

**YASSI ÇELİK MAMULLERİN SICAK HADDELENMESİNDE HADDELEME YÜKÜNÜN  
HESAPLANMASINDA KULLANILAN METODLARIN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Met. Müh. İbrahim TOZLU**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 SUBAT 1992**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 19 SUBAT 1992**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Eyüp Sabri KAYALI**

**Diğer Juri Üyeleri : Prof.Dr. Feridun DİKEÇ  
Prof.Dr. Niyazi ERUSLU**

**SUBAT 1992**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

## ÖNSÖZ

Bu tezin alınmasında ve her aşamasında fikir, öne-ri ve desteğinden faydalandığım saygıdeğer hocam Sayın Prof.Dr. E.Sabri KAYALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezle ilgili verilerin toplanmasında ve yürütülme-sinde her bakımından destek veren Erdemir İşletmeler Ge-nel Müdür Yardımcısı Sayın Kerim DERVİŞOĞLU'na ve yine her türlü teşvik ve desteklerini esirgemeyen Haddehan-e-ler Başmüdürü Sayın Atemer GİYİCİ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca verilerin toplanmasında destek gördüğüm Sıcak Haddehan Müdürü Sayın Halil KARTAL'a ve Baş Mühendisi Sayın Mehmet AYDIN'a bilgisayar programının hazırlanmasında sürekli yardımcı olan Sıcak Haddehan İşletme Mühendisi Sayın Ahmet TAŞKIN'a teşekkür etmek isterim.

ŞUBAT, 1992

Met.Müh.İbrahim TOZLU

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
BÖLÜM 2. YASSI MAMULLERİN HADDELENMESİNDE KULLANILAN STANDART TERİMLER VE EZME BÖLGESİ GEOMETRİSİ.....	3
2.1. Kullanılan Standart Terimler.....	3
2.1.1. Ortalama Şerit Kalınlığı.....	3
2.1.2. Ezme Miktarı.....	4
2.1.3. Ezme Oranı.....	4
2.1.4. Kapma Açısı.....	4
2.1.5. Temas Boyu.....	4
2.1.6. Nötr Nokta.....	5
2.2. Deformasyon Bölgesinin Geometrisi.....	5
2.2.1. Deformasyon Bölgesinin Aritmetik Ortalama En-Boy Oranı.....	6
2.2.2. Deformasyon Bölgesinin Geometrik Ortalama En-Boy Oranı.....	6
2.2.3. Deformasyon Bölgesinin Parabolik Ortalama En-Boy Oranı.....	6
2.3. Hadde Yassılılaşması.....	7
BÖLÜM 3. SÜRTÜNME KATSAYISI VE KUVVETİ.....	9
3.1. Sürtünme Çeşitleri ve Sürtünme Kuvveti.....	10
3.1.1. Von Karman Çözümü.....	11
3.1.2. Ekelund Çözümü.....	11
3.1.3. Siebel Çözümü.....	11
3.1.4. Nadia Çözümü.....	12
3.1.5. Tselikov Çözümü.....	12
3.2. Sürtünme Katsayısi.....	14

<b>BÖLÜM 4. SICAK HADDELEMEDE MALZEME MUKAVEMETİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRER.....</b>	<b>18</b>
4.1. Sıcaklığın ve Kimyasal Bileşimin Mukavemete Etkisi.....	18
4.1.1. Sıcaklığın Etkisi.....	18
4.1.2. Sıcaklığın ve Kimyasal Bileşimin Etkisi.....	19
4.2. Deformasyon Hızı.....	21
4.2.1. Deformasyon Hızının Hesaplanması- da Kullanılan Bağıntılar.....	21
4.2.2. Ford-Alexander Çözümü.....	22
4.2.3. Sims Çözümü.....	22
4.2.4. Drowan Çözümü.....	22
4.2.5. Wusatowski Çözümü.....	23
4.2.6. Dinamik Akma Gerilmesi.....	24
<b>BÖLÜM 5. HADDELEME YÜKÜNÜN HESAPLANMASINDA KULLANILAN BAĞINTILAR.....</b>	<b>27</b>
5.1. Sims Metodu.....	29
5.2. Cook-McCrum (Bisra) Metodu.....	32
5.3. Ford Alexander Metodu.....	32
5.4. Denton-Crane Metodu.....	33
5.5. Green Wallace Metodu.....	33
5.6. Ekelund Metodu.....	34
5.7. Ride Metodu.....	35
5.8. Geleji Metodu.....	36
5.9. Tselikov Metodu.....	37
<b>BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>38</b>
6.1. Kullanılan Malzemeler.....	38
6.2. Kullanılan Hadde Tezgahının Özellik- leri.....	38
6.3. Verilerin Toplanması.....	39
6.3.1. Sıcaklık.....	39
6.3.2. Haddeleme Hızı.....	40
6.3.3. Hadde Giriş-Çıkış Katsımlıkları ve Ezme Oranı.....	40
6.3.4. Haddeleme Yükü ve Motor Akımı.....	40

6.3.5. Merdane Yarı Çapı.....	41
6.3.6. Şerit Genişliği.....	41
6.3.7. Karbon ve Manganez Değerleri.....	41
6.4. Verilerin Değerlendirilmesi.....	41
6.5. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	44
<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>66</b>
<b>EK-1 VERİLER.....</b>	<b>68</b>
<b>EK-2 YARDIMCI BİLGİSAYAR PROGRAMI.....</b>	<b>69</b>
<b>EK-3 ANA BİLGİSAYAR PROGRAMI.....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>92</b>

## SEMBOLLER

$h_1$	= Malzemenin haddeye giriş kalınlığı (mm)
$h_2$	= Malzemenin haddeden çıkış kalınlığı (mm)
$h_a$	= Ortalama şerit kalınlığı (mm)
$\Delta h$	= Ezme miktarı (mm)
$h_n$	= Nört noktadaki şerit kalınlığı (mm)
$r$	= Ezme oranı
$h_y$	= Yağ filminin kalınlığı
$L$	= Temas boyu (mm)
$R$	= Merdane yarı çapı (mm)
$R'$	= Yassılaşmış merdane yarı çapı
$N$	= Merdane dönmeye hızı (dev/dak.)
$V$	= İş merdanesinin yüzey hızı (m/s)
$V_x$	= Haddelenen malzemenin hızı (m/s)
$X_n$	= Nötr nokta ile X noktası arasındaki uzunluk (mm)
$E$	= İş merdanesinin elastik modülü
$W$	= Haddelenen malzemenin genişliği
$\alpha$	= Kapma açısı
$Z_a$	= Deformasyon bölgesinin aritmetik ortalama en-boy oranı.
$Z_g$	= Deformasyon bölgesinin geometrik ortalama en-boy oranı.
$Z_p$	= Deformasyon bölgesinin parabolik ortalama en-boy oranı.
$\nu$	= Poisson oranı
$T$	= Sıcaklık ( $^{\circ}$ C)
$T_s$	= Sürtünme kuvveti
$\Delta T$	= Sıcaklık değişimi ( $^{\circ}$ C)
$T_o$	= Şeritin giriş sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)
$T_F$	= Şeritin çıkış sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)
$T_H$	= Haddeleme sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)
$T_{Hi}$	= İ pasosundaki haddeleme sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)

- $\mu$  = Sürtünme Katsayısı  
 $\gamma$  = Akma gerilmesi  
 $S$  = Dinamik akma gerilmesi  
 $S_0$  = Hadde açıklığı (mm)  
 $S_1$  = Hadde açıklığı sıfır iken göstergeden okunan açıklık değeri.  
 $F$  = Haddeleme yükü  
 $F_o$  = Ön yüklemeye (ton)  
 $F_m$  = Ölçülen haddeleme yükü (ton)  
 $F_h$  = Hesaplanan haddeleme yükü (ton)  
 $F_s$  = Sürtünme kuvveti  
 $F_x, F_y$  = Eksenel gerilmeler  
 $M$  = Hadde tezgahı modülü  
 $P_n$  = Normal kuvvet  
 $G$  = Tufal kalınlığı  
 $g$  = Merdane yüzey pürüzlülüğü (mikron)  
 $K$  = Deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )  
 $K_v$  = Geleji hız etkisi katsayısı,  
 $C_g$  = Geleji geometrik faktörü,  
 $D$  = Tselikov faktörü  
 $\dot{\epsilon}$  = Ortalama deformasyon hızı  
 $A$  = Ezme oranına bağlı sims faktörü  
 $Q_p$  = Sims geometrik faktörü  
 $C_p$  = Cook-McCrum geometrik faktörü  
 $I_p$  = Ezme oranına ve deformasyon hızına bağlı faktör  
 $M_a$  = Ölçülen motor akımı  
 $P_s$  = Paso sayısı  
 $a, b$  = Sabit  
 $a_0 \dots a_8$  = Ride metodu sabitleri  
 $n$  = Plastisite katsayısı

## ÖZET

Yassı mamüllerin sıcak haddelenmesinde haddeleme yükünün hesaplanmasında kullanılan literatürde önerilen metodlarla hesaplanan yükler ile ölçülen yükler arasında az yada çok daima bir sapma bulunmaktadır. Zire yükü etkileyen faktörlerin (mukavemet, sürtünme katsayısı, ezme hızı ve miktarı gibi) kompleks oluşu ve değerlerinin tam olarak tesbitinin zor olması ölçülen ile hesaplanan yükler arasında farklılıklara yol açmaktadır. Her hadde tezgahının kendine has özellikleri bulunması nedeniyile ezme bölgesinin geometrisi hadde tezgahının özelliklerine göre değişmektedir.

Bu çalışmada yassı çelik mamullerin sıcak haddelenmesinde haddeleme yüküne etki eden faktörler incelenmiş dokuz ayrı metodla hesaplanan haddeleme yüklerinin ölçülen yüklerle karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla dörtlü tersinir haddeden Fe-33, Fe-37 ve Fe-44 kalite çeliklerin haddelenmesi sırasında alınan veriler bir bilgisayar programı yardımı ile her metod için yük ve deformasyon direnci, akma ve dinamik akma gerilmeleri deformasyon hızı ve ezme oranları, farklı kalite çelik deformasyon hızı ve sıcaklık değerleri için hesaplatılmıştır.

Haddeleme yükünü etkileyen sürtünme katsayısı ve kuvveti, akma ve dinamik akma gerilmesi, ezme bölgesi geometrisi ve bunlara etki eden faktörler incelenip, literatürde önerilen farklı matematik modeller kullanılarak, haddeleme yükleri hesaplatılıp ölçülen yüklerle karşılaştırılmıştır.

Hazırlanan bir bilgisayar programı yardımı ile teorik yükler hesaplatılmış, teorik yükler ile ölçülen yükler arasındaki korelasyon ve korelasyon sabitleri "en küçük kareler" metodu ile bulunarak her metodun ölçülen yükle olan bağıntısı elde edilmiştir.

Geometrik faktör, karbon miktarı, sıcaklık ve deformasyon hızının deformasyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ölçülen haddeleme yükü ve motor akımı arasındaki doğrusal ilişkisi veren bir bağıntı elde edilmiştir.

# AN INVESTIGATION FOR THE VALIDITY OF DIFFERENT LOAD CALCULATION MATHEMATICAL MODELS(METHODS)FOR THE HOT ROLLING OF FLAT PRODUCTS

## SUMMARY

In the present work, nine different load calculation methods for the hot rolling of flat products are investigated.

The factors used in these methods that affect rolling load are studied. These factors are the deformation zone geometry, external friction in the deformation zone and the factors affecting strength of the material.

Standard terms used in theories of flat rolling are: average work piece thickness, draft, relative reduction, roll bite angle and roll contact length.

Many factors affect rolling load, one of them is aspect ratio of the rolling deformation zone which is described in one of the following three terms;

- 1- Arithmetic average aspect ratio,  $Z_a$ .
- 2- Parabolic average aspect ratio,  $Z_p$ .
- 3- Geometric mean aspect ratio,  $Z_g$ .

A number of solutions have been proposed for type and magnitude of coefficient of friction and distribution of frictional force in the roll bite of hot mill. Although distribution of frictional force is different at the roll-strip interfaces according to different theories, there are two types of friction. These are slipping and sticking friction.

It is well known that friction between the rolls and the workpiece is necessary to transmit deformation energy from the rolls to the strip. Excessive friction however, tends to restrain the deformation and results in undesirably high rolling force and spindle torques. On the other hand, too little friction results in either roll slippage or the failure of workpiece to enter the roll bite.

The value of the friction coefficient depends on temperature, scale condition of workpiece surface type of roll, surface condition and state of lubricant. The values of the effective coefficient of friction in the roll bite of a hot mill changes from 0.2 to 0.5. in the roll bite.

In order to compute the rolling force in a particular stand of a hot strip mill, it is necessary to know the flow stress at the temperature and strain rate associated with the deformation at that stand. A number of expressions have been developed empirically relating the flow stress (or dynamic constrained flow stress) to the temperature and the average strain rate for steel.

Turokh and Seredynski developed an expression using Sims' method based on sticking friction. They also proposed another equation based on sliding friction in the temperature range 1500 to 2300°F for flow stress.

Ekelund derived an equation for yield stress of the rolled material corresponding to a given temperature and chemical composition. Geleji proposed an equation to calculate yield stress of the rolled material based on rolling temperature.

The most important factor affecting flow stress or yield stress of rolled material is temperature. The temperature distribution within a coil at any instant during the rolling process is determined by a number of factors which may be classified into two groups; those that impart heat to the workpiece and those that cool it. The piece may acquire heat by (1) its deformation (2) frictional effects in the roll bites, (3) oxidation or scaling of the workpiece surfaces, (4) physical and metallurgical changes occurring in the piece, and (5) heating such as may be introduced into heat-shields

located on crop shear tables. Heat may be lost by the piece by (1) direct conduction of the work rolls and table rolls (2) radiation, (3) air cooling, and (5) heat conduction within the piece.

The rate of deformation of an element of a work-piece as it passes through a roll bite decreases as the elements moves from the entry to the exit end of the bite. For computational purposes, however, it is desirable, for reasons of mathematical simplicity, to use an effective average value of the strain rate.

Five solutions are proposed for mean strain rate. These are:

- a)- Ford and Alexander's solution
- b)- Sims' solution
- c)- Drowan and Pascoe's solution
- d)- Wusatowski's solution

Although a number of equation were driven to calculate strain rate, they were expressed as a function of the roll speed and the reduction divided by the length of the contact area.

Many mathematical methods have been proposed to calculate rolling load for hot rolling of steel. Nine of these methods are studied and used in this study for rolling load calculation of steel flat products. These methods are:

- 1- Sims' method
- 2- Cook-McCrumb's method
- 3- Ford-Alexander's method
- 4- Denton-Cranc's method
- 5- Green-Wallace's method
- 6- Ekelund's method

7- Ride's method

8- Geleji's method

9- Tselikov's method

Among these nine methods, Sims, Alexander-Ford, Denton Crane, Green Wallace used mean constrained yield stresses; Geleji, Tselikov and Ekelund used yield stress corresponding to a given temperature and chemical composition for rolling load calculations. It is important to know that Ekelund's method is valid for the following conditions: minimum rolling speed is 7m/s and maximum manganese content is 1%.

Another restriction about yield stress used in Geleji's method is that yield stress value is valid for carbon steels of a tensile strength up to 60 kg/mm<sup>2</sup> and in a temperature range of 800 to 1300°C.

Ride has utilized a statistical analysis of the rolling mill data in order to derive an empirical formula for the calculation the roll separating force. In this formula, each of the parameters affecting the roll separating force was included as a parabolic function. These parameters are roll peripheral speed, strip temperature, per cent reduction and roll contact length. The resulting equation is obtained from a correlation by the method of least squares.

Data used in this work were collected from the 1676-mm reversible hot strip mill in Ereğli Iron and steel works consists of a 4-high powered by two 2500-hp drive motor.

Tests with different rolling conditions on plain carbon steels (Fe-33, Fe-37, Fe 44) were performed and data is evaluated by a computer program in order to find adequate rolling load calculation method or methods for hot flat rolling of steel strip which gives satisfactory results when compared with measured loads.

The following rolling parameters were measured:

i)- Incoming temperature and thickness of bar

- ii-) Roll gap-set
- iii-) Rolling load and motor current
- iv-) Outgoing temperature and thickness
- v-) Strip width after last pass.

Data collected from hot strip mill were stored in a computer Appendix-1. To calculate rolling load; entry and exit thicknesses and temperatures for each pass were calculated by a subprogram presented at Appendix-2.

Rolling load for each of the nine methods used in this work was calculated by a computer program and compared with measured load.

Strain rate and deformation resistance were calculated according to the equations given in each of these methods. At the same time, the deformation resistances are also calculated by using measured load and compared with calculated deformation resistance values of the methods.

The first objective of this study was to compare calculated and measured rolling loads in order to find adequate method or methods for calculation of rolling load which can be used to obtain optimum rolling conditions such as rolling speed, number of pass, draft and rolling temperature.

Comparative curves drawn for measured and calculated rolling load showed that there is always some deviation between calculated and measured rolling loads for each of these methods because of the difficulties to determine accurately the factors affecting rolling load such as flow stress, draft, coefficient of friction and geometry of deformation zone in the hot rolling of steel flat products.

The results of this study showed that Geleji's method gave the best result for calculation of rolling load when its calculated values compared to measured load values.

Some load values calculated by Ride's method gave large scatter according to measured loads. This scatter may be related to the high sensitivity to per cent reduction of Ride's method. Measurement error in thickness for each reduction which is less than 0.22 mm affects the load value obtained from Ride's method especially at small drafts. If the true per cent reduction value is determined, Ride's method gives adequate load values.

The rolling load values obtained by Ekelund's method gave 30-40% standart error against measured load. Sims, Ford-Alexander, Cook-McCrumb, Denton-Craen, Green Wallace and Tselikov's methods gave approximately 60-70 % standart error against measured rolling load. These results are probably due to inadequate geometric factor of deformation zone and improper rolling speed effect used in these methods.

The deformation resistance of Fe-44 steel increased with increasing geometric factor. It also increased with increasing deformation rate at a constant temperature and reduction and decreased with increasing temperature at a constant deformation rate and reduction.

A linear relation between measured rolling load and motor current was found. The motor current increased linearly with increasing rolling load.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Malzemeleri, eksenleri etrafında dönen iki silindir (merdane) arasından geçirerek yapılan plastik şekil verme işlemeye haddeleme denir [1].

Haddeleme, Üretim hızı ve sürekliliği ile, işlemin ve ürünün kolay kontrol edilmesi nedeniyle en çok kullanılan plastik şekil verme yöntemidir [1].

Haddelemede malzemenin plastik şekil değişimi, merdanelerin malzemeye uyguladığı yüklerin etkisiyle olmaktadır. Plastik şekil değiştirme hızı (deformasyon hızı) ise merdanelerin dönme hızı ile doğru orantılıdır.

Haddeleme işleminin, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde yapılması sıcak haddeleme, altında yapılması ise soğuk haddeleme olarak adlandırılır. Sıcak haddelemede, soğuk haddelemeye göre daha az yük ile çok daha fazla ezme vererek kesit alanda büyük oranda azalma ve boyca uzama sağlanmaktadır.

Yassı çelik mamullerin sıcak haddelenmesinde, malzemelerin yüzey özellikleri (kalınlık dağılımı, kenar orta kalınlık farkı gibi) ve harcanan elektrik enerjisi haddeleme yükü ile yakından ilişkilidir. Bu yüzden birim zamanda Üretimin artırılması sağlanırken, ürünün kalitesinin arzu edilen özelliklerde olmasının sağlanabilmesi için haddeleme işleminin optimum şartlarda (sıcaklık, pası sayısı, haddeleme hızı gibi) yapılması kaçınılmazdır. Zira bir ürünün istenilen özelliklerde yani kalitede üretilmesi kadar, o ürünün mümkün olduğu kadar düşük maliyette üretilmesi, günümüz piyasasında rekabet için temel şarttır.

Motor güçlerinin sınırlı olduğu da gözönüne alınırsa optimum şartların sağlanmasında haddeleme yükü kriter olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada, önce sıcak haddelemede haddeleme yüküne etki eden faktörler ve yükün hesaplanması sırasında kullanılan çeşitli matematik modeller incelenmiştir. Deneysel çalışma ise, Ereğli Demir Çelik Fabrikaları (ERDEMİR)I. Şerit Hadde tezgahından normal çalışma şartlarına uygun olarak Fe-33, Fe-37, Fe-44 kalite çeliklerden alınan veriler ile yapılmıştır. Literatürde önerilen matematik modeller kullanılarak hazırlanan bir bilgisayar programı yardımı ile haddeleme yükleri farklı matematik modeller için hesaplanmıştır. Bulunan bu teorik haddeleme yükleri haddeleme verilerinin alındığı hadde tezgahından ölçülen yükler ile karşılaştırılarak literatürdeki mevcut matematik modellerden gerçeğe en uygununun belirlenmesi amaçlanmıştır.

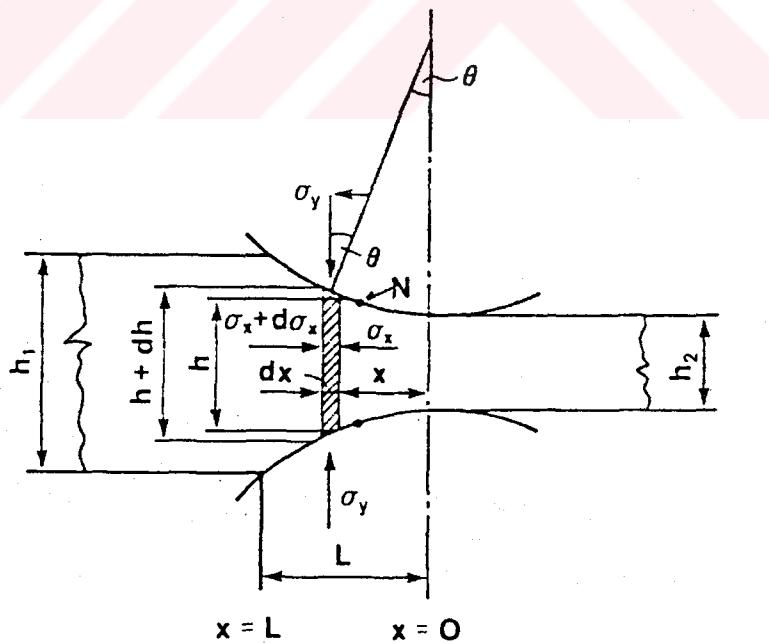
## BÖĞÜM 2. YASSI MAMULLERİN HADDELENMESİNDE KULLANILAN STANDART TERİMLER VE EZME BÖLGESİ GEOMETRİSİ

### 2.1. Kullanılan Standart Terimler

Yassi mamullerinin haddelenmesinde ve haddeleme yükünün hesaplanmasıında kullanılan terimler farklı sembollerle gösterilmesine karşılık ifade ettikleri anımlar ayındır. Bu terimler, aşağıda açıklanmıştır.

#### 2.1.1. Ortalama Şerit Kalınlığı

Ortalama şerit kalınlığı ( $h_a$ ), malzemenin haddeye girmeden önceki kalınlığı ( $h_1$ ) ile hadde çıkışındaki kalınlığının ( $h_2$ ) yarısına eşittir [2] (Şekil 2.1).



ŞEKİL: 2.1. Ezme Bölgesinin Şematik Görünümü [2].

$$h_a = (h_1 + h_2)/2 \quad (2.1)$$

### 2.1.2. Ezme Miktarı

Ezme miktarı ( $\Delta h$ ) malzemenin haddeye giriş kalınlığı ile çıkış kalınlığının farkına eşittir (Şekil 2.1) [2].

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (2.2)$$

### 2.1.3. Ezme Oranı

Ezme oranı ( $r$ ), bir pasodaki ezme miktarının ( $\Delta h$ ) malzemenin haddeye giriş kalınlığına bölümlüdür [2].

$$r = \Delta h / h_1 \quad (2.3)$$

### 2.1.4. Kapma Açısı

Hadde kapma açısı ( $\alpha$ ), malzemenin haddeye giriş düzleminin merdane merkezine birleştirildiği düzlem ile çıkış düzlemi arasındaki açıdır (Şekil 2.2) [2].

$$\alpha = \text{Arccos} (1 - \Delta h / 2R) \quad (2.4)$$

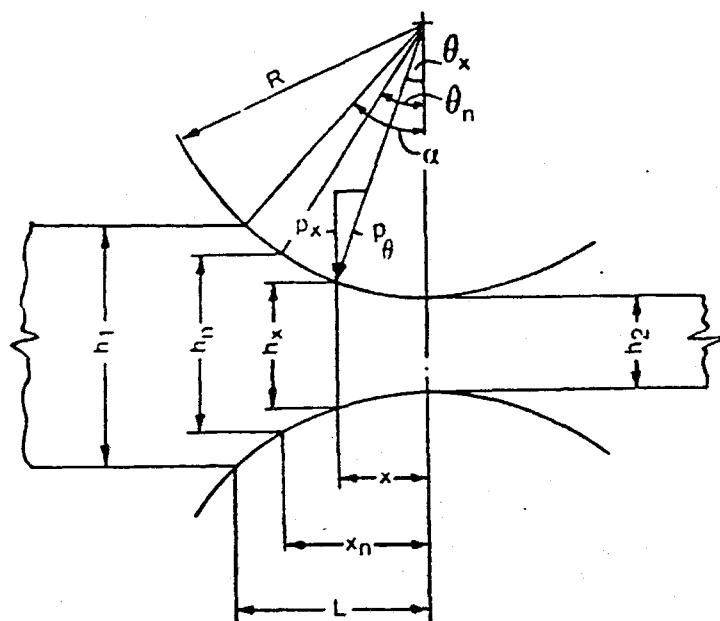
Burada;

R= Merdane yarıçapı (mm)

### 2.1.5. Temas Boyu

Temas boyu ( $L$ ), haddeleme esnasında ezme bölgesinde merdane-malzeme temas yayının izdüşümü olarak ifade edilir (Şekil 2.1) [2].

$$L = (R \Delta h - \frac{(\Delta h)^2}{4})^{1/2} \quad (2.5)$$



ŞEKİL: 2.2. Ezme Bölgesine Ait Parametreler [2].

$\Delta h^2/4$  şerit haddelemede küçük bir değer olacağından

$$L = (R \Delta h)^{1/2} \quad \text{alınabilir} \quad (2.6)$$

2.5. ve 2.6 nolu eşitliklerde hadde yassılaşması gözönüne alınmamıştır.

#### 2.1.6. Nötr Nokta

Nötr nokta ( $N$ ), ezme bölgesinde merdane hızı ile malzeme hızının eşit olduğu noktası olarak tarif edilmektedir [2] (Şekil 2.1).

#### 2.2. Deformasyon Bölgesinin Geometrisi

Deformasyon bölgesinin geometrisi haddeleme yükünün hesaplanmasıında önemli bir yer tutmaktadır. Haddeleme yükünün hesaplanması sırasında kullanılan metodlar ezme bölgesinin geometrisinin etkisi hakkında üç ayrı yaklaşım kullanılmışlardır [2]. Bunlar,

- a)- Deformasyon bölgesinin aritmetik ortalama en-boy oranı.
- b)- Deformasyon bölgesinin geometrik ortalama en-boy oranı.
- c)- Deformasyon bölgesinin parabolik ortalama en-boy oranı.

#### **2.2.1. Deformasyon Bölgesinin Aritmetik Ortalama En-Boy Oranı**

Aritmetik ortalama en-boy oranı, ( $Z_a$ ), ezme bölgesinde merdane ile malzeme temas yayı uzunluğu düz bir çizgi olarak kabul edilerek, temas boyunun (L) ortalama şerit kalınlığına oranı olarak ifade edilir [2].

$$Z_a = 2L/h_1 + h_2 \quad (2.7)$$

#### **2.2.2. Deformasyon Bölgesinin Geometrik Ortalama En-Boy Oranı**

Geometrik ortalama en-boy oranı ( $Z_g$ ), ezme bölgesinde merdane-malzeme temas uzunluğu aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir [2].

$$Z_g = L/(h_1 h_2) \quad (2.8)$$

#### **2.2.3. Deformasyon Bölgesinin Parabolik En-Boy Oranı**

Parabolik en boy oranı ( $Z_p$ ), merdane-malzeme temas yayı bir parabol olarak kabul edilmiş ve aşağıdaki bağıntısı ile verilmiştir [2].

$$Z_p = 3L/h_1 + 2h_2 \quad (2.9)$$

### 2.3. Hadde Yassılaşması

Haddeleme sırasında şerit malzemesinin plastik deformasyonu için uygulanan yük, aynı zamanda iş merdanesinin elastik deformasyonu sonucu merdane yassılaşmasına sebep olur. Böyle bir durumda merdanelerin yassılaşması şematik olarak Şekil 2.3'de verilmiştir. Şekil 2.3'den de anlaşılacağı gibi merdane yassılaşması sonucu [2]:

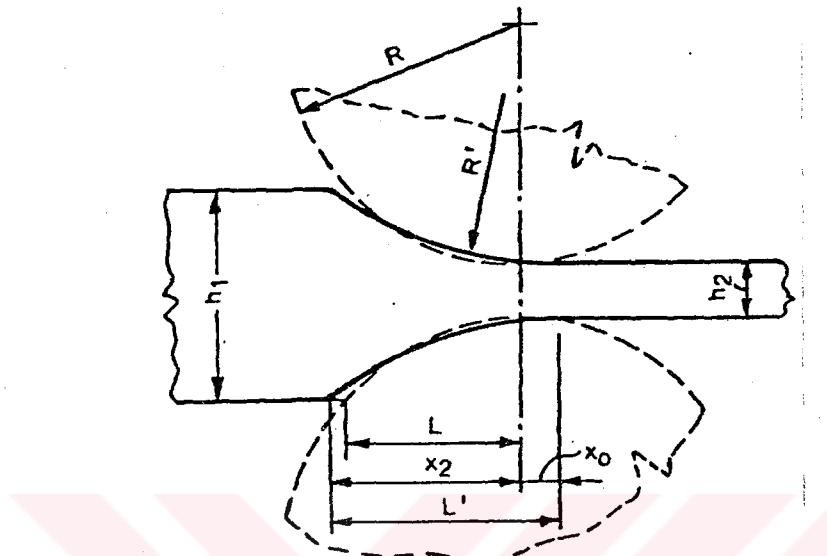
- a)- Merdane-malzeme temas boyu aynı ezme için artmakte,
- b)- Ezme bölgesinde oluşan giriş ve çıkış düzlemleri merdane ekseninin hem giriş hemde çıkış tarafına doğru kaymaktadır.

Ezme bölgesindeki temas yayı boyunca oluşan yük dağılımı eliptik kabul edilerek yassılaşmış merdane yarıçapı ( $R'$ ), Hitchcock tarafından çıkarılan bağıntıyla hesaplanabilir [2].

$$R' = R \left[ 1 + \frac{16 F(1-\nu^2)}{EW Ah} \right] \quad (2.10)$$

Burada;

- $R'$  = Yassılaşmış merdane yarı çapı
- $R$  = İş merdanesinin yassılaşmamış yarı çapı
- $\nu$  = Merdane malzemesinin poisson oranı
- $E$  = Merdanenin elastik modülü
- $F$  = Haddeleme yükü
- $W$  = Haddelenen malzemenin genişliği
- $Ah$  = Ezme miktarı



ŞEKİL: 2.3. Merdane Yassılaşmasının Şematik Görünüşü [2].

### BÖLÜM 3. SÜRTÜNME KATSAYISI VE KUVVETİ

Genel olarak sürtünme, birbiri ile temas eden ve bağıl olarak hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya harekete karşı gösterdikleri dirençtir [1].

Mühendislik ve fiziksel olayların çoğunda sürtünmenin etkisi sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) ile tanımlanır. Sürtünme katsayısının değeri temas eden malzemelerin yüzey özelliklerine, sıcaklığına ve yağlama durumuna göre değişmektedir [3]. Sürtünme katsayısının artması malzemelerin birbiri üzerindeki hareketini zorlaştıracaktır [3]. Diğer bir değişim ile hareket için gerekli kuvvet sürtünme katsayısının artması ile artarken malzemenin deformasyon kabiliyeti azalır.

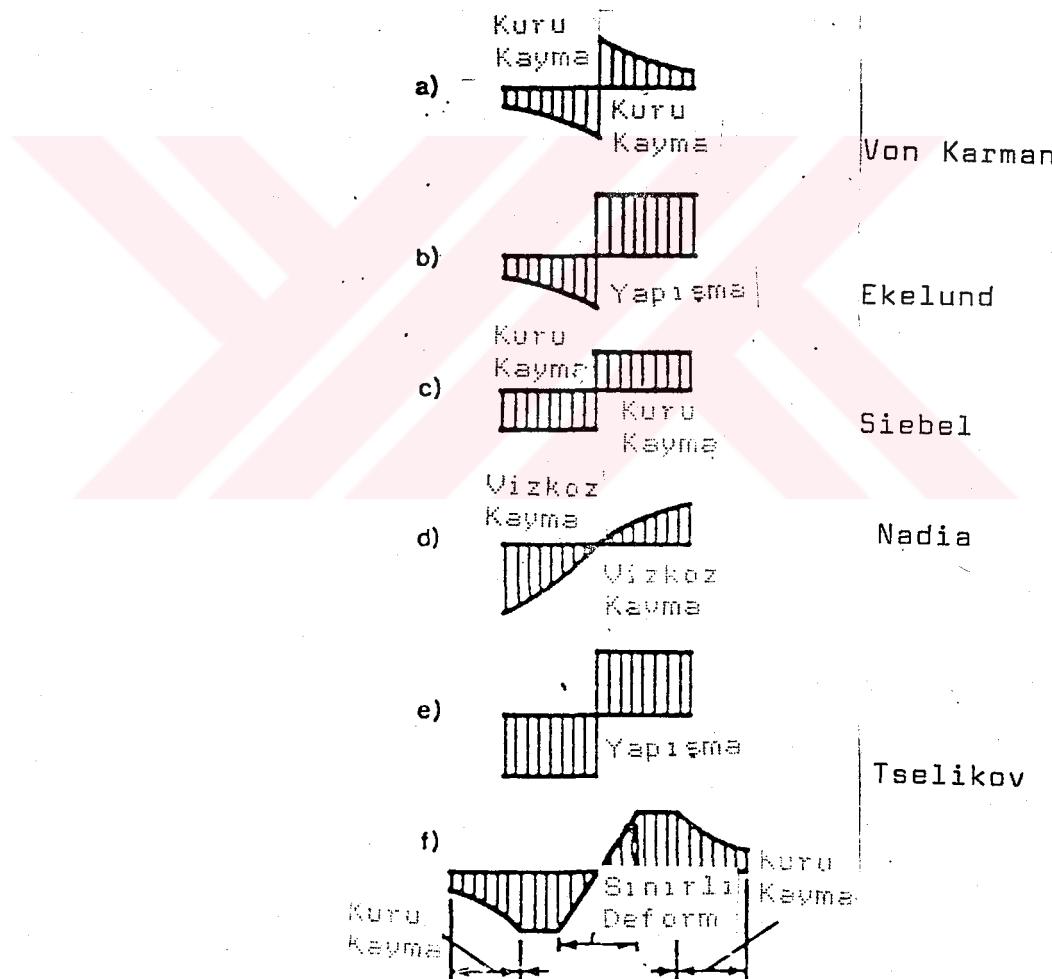
Sıcak haddelemede ezme bölgesinde oluşan etkin sürtünme katsayısı, iyi yağlama yapılmış bir soğuk haddeleme sisteminde meydana gelen sürtünme katsayılarından çok daha büyüktür. Sıcak haddelemede sürtünme katsayısı  $\mu > 0.2$  değerindedir. Ancak haddeleme sırasında sürtünme katsayısının değeri ve şeklinin temas olayı boyunca değişmesi sebebi ile değerinin tespitinin zor olmasından dolayı ortalama sabit bir sürtünme katsayısı kabul edilir [3].

Sürtünme çeşidi ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. İlk haddeleme uzmanları, sıcak haddelemede ezme bölgesinde yapışma sürtünmesinin (Sticking friction) meydana geldiğini (etkin sürtünme katsayısı yaklaşık 0.577) kabul etmişlerdir. Ancak günümüzde, merdane-malzeme

temas yayı boyunca kayma sürtünmesinin (slipping friction) meydana geldiği ve sürtünme katsayısunın daha düşük değerlerde olduğu genel olarak kabul edilen görüştür [3].

### 3.1. Sürtünme Çeşitleri ve Sürtünme Kuvveti

Ezme bölgesinde merdane-malzeme temas yayı boyunca sürtünme kuvvetinin etkisi ve çeşidi ile ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Şekil 3.1'de sürtünme çeşitleri ve sürtünme kuvvetinin temas yayı boyunca değişimi görülmektedir.



ŞEKİL: 3.1. Farklı Sürtünme Durumlarına Göre Sürtünme Çeşitleri ve Sürtünme Kuvvetinin Temas Yayı Boyunca Değişimi [2].

Haddeleme sırasında ezme bölgesinde sürüünme çesidi ve kuvveti ile ilgili farklı görüşler aşağıdaki bölümler de açıklanmıştır.

### 3.1.1. Von Karman Çözümü

Von Karman çözümü, haddeleme sırasında ezme bölgesinde malzeme ile merdane temas yayı boyunca kuru kayma sürüünmesinin (dry slipping friction) olduğunu ve aynı zamanda sürüünme kuvvetinin bölgesel normal kuvvet ile doğru orantılı olduğunu kabul etmektedir (Şekil 3.1.a) [2].

Buna göre;

$$F_s = M P_n \quad (3.1)$$

Burada;

$F_s$  = sürüünme kuvveti

$M$  = sürüünme katsayısı

$P_n$  = normal kuvvet

### 3.1.2. Ekelund Çözümü

Ekelund çözümü, ezme bölgesinde malzeme-merdane temas yayı boyunca nötr nokta ile giriş düzlemi arasında kuru kayma, nötr nokta ile çıkış düzlemi arasında ise yapışma sürüünmesi olduğunu kabul etmektedir (Şekil 3.1.b) [4].

### 3.1.3. Siebel Çözümü

Siebel çözümü, ezme bölgesinde merdane-malzeme temas yayı boyunca kuru kayma olduğu ve sürüünme kuvvetinin sabit olacağını kabul etmektedir (Şekil 3.1.c).

### 3.1.4. Nadia Çözümü

Nadia, ezme bölgesinde temas yayı boyunca viskoz kaymanın (viscous slipping) olduğunu ve aynı zamanda sürtünme kuvvetinin rölatif kayma hızı ile orantılı olduğunu kabul etmiştir (Şekil 3.1.d) [2].

$$F_s = M(V_x - V)h_y \quad (3.2)$$

Burada;

$F_s$  = sürtünme kuvveti

$V_x$  = Haddelenen malzemenin hızı

$V$  = İş merdanesinin yüzey hızı

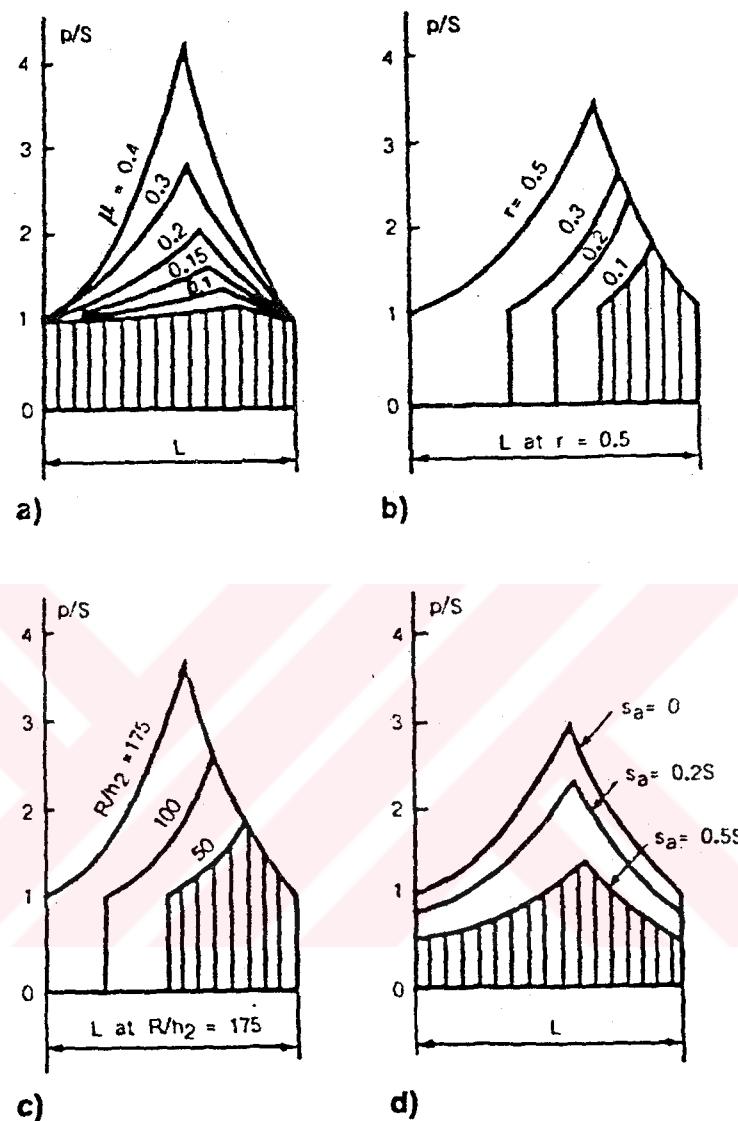
$h_y$  = Yağ filminin kalınlığı

### 3.1.5. Tselikov Çözümü

Tselikov çözümü, ezme bölgesinin ortasında sınırlanmış plastik deformasyon bölgesinin olması durumunu gözönüne almaktadır. Şekil 3.1.f'den de görüleceği gibi temas yayının giriş ve çıkış düzlemleri boyunca kuru kayma, arada ise yapışmanın olduğu kabul edilmektedir [2].

Merdane ile malzeme temas yayı boyunca normal kuvvetin değişimine sürtünme katsayısının, ezme miktarının, hadde yarı çapının şerit giriş kalınlığına oranının ve ortalama şerit gerilmesinin etkileri ise Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Deformasyon Direncinin Akma Gerilmesine Oranı



Temas boyu

**ŞEKİL: 3.2. Geniş Şerit Malzemelerin Haddelenmesinde Temas Yayı Boyunca Deformasyon Direncinin Akma Gerilmesine Oranının Değişimi ( $r=0.3$ ,  $\alpha=5^{\circ}41'$ )**

- Sürtünme Katsayısının etkisi,
- Ezmenin etkisi,
- Hadde yarı çapının şerit giriş kalınlığına oranının etkisi
- Giriş ve çıkışta uygulanan gerilmelerin etkisi [2].

### 3.2. Sürtünme Katsayısı

Yassı mamullerin sıcak haddelenmesinde sürtünme katsayısını etkileyen bir çok faktör vardır. Bu faktörler sıcaklık, yağlama, malzeme yüzeyinin tufal durumu ve iş merdanesinin yüzey şartlarıdır.

Yağlama yapılmadığı haddeleme şartlarında sıcaklık ( $T, {}^{\circ}\text{C}$ ) ile sürtünme katsayısı ( $M$ ) arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [3].

$$M = 2.7 \times 10^{-4} T - 0.08 \quad (3.3)$$

Yapılan araştırmalarda sıcak haddelemede sürtünme katsayısı için 0.2 ile 0.5 arasındaki değerler tesbit edilmiştir [3]. Denton ve Crane yapmış oldukları deneysel ve analitik araştırmalar neticesinde sürtünme katsayısının  $100 {}^{\circ}\text{C}$  de 0.25 değerinde ve  $1100 {}^{\circ}\text{C}$  de 0.4 değerine kadar yükseldiğini tesbit etmişlerdir [4].

1968 yılında El Kalay ve Sparling düşük karbonlu çelikler ile ilgili olarak  $1000, 1100, 1200 {}^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarında az, orta ve çok tufal miktarlarında düzgün (14-25 mikro inç'e taşlanmış) ve kaba yüzeyli (149-187 mikro inç'e taşlanmış) merdanelerle, haddeleme hızında yaklaşık sabit bir değere ( $4.55-5.12 \text{ s}^{-1}$ ) ayarlamak suretiyle çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, sürtünme katsayısı için aşağıdaki bağıntı bulunmuştur [5,6].

$$M = 36 \exp (-4810/(459+T)) + 0.063 \ln(g/G) \quad (3.4)$$

Burada;

$T$  = Haddeleme sıcaklığı ( ${}^{\circ}\text{F}$ )

$g$  = Mardane yüzey pürüzülüğü (mikro inç)

$G$  = Tufal kalınlığı ( $16 \times 10^{-3}/\text{ft}^2$ )

1960'lı yıllarda, sıcak haddeleme yağları bazı şerit haddelerde başarı ile kullanılmış, daha az haddeleme yükü ve tahrik momentleri gibi yararlar sağlanmıştır [3].

Sıcak haddelemede yağ kullanılarak elde edilebilecek olan sürtünme katsayısı genellikle 0.2-0.3 arasında değişmektedir. Değişimi etkileyen faktörler [3];

- a)- Haddelemede kullanılan yağın kimyasal ve fizikal özelliklerini.
- b)- Yağın uygulama şekli ve miktarı
- c)- Malzemenin sıcaklığı
- d)- Malzemenin yüzey durumu (özellikle yüzeydeki tufal kalınlığı)
- e)- İş merdanelerinin yüzey pürüzlülüğüdür.

Yağlı haddeleme durumunda sürtünme katsayısını veren eşitlik aşağıda verilmiştir [3].

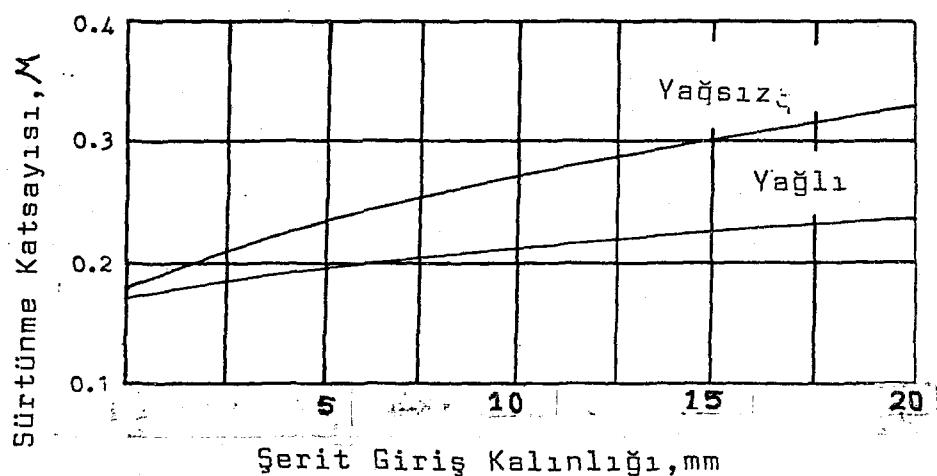
$$M = 2.77 \times 10^4 \exp (-2.61 \times 10^4 / (459+T) + 0.21) \quad (3.5)$$

Burada;

$$T = \text{sıcaklık } (^{\circ}\text{F})$$

Şekil 3.3'de ise şerit giriş kalınlığı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki yağlı ve yağsız durumuna göre verilmektedir.

Ekelund sıcaklığı ( $T, ^{\circ}\text{C}$ ) ve merdane cinsine bağlı olarak sürtünme katsayısını aşağıdaki bağıntılarla vermektedir [2].



ŞEKİL: 3.3. Yağlı ve Yağsız Haddelenme Durumunda Şerit Giriş Kalınlığı ile Sürtünme Katsayıları Arasındaki İlişki [3].

a)- Dökme demir ve yüzeyi pürüzlü çelik merdaneler için,

$$M = 1.05 - 0.000T \quad (3.6)$$

b)- Çil uygulanmış pürüzsüz çelik merdaneler için

$$M = 0.8 (1.05 - 0.0005 T) \quad (3.7)$$

c)- Yüzeyi taşlanmış çelik merdaneler için,

$$M = 0.55 (1.05 - 0.0005 T) \quad (3.8)$$

Geleji ise sürtünme katsayısı ile ilgili Ekelund bağıntılarına ilave olarak hız faktörünüde göz önüne almıştır. Sürtünme katsayısını sıcaklık ( $T, {}^{\circ}\text{C}$ ) ve hız etisi katsayısına ( $K_v$ ) bağlı olarak veren Geleji bağıntıları [2];

a)- Çelik merdaneler için

$$M = (1.05 - 0.0005 T) K_v \quad (3.9)$$

b)- Sertleştirilmiş çelik merdaneler için

$$M = (0.92 - 0.0005 T) \quad (3.10)$$

c)- Sertleştirilmiş ve taşlanmış çelik merdaneler için,

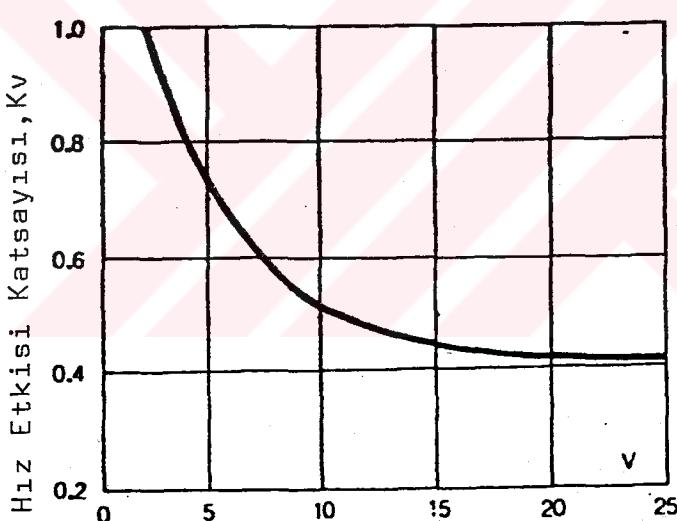
$$M = (0.82 - 0.0005 T)Kv \quad (3.11)$$

şeklindedir.

Burada; Hız etkisi katsayısı ( $Kv$ );

$$Kv = 0.42 + (25-V)^{7/3}/115000 \quad (3.12)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Burada merdane yüzey hızı ( $m/s$ )dır. Geleji hız etkisi katsayısının  $Kv$  merdane yüzey hız ile değişimi Şekil 3.5'de verilmiştir [2].



Merdane Yüzey Hizi,  $V(m/s)$

ŞEKİL: 3.5. Hız Etkisi Katsayısının ( $Kv$ ) Merdane Yüzey Hizi( $V$ ) ile Değişimi [2].

## BÖLÜM 4. SICAK HADDELEMEDE MALZEME MUKAVEMETİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

### 4.1. Sıcaklığın ve Kimyasal Bileşimin Mukavemete Etkisi

Yassi çelik mamullerin sıcak haddelemede malzeme mukavemetini etkileyen ana faktörler, haddeleme sıcaklığı, kimyasal bileşim ve deformasyon hızıdır. Bu faktörler aşağıda incelenmiştir.

#### 4.1.1. Sıcaklığın Etkisi

Haddeleme sırasında malzeme sıcaklığının değişimi malzemenin mukavemetini, dolayısı ile haddeleme yükünü direkt olarak etkilemektedir. Bu yüzden haddeleme yükünün hassas olarak hesaplanabilmesi için bilinmesi gereken faktörlerin başında haddeleme sıcaklığı gelmektedir.

Ezme bölgesinde sıcaklığı etkileyen faktörleri iki ana grupta toplamak mümkündür. Bu iki ana grup, malzeme sıcaklığını artıran ve azaltan etkenlerdir [3].

Malzeme sıcaklığını artıran etkenler;

- 1- Ezme miktarı,
- 2- Ezme bölgesindeki sürtünme,
- 3- Ezme bölgesindeki oksidasyon,
- 4- Malzeme bünyesindeki fiziksel ve metalurjik değişimler,
- 5- Isı kolkası, Coil-box ve ısıtma fırınları yöntemiyle yapılan ısıtmalar.

Malzeme sıcaklığını düşüren etkenler ise;

- 1- İş ve masa merdaneleri ile olan doğrudan temas
  - 2- Işıma
  - 3- Hava ile soğuma
  - 4- Su ile soğuma
- isi kayipları olmaktadır.

Sıcak haddelemede yükün hesaplanabilmesi için akma veya plastik akma gerilmesinin (flow stress) bilinmesi gerekmektedir. Akma gerilmesini malzemenin kimyasal bileşim ve sıcaklık etkilerken, dinamik akma gerilmesi (dynamic constrained yield stress) üzerinde deformasyon hızının da etkisi bulunmaktadır.

Aşağıdaki bölümlerde akma ve dinamik akma gerilmeleri ayrı ayrı incelenmektedir.

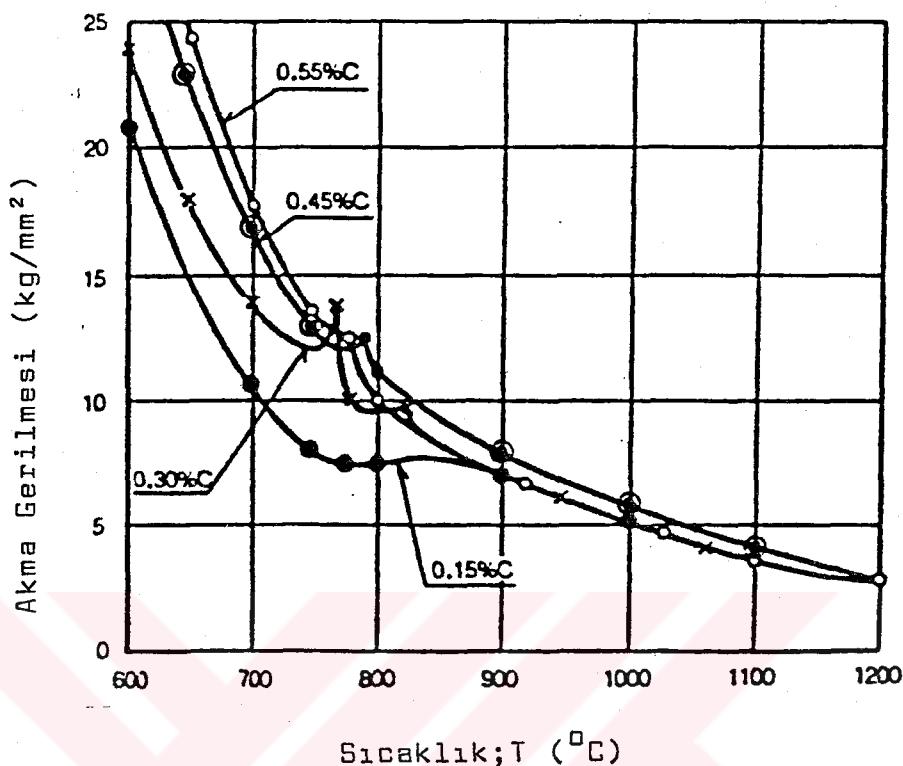
#### 4.1.2. Sıcaklığın ve Kimyasal Bileşimin Etkisi

Düşük ve orta karbonlu çelikler genellikle pratikte 880 ile 1200°C arasında haddelemektedirler. Karbon çeliklerinde mukavemet dolayısı ile çeliğin deformasyon direnci % C miktarının artması ile artarken sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Şekil 4.1'de bazı karbon çeliklerinde malzeme sıcaklığı ve % C miktarına bağlı olarak akma gerilmesinin değişimi verilmektedir.

Ekelund ise çeliğin akma gerilmesini sıcaklığı ( $T$ , °C), % C, % Mn ve %Cr miktarına bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyla vermiştir [2].

$$y = (14 - 0.01T)(1,4 + C + Mn + 0.3 Cr) \quad (4.1)$$

Burada;



ŞEKİL: 4.1. Karbon Çeliklerinde Sıcaklığa Bağlı  
Olarak Akma Gerilmesinin Değişimi [2].

Burada;

$$y = \text{Akma gerilmesi (kg/mm}^2\text{)}$$

C, Mn ve Cr = sırasıyla % Karbon, % Manganez ve % krom  
miktari

$$T = \text{Sıcaklık (°C)}$$

Geleji akma gerilmesinin hesaplanmasıında sadece sı-  
caklığa bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyı kullanmıştır [2].

$$y = 0.015 (1400 - T) \quad (4.2)$$

Burada;

$$y = \text{akma gerilmesi (kg/mm}^2\text{)}$$

$$T = \text{sıcaklık (°C)}$$

#### 4.2. Deformasyon Hızı

Haddelemede deformasyon hızının artması malzemenin mukavemetinin dolayısı ile haddeleme yükünün artması yönünde etki etmektedir.

Haddeleme sırasında, malzemenin ezme bölgesinin girişinden çıkışına doğru olan hareketi boyunca deformasyon hızı azalır. Ancak hesaplamalarda metametiksel kolaylık sağlama açısından ortalama bir deformasyon hızı kullanılmaktadır [3].

Genel olarak deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ):

$$\dot{\epsilon} = (d\epsilon/dt) = (Vr/L) \quad (4.3)$$

olarak ifade edilir.

Burada;

$V$  = merdane yüzey hızı(m/s)

$r$  = ezme oranı

$L$  = merdane-malzeme temas yayı uzunluğu (mm)

Yukarıdaki bağıntılardan da anlaşılacağı gibi deformasyon hızı, merdane yüzey hızı ve ezme oranının artması ile artarken temas yayı uzunluğu artarken azalmaktadır. Sıcak haddelemede deformasyon hızı genellikle 1 ile  $100 \text{ s}^{-1}$  arasındadır [3].

##### 4.2.1. Deformasyon Hızının Hesaplanmasındaki Kullanılan Bağıntılar

Deformasyon hızının hesaplanmasındaki kullanılan bir çok denklem bulunmaktadır. Bu denklemler arasında bazı farklılıklar olmasına rağmen temel yaklaşımalar aynıdır.

#### 4.2.2. Ford ve Alexander Çözümü

Ford ve Alexander ezme bölgesinde ortalama deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir [2].

$$\dot{\epsilon} = (N/30) \times (R/h_1) \times (1+r/4) \times (r^{1/2}) \quad (4.4)$$

Burada;

$\dot{\epsilon}$  = Ortalama deformasyon hız (1/s)

N= Merdane dönmə hızı (dev/dak)

R= Merdane yarı çapı (mm)

$h_1$  Malzemenin giriş kalınlığı (mm)

r= Ezme oranı

#### 4.2.3. Sims Çözümü

Sims, ezme bölgesinde ortalama deformasyon hızı ( $\dot{\epsilon}$ ) için Ford Alexander bağıntısındaki terimler cinsinden aşağıdaki bağıntıyı vermiştir [2].

$$\dot{\epsilon} = (N/30) \times (R/h_1) \times (1/r^{1/2}) \ln(1/(1-r)) \quad (4.5)$$

#### 4.2.4. Orowan ve Pascoe Çözümü

Orowan ve Pascoe ise ezme bölgesinde ortalama deformasyon hızı ile ilgili olarak aşağıdaki eşitliği kullanmıştır [2].

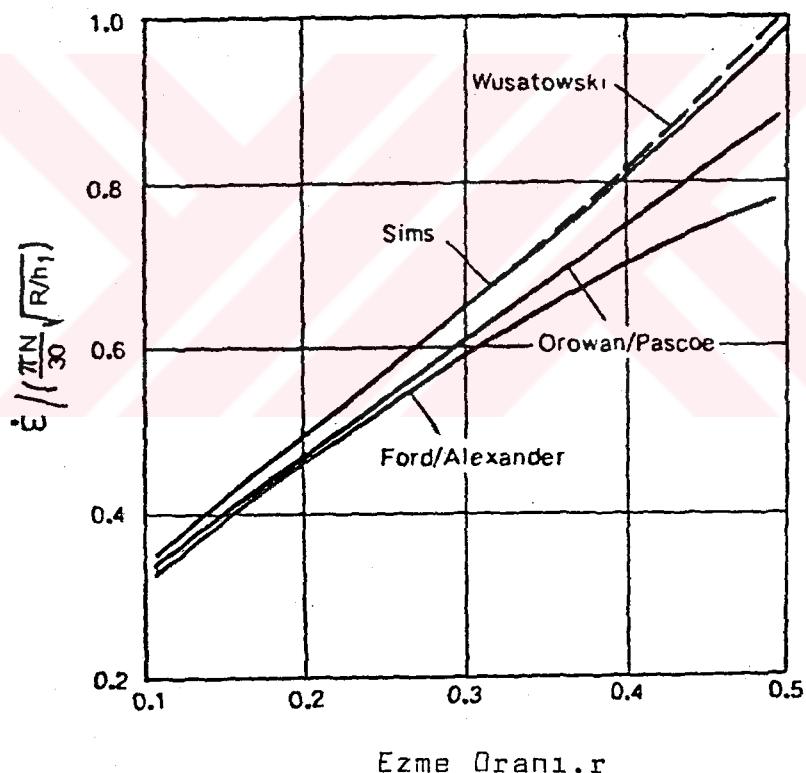
$$\dot{\epsilon} = (N/30) \times (R/h_1) \times (1 - 0.75r/(1-r)) \quad (4.6)$$

#### 4.2.5. Wusatowski Çözümü

Wusatowski ezme bölgesinde ortalama deformasyon hızı ( $\dot{\varepsilon}$ ) için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir [2].

$$\dot{\varepsilon} = \left( N/30 \right) \times (R/h_1) \times (r/1-r) \quad (4.7)$$

Yukarıda tanımlanan farklı bağıntılarla hesaplanan ortalama deformasyon hızlarının ( $\dot{\varepsilon}$ ) karşılaştırılması Şekil 4.2'de görülmektedir.



SEKİL: 4.2. Farklı Bağıntılarla Hesaplanan Ortalama Deformasyon Hızlarının Ezme Oranlarıyla Değişimi [2].

#### 4.2.6. Dinamik Akma Gerilmesi

Haddelenme yükünü etkileyen önemli faktörlerden birisi de sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı olarak değişen dinamik akma gerilmesidir.

Ostenit fazında sıcaklığa ve ortalama deformasyon hızına bağlı olarak değişen dinamik akma gerilmesi (dynamic constrained flow stress) ile ilgili bir çok denklem geliştirilmiştir [3].

Tarokh ve Seredynski, Sims'in yapışma sürtünmesini esas alan modelini kullanarak aşağıdaki bağıntıyı geliştirmiştir [7].

$$S = [a_0 + a_1/T^2 + a_2/r^{1/2} + a_3 r^{1/2}/T + a_4 r^{1/2} \log \dot{\epsilon}] \quad (4.8)$$

Burada;

$S$  = Plastik akma gerilmesi (Psi)

$T$  = Sıcaklık ( $^{\circ}$ C)

$\dot{\epsilon}$  = Ortalama deformasyon hızı (1/s)

$r$  = Ezme oranı

$a_1, a_2, a_3, a_4$  = katsayılar

Bağıntı 4.8'de kullanılan deformasyon hızı, Sims deformasyon hızı bağıntısıyla Bağıntı 4.3 hesaplanmıştır.

Moller Bağıntı 4.8'i esas alarak % 0.20 karbonlu çelik için aşağıdaki empirik eşitliği geliştirmiştir [8].

$$S = 1,429 + 4,985(T/1000)^{-2} - 21.36r^{1/2}(T/1000)^{-1} \quad (4.9)$$

Burada;

S= Dinamik akma gerilmesi, (Mpa)

T= Sıcaklık ( $^{\circ}$ C)

Kayma sürtünmesi olması durumunda dinamik akma gerilmesi S, sıcaklığıga T olmak üzere aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır [6].

$$S = 238.5 \exp(8.53 \times 10^3 / (459 + T) + 2600 \log_{10} \dot{\epsilon}) \quad (4.10)$$

Burada: S(psi), T( $^{\circ}$ F) birimi ile verilmiştir.

Hatta ve Kokada ise dinamik akma gerilmesi için S (kgf/m<sup>2</sup>) aşağıdaki ifadeyi kullanmıştır [3].

$$S = 1.15 \times 1.5 \times 10^6 (1 - h_i + 1/h_i)^{0.2} \times \\ ((1 - h_i + 1/h_i)(V_i + V_i + 1) / (2(R(h_i - h_i + 1))^{1/2})^{0.1} \exp \\ (2850/T + 273) \quad (4.11)$$

Burada;

$h_i, h_i + 1$  = Sırasıyla hadde giriş ve çıkışındaki şerit kalınlığı

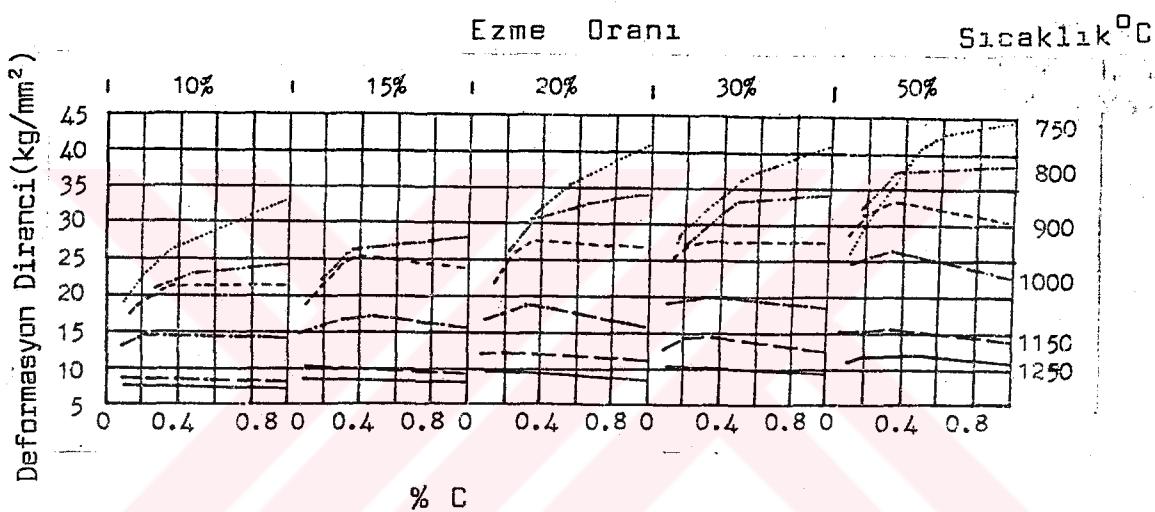
$V_i, V_i + 1$  = Sırasıyla hadde giriş ve çıkışındaki şerit hızları.

R = İş merdanesinin çapı

T = Sıcaklık ( $^{\circ}$ C)

Pocta, karbon çeliklerinin haddelenmesinde karbon miktarının, ezme oranının ve sıcaklığın deformasyon dírencine olan etkilerini kapsayan bir araştırma yapmıştır. Pocta, karbon yüzdeleri 0.09 ile 0.96 olan çelikleri 750-1250 $^{\circ}$ C sıcaklık aralığında 290 mm çapında iki-li haddede  $7.25 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında ve % 10-50 ezme vererek haddelemiştir. [3].

Pocta'nın bu araştırmasının sonuçları Şekil 4.3'de verilmiştir. Burada bahsi geçen deformasyon direnci haddelemeye ölçülen haddeleme yükünün temas bölümündür. Şekil 4.3'de karbon çeliklerinin haddelenmesinde malzemenin deformasyon direncinin, karbon miktarı (%C) ezme oranı ve haddeleme sıcaklığına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir.



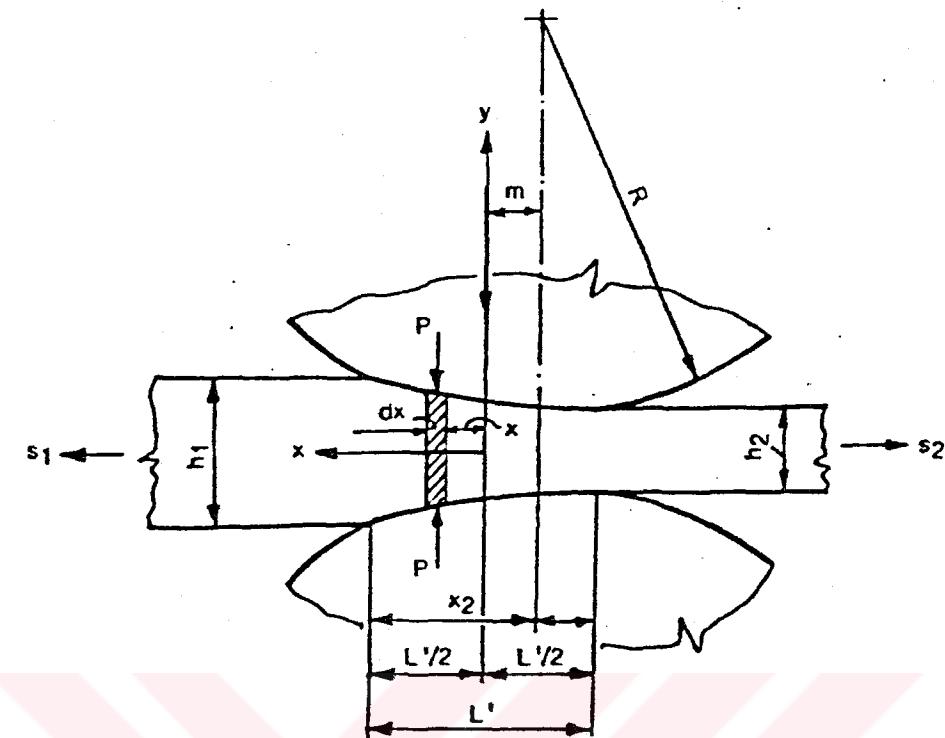
SEKİL: 4.3. % Karbon, Ezme Oranı ve Sıcaklığa  
Bağlı Olarak Deformasyon Direncinin  
Değişimi [3].

## BÖLÜM 5. HADDELEME YÜKÜNÜN HESAPLANMASINDA KULLANILAN METODLAR

Yassi mamullerin sıcak haddelenmesinde haddeleme yükünün hesaplanmasında kullanılan bir çok matematik metod bulunmaktadır. Bu metodların ana değişkenleri aynı olmasına rağmen, değişkenlerin değerlerinin tespitinde kullanılan ifadeler farklı olmaktadır. Bu değişkenler;

- a)- Akma gerilmesi ( $y$ ), dinamik akma gerilmesi( $s$ )
- b)- Sürtünme katsayısı ( $M$ )
- c)- Deformasyon hızı( $\dot{\epsilon}$ )
- d)- Deformasyon zonu geometrisidir.

Haddeleme teorileri, haddeleme yükünün hesaplanması ile ilgili ezme bölgesinin kuvvet dengesine ait eşitliğin Von Karman tarafından 1925 yılında yayılmasına kadar bir çok durumda pratiğin bir hayli gerisinde kalmıştır [8]. Von Karman ezme bölgesinde kuru kayma sürtünmesinin olduğunu kabul ederek, Şekil 5.1' den akma kriterini de gözönüne alarak ezme bölgesinin kuvvet dengesi eşitliğini (Bağıntı 5.6) yazmıştır. Bu eşitlik aynı zamanda "Homojen deformasyon Teorisi" olarak da bilinir [2].  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  eksenel gerilme olmak üzere düzlemsel basma durumunda distorsiyon enerji kriterine göre (Von Mises akma kriteri), cisimde uygulanın gerilmelerle, distorsiyon enerjisi belli bir seviyeye ulaştığında akma olayı başlamaktadır [9].



ŞEKİL: 5.1. Ezme Bölgesinde Etkili Kuvvetler [2].

Şekil 5.1'de  $dx$  kesitine etki eden yatay kuvvetlerin dengesi deklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$(\Gamma_x + d\Gamma_x)(h+dh) \pm 2M \Gamma_y d_x - 2\Gamma_y \tan \theta dx - \Gamma_x h_x = 0 \quad (5.1)$$

veya;

$$2\Gamma_y (\tan \theta \pm M) d_x = d(h \Gamma_x) \quad (5.2)$$

burada (-) sürtünme kuvvetinin nötr noktaya kadar girişe doğru, (+) ise nötr noktadan sonra çıkışa doğru olduğunu gösterir [2].

$$\tan \theta = \frac{1}{2} - \frac{dh}{dx} \quad \text{alınarak,} \quad (5.3)$$

(5.1) nolu eşitlik aşağıda gibi yazılabilir.

$$\bar{V}_x - \frac{dh}{dx} \pm 2M \bar{V}_y = \frac{d(h \bar{V}_x)}{dx} \quad (5.4)$$

$P = \bar{V}_y$  yazılıarak ve akma kriteri de gözönüne alınarak [2] ;

$$\bar{V}_x - \bar{V}_y = 1.15Y = S \text{ olarak yazıldığında } (5.5)$$

5.4 nolu eşitlik aşağıdaki şekli alır.

$$P - \frac{dh}{dx} \pm 2M P = \frac{d(h(P-S))}{dx} \quad (5.6)$$

Venede çeşitli sıcaklık ve deformasyon hızlarında, metallerin plastik akma gerilmeleri ile ilgili bilgilerin eksikliği ve uygun hassas aletlerin olmaması, 1946 yılında Orowan ve Pasco metodunun geliştirilmesi, Pomp, Weddige ve Lueg tarafından akma gerilmelerinin ölçülmesine kadar Von Karman eşitliği kullanılamamıştır. Daha sonra ellili yılların sonuna doğru ise El alay ve Sparling haddelemede karışık sürtünme (kayma ve yapışma) ile ilgili çalışmalar yapmışlardır [8].

Bu çalışmada incelenen Sims metodu 1954, Cook-McCrum metodu 1958, Ride metodu 1960, Green-Wallace metodu 1962, Ford-Alexander metodu 1963, Ekelund, Tselikov, Geleji metodları 1969 ve Denton-Crane metodu ise 1972 yılında yayınlanmıştır [2]. Bu metodlar aşağıda incelenmiştir.

### 5.1. Sims Metodu

Sims metodu, deformasyon bölgesinde temas yayı boyunca yapışma (Sticking) sürtünmesinin olduğunu kabul ederek yükün hesaplanmasıında aşağıdaki eşitliği vermiştir [2].

$$F = Q_p \times S \times L \times W \quad (5.7)$$

Burada;

$F$  = Haddelenme yükü

$Q_p$  = Geometrik faktör

$S$  = Ortalama dinamik akma gerilmesi

$W$  = Haddelenen malzemedenin genişliği

$L$  = Merdane-malzeme temas boyu

$$Q_p = \left[ \frac{\pi}{2A} \tan^{-1} A \frac{\pi}{4} - \frac{R^2}{h_2^2} \left( L_n \frac{h_n}{h_2} - \frac{1}{2} L_n \frac{A^2}{r} \right) \right] \quad (5.8)$$

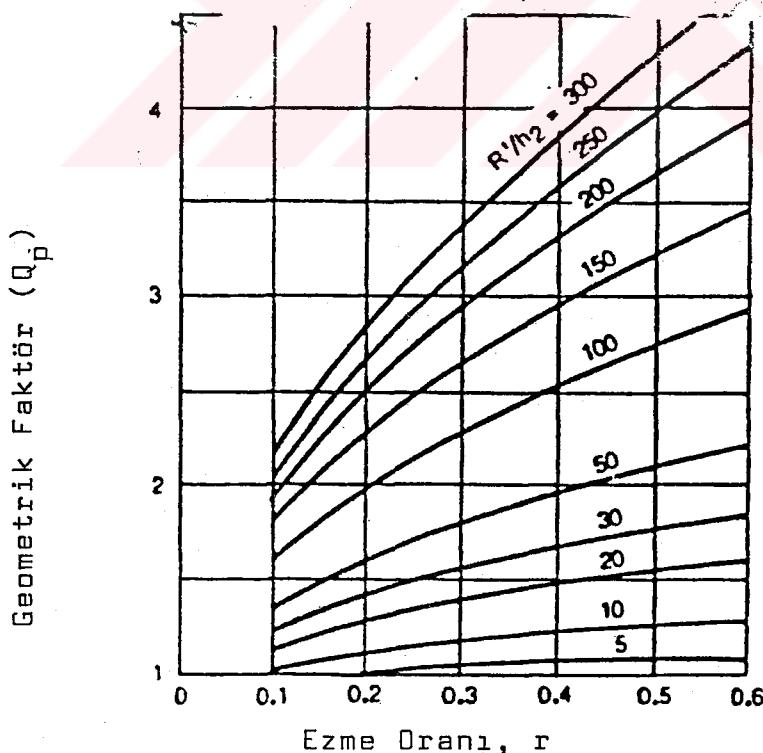
$$A = r (1-r) \quad (5.9)$$

$$h_n = h_2 + (X^2/R) \quad (5.10)$$

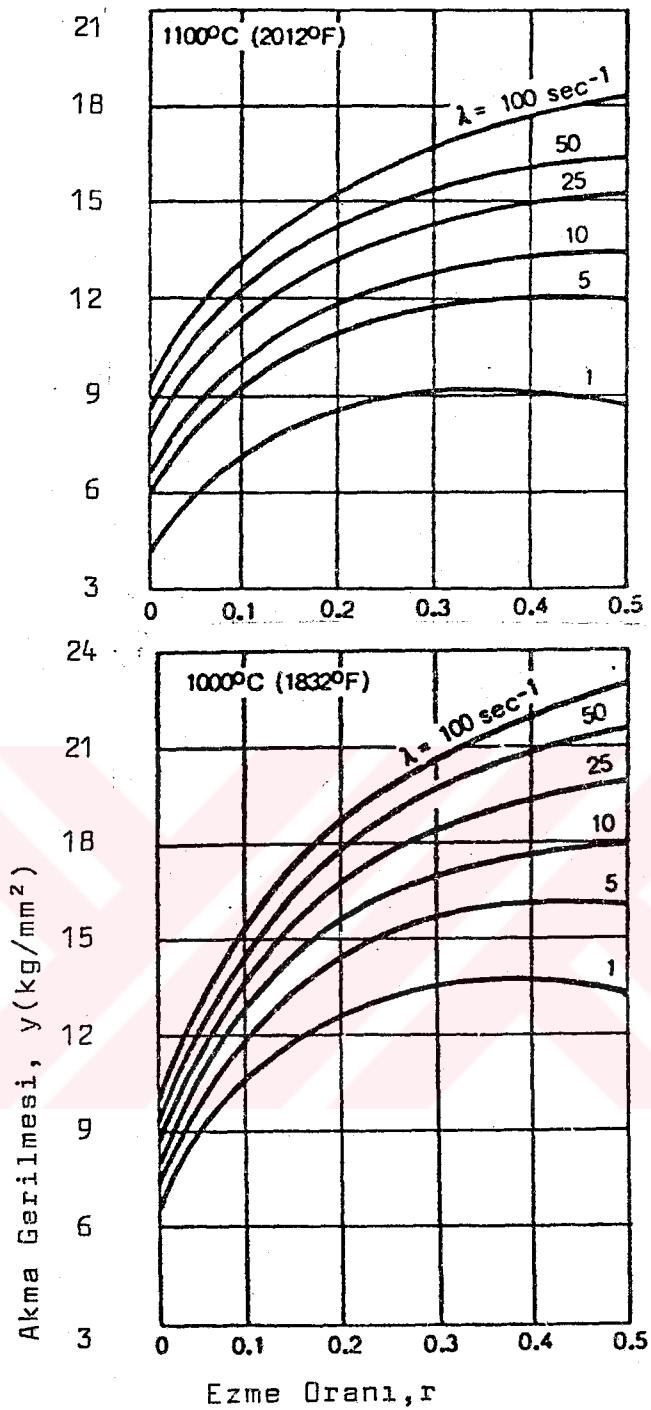
$$h_a = (h_1 + h_2) / 2 \quad (5.11)$$

$$X_n = (h_2 L) / (h_1 + h_2) \quad (5.12)$$

$Q_p$  geometrik faktörü Şekil 5.2'de dinamik akma gerilmesi ise şekil 5.3'de verilmistir [2].



ŞEKİL: 5.2. Sims Geometrik Faktörü [2].



ŞEKİL: 5.3. Karbon Çelikleri İçin Yük Hesaplamalarında Kullanılan Ortalama Dinamik Akma Gerilmesi [2].

### 5.2. Cook-McCrum Metodu

Cook-McCrum, Sims eşitliğini birçok malzemedede ölçütükleri akma gerilmeleri ile kıyaslayarak yük ve momentin hesaplanması bir grafik yöntem elde etmek için modifiye etmişlerdir. Bu metod BISRA metoduna olarakta bilinmektedir [10]. Bu metoda ait eşitlikler aşağıda verilmektedir [2].

$$F = R' W C_p I_p L \quad (5.13)$$

Burada;

$L$  = Temas boyu

$F$  = Haddelenme yükü

$C_p$  = Geometrik faktör

$I_p$  = Ezme ve deformasyon hızına bağlı faktör

$W$  = Şerit genişliği

$R'$  = Yassılaşmış hadde yarıçapı

$$C_p = Q_p(h_2/r) \times (r/1+r) \quad (5.14)$$

$$I_p = S(1+r/1-r) \quad (5.15)$$

$Q_p$  = Geometrik faktör

Burada geometrik faktör ( $Q_p$ ) Bağıntı 5.8'de dinamik akma gerilmesi ( $S$ ), Bağıntı 4.8'de, yassılaşmış merdane yarı çapı ( $R'$ ) ise Bağıntı 2.10'da verilmiştir.

### 5.3. Ford-Alexander Metodu

Ford-Alexander Metodu, deformasyon bölgesinde dinamik akma ( $S$ ) ve aritmetik ortalama en-boy oranını ( $Z_a$ ) esas almaktadır. Bu metod da aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır [2].

$$F = 0.25 W \cdot L (\pi + Z_a) S \quad (5.16)$$

Burada;

W = Serit genişliği

L = Temas boyu

F = Haddeleme yükü

Z<sub>a</sub> = Deformasyon bölgesinin aritmetik ortalama  
en-boy oranı

S = Dinamik akma gerilmesi

Z<sub>a</sub> Bağıntı 2.7'de, S, Bağıntı 4.8'de verilmiştir.

#### 5.4. Denton-Crane Metodu

Denton-Crane, Ford-Alexander'dan farklı olarak  
ezme bölgesinin geometrik şekil oranı olarak ortalama  
geometrik en-boy oranını (Zg) kullanmışlardır.

$$F = W \cdot L (0.655 + 0.265 Zg) S \quad (5.17)$$

Burada Zg Bağıntı 2.8'de S ise 4.8'nolu bağıntılarda  
verilmiştir.

#### 5.5. Green-Wollece Metodu

Bu metoda ait denklemler aşağıda verilmiştir [1].

$$F = 0.5 W \cdot L (Z_a + \frac{1}{Z_a}) S \quad (5.18)$$

Burada;

Z<sub>a</sub> ve S; sırasıyla 2.7 ve 4.8 nolu bağıntılarda  
verilmiştir.

### 5.6. Ekelund Metodu

Ekelund, ezme bölgesinde giriş düzleminden nötr noktaya kadar kayma sürtünmesi, nötr nokta ile çıkış düzlemi arasında ise yapışma sürtünmesi olduğunu kabul etmiştir. Ayrıca yük hesaplamasında kimyasal bileşime.

ve sıcaklığına bağlı bir akma gerilmesi kullanılmıştır. Ekelund'un kullandığı eşitlikler aşağıda verilmiştir [2].

$$F = \left( 1 + \frac{0.8 M L - 0.6 h_a}{h_a} \right) \left( Y + \frac{n V h / R'}{h_a} \right) \times W \times L \quad (5.19)$$

Burada;

F= Haddeleme yükü (kg)

V= Merdane yüzey hızı (mm/s)

R= Merdane yarı çapı (mm)

n= Plastisite katsayısı (kg s/mm<sup>2</sup>)

Y= Sıcaklığa ve kimyasal bileşime ~ bağlı akma gerilmesi (kg/mm<sup>2</sup>).

$h_a$ = Ortalama şerit kalınlığı (mm)

M = Merdane cinsine bağlı sürtünme katsayısı

$$n = 0.01 (14 - 0.01 T) \quad (5.20)$$

Burada;

T= Haddeleme sıcaklığı °C,

Ekelund haddeleme yükü bağıntısında kullanılan sürtünme katsayısı 3.6, 3.7, 3.8, nolu bağıntılarda verilmiştir.

Ekelund metodunun ancak minimum 800°C sıcaklıkta maksimum 7m/s haddeleme hızında ve malzemede maksimum %1 manganez içeren durumlarda kullanılması gereği göz önünde bulundurulmalıdır [2].

### 5.7. Ride Metodu

Ride 1958 yılında 4000 bobin üzerinde yapmış olduğu araştırmalarının sonucunu yayınlamıştır [11]. Ride, topladığı datalarдан bir empirik bağıntı elde etmek üzere istatistik analizden yararlanmıştır [11]. Ride formülü, haddeleme hızı ezme, malzemenin giriş kalınlığı ve sıcaklık ile deformasyon direncinin parabolik bir fonksiyon oluşturduğu kabul edilerek en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen korelasyon ve korelasyon katsayıları aşağıda verilmiştir [11].

$$K = (a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 r + a_4 r^2 + a_5 h_1 + a_6 h^2 + a_7 T + a_8 T^2) / L \quad (5.21)$$

$$F = K \cdot W \cdot L \quad (5.22)$$

Burada;

K= Deformasyon direnci

F= Haddelenme yükü (ton)

V= Haddelenme hız (Fpm)

r= Ezme yüzdesi

$h_1$ = Şerit giriş kalınlığı (In)

T= Haddelenme sıcaklığı ( $^{\circ}$ F)

W= Şerit genişliği

L= Merdane malzeme temas uzunluğu

$a_0 \dots a_8$ = empirik sabitler olup bu sabitler [11].

$$a_0 = 102.278 \quad a_2 = 0.0012 \quad a_2 = -0.000013$$

$$a_3 = 1.494 \quad a_4 = 0.014 \quad a_5 = -106.363$$

$$a_6 = 71.888 \quad a_7 = -0.070 \quad a_8 = 0.000018$$

olarak verilmiştir.

### 5.8. Geleji Metodu

Geleji, haddelenme yükünün hesaplanmasıında aşağıdaki daki formüller kullanmıştır [2].

$$F = 1.15Y(1+C_g M Z_a V^{1/4}) \cdot W \cdot L \quad (5.23)$$

Burada;

$Y$  = Haddelenen malzemenin sıcaklığına bağlı akma gerilmesi,  $\text{kg}/\text{mm}^2$

$V$  = Merdanenin çevresel hızı  $\text{m}/\text{s}$

$C_g$  = Geleji geometrik faktörü

$Z_a$  = Aritmetik ortalama en-boy oranı

$$Y = 0.015 (1400 - T) \quad (5.24)$$

$T$  = Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )

Geometrik faktör  $C_g$  ise  $Z_a$ 'ya bağlı olarak aşağıda verilmiştir [11].

a-)  $0.25 \leq Z_a < 1$  ise (5.25)

$$C_g = 17Z_a^2 - 29.85 Z_a + 18.3$$

b-)  $1 \leq Z_a \leq 3$  ise (5.26)

$$C_g = 0.8(Z_a)^2 - 4.9 Z_a + 9.6$$

c-)  $3 \leq Z_a \leq 13$  ise

$$C_g = 0.013 (Z_a)^2 - 0.29(Z_a) + 2.85 \quad (5.27)$$

Bu formüllerin uygulanmasında gözönünde bulundurulması gereken bir husus da malzemenin  $800-1300^{\circ}\text{C}$  arasında haddelenmesi ve çekme mukavemetinin oda sıcaklığında  $60 \text{ kg}/\text{mm}^2$  den fazla olmamasıdır [12].

Geleji hız etkisi katsayısı Bağıntı 3.12'de, sürtünme katsayısı  $M$  ise 3.9, 3.10 ve 3.11 nolu bağıntılarda verilmiştir.

### 5.9. Tselikov Metodu

Tselikov hadnaleme yükünün ( $F$ ) hesaplanması ile ilgili bir çok bağıntı geliştirmiştir [2]. Bu bağıntılardan biri aşağıda verilmiştir.

$$F = [(1,15y(2-r)/(rD)] \times [(1/1-r)^{D/2}] L \times W \quad (5.28)$$

$$D = 2$$

Tselikov metodunda kullanılan akma gerilmesi  $\gamma$  800-1200°C arası için Bağıntı 5.29'da verilmiştir.

$$\gamma = 7.5 + (900-T) \times 0.0157 \quad (5.29)$$

Burada;

$T$  = Haddeleme sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ) dir.

$M$  değerinin hesaplanmasıında Geleji bağıntıları (3.9, 3.10, 3.11) kullanılmıştır.

## BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yassı çelik mamuller içinde geniş-  
yer alan Fe-33, Fe-37 ve Fe-44 çelik kalitelerinin Ereğ-  
li Demir Çelik Fabrikaları (Erdemir) I. Sıcak şerit had-  
dede sıcak haddelenmesi sırasında alınan veriler kulla-  
nilmıştır. Kullanılan malzemelere ait verilerin toplan-  
ması ve değerlendirilmesi aşağıda açıklanmıştır.

### 6.1. Kullanılan Malzemeler

Deney malzemesi olarak aşağıda kimyasal kompozisyon-  
ları verilen Fe-33, Fe-37 ve Fe-44 kalite karbon çelik-  
leri kullanılmıştır (Tablo 6.1).

TABLO: 6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Kimyasal  
Bileşimleri (% Ağırlık)

TSE NO:	ERDEMİR NO:	Kimyasal Bileşim (% Ağırlık)					
		C	Mn	Si	P(max.)	S(max.)	Fe
Fe-33	3233	.13-.15	.30-.50	.050	.015	.030	Kalan
Fe-37	3237	.15-.17	.60-.80	.050	.015	.030	Kalan
Fe-44	3244	.18-.21	.90-.1.10	.050	.020	.030	Kalan

### 6.2. Kullanılan Hadde Tezgahının Özellikleri

Çalışmada kullanılan veriler Erdemir I. Sıcak şerit  
hadde tezgahından alınmıştır. Bu hadde tezgahı dört mer-  
daneli olup, çift yönlü (tersinir) haddeleme yapmaktadır.  
Her malzemeye 5 paso verilmiş, tufal temizleme işlemi  
malzeme haddeye girmeden, birinci pasodan önce yapılmıştır.

Hadde tezgahına ait teknik özellikler aşağıda verilmişdir.

Maksimum yük : 2500 ton  
Merdane yarıçapı : 310 mm  
Minimum Haddeleme hızı : 50 dev/dak.  
Maksimum haddeleme hızı : 225 dev/dak.

Malzemelerin haddelenmesinde haddeleme yükünün ölçü mü destek merdanesinin iki ucuna, vida ile merdane arası na yerleştirilen yük ölçer(Load-cell) ile; malzeme sıcaklıklarının ölçümü ise hadde giriş ve çıkışlarındaki pirometreler ile yapılmıştır.

### 6.3. Verilerin Toplanması

Literatürde haddeleme yükünün hesaplanması için çeşitli araştırmacılarca önerilen farklı metodlarda gerçek haddeleme yükünün ne derece doğru olarak hesaplandığını belirlemek amacıyla Tablo 6.1'de kimyasal bileşimleri verilen malzemelerin haddelenmesi sırasında sıcaklık, haddeleme hızı ve ezme miktarlarına bağlı olarak değişen gerçek haddeleme yük değerleri ölçülmüştür.

Bu veriler ile ilgili bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

#### 6.3.1. Sıcaklık

Sıcaklık ölçümü, hadde girişinde tufal temizleyici den önce ve haddelemenin bitişinde, yanı son pasodan sonra hadde çıkışında sabit pirometreler vasıtasi ile sürekli olarak yapılmıştır. Ayrıca seyyar bir pirometre ile tufal temizleyiciden sonra ve paso aral rında ölçümler yapılarak sıcaklıklar kaydedilmiştir. Aralarda ölçülen

sıcaklıklar hesaplanan sıcaklıkların kontrol etmek için kullanılmıştır. Hesaplamalarda iki sıcaklık kullanılmıştır. Bunlardan birincisi giriş sıcaklığı, ikincisi son pasodan hemen sonra alınan çıkış sıcaklığıdır. Bu sıcaklıklar EK-1'de verilmiştir.

#### **6.3.2. Haddeleme Hızı**

Haddeleme hızı merdanelerin dönme hızı cinsinden her paso için hem bir digital göstergeden okunmuş, hemde devir/dakika olarak devamlı kaydedilmiştir (EK-1).

#### **6.3.3. Hadde Giriş ve Çıkış Kalınlıkları ile Ezme Oranları**

Hesaplamalarda kullanılmak üzere, sıcaklık ölçümle rinin yapıldığı iki ayrı noktadan mikrometre ile ölçülen kalınlıklar her bobin için kaydedilmiştir. Bu kalınlıklar ilk pasoya girmeden önce ve son pasodan sonra hadde çıkışında bobin sarmadan önce ölçülmüştür. Ayrıca her pasoda hadde açıklıkları digital olarak okunarak yazılmıştır. (EK-1). Hadde açıklığı değerleri ile ölçülen ilk-son kalınlık değerleri yardımı ile ara pasolardaki ezme miktarları ve ara pasolardaki hadde giriş-çıkış kalınlıkları, yardımcı bir bilgisayar programı ile hesaplatılmıştır (EK-2).

#### **6.3.4. Haddeleme Yükü ve Motor Akımı**

Haddeleme yükü ve motor akımı, hız da olduğu gibi her pasoda hem bir göstergeden digital olarak okunmuş, hemde bir kaydedici vasıtası ile her paso için sürekli kaydedilmiştir (EK-1).

### 6.3.5. Merdane Yarı Çapı

Merdane yarı çapları merdane hadde tezgahına takılımadan önce ölçülerek kaydedilmiştir.

### 6.3.6. Şerit Genişliği

Şerit genişliği son pasodan sonra ölçülerek kaydedilmiştir.

### 6.3.7. Karbon ve Manganez Değerleri

Her bobin için % C ve % Mn değerleri, her malzeme için döküm kayıtlarında verilen limitlerin ortalaması olarak alınmıştır.

## 6.4. Verilerin Düzenlenmesi ve Değerlendirilmesi

Bölüm 6.3'de açıklanan ve haddeleme sırasında alınmış olan veriler bir bilgisayara girilmiştir. (EK-1), EK-1'den görüleceği gibi bilgisayar programı ile önerilen metodlarla ilgili hesaplamaların her paso için yapılabilmesi için sıcaklık, ezme miktarı ve ezme oranının her paso için bilinmesi gerekmektedir. Bunun için yardımcı bir program ile hesaplamalara esas olacak EK-2 oluşturulmuştur. Her paso için ezme miktarlarının ve şerit giriş çıkış kalınlıklarının hesaplanmasında 6.1 nolu bağıntı kullanılmıştır [10].

$$h_2 = S_0 - S_1 + [(F_0 - F_m)/M] \quad (6.1)$$

Burada;

$h_2$  : Şerit çıkış kalınlığı (mm)

$S_0$  : Dijital göstergeden okunan hadde açıklığı (mm)

$S_1$  : Hadde açıklığı sıfır iken dijital göstergeden okunan değer (mm)

$F_o$  : Haddeler tezgaha takıldıktan sonra boşlukları almak için uygulanan ön yük değeri (ton)

$F_m$  : Ölçülen haddeleme yükü (ton)

$M$  : Hadde tezgahı modülü (mm/ton)

Kullanılan hadde tezgahı için  $F_o$  değeri 2000 ton ve hadde tezgahı modülü ( $M$ ) ise 525 mm/ton'dır. 6.1 nolu bağıntıdaki  $[(F_o - F_m)/M]$  değeri hadde sicraması değerini vermektedir.

Bağıntı 6.1'in yardımı ile her paso için hadde giriş ve çıkış kalınlıkları hesaplatılmıştır. Bu hesaplamalarda elde edilen değerlerin hassasiyetinin  $\pm 0.20$  mm olduğu, ara ölçümlerle tesbit edilmiştir.

Sıcaklığın ara pasolar için tesbitinde ise, hadde girişinde tufal temizleyiciden önce ve son pasodan sonra ölçülen sıcaklıklar kullanılmıştır. Haddeleme sırasında her pasoda sıcaklık düşüşünün eşit olduğu kabul edilmiştir. Her paso için giriş ve çıkış sıcaklıkları aşağıdaki bağıntılarla tesbit edilmiştir.

$$\Delta T = [(T_o - 25) - T_F] P_S \quad (6.2)$$

$$T_{HI} = T_o - (T + 25) \quad (6.3)$$

Burada;

$\Delta T$  : Her pasodaki sıcaklık düşüşü,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$T_o$  : Şeritin giriş sıcaklığı,  $^{\circ}\text{C}$

$T_F$  : Şeritin son pasodan sonraki sıcaklığı,  $^{\circ}\text{C}$

$T_{HI}$  : İ pasosundaki haddeleme sıcaklığı,  $^{\circ}\text{C}$

$P_S$  : Paso sayısı.

Örneğin, tufal temizleyiciden önceki şerit sıcaklığı  $1025^{\circ}\text{C}$ , paso sayısı 5 ve son paso çıkışındaki sıcaklık  $900^{\circ}\text{C}$  olduğu kabul edilirse, ilk paso sıcaklığı aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta T = [(1025-25)-900]/5$$

$$\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{H1} = 1025 - (20+25)$$

$$T_{H1} = 980^{\circ}\text{C}$$
 'dir.

Ara pasolardaki sıcaklık düşüşünün hesaplanmasıında kullanılan 6.2 ve 6.3 nolu bağıntılar verilerin alındığı hadde tezgahı için yapılan ölçümler kriter alınarak yazılmıştır. Ayrıca haddeleme esnasında paso aralarında ölçülen sıcaklıklar ile 6.2 ve 6.3 denklemlerden EK-1'de bulunan her malzeme için birinci pasoğa giriş ve son pasodan sonraki çıkış sıcaklıklarını kullanılarak hesaplanan sıcaklıklar arasındaki sapmanın  $\pm 1-2$  olduğu ve tufal temizleyicideki sıcaklık düşüşünün ortalama  $25^{\circ}\text{C}$  olduğu tesbit edilmiştir.

Literatürde önerilen farklı metodlarla teorik yüklerin hesaplanmasında kullanılan bağıntılardaki terimlerle ilgili değerleri içeren EK-2, 6.1, 6.2 ve 6.3 nolu bağıntılar kullanılarak yazılan bir programla her paso için gerekli malzeme sıcaklığı, malzemenin haddeye giriş ve çıkış kalınlığı hesaplatılarak oluşturulmuştur.

Ana bilgisayar programında 9 ayrı metot kullanılarak EK-2'de bulunan bilgiler yardımcı ile teorik haddeleme yükleri, akma ve dinamik akma gerilmeleri deformasyon direnci, ezme oranı ve ortalamalı deformasyon hızları hesaplatılmıştır. Hesaplamaların yapıldığı bilgisayar programı EK-3'de verilmiştir.

Haddeleme deformasyon direnci ( $K$ ),

$$K = F/W \cdot L \quad (6.4)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır.

Burada;

$K$  = Deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )

$F$  = Haddeleme yükü (kg)

$W$  = Şerit genişliği (mm)

$L$  = Merdane malzeme temas boyu (mm)

### 6.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bölüm 6.4'de özetlenen Ek-2'deki verilerden, farklı metodlarla hesaplanan haddeleme yükleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Tablo 6.1'de  $M_1 - M_9$  farklı metodlarla hesaplanan haddeleme yükü değerlerini göstermektedir.

Bunlar;

$M-1$  = Sims metodu ile hesaplanan yükleri(ton),

$M-2$  = Cook-McCrum metodu ile hesaplanan yükleri(ton)

$M-3$  = Ford-Alexander metodu ile hesaplanan yükleri,  
(ton),

$M-4$  = Denton-Crane metodu ile hesaplanan yükleri(ton)

$M-5$  = Green-Wallace metodu ile hesaplanan yükleri(ton)

$M-6$  = Ekelund metodu ile hesaplanan yükleri(ton),

$M-7$  = Ride metodu ile hesaplanan yükleri(ton),

$M-8$  = Geleji metodu ile hesaplanan yükleri(ton),

$M-9$  = Tselikov metodu ile hesaplanan yükleri(ton),  
göstermektedir.

TABLO: 6.2. Farklı Metodlarla Hesaplanan ( $F_H$ ) ve Ölçülen ( $F_m$ ) Haddelene Yükleri

Ezme Oranı (r)	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	$F_H$ (ton)	Ölçülen yükü ( $F_m$ ) (ton)	Haddelene
.10	206	214	261	250	275	544	729	638	241	800		
.18	331	343	248	440	536	691	1583	1049	482	1000		
.20	524	531	495	470	495	781	927	1395	488	1400		
.23	549	558	509	498	535	818	1251	1338	619	1200		
.26	632	642	643	621	689	1064	1146	1524	604	1500		
.30	652	660	633	614	687	1104	1474	1511	658	1600		
.32	812	824	780	759	851	1257	1732	1907	838	1800		
.39	1006	1019	951	938	1073	1507	2375	2310	1088	2100		

Haddeleme sırasında ölçülen yüklerle, farklı metodlarla hesaplanan haddeleme yüklerinin karşılaştırılması Şekil 6.1a ve 6.1b'de görülmektedir. Şekil 6.1'deki farklı eğimlerdeki bu doğrular birinci dereceden tek değişkenli bir fonksiyonla ifade edilebilir (Bağıntı 6.5).

$$F_h = a + b F_m \quad (6.5)$$

Burada;

$F_h$  : Hesaplanan haddeleme yükü (ton),

$F_m$  : Ölçülen haddeleme yükü,

a+b: sabitler

Bağıntı 6.5 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$F_m = (F_h - a) / b \quad (6.6)$$

En küçük kareler metodu kullanılarak her metod için a ve b sabitleri hesaplatılarak ölçülen haddeleme yükü ile hesaplanan haddeleme yükü arasındaki ilişkiye her metod için ayrı ayrı veren bağıntılar (Bağıntı 6.7-6.15) elde edilmiştir.

Bu bağıntılar;

1)- Sims metodu için

$$F_m = (F_h - 88) / 0.34 \quad (6.7)$$

2)- Cook-McCrum metodu için

$$F_m = (F_h - 96) / 0.34 \quad (6.8)$$

3)- Ford-Alexander metodu için

$$F_m = (F_h - 181) / 0.29 \quad (6.9)$$

4)- Denton-Crane metodu için

$$F_m = (F_h - 172) / 0.29 \quad (6.10)$$

5)- Green-Wallace metodu için

$$F_m = (F_h - 205) / 0.32 \quad (6.11)$$

6)- Ekelund metodu için

$$F_m = (F_h - 350) / 0.39 \quad (6.12)$$

7)- Ride metodu için

$$F_m = (F_h - 643) / 0.61 \quad (6.13)$$

8)- Geleji metodu için

$$F_m = (F_h - 502) / 0.68 \quad (6.14)$$

9)- Tselikov metodu için

$$F_m = (F_h - 182) / 0.32 \quad (6.15)$$

şeklindedir.

İncelenen malzemelerden Fe-44 kalite çeliğin sıcak haddelenmesinde geometrik faktör'e bağlı olarak farklı dokuz metoda göre hesaplanan deformasyon dirençleri ( $D_1, D_2, \dots, D_9$ ) ile ölçülen deformasyon dirençleri değerleri Tablo 6.3'de verilmiştir.

TABLO: 6.3. Fe-44 Kalite Çelik İçin Farklı Metodlar İle Hesaplanan ve Ölçülen Deformasyon Dirençlerinin Geometrik Faktör İle Değişimi

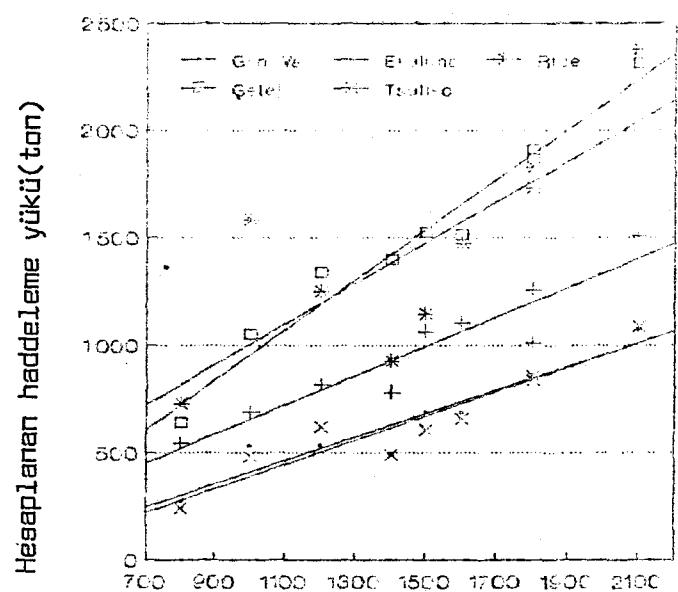
Geometrik Faktör (L/h <sub>a</sub> )	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Ölçülen
2.0	12.6	12.8	11.9	12.3	12.8	18.8	22.3	33.5	11.7	33.6
2.3	14.4	14.9	17.4	16.5	17.9	29.6	45	44.4	16.0	27.0
2.6	14.8	15.0	15.0	14.6	16.1	25.0	26.9	35.8	14.2	35.2
2.8	14.5	14.6	14.1	13.7	15.3	24.5	32.8	33.6	14.6	37.0
2.9	15.8	16.2	18.3	17.8	20.2	32.1	44.7	43.4	22.3	29.2
3.0	15.9	16.2	17.2	16.7	19.1	26.9	37.4	40.0	16.8	30.4
3.5	15.2	15.6	18.5	18.4	21.4	36.1	48.7	42.9	18.4	49.7
3.6	15.4	15.6	19.8	19.1	23.0	39.6	59.6	46.4	20.0	58.8
3.7	16.2	16.5	17.8	17.6	21.0	33.0	45.2	41.6	19.5	31.0

Burada;

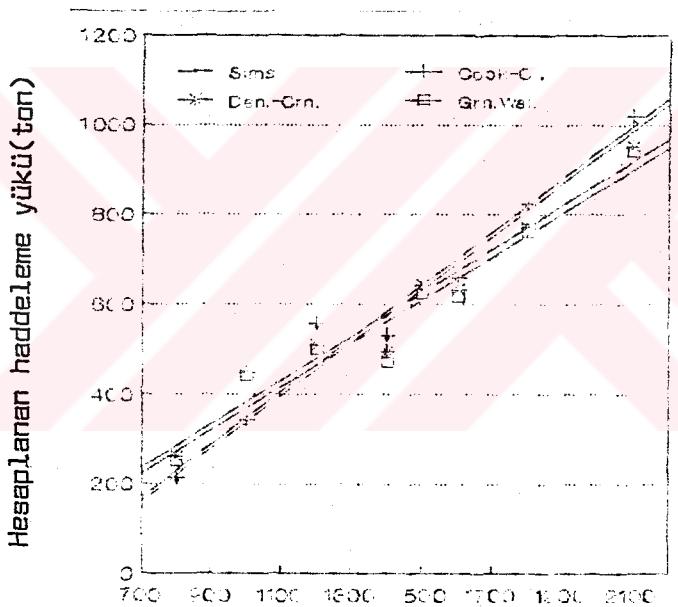
- D1 : Sims metodu ile hesaplanan deformasyon direnci( $\text{kg/mm}^2$ )
- D2 : Cook-McCrum metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D3 : Ford -Alexander metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D4 : Denton-Crane metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D5 : Green-Wallace metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D6 : Ekelund metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D7 : Ride metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D8 : Geleji metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ )
- D9 : Tselikav metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ( $\text{kg/mm}^2$ ).

Sims, Cook-McCrum, Ford-Alexander ve Denton-Crane metodları ile hesaplanan yüklerin ezme oranına bağlı olarak değişimi, ölçülen yükler ile karşılaştırımlı olarak Şekil 6.2'de verilmiştir.

Sims, Cook-McCrum, Ford-Alexander ve Denton-Crane metodları ile hesaplanan haddeleme yükü değerlerinin ölçülen yükün % 30-45 mertebesinde olduğu Şekil 6.2'den tesbit edilmiştir. Düşük ezme oranlarında hesaplanan haddeleme yükleri ölçülen yükün % 30'u mertebesinde iken yüksek ezme oranlarında % 45 mertebesine çökmaktadır. Ayrıca Şekil 6.2'den görüldüğü gibi ölçülen yük ile bu metodlarla hesaplanan haddeleme yükleri arasındaki fark ezme oranı arttıkça artmaktadır.

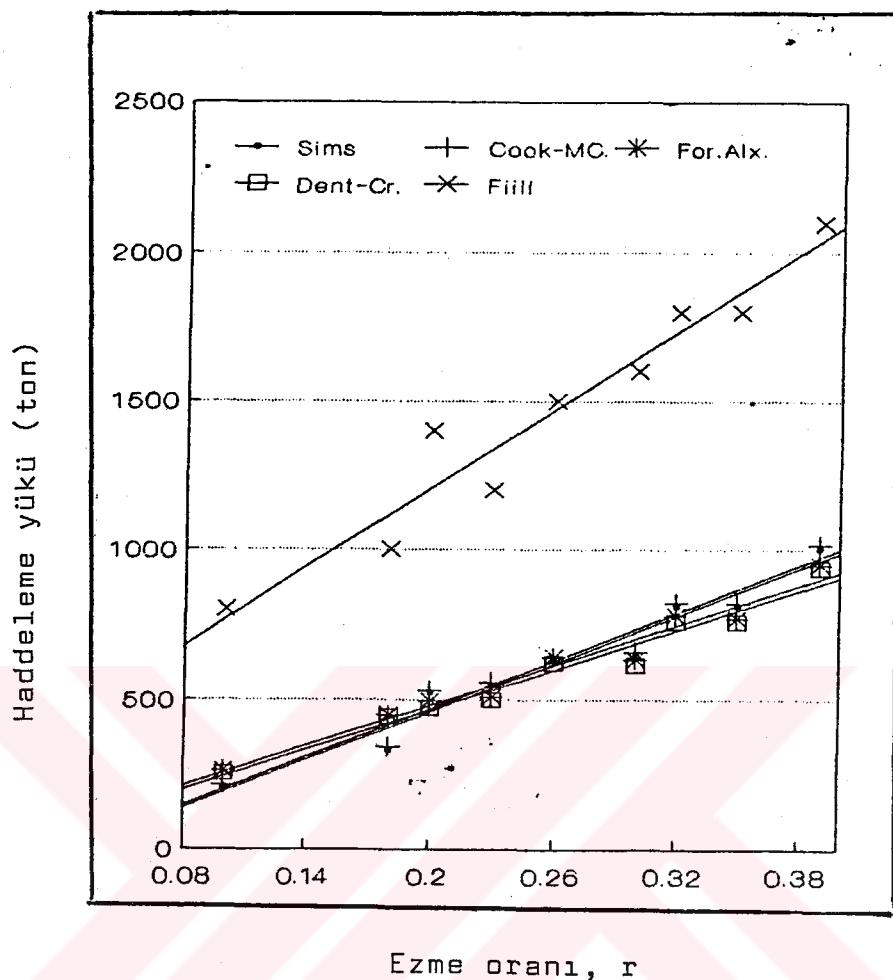


(a)



(b) Ölçülen haddeleme yükü (ton)

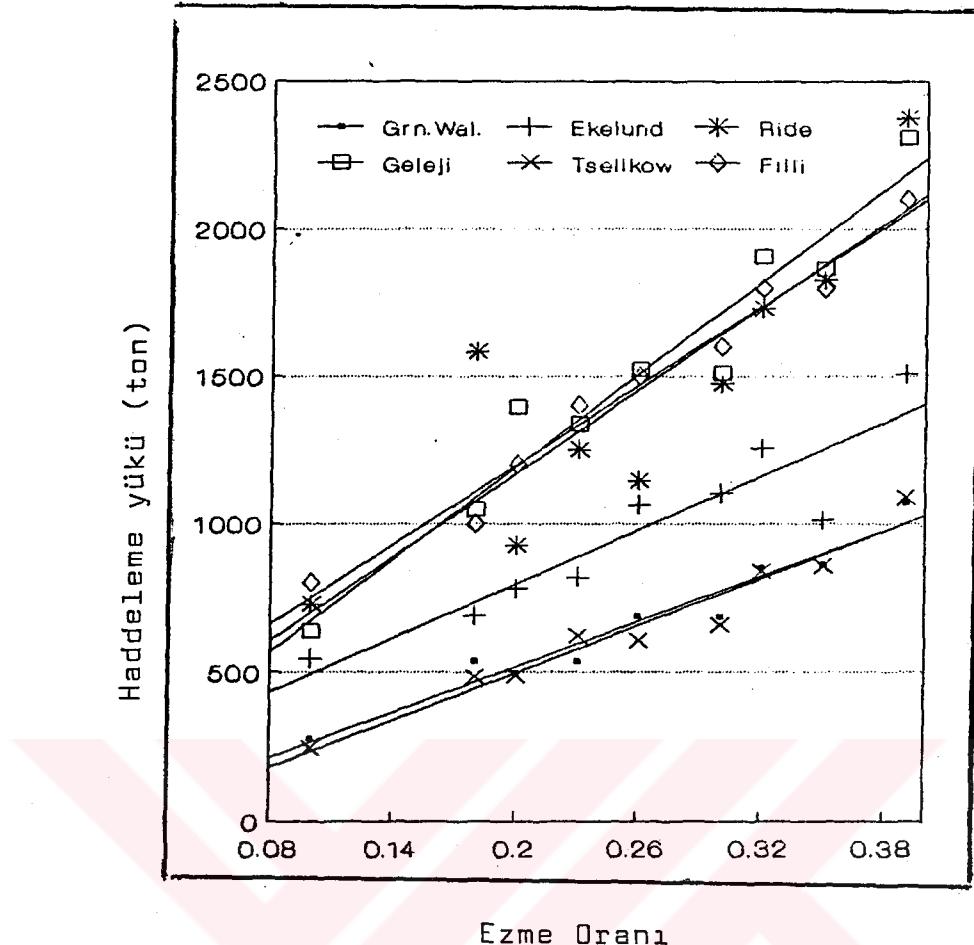
ŞEKİL: 6.1. Farklı Ezme Oranlarında Ölçülen Haddeleme Yükleri İle Aynı Ezme Oranları İçin Farklı Metodlara Göre Hesaplanan Haddeleme Yüklerinin Karşılaştırılması.



ŞEKİL: 6.2. Ezme Oranına Bağlı Olarak Ölçülen ve Sims, Cook-McCrumb, Ford-Alexander ve Denton-Crane Metodları ile Hesaplanan Yüklerin Değişimini.

Sims, Cook-McCrumb, Ford-Alexander ve Denton-Crane metodları ile hesaplanan yük değerleri ile ölçülen yükler arasındaki korelasyon 6.7 - 6.10 nolu bağıntılarda verilmiştir.

Green-Wallace, Ekelund, Ride, Geleji ve Tselyikov metodları ile hesaplanan ve ölçülen haddeleme yüklerinin ezme oranı ile değişimleri Şekil 6.3'de görülmektedir.



ŞEKİL: 6.3. Ezme Oranına Bağlı Olarak Ölçülen ve Green-Wallace, Ekelund, Ride, Geleji ve Tselikov Metodları ile hesaplanan Yüklerin Değişimi.

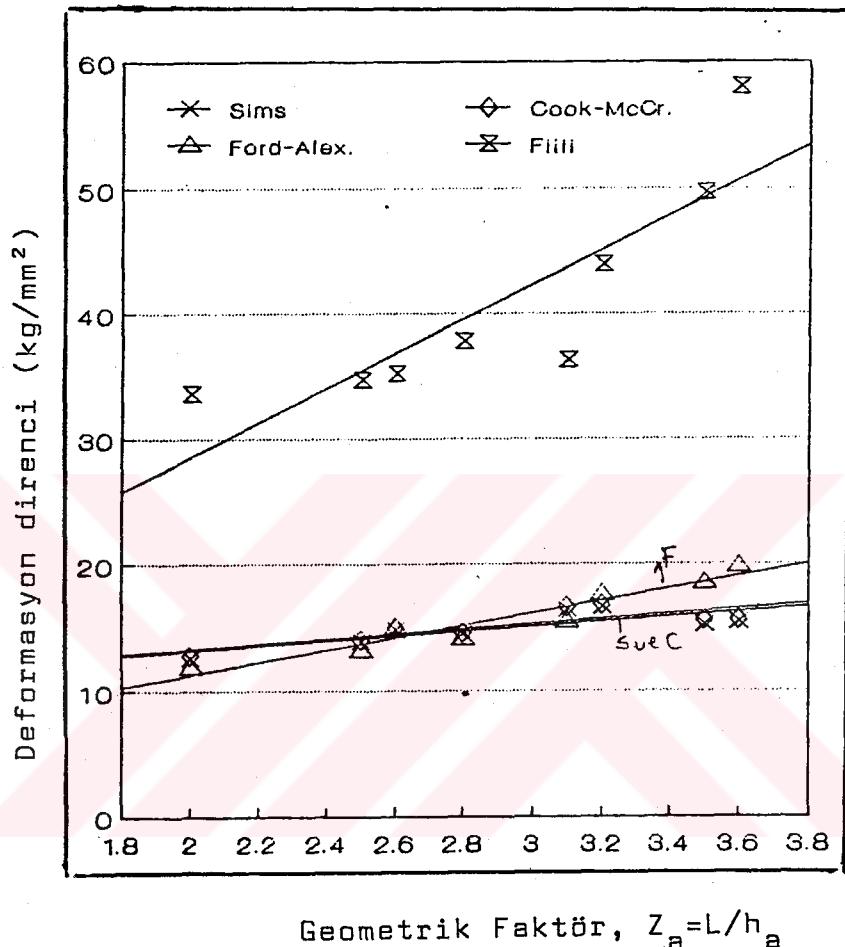
Green-Wallace ve Tselikov metodları ile farklı ezme oranları için hesaplanan yük değerlerinin birbirine çok yakın ve ölçülen yük değerlerinin % 35-50 mertebesinde olduğu, ölçülen yük ile bu metodlarla hesaplanan yükler arasındaki farkın düşük ezme oranı değerlerinde az ve ezme oranının artması ile arttığı Şekil 6.3'de görülmektedir.

Ekelund metodu ile hesaplanan ise incelenen düşük ve yüksek ezme oranı değerlerinde ölçülen yükün % 70 mertebesinde bulunmuştur. Buna karşın ölçülen yük ile hesaplanan yük değerleri arasındaki fark diğerlerinde olduğu gibi artan ezme oranı ile artmaktadır. Bunun nedeni Ekelund metodunun yeterli geometrik faktör ile düzenlenmemesidir.

Ride metodu ile hesaplanan yük değerleri ise ölçülen yük değerlerine çok yakın olmasına karşın, bu metoda hesaplanan değerleri ile ölçülen yük değerleri arasında bazı ezme oranlarında fazla miktarlarda sapmalar olduğu görülmektedir (Şekil 6.3). Aşırı sapmaları nedeni bu metodun ezme yüzdesine hassas olmasıdır. Verilerin toplanmasında ezme miktarlarındaki hatanın  $\pm 0.20\text{mm}$ 'den küçük olduğu belirtilmiştir. Bu hata payı yüksek ezme miktarlarında (4-6mm) ezme yüzdesinin yaklaşık  $\% \pm 3$ 'lük bir değişime sebep olurken, düşük ezme miktarlarında (1-2 mm)  $\% \pm 10-20$  bir değişime sebep olmaktadır. Buda ezme yüzdesine hassas olan Ride metodu ile hesaplanan yük değerlerinde yer yer sapmaya sebep olmaktadır. Haddeleme yüklerinin diğer metodlarla hesaplanmasıda yukarıda bahsedilen hatanın etkisi minimuma indirilmiştir.

İncelenen metolar içinde ölçülen haddeleme yüküne en yakın ve uyumlu değerlerin Geleji metodu ile hesaplanan haddeleme yükü değerleri olduğu Şekil 6.3'den anlaşılmaktadır. Bunun nedeni Geleji metodunun uygun geometrik faktör ile modifiye edilmiş olmasıdır. Çünkü ölçülen haddeleme yüklerini % 35-40 mertebesinde veren Tselikov metodu ile, ölçülen haddeleme yüklerini % 85-100 mertebesinde veren Geleji metodu arasındaki temel fark Tselikov metoduna göre Geleji metodunun geometrik faktör ile modifiye edilmesidir. Şekil 6.3'de açıkça görüldüğü gibi ezme oranının 0.30'a kadar artan değerlerinde Geleji ile hesaplanan yüklerin ölçülen yükler mertebesinde olduğu 0.30'un üzerindeki ezme oranlarında ise ölçülen yükün üzerinde değerler verdiği görülmektedir.

Geometrik faktörü ( $Z_a = L/H_a$ ) bağlı olarak ölçülen ve farklı metodlara göre hesaplanan deformasyon dirençlerinin değişimleri Şekil 6.4 ve 6.5'de görülmektedir.



ŞEKİL: 6.4. Fe-44 Kalite Çelik İçin Geometrik Faktöre Bağlı Olarak Sims, Cook-McCrum, Ford-Alexander Metodları İle Hesaplanan ve Haddelenme Sırasında Ölçülen Deformasyon Dirençlerinin Değişimi.

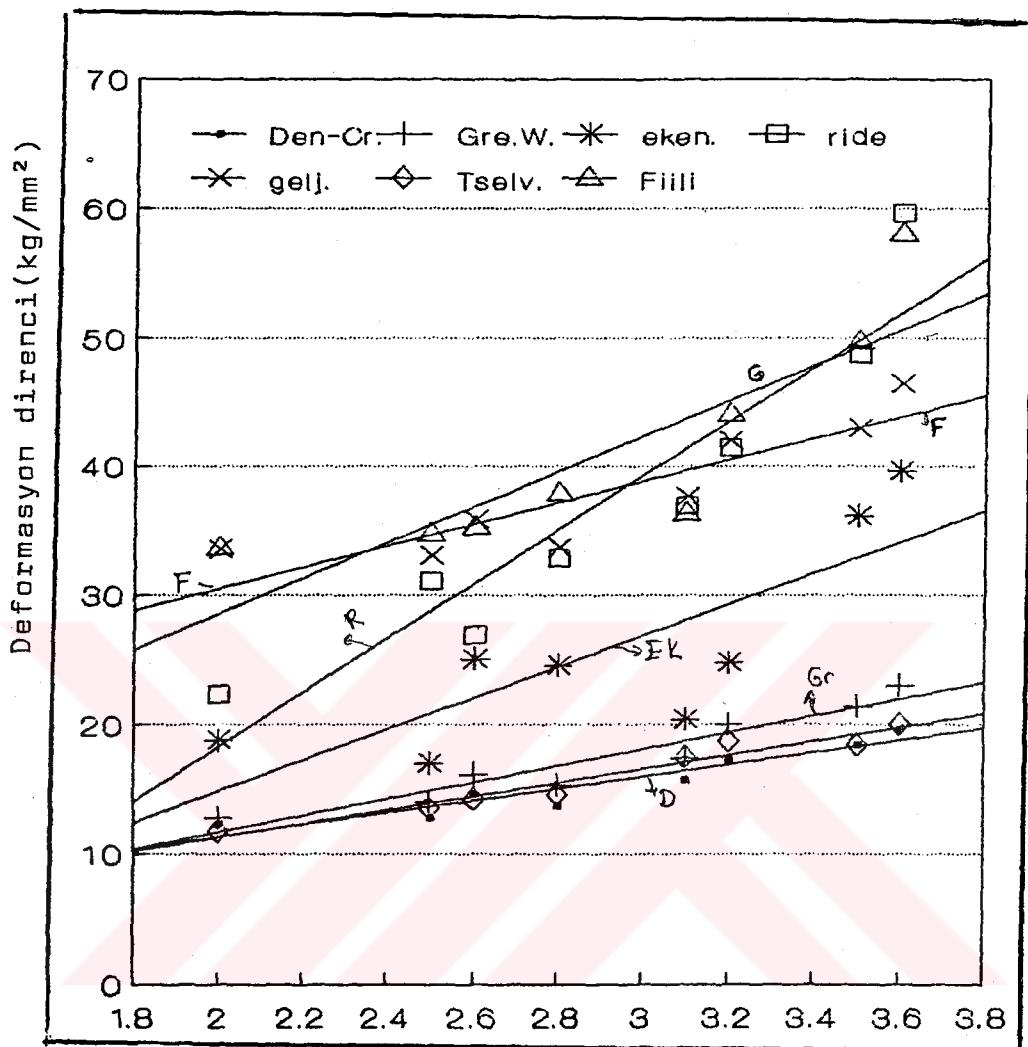
Şekil 6.4'den görüldüğü gibi, ölçülen ve metodlara göre hesaplanan deformasyon dirençlerinin geometrik faktöre göre değişimleri yüklerin ezme oranına göre değişimlerine (Şekil 6.2) benzerdir.

Sims ve McCrum değerlerinin birbirinin aynı ve ölçülen deformasyon direncinin yaklaşık % 30-40 mertebede olduğu, Şekil 6.4'den görülmektedir. Ayrıca Ford-Alexander metodu ile hesaplanan deformasyon direnci değerlerinin ise geometrik faktörün düşük değerleri için ( $Z_a < 2.6$ ) Sims ve McCrum değerlerinin altında, geometrik faktörün yüksek değerleri için ( $Z_a > 2.6$ ) ise söz konusu bu iki metodun üzerinde artış gösterdiği ve incelenen geometrik sınırlar içinde ölçülen deformasyon direncinin yaklaşık % 40 mertebesinde olduğu anlaşılmaktadır.

Denton-Crane, Green -Wallace ve Tselikov metodları ile hesaplanan deformasyon dirençlerinin ölçülen deformasyon direncinin altında ve % 30-40 mertebesinde olduğu ve geometrik faktörün artması ile ölçülen deformasyon dirençleri ile hesaplanan deformasyon dirençleri arasındaki farkların arttığı Şekil 6.5'den görülmektedir.

Geleji metodu ile hesaplanan deformasyon direncinin değerleri de geometrik faktörün küçük değerlerinde ( $Z_a < 2.4$ ) ölçülen yükün altında yüksek geometrik faktörü değerlerinde ( $Z_a > 2.4$ ) ölçülen yükün üstündedir (Şekil 6.5).

Ekelund metodu ile hesaplanan deformasyon direnci ise incelenen geometrik faktör sınırlarında ölçülen yükün % 50 ile % 80 mertebelерinde oldu ve artan geometrik faktör ile deformasyon dirençleri arasındaki farkın azaldığı Şekil 6.5'den anlaşılmaktadır.



$$\text{Geometrik Faktör}, Z_a = L/h_a$$

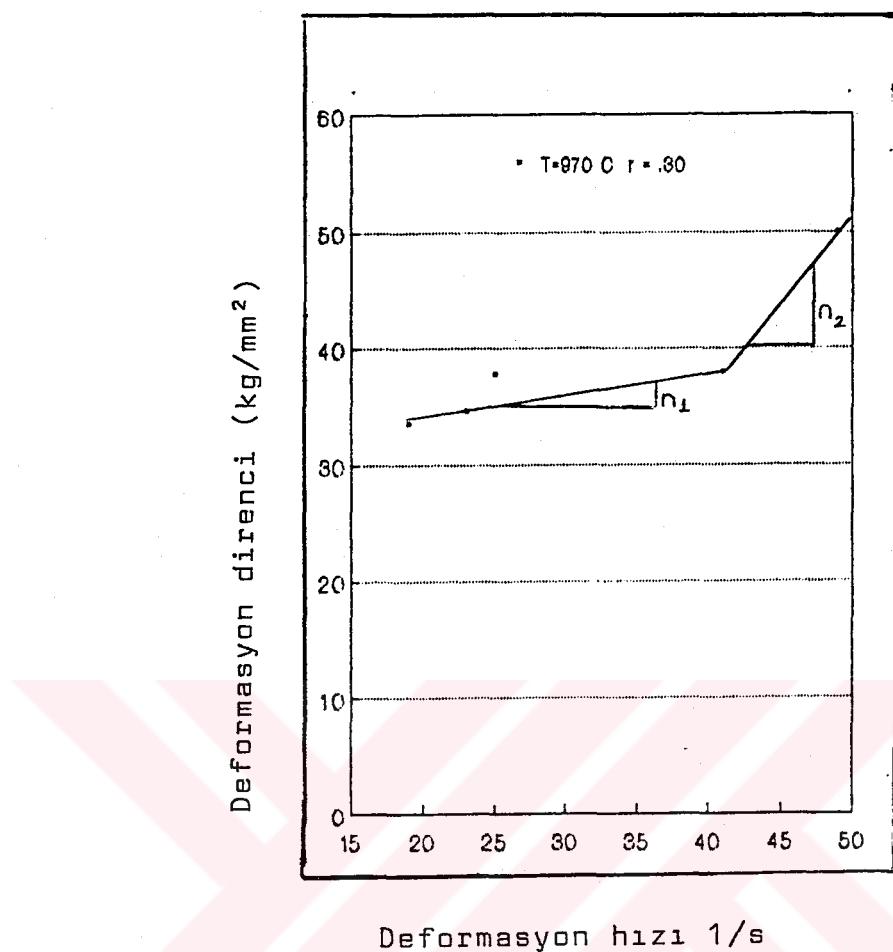
ŞEKİL: 6.5. Fe-44 Kalite Çeliğin Haddelenmesinde Geometrik Faktör İle Ölçülen ve Denton-Crane, Green-Wallace, Ekelund, Ride, Geleji ve Tselikov Metodları ile Hesaplanan Deformasyon Direnci Değerlerinin Değişimi.

Fe-44 kalite çeliğin sıcak haddelenmesinde ezme oranının % 30 değeri için sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı olarak değişen deformasyon dirençleri ( $K=F_m/W.L$ ) değerleri Tablo 6.4'de verilmiştir.

TABLO: 6.4. Fe-44 Kalite Çeliğin Haddelenmesinde, Sıcaklık ve Deformasyon Hızına Göre Değişen Deformasyon Dirençleri ( $K=F_m/WL$ ) Değerleri

Deformasyon Hızı ( $\text{sec}^{-1}$ ) (1/S)	Deformasyon Direnci (K) (kg/mm <sup>2</sup> )	Sıcaklık (T) (°C)
19	33.6	990
25	37.8	990
37	35.2	960
41	41.0	965
49	49.7	950

Tablo 6.4'deki sıcaklık değerleri için ortalama bir değer olarak 970°C kabul edildiğinde sabit bir sıcaklık (970°C) ve ezme oranı ( $r=0.30$ ) için Tablo 6.5'den deformasyon hızına bağlı olarak deformasyon direncinin değişimini veren, Şekil 6.6 çizilmistiir.



ŞEKİL: 6.6. Fe-44 Kalite Çelikte  $970^{\circ}\text{C}$ 'de 0.30 Ezme Oranında Deformasyon Hızına Bağlı Olarak Deformasyon Direncinin Değişimi.

Şekil 6.6'da görüldüğü gibi genelde artan deformasyon hızı ile deformasyon direnci artmaktadır. Ayrıca deformasyon direncinin artan deformasyon hızı ile değişimi deformasyon hızı  $\dot{\epsilon} < 40 \text{ } 1/\text{s}$  değerleri için az olup eğimi  $n_1$  olan doğrusal bir artış gösterirken, deformasyon hızının  $\dot{\epsilon} > 40 \text{ } 1/\text{s}$  değerleri için ise artan deformasyon hızı ile deformasyon direncinin artışı hızlı olup eğimi  $n_2$  olan doğrusal bir artış göstermektedir. Bu iki eğrinin fonksiyonları birinci dereceden tek değişkenli olup  $K=a+n\dot{\epsilon}$  şeklinde bir bağıntı ile ifade edilebilir.

Buna göre;

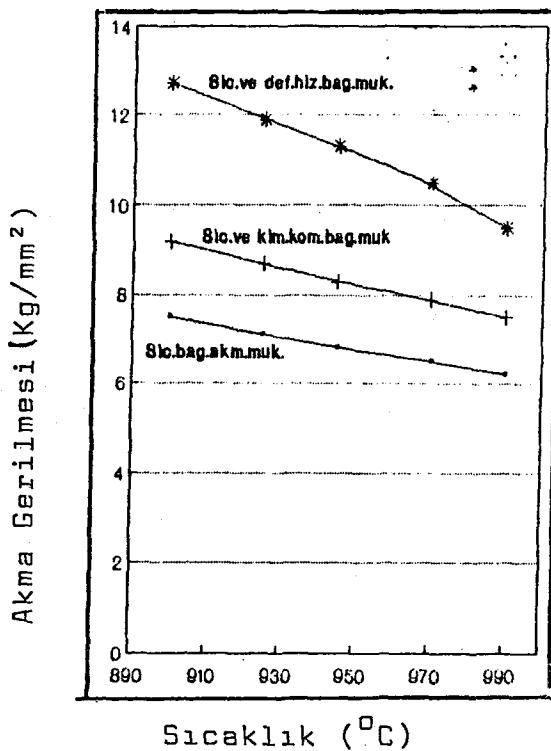
$$40 \text{ 1/s için } K(\text{kg/mm}^2) = 35 + 0.167 \dot{\epsilon} \text{ (1/s)} \quad (6.16)$$

$$40 \text{ 1/s için } K(\text{kg/mm}^2) = 8 + 0.857 \dot{\epsilon} \text{ (1/s)} \quad (6.17)$$

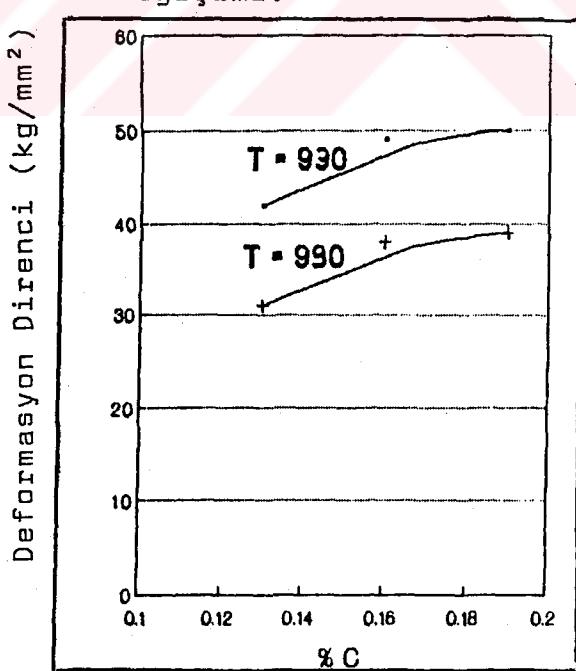
olacaktır.

Şekil 6.7'de sıcaklığa bağlı olarak Fe-44 çeliği için farklı metodlar kullanılarak sıcaklığa bağlı akma gerilmesi (Geleji metodu), sıcaklığa ve kimyasal bileşime bağlı akma gerilmesi (Ekelund metodu), sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı akma gerilmesi (Sims, Cook McCrum, Ford-Alexander, Denton-Crane, Green-Wallace metodları) değişimleri görülmektedir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, sabit bir sıcaklık için sıcaklığa bağlı akma gerilmesi değeri en düşük, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı akma gerilmesi değeri ise en yüksektir. Genelde sıcaklık artışı farklı metodlara göre hesaplanan akma gerilmelerinin düşüğü bununla beraber bu düşüş sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı akma gerilmesinde daha hızlı olduğu Şekil 6.7'den açıkça görülmektedir.

İncelenen çeliklerde karbon miktarı ve sıcaklığın deformasyon direnci üzerindeki etkisi iki farklı sıcaklık için ( $930^{\circ}\text{C}$  ve  $990^{\circ}\text{C}$ ) Şekil 6.8'de verilmiştir. Şekil 6.8'de görüldüğü gibi sabit sıcaklık ve deformasyon hızında deformasyon direnci malzemenin artan % C miktarı ile artmaktadır, sabit karbon içeriği ve deformasyon hızı için ise deformasyon direnci azalan sıcaklık ile artmaktadır.



ŞEKİL: 6.7. Fe-44 Çeliğinde Farklı Metodlara Göre Hesaplanan Sıcaklığı, Kimyasal Bileşime ve Deformasyon Hızına Bağlı Akma gerilme Değerlerinin Haddelenme Sıcaklığı İle Değişimi.



ŞEKİL: 6.8. % C Miktarına ve Sıcaklığa Bağlı Olarak Deformasyon Direncinin Değişimi ( $r = 10 \text{ 1/S}$ )

Yapılan haddeleme işlemleri sırasında ölçülen haddeleme yükü (ton) ile motor akımı (Amp) değerleri Tablo 6.5'de verilmektedir. Bu değerler kullanılarak çizilen Şekil 6.9'dan da görüldüğü gibi ölçülen haddeleme yükü ile motor akımı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Tablo 6.5'de değerleri verilen haddeleme yükü ile motor akımı arasındaki ilişki (Şekil 6.9) aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir.

$$M_a = a + bF_m \quad (6.18)$$

Burada;

$M_a$  = Motor akımı (Amp)

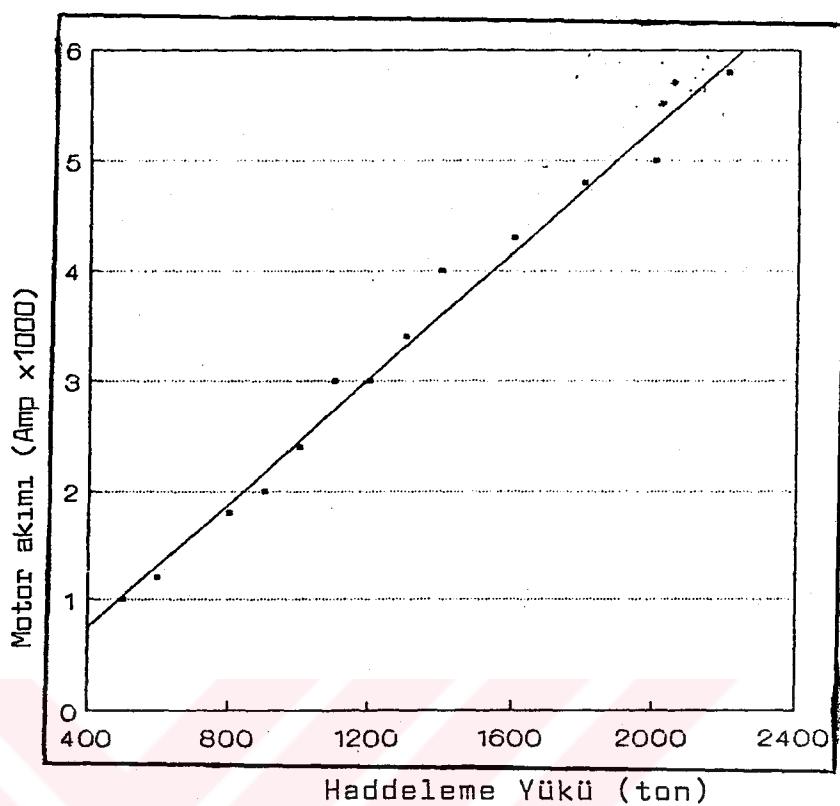
$F_m$  = Ölçülen haddeleme yükü (ton)

a ve b= sabitler ( $a=566$ ,  $b=2.84$ )

Bağıntı 6.18 motor akımının 1000 Amperden büyük durumlarda ve DC motorlar için geçerlidir.

TABLO: 6.5. Ölçülen Haddeleme Yükü ( $F_m$ ) ve Motor Akımları ( $M_a$ )

Haddeleme Yükü ( $F_m$ ) Ton	Motor Akımı ( $M_a$ ) Amper
500	1000
600	1200
800	1800
900	2000
1100	3000
1200	3000
1300	4000
1400	4000
1300	4400
1800	5000
2000	5200
2200	5800



ŞEKİL: 6.9. Ölçülen Haddeleme Yükü ile Motor Akımının Değişimi.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Fe-33, Fe-37 ve Fe-44 kalite çeliklerin sıcak haddelenmesinde ölçülen yükler ile literatürde önerilen Sims, Cook-McCrum, Ford-Alexander, Denton-Crane, Green-Wallace, Ekelund, Ride, Geleji ve Tiselikov metodları kullanılarak hesaplanan haddeleme yükleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- 1)- İncelenen metodlar içinde ölçülen yüklerde en yakın değerler Geleji metodu ile elde edilmiştir. Bunun nedeni Geleji metodunun gerçeğe uygun ezme bölgesi geometrik faktörü ile modifiye edilmiş olmasıdır.
- 2)- Ride metodu ile hesaplanan yükler ölçülen yüklerde çok yakınmasına rağmen bazı ezme oranlarında sapmalar göstermektedir. Bunun nedeni bu metodun ezme yüzdesine çok hassas olmasıdır.
- 3)- Ekelund metodu ile hesaplanan haddeleme yükleri ölçülen yüze göre % 30-40 sapma göstermektedir. Bunun nedeni ise Ekelund metodunda yeterli ezme bölgesi geometrik faktörü kullanılmamasıdır.
- 4)- Haddeleme yükünün hesaplanmasında kullanılan Sims, Cook-McCrum, Ford-Alexander, Denton-Crane, Green Wallace, Tselikov metodları ile hesaplanan haddeleme yükleri değerleri yeterli geometrik faktör ve hız etkisi faktörleri ile düzeltildikleri için ölçülen yükün %30-45 mertebelerinde kalmaktadır.

5-) Ölçülen yükler ( $F_m$ ) ile her metod için hesaplanan yükler ( $F_h$ ) arasında yapılan korelasyon sonucu elde edilen bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\text{Sims metodu için} : F_m = (F_h - 88) / 0.34$$

$$\text{Cook-McCrum metodu için} : F_m = (F_h - 96) / 0.34$$

$$\text{Ford-Alexander metodu için} : F_m = (F_h - 181) / 0.29$$

$$\text{Denton-Crane metodu için} : F_m = (F_h - 172) / 0.29$$

$$\text{Green-Wallace metodu için} : F_m = (F_h - 205) / 0.32$$

$$\text{Ekelund metodu için} : F_m = (F_h - 350) / 0.39$$

$$\text{Ride metodu için} : F_m = (F_h - 643) / 0.61$$

$$\text{Geleji metodu için} : F_m = (F_h - 502) / 0.68$$

$$\text{Tselikov metodu için} : F_m = (F_h - 182) / 0.32$$

6)- Ölçülen motor akımının ( $M_a$ ) haddeleme yükünün ( $F_m$ ) artışı ile doğrusal olarak arttığı ve aralarındaki bağıntının ( $M_a > 1000 \text{ amp}$  için)

$$M_a (\text{Amp}) = 566 + 2.8 F_m (\text{ton})$$

şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

7)- Deformasyon direncinin ( $K$ ), sabit sıcaklık ve deformasyon hızında karbon içeriği ile arttığı, sabit deformasyon hızı ve karbon içeriğinde sıcaklık ile azaldığı tespit edilmiştir.

8)- Akma gerilmesinin ( $\gamma$ ), dinamik akma gerilmesinden ( $S$ ) düşük olduğu, sıcaklığın artması ile her iki gerilmenin de azaldığı, ancak sıcaklık artışı ile dinamik akma gerilmesinin daha hızlı azaldığı tespit edilmiştir.

Haddeleme yükünün hesaplanmasında kullanılan teorik metodların sağlıklı sonuç verebilmesi için, kullanılan haddeleme tezgahının özelliklerinin iyi bilinmesi ve haddeleme sıcaklığının, özellikle ezme miktarının hassas olarak tesbit edilmesi gerekmektedir. Ayrıca ölçümlerde hata payının mümkün olduğunca küçük olması literatürdeki mevcut metodların daha hassas sonuç vermesini sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] KAYALI, E.S. ENSARI, C., "Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları" İTÜ Kimya-Metalurji Fak. İstanbul, 1986.
- [2] VLADEMIR, G.G., "Steel Rolling Technology, Theory and Practice" International Rolling Mill Consultants, Inc, Pittsburgh, Pennsylvania, 1989.
- [3] ROBERTS, W.L., "Flat Processing of Steel" Marcel Dekker, Inc, New York, 1988.
- [4] DENTON, B.K., CRANE, F.A.A., "Roll Load and Torque in the Hot Rolling of Steel" JISI, pp 606-617 August, 1972.
- [5] EL-KALAY, A.K.E.H.A, SPARLING, L.G.M. Factor Effecting Friction and Their Effect on Load Turque and Spread in Hot, Flat Rolling "JISI, pp.152-163. February, 1968.
- [6] ROBERTS, W.L., "Friction in The Hot Rolling of Steel Strip" AISE Year Book, pp.301-307, 1974.
- [7] BERNICK, L.W., "Roll Force Estimation in Hot Rolling", AISE Year Book, pp 130-139, 1973.
- [8] ROBERTS, W.L., "Hot Rolling of Steel" Marcel Dekker Inc., New York, 1983.
- [9] DIETER, G.E., "Mechanical Metallurgy" Second Edition Mc. Graw-Hill Comp. New York, 1976.
- [10] SIMS, R.B., and WRIGHT, H., "Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills, A Comparison Between Measurment and Colculation" JISI, Vol, 201, pp.261-269, March 1963.
- [11] RIDE, J.S., "Analysis of Operation Factors Derived From Hot Strip mill Tests" AISI Yearly Proceedings, pp,461-467, 1965.

[12] GEVREK, M., DEMİRKOL, M., ARON, A., "Sıcak Haddelemede Kuvvet Hesabı İçin Önerilen Formüllerin Kullanım Alanlarının İncelenmesi" .3. Ulusal Metalürji Kongresi, 5-7 Aralık 1979, ODTÜ Ankara.

$\epsilon_{K-1}$

MERDANE	KOMPOZİSYON	KALINLIK		SICAKLIK	VİDA	HADDELEME	MOTOR				
ÇAPı	KARB. MANG.	GİRİŞ	ÇIKIS	GENİŞLİK	GİRİŞ	ÇIKIS	SETİ	HİZİ	YÜKÜ	AKJMI	
(inç)	(%)	(%)	(mm)	(mm)	(C)	(C)	(mm)	rpm	ton	Amper	
24.917	0.14	0.75	20.00		1545	1040		18.50	100	1700	4200
								14.50	100	1800	5000
								12.50	100	1500	3000
								11.00	100	1300	2000
				6.25			900	11.00	125	1000	1000
25.390	0.19	1.40	16.50		1020	980		17.50	100	1600	4400
								13.50	100	1700	4200
								11.50	125	1400	4200
								10.50	125	1100	3000
				5.20			870	10.50	150	800	2000
24.917	0.14	0.75	20.00		1545	1040		18.50	100	1700	4200
								14.50	100	1900	5000
								13.00	100	1600	3000
								11.50	100	1300	2000
				6.25			900	11.50	125	800	1000
24.343	0.16	0.70	18.00		1230	1020		17.50	100	2000	5000
								13.50	100	1900	4200
								11.50	150	1400	4400
								10.50	150	1100	3000
				5.20			930	10.50	150	900	2000
24.352	0.15	0.85	18.50		1240	1040		19.00	100	1400	4400
								15.00	150	1500	3600
								13.00	150	1100	3000
								12.00	150	800	2000
				6.00			880	12.00	150	500	1200
25.434	0.19	1.10	18.00		1060	1040		16.00	100	1700	4400
								12.00	125	1500	5000
								10.50	150	1300	3000
								9.50	150	1200	2800
				4.00			890	9.50	150	800	1400
1											
25.371	0.15	0.85	17.50		1240	1000		15.50	100	1800	5000
								11.50	125	1700	4000
								10.50	150	1500	4000
								9.50	150	1200	3000
				4.10			910	9.50	150	900	2000

24.900	0.14	0.40	16.50		1040	1000	16.50	100	1500	4000	
							12.50	125	1600	4000	
							11.00	150	1200	3600	
							10.00	150	900	2000	
25.399	0.14	0.40	16.50	4.05	1040	1020	890	10.00	150	500	1000
							17.00	100	1500	5000	
							13.00	125	1500	4600	
							11.00	150	1100	3000	
							10.00	150	900	2400	
25.415	0.14	0.40	19.50	4.55	1015	1010	880	10.00	150	700	1200
							15.50	100	1800	5000	
							11.50	150	1900	4600	
							10.00	200	1300	4000	
							9.00	200	1000	3000	
25.434	0.16	0.70	18.00	3.60	1045	1030	910	9.00	150	800	1000
							17.50	100	1500	4200	
							13.50	100	1300	3400	
							11.50	125	1100	2800	
							10.50	150	900	2200	
24.259	0.14	0.40	18.50	5.00	1145	1040	900	10.50	150	700	1200
							17.00	100	1600	5000	
							13.00	100	1500	3800	
							11.00	150	1100	3200	
							10.00	150	900	2600	
				4.15			910	10.00	150	600	1400

EK-2

PROGRAM DATA

```
C ======  
C ======  
C =====  
C ===== BU PROGRAM Fiili OLARAK TOPLANAN HADDELEME BILGILE- =====  
C ===== RiNiN ARA PASO DEGERLERINI HESAPLATMAK ICIN HAZIR- =====  
C ===== LANMIŞTIR. HESAPLANAN ARA DEGERLER SUNLARDIR: =====  
C =====  
C ===== - PASO ÖNCESİNDE VE SONRASINDA HADDELEME SICAKLIĞI =====  
C =====  
C ===== - PASO ÖNCESİNDE VE SONRASINDA MALZEME KALINLIĞI =====  
C =====  
C =====  
C =====  
C ===== HAZIRLAYAN: İBRAHİM TOZLU =====  
C ===== METALURJİ MÜHENDİSİ =====  
C ===== ERDEMİR =====  
C ===== EKİM, 1991 =====  
C =====  
C =====  
C =====
```

REAL DATA\_BUF (100,13,6),HATA(100),C\_KAL(100)

INTEGER CONT,SAYI

```
OPEN ( UNIT      = 1,  
1  STATUS      = 'UNKNOWN',  
1  FILE        = 'TEZ.DAT',  
1  IOSTAT     = IOS )
```

```
OPEN ( UNIT      = 2,  
1  STATUS      = 'UNKNOWN',  
1  FILE        = 'TEZ_CONVERT.OUT',  
1  IOSTAT     = IOS )
```

```
DO I=1,100
  DO J=1,13
    DO K=1,5
      DATA_BUF (I,J,K) = 0.0
    END DO
  END DO
END DO
```

J=0

```
READ (1,10) CONT, (DATA_BUF (1,K,1),K=1,12)
```

```
DO I=1,1000
  IF (CONT .NE. 0) THEN
    J=J+1
    L=0
  END IF
  L=L+1
  READ (1,20,END=30) CONT, (DATA_BUF (J,K,L),K=1,12)
END DO
```

```
10  FORMAT (////,11,F6.3,F6.2,F6.2,F7.2,F7.2,F10.0,
1     F7.0,F7.0,F7.2,F5.0,F6.0,F7.0)
```

```
20  FORMAT (11,F6.3,F6.3,F6.2,F7.2,F7.2,F10.0,F7.0,
1     F7.0,F7.2,F5.0,F6.0,F7.0)
```

```
30  SAYI = J
```

```
DO I=1,SAYI
  DO K=1,6
    IF (DATA_BUF (I,9,K) .NE. 0.) THEN
      DATA_BUF (I,1,K) = DATA_BUF (I,1,1)
      DATA_BUF (I,2,K) = DATA_BUF (I,2,1)
      DATA_BUF (I,3,K) = DATA_BUF (I,3,1)
```

```
DATA_BUF (I,6,K) = DATA_BUF (I,6,1)
DATA_BUF (I,13,1) = K
END IF
END DO
END DO

DO I=1,SAY1
SIC_FAR = DATA_BUF (I,7,1)
1      - DATA_BUF (I,8,DATA_BUF(I,13,1)) - 25.

DO K=1,DATA_BUF(I,13,1)-1
DATA_BUF (I,8,K) = (INT ((DATA_BUF (I,7,1) - 25.
1      - SIC_FAR/DATA_BUF(I,13,1) * K)/5.))*5
DATA_BUF (I,7,K+1) = DATA_BUF (I,8,K)
END DO
END DO

DO I=1,SAY1

DO K=1,DATA_BUF(I,13,1)
IF (DATA_BUF(I,5,K) .EQ. 0.) THEN
    DATA_BUF (I,5,K) = DATA_BUF (I,9,K) - 3.0
1      - (2000. - DATA_BUF(I,11,K))/525.
    IF (K .LT. DATA_BUF(I,13,1)) THEN
        DATA_BUF (I,4,K+1) = DATA_BUF (I,5,K)
    END IF
END IF
END DO

HATA (I) = DATA_BUF(I,5,DATA_BUF(I,13,1))
1      - (DATA_BUF(I,9,DATA_BUF(I,13,1)) - 3.0
1      - (2000. - DATA_BUF(I,11,DATA_BUF(I,13,1)))/525.)

C_KAL(I) = DATA_BUF(I,9,DATA_BUF(I,13,1)) - 3.0
1      - (2000. - DATA_BUF(I,11,DATA_BUF(I,13,1)))/525.
```

```
T_YUK = 0.  
  
DO K=1,DATA_BUF(I,13,1)  
    T_YUK = T_YUK + DATA_BUF(I,11,K)  
END DO  
END DO  
  
DO I=1,SAYI  
    DO K=1,DATA_BUF(I,13,1)  
        WRITE (2,40) (DATA_BUF (I,J,K),J=1,12)  
    END DO  
END DO  
  
40 FORMAT (2X,12F10.2)  
45 FORMAT (14X,'yükə bağlı kalınlık =',F11.2,10X,'hata =',F11.2)  
  
END
```

25.43	0.19	1.10	18.00	12.43	1060.00	1040.00	990.00	16.00	100.00	1700.00	4400.00
25.43	0.19	1.10	12.43	8.05	1060.00	990.00	965.00	12.00	125.00	1500.00	5000.00
25.43	0.19	1.10	8.05	6.17	1060.00	965.00	940.00	10.50	150.00	1300.00	3000.00
25.43	0.19	1.10	6.17	4.98	1060.00	940.00	915.00	9.50	150.00	1200.00	2800.00
25.43	0.19	1.10	4.98	4.00	1060.00	915.00	890.00	9.50	150.00	800.00	1400.00
25.37	0.15	0.85	17.50	12.12	1240.00	1000.00	960.00	15.50	100.00	1800.00	5000.00
25.37	0.15	0.85	12.12	7.93	1240.00	960.00	950.00	11.50	125.00	1700.00	4000.00
25.37	0.15	0.85	7.93	6.55	1240.00	950.00	935.00	10.50	150.00	1500.00	4000.00
25.37	0.15	0.85	6.55	4.98	1240.00	935.00	925.00	9.50	150.00	1200.00	3000.00
25.37	0.15	0.85	4.98	4.10	1240.00	925.00	910.00	9.50	150.00	800.00	2000.00
24.90	0.14	0.40	16.50	12.55	1040.00	1000.00	960.00	16.50	100.00	1500.00	4000.00
24.90	0.14	0.40	12.55	8.74	1040.00	960.00	940.00	12.50	125.00	1600.00	4000.00
24.90	0.14	0.40	8.74	6.48	1040.00	940.00	925.00	11.00	150.00	1200.00	3600.00
24.90	0.14	0.40	6.48	4.90	1040.00	925.00	905.00	10.00	150.00	900.00	2000.00
24.90	0.14	0.40	4.90	4.05	1040.00	905.00	890.00	10.00	150.00	500.00	1000.00
25.40	0.14	0.40	16.50	13.05	1040.00	1020.00	970.00	17.00	100.00	1500.00	5000.00
25.40	0.14	0.40	13.05	9.05	1040.00	970.00	950.00	13.00	125.00	1500.00	4600.00
25.40	0.14	0.40	9.05	6.29	1040.00	950.00	925.00	11.00	150.00	1100.00	3000.00
25.40	0.14	0.40	6.29	4.90	1040.00	925.00	905.00	10.00	150.00	900.00	2400.00
25.40	0.14	0.40	4.90	4.55	1040.00	905.00	880.00	10.00	150.00	700.00	1200.00
25.42	0.14	0.40	19.50	12.12	1015.00	1010.00	970.00	15.50	100.00	1800.00	5000.00
25.42	0.14	0.40	12.12	8.31	1015.00	970.00	955.00	11.50	150.00	1900.00	4600.00
25.42	0.14	0.40	8.31	5.67	1015.00	955.00	940.00	10.00	200.00	1300.00	4000.00
25.42	0.14	0.40	5.67	4.10	1015.00	940.00	925.00	9.00	200.00	1000.00	3000.00
25.42	0.14	0.40	4.10	3.60	1015.00	925.00	910.00	9.00	150.00	800.00	1000.00
25.43	0.16	0.70	18.00	13.55	1045.00	1030.00	985.00	17.50	100.00	1500.00	4200.00
25.43	0.16	0.70	13.55	9.17	1045.00	985.00	965.00	13.50	100.00	1300.00	3400.00
25.43	0.16	0.70	9.17	6.79	1045.00	965.00	940.00	11.50	125.00	1100.00	2800.00
25.43	0.16	0.70	6.79	5.40	1045.00	940.00	920.00	10.50	150.00	900.00	2200.00
25.43	0.16	0.70	5.40	5.00	1045.00	920.00	900.00	10.50	150.00	700.00	1200.00
24.26	0.14	0.40	18.50	13.24	1145.00	1040.00	995.00	17.00	100.00	1600.00	5000.00
24.26	0.14	0.40	13.24	9.05	1145.00	995.00	975.00	13.00	100.00	1500.00	3800.00
24.26	0.14	0.40	9.05	6.29	1145.00	975.00	950.00	11.00	150.00	1100.00	3200.00
24.26	0.14	0.40	6.29	4.90	1145.00	950.00	930.00	10.00	150.00	900.00	2600.00
24.26	0.14	0.40	4.90	4.15	1145.00	930.00	910.00	10.00	150.00	600.00	1400.00

24.92	0.14	0.75	20.00	14.93	1545.00	1040.00	990.00	18.50	100.00	1700.00	4200.00
24.92	0.14	0.75	14.93	11.12	1545.00	990.00	970.00	14.50	100.00	1800.00	5000.00
24.92	0.14	0.75	11.12	8.55	1545.00	970.00	945.00	12.50	100.00	1500.00	3000.00
24.92	0.14	0.75	8.55	6.67	1545.00	945.00	925.00	11.00	100.00	1300.00	2000.00
24.92	0.14	0.75	6.67	6.25	1545.00	925.00	900.00	11.00	125.00	1000.00	1000.00
25.39	0.19	1.40	16.50	13.74	1020.00	980.00	940.00	17.50	100.00	1600.00	4400.00
25.39	0.19	1.40	13.74	9.93	1020.00	940.00	920.00	13.50	100.00	1700.00	4200.00
25.39	0.19	1.40	9.93	7.36	1020.00	920.00	905.00	11.50	125.00	1400.00	4200.00
25.39	0.19	1.40	7.36	5.79	1020.00	905.00	885.00	10.50	125.00	1100.00	3000.00
25.39	0.19	1.40	5.79	5.20	1020.00	885.00	870.00	10.50	150.00	800.00	2000.00
24.92	0.14	0.75	20.00	14.93	1545.00	1040.00	990.00	18.50	100.00	1700.00	4200.00
24.92	0.14	0.75	14.93	11.31	1545.00	990.00	970.00	14.50	100.00	1900.00	5000.00
24.92	0.14	0.75	11.31	9.24	1545.00	970.00	945.00	13.00	100.00	1600.00	3000.00
24.92	0.14	0.75	9.24	7.17	1545.00	945.00	925.00	11.50	100.00	1300.00	2000.00
24.92	0.14	0.75	7.17	6.25	1545.00	925.00	900.00	11.50	125.00	800.00	1000.00
24.34	0.16	0.70	18.00	14.50	1230.00	1020.00	980.00	17.50	100.00	2000.00	5000.00
24.34	0.16	0.70	14.50	10.31	1230.00	980.00	970.00	13.50	100.00	1900.00	4800.00
24.34	0.16	0.70	10.31	7.36	1230.00	970.00	955.00	11.50	150.00	1400.00	4400.00
24.34	0.16	0.70	7.36	5.79	1230.00	955.00	945.00	10.50	150.00	1100.00	3000.00
24.34	0.16	0.70	5.79	5.20	1230.00	945.00	930.00	10.50	150.00	900.00	2000.00
24.17	0.19	0.90	20.00	16.86	1515.00	1010.00	955.00	21.00	100.00	1400.00	3000.00
24.17	0.19	0.90	16.86	13.05	1515.00	955.00	930.00	17.00	50.00	1500.00	3000.00
24.17	0.19	0.90	13.05	12.05	1515.00	930.00	900.00	17.00	100.00	1000.00	1200.00
24.17	0.19	0.90	20.00	16.86	1505.00	1040.00	985.00	21.00	100.00	1400.00	2400.00
24.17	0.19	0.90	16.86	12.86	1505.00	985.00	950.00	17.00	50.00	1400.00	3000.00
24.17	0.19	0.90	12.86	11.90	1505.00	950.00	920.00	17.00	100.00	900.00	1200.00
24.35	0.15	0.85	18.50	14.86	1240.00	1040.00	990.00	19.00	100.00	1400.00	4400.00
24.35	0.15	0.85	14.86	11.05	1240.00	990.00	960.00	15.00	150.00	1500.00	3600.00
24.35	0.15	0.85	11.05	8.29	1240.00	960.00	935.00	13.00	150.00	1100.00	3000.00
24.35	0.15	0.85	8.29	6.71	1240.00	935.00	905.00	12.00	150.00	800.00	2000.00
24.35	0.15	0.85	6.71	6.00	1240.00	905.00	880.00	12.00	150.00	500.00	1200.00

EK-3

PROGRAM HAD\_HESAP

C =====  
C =====  
C =====  
C ===== BU PROGRAM ASAĞIDAKİ HADDELEME PARAMETRELERİNİN HE- =====  
C ===== SAPLATILMASI VE HESAPLANAN PARAMETRELERİN FİİLİ DE- =====  
C ===== GERLER İLE KİYASLANMASI İÇİN HAZIRLANMIŞTIR: =====  
C =====  
C ===== - HADDELEME YÜKÜ  
C ===== - DEFORMASYON DİRENCİ  
C ===== - AKMA GERİLMESİ  
C ===== - PLASTİK AKMA GERİLMESİ  
C =====  
C =====  
C ===== BU PARAMETRELERİN HESAPLANMASINDA SU METODLAR KUL- =====  
C ===== LANILMIŞTIR:  
C =====  
C ===== - SIMS METODU  
C ===== - COOK-Mc CRIM (BISRA) METODU  
C ===== - FORD-ALEXANDER METODU (normal)  
C ===== - FORD-ALEXANDER METODU (yassılaşmaya göre)  
C ===== - DENTON-CRANE METODU  
C ===== - GREEN WALLECE METODU  
C ===== - EKELUND METODU  
C ===== - RIDE METODU  
C ===== - GLEJİ METODU  
C ===== - TSELIKOV METODU  
C =====  
C =====  
C =====  
C ===== HAZIRLAYAN: İBRAHİM TOZLU  
C ===== METALURJİ MÜHENDİSİ  
C ===== ERDEMİR  
C ===== EKİM, 1991  
C =====  
C =====

IMPLICIT INTEGER (A-P,S-Z)

INTEGER WORKSPACE (3),

1 TCA (3),  
1 GIRIS (400),  
1 MENU (400),  
1 INDEX

CHARACTER ONAY\*1,

1 BF1 \*1,  
1 BF2 \*2,  
1 BF3 \*3,  
1 BF4 \*4,  
1 BF5 \*5,  
1 BF6 \*6,  
1 BF7 \*7,  
1 BF8 \*8,  
1 OPTION\*29,  
1 CINDEX\*2,  
1 BLANK\_CINDEX\*2,  
1 ARROW\*2,  
1 BLANK\_ARROW\*2,  
1 SIFRE \*10,  
1 FT\_BUF (10) \*20,  
1 KUTUK11 \*20,  
1 KUTUK12 \*20,  
1 KUTUK1 \*20,  
1 GRAFIK (51,121,13) \*1,  
1 X\_EKSEN \*50,  
1 Y\_EKSEN \*50,  
1 LEGEND (3)\*70

REAL W\_BUF(11,4),! write buffer 11: yöntemler,  
1 ! 1 : haddelenme yükü, (FT),  
1 ! 2 : akma gerilmesi (DAM,AGT,AGE,AGG,DA),  
1 ! 3 : dinamik akma gerilmesi,  
1 ! 4 : sürtünme katsayısı,

1 ORT\_Y(11), ! regresyon için kullanılan değişkenler  
1 Y\_DEG(300,11), !  
1 AK(11), !  
1 BK(11), !  
1 BK1(11), !  
1 BK2, !  
1 TOP\_Y(11), !  
1 ADET, ! deney adedi  
1 H1, ! malzemenin giriş kalınlığı (mm)  
1 H2, ! malzemenin çıkış kalınlığı (mm)  
1 HA, ! aritmetik ort. kalınlık (mm)  
1 HN, ! n noktasında kalınlık (mm)  
1 HINI,! malzemenin giriş kalınlığı (in)  
1 DRF, ! draft (g\_kal - ç\_kal) (mm)  
1 TB, ! merd-malz temas boyu (mm)  
1 XN, ! n noktasında temas boyu (mm)  
1 RED, ! ezme oranı (mm/mm)  
1 AF, ! A faktörü  
1 EP, ! deformasyon hızı (1/sn)  
1 DFD, ! deformasyon direnci (kg/mm<sup>2</sup>)  
1 EPFA,! deformasyon hızı (ford-alex)(1/sn)  
1 DAM, ! dinamik akma mukavemeti (kg/mm<sup>2</sup>)  
1 C\_MIK, ! karbon miktarı (%)  
1 MN\_MIK,! mangan miktarı (%)  
1 TH, ! haddeleme sıcaklığı (C)  
1 THF, ! haddeleme sıcaklığı (F)  
1 RM, ! iş merdanesi yarıçapı (mm)  
1 RMF, ! yassılaşmış iş merdanesi yarıçapı (mm)  
1 ER, ! iş merdanesi elastik modülü (kg/mm<sup>2</sup>)  
1 W, ! malzemenin genişliği (mm)  
1 SK, ! sörtenme katsayısı  
1 FT\_PR, ! pratik haddeleme yükü (ton)  
1 FT, ! toplam haddeleme yükü (ton)  
1 FTM, ! modifiye edilmiş toplam haddeleme yükü (ton)  
1 FT1, ! toplam haddeleme yükü kontrol değeri (ton)  
1 AK\_PR,! hadde motoru akımı (Amp)  
1 VMM, ! haddeleme hızı (mm/sn)

1 VM, ! haddeleme hızı (m/sn)  
1 VN, ! haddeleme hızı (dev/dak)  
1 VFPM, ! haddeleme hızı (fpm)  
1 TA, ! had-merd temas alanı (mm<sup>2</sup>)  
1 ZA, ! temas boyunun kalınlığa oranı (arit-ort)  
1 ZP, ! temas boyunun kalınlığa oranı (para-ort)  
1 ZG, ! temas boyunun kalınlığa oranı (geom-ort)  
1 QP, ! geometrik faktör (sims)  
1 CP, ! geometrik faktör (bisra)  
1 IP, ! geometrik faktör (bisra)  
1 CKD, ! merdane yarı çapının çıkış kalınlığına oranı  
1 WHF, ! faktör (wright-hope)  
1 DA, ! ortalama dinamik akma gerilmesi (kg/mm<sup>2</sup>)  
1 DATS,! dinamik akma gerilmesi (tarokh-sered.) (kg/mm<sup>2</sup>)  
1 POIS,! poison oranı (0,33)  
1 MCIN,! kullanılan merdane cinsi  
    ! 1 : dökme demir, pörözlü yüzeyli çelik merdane  
    ! 2 : çil dökme demir, düzgün yüzeyli çelik merdane  
    ! 3 : taşlanmış yüzeyli çelik merdane  
1 PK, ! plastisite katsayısı (ekelund)  
1 AGE, ! akma gerilmesi (ekelund)  
1 AGT, ! akma gerilmesi (tselikov)  
1 FAC, ! ford-alex. hadde yassılaşma katsayısı  
1 FAX, ! ford-alex. katsayısı  
1 SKE, ! ekelund sürtünme katsayısı  
1 AGG, ! gleji akma gerilmesi  
1 GHF, ! gleji hız faktörü  
1 SKG, ! gleji sürtünme katsayısı  
1 GMF, ! gleji merdane cinsi faktörü  
1 TF ! tselikov faktörü

FT\_BUF (1) = 'sims' : '  
FT\_BUF (2) = 'cook-mc crum' : '  
FT\_BUF (3) = 'ford-alexander 1' : '  
FT\_BUF (4) = 'ford-alexander 2' : '  
FT\_BUF (5) = 'denton-crane' : '  
FT\_BUF (6) = 'green wallece' : '

```
FT_BUF (7) = 'ekelund      : '
FT_BUF (8) = 'ride        : '
FT_BUF (9) = 'gleji       : '
FT_BUF(10) = 'tselikov    : '
```

```
type *,' bilgilerin OKUNACAGI kutuk adini girin (max 20 chr) : '
READ (*,'(A20)') KUTUK1
```

```
OPEN ( UNIT      = 1,
1  STATUS      = 'UNKNOWN',
1  FILE        = KUTUK1,
1  IOSTAT     = IOS )
```

```
type *,' bilgilerin YAZILACAGI kutuk adini girin (max 20 chr) : '
READ (*,'(A20)') KUTUK11
```

```
OPEN ( UNIT      = 11,
1  STATUS      = 'UNKNOWN',
1  FILE        = KUTUK11,
1  ACCESS      = 'APPEND',
1  IOSTAT     = IOS )
```

```
type *,' grafiklerin CIZILECEGI kutuk adini girin (max 20 chr) : '
READ (*,'(A20)') KUTUK12
```

```
OPEN ( UNIT      = 12,
1  STATUS      = 'UNKNOWN',
1  FILE        = KUTUK12,
1  ACCESS      = 'APPEND',
1  IOSTAT     = IOS )
```

```
DO Y=1,51
  DO I=1,13
    DO X=1,121
      GRAFIK (Y,X,I) = ' '
    END DO
```

```
GRAFIK (Y,1,1) = '1'  
END DO  
END DO  
  
DO X=1,121  
  DO I=1,13  
    GRAFIK (1,X,I) = '-'  
  END DO  
END DO  
  
ABET = 0.  
  
10   READ (1,510,END=999) RM,C_MIK,MN_MIK,H1,H2,W,TH,VN,FT_PR,AK_PR  
510  FORMAT (2X,6F10.2,10X,F10.2,10X,3F10.2)  
  
RM = RM / 2. * 25.4  
MCIN = 1  
METOD = 1  
ER = 18000  
  
PI = 22. / 7.  
  
POIS = 0.33  
  
THF = 1.8*TH+32  
  
VM1 = 2. * PI * RM * VN / 60.  
  
VM = VM1 / 1000.  
  
VFPM = VM1 / 25.4 / 12. * 60.  
  
HIN1 = H1 / 25.4  
  
DRF = H1 - H2
```

$$RED = DRF / H1$$

$$AF = RED * (1. - RED)$$

$$TB = (RM * DRF) ** 0.5$$

$$XN = (H2 * TB) / (H1 + H2)$$

$$HN = H2 + (XN * H2. / RM)$$

$$HA = (H1+H2)/2.$$

$$ZA = 2.*TB / (H1+H2)$$

$$ZG = TB / (H1*H2)**0.5$$

$$CK0 = RM / H2$$

$$DFD = FT_PR * 1000. / TB / W$$

$$W_BUF(METHOD,1) = FT_PR$$

$$W_BUF(METHOD,2) = FT_PR$$

$$W_BUF(METHOD,3) = 0.$$

$$W_BUF(METHOD,4) = DFD$$

$$W_BUF(METHOD,5) = 0.$$

! ===== Sims metoduna göre haddeleme yükü =====

$$METHOD = 2$$

$$EP = PI*XN/30. * (RM/H1)**0.5 * (1. / (RED)**0.5) \\ 1 * ALOG(1. / (1. - RED))$$

$$DAM = -1.429 + 4.995 / ((TH/1000.)**2.) - 21.36 * (RED**0.5) \\ 1 + 33.08 * (RED**0.5) / (TH/1000.)$$

QP = 1.4

C QP = 2.\* PI\*\*2./360. \* ATAN(AF) / (2.\*AF) - PI/4.  
C 1 - (RM/H2)\*\*0.5 \* (ALOG(HN/H2)  
C 1 + ALOG(AF\*\*2./RED) / 2.) / AF

FT = W \* TB \* QP \* DAM

FT1 = 0.

DO WHILE (ABS(FT1-FT) .GT. 1)

FT1 = FT

RMF = RM + RM\*16.\*FT1\*(1.-POIS\*\*2.)/(PI\*ER\*ADR)

C QP = 2.\* PI\*\*2./360. \* ATAN(AF) / (2.\*AF) - PI/4.  
C 1 - (RMF/H2)\*\*0.5 \* (ALOG(HN/H2)  
C 1 + ALOG(AF\*\*2./RED) / 2.) / AF

FT = W \* TB \* QP \* DAM

END DO

FT = FT/1000.

FTM = (FT - 88.1048) / 0.3368

DFD = FT \* 1000. / TB / W

W\_BUF (METHOD,1) = FT

W\_BUF (METHOD,2) = FTM

W\_BUF (METHOD,3) = DAM

W\_BUF (METHOD,4) = DFD

W\_BUF (METHOD,5) = 0.

! ====== Cook-Mc Crum (Bisra) metoduna göre haddeleme yükü ======

METHOD = 3

$$EP = \frac{\pi \times W}{30} \times \left( \frac{RM}{H1} \right)^{0.5} \times \left( \frac{1}{(1-RED)} \right)^{0.5}$$
$$1 \quad \times \text{ALOG}\left(\frac{1}{(1-RED)}\right)$$

$$DAM = -1.429 + 4.985/\left(\frac{TH}{1000}\right)^2, - 21.36 \times RED^{0.5}$$
$$1 \quad + 33.08 \times RED^{0.5}/\left(\frac{TH}{1000}\right)$$

$$IP = DAM \times \left( \frac{(1+RED)}{(1-RED)} \right)^{0.5}$$

QP = 1.4

C      QP =  $2 \times \frac{\pi}{360} \times \text{ATAN}(AF) / (2 \times AF)$

C      1       $- \frac{\pi}{4} - \left( \frac{RM}{H2} \right)^{0.5}$

C      1       $\times \left( \text{ALOG}\left(\frac{HN}{H2}\right) + \text{ALOG}\left(\frac{AF^2}{RED}\right) / 2 \right) / AF$

$$CP = QP \times \left( \frac{H2 \times RED}{RM \times (1+RED)} \right)^{0.5}$$

$$FT = W \times RM \times CP \times IP$$

$$FT1 = 0.$$

DO WHILE (ABS(FT1-FT) .GT. 1)

$$FT1 = FT$$

$$RMF = RM + RMA16 \times FT1 \times \left( 1 - \frac{POIS}{WDRF} \right) / (\pi \times ER \times WDRF)$$

C      QP =  $2 \times \frac{\pi}{360} \times \text{ATAN}(AF) / (2 \times AF) - \frac{\pi}{4}$

C      1       $- \left( \frac{RMF}{H2} \right)^{0.5} \times \left( \text{ALOG}\left(\frac{HN}{H2}\right) + \text{ALOG}\left(\frac{AF^2}{RED}\right) / 2 \right) / AF$

$$CP = QP \times \left( \frac{H2 \times RED}{RMF \times (1+RED)} \right)^{0.5}$$

$$FT = W \times RMF \times CP \times IP$$

END DO

FT = FT/1000.

FTM = (FT - 96.2769) / 0.3387

DFD = FT \* 1000. / TB / W

W\_BUF (METOD,1) = FT

W\_BUF (METOD,2) = FTM

W\_BUF (METOD,3) = DAM

W\_BUF (METOD,4) = DFD

W\_BUF (METOD,5) = 0.

! ===== Ford-Alexander metoduna göre haddeleme yükü =====

METOD = 4

EP = PI\*VN/30. \* (RM\*RED/H1)\*\*0.5 \* (1.+(RED/4.))

DA = (238.5 \* EXP(8530/(459.+THF)) + 2600.\* ALOG10 (EP)) / 1422.

FT = 0.25 \* (ZA+PI) \* W \* TB \* DA /1000.

FTM = (FT - 181.1009) / 0.2906

DFD = FT \* 1000. / TB / W

W\_BUF (METOD,1) = FT

W\_BUF (METOD,2) = FTM

W\_BUF (METOD,3) = DA

W\_BUF (METOD,4) = DFD

W\_BUF (METOD,5) = 0.

! ===== Ford-Alexander met. göre had. yükü (yassılaşmaya göre) =====

METHOD = 5

$$FAC = 16. * (1. - POISK * 2) / (PI * ER)$$

$$FAX = PI * FAC * 2. * FAC * (RM / H1) ** 0.5 * (RM / H1) / (2. * RED * (2. - RED))$$

$$EP = PI * UN / 30. * (RM * RED / H1) ** 0.5 * (1. + (RED / 4.))$$

$$DA = (238.5 * EXP(8530 / (459. + THF)) + 2600. * ALOG10 (EP)) / 1422.$$

$$FT = 0.25 * (ZA + PI) * W * TB * DA / (1. - (FAX * DA / 2.)) / 1000.$$

$$FTM = (FT - 181.7289) / 0.2904$$

$$DFD = FT * 1000. / TB / W$$

$$W_BUF (METHOD,1) = FT$$

$$W_BUF (METHOD,2) = FTM$$

$$W_BUF (METHOD,3) = DA$$

$$W_BUF (METHOD,4) = DFD$$

$$W_BUF (METHOD,5) = 0.$$

! ===== Denton-Crane metoduna göre haddeleme yükü =====

METHOD = 6

$$EP = PI * UN / 30. * (RM * RED / H1) ** 0.5 * (1. + (RED / 4.))$$

$$DA = (238.5 * EXP(8530 / (459. + THF)) + 2600. * ALOG10 (EP)) / 1422.$$

$$FT = W * TB + (0.265 * ZG + 0.655) * DA / 1000.$$

$$FTM = (FT - 172.2061) / 0.2863$$

$$DFD = FT * 1000. / TB / W$$

W\_BUF (METOD,1) = FT  
W\_BUF (METOD,2) = FTM  
W\_BUF (METOD,3) = DA  
W\_BUF (METOD,4) = DFD  
W\_BUF (METOD,5) = 0.

! ===== Green Wallece metoduna göre haddeleme yükü =====

$$METOD = 7$$

$$EP = PI * W / 30. * (RM * RED / H1) * 0.5 * (1. + (RED / 4.))$$

$$DA = (238.5 * EXP(8530 / (459. + THF)) + 2600. * ALOG10 (EP)) / 1422.$$

$$FT = 0.5 * W * TB * (ZA + 1 / ZA) * DA / 1000.$$

$$FTM = (FT - 204.7148) / 0.3248$$

$$DFD = FT * 1000. / TB / W$$

W\_BUF (METOD,1) = FT  
W\_BUF (METOD,2) = FTM  
W\_BUF (METOD,3) = DA  
W\_BUF (METOD,4) = DFD  
W\_BUF (METOD,5) = 0.

! ===== Ekelund metoduna göre haddeleme yükü =====

$$METOD = 8$$

$$PK = 0.01 * (14. - 0.01 * TH)$$

IF (MCIN .EQ. 1) THEN

SKE = 1.05 - 0.0005 \* TH  
ELSE IF (MCIN .EQ. 2) THEN  
    SKE = 0.8 \* (1.05 - 0.0005 \* TH)  
ELSE IF (MCIN .EQ. 2) THEN  
    SKE = 0.55 \* (1.05 - 0.0005 \* TH)  
END IF

AGE = 100.\*PK\*(1.4+C\_MIK+MN\_MIK+0.3\*CR).

FT = (1+(0.8\*SKE\*TB-0.6\*DRF)/HA) \* (AGE+PK\*VMM\*(DRF/RM)\*0.5/HA)  
1       \* W \* TB /1000.

FTM = (FT - 350.6286) / 0.3877

DFD = FT \* 1000. / TB / W

W\_BUF (METOD,1) = FT  
W\_BUF (METOD,2) = FTM  
W\_BUF (METOD,3) = AGE  
W\_BUF (METOD,4) = DFD  
W\_BUF (METOD,5) = SKE

! ===== Ride metoduna göre haddeleme yükü =====

METOD = 9

FT = (102.278 - 0.0012\*VFP - 0.000013\*VFP\*\*2 + 149.4\*RED  
1           - 1.4\*RED\*\*2 -106.363\*HIN1 + 71.888\*HIN1\*\*2  
1           - 0.07\*THF + 0.000018\*THF\*\*2) \* W / 25.4

FTM = (FT - 643.7689) / 0.6134

DFD = FT \* 1000. / TB / W

W\_BUF (METOD,1) = FT  
W\_BUF (METOD,2) = FTM

W\_BUF (METOD,3) = 0.  
W\_BUF (METOD,4) = DFD  
W\_BUF (METOD,5) = 0.

! ===== Gleji metoduna göre haddeleme yükü =====

METOD = 10

AGG = 0.015 \* (1400-TH)

IF (ZA .GT. 0.25 .AND. ZA .LE. 1.) THEN  
    GMF = 17.\*ZAA\*\*2 - 29.85\*ZA + 18.3  
ELSE IF (ZA .GT. 1. .AND. ZA .LE. 3.) THEN  
    GMF = 0.8\*ZAA\*\*2 - 4.9\*ZA + 9.6  
ELSE IF (ZA .GT. 3. .AND. ZA .LE. 13.) THEN  
    GMF = 0.013\*ZAA\*\*2 - 0.29\*ZA + 2.85  
END IF

GHF = 0.42 + (25. - VM)\*\*3.5 / 115000.

IF (MCIN .EQ. 1) THEN  
    SKG = (1.05 - 0.0005 \* TH) \* GHF  
ELSE IF (MCIN .EQ. 2) THEN  
    SKG = (0.92 - 0.0005 \* TH) \* GHF  
ELSE IF (MCIN .EQ. 2) THEN  
    SKG = (0.82 - 0.0005 \* TH) \* GHF  
END IF

FT = W \* TB \* 1.15 \* AGG \* (1. + GMF \* SKG \* ZA  
1 \* VM\*\*0.25)/1000.

FTM = (FT - 502.4436) / 0.6852

DFD = FT \* 1000. / TB / W

W\_BUF (METOD,1) = FT

W\_BUF (METOD,2) = FTM  
W\_BUF (METOD,3) = AGG  
W\_BUF (METOD,4) = DFD  
W\_BUF (METOD,5) = SKG

! ===== Tselikov metoduna göre haddeleme yükü =====

METOD = 11

$$AGT = 7.5 + (900 - TH) * 0.0157$$

$$GHF = 0.42 + (25. - VM) * 3.5 / 115000.$$

IF (MCIN .EQ. 1) THEN  
SKG = (1.05 - 0.0005 \* TH) \* GHF  
ELSE IF (MCIN .EQ. 2) THEN  
SKG = (0.92 - 0.0005 \* TH) \* GHF  
ELSE IF (MCIN .EQ. 2) THEN  
SKG = (0.82 - 0.0005 \* TH) \* GHF  
END IF

$$TF = 2. * SKG * TB / DRF$$

$$FT = 1.15 * AGT * (2. - RED) / (RED * TF)  
1 * (((1/(1-RED)) * (TF/2.) - 1.)) * W * TB / 1000.$$

$$FTM = (FT - 182.1794) / 0.3420$$

$$DFD = FT * 1000. / TB / W$$

W\_BUF (METOD,1) = FT  
W\_BUF (METOD,2) = FTM  
W\_BUF (METOD,3) = AGT  
W\_BUF (METOD,4) = DFD  
W\_BUF (METOD,5) = SKG

! ===== hesaplamalarin sonu =====

WRITE (11,520) H1, H2, TH, RED, TB, W, EP, CK0

```
520  FORMAT (/,3X,'H1 = ',F5.2,
     1      3X,'H2 = ',F5.2,
     1      3X,'TH = ',F5.0,
     1      3X,'RED= ',F4.2,
     1      3X,'TB = ',F5.2,
     1      3X,'W = ',F5.0,
     1      3X,'EP = ',F5.2,
     1      3X,'CK0= ',F6.2)
```

WRITE (11,530) ((W\_BUF(I,J),I=1,11),J=1,5)

```
530  FORMAT (2X,'Haddeleme Yükü : ',11F10.2,/,
     1      2X,'Mo.Ed.Had.Yükü : ',11F10.2,/,
     1      2X,'Akma Gerilmesi : ',11F10.2,/,
     1      2X,'Defrn. Direnci : ',11F10.2,/,
     1      2X,'Sırtunme Kats. : ',11F10.2)
```

X = NINT (W\_BUF(1,2)/21.+1.)

Y = NINT (AK\_PR/120.+1.)

GRAFIK (Y,X,1) = '\*'

```
Y_DEG(ADET,1) = W_BUF(1,2)
Y_DEG(ADET,2) = AK_PR
```

ADET = ADET+1

GO TO 10

```
999  DO I=1,11
      TOP_Y(I) = 0.
      END DO
```

```
DO J=1,ADET
    DO I = 1,11
        TOP_Y(I) = TOP_Y(I) + Y_DEG(J,I)
    END DO
END DO

DO I = 1,11
    ORT_Y(I) = TOP_Y(I) / ADET
    BK1(I) = 0.
END DO

BK2 = 0.

DO J=1,ADET
    DO I = 1,11
        BK1(I) = BK1(I) + Y_DEG(J,I) * Y_DEG(J,I)
    END DO
    BK2 = BK2 + Y_DEG(J,I)**2.
END DO

DO I = 2,11
    AK(I) = (BK2 * TOP_Y(I) - BK1(I) * TOP_Y(I))
1           / (BK2 * ADET - TOP_Y(I)**2.)
    BK(I) = (BK1(I) - TOP_Y(I) * TOP_Y(I) / ADET)
1           / (BK2 - TOP_Y(I)**2. / ADET)
END DO

DO I=1,10
    WRITE (12,540) ((GRAFIK(Y,X,I), X=1,121), Y=51,1,-1)
    WRITE (12,550) FT_BUF(I),AK(I+1), BK(I+1)
    WRITE (12,'(A1)') '1'
END DO

540 FORMAT (7X,12|A1)
550 FORMAT (///,7X,A20,/,
1           7X,'Y = A + B X',/,
1           7X,'Y : metoda göre hesaplanan yük değeri',/)
```

1       7X,'X : fiili yük değeri',/  
1       7X,'A = ',F12.4,/,  
1       7X,'B = ',F12.4)

STOP

END

## ÖZGEÇMİŞ

İbrahim TOZLU 1961 yılında Gümüşhane'de doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Gümüşhane'de bitirdi. 1983 yılında İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliğini kazanmış; 1987 yılında bu bölümde Metalurji Mühendisi ünvanıyla mezun olmuştur. Yine aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında Yüksek Lisans eğitimi ne başlamıştır. Ekim 1988 tarihinden itibaren, Ereğli Demir Çelik Fabrikaları, Sıcak Haddehanesinde işletme mühendisi olarak çalışmaktadır.