra, diskin bir kısmı dış duvara doğru akarken, bir kısmı da diskin eksenine doğru akar. Bu noktadan sonra diskin iç çapı küçülmeye başlar (Şekil 55' de  $\mu = 0.06$  ve daha yüksek sürtünme katsayıları). Bu işlemler olurken diskte, sabit bir yarıçap değerinde malzeme akışı olmaz. Bu yarıçap değerine nötr yarıçap  $R_n$  denir.

Grafiklerden diskin iç çapının düşük sürtünme katsayılarında belirli bir değere kadar büyüdüğü, sonra küçüldüğü görülmüştür. Bunun nedenlerinden biri; sürtünme katsayısı deformasyon boyunca sabit kabul edilirse de, deformasyon artışı ile sürtünme katsayısı (sürtünme kuvveti) da artmaktadır. Bu artış belirli bir değerden sonra,  $R_n$  nötr yarıçap sınırını malzeme üzerine getirir ve eksene doğru malzeme akışına neden olur. Diğer bir neden ise; bu özellik dikkat edilirse, sıfır sürtünme katsayısı hariç düşük sürtünme katsayılarında meydana gelmektedir. Diskte, malzeme akışı eksene göre dışa doğru daha fazla olduğundan, bu bölgede daha fazla malzeme yığılması olmaktadır. Bu yığılma, akan malzemenin deformasyon sertleşmesine sebep olmaktadır. Böylece numunede, eksenden dışa doğru deformasyon sertleşmesi artışı oluşur. Bu deformasyon sertleşmesi ile malzemenin akma direnci dışa doğru artar. Dolayısıyla akma direnci eksene doğru azalacağından malzeme akışı eksene doğru olur ve bu da iç çap küçülmesine neden olur.

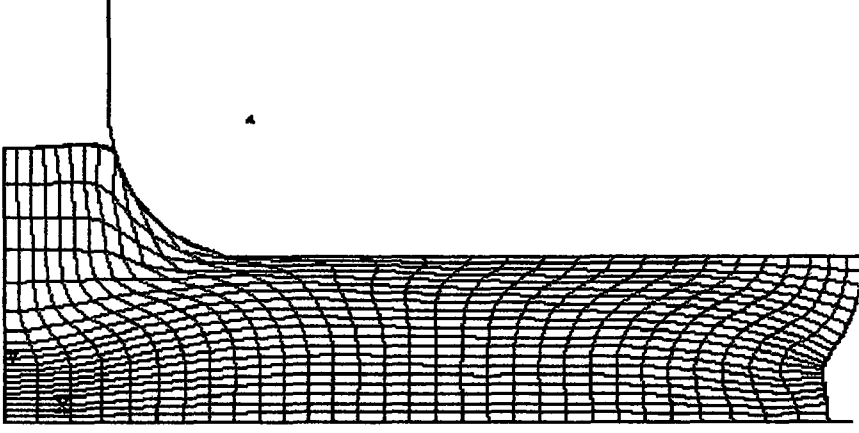
Disk basma testlerinde sayısal ve deneysel değerlerin uyduğu görülmüştür. Gres yağıyla yağlamada kalın film tabakası oluştuğu için az sürtünme (düşük sürtünme katsayısı) oluşmaktadır. Motor yağıyla daha küçük film tabakası oluştuğu için daha yüksek sürtünme katsayısı meydana gelmiştir. Aynı şekilde ince yağlı şartlarda daha da yüksek sürtünme katsayısı oluşmuştur. Yağsız kaba yüzeyle şartlarda  $\mu$  değerleri, mevcut değerlerin hepsinden

daha yüksek çıkmıştır. Düzgün yüzeyli yağsız şartlarda ise değerler farklı bir dağılım vermiştir. Bu dağılım Şekil 57 ve 58’ de görüldüğü gibi motor yağı ile elde edilen değerlerden bile düşük çıkmıştır. Şekil 55 ve 56’ da ise artan deformasyon oranı ile diskin iç çap azalmasının ilk deformasyon oranlarına göre düştüğü görülmüştür. Bunun sebepleri ise; ölçüm hataları, homojen olmayan deformasyon, deformasyon sertleşmesinin olması, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon sırasında oluşan yüzey pürüzlenmesi gibi.

Alüminyum malzemesi için elde edilen deneysel değerler, sayısal kalibrasyon eğrileriyle karşılaştırıldığında; gres yağlı, motor yağlı, ince yağlı ve kaba yüzeyli yağsız şartlarda sürtünme katsayıları sırasıyla; 0.03, 0.11, 0.12 ve 0.20, bakır için; bunlar 0.07, 0.09, 0.12 ve 0.15, bronz için; 0.08, 0.13, 0.14 ve 0.15 ve pirinç için; 0.04, 0.12, 0.15 ve 0.15 elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı, gres yağlı şartlarda en yumuşak ve en sert malzemede yaklaşık aynı değerleri almaktadır ( $\mu=0.03\sim 0.04$ ). Bütün bu sonuçlara göre sürtünme katsayıları ve dolayısıyla sürtünme kalibrasyon eğrileri farklı çıkmaktadır.

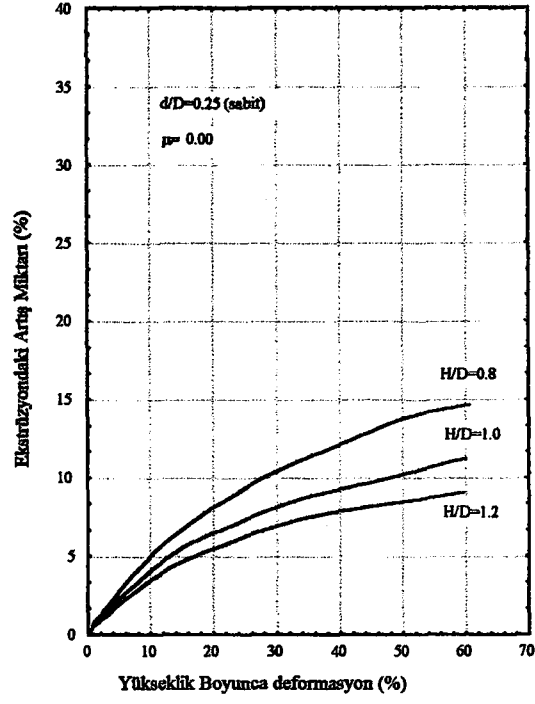
Açık kalıp-geri ekstrüzyon testlerinde deformasyona uğrayan malzemenin üst kalıptan yükselme miktarının kalıp-iş parçası arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olup olmadığı araştırılmıştır. Çalışmalar göstermiştir ki ekstrüzyondaki yükselme miktarı sürtünme katsayısına, numune ve kalıp geometrisine bağlıdır. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinde deformasyona uğrayan malzemenin bir kısmı radyal yönde akarken bir kısmı da ortası delik olan üst kalıba doğru akarak ekstrüzyondaki yükselme miktarını oluşturmaktadır (Şekil 59). Malzemenin akış yönünü belirleyen faktörlerden en önemlisi, kalıp-iş parçası arasındaki akış direncidir. Küçük sürtünme katsayılarında üst kalıp-iş parçası arasındaki akış direnci nispeten az olduğundan malzeme üst kalıba doğru akmak yerine radyal yönde akmaktadır. Ancak artan sürtünme katsayılarında bu direnç arttığından malzeme kolay olanı seçerek üst kalıba doğru akmakta ve ekstrüzyondaki yükselme miktarını artırmaktadır. Dolayısıyla her numune ve kalıp geometrisi için artan sürtünme katsayılarında, ekstrüzyondaki yükselme miktarı artmaktadır. Numune geometrisi  $H/D=0.8$  için ve kalıp geometrisi  $d/D=0.25$  ve  $0.42$  için yapılan açık kalıp-geri ekstrüzyon testlerinden elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi, belirli bir deformasyon oranına kadar ekstrüzyon yükselme miktarındaki değişimin tüm sürtünme katsayıları için hemen hemen aynı olduğu ve bu belirli noktadan sonra değişim

farkının belirginleştigi tespit edilmiştir (Şekil 49, 50). Farkın belirginleştigi bu bölgede sürtünme katsayısı  $\mu$ , arttıkça, ekstrüzyondaki yükselme miktarının da arttığı görülmüştür.

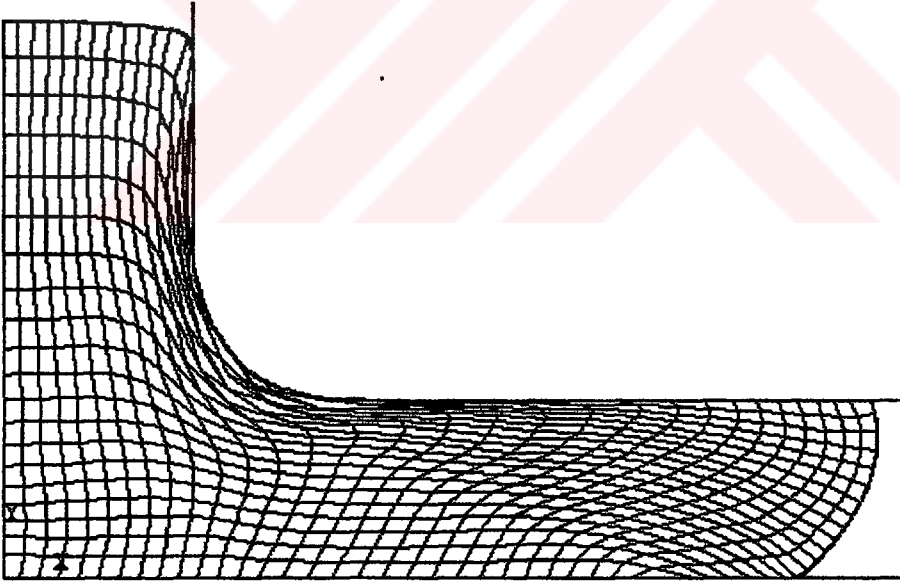


Şekil 59.  $H/D=0.8$ ,  $d/D=0.25$  ve  $\mu=0$  için numunenin deformasyona uğramış hali

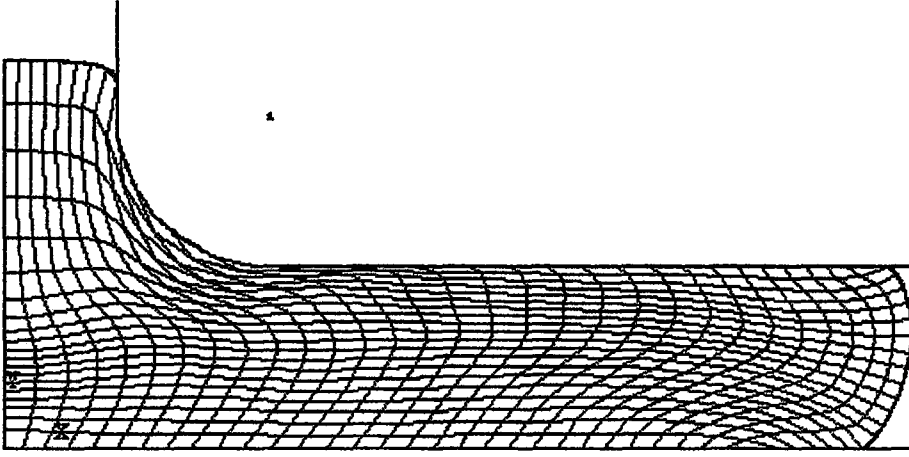
Şekil 60' da  $d/D=0.25$  değeri için numune boyutlarına göre ( $H/D$ ) ekstrüzyon yükselme miktarlarının değişimleri verilmiştir. Her iki şekilde de  $H/D$  oranının artması ile yükselme miktarının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi;  $H/D$  oranının artması ile numunenin hacmi de artar. Hacmin artması ile aynı deformasyon oranlarında birim hacme düşen şekil değişim miktarı azalır. Dolayısıyla  $H/D$  oranı artması ile birim hacme düşen şekil değiştirme miktarı azalacağından ekstrüzyondaki yükselme miktarı da azalır.



Şekil 60. Numune boyutlarına göre ekstrüzyondaki yükselme miktarının değişimi

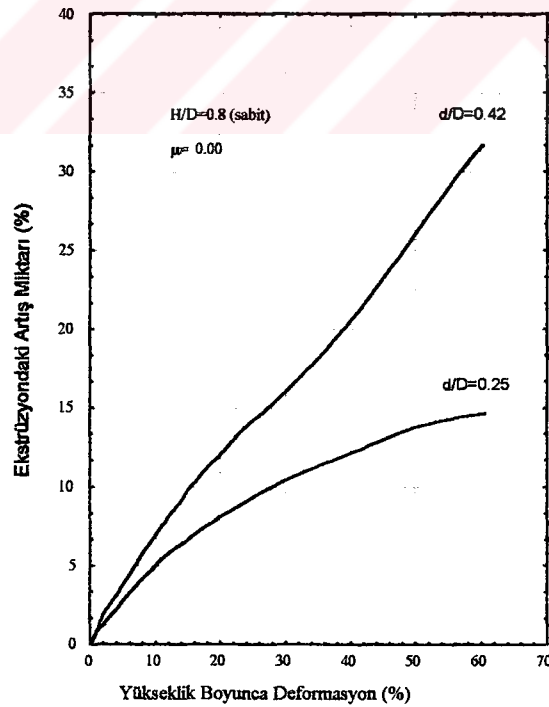


Şekil 61.  $H/D=0.8$ ,  $d/D=0.42$  ve  $\mu=0.8$  için numunenin deformayona uğramış hali



Şekil 62.  $H/D=0.8$ ,  $d/D=0.25$  ve  $\mu=0.8$  için numunenin deformasyona uğramış hali

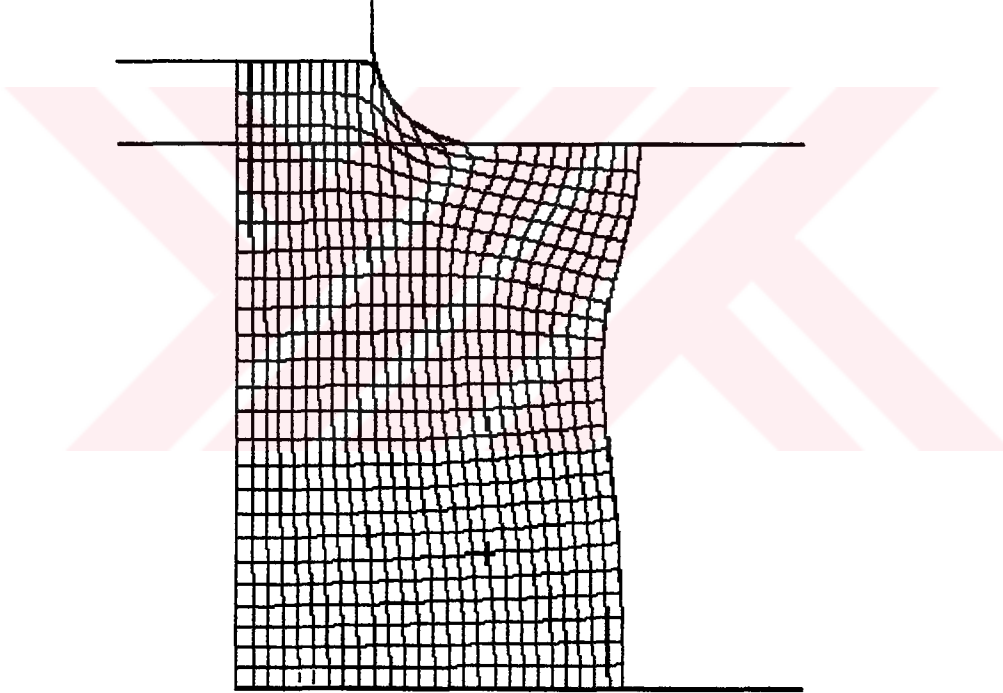
Şekil 61 ve 62' de ki deformasyon geometrilerinden ve Şekil 63' te ki grafikten açıkça görüldüğü gibi,  $d/D$  oranının artması ile ekstrüzyondaki yükselme miktarı artmaktadır. Bunun sebebi;  $d/D$  oranı artması ile daha az malzemeye daha büyük yükler etkir. Dolayısıyla malzeme daha kolay bir şekilde en az direncin olduğu yöne doğru (radyal yönde) akar ve ekstrüzyondaki yükselme oranının artmasına neden olur.



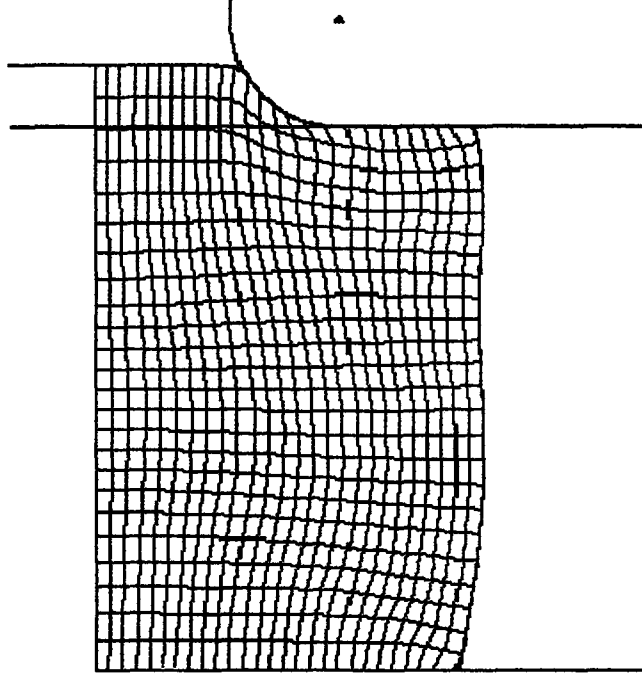
Şekil 63.  $H/D=0.8$  ve  $\mu=0$ ' de ekstrüzyon yükselme miktarının  $d/D$ ' ye göre değişimi



$H/D=1.0$  ve  $1.2$  için verilen grafiklerden de görüldüğü gibi (Şekil 51, 52, 53 ve 54) sürtünme katsayılarının kesiştiği noktaya kadar olan bölgede  $\mu$  arttıkça ekstrüzyondaki yükselme miktarı azalmaktadır. Bunun sebebi malzemenin üst kalıp deliğinden akmak yerine radyal yönde dışa doğru akmasıdır. Şekil 64 ve 65' te görüldüğü gibi (% 30 deformasyon oranında) sürtünme arttıkça radyal yönde akan malzeme üst kalıp deliğine denk gelen malzemeyi aşağıya doğru çekerek ekstrüzyondaki yükselme miktarını azaltır. Kritik noktadan sonra ise malzeme akışı hem radyal yönde hem de üst kalıp deliğine doğru olmaktadır. Şekil 59 ve 62' den görüldüğü gibi sürtünme katsayısı arttıkça radyal yöndeki akış engelleneceğinden malzeme üst kalıp deliğine doğru akacak ve ekstrüzyondaki yükselme miktarını arttıracaktır (% 60 deformasyon oranında).

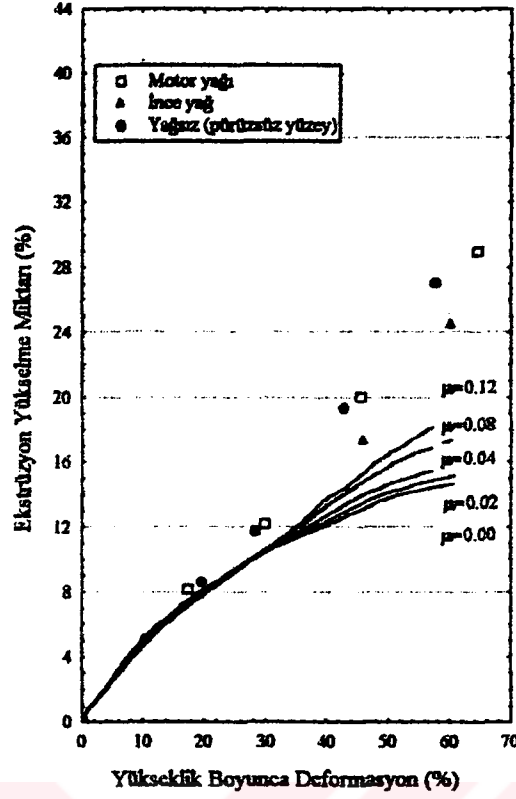


Şekil 64. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin,  $H/D=1.2$ ,  $d/D=0.42$  ve  $\mu=0.0$  için % 30 deformasyona uğramış hali

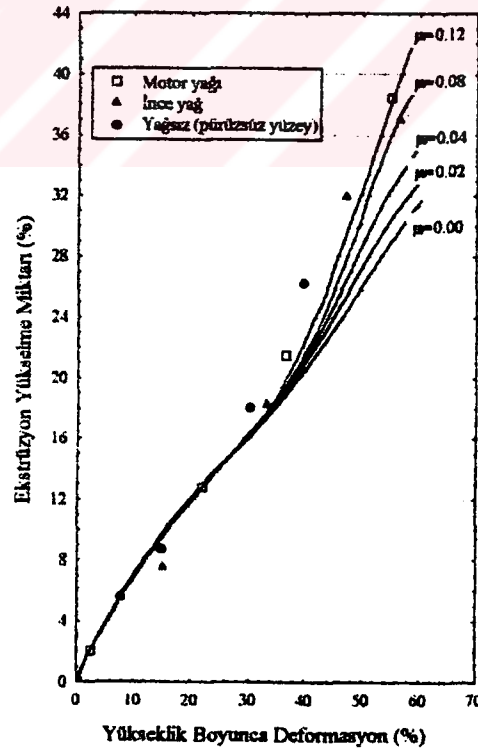


Şekil 65. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin,  $H/D=1.2$ ,  $d/D=0.42$  ve  $\mu=0.12$  için % 30 deformasyona uğramış hali

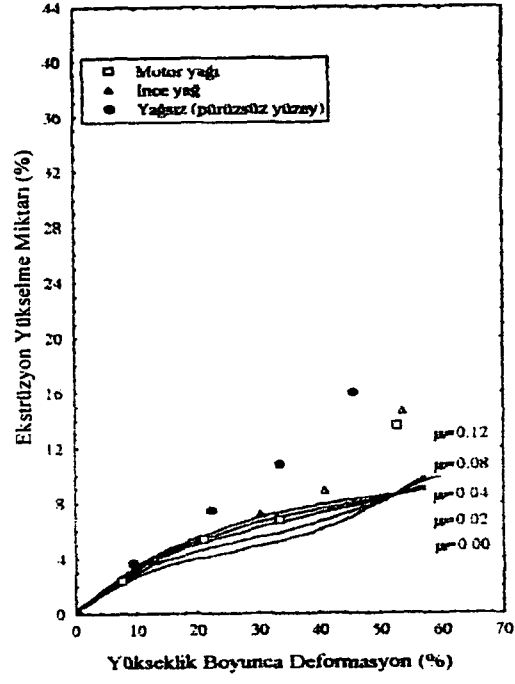
Açık kalıp-geri ekstrüzyon deneylerinde de numune geometrisi ( $H/D$ ) ve kalıp geometrisinin ( $d/D$ ) sürtünme şartlarına etkisi incelenmiştir. Şekil 66, 67, 68, 69, 70 ve 71'de görüldüğü gibi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak alınan sonuçlarla deney sonuçları farklılık göstermiştir. Bu farklılıkların sebepleri; sayısal çözüm analizinde yapılan kabullerden, numuneden (talaşlı işlenmesi sırasında deformasyon sertleşmesi, artık gerilmelerin oluşması), deney düzeneğinden (yağlamanın her tarafta aynı olmaması), modellemeden (yeterince ince ve uygun eleman seçilmemesi), üst kalıp deliğinin eğrilik yarıçapının eşit olmaması ve ölçüm hataları sayılabilir.



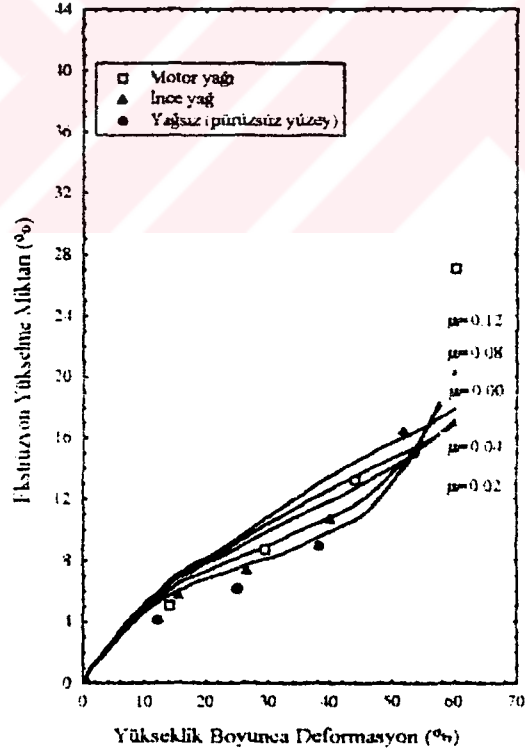
Şekil 66.  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.25$  için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 67.  $H/D=0.8$  ve  $d/D=0.42$  için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 68.  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.25$  için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri



Şekil 69.  $H/D=1.2$  ve  $d/D=0.42$  için sayısal ve deneysel sürtünme kalibrasyon eğrileri

## 5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Disk basma testi için; her malzemenin kendine has farklı sürtünme kalibrasyon eğrileri vardır.
2. Disk basma testi için kabuller yapılarak çözülen teorik sonuçlar, sürtünme katsayısını belirlemek için yetersiz kalmaktadır.
3. Sürtünme katsayılarını belirlemek için disk basma testine alternatif yöntem olarak geliştirilen açık kalıp-geri ekstrüzyon testi ile de sürtünme kalibrasyon eğrileri, dolayısıyla sürtünme katsayıları elde edilebilir.
4. Açık kalıp-geri ekstrüzyon test yönteminde sürtünme kalibrasyon eğrileri, numune geometrisi ( $H/D$ ) ve kalıp geometrisine ( $d/D$ ) bağlıdır.
5. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinde üst delik yarıçap eğriliği malzeme akışını etkilemektedir.
6. Değişik özelliklere sahip yağlayıcılar kullanılarak, kalıp-iş parçası ara yüzeyinde uygun sürtünme değerleri elde edilebilir.

## 6. ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığı altında aşağıdaki çalışmaların yapılması önerilmiştir.

1. Sıcak şekillendirme işlemlerindeki sürtünme şartlarını incelemek için; değişik sıcaklıklarda ve değişik deformasyon hızlarında deneysel ve sayısal çalışmalar yapılabilir.
2. Disk basma testinin yetersiz kalan teorik analizi üzerine geliştirme çalışmaları yapılabilir.
3. Sürtünme katsayısı çalışmalarında yüzey pürüzlülüğü özelliği üzerine çalışmalar yapılarak bu parametrenin metal şekillendirme işlemlerine etkisi belirlenebilir.
4. Açık kalıp-geri ekstrüzyon testi için de, disk basma testinde olduğu gibi standart boyutlara sahip numune ve kalıp geometrileri ( $H/D$ ,  $d/D$  ve üst kalıp eğrilik yarıçapı) geliştirilebilir.

## **7. KAYNAKLAR**

Altan, T., lahoti, G. D., Nagpal, V., Systems Approach in Massive Forming and Application to Modeling of Forging Processes, Cilt 1, J. Appl. Metal Working, ASM,1981, 29

Altan, T., Oh, S. I., H. L., Metal Forming; Fundamentals and Applications, ASM,1983, Ohio

ANSYS, User' s Manual, DN-R300:50-1, Houston, 1992

American Society for Metals, Metal Hand Book, 8.baskı, Cilt 1 ve 4, ASM, Metal Park, 1961, Ohio

Avitzur. B., Metal Forming; Processes and Analysis, McGraw-Hill Book Co., 1989, New York

Bowden, F. P., ve Tabor, D., The Friction and Lubrication of solids-Part II, Oxford Üniversitesi Basımı, 1964, London.

Çapan, L., Malzeme ile Sürtünme Koşullarının Dövme İşlemlerine Etkileri, Mühendis ve Makine, 374, 1991, 24-27

Ersoy, U., Göksel, A., Plastik Tekil Verme Proseslerindeki Tribolojik Temeller, Bitirme Çalışması, Trabzon, 1999

Hawkyard, J. B., Johnson, W., An Analysis of the Changes in Geometry of A Short Hollw Cylinder During Axial Compression, Int. J. Mech. Sci., Pergamon Basım, 9, 1967, 163-182

Hill, R., On the İnhomogeneous Deformation of A Plastic Lamina A Compression Test, Phil. Mas., 41, 1950, 733-744.

Hutching, I. M., Tribology; Friction and Wear of Engineering Materials, Cambride Üniversitesi, Londra, 1992

Kasuga, Y., Yamaguchi, K., Friction and Lubrication in the Deformstion Processing of Metals, JSME 1967 Semi-international Symposium, Tokyo, Japan, 1967

Kayalı, E. S., Ensari, C. ve Dikeç, F., Metal Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İ.T.Ü., 1990, İstanbul, 66-76

Kienzle, O., The Principles of Manufacturing Technology, Werkstattstechnik und Maschinenbau, Cilt 46, No 5, 1956, 204

Kobayashi, S., The Role of the Finite Element Method in Metal Forming Technology of Plasticity, 2, 1984, 1035-1040

Kobayashi, S., Oh, S. I. ve Altan, T., Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford, 1989, New York, 8-10

Kudo, H., An Analysis of Plastic Compression Deformation of A Lamella between Rough Plates by the Energy Method, Proc. 5<sup>th</sup> Jap. Nat. Congr. Appl. Mech. 5, 1955, 75-78

Kunogi, M., On the Plastic Deformation of the Hollow Cylinder under Axial Load, J. Sci. Res. Inst. Japan. 30 (2), 1954, 63-92

Lahoti, G. D., Altan, T., Input/Output Relationships in Metal Forming, SME Paper EM75-375, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1975

Male, A. T., Cockroft, M. G., A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation, J. Inst. Met., 93, 1964-65, 38-46

Male, A. T., De Pierre, V., Mathematical calibration of the Ring Test for friction studies in Flat forging Operations, AFML-TR-69-28 Kısım 1, Wright-Patterson Hava Kuvvetleri Üssü, 1969

Peterson, M. B., Ling, F. F., Friction and Lubrication of Extrem Pressures, Symposium on Friction and Lubrication in metal Processing, ASME, 1966, 39

Rebelo, N., ve Wertheimer, T. B., general Purpose for Elastic-Plastic Analysis of Metal Forming Processes, Proc. NAMRC 16, 1988, 414-419

Rowe, G. W., Principles of Industrial Metalworking Processes, Butler Tanner Ltd., London, 1990, 287-307



Sato, K., Tanaka, S., ve Uchida, F., Numerical Simulation System for Plastic Metal Forming Process Based on A FEM, İntroducing Slide Between Elements, Advanced Technology of Plasticity, 2, 1984, 1021-1026

Schey, T. A., Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear, American Society for Metals, Metal Park, 1983, Ohio

Sofuoğlu, H., Physical Modeling and Finite Element Analysis of Friction Encountered in Large Deformation Processes, Doktora, Texas Teknik Üniversitesi, Texas, 1993

Wilson, W. R. D., Friction and Lubrication in Bulk Metal Forming Processes, J. Appl. Metalworking, 1, 1979, 7-19

Van Rooyen, G. T. ve Backofen, W. A., A Study of Interface Friction in Plastic Compression, İnt. J. Mech. Sci., 8, 1966, 731

Zum Gahr, Karl-Heinz, Microstructure and wear of Materials, Elsevier Scie. Pub. B. V., 1087, New York

## 8. EKLER

### EK. 1

Bu çalışmada gerçekleştirilen bilgisayar programı aşağıdaki adımlardan oluşmuştur:

$$\mu = \frac{m}{2\sqrt{3}}$$

$$(a) \quad A = \frac{mR_o}{T_1}$$

$$(b) \quad B = \frac{1}{2\left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right)} \ln \left( \frac{3(R_o/R_i)^2}{1 + \sqrt{1 + 3(R_o/R_i)^4}} \right)$$

$$(c) \quad A > B$$

$$R_n = R_o \left\{ \frac{2\sqrt{3}A}{(R_o/R_i)^2 - 1} \left[ \sqrt{1 + \frac{(1 + R_i/R_o)[(R_o/R_i)^2 - 1]}{2\sqrt{3}A}} \right] - 1 \right\}$$

$$(d) \quad A \leq B$$

$$\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 = \frac{(\sqrt{3}/2)[1 - (R_i/R_o)^4 x^2]}{\sqrt{x(x-1)[1 - (R_i/R_o)^4 x]}}$$

$$x = \left\{ \frac{R_o}{R_i} \exp \left( -A \left( 1 - \frac{R_i}{R_o} \right) \right) \right\}^2$$

$$(e) \quad Ri_1 = \left[ \frac{R_n^2 - (R_n^2 - Ri^2)T_0}{T_1} \right]^{1/2}$$

$$(f) \quad \Delta D_1 = \frac{R_i - Ri_1}{R_i} * 100$$

Burada;

$R_o$  : Disk numunesinin başlangıçtaki dış yarıçapı

$R_i$  : Disk numunesinin başlangıçtaki iç yarıçapı

$R_{i1}$  : Disk numunesinin deformasyondan sonraki iç yarıçapı

$T_o$  : Disk numunesinin ilk yüksekliği

$T_1$  : Disk numunesinin deformasyondan sonraki yüksekliği

$R_n$  : Disk numunesinin nötr yarıçapı

$\Delta D_1$  : % deformasyon oranı

$m$  : Ara yüzey sürtünme faktörü

$\mu$  : Sürtünme katsayısı

Bilgisayar programına, disk numunesinin ilk boyutları girilerek çözüme başlanır ( $R_o$ : 18 mm,  $R_i$ : 9 mm ve  $T_o$ : 6 mm). Ara yüzey sürtünme faktörü  $m$ , sıfırdan bir'e kadar 0.01 artımlarla, yükseklik boyunca deformasyon başlangıç değerinden başlayarak ( $T_o$ ) % 60 deformasyon değerine kadar ( $0.60 T_o$ ), 0.025 artımlarla, "Do" döngüsü kullanılarak hesaplamalar yaptırılmıştır.

**EK. 2**

Disk basma testinin bronz malzeme ve  $\mu=0.57$  sürtünme katsayısı için ANSYS' de modellenmesinde kullanılan input verileri.

```

/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.4      UP19970828      16:32:26      07/01/1999
/input,menust,tmp          ,,,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PREP7
RECTNG,.0045,.009,0,.003,
K,5,0,.003,0,
K,6,.015,0.003,0,
LSTR,      5,      6
!*
UIMP,1,EX, , , ,135e9,
UIMP,1,DENS, , , ,8840,
UIMP,1,ALPX, , , ,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , , ,.3,
UIMP,1,PRXY, , , ,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , , ,
UIMP,1,C, , , ,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , , ,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,
!*
!*
UIMP,2,EX, , , ,
UIMP,2,DENS, , , ,
UIMP,2,ALPX, , , ,
UIMP,2,REFT, , , ,
UIMP,2,NUXY, , , ,
UIMP,2,PRXY, , , ,
UIMP,2,GXY, , , ,
UIMP,2,MU, , , ,.57,
UIMP,2,DAMP, , , ,
UIMP,2,KXX, , , ,
UIMP,2,C, , , ,
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,EMIS, , , ,
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,MURX, , , ,
UIMP,2,MGXX, , , ,

```

```

UIMP,2,RSVX, , , ,
UIMP,2,PERX, , , ,
UIMP,2,VISC, , , ,
UIMP,2,SONC, , , ,
!*
TB,MKIN,1, , , ,
!*
TBMODIF,1,2,0.002
TBMODIF,1,3,0.04
TBMODIF,1,4,0.08
TBMODIF,1,5,0.17
TBMODIF,2,2,270000000
TBMODIF,2,3,346000000
TBMODIF,2,4,366000000
TBMODIF,2,5,398000000
TBPLOT,MKIN,1,
!*
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
!*
!*
ET,1,PLANE82
!*
ET,2,CONTA172
!*
ET,3,TARGE169
!*
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
!*
!*
R,1, , ,3,.1,1e-5, ,
RMORE, , ,140e6,
!*
LPLOT
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y

```

```

LESIZE, _Y1, , , 9, 1,
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
!*
FLST, 5, 2, 4, ORDE, 2
FITEM, 5, 2
FITEM, 5, 4
CM, _Y, LINE
LSEL, , , , P51X
!*
CM, _Y1, LINE
CMSEL, , _Y
LESIZE, _Y1, , , 6, 1,
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
!*
MSHAPE, 0, 2D
MSHKEY, 0
!*
CM, _Y, AREA
ASEL, , , , 1
CM, _Y1, AREA
CHKMSH, 'AREA'
CMSEL, S, _Y
!*
AMESH, _Y1
!*
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
CMDEL, _Y2
!*
LPLLOT
TYPE, 3
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
!*
LMESH, 5
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
!*
!*
ESURF, _Z1, BOT
!*
/PSF, DEFA, , 1
/PBF, DEFA, , 1
/PSYMB, CS, 0
/PSYMB, NDIR, 0
/PSYMB, ESYS, 1
/PSYMB, LDIR, 0
/PSYMB, ECON, 0
/PSYMB, DOT, 1
/PSYMB, PCONV,
/PSYMB, LAYR, 0
!*
/PBC, ALL, , 1
/REP
!*

```

```

FLST,2,9,2,ORDE,3
FITEM,2,56
FITEM,2,58
FITEM,2,-65
EDELE,P51X
/SOLU
FINISH
/SOLU
!*
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NROPT,AUTO, ,
LUMPM,0
EQSLV,SPAR,1e-008,0,
SSTIF
PSTRES
TOFFST,0,
!*
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
DK,P51X, ,0, ,1,UY
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-6
DK,P51X, ,0, ,1,UX
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-6
DK,P51X, ,-1.8e-3, ,1,UY
!*
OUTRES,ALL,ALL,
ERESX,NO
!*
TIME,.24
AUTOTS,1
DELTIM,1e-5,1e-6,1e-2,1
KBC,0
!*
!*
SOLCONTROL,ON,0
!*
!*
CNVTOL,U, ,0.00001,2, ,
!*
!*
PRED,ON, ,ON
/STAT,SOLU
SOLVE

```

**EK. 3**

Açık kalıp-geri ekstrüzyon testinin alüminyum malzeme,  $H/D=1.0$ ,  $d/D=0.25$  ve  $\mu=0.3$  sürtünme katsayısı için ANSYS' de modellenmesinde kullanılan input verileri.

```

/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 5.4      UP19970828      11:26:48      07/02/1999
/input,menust,tmp          ,,,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PREP7
RECTNG,0,6e-3,0,12e-3,
K,5,0,0,0,
K,6,.015,0,0,
K,7,.0015,.02,0,
K,8,0.0015,.012,0,
K,9,.015,0.012,0,
LSTR,      5,      6
LSTR,      7,      8
LSTR,      8,      9
!*
LFILLT,6,7,2e-3, ,
KDELE,      8
!*
UIMP,1,EX, , , ,72.5e9,
UIMP,1,DENS, , , ,2700,
UIMP,1,ALPX, , , ,
UIMP,1,REFT, , , ,
UIMP,1,NUXY, , , ,.27,
UIMP,1,PRXY, , , ,
UIMP,1,GXY, , , ,
UIMP,1,MU, , , ,
UIMP,1,DAMP, , , ,
UIMP,1,KXX, , , ,
UIMP,1,C, , , ,
UIMP,1,ENTH, , , ,
UIMP,1,HF, , , ,
UIMP,1,EMIS, , , ,
UIMP,1,QRATE, , , ,
UIMP,1,MURX, , , ,
UIMP,1,MGXX, , , ,
UIMP,1,RSVX, , , ,
UIMP,1,PERX, , , ,
UIMP,1,VISC, , , ,
UIMP,1,SONC, , , ,
!*
!*
UIMP,2,EX, , , ,
UIMP,2,DENS, , , ,
UIMP,2,ALPX, , , ,
UIMP,2,REFT, , , ,
UIMP,2,NUXY, , , ,
UIMP,2,PRXY, , , ,
UIMP,2,GXY, , , ,
UIMP,2,MU, , , ,.3,
UIMP,2,DAMP, , , ,
UIMP,2,KXX, , , ,

```



```

UIMP,2,C, , , ,
UIMP,2,ENTH, , , ,
UIMP,2,HF, , , ,
UIMP,2,EMIS, , , ,
UIMP,2,QRATE, , , ,
UIMP,2,MURX, , , ,
UIMP,2,MGXX, , , ,
UIMP,2,RSVX, , , ,
UIMP,2,PERX, , , ,
UIMP,2,VISC, , , ,
UIMP,2,SONC, , , ,
!*
TB,MKIN,1, , , ,
!*
!*
FINISH
/FILNAM,a125s30
!*
MPLIST,ALL, , , EVLT
/PREP7
!*
TBMODIF,1,2,0.002
TBMODIF,1,3,0.039
TBMODIF,1,4,0.078
TBMODIF,1,5,0.117
TBMODIF,2,2,145000000
TBMODIF,2,3,195000000
TBMODIF,2,4,213000000
TBMODIF,2,5,221000000
TBPLOT,MKIN,1,
!*
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
!*
!*
ET,1,PLANE82
!*
ET,2,CONTA172
!*
ET,3,TARGE169
!*
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0

```

```

!*
!*
R,1, , ,3,.1,1e-5, ,
RMORE, , ,90e6,
!*
L/PLOT
/SOLU
FINISH
/SOLU
/PREP7
FINISH
/PREP7
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,30,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
!*
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1, , ,20,1,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2
!*
L/PLOT
TYPE, 3
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
!*
FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-8

```

```
LMESH, P51X
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
!*
!*
ESURF, _Z1, BOT
!*
/PSF, DEFA, , 1
/PBF, DEFA, , 1
/PSYMB, CS, 0
/PSYMB, NDIR, 0
/PSYMB, ESYS, 1
/PSYMB, LDIR, 0
/PSYMB, ECON, 0
/PSYMB, DOT, 1
/PSYMB, PCONV,
/PSYMB, LAYR, 0
!*
/PBC, ALL, , 1
/REP
!*
/UI, MESH, OFF
FLST, 2, 20, 2, ORDE, 20
FITEM, 2, 606
FITEM, 2, 637
FITEM, 2, 639
FITEM, 2, 641
FITEM, 2, 643
FITEM, 2, 645
FITEM, 2, 647
FITEM, 2, 649
FITEM, 2, 651
FITEM, 2, 653
FITEM, 2, 655
FITEM, 2, 657
FITEM, 2, 659
FITEM, 2, 661
FITEM, 2, 663
FITEM, 2, 665
FITEM, 2, 667
FITEM, 2, 669
FITEM, 2, 671
FITEM, 2, 674
EDELE, P51X
/SOLU
FINISH
/SOLU
!*
ANTYPE, 0
NLGEOM, 1
NROPT, AUTO, ,
LUMPM, 0
EQSLV, SPAR, 1e-008, 0,
SSTIF
ESTRES
TOFFST, 0,
!*
/PREP7
```

```

FINISH
/PRÉP7
!*
FLST,5,1,2,ORDE,1
FITEM,5,601
CM,_Y,ELEM
ESEL,, , ,P51X
CM,_Y1,ELEM
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,,_Y1
ESURF,,REV
CMSEL,,_Y
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
!*
/SOLU
FINISH
/SOLU
FLST,2,2,3,ORDE,2
FITEM,2,5
FITEM,2,-6
DK,P51X, ,0, ,1,UX,UY
FLST,2,6,3,ORDE,5
FITEM,2,1
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,9
FITEM,2,-11
DK,P51X, ,0, ,1,UX ,2,4,3,ORDE,3
FITEM,2,7
FITEM,2,9
FITEM,2,-11
DK,P51X, ,-7.2e-3, ,1,UY
!*
OUTRES,ALL,ALL,
ERESX,NO
!*
TIME,24
AUTOTS,1
DELTIM,1e-4,1e-5,1e-2,1
KBC,0
!*
!*
TIME,24
AUTOTS,1
DELTIM,0.001,1e-004,0.1,1
KBC,0
!*
!*
SOLCONTROL,ON,0
!*
!*
CNVTOL,U, ,0.00001,2, ,
!*
!*
PRED,ON,,ON
/STAT,SOLU
SOLVE

```

## 9. ÖZGEÇMİŞ

**Hasan GEDİKLİ**, 1972 yılında Trabzon' un Akçaabat ilçesinde doğdu. İlk öğrenimini Akçaabat Merkez İlkokulunda, ortaokulu Akçaabat Ortaokulunda, liseyi Akçaabat Lisesinde tamamladı. 1992 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1996 yılında aynı bölümden Makine Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Batı-Söke Çimento fabrikası montajında beş ay şantiye şefliği yaptı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Mayıs 1999 yılından itibaren aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Yabancı dil olarak İngilizce ve Almanca bilmektedir.

