

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOĞUK HADDELEME İŞLEMİNİN PROSES  
AMAÇLI ENİYİLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Aykut BAŞKAYA**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet FIRAT**

**Ocak 2020**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

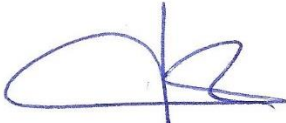
SOĞUK HADDELEME İŞLEMİNİN PROSES  
AMAÇLI ENİYİLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aykut BAŞKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

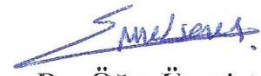
Bu tez 30.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Mehmet FIRAT  
Jüri Başkanı



Doç. Dr.  
Murat ÖZSOY  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi  
Emre ESENER  
Üye

## **BEYAN**

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

Aykut BAŞKAYA

30.01.2020

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet FIRAT'a ve her konuda desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmamda benden manevi desteklerini esirgemeyen eşim Ümran BAŞKAYA ve kızım Bilge BAŞKAYA'ya teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLOLAR LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1.Haddelemenin Basit Tanımı.....	1
1.2. Sıcak Haddeleme Prosesi.....	3
1.3. Soğuk Haddeleme Prosesi.....	3
1.4. Haddelemenin Tarihçesi.....	4
1.5 Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı.....	7
BÖLÜM 2.	
HADDELEME TEORİSİ .....	9
2.1. Haddeleme Esnasında Malzemede oluşan Deformasyon .....	9
2.2. Hadde Geometrisi .....	10
2.3. Haddelemede kuvvet Eşitliği .....	12
2.4. Hadde Merdanelerinin Elastik Deformasyonu .....	15
2.5. Sürtünme Katsayısı .....	17

### BÖLÜM 3.

HADDELEMEDE ANALİTİK YÖNTEMLER	20
3.1. Wusatowski Yöntemi .....	22
3.2. Trink Yöntemi.....	23
3.3. Korolev ve Nikolayevski Yöntemi.....	24
3.4. Ekelund Yöntemi.....	25
3.3. Tselikov Yöntemi .....	25
3.6. Dieter Yöntemi.....	27
3.7. Stone Yöntemi.....	27
3.8. ScheyYöntemi.....	28
3.9. Bland ve Ford Yöntemi.....	29

### BÖLÜM 4.

UYGULAMA ÇALIŞMASI .....	30
4.1. Deneme Üretiminde Kullanılacak Malzeme Seçimi.....	30
4.2. Deneme Malzemesinin Mekanik Özelliklerinin Tespit Edilmesi.....	31
4.3. Soğuk Haddeme Deneme Üretimi Yapılması .....	32
4.4. Analitik Hesaplamalar.....	36
4.5. Nümerik Hesaplamalar.....	37
4.5.1. 1. Stand analizi.....	39
4.5.2. 2. Stand analizi.....	40
4.5.3. 3. Stand analizi.....	41
4.5.4. 4. Stand analizi.....	42
4.5.5. Nümerik analiz sonuçları.....	43

### BÖLÜM 5.

DEĞERLENDİRME .....	44
KAYNAKLAR .....	47
ÖZGEÇMİŞ .....	50

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\mu$	: Sürtünme katsayısı
b	: Malzeme genişliği
C	: Pekleşme katsayısı
e	: Euler sayısı
E	: Elastisite modülü
h	: Malzeme kalınlığı
$K_{fm}$	: Ortalama Mukavemet
$K_s$	: Düzlemsel gerilmedeki malzeme mukavemeti
$K_w$	: Deformasyon direnci
L	: Merdanelerin malzemeye temas uzunluğu
n	: Pekleşme üsteli
P	: Hadde yükü
p	: Hadde yüzey basıncı
PMF	: Stone katsayısı
Q	: Dieter katsayısı
R	: Merdane yarıçapı
r	: Yüzde haddeleme miktarı
t	: Gergi yükü
$\alpha$	: Gerinim oranı katsayısı
$\gamma$	: Poisson oranı
$\varepsilon$	: Gerinim
$\varepsilon$	: Gerinim oranı
$\sigma$	: Mukavemet
$\sigma_{ak}$	: Malzeme akma mukavemeti
$\sigma_t$	: Birim gergi yükü
vr	: Merdane çizgisel hızı

$v_s$  : Malzeme hızı  
 $\varphi$  : Merdane ekseninden temas açısı





## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tek standlı hadde düzeneği.....	1
Şekil 1.2. Tandem hadde şematik gösterimi .....	2
Şekil 1.3. Sıcak Haddehane Şematik Gösterimi [5].....	3
Şekil 1.4. Leonardo da Vinci'nin Hadde Projesi [7] .....	4
Şekil 1.5. Çubuk Hadde Projesi - John Payne - 1728 [7].....	5
Şekil 1.6. Dişli Kaplin Tasarımı - John Purnell -1766 [7] .....	5
Şekil 1.7. Wiliam Playfield'in Hadde Ayağı Tasarımı - 1783 [7].....	6
Şekil 1.8. 1860'lı yılların tipik levha hadde ayağı [7] .....	6
Şekil 2.1. Hollenberg deneysel Çalışması [4] .....	9
Şekil 2.2 Orowan'ın, plastin lama haddelemesi [4] .....	10
Şekil 2.3. Hadde Kesiti.....	11
Şekil 2.4. Haddelemede Kuvvetler.....	12
Şekil 2.5. Hadde basınç dağılımı.....	15
Şekil 2.6. İş Merdanelerinde eğilme [21].....	15
Şekil 2.7. Merdane Düzleşmesi.....	16
Şekil 2.8. Hitchcock ve sonlu elemanlar yöntemi kıyaslanması [12] .....	17
Şekil 3.1. Haddeleme Prosesindeki Elastik Bölgeler [5] .....	20
Şekil 3.2. Haddelenen Manuldeki Genişlik Artışı [4].....	21
Şekil 4.1. Çelik Kaliteleri [27] .....	31
Şekil 4.2. Sürekli Tandem Hadde Çalışma Prensibi .....	33
Şekil 4.3. Deneysel Çalışmanın yapıldığı Sürekli Tandem Hadde .....	34
Şekil 4.4. Sürekli Tandem Hadde Operatör Ekranı.....	34
Şekil 4.5. Simufact Forming 3D Modelleme .....	38
Şekil 4.6. Soğuk Haddelemede 2D düzlemsel gerilme metodu [13] .....	38
Şekil 4.7. Yazılımda 2D Düzlemi Seçimi .....	38
Şekil 4.8. İki Hadde Merdanesi Arasında Haddelenmek üzere olan Malzeme.....	39

Şekil 4.9. 1. Standda Oluşan eşdeğer Gerilme .....	39
Şekil 4.10. 1. Standda Hadde Yüğü .....	40
Şekil 4.11. 2. Standda Malzemede Oluşan Eşdeğer Gerilme.....	40
Şekil 4.12. 2. Standda Hadde Yüğü .....	41
Şekil 4.13. 3. Standda Oluşan Eşdeğer Gerilme .....	41
Şekil 4.14. 3. Standda Hadde Yüğü .....	42
Şekil 4.15. 4. Standda Oluşan Eşdeğer Gerilme .....	42
Şekil 4.16. 4. Standda Hadde Yüğü .....	43
Şekil 5.1. Tez Çalışmasında Alınan Sonuçların Karşılaştırılması .....	45



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Deneme Üretiminden Elde Edilen Veriler.....	35
Tablo 4.2. Hesaplanan Sürtünme Katsayıları.....	36
Tablo 4.3. Analitik Yöntemlerle Elde Edilen Hadde Kuvvetleri (KgF) .....	37
Tablo 4.4. Nümerik Analiz Sonucu Elde Edilen Hadde Yükleri .....	43
Tablo 5.1. Tez Çalışmasında alınan sonuçların Karşılaştırılması .....	44

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Soğuk Haddeme, Sonlu Elemanlar Analizi, Plastik Şekil Verme, IF Malzeme, Hadde Kuvveti

Soğuk haddeme elastik ve plastik deformasyon bölgelerinden oluşan bir şekil verme yöntemidir. Plastik deformasyon, haddeme prosesinin temelini oluşturmaktadır. Malzemeyi plastik şekil vermek için gerekli hadde kuvvetinin tespiti, haddehane büyüklüğünü ve gerekli motor güçlerinin hesaplanmasında veya mevcut haddeme kapasitesinin yeterli olup olmayacağı hakkında kullanılmaktadır. Ayrıca, çelik yeni kalitelerinin geliştirilmesi esnasında hangi kalitenin hangi parametreler ile haddelenmesi gerektiğinin hesaplanmasında da hadde kuvveti baz alınmaktadır.

Bu çalışmada, Soğuk haddeme hadde kuvveti, analitik ve nümerik yöntemlerle hesaplanmış, hesaplanan sonuçlar deneysel çalışma ile elde edilenler ile kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışma aşamasında, EN 10130:2006 DC03 kalite IF çeliği, soğuk haddelenerek, haddeme esnasında oluşan kuvvetler ve diğer parametreler tespit edilmiştir. Literatürde yapılan araştırmalar ile soğuk haddemede kullanılan analitik yöntemler incelenmiş ve her bir yöntem ile, deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılarak soğuk haddeme kuvveti analitik olarak hesaplanmıştır. Bir sonraki adımda soğuk haddeme yapılan hat ve kullanılan malzeme sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen parametreler ile haddeme simülasyonu yapılmış, hadde kuvveti elde edilmiştir.

Deneysel çalışma, Analitik ve Nümerik analizlerden birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Daha önce haddeme pratiği yapılmamış bir malzemenin haddeme sırasında nasıl davranış sergileyeceği veya hangi parametrelerle nasıl haddelenebileceğinin önceden çok yakın bir şekilde tahmin edilebileceği görülmüştür.

# PROCEED OPTIMISATION OF COLD ROLLING PROCESS

## SUMMARY

Keywords: Cold Rolling, Finite Element Analysis, Plastic Deformation, IF Steel, Roll Force

Cold rolling is a forming method consisting of elastic and plastic deformation zones. Plastic deformation forms the basis of the rolling process. Determination of the rolling force required for rolling the material is used to calculate the size of the rolling mill and the required motor forces, or to determine whether the available rolling capacity. In addition, during the development of new grades of steel, the rolling force is taken as the basis for calculating which quality should be rolled with which parameters.

In this study, Cold rolling rolling force was calculated by analytical and numerical methods and the results were compared with those obtained by experimental study.

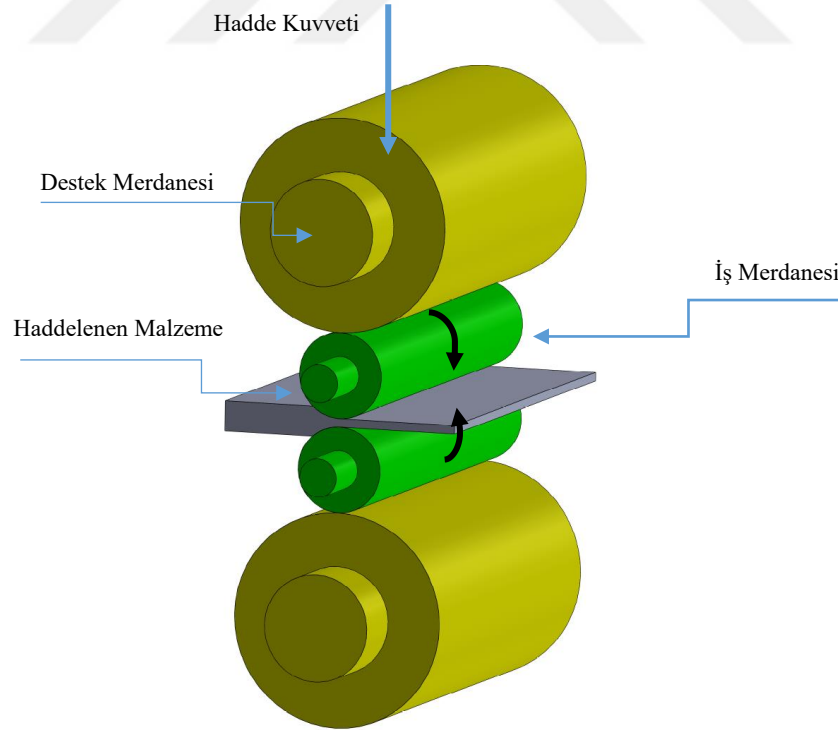
In the experimental study stage, the forces and other parameters which are formed during rolling are determined by cold rolling of EN 10130: 2006 DC03 quality IF steel. In the literature, analytical methods used in cold rolling were examined and with each method, cold rolling roll force was calculated analytically by using the data obtained in the experimental study. In the next step, the cold rolling line and the material used are modeled using finite element software. Rolling simulation was performed with the parameters obtained in the experimental study and the rolling force was obtained.

Experimental study, Analytical and Numerical analysis results were obtained close to each other. It has been found that how a material which has not previously been rolled will behave during rolling or with which parameters it can be predicted very closely in advance.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Haddelenenin Basit Tanımı

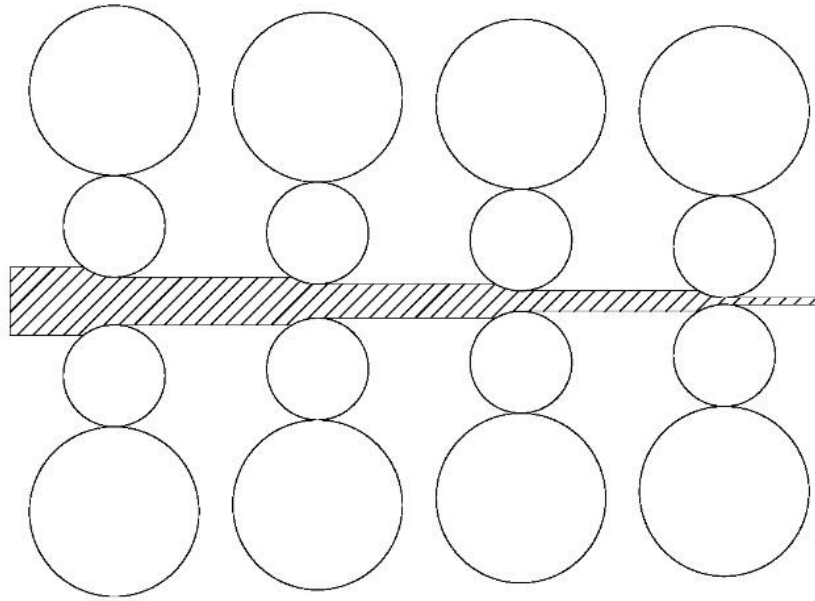
Wagoner ve Chenot'a göre a göre haddeleme; “ sabit kesitli uzun malzemelerin, dönmekte olan iki merdanenin arasında, kesit alanının azaltılması amacı ile sıkıştırılarak uygulanan, sürekli plastik deformasyon prosesidir” [1]. Malzeme, merdanelerin arasında çok yüksek bir sıkıştırma kuvvetine, merdaneler ile malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin etkisi ile de yüzey kayma gerilimine maruz kalır. Sürtünme kuvveti aynı zamanda malzemenin merdaneler arasına alınması ve rahatça ilerleyebilmesini sağlar [2].



Şekil 1.1. Tek standlı hadde düzeneği

Birbirinin tersi istikamette dönen iş merdaneleri, haddelenmek istenen malzemeyi aralarına alarak, hadde kuvvetinin de etkisi ile malzemenin ezilerek uzamasını, bu sayede belirli bir kalınlıktan hedef kalınlığa inceltmesini sağlarlar. Merdaneler arasındaki boşluk miktarı istenilen malzeme kalınlığı kadardır. Haddeleme işlemi olurken malzemenin metalürjik özellikleri de değişim gösterir. Şekil 1.1.'de de üç boyutlu, tek standlı, 4 gözlü merdane düzeneği şematik olarak gösterilmiştir [1, 2, 3].

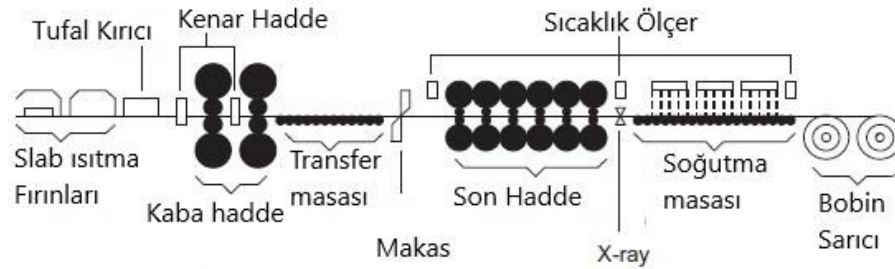
Haddelemek için gerekli gücü azaltmak ancak küçük çaplı merdane kullanarak mümkündür. Daha küçük çaplı merdaneler ise dayanımı düşük olduklarından daha büyük merdanelerle desteklenmeleri gerekir. Bu merdanelere destek merdanesi denir. İş ve destek merdanelerinin kullanıldığı düzene 'dört gözlü' denir. Bu sayede daha ince mamul, daha hassas toleranslarla üretilme imkânı olur. Yüksek hızlı üretim için sıralı (Tandem) haddeler kullanılır (Şekil 1.2.). Tandem haddelerde iki veya daha fazla stand bulunur. Son standa yaklaştıkça malzeme incelendiğinden haddeleme hızı da artmaktadır. Haddeleme prosesi haddelenecek mamulün sıcaklığına göre tanımlanmaktadır. Haddeleme esnasında mamul sıcaklığı, mamul erime noktasının yaklaşık yarısı sıcaklığında ise sıcak haddeleme, bu sıcaklığın altında ise soğuk haddeleme olarak nitelendirilmektedir [3, 5].



Şekil 1.2. Tandem hadde şematik gösterimi

## 1.2. Sıcak Haddelme Prosesi

Sıcak haddelme prosesi birbiri içerisine entegre çalışan tesislerden meydana gelen sıcak haddehanelerde gerçekleştirilmektedir. Modern üretim tesislerinin çoğu sürekli döküm yöntemi ile belirli uzunluklarda slab dökerek, daha sonra slabın istenilen sıcaklığa yeniden 1100 - 1300 ° mertebelerine ısıtılması ile başlar. Slab önce kaba haddelenir. Kaba hadde genelde 2 gözlü hadde düzeneğine sahiptir ve malzemenin kenarlarını da haddelemek için dikey kenar haddeleri de bünyesinde bulundurur. Sıcak hadde prosesinde mamul hadde merdanelerinin arasına girmeden mutlaka yüksek basıçlı su ile mamul yüzeyinde oluşan tufal kırılır ve uzaklaştırılır. Haddelme işleminden sonra mamul su ile soğutularak 700 – 900 °C derece mertebelerine indirilir ve bobin haline gelmek üzere bobin sarıcı ile sarılır. Bu işlemin tamamına Sıcak Haddelme denilmektedir (Şekil 1.3.) [2, 3, 6, 8, 12].



Şekil 1.3. Sıcak Haddehane Şematik Gösterimi [5]

## 1.3. Soğuk Haddelme Prosesi

Soğuk haddelme, sıcak haddelenmiş ve yüzeyi asitle dağlanmış mamulün daha iyi yüzey özelliklerine ve daha hassas ölçülerde üretilmesi aşamasıdır. Aynı zamanda mamul soğuk haddelme ile pekleştiğinden ilave mukavemet de kazanmaktadır. Soğuk haddehaneler genellikle 4 veya 5 standlı olarak imal edilirler. Tek standlı tersinir haddeler de kapasitenin düşük olduğu yerlerde kullanılabilir. Soğuk haddelme ile %50 ile %90 arası ezme yapılabilir. Genellikle en az yüzde ezme daha iyi yüzey özelliği, kalınlık düzgünlüğü elde edebilmek için son standda yapılmaktadır [3, 5, 6].



#### 1.4. Haddelenenin Tarihçesi

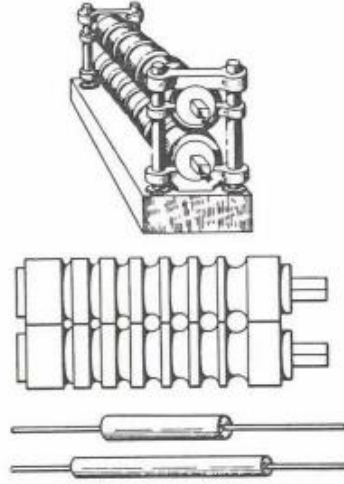
Haddelenenin 14. yüzyılda ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bu yıllarda elle tahrik edilen yaklaşık 12 mm çapında hadde düzeneği ile altın, gümüş veya kurşun levhalar üretilmiştir. Haddelene ile ulaşılabilen ilk taslak çizim 1495 yılında Leonardo da Vinci tarafından çizilmiştir (Şekil 1.4.) [7, 20].



Şekil 1.4. Leonardo da Vinci'nin Hadde Projesi [7]

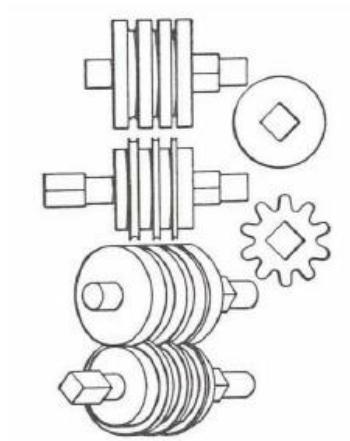
16 ve 17. yüzyıllarda haddehaneler yaygınlaşmaya başlamış ve altın, gümüş, kalay haddelenmede ve para imalatında kullanılmaya başlanmıştır. Çeliğin haddelenmesi ise 16. yy da Almanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Belçika ve İngiltere ise aynı yıllarda haddelene yapmaya başlamışlardır. 1682 itibarı ile İngiltere haddelene endüstrisinde dünyada başı çekmeye başlamış ve çeliğin sıcak haddelenmesi ilk kez yapılmaya başlanmıştır. 18. yy itibarı ile de haddelene prosesi Avrupa genelinde yayılmaya başlamıştır.

18. yy başlarında Christophher Polhem isveçte, destek merdanesinden tahrikli ilk 4 gözlü hadde düzeneğini geliştirmiştir. 1728 de John Payne tarafından tasarlanan çubuk haddesi için ilk defa patent alınmıştır (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. Çubuk Hadde Projesi - John Payne - 1728 [7]

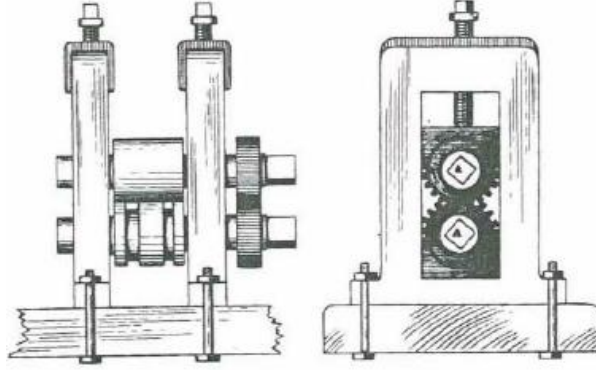
Ayrıca 1766 da İngiliz John Purnell, kaplin ile bağlanmış pinyon dişli tahrikli hadde düzeneğine patent almıştır (Şekil 1.6.).



Şekil 1.6. Dişli Kaplin Tasarımı - John Purnell -1766 [7]

Aynı dönemlerde sıcak haddeleme düzenekleri günümüzdeki modern hadde düzeneklerine benzemeye başlamıştır. 1782 de William Playfield'in patentini aldığı

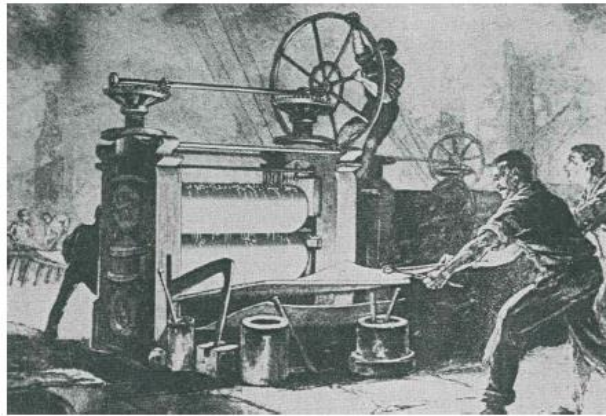
her iki taraftan kalınlık ayarı imkanı tanıyan vidalı, dökme demir gövdeli hadde mekanizması en büyük örneklerinden birisidir (Şekil 1.7.).



Şekil 1.7. Wiliam Playfield'in Hadde Ayağı Tasarımı - 1783 [7]

Richard Ford, çubuk haddelemek için kullanılan ilk Sıralı hadde düzeneğinin 1766 da patentini almıştır. 1798 de John Hazeldine sürekli sıcak levha haddesi geliştirmiş ve patentini almıştır [7].

19. yy da İngilterede başlayan birinci sanayi devriminde haddeleme teknolojileri ivme kazanmış ve önemli gelişmeler göstermiştir. 1820 de John Bikenshaw ray haddesi tasarlamış ve patentini almıştır. 1831'de ile T profili ray İngilterede haddelenmiş, 1849 da ilk I profili Fransa'da üretilmiştir. 1853 te üç gözlü hadde düzeneği R. Roden tarafından geliştirilmiştir (Şekil 1.8.).



Şekil 1.8. 1860'lı yılların tipik levha hadde ayağı [7]

1854 te ilk tersinir sıcak hadde İngiltere’de Parkgate Works firmasında devreye alınmıştır. Burada üretilen levhalar ‘Great Eastern’ isimli buharlı geminin imalatında kullanılmıştır. 1862 de J.T. Newton aldığı patentte haddehaneyi; iki küçük iş merdanesi arasında malzemenin sıkıştırılması, daha büyük iki merdanenin ise destek görevi göstermesi gerektiği şeklinde tarif etmiştir. Bu tarif günümüz modern haddehanelerde de aynı şekilde geçerlidir [7].

İlk sıralı tandem soğuk hadde 1904 yılında West Leechburg Steel firması tarafından 2 gözlü ve 4 standlı olarak kurulmuştur. Günümüzdeki, gergiler ile birlikte çalışan modern sıralı tandem soğuk hadde ise 1915 yılında Pittsburgh, Pennsylvania’da kullanılmıştır. Tandem soğuk hadde 1930 lu yıllarda yaygınlaşmaya başlamış ve 6 standlı örnekleri ortaya çıkmıştır. 1970 ve 1980 li yıllarda ise merdane üretim teknolojilerinin de artması ile daha geniş ve daha hızlı mamul üreten tesisler devreye alınmaya başlanmıştır [7].

### **1.5. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı**

15. yy dan beri üzerinde çalışılmakta olan haddeleme prosesinin mekaniği hala tam olarak anlaşılamamıştır. Bu sebeple, sıcak ve soğuk, profil, bar, ray vb. sıkı toleranslarda ve istenen geometride haddeleme yapmak, ilave merdane tasarımı da gerektirdiği için çelik haddeleme sektörün en büyük sorunlarından birisidir. Özellikle ilk defa haddelenecek olan bir mamulün haddehane koşullarında nasıl davranacağını, nihai kalınlığına ve mukavemete ulaşılması için kaç pasoda ne kadarlık ezme oranları ile haddeleneceği modellenmesi ve sonuca ulaşılması ciddi mühendislik çalışmaları gerektirmektedir. Günümüz teknolojisinde bile, haddeleme operasyonlarında tecrübeli mühendisler tarafından deneme – yanılma yöntemi ile belirlenen parametreler, zaman kaybına ve maliyetlerin artmasına sebep olmaktadır. Her deneme esnasında tolerans dışı kalan, hurda olan merdaneler ve mamul, haddeleme şirketlerinin verimini düşürmektedir. Özellikle yapı çeliği ve ray haddehanelerinde simetrik olmayan iş merdanelerinin tasarımı, yüksek sıcaklıklardaki çeliğin simetrik olmayan durumlarda nasıl davrandığının bilinmemesi nedeni ile çok zordur. Ayrıca sıcaklığın etkisi ile genişleyen merdaneler hedef malmul toleransı etkilemektedir.

Nihai geometrinin etkilenmemesi adına aşınmaların da minimum olacak şekilde merdanelerin tasarlanması gerekmektedir.

Bu sıkıntıların aşılmasını sağlayacak yöntem ise haddelemenin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesidir. Önce sanal olarak haddeleme yapmak, hem zaman kazandırır hem de deneme sayılarını azaltacağı için maliyeti düşürür, hadde şirketlerinin verimini artırır.

Bu Tez çalışmasının amacı, haddelemenin bilgisayar ortamında yapılabilmesi için sonlu elemanlar modeli oluşturmaktır. Haddeleme mekanizmasının daha net anlaşılması, numune almanın kolaylığı, haddelemenin simetrik olması avantajı ile soğuk yassı haddeleme ile çalışılmıştır. Tezin ilk aşamasında, isotropik özelliğe yakınlığından ötürü IF çeliği kullanılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada haddelenen malzemenin mekanik özellikleri ve haddelenmesi esnasında oluşan parametreler tespit edilmiştir. Tezin ikinci aşamasında literatürde bulunan soğuk haddeleme hesabı ile ilgili analitik yöntemler araştırılmış, bu yöntemlerin tamamı ile deneysel çalışmada tespit edilen parametreler kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Tezin üçüncü aşamasında sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, soğuk haddeleme modeli oluşturulmuş ve analiz sonucu mekanik kuvvetler tespit edilmiştir.

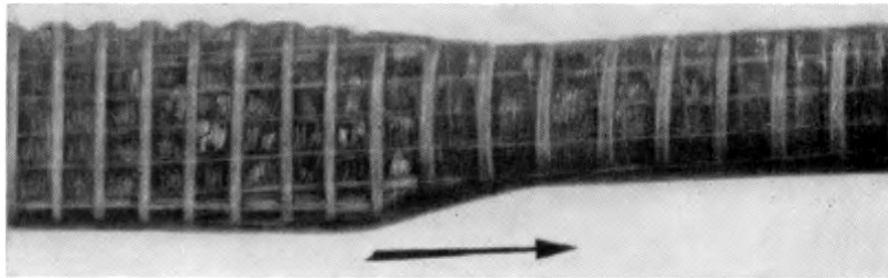
Tez çalışmasının sonuç bölümünde deneysel, analitik ve nümerik yöntemler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, öneriler sunulmuştur.

## BÖLÜM 2. HADDELEME TEORİSİ

Haddeleme prosesinin daha iyi anlaşılması için haddelenen malzemenin merdaneler arasındaki akışı incelenmeli, malzemenin nasıl davrandığı araştırılmalıdır [4]. Araştırmalar 19. yy'da deneysel çalışmalarla başlamış 20. yy. başlarında ise teorik matematiksel çalışmalarla devam etmiştir. 20. Yüzyılın ortalarında geliştirilen matematiksel modeller, günümüzde yerini sonlu elemanlar analizine ve bilgisayar destekli veri analizi yöntemlerine bırakmaktadır.

### 2.1. Haddeleme Esnasında Malzemede Oluşan Deformasyon

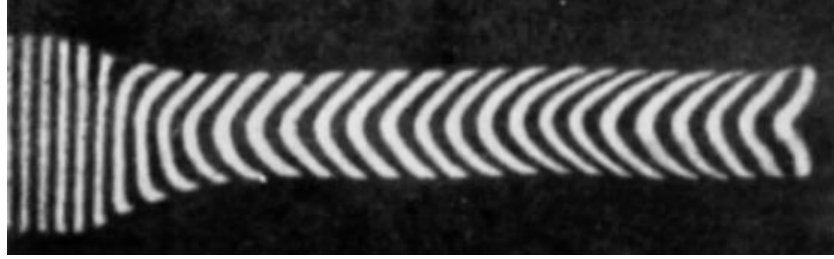
Haddeleme sırasında malzemenin merdaneler arasındaki akışını incelemek için ilk girişim 1883 yılında A. Hollenberg tarafından yapılmıştır [4]. Hollenberg, haddelenecek numune üzerine haddeleme yönünde eşit aralıklı delikler açmış ve bu delikleri perçinle kapatmıştır. Isıtılan numune merdanelerin arasından geçirilerek haddelenmiş ve delik ekseninden kesiti alınarak incelenmiştir. Deliklerin bombeleşme miktarı ile haddeleme oranı arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Hollenberg deneysel Çalışması [4]

Haddelemede oluşan deformasyonu E. Orowan tarafından da plastisin lama kullanılarak incelenmiştir. 70 mm genişliğinde 25mm kalınlığındaki plastisin lamalar

73 mm çapındaki ahşap merdaneler arasından geçirilerek 13,5 mm'ye haddelenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi plastisin, haddeleme yönüne, merdanelerin dönme yönüne doğru sürtünme kuvvetinin etkisi ile bükülmüştür. Haddelenen malzemede oluşan akış gözle görülebilmektedir (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Orowan'ın, plastin lama haddelemesi [4]

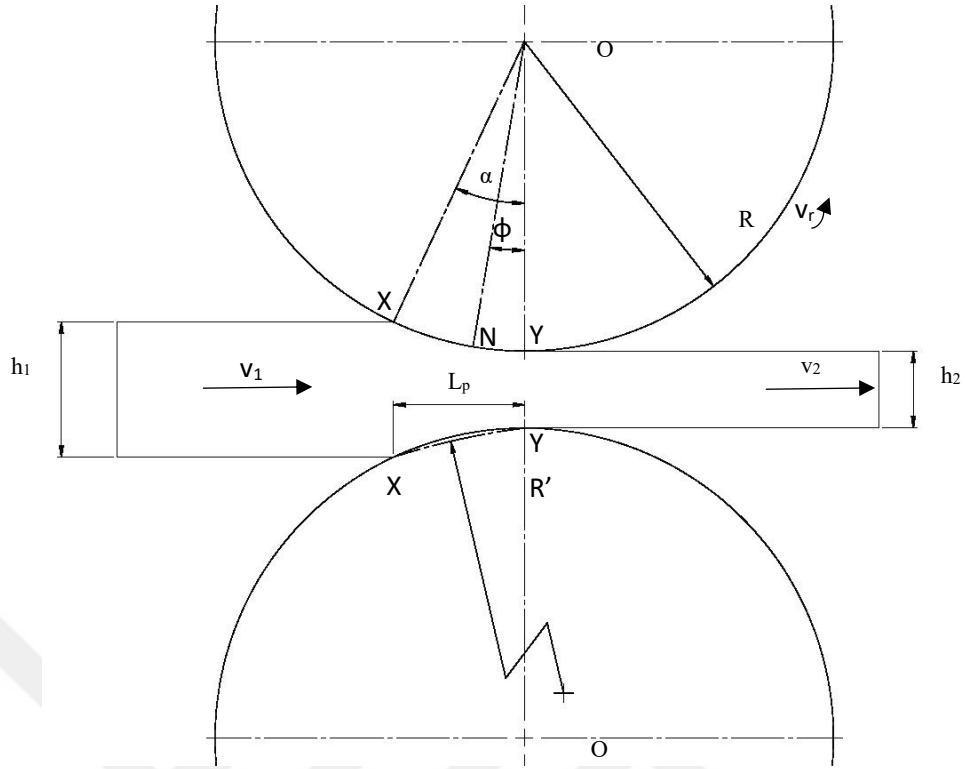
Her iki çalışmada da görüldüğü üzere deformasyon merdanelere yakın bölgelerde daha fazla gerçekleşmiş, malzemenin orta kısımlarına doğru azalmıştır.

## 2.2. Hadde Geometrisi

Haddelenecek  $b$  genişliğindeki levha, merdaneler arasındaki boşluğa  $h_1$  kalınlığında,  $v_1$  hızında ve X-X düzleminden giriş yapar (Şekil 2.3.). Hadde boşluğundan  $h_2$  kalınlığında,  $v_2$  hızında ve Y-Y düzleminden çıkar. Haddelenen mamulün genişliğinin hiç değişmediğini kabul edilirse birim zamanda hadde boşluğuna giren malzeme hacmi, çıkan malzeme hacmine eşitti olur [9] (Denklemler 2.1).

$$b \cdot h_1 \cdot v_1 = b \cdot h_2 \cdot v_2 \quad (2.1)$$

Giren malzemenin hızı çıkışa doğru ilerledikçe sürekli olarak artar. Sadece bir noktada mamulün hızı merdanelerin çevresel hızı ile aynıdır. Bu nokta kaymanın olmadığı merdane hızı  $v_r$  ile malzemenin hızının aynı olduğu nötr nokta olarak tabir edilen N noktasıdır.



Şekil 2.3. Hadde Kesiti

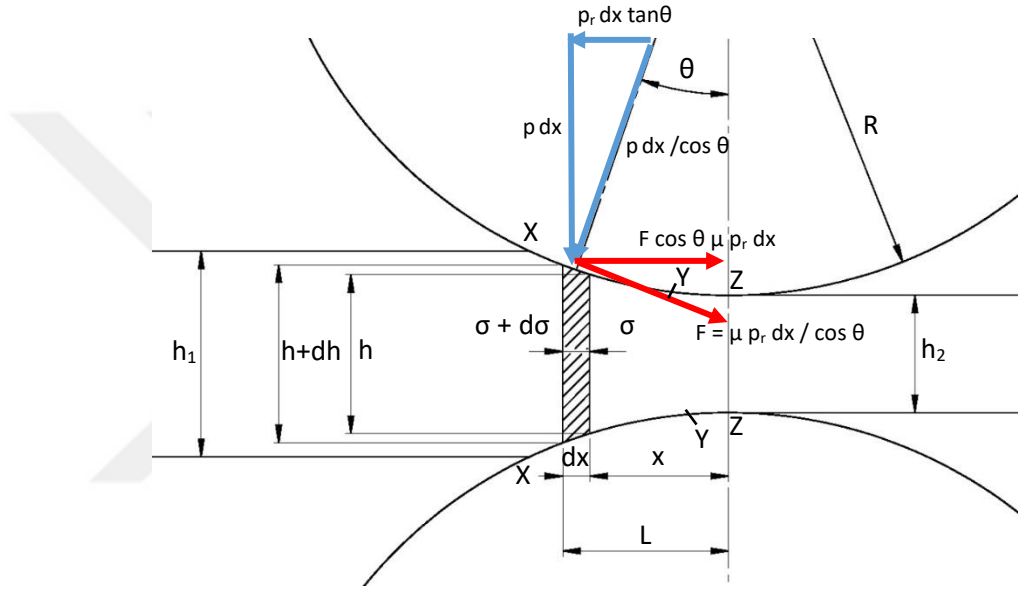
Giriş düzlemi ile nötr nokta arasında malzemenin hızı merdane hızından düşüktür ve sürtünme kuvveti mamulün merdane arasına doğru ilerletilmesini sağlar. Nötr bölge ile çıkış arasında mamulün hızı merdane hızından fazladır. Bu bölgede oluşan sürtünme kuvveti de mamulün haddelerden uzaklaştırılmasını sağlar. Spesifik merdane yüzey basıncı, haddeleme kuvvetinin temas yüzeyine bölünmesi ile elde edilir. Mamul ile merdanenin temas yüzeyi, mamul genişliği  $b$  ve temas yüzeyi eğrisinin yataydaki uzunluğu  $L_p$ ' dir (Denklem 2.2) [2, 4, 5, 9].

$$L_p = \sqrt{\left[ R \cdot (h_1 - h_2) - \frac{(h_1 - h_2)^2}{4} \right]} \cong \sqrt{R \cdot (h_1 - h_2)} \quad (2.2)$$



### 2.3. Haddedelemde Kuvvet Eşitliği

Hedeleme mekaniğinde oluşan kuvvetlerin hesaplanabilmesi için, malzemeye temas halinde olan bölgedeki basınç dağılımının teorik olarak hesaplanması gereklidir. [7] Bu ihtiyaca 1925 yılında Von KARMAN haddelemeyi diferansiyel olarak tanımlayarak cevap vermiş ve Von KARMAN eşitliği olarak literatürde yerini almıştır [4, 5, 7, 8, 9, 10, 11].



Şekil 2.4. Haddedelemde Kuvvetler

Hadde boşluğunda haddelenmekte olan  $h$  yüksekliğinde,  $dx$  kalınlığında diferansiyel eleman tanımlanmıştır. Bu eleman hadde boşluğu girişi X-X düzlemi ve nötr bölge Y-Y düzlemi arasındadır. Merdane yüzeyi ve malzeme arasındaki yüzeyde diferansiyel elemana etkiyen radyal basınç  $p_r$ , teğet sürtünme kuvveti  $F$  ve diferansiyel elemanın merkez noktası ile dikey eksen arasındaki açı da  $\theta$ 'dır. Eğer malzemenin birim genişlikte olduğu ve merdanelerin de rijit olduğu düşünülürse, elemana etkiyen normal kuvvet  $p_r \cdot dx / \cos \theta$  olur. Bu kuvvetin yataydaki bileşiği ise ( hadde boşluğuna malzemenin girmesine karşı olan direnç) aşağıdaki gibidir (Denklem 2.3).

$$p_r \cdot \frac{dx}{\cos \theta} \cdot \sin \theta = p_r \cdot \tan \theta \cdot dx \quad (2.3)$$

Teğetsel sürtünme kuvveti  $F$  ise  $\mu \cdot p_r \cdot dx / \cos \theta$  'ya eşit olur. Burada  $\mu$  sürtünme katsayısıdır. Sürtünme kuvvetinin yatay bileşeni, malzemeyi hadde boşluğuna çeken kuvvettir (Denklem 2.4).

$$\mu \cdot p_r \frac{dx}{\cos \theta} \cdot \cos \theta = \mu \cdot p_r \cdot dx \quad (2.4)$$

Diferansiyel elemana yatayda etkiyen ve bası gerimi oluşturan gerilim, elemanın yüksekliği boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Bu gerilimler, elemanın kısa tarafı  $h$  ve uzun tarafı  $h+dh$  bölgesine etkiyen  $\sigma$  ve  $\sigma+d\sigma$  olarak tanımlanmıştır. Yatay kuvvetler toplanırsa aşağıdaki denklem elde edilir (Denklem 2.5).

$$2 \cdot p_r \cdot \tan \theta \cdot dx - 2 \cdot \mu \cdot p_r \cdot dx = (h + dh) \cdot (\sigma + d\sigma) - h\sigma = d(h\sigma) \quad (2.5)$$

Eğer diferansiyel elemana dikeyde etkiyen kuvvet  $p \cdot dx$  olarak kabul edilirse eşitlikler aşağıdaki gibi olur (Denklem 2.6 ve 2.7).

$$p \cdot dx = p_r \frac{dx}{\cos \theta} \cdot \cos \theta = p_r \cdot dx \quad (2.6)$$

$$p = p_r, \quad p \cdot (\tan \theta - \mu) = \frac{d(h\sigma)}{2} \quad (2.7)$$

Eğer benzer bir diferansiyel eleman nötr nokta  $Y$  ile çıkış düzlemi arasında olsaydı benzer eşitlik aşağıdaki gibi olacaktı (Denklem 2.8).

$$p \cdot (\tan \theta + \mu) = \frac{d(h\sigma)}{2} \quad (2.8)$$

İki eşitlik taraf tarafa toplanırsa; (Denklem 2.9)

$$p \cdot (\tan \theta \pm \mu) = \frac{d(h\sigma)}{dx} \quad (2.9)$$

Geometrik ilişkilere göre (Denklem 2.10);

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{dh}{dx} = \tan \theta \quad (2.10)$$

Eşitlik eşitlik aşağıdaki şekilde yeniden yazılırsa; (Denlem 2.11)

$$p \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{dh}{dx} \pm \mu \right) = \frac{d \cdot \left( \frac{h\sigma}{2} \right)}{dx} \quad (2.11)$$

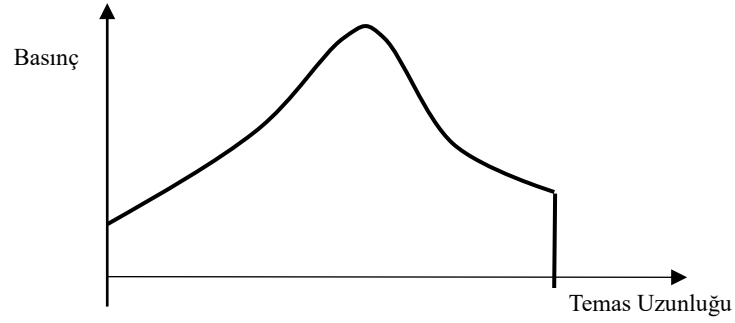
Diferansiyel elemanın ucundaki dikey kuvvet  $p \, dx + \mu \, F \sin \theta$  dir ve bu  $p (1 + \mu \tan \theta)$  ya eşittir. Bu durumda elemana etkiyen dikey gerilme sadeleşir ve  $p (1 + \mu \tan \theta)$  olur. Eğer bu gerilme büyük olan gerilme olduğu ve yatay gerilmenin de  $\sigma$  olduğu kabul edilirse, Tresca akma kriterine göre denklem aşağıdaki gibi olur (Denlem 2.12).

$$p \cdot (1 + \mu \cdot \tan \theta) = \sigma_c + \sigma \quad (2.12)$$

Bu eşitlikteki  $\sigma_c$  malzemenin düzlemsel gerilmedeki akma gerilmesidir. Elde edilen denklemler taraf tarafa toplanır,  $p$  ve  $x$  iki değişken olarak düşünülüp,  $h$  de  $x$  cinsinden yazılabilir. Matematiksel basitlik için genellikle  $\mu \tan \theta$  çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Fakat bu kabul düşük (genellikle 0,04 radyandan az) giriş açılarında mümkündür.  $\mu \tan \theta$  nın ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu durumda eşitlik en son aşağıdaki ifadeyi alır (Denklem 2.13) [4, 5, 7, 8, 9, 10, 11].

$$\frac{p}{2} \frac{dh}{dx} \pm p \cdot \mu = \frac{d \cdot \left( \frac{h}{2} (p - \sigma_c) \right)}{dx} \quad (2.13)$$

Merdane yüzeyinde oluşan basınç dağılımı aşağıdaki gibidir. Nötr bölgeye yaklaştıkça basınç artar, nötr bölgede maksimuma ulaşır ve daha sonra azalır (Şekil 2.5.).

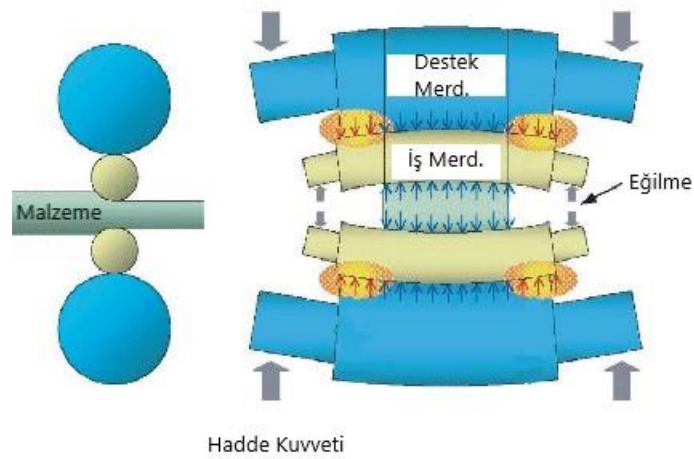


Şekil 2.5. Hadde basınç dağılımı

Şekilde yüzey basıncının nötr bölgede çok keskin bir pik yapmadığı görülmektedir. Basınç dağılım eğrisinin şekli çok önemlidir çünkü bu eğriden yola çıkılarak gerekli güç ve gerekli tork hesapları yapılır [7].

#### 2.4. Hadde Merdanelerinin Elastik Deformasyonu

Hadde merdaneleri, haddelene esnasında çok büyük yükler altında kalır. Bu yükleme koşullarında merdaneler üzerinde iki önemli elastik deformasyon oluşmaktadır. Birincisi, merdaneler eğilmeye zorlanır. Bu eğilme haddelenen mamuldeki kalınlık dağılımını olumsuz etkileyeceği gibi, malzeme kenar dalgası kusuruna sebep olur [4, 7] (Şekil 2.6.).



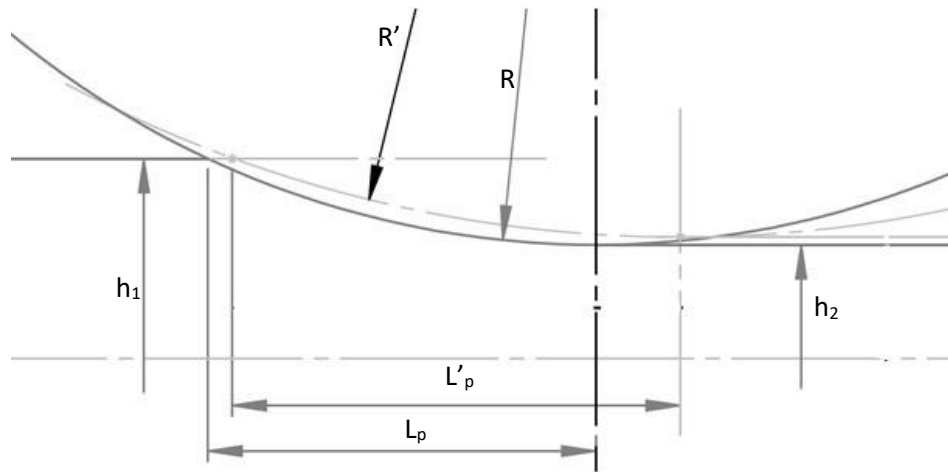
Şekil 2.6. İş Merdanelerinde eğilme [21]

İkinci önemli elastik deformasyon ise, merdane yüzeyinin haddeleme bölgesinde düzleşmesi ve yuvarlaklığını kaybetmesi ile oluşur. Bu düzleşme nedeni ile malzemenin merdaneye temas eden bölgesi  $L_p$  den  $L_p'$  ye artmasına neden olmaktadır. Bu deformasyonun direkt etkisi merdane temas yüzeyinin artması sonucu ezme miktarındaki azalmadır. Endirekt etkisi ise temas alanı artması nedeni ile deformasyon direnci değişimidir [4]. Hitchcock 1935 yılında merdanelerin deforme olmuş merdane yarıpını hesaplamıştır (Şekil 2.7.). Hitchcock'a göre P hadde yükü altındaki merdane, kendi yuvarlaklığını korur fakat merdane yarıçapı R den R' artmaktadır [4, 7, 12] (Denklem 2.14).

$$R' = \left(1 + \frac{C_H \cdot P}{b \cdot (h_1 - h_2)}\right) \cdot R \quad (2.14)$$

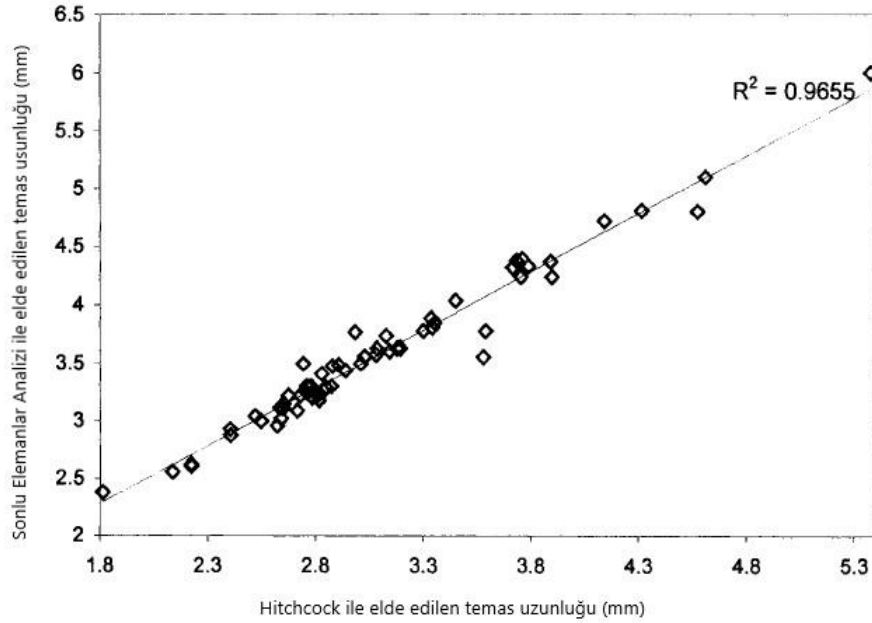
$C_H$  katsayısı ise hadde merdanelerinin elastik deformasyon katsayısıdır. Bu değer dövme çelik merdaneler için yaklaşık  $2,14 \times 10^{-4}$  olarak alınabileceği gibi, ilgili merdanenin elastisite modülü  $E_r$  ve poisson oranı  $\gamma$  biliniyor ise hesaplanabilir [6, 7, 9] (Denklem 2.15).

$$C_H = \frac{16 \cdot (1 - \gamma^2)}{\mu \cdot E_r} \quad (2.15)$$



Şekil 2.7. Merdane Düzleşmesi

Hitchcock'un denklemi kullanılarak haddeme esnasında oluşan yeni yarıçapı hesaplamak için birkaç kere iterasyon yapmak gereklidir. Günümüzde haddeme modellerinde hesap kolaylığı sebebi ile sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan sonu elemanlar analizleri ile de arasında yüksek korelasyon bulunmaktadır [12] (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Hitchcock ve sonlu elemanlar yöntemi kıyaslanması [12]

## 2.5. Sürtünme Katsayısı

Haddeme karmaşık fiziksel bir prosestir. Plastik deformasyon bölgesinde, hadde kuvveti, tork, ezme oranı, hadde kayması, sürtünme, yağlama ve haddelenen malzemenin mekanik özellikleri birbiri ile ilişkilidir. Bu ilişkilerin bilinmesi, haddeme davranışının tespiti için önem taşımakla birlikte en hassas birisi de sürtünme katsayısıdır. Literatürde sürtünme katsayısının başka parametreler cinsinden tanımlamak için birçok çalışma yapılsa da bu çalışmaların tamamında sürtünme katsayısının temas alanı oyuncu sabit olduğu varsayımı yapılmaktadır [5, 7]. Sürtünme katsayısının bulunması için Sims 1952 de ilk teorik eşitliği geliştirmiştir [5] (Denklem 2.16 ve 2.17).

$$\tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{v_2 - v_r}{v_2}\right)} = \frac{1}{2} \left[ \tan^{-1} \sqrt{\frac{r}{1-r}} - \frac{1}{2a} \ln \left( \frac{1}{1-r} \right) \right] \quad (2.16)$$

$$a = \frac{\mu}{1-r} \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \quad (2.17)$$

Bland and Ford 1948 yılında benzer değişkenleri kullanarak teorik sürtünme katsayısını tanımlamışlardır [5] (Denklem 2.18).

$$\mu = \frac{h_1 - h_2}{2 \cdot \sqrt{R'(h_1 - h_2)} - 4 \cdot \sqrt{s \cdot R' \cdot h_2}} \quad (2.18)$$

En iyi bilinen ve sıklıkla kullanılan deneysel çalışmalarla desteklenerek hesaplanan sürtünme katsayısı formülü Hill tarafından geliştirilmiştir [5, 18] (Denklem 2.19).

$$\mu = \frac{\frac{P}{K_w \cdot \sqrt{R' \cdot \Delta h}} - 1,08 + 1,02 \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right)}{1,79 \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{R'}{h_1}}} \quad (2.19)$$

Roberts 1967 yılında sürtünme kuvveti, gergileri de dahil ederek geliştirmiştir [5, 7] (Denklem 2.20).

$$\mu = 2 \cdot \sqrt{\frac{h_1}{R' \cdot r}} \left[ \frac{P \cdot (1-r)}{\sigma_2 - \sigma_1} \sqrt{\frac{1}{R' \cdot h_1 \cdot r}} - 1 + \frac{5 \cdot r}{4} \right] \quad (2.20)$$

Ekelund eşitliği, 1977 yılında Rowe tarafından geliştirilerek hadde kuvveti, malzeme geometrik ve fiziksel parametreleri cinsinden sürtünme kuvveti hesaplanmıştır [5] (Denklem 2.21).

$$\mu = \frac{\left[ \left( \frac{P}{\sigma \cdot \sqrt{R' \cdot \Delta h}} \right) (h_1 + h_2) + 1,2 \cdot \Delta h \right]}{1,6 \cdot \sqrt{R' \cdot \Delta h}} \quad (2.21)$$

Eşitlikler hesap kolaylığı sağlamakla birlikte, çoğu durumda çok yaklaşık sonuçlar vermektedir. Fakat sürtünme katsayısının hadde temas alanı boyunca sabit

olmadığı, ezme oranları ve hadde hızına da bağlı olduğu, laboratuvar ortamında simülâtorlerde yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [5, 22, 23].

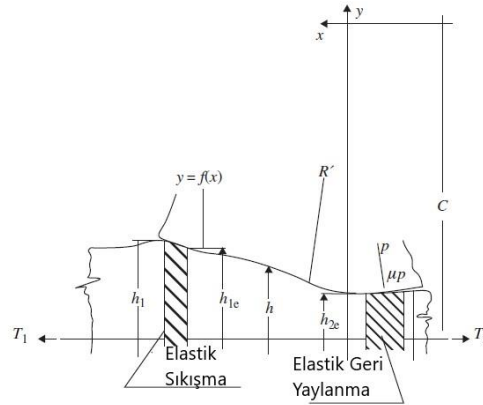




### BÖLÜM 3. HADDELEMEDE ANALİTİK YÖNTEMLER

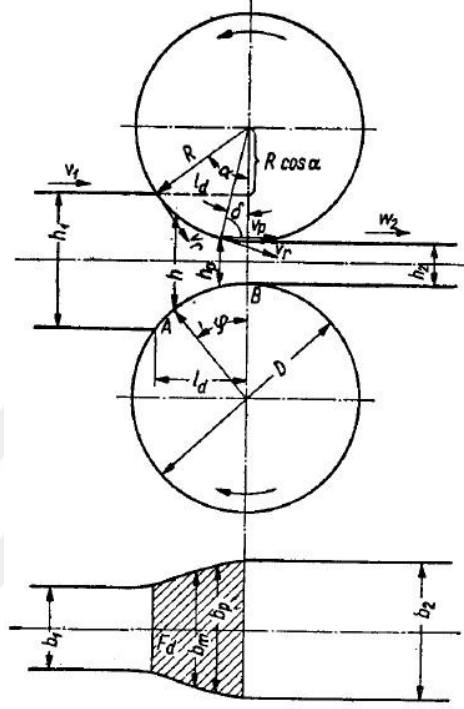
Soğuk ve sıcak haddeleme ile ilgili ilk matematiksel modeller, 20. yy başlarında oluşturulmuş ve yayınlamıştır. Bu modeller, haddeleme öncesinde ve sonrasında oluşan malzemedeki metalürjik olayları, prosesin adaptif kontrolünü sağlar. İlave olarak, merdaneler, haddehane gövdesi, motor güçleri, rulmanlar vb. haddehane dizaynı ile ilgili gerekli bilgilere de ulaşılmasını sağlar. Matematiksel model hesaplamak için literatürde birçok basit veya daha karmaşık analitik hesaplama yöntemleri bulunmaktadır. Eğer yaklaşık bir hadde kuvveti ihtiyacı var ise, en basit yöntem kullanılabilir. Fakat haddehanede dizayn çalışması yapılacak ise, çok daha detaylı kompleks yöntemler kullanılmalıdır. Literatürdeki analitik yöntemlerin tamamı, bazı kabuller yapmaktadır. Bu kabuller genellikle aşağıdaki gibidir;

- Haddeleme, elastik ve plastik deformasyonun bir arada olduğu bir metal şekillendirme yöntemidir. Malzeme merdanelerin arasına girdiğinde elastik sıkışmaya maruz kalmaktadır. Merdanelerin arasından çıktığında ise elastik geri yaylanma gösterir. Elastik bölgelerde oluşan girinim plastik bölgele görece çok düşük olduğundan genellikle ihmal edilir [4, 5, 8, 13] (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Haddeleme Prosesindeki Elastik Bölgeler [5]

- b. Haddelenme esnasında haddelenen yassı malzemenin boyu uzamaktadır. Fakat az ada olsa genişliği de artmaktadır. Genişlikteki artış ezme oranı arttıkça artış gösterse de, boydaki uzamaya nazaran çok küçük olduğu için ihmal edilir [4, 5, 8, 13] (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Haddelenen Manuldeki Genişlik Artışı [4]

- c. Haddelenen malzemenin homojen ve izotropik olduğu kabul edilir. Bu kabul hadde merdanesi / mamul kalınlığı oranının küçük olduğu durumlarda, ön standlarda hata payını artırmakta, son standlarda mamul inceldiğinde hata payı da azalmaktadır [5].

Haddehanelerdeki tüm parametreler, hadde kuvveti ile ilişkilidir. Bu sebeple hadde kuvvetinin doğru tahmin edilmesi, motor gücü, tork, ezme oranı gibi diğer önemli parametrelerin hesaplanmasını sağlayacağı için, tezin bu bölümünde, literatürde yer alan, sıklıkla kullanılan matematiksel modellerin soğuk haddeleme hadde kuvvetini nasıl hesapladıkları verilmiştir.

### 3.1. Wusatowski Yöntemi

Wusatovski'ye göre haddelenmekte olan mamulün ortalama akma dayanımı hadde kuvvetinin hesaplanmasında en önemli faktördür [4]. Ortalama akma dayanımı merdane düzleşmesinden etkilenmediğinden ihmal edilir. Ortalama akma dayanımının hesaplanması için hadde giriş açısı  $\alpha$  (Şekil 2.3.) dört eşit parçaya bölünür.

$$\varphi_1 = 0$$

$$\varphi_2 = \alpha/4 = 0,0158 \text{ rad}$$

$$\varphi_3 = 2 \alpha/4 = 0,0316 \text{ rad}$$

$$\varphi_4 = 3 \alpha/4 = 0,0474 \text{ rad}$$

$$\varphi_5 = 4 \alpha/4 = 0,0633 \text{ rad}$$

Her bir açığa tekabül eden malzeme kalınlığı  $h_{\varphi_i}$  aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Denklem 3.1).

$$h_{\varphi_i} = h_1 + \varphi_i^2 R \quad (3.1)$$

Her bir açığa denk gelmekte olan malzeme kalınlığı hesabı ardından, her bir açığa denk gelen yüzde ezme miktarı hesaplanır. Sonrasında Akma eğrisinden yararlanılarak her bir açığa denk gelen mukavemet  $K_{fi}$  hesaplanır. Elde edilen  $K_{fi}$  değerleri kullanılarak ortalama akma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır (Denklem 3.2).

$$K_{fm} = \frac{1}{4} \left( \frac{K_{f1}}{2} + K_{f2} + K_{f3} + K_{f4} \frac{K_{f5}}{2} \right) \quad (3.2)$$

Son olarak Hadde Kuvveri P aşağıdaki formülle hesaplanır [4, 25] (Denklem 3.3).

$$P = 1,155 \cdot K_{fm} \cdot b \cdot L \quad (3.3)$$

### 3.2. Trink Yöntemi

Trink'in geliştirdiği grafiksel metod, deformasyon sertleşmesi ve gergileri dikkate almaktadır [4]. Merdane çap değişiminin de hesaba katıldığı bu yöntemde toplam hadde kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Denklem 3.4).

$$P = K_{wm} \cdot b \cdot L' \quad (3.4)$$

Ortalama mukavemet  $K_{fm}$ , denklem 3.2'den hesaplanır, düzlemsel gerilmede kullanılmak üzere 1,155 katsayısı ile çarpılır (Denklem 3.5).

$$K_m = 1,155 \cdot K_{fm} \quad (3.5)$$

Trink, giriş ve çıkış gergilerin ortalamasını alarak çalışmasında kullanmıştır (Denklem 3.6).

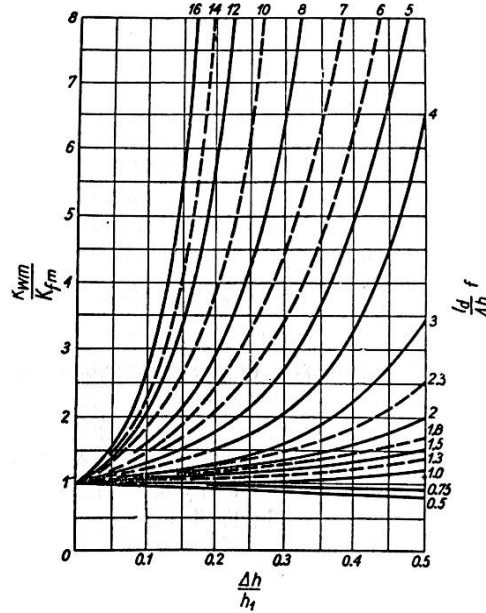
$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (3.6)$$

Bu değerlerin hesaplanmasından sonra, ortalama akma gerilmesi  $K_{fx}$  aşağıdaki gibi hesaplanır (Denklem 3.7 ).

$$K_{fx} = K_m - \sigma_m \quad (3.7)$$

Hadde yükleri altında esneyen merdanenin yeni çapına göre temas uzunluğu  $L'$  hesaplanır (Denklem 2.2, 2.14). Daha sonra Trink eğrilerinde kullanılmak üzere istenilen değerler hesaplanır ve Şekil 3.3.'ten  $K_{wm}/K_{fm}$  değeri bulunur. Bulunan değer ile ortalama deformasyon direnci  $K_{wm}$  hesaplanır (Denklem 3.8).

$$K_{wm} = \left( \frac{K_{wm}}{K_{fm}} \right) \cdot K_{fx} \quad (3.8)$$



Şekil 3.3. Trinks'in Deformasyon Direnci Tablosu [4]

### 3.3. Korolev ve Nikolayevski Yöntemi

Korolev ve Nikolayevski 'nin soğuk haddeleme hesaplama yöntemi deformasyon sertleşmesi ve merdane deformasyonunu hesaba dâhil etmektedir. Hesaplama aşağıdaki deformasyon direnci formülüne dayanmaktadır [4] (Denklem 3.9).

$$K_{wm} = \frac{9500}{2 \cdot R} \cdot \frac{L'^2 - L^2}{L'^2} \quad (3.9)$$

Deforme olmuş merdane temas alanı uzunluğu ise aşağıdaki formül ile hesaplanır. Önce deforme olmamış uzunluk ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen sonuç ile yeniden hesaplanır. Sonuçlar eşitleninceye kadar hesaplanmaya devam edilir. Burada  $\varepsilon_h = \Delta h / h =$  hadde oranı olarak tanımlanmıştır (Denklem 3.10, 3.11, 3.12, 3.13).

$$L' = L \cdot \sqrt{a + b \cdot A^{L'}} \quad (3.10)$$

$$a = 1 - b \quad (3.11)$$

$$b = \frac{2-\varepsilon_h}{9500 \cdot f \cdot \varepsilon_h} \cdot \left( 1.155 \cdot K_{fm} - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \quad (3.12)$$

$$A = \left( \frac{1}{1-\varepsilon_h} \right)^{\frac{\mu}{\Delta h}} \quad (3.13)$$

Ortalama akma dayanımı haddeye giriş akma tayanımı  $K_{f1}$  ve çıkış akma dayanımı  $K_{f2}$  değerinin ortalaması olarak hesaplanmıştır (Denklem 3.14).

$$K_m = \frac{1.155 \cdot (K_{f1} + K_{f2})}{2} \quad (3.14)$$

Deformasyon direncinin bulunmasının ardından hadde toplam haddeleme kuvveti de aşağıdaki gibi hesaplanır (Denklem 3.15).

$$P = b \cdot L' \cdot K_{wm} \quad (3.15)$$

### 3.4. Ekelund Yöntemi

Ekelund'un sıcak haddeleme kuvvetlerinin hesabı için geliştirdiği formülleri, Bland ve Ford tarafından basitleştirilmiş ve geliştirilerek soğuk haddelemeye uygun hale getirmiştir [4] (Denklem 3.16).

$$P = b \cdot k_{fm} \cdot L' \cdot \left( 1 + \frac{1,6 \cdot \mu \cdot \sqrt{R' \cdot (h_1 - h_2)} - 1,2 \cdot (h_1 - h_2)}{h_1 + h_2} \right) \quad (3.16)$$

$K_{fm}$  denklem 3.2 ye göre hesaplanmıştır. Ekelund's yönteminde gergiler ve haddeleme hızı dikkate alınmamaktadır. İlk pasalarda ve düşük haddeleme hızlarında çok yaklaşık sonuçlar vermektedir.

### 3.5. Tselikov Yöntemi

Alexander Tselikov'un geliştirdiği metod ile toplam hadde kuvveti uygulanan giriş ve çıkış gergileri ile birlikte hesaplanabilmektedir. Tselikov'a göre giriş ve çıkış

gergileri ile hadde sırasında oluşan basınç dağılımı  $p_x$  biliniyorsa hadde kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanır [4, 7, 9, 17] (Denklem 3.17, 3.18).

$$P = b \cdot \int_0^{l_d} p_x dx \quad (3.17)$$

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{K_f}{y} \frac{dy}{dx} \pm \frac{\mu}{y} p_x = 0 \quad (3.18)$$

Tselikov, denklemin çözümü için, soğuk haddelemede gerger kuvvetlerinin tesiri altında aşağıdaki ön formülleri geliştirmiştir. Deformasyon sertleşmesi de hesaba dâhil edilmiş,  $K_{f1}$  ve  $K_{f2}$  değerleri haddelemeye giriş ve çıkış akma dayanımı olarak tanımlanmıştır (Denklem 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23).

$$\xi_1 = \frac{K_{f1} - \sigma_1}{K_{f1}} \quad (3.19)$$

$$\xi_2 = \frac{K_{f2} - \sigma_2}{K_{f2}} \quad (3.20)$$

$$m = \frac{2 \cdot \mu \cdot L'}{h_1 + h_2} \quad (3.21)$$

$$h_n = \left( \frac{\xi_1}{\xi_2} \cdot h^{\delta-1} \cdot H^{\delta+1} \right)^{\frac{1}{2\delta}} \quad (3.22)$$

$$\delta = \frac{2 \cdot \mu \cdot L'}{h_1 - h_2} \quad (3.23)$$

Tselikov gerger kuvveti dâhil olarak soğuk haddeleme hadde kuvvetini aşağıdaki gibi belirlemiştir (Denklem 3.24).

$$P = \frac{b \cdot L}{\Delta h} \cdot \left( \xi_1 \cdot 2 \cdot K_{f1} \cdot \frac{h_1}{\delta-2} \left( \left( \frac{h_1}{h_n} \right)^{\delta-2} - 1 \right) + \xi_2 \cdot 2 \cdot K_{f2} \cdot \frac{h_2}{\delta-2} \left( \left( \frac{h_n}{h_2} \right)^{\delta-2} - 1 \right) \right) \quad (3.24)$$

### 3.6. Dieter Yöntemi

Dieter geleneksel Orowan teorisinin üzerine çalışmış ve hadde kuvveti hesabını sadeleştirmiştir [6] (Denklem 3.25, 3.26, 3.27).

$$P = 1.155 \cdot \sigma_0 \cdot \left( \frac{1}{Q} \cdot (e^Q - 1) \cdot b \cdot L \right) \quad (3.25)$$

$$\sigma_0 = \frac{k_{f1} + k_{f2}}{2} \quad (3.26)$$

$$Q = \mu \cdot \frac{2 \cdot L'}{h_1 + h_2} \quad (3.27)$$

Dieter yöntemi sade ve besit olmasına karşın %27 lik bir hata payına sahiptir. Arıca gerekli gergi kuvvetlerini dikkate almamıştır.

### 3.7. Stone Yöntemi

Stone ortalama deformasyon direnci hesabı yaparak hadde kuvvetlerini tespit etmiştir. Geliştirdiği formüllerde, gergileri de dikkate almıştır [4, 8, 11, 25] (Denklem 3.28, 3.29, 3.30).

$$h_m = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3.28)$$

$$\sigma_m = \frac{0.7 \cdot \sigma_{t1} + 0.3 \cdot \sigma_{t2}}{2} \quad (3.29)$$

$$PMF = \frac{e^{\left(\frac{\mu \cdot L}{h_m} - 1\right)}}{\frac{\mu \cdot L'}{h_m}} \quad (3.30)$$

Gergilerin etkisi ile deformasyon direnci  $K_w$  elde edilmiştir. Elde edilen deformasyon direnci ile de Hadde yükü hesaplanmıştır (Denklem 3.31, 3.32).

$$K_w = (1,15 \cdot K_{f1} - \sigma_m) \cdot PMF \quad (3.31)$$



$$P = b \cdot K_w \cdot L' \quad (3.32)$$

### 3.8. Schey Yöntemi

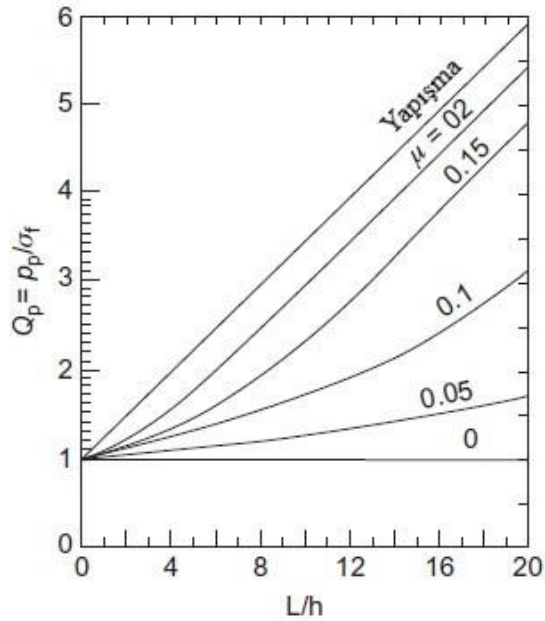
John Schey basit ve kullanışlı bir yöntem geliştirmiştir. Schey'e göre Hadde kuvveti gerinim oranı ve haddeleme hızı kullanılarak elde edilmiştir [5,12, 13, 17, 24] (Denklem 3.33).

$$P = 1,155 \cdot \sigma_{fm} \cdot Q_p \cdot L' \cdot b \quad (3.33)$$

Ortalama akma dayanımı  $\sigma_{fm}$  Aşağıdaki gibi hesaplanır (Denklem 3.34).

$$\sigma_{fm} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \left[ \frac{\varepsilon_2^{n+1} - \varepsilon_1^{n+1}}{n+1} \right] \quad (3.34)$$

$Q_p$  değerini Schey tarafından hazırlanan tablodan, mevcut sürtünme katsayısı dikkate alarak hesaplanır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Schey'in  $Q_p$  Hesap Tablosu [24]

### 3.9. Bland ve Ford Yöntemi

Bland ve Ford 1948 yılında Orowan teorisinin üzerinde çalışmış ve toplam hadde kuvvetini temas yüzeyinin her bir noktasındaki normal basıncın toplamı olarak ifade etmişlerdir. Hesaplamaları düzlemsel gerilme basma akma gerilmesi  $k$  ile aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [5, 7, 17, 25, 26] (Denklem 3.35).

$$P = R \cdot k \cdot b \cdot \left[ \int_0^{\varphi_n} \frac{h}{h_0} e^{\mu \cdot H} d\varphi + \int_{\varphi_n}^{\varphi_i} \frac{h}{h_i} e^{\mu(H_i - H)} d\varphi \right] \quad (3.35)$$

Hadde kuvveti girişten nötral bölgeye ve nötral bölgeden çıkışa olmak üzere iki kısımda hesaplanmaktadır. Burada hadde giriş açısı ve Nötral bölge açısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Denklem 3.36, 3.37).

$$\varphi_n = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \cdot \tan \sqrt{\frac{h_1}{R}} \cdot \frac{H_n}{2} \quad (3.36)$$

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{h_1 - h_2}{R}} \quad (3.37)$$

Bland ve Ford hesaplamaları basitleştirmek için aşağıdaki sadeleştirmeleri yapmıştır (Denklem 3.38, 3.39, 3.40).

$$a = \mu \cdot \sqrt{\frac{R}{h_2}} \quad (3.38)$$

$$H_1 = \frac{2 \cdot a \cdot \left( \sqrt{\frac{r}{1-r}} \right)}{\mu} \quad (3.39)$$

$$H_n = \frac{H_1}{2} - \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot \ln \left( \frac{h_i}{h_0} \cdot \left( \frac{1 - \frac{\sigma_0}{k_0}}{1 - \frac{\sigma_i}{k_i}} \right) \right) \quad (3.40)$$

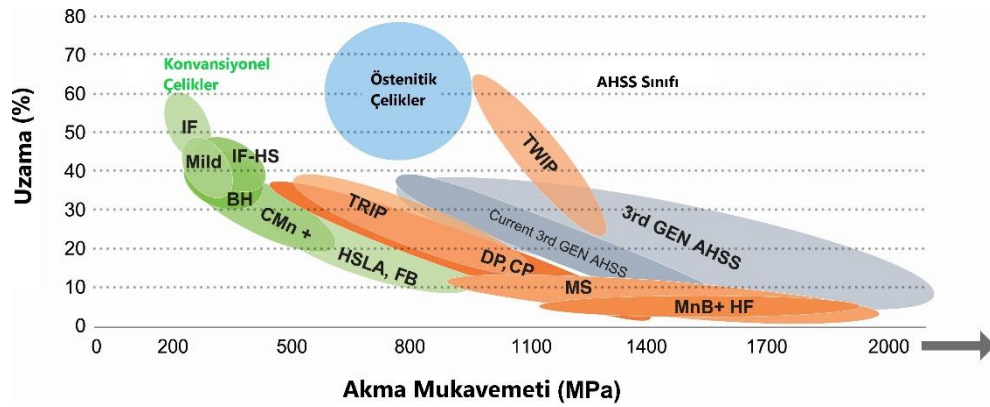
## **BÖLÜM 4. UYGULAMA ÇALIŞMASI**

Tez çalışmasının bu bölümünde, 4 standlı soğuk haddehanede deneme üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneme esnasında oluşan kuvvetler, hızlar, ezme oranları vb. gibi haddeleme modelinde kullanılacak veriler toplanmıştır. Bu veriler kullanılarak, literatürde geçen soğuk haddeleme modelleri ile her bir stand için hadde kuvveti hesabı yapılmıştır. Yine matematiksel modellerde kullanılmak üzere sürtünme katsayısı hesaplanmış ve deneme üretimi gerçekleştirilen malzemenin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak deneme üretimi gerçekleştirilen haddehane modellenmiş ve haddeleme simülasyonu yapılmıştır.

### **4.1. Deneme Üretiminde Kullanılacak Malzeme Seçimi**

IF-çelikleri (Interstitial Free Steel), ferrit matrikse sahip olup yüksek şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle özellikle otomotiv sektöründe yoğun kullanımı olan bir çelik türüdür. Kimyasal kompozisyon, soğuk hadde sırasındaki ezme miktarı ve tavlama pratikleri kristalografik doku ile tane yapısını ve bunlara bağlı olarak şekillendirilebilirlik özelliklerini etkiler [28] (Şekil 4.1.).

IF çelikleri bünyesinde titanyum veya niyobyum gibi arayer atomu bulundurmadığından diğer çelik kalitelerine göre yüksek uzama ve düşük mukavemet değerine sahiptir (Şekil 4.1.). Matematiksel modeller, malzemeleri homojen, izotropik olarak kabul ederek oluşturulmuştur. Ayrıca, nümerik analiz iki boyutlu düzlemde yapılacağından dolayı malzeme izotropik olarak kabul edilecektir. Bu sebeple, oluşabilecek hata miktarını azaltmak amacı ile deneme üretiminde homojen ve izotropiğe en yakın çelik olan IF çeliği kullanılmıştır [29].



Şekil 4.1. Çelik Kaliteleri [27]

#### 4.2. Deneme Malzemesinin Mekanik Özelliklerinin Tespit Edilmesi

Deneme üretiminde sıcak haddelenmiş EN 10130 standardına göre DC04 kalite, Erdemir standardına göre 7114 kalite sıcak haddelenmiş malzeme kullanılmıştır [30,31]. Sıcak haddelenmiş malzemenin proses parametreleri aşağıdaki gibidir;

- Slab Isıtma sıcaklığı: 1250 °C
- Slab ısıtma süresi: 180 Dak.
- Haddeleme giriş sıcaklığı 930-950 °C Hedef: 940 °C
- Sarıma Sıcaklığı: 690-710 °C Hedef: 700 °C
- Kalınlık: 4.1 mm

Sıcak haddelemede uygulanan sarılma sıcaklığı nihai ürünün mukavemetini direkt etkileyen bir parametredir [32]. Malzeme bobin haline gelirken en dışta kalan sarımlar hava ile temas halinde olduğu için daha hızlı soğuma eğilimindedir. Bu sebeple, gerçeği temsil etmesi amacı ile deneysel çalışmada kullanılacak sıcak haddelenmiş bobin açılmış ve ilk 20 metrelik bölüm kesilip çıkarılmıştır. 21. Metreden, haddeleme yönünde alınan çekme numunesi ile iki tekrarlı çekme testi yapılmıştır. Çekme testi, Zwick 250kN cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mekanik testler standardın da belirttiği şekilde hadde yönünde olmak üzere ISO 6892-1 standardındaki esaslara göre tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik test numuneleri A80 boyutlarında hazırlanmıştır [34].

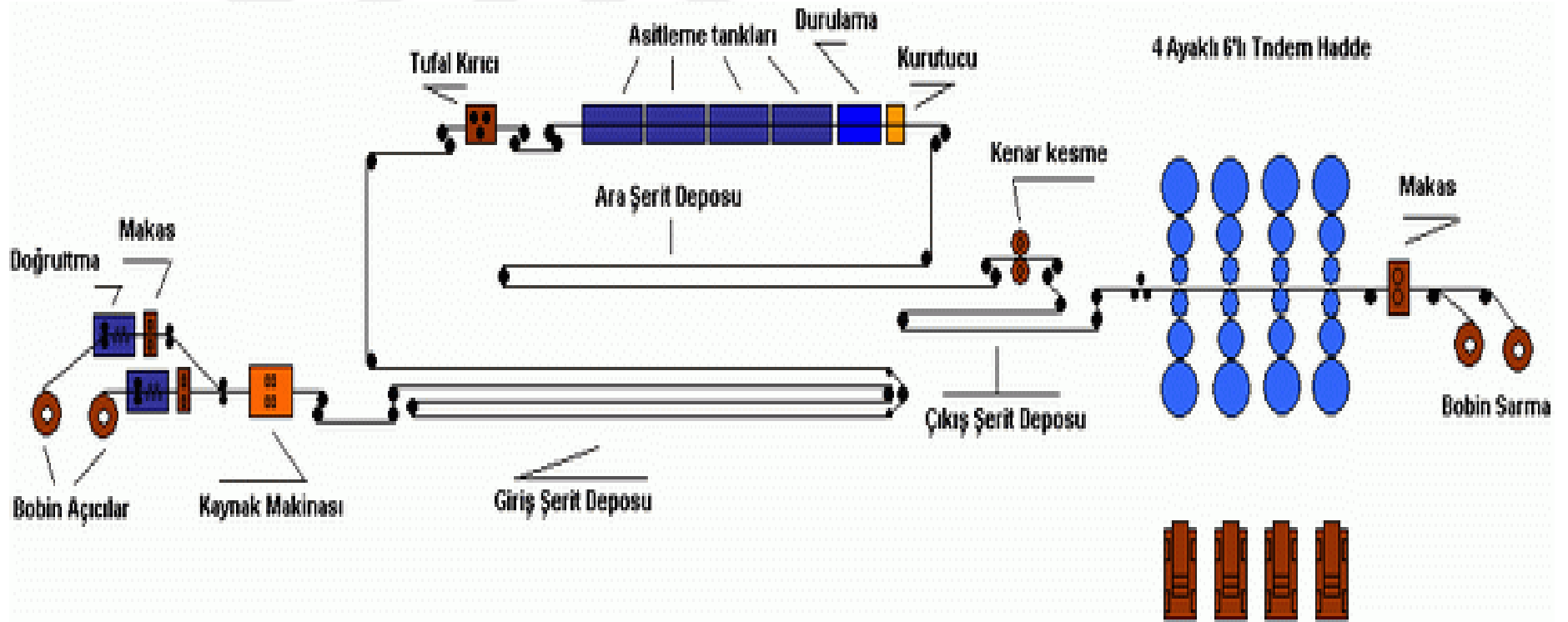
Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- a. Malzemenin akma mukavemeti: 25,4 kg/mm<sup>2</sup>
- b. Pekleşme üsteli n: 0,194
- c. Pekleşme katsayısı C: 59

### 4.3. Soğuk Haddelme Deneme Üretimi Yapılması

Tez kapsamındaki deneme üretimi çalışması Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları (ERDEMİR) bünyesinde faaliyet gösteren 2. Soğuk Haddehane Sürekli Tandem Hattında gerçekleştirilmiştir. Sürekli Tandem Hattı, 1990 yılında Hitachi – Japonya firması tarafından 1,5 Milyon Ton kapasite ile kurulmuştur. Sonuncusunu 2019 yılında gerçekleştiren modernizasyon çalışmaları ile güncel durumda, 1.85 Milyon Ton kapasitede faaliyetine devam etmektedir.

Sıcak Haddehanelerden gelen bobinler, haddehanenin giriş kısmında, bobin açıcı vasıtası ile açılır ve doğrultma ünitesinde doğrulturlurlar. Doğrultma çıkışı bulunan makasla bobinin uc kısmı düzeltilir. Yine girişte kaynak makinesi ile bobinler uc uca kaynatılarak birbirlerine eklenmiş olunur. Bobinler, hatta bulunan iki adet bobin açıcı ile birbirlerine eklenerek hat sürekli hale getirilmektedir. Kaynak makinesi ile kaynak yapılması sırasında oluşan vakit kaybını engellemek için giriş şerit deposu görev yapmaktadır. Malzeme üzerindeki tufalın mekanik olarak kırılması için tufal kırıcı merdanelerin arasından geçirilir. Tufaldan tamamen temizlenmesi amacı ile asit tanklarından geçirilir, durulanır ve kurutulur. Malzemenin kenar kısımlarındaki çaptan arındırmak ve nihai genişliğe getirmek için kenar kesme makinesinden geçirilerek haddelme operasyonu için hazır duruma getirilir. Çıkış şerit deposunda biriktirilen malzeme, 4 standlı, 6 gözlü tandem haddeden geçirilerek soğuk haddelenir. Soğuk haddelenmiş malzeme çıkış bobin sarıcılar ile sarılarak tekrar bobin haline getirilir (Şekil 4.2.).

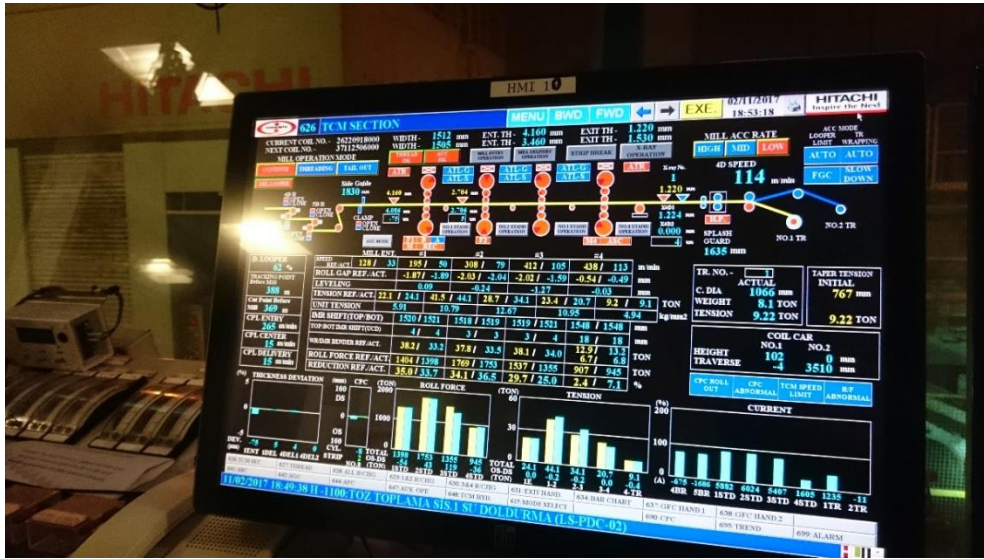


Şekil 4.2. Sürekli Tandem Hadde Çalışma Prensibi

Deneme üretimi için mekanik özellikleri tespit edilen bobin, asitlenmiş ve haddelenmiştir (Şekil 4.3., 4.4.). Deneme üretimi, önceden ayarlanan parametrelerle gerçekleştirilmiş olup, haddeleme esnasında oluşan sonuç parametreler tespit edilmiştir (Tablo 4.1.).



Şekil 4.3. Deneysel Çalışmanın yapıldığı Sürekli Tandem Hadde



Şekil 4.4. Sürekli Tandem Hadde Operatör Ekranı

Tablo 4.1. Deneme Üretiminden Elde Edilen Veriler

Stand	Veri Cinsi	Veri Değeri	Birim
1	Merdane yarıçapı	206,73	mm
	Giriş - çıkış gergi	22800 - 41300	kg
	Merdane çevresel hızı	197,33	m/dk
	Fiili hadde yükü	1.388.428	kg
	Giriş - çıkış malzeme hızı	129 - 198,46	m/dk
	Giriş - çıkış malzeme kalınlığı	4,121 - 2,704	mm
	Malzeme genişliği	1.512,00	mm
2	Merdane yarıçapı	213,80	mm
	Giriş - çıkış gergi	41300 - 31400	kg
	Merdane çevresel hızı	300,50	m/dk
	Fiili hadde yükü	198,46 - 301,54	m/dk
	Giriş - çıkış malzeme hızı	1.553.892	kg
	Giriş - çıkış malzeme kalınlığı	2,704 - 1,725	mm
	Malzeme genişliği	1.512,00	mm
3	Merdane yarıçapı	226,48	mm
	Giriş - çıkış gergi	31400 - 22500	kg
	Merdane çevresel hızı	428,63	m/dk
	Fiili hadde yükü	301,54 - 428,87	m/dk
	Giriş - çıkış malzeme hızı	1.230.010	kg
	Giriş - çıkış malzeme kalınlığı	1,725 - 1,305	mm
	Malzeme genişliği	1.512,00	mm
4	Merdane yarıçapı	233,48	mm
	Giriş - çıkış gergi	22500 - 9300	kg
	Merdane çevresel hızı	438,33	m/dk
	Fiili hadde yükü	428,87 - 439,87	m/dk
	Giriş - çıkış malzeme hızı	820.346	kg
	Giriş - çıkış malzeme kalınlığı	1,305 - 1,224	mm
	Malzeme genişliği	1.512,00	mm



#### 4.4. Analitik Hesaplamalar

Tezin bu aşamasında haddehanelerden alınan veriler ve çekme testinden elde edilen veriler kullanılarak, her bir stand için, tezin üçüncü bölümünde bahsi geçen matematiksel modeller kullanılarak hadde kuvveti hesaplanmıştır. Hadde kuvvetine ulaşılması için önce mazlemeler ile merdaneler arasındaki sürtünme katsayısının bilinmesi gerekir. Sürtünme katsayısının direkt hesaplanması için geliştirilmiş formüller literatürde bulunsa da, fiili hadde kuvvetinden ters işlem yaparak daha hassas sonuca ulaşılacağı görülmüştür [33]. Bu sebeple deneme çalışmasının yapıldığı sürekli tandem hattının matematiksel modelini olan Hill yöntemi kullanılarak, elde edilen veriler ışığında her stand için sürtünme katsayısı hesaplanmıştır [18]. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. Hesaplanan Sürtünme Katsayıları

Stand	Veri Cinsi	Veri Değeri	Birim
1	Merdane Pürüzlülüğü	0,7	$\mu\text{m Ra}$
	Sürtünme Katsayısı	0,043	$\mu\text{m Ra}$
2	Merdane Pürüzlülüğü	0,7	$\mu\text{m Ra}$
	Sürtünme Katsayısı	0,06	$\mu\text{m Ra}$
3	Merdane Pürüzlülüğü	0,7	$\mu\text{m Ra}$
	Sürtünme Katsayısı	0,05	$\mu\text{m Ra}$
4	Merdane Pürüzlülüğü	3,5	$\mu\text{m Ra}$
	Sürtünme Katsayısı	0,089	$\mu\text{m Ra}$

Deneme üretiminde elde edilen veriler (Tablo 4.1.) ve hesaplanan sürtünme katsayıları (Tablo 4.2.) kullanılarak, Bölüm 3'te incelenen matematiksel modeller ile tüm standda oluşan hadde kuvvetleri hesaplanmıştır (Tablo 4.3.).

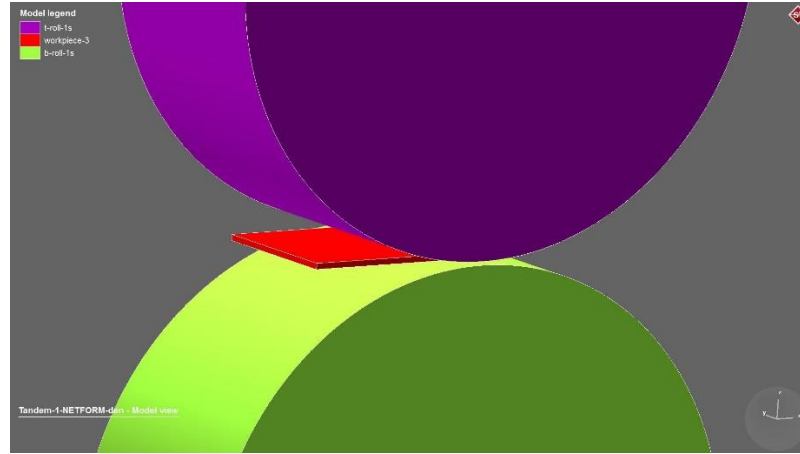
Tablo 4.3. Analitik Yöntemlerle Elde Edilen Hadde Kuvvetleri (KgF)

<i>Metod</i>	<i>1. Stand</i>	<i>2. Stand</i>	<i>3. Stand</i>	<i>4. Stand</i>
Wusatovski	1.256.000	1.479.000	1.161.000	697.400
Trinks	906.100	1.393.000	1.147.000	613.200
Korolev Nikolayevski	1.411.000	1.580.000	1.250.000	833.900
Ekelunds	1.017.000	1.386.000	1.146.000	811.500
Tselikov	1.412.000	2.629.000	2.177.000	1.486.000
Dieter	1.350.000	1.878.000	1.456.000	925.100
Stone	1.468.000	1.648.000	1.486.000	827.700
Schey	935.400	1.493.000	1.235.000	803.600
Bland ve Ford	1.213.000	1.637.000	1.321.000	889.100

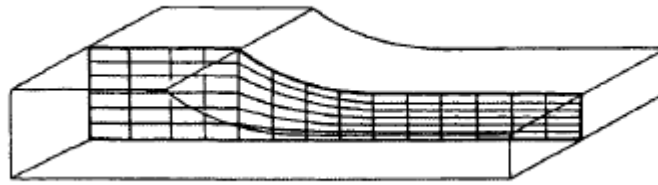
#### 4.5. Nümerik Hesaplamalar

Sonlu elemanlar yöntemi ile soğuk haddeleme modellemesi, soğuk haddeleme parametrelerini önceden tahmin etme, malzemede pekleşme miktarı, deformasyon sonucu oluşan sıcaklık vb. gibi birçok veriye ulaşılmasını sağlar. Analiz üç boyutlu düzlemde yapılabileceği gibi, iki boyutlu düzlemsel gerilme yöntemi ile de yapılabilir.

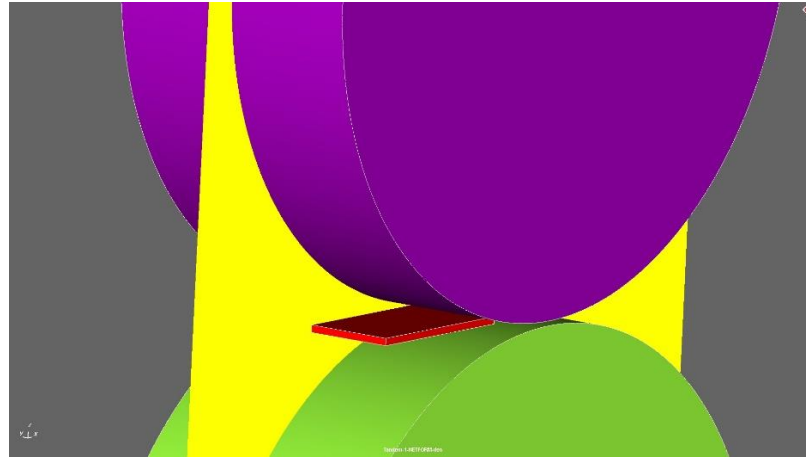
Tezin bu bölümde sonlu bir elemanlar yazılımı kullanılarak, deneme üretiminin gerçekleştirildiği malzeme ve deneme üretiminin gerçekleştirildiği parametreler simule edilmiş, sonlu elemanlar analizi yapılarak hadde yükleri tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analiz programı olarak Simufact Forming programının, haddeleme modülü kullanılmıştır. Hadde üo boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 4.5.). Soğuk haddelemede genişlik değişimi ihmal edilebilecek kadar az olduğu için iki boyutlu düzlemsel gerilme tipi seçilmiştir [13, 17] (Şekil 4.6., 4.7.).



Şekil 4.5. Simufact Forming 3D Modelleme

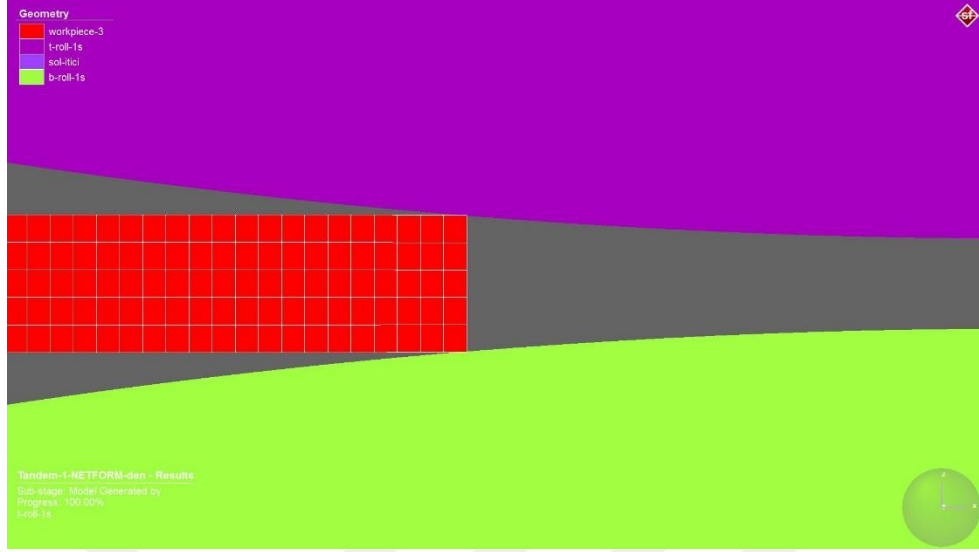


Şekil 4.6. Soğuk Haddede 2D düzlemsel gerilme metodu [13]



Şekil 4.7. Yazılımda 2D Düzlemi Seçimi

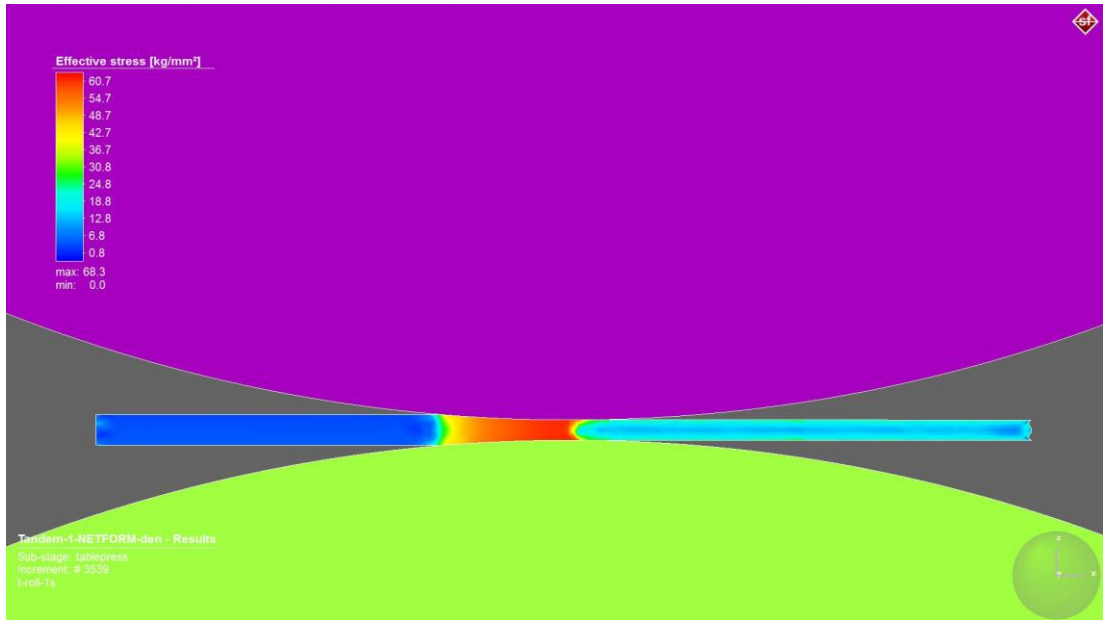
Analizin iki boyutlu olması nedeni ile düzlemsel eleman olan “11” numaralı eleman ile, ağ yapısı oluşturuldu (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. İki Hadde Merdanesi Arasında Haddelenmek üzere olan Malzeme

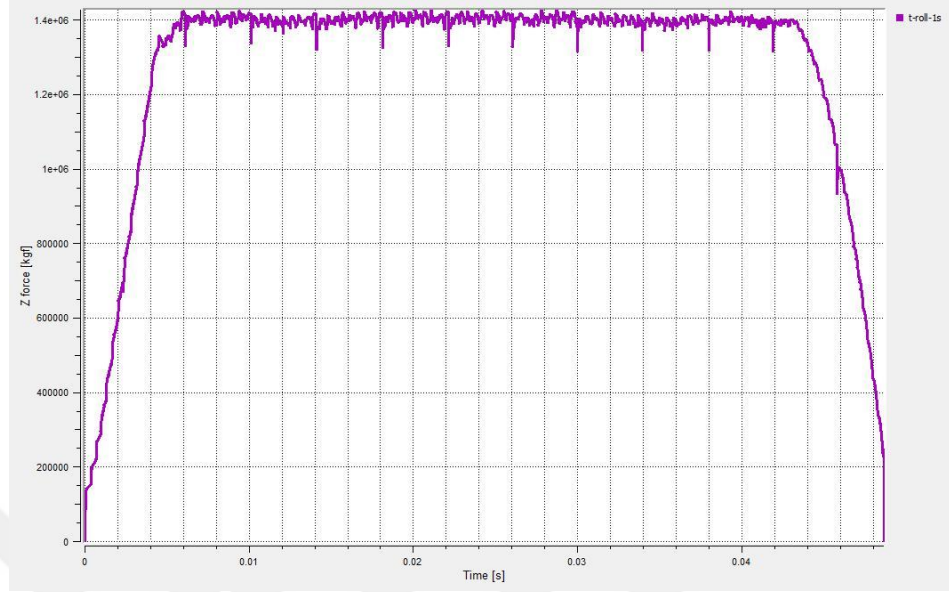
#### 4.5.1. 1. stand analizi

Analiz yürütülmüş, malzemede oluşan eşdeğer gerilme verilmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. 1. Standda Oluşan eşdeğer Gerilme

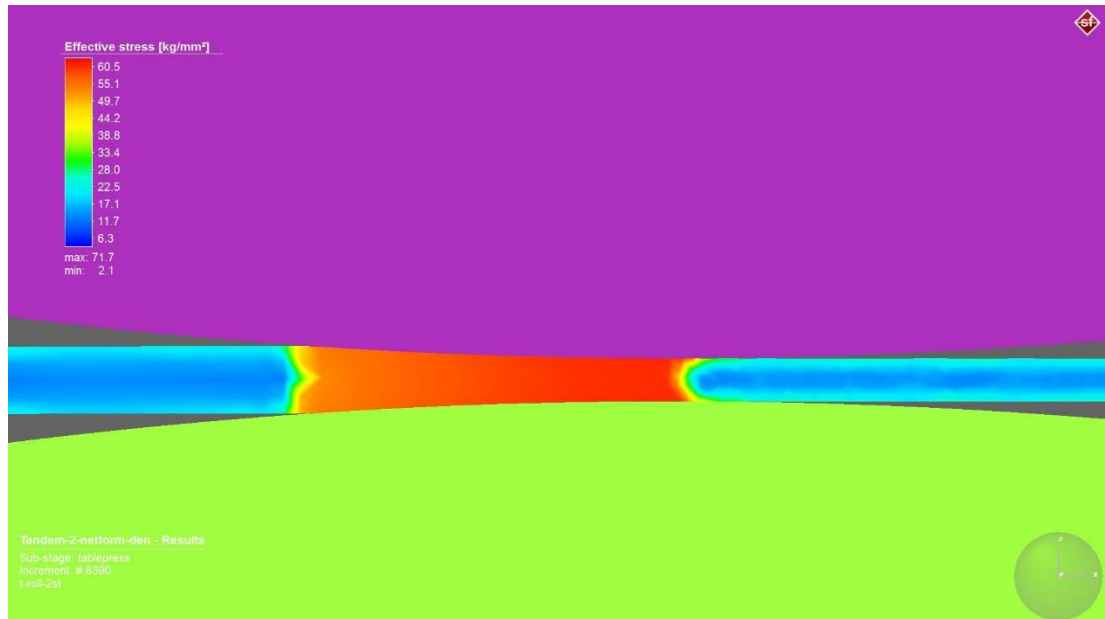
1. standda oluşan Z eksenindeki hadde yükü verilmiştir (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. 1. Standda Hadde Yükü

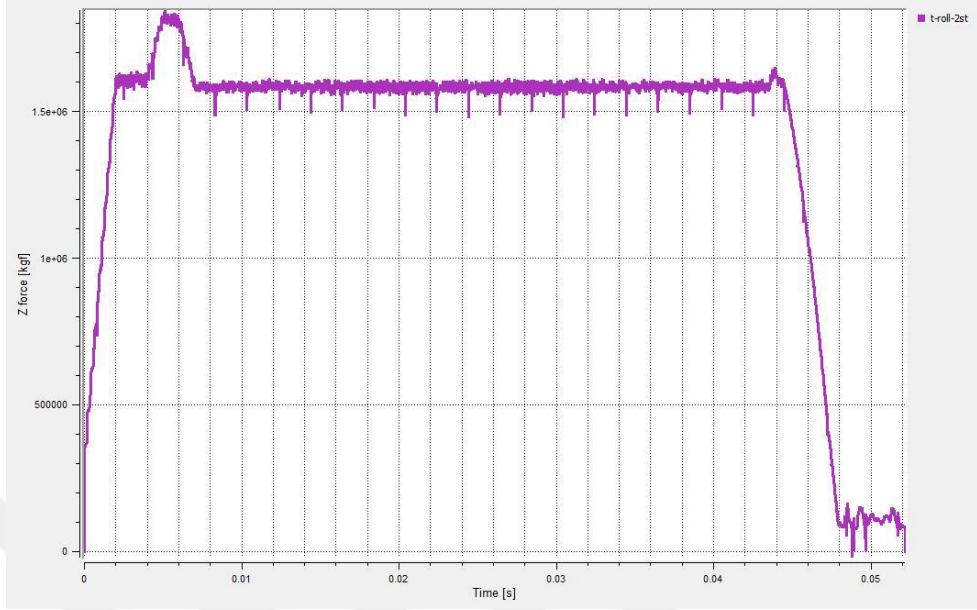
#### 4.5.2. 2. stand analizi

İlk standda haddelenen malzeme ile analiz yürütülmüş, malzemede oluşan eşdeğer gerilme verilmiştir (Şekil 4.11.).



Şekil 4.11. 2. Standda Malzemede Oluşan Eşdeğer Gerilme

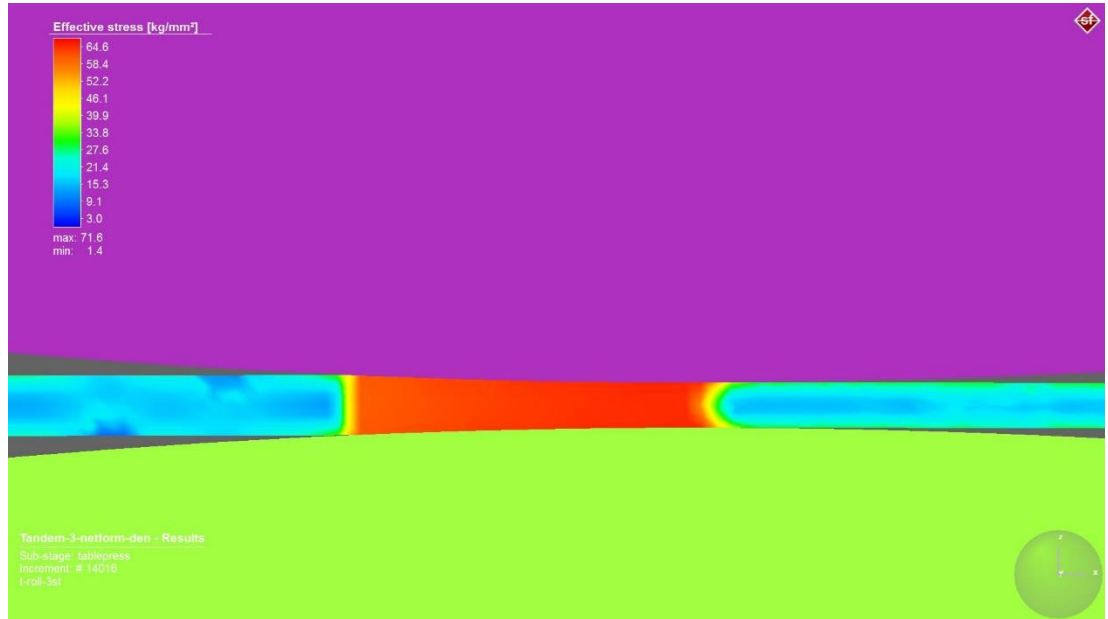
İkinci standda oluşan Z eksenindeki hadde yükü verilmiştir (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. 2. Standda Hadde Yüğü

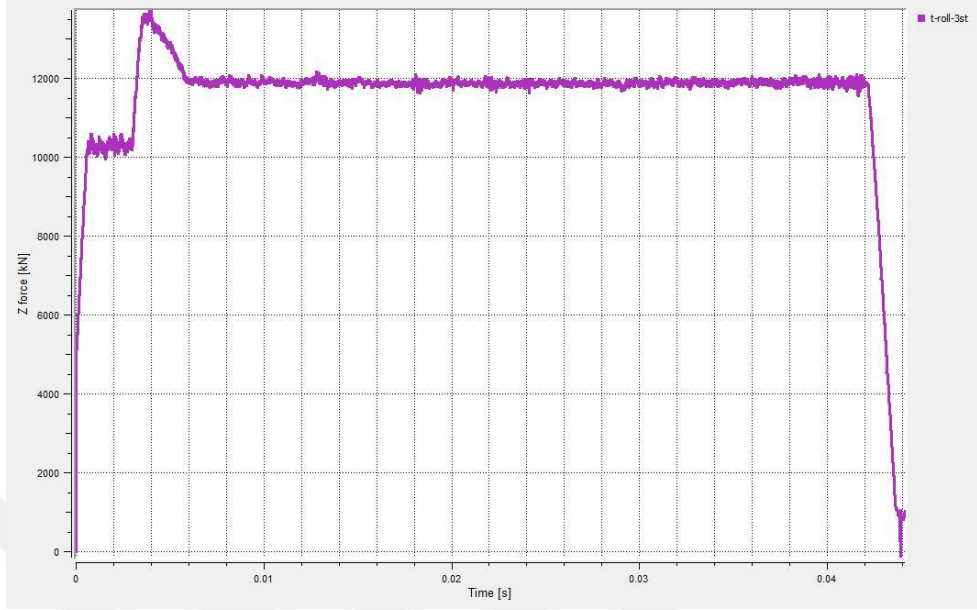
#### 4.5.3. 3. stand analizi

İkinci standda haddelenen malzeme ile analiz yürütülmüş, malzemede oluşan eşdeğer gerilme verilmiştir (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. 3. Standda Oluşan Eşdeğer Gerilme

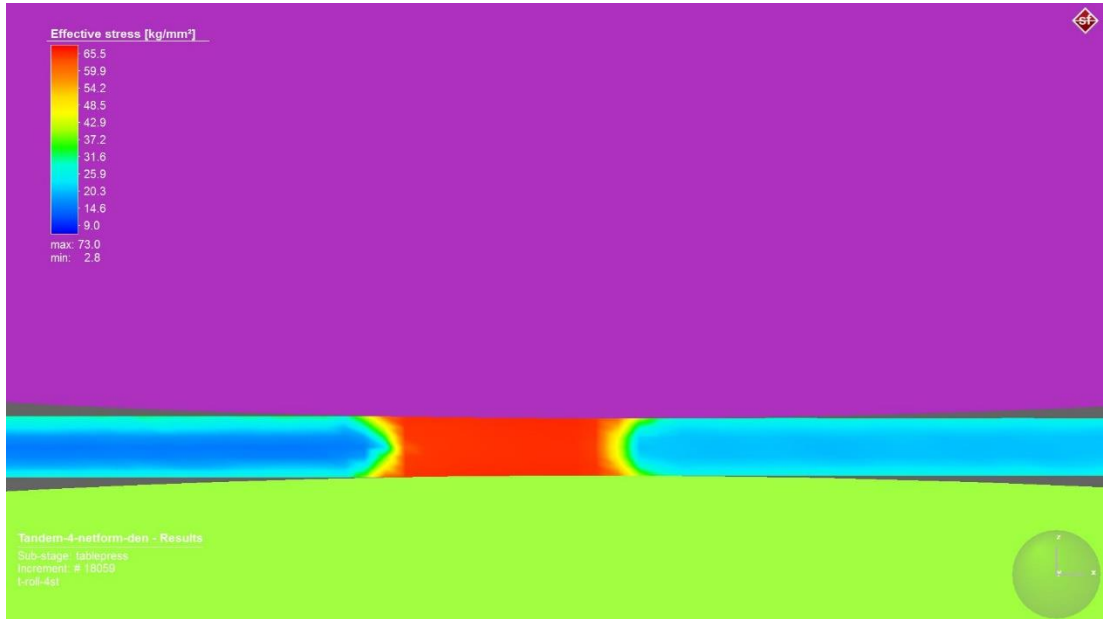
Üçüncü standda oluşan Z eksenindeki hadde yükü verilmiştir (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. 3. Standda Hadde Yüğü

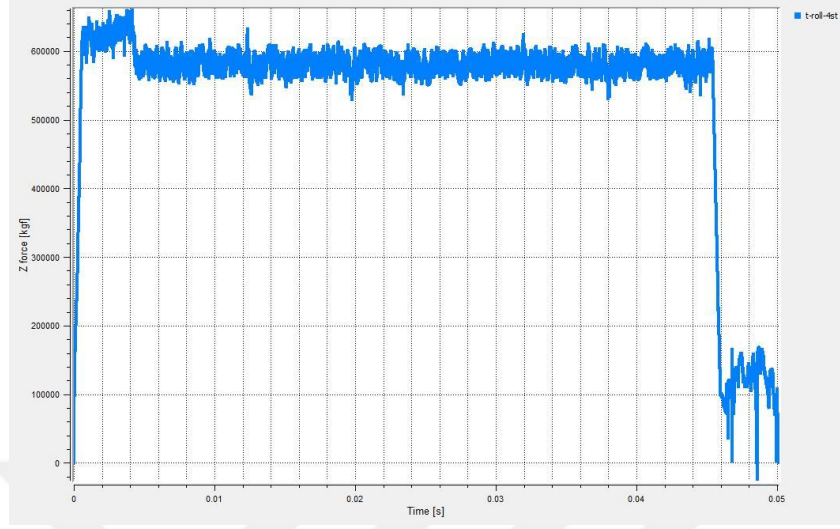
#### 4.5.4. 4. stand analizi

Üçüncü standda haddelenen malzeme ile analiz yürütülmüş, malzemede oluşan eşdeğer gerilme verilmiştir (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. 4. Standda Oluşan Eşdeğer Gerilme

Dördüncü standda oluşan Z eksenindeki hadde yükü verilmiştir (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. 4. Standda Hadde Yüğü

#### 4.5.5. Nümerik analiz sonuçları

Tüm standlar için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak nümerik analiz yapılmıştır. Nümerik analiz ile elde edilen hadde yükü, analiz sırasında sabit kalmayıp, değikenlik göstermektedir. Hadde yükü olarak bu rakamların ortalaması alınmıştır. (Tablo 4.4.)

Tablo 4.4. Nümerik Analiz Sonucu Elde Edilen Hadde Yüğüleri (KgF)

<i>Metod</i>	<i>1. Stand</i>	<i>2. Stand</i>	<i>3. Stand</i>	<i>4. Stand</i>
<i>Nümerik Çalışma</i>	<i>1.393.726</i>	<i>1.578.977</i>	<i>1.215.450</i>	<i>580.000</i>

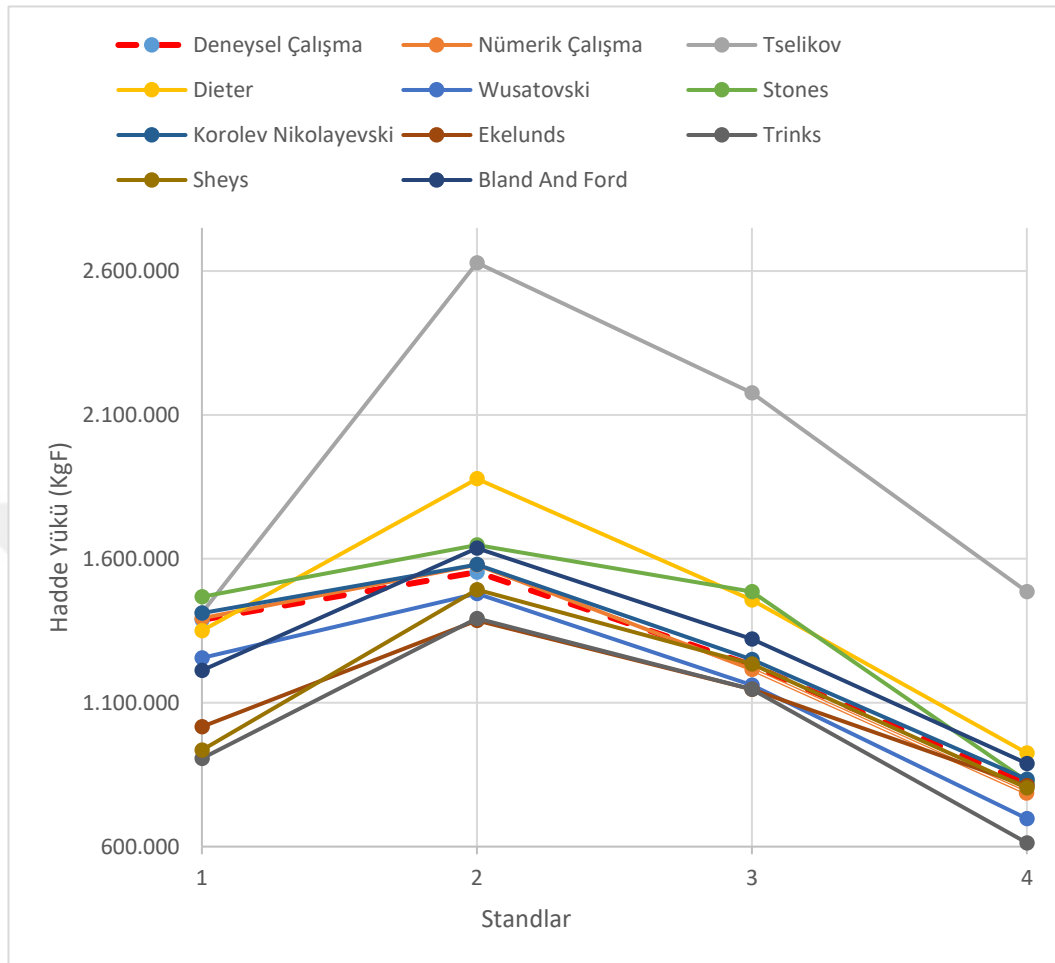


## BÖLÜM 5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında soğuk haddeleme prosesinin analitik ve nümerik olarak hesaplanarak hadde yükünün bulunması amaçlanmıştır. Öncelikle deney numunesi üzerinde çekme testi yapılarak numunenin akma eğrisi elde edilmiştir. Haddeleme sırasında fiili haddeleme parametreleri tespit edilmiştir. Literatürde bulunan analitik yöntemler incelenmiş ve deneysel çalışmada elde edilen veriler kullanılarak hadde yükü hesap edilmiştir. Bunun sonuçlar deneysel çalışmada elde edilenler ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak haddeleme operasyonu nümerik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar fiili sonuçlar ile kıyaslanmıştır (Tablo 5.1., Şekil 5.1.).

Tablo 5.1. Tez Çalışmasında alınan sonuçların Karşılaştırılması (KgF)

<i>Metod</i>	<i>1. Stand</i>	<i>2. Stand</i>	<i>3. Stand</i>	<i>4. Stand</i>
<i>DeneySEL Çalışma</i>	1.388.428	1.553.892	1.230.010	820.346
<i>Nümerik Çalışma</i>	1.393.726	1.578.977	1.215.450	580.000
Wusatovski	1.256.000	1.479.000	1.161.000	697.400
Trinks	906.100	1.393.000	1.147.000	613.200
Korolev Nikolayevski	1.411.000	1.580.000	1.250.000	833.900
Ekelunds	1.017.000	1.386.000	1.146.000	811.500
Tselikov	1.412.000	2.629.000	2.177.000	1.486.000
Dieter	1.350.000	1.878.000	1.456.000	925.100
Stone	1.468.000	1.648.000	1.486.000	827.700
Schey	935.400	1.493.000	1.235.000	803.600
Bland ve Ford	1.213.000	1.637.000	1.321.000	889.100



Şekil 5.1. Tez Çalışmasında Alınan Sonuçların Karşılaştırılması

Pratik ve hızlı hesap yapılmasını sağlayan analitik yöntemlerde yakın sonuçlar edilse de çok yakın değerler elde edebilmek için daha detaylı analitik yöntemlerin kullanılması gerekliliği görülmüştür. Analitik yöntemlerle doğru sonuca ulaşılabilmesinin en önemli parametresi haddelenecek malzemenin akma eğrisinin tespitidir. Çekme testi ile hazırlanan akma eğrisi ilk standlar için yaklaşık sonuç verse de son stantlara gidildikçe sonuçlardaki hata payının arttığı görülmüştür. Hatanın bir sebebi, çekme testinde yaşanan deformasyon ile haddeme prosesindeki deformasyonun birbirine benzememesinden kaynaklanabileceği hatta bazı kaynaklarda çekme testi yerine basma testinin alternatif olarak kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca haddeme esnasında oluşan deformasyon hızının, çekme veya basma testlerine göre çok hızlı olması bir diğer hata kaynağı olarak tespit edilmiştir.

Akma eğrisinin hadde simülatörü kullanılarak, farklı hızlarda elde edilmesi ile daha yakın sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Sürtünme katsayısı teorik olarak hıza, hadde yüzey pürüzlülüğüne ve haddeleme esnasında kullanılan mineral yağın cinsine göre değişmektedir. Ayrıca hadde merdanesinin haddelenen mamule temas ettiği bölgenin her yerinde anı sürtünme katsayısı olmamasına rağmen sabit sürtünme katsayısı kullanılmaktadır. Bu durum ikinci bir hata kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma yapılacak her bir haddehane için farklı hızlarda, farklı malzeme cinsleri ve minerile yapılacak deneysel çalışmalarla ilgili haddehaneye ait sürtünme katsayısı aralığı tespit edilmelidir. Akma eğrisi ve sürtünme katsayısı doğru bir şekilde tespit edildiği taktirde soğuk haddelemenin nümerik analizi çok yakın sonuçlar vereceği de görülmüştür. Bu çalışmada Koralev ve Nikolayevski yöntemi ile Bland ve Ford yöntemleri çok yaklaşık sonuç vermiştir.

Nümerik çalışmada ise ilk üç standda çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Son standda ise düşük hadde yükü hesaplanmıştır. Bunun sebebinin son standdaki yüzde ezme miktarının çok az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İlk defa haddelenecek mamulün hedef kalınlık ve mukavemet değerine haddelenebilmesi için yapılacak deneme sayısı, beraberinde üretim kaybına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, soğuk haddeleme prosesinin öncesinde analitik ve nümerik olarak analizinin yapılarak parametrelerin önceden tespit edilmesi, deney sayısını ciddi anlamda azaltacağı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] Wagoner, R.H., Chenot, J.L., Metal Forming Analysis, Cambridge University Press, 208-209, 2001.
- [2] Panjkovic, V., Friction and the Hot Rolling of Steel, CRC Press, 123-126, 2014.
- [3] apan, L., Metallere Plastik Şekil Verme, ađlayan Kitabevi 1-100, 2010.
- [4] Wusatowski, Z., Fundamentals Of Rolling, Pergamon Press, 1-89,1969.
- [5] Lenard, J., Primer On Flat Rolling, 2. Baskı, Elsevier, 2014.
- [6] Dieter G., Mechanical Metallurgy, Mc-Graw-Hill Inc.,607-616,1988.
- [7] Roberts, W., Cold Rolling Of Steel, Marcel Dekker,1-90,1978.
- [8] Ginzburg, V., Ballas R., Flat Rolling Fundamentals, Marcel Dekker, 219-239,2000.
- [9] Tselıkov, Alexander (1967), Stress and Strain in Metal Rolling, 1. Baskı, Mir Publishers, Rusya.
- [10] Ginzburg, Vladimir B., Steel Rolling Technology, CRC Press 324-353,1989.
- [11] Ginzburg, Vladimir B. (2005), Metallurgical Design Of Flat Rolled Steels, 1. Baskı, Marcel Dekker Inc, ABD.
- [12] Lenard, J., Metal Forming Science and Practice, Elsevier, 90-195,2002.
- [13] Lenard, J., M. Pietrzyk ve L. Cser, Mathematical and Physical Simulation of the properties Of Hot Rolled Product, 1. Baskı, Elsevier Science Ltd.,88-98,1999.
- [14] Ginzburg, Vladimir B., Steel Rolling Technology, CRC Press 324-353,1989.

- [15] Wagoner, R., Chenot L., Metal Forming Analysis, Cambridge University Press, 77-141, 2002.
- [16] Degner M., Palowski H., Fit for Hot and Cold Rolling of Strips 10-133, 2016.
- [17] Lenard, J., Maciej Pietrzyk, Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolled Process, Springer-Verlag, 50-90,1991.
- [18] Hill R., The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, 188-212, 1950.
- [19] Rees D., Basic Engineering Plasticity, Elsevier, 269-205, 2006.
- [20] Cianci, M., Leonardo da Vinci's Machines, Beccoci Editore, 89,1999
- [21] Toshiyuki, K., Nishi, H., Yoshimura, Y., Furumoto, H., 2015. High Type Rolling Mill for Cold Rolling. Excellent Inovations in Metal Forming, 60: 239-244.
- [22] Liu, Y.J., Tieu, A.K., Wang, D.D., Yuen, W.Y.D., 2001, Friction Measurement in cold Rolling, Journal of Materials Processing Technology, 111: 142-145.
- [23] Liu, Y.J., Tieu, A.K., 2004, Friction variation in the cold Rolling process, Tribology International, 37: 177-183.
- [24] Schey, J., Introduction to Manufacturing Processes, McGraw Hill, 200-250, 2000.
- [25] Ginzburg, V., Steel Rolling Technology, CRC Press, 214-339.
- [26] Ford, H., The Theory of Rolling, Metallurgical Reviews, 2-5.
- [27] <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions.>, Erişim Tarihi : 12.11.2019.
- [28] Başkaya, Ü., Aldıkaçtı, G., Davut, K., Kılıç, Y., 2018, IF-Çeliklerinde Kristalografi k Dokunun Soğuk Ezme Miktarıyla Değişimi ve Şekillendirilebilirliğe Etkisi, 19 International Metallurgy and Materials Congress.
- [29] ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, 10th edition, 1993.

- [30] EN 10130 :2006, Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming.
- [31] Erdemir Ürün Kataloğu, 2018, 173.
- [32] Roberts, W. L., Hot Rolling Of Steel, Maercel Deccer, 1978, 641-649.
- [33] Byon, S.M., KIM, S.I., Lee, Y., A numerical approach to determine flow stress-strain curve of treip and friction coefficent in actual cold Rolling mill, 2008, Journal of Materials Processing Technology, 2008, 106-111.
- [34] ISO 6892-1:2009 Metallic materilas, tensile testing, method of test at room temprature, 2009, 40.



## ÖZGEÇMİŞ

Aykut Başkaya, 15.02.1984'de Kdz. Ereğli'de doğdu. İlk Öğretimi Kdz. Ereğli TED Kolejinde tamamladı. 2002 yılında Kdz. Ereğli Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2007 yılında bitirdi. 2007 yılında proje mühendisi olarak bir tersine mühendislik firmasında çalışma hayatına girdi. 2008 yılında Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarında İşletme Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarında İşletme Başmühendisi oldu akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesinde devam etti. Halen Ereğli Demir ve Çelik Fabrikalarında İşletme Başmühendisi olarak görev yapmaktadır.