

175863

**KALINLIK KONTROLU İÇİN SICAK HADDELEME
PROSESİNİN MODELLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ertan ÖZNERGİZ
(Enstitü No: 503912021)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Eylül 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Mayıs 2003**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Can ÖZSOY

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Ahmet KUZUCU

Doç.Dr. Kenan KUTLU

Prof.Dr. A. Talha DİNİBÜTÜN (Doğuş.Ü.)

Doç.Dr. İsmail YÜKSEK (Y.T.Ü)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Endüstride yaygın olarak karşımıza çıkan proses kontrolü ve optimizasyonuna yönelik araştırmalar son yıllarda önemli artış göstermektedir. Kontrol edilecek sistemin modeli, yapısı ve parametreleri ne kadar iyi bilinirse kontrolü ve optimizasyonu o kadar kolaylaşacaktır. Bu sebeple; bu çalışmada deneysel olarak bir endüstriyel prosesin modellenmesi, tanınması ve optimizasyonu konusunda .bir çalışma yapılmaktadır.

Bu konuda çalışmamı öneren ve çalışmanın her safhasında bana destek olan, yönlendiren hocam Sayın Prof. Dr. Can ÖZSOY'a ve şimdiye kadarki çalışmalarında bana desteklerini esirgemeyen, Otomatik Kontrol Birimi'ndeki hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Daha önce yapılan çalışmalarla birlikte benim çalışmalarım için gerekli deneysel veriyi sağlayan ve bu konudaki çalışmalarından faydalandığım, Metalürji Yüksek Mühendisi Abdullah SEZER başta olmak üzere Ereğli Demir Çelik Fabrikaları bünyesindeki 2. Sıcak haddehanesi yöneticilerine, çalışmamın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Celalettin ERGÜN, Yard. Doç. Dr. Cemal BAYKARA ve Dr. Ahmet ZORLU' ya, ve tezin yazımı sırasındaki yardımlarından ötürü Arş. Gör. Müh. Kemal KIZILASLAN ve Otomatik Kontrol Birimi'ndeki bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

En önemlisi bana rahat ve huzurlu bir aile ortamı sağlayarak çalışmamı kolaylaştıran eşim Gıda Müh. Meliha ÖZNERGİZ'e de teşekkür ederim.

Mayıs 2003

Ertan ÖZNERGİZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. SICAK HADDELEME PROSESİ	4
2.1. Haddeleme Prosesine Genel Bakış	4
2.1.1. Hadde silindirleri	5
2.1.2. Haddelemede kullanılan kavramlar	6
2.2. Haddelerde Ayırma Kuvvetinin ve Momentin Analitik Olarak Hesaplanması	7
2.2.1. Sims metodu	8
2.2.2. Cook-McCrum metodu	9
2.2.3. Ford-Alexander metodu	10
2.2.4. Dentone-Crane metodu	10
2.2.5. Green-Wollece metodu	10
2.2.6. Ekelund metodu	10
2.2.7. Geleji metodu	11
2.2.8. Tselikov metodu	12
2.2.9. Ride metodu	12
2.3. Haddelemede Sıcaklığın Önemi ve Hesaplanması	12
2.3.1. Stefan-Boltzman formülü	13
2.3.2. Geleji metodu	14
2.3.3. Tjagunow metodu	14
3. SİSTEM TANILAMA VE MODELLEME	16
3.1. Sistem Tanılama Teorisi	16
3.2. Sistem Tanılama İlkeleri	17
3.2.1. Deneysel planlama	18
3.2.2. Model yapıları	19
3.2.2.1. Kriterler	19
3.2.3. Parametre tahmin metotları	20
3.2.4. Model geçerliliği tespiti	20
3.3. Sistem Tanılama	21
3.4. Parametre Uyum Algoritmaları	22

3.4.1. En küçük kareler yöntemi	23
3.4.1. En küçük kareler yöntemi ile parametre kestirimi	25
3.5. Basamak Giriş Cevabı Modeli	26
4. SICAK HADDELEME PROSESİNİN MODELLENMESİ	28
4.1. Sıcak Haddeleme Prosesi	29
4.1.1. Kullanılan hadde tezgahı ve özellikleri	29
4.1.2. Verilerin toplanması	30
4.1.3. Kullanılan malzemeler	30
4.2. Sıcak Haddeleme Modeli	30
4.2.1. Modeli geliştirilen büyüklükler	30
4.2.1.1. Haddeleme kuvveti modeli	31
4.2.1.2. Haddeleme momenti modeli	31
4.2.1.3. Kütük sıcaklığı modeli	32
4.2.1.4. Hadde sıçraması modeli	32
4.3. Sıcak Haddelemenin Ampirik Modeli	33
4.3.1. Sıcak haddelemede kuvvet ve momentin ampirik modeli	33
4.3.2. Sıcaklık değişimini veren ampirik model	35
4.3.3. Hadde sıçramasının ampirik modeli	36
4.4. Sıcak Haddelemenin Dinamik Modeli	37
4.5. Model Geçerliliğinin Araştırılması	38
5. HADDELEME PROSESİ TANILAMA SONUÇLARI	39
5.1. Model Tanılama Sonuçları	39
5.1.1 Haddeleme kuvveti modeli tanılama sonuçları	40
5.1.2. Haddeleme momenti modeli tanılama sonuçları	43
5.1.3. Kütük sıcaklığı modeli tanılama sonuçları	46
5.1.4. Hadde sıçraması modeli tanılama sonuçları	48
5.2. Haddeleme Prosesi Model Tanılama Sonuçlarının Değerlendirilmesi	50
6. HADDELEME PROSESİNİN OPTİMİZASYONU VE SONUÇLARI	52
6.1. Kısıtlı Optimizasyon Problemi	53
6.1.1 Sıralı kuadratik programlama (SQP) problemi	54
6.2. Haddeleme Prosesinin Optimizasyon Modeli	55
6.3. Haddeleme Prosesinin Optimizasyon Sonuçları	57
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61
EK A. YAPILAN PROGRAMLAR	64
A.1. Basamak Cevabı Modeli İçin Matlab’de Yazılan Program	64
A.2. Ampirik Model İçin Matlab’de Yazılan Program	65
A.3. Optimizasyon Programı	66
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

ADC	: Analog – Digital Converter
ARMA	: Autoregressive with Moving Average Noise
ARMAX	: Autoregressive with Exogenous Variable and Moving Average Noise
ARX	: Autoregressive with Exogenous Variable
DAC	: Digital – Analog Converter
ELS	: Extended Least Squares
LP	: Linear Programming
MISO	: Multi Input Single Output
MLR	: Multivariable Least Squares Regression
NP	: Non-linear Programming
PAA	: Parameter Adaptation Algorithms
PLS	: Partial Least Squares
PRBS	: Pseudo Random Binary Sequences
RLS	: Recursive Least Squares
RML	: Recursive Maximum Likelihood
QP	: Quadratic Programming
SQP	: Sequential Quadratic Programming
ZOH	: Zero Order Holders

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1 : Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri.....	30
Tablo 5.1 : Ampirik modelde hesaplanan regresyon sabitleri.....	50
Tablo 6.1 : Haddeleme prosesi için kullanılan kısıtlar.....	57
Tablo 6.2 : Optimizasyon probleminde elde edilen sonuçlar.....	57
Tablo 6.3 : Optimizasyon sonucu elde edilen ezme miktarları.....	58



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Şekil 2.1 : Hadde silindirleri yerleşim şekilleri	5
Şekil 2.2 : Yaygın bir haddeleme ünitesinin genel görünüşü	6
Şekil 2.3 : Haddeleme prosesinin mekanik modellenmesinde kullanılan parametreler ve bunların şematik gösterimi	8
Şekil 2.4 : Haddelemede şekil değiştirme işi sırasında enerji dengesi	13
Şekil 3.1 : Sistem tanılama akış diyagramı	18
Şekil 3.2 : Parametre tanılama blok diyagramı	21
Şekil 4.1 : Haddeleme kuvveti modelinin blok diyagramı	31
Şekil 4.2 : Haddeleme momenti modelinin blok diyagramı	31
Şekil 4.3 : Kütük sıcaklığı modelinin blok diyagramı	32
Şekil 4.4 : Hadde sıçraması modelinin blok diyagramı	33
Şekil 5.1 : Haddeleme kuvveti için bulunan ortalama akma gerilmesinin (k_p) ampirik model tanılama (a) ve geçerlilik (b) sonuçları (kg/mm^2) ...	40
Şekil 5.2 : Haddeleme kuvveti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (ton)	41
Şekil 5.3 : Haddeleme kuvveti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (ton)	42
Şekil 5.4 : Haddeleme momenti için bulunan ortalama akma gerilmesinin (k_g) ampirik model tanılama (a) ve geçerlilik (b) sonuçları.(kg/mm^2) ...	43
Şekil 5.5 : Haddeleme momenti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (kgmm)	44
Şekil 5.6 : Haddeleme momenti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (kgmm)	45
Şekil 5.7 : Kütük sıcaklığı için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları ($^{\circ}\text{C}$)	46
Şekil 5.8 : Kütük sıcaklığı için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları ($^{\circ}\text{C}$)	47
Şekil 5.9 : Hadde sıçraması için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (mm)	48
Şekil 5.10 : Hadde sıçraması için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (mm)	49

SEMBOL LİSTESİ

a, b	: Bilinmeyen parametreler
b_i	: Regresyon sabitleri
d	: Hadde sıçraması
C_g	: Geleji geometrik faktörü
C_p	: Cook-McCrum geometrik faktörü
E	: Her geçiş için gerekli enerji
G_i	: Hadde momenti
g_j	: Hesaplanan model katsayıları
h_a	: Ortalama şerit kalınlığı
h_i, h_1	: Malzemenin haddeye giriş kalınlığı
h_{i+1}, h_2	: Malzemenin haddeden çıkış kalınlığı
h_n	: Nötr noktadaki malzeme kalınlığı
i	: Geçiş sayısını veren indis
I_p	: Ezme ve deformasyon hızı faktörü
$J(\Theta)$	: Kayıp fonksiyonu
k	: Örneklemme zamanı
k_a	: Ortalama dinamik akma gerilmesi
K_g, k_p	: Ortalama uzama akma gerilmesi
K	: Deformasyon direnci
L	: Temas boyu uzunluğu
m	: Kütüğün kütlesi
n	: Model derecesi
n_p	: Plastisite katsayısı
n_m	: Merdane devir sayısı
P	: Haddeleme yükü
r	: % Ezme oranı
R	: Merdane yarıçapı
R'	: Yassılaştırmış merdane yarıçapı
Q_p, Q_g	: Geometrik faktörü (sırayla kuvvet ve momet için)
s	: Hadde stroku
S	: Işıma olan yüzey
t	: Haddeleme süresi
T	: Haddeleme sıcaklığı
u	: Sistem girişleri
X	: Gözlem vektörü
v	: Merdane yüzey hızı
V_s	: Kütük hacmi
W_s	: Malzeme genişliği
w	: Ağırlık faktörü
y	: Sistem çıkışları
$\hat{y}, y^*$	: Modelin bulduğu çıkış değeri
Y	: Akma gerilmesi

z	: Haddeleme zamanı
Z_a	: Deformasyon bölgesinin aritmetik ortalama en-boy oranı
Z_p	: Deformasyon bölgesinin parabolik ortalama en-boy oranı
Z_g	: Deformasyon bölgesinin geometrik ortalama en-boy oranı
δ	: Malzemeye verilen ezme miktarı
α	: Kapma açısı
θ	: Nötr açı
ϕ	: Isı geçiş katsayısı
Φ	: Modele giriş verilerini içeren matris.
Θ	: Modelin bilinmeyen parametreleri vektörü
μ	: Sürtünme katsayısı
ε	: Ölçülen değer ile tahmin edilen değer arasındaki fark, hata
λ	: Ortalama deformasyon hızı
ω_n	: Merdane açısal hızı



KALINLIK KONTROLÜ İÇİN SICAK HADDELEME PROSESİNİN MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışma üç kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak, sıcak haddeleme prosesinde haddeleme kuvveti, momenti, kütük sıcaklığı ve hadde sıçraması için deneysel modelleme yapıldı. Bu modelin yapısı basamak cevabı modeli formundadır ve haddeleme kuvveti, momenti, kütük sıcaklığı ve hadde sıçraması için daimi rejim değerlerini hesaplamaktadır.

İkinci olarak verilen dinamik model ile sıcak haddeleme proseslerinde yaygın olarak kullanılan klasik ampirik modeller karşılaştırıldı. Bu ampirik modellerde katlı lineer regresyon yöntemi kullanıldı.

Son kısımda da, tanılama sonunda bulunan basamak cevabı modeli esas alınarak optimizasyon modeli geliştirildi. Maliyet optimizasyonu için, efektif bir çözüm olarak görünen, her geçişteki ezme miktarını artırarak geçiş sayısını minimize etmenin değil de, maliyeti etkileyen bütün faktörleri göz önünde bulunduran optimum bir haddeleme planı uygulamanın daha geçerli bir kontrol stratejisi olduğu gözlenmiştir. Optimum planlamanın amacı, enerji ve zaman maliyetini minimize ederek, her geçiş için gerçekleştirilebilir ezme miktarlarını hesaplamaktır.

Bu çalışmada modelleri geliştirmek için kullanılan veriler, Ereğli Demir Çelik Fabrikaları 2. sıcak haddehanesi tersinir kaba haddeleme tezgahından sağlanmıştır.

MODELLING OF HOT-ROLLING PROCESS FOR GAUGE CONTROL

SUMMARY

This study consists of three parts: In the first part, experimental roll force, torque, slab temperature and roll deflection modeling of a plate hot-rolling is represented. The structures of these models are the step-response forms and predict the steady-state values of roll force, torque and temperature.

In the second part, the proposed dynamical models are compared with the classical empiric models commonly used in the rolling practice. For empiric model, multiple linear regression method is used.

In the third part an optimization model is improved by using step response identification model. An accurate control strategy for the hot-rolling mill process to obtain optimum cost, is not to minimize the pass number by maximizing the reduction per pass which seems to be an effective solution, but is to realize a rolling schedule that take into account all the factors affecting the cost. The aim of optimum scheduling is to calculate the reduction per pass that can be achieved by minimizing the energy and time cost.

The experimental data obtained from Ereğli Iron and Steel Factory in Turkey was used for developing both of the models.

1. GİRİŞ

Sıcak haddeleme prosesinde amaç, iş parçasının iki merdane arasından geçirilerek istenilen kalınlığa getirilmesidir. İstenilen kalınlığa hassas bir şekilde ulaşmanın yanı sıra işlem maliyetinin minimuma düşürülmesi; haddeleme parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesine, işlem sırasında bu parametrelerin sürekli kontrolüne ve gerekli müdahaleler ile parametrelerin arzu edilen aralıklarda tutulmasına bağlı olacaktır.

İşlem parametre değerlerinin işlem öncesi belirlenmesi amacıyla matematiksel modeller kullanılabilir. Hem teorik hem de deneysel olarak haddeleme prosesi modellenmesi üzerinde bir çok çalışma yapılmıştır, (Sims, 1954, Orowan, 1943, Hitchcock, 1935, Shohet ve Townsend, 1968, Schultz ve Smith, 1965, Ford ve Alexander, 1964). Bunlar haddeleme kuvveti, momenti, parça sıcaklığı, hadde sıçraması, haddeleme sırasında iş parçasının deformasyon direnci ve akma gerilmesi ile ilgili matematiksel modelleri kapsamaktadır. Bu modeller istenilen sonuçlara belirli bir hata payı ile yaklaşabilmektedir ve çoğu ampirik yapıdadır. Dolayısı ile bu modeller belli bir noktaya kadar güvenilirlerdir ve daha güvenilir yeni modellerin geliştirilmesi için sürekli yeni araştırmalar yapılmaktadır.

Bir kısım matematik modeller sıcak haddeleme prosesinde gerek verimin artırılması gerekse enerji sarfiyatının minimuma indirilmesi amacıyla endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin bugün Erdemir 2. sıcak haddehanesine General Electric firması tarafından kurulan otomasyon sisteminde haddeleme yükü ve momentinin hesaplanmasında kullanılan kuvvet ve moment modellerinde Sims'in formülleri ve bunların geliştirilmiş haliyle, Ford-Alexander modelleri kullanılmaktadır (Sezer, 1999). Haddeleme yükünün tespiti için Sims'in önerdiği matematiksel model bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır, (Fazan ve diğ., 1980, Ruddle ve diğ., 1983, Partington, 1980, Buckman, 1972, Özsoy ve diğ., 1985, Özsoy ve diğ., 1992, Gittens ve diğ., 1974, Tarokh ve Serebinski, 1970, Siciliano ve diğ. 1996). Bu amaçla ülkemizde yapılan çalışmalara ait aşağıdaki örnekler verilebilir. Erdemir 1. sıcak haddehanede haddeleme yükünün tespiti için kullanılan modellerden Geleji metodunun gerçeğe en yakın değeri verdiği Tozlu, (1992) ve Sarioğlu, (1994)

tarafından yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Yine Sezer, Erdemir 2. sıcak haddehanesi tersinir kaba haddeleme tezgahından elde ettiği verilerle, dinamik kuvvet ve hadde sıçraması tanılamak için ani darbe cevabı modelini uygulamıştır.

Bu çalışmada genel olarak bir haddeleme modeli oluşturmak amacıyla, Sims, Tarokh ve Seredynski ile Ford ve Alexander'ın önerdikleri matematiksel modeller incelenmiştir. Bu modellerden derlenen bir ampirik model geliştirilerek elde edilen sonuçlar dinamik modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra elde edilen dinamik model sonuçları kullanılarak, optimum haddeleme pasolarını elde etmek amacıyla bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu paragrafta ana teması kısaca izah edilen çalışmanın içerdiği bölümler aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

İkinci bölümde sıcak haddeleme prosesine genel bir bakış yapılmış, hadde yükü, momenti ve kütük sıcaklığı modellerine genel yaklaşım sağlamak amacıyla haddeleme yüküne etki eden faktörler ile yük ve moment hesaplanmasında kullanılan ampirik formüller ve sıcaklık modeli kısaca verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise deneysel modelleme yapabilmek için gerekli sistem tanılama yöntemi kısaca özetlenerek çalışmamıza bir giriş yapılmıştır.

Dördüncü bölümde ise haddeleme kuvveti, haddeleme momenti, hadde sıçramasının ve sıcaklığın önceden tahmin edilmesi amacıyla daha basit ve etkili bir yöntem olan deneysel modelleme yoluna gidilmiştir. Prosesin deneysel modellenmesi amacıyla sistem tanımlama üzerinde durulmuştur. Sistem tanılama için ardışık en küçük kareler prensibine dayanan modellerden basamak cevabı modeli kullanılmıştır. Ayrıca bu kısımda bir çok model incelenerek derlenen ampirik model de verilmiştir.

Beşinci bölümde ise gerçekleştirilen ampirik ve dinamik model simülasyon sonuçları verilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dinamik model için Matlab bilgisayar paket programının model kestirimci kontrol programında bulunan çok terimli en küçük kareler regresyonu algoritması ile sistem tanılama programı kullanılmıştır. Ampirik modelde kullanılan katlı lineer regresyon için ise yine Matlab paket programının sistem tanılama programı kullanılmıştır. Deneysel modelleme için gerekli olan veriler Erdemir 2. Sıcak haddehanedeki General tersinir kaba hadde tezgahından alınmıştır. Model geçerliliğinin araştırılması, oluşturulan modelin daha önce kullanılmamış verilerle test edilmesi yoluyla yapılmıştır.

Altıncı bölümde de ilk önce optimizasyon problemine genel bir bakış yapıp kullanılan optimizasyon modeli ve yöntemi verildikten sonra Matlab paket programının optimizasyon kısmı kullanılarak yapılan optimizasyon modeli ve sonuçları verilmiştir.

Yedinci bölümde ise çalışmanın sonuçları tartışılarak genel değerlendirme yapıp öneriler verilmiştir.



2. SICAK HADDELEME PROSESİ

2.1 Haddeleme Prosesine Genel Bakış

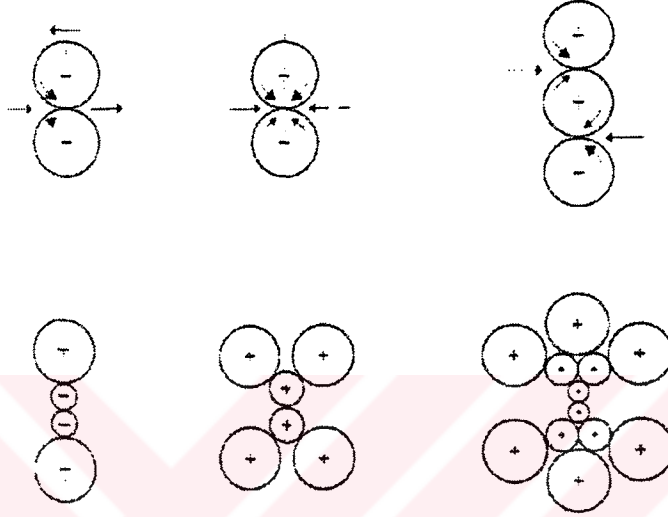
Metal işleme prosesi genel olarak birincil (primary) ve ikincil (secondary) olmak üzere ikiye ayrılabilir. Birincil işlemde yarı bitirilmiş profillerin elde edilmesini kapsayan konfigürasyonda, istenen boyut, şekil ve özelliklerde malzeme üretimi yapılır. Bunu takip eden ikincil işlemde ise ek şekil değişimi, kaynak, metal işleme, ısıl işlem, vs. yapılır. Bu işlem sonunda malzemenin son şekli verilmiş olur.

Sıcak veya soğuk haddeleme, çeşitli şekillerdeki metal profiller elde etmek amacıyla iş parçalarının iki silindir arasından geçirilmesi sonucu şekil değişimine tabi olmasıdır. Bu işlemi diğer sıcak ve soğuk şekil verme yöntemleri izleyebilir. Buradan da anlaşılabileceği üzere metal işlemede en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden olan sıcak ve soğuk haddelemeyi bir tür birincil işlem olarak kabul edebiliriz.

Soğuk haddelemede iş parçası, oda sıcaklığında işleme tabi tutulurken, sıcak haddeleme de ise haddeleme, kütüğün haddeleme sırasındaki soğuması da göz önüne alınarak, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta yapılır. Bu sıcaklığa sıcak haddeleme sıcaklığı da denilir ve bu sıcaklık değeri, çelikler için 1000-1300°C, alüminyum için 450-650°C civarında bir değerdir. Böylece yüksek sıcaklıklarda metal düşük bir akma gerilmesi gösterir ve şekil değiştirmeye karşı direnci azalır. Yüksek sıcaklıktaki iş parçası, sıcaklığa ve şekil değiştirme hızına bağlı olan şekil değiştirme yaşanmasına maruz kalmaz, fakat sürtünme katsayısı soğuk haddelemeye göre daha yüksek olur. Bunun getirdiği avantaj ise, yakalama açısı (bite angle) ve pasonun yüksek seçilebilmesidir. Sıcak haddelemede yapışma sürtünmesi (sticking friction) olurken soğuk haddelemede kayma sürtünmesi (sliding friction) olur (Mielnik, 1999, Roberts, 1983, Roberts, 1988, Yılmaz, 1988, İnceyan, 1989).

2.1.1 Hadde silindirleri

Haddeleme işlemi hadde silindirleri (merdaneler) vasıtasıyla gerçekleştirilir. Silindirler düz veya üzeri desenli olabilir ve gövde “housing” içine monte edilirler. Silindir ve gövde sisteminin tümü tezgah “stand” olarak adlandırılır. Şekil 2.1’de görülebileceği gibi, stand çok çeşitli şekillerde olabilir.

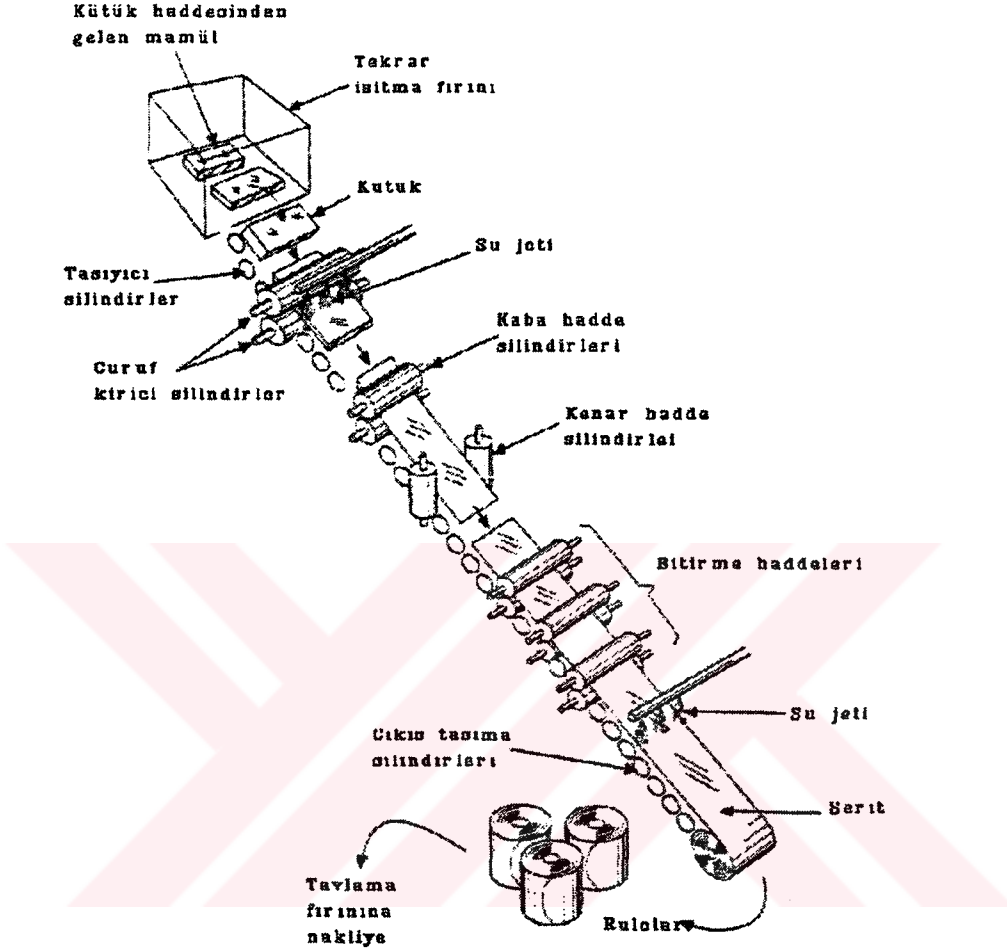


Şekil 2.1. Hadde silindirleri yerleşim şekilleri

Bu konfigürasyonlarda parçayla temas halinde olan silindire iş silindiri “work mill” adı verilir, diğerleri ise destek silindirleri “back up mill” olarak adlandırılır ve destek amaçlı olarak kullanılırlar. Küçük çaplı silindir kullanılması daha avantajlıdır, bu nedenle gerekli rijitlik destek silindirleri tarafından sağlanır. Bazı konfigürasyonlarda parçaların kenarlarında haddelenmesi için silindirler vardır, bunlar “üniversal silindirler” olarak adlandırılırlar. Bunlara ek olarak parçanın kenarlarının kesilmesine yarayan “bıçaklı kenarlayıcılar” bulunabilir, böylece parça daha üniform özellik gösterir (Mielnik, 1999 Yılmaz,1988, İnceyan, 1989).

Haddeleme işlemi ve sırası, haddelenecek malzemenin miktarına ve mekanik özelliklerine, ezme oranına, profile, ekipmana, ve üründe aranan mekanik özelliklere bağlıdır. Haddeleme sırasında silindirler birbirinin ters yönünde dönerler, iş parçası silindirler arasına bir taraftan girer ve kalınlığı azalmış şekilde diğer taraftan çıkar. Her bir geçiş, “pass” olarak adlandırılır. Bazı durumlarda her bir geçişten sonra hadde silindirleri ters yönde çevrilir böylece parça çıktığı taraftan silindirler arasına

tekrar girer. Bu konfigürasyona tersinir haddeleme “reversing mill” adı verilir. Şekil 2.2’de tipik bir hadde ünitesinden genel bir görünüş verilmiştir.



Şekil 2.2. Yaygın bir haddeleme ünitesinin genel görünüşü.

Bir de sürekli haddeleme (continuous rolling) işlemi vardır. Bu işlemde eriyik metal fırından düzgün şekilde akıtılır, sıvı metal sistemde kendisi için tasarlanan yolu izlerken belli bir profilde katlaşır, katlaşan kısımda sıcaklık belli bir miktar azaldığında malzeme silindirler arasına girer, ve haddeleme gerçekleşir. Bu işlemde süreklilik olduğu için kesintisiz çok uzun profiller yüksek bir verimlilikte elde edilebilir.

2.1.2 Haddelemede kullanılan kavramlar

Erimiş çeliğin dökümü ile elde edilen şekle “ingot” adı verilir. İngotun ön haddede ilk defa ezilmesi ile elde edilen şekle ise iri kütük “bloom” denilir ve boyutu 15x15 cm. den fazladır. Haddelemeye devam edilmesi ile elde edilen malzeme sırasıyla,

aşağıda verildiği gibi isimlendirilirler. Kütük “billet”, 4 x 4 ve 15x15 cm. arasındır. Bu terim demir dışı metaller içinde kullanılabildiği gibi ekstrüzyon işlemindedir kullanılır. Yassı kütük “slab” ise yarı bitirilmiş bir profildir ve minimum kalınlığı 4 cm. ve genişliği kalınlığının en az iki katından büyüktür. Buraya kadar yapılan işleme kaba haddemeleme denir. Levha “plate” ise bitirilmiş bir üründür ve kalınlığı 6 mm. veya daha fazla genişliği en az 15 cm. dir. Saç “sheet” ise kalınlığı 6 mm. den az genişliği 30 cm. den fazladır. Şeritin “strip” genişliği ise 30 cm. den azdır.

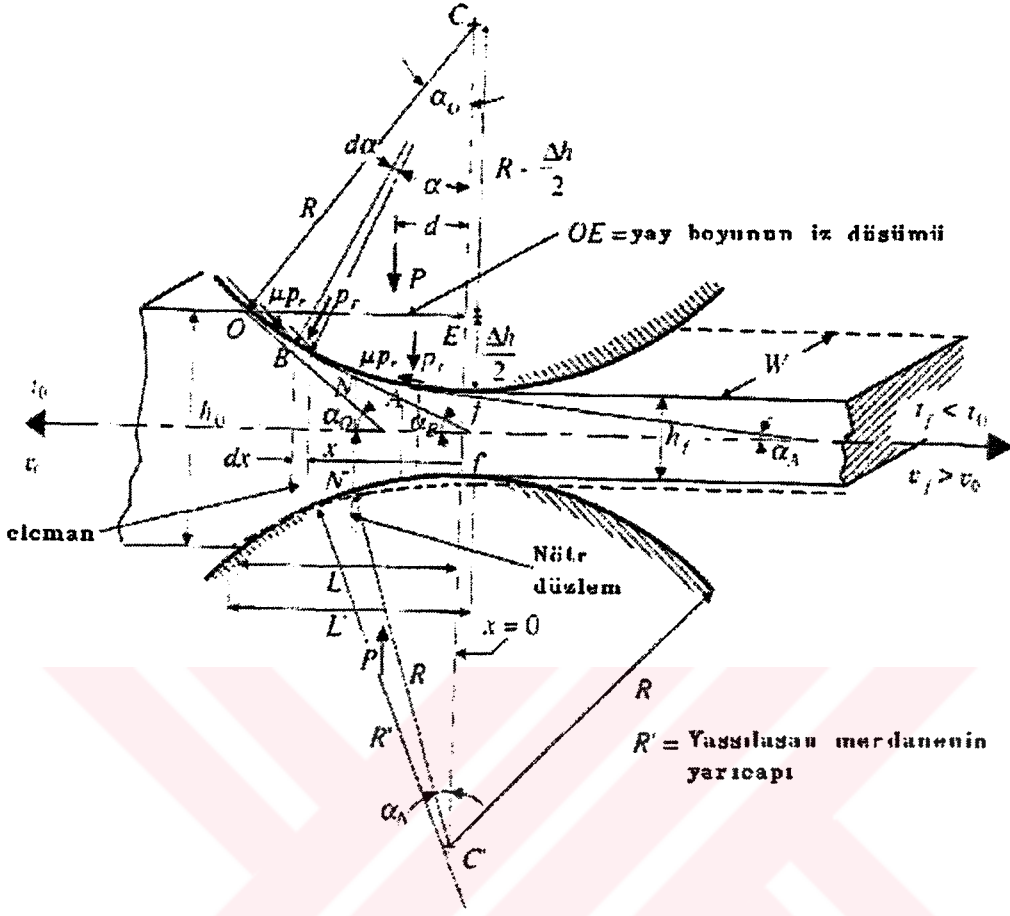
2.2 Haddelerde Ayırma Kuvveti ve Momentinin Analitik Olarak Hesaplanması:

Haddemele işleminin mekaniğinin incelenmesi ve prosesin modellenmesi konusunda şimdiye kadar bir çok araştırma yapılmıştır. Geliştirilen bu modeller, gerek haddemele işleminin daha iyi anlaşılması gerekse daha kaliteli mamullerin elde edilmesi ve verimliliğin artırılması konusunda çok faydalı olmuşlardır. Bu modellerin amacı ve faydaları şu şekilde özetlenebilir:

- Haddemele işlemini geliştirmek,
- Silindirlerin ve diğer ekipmanların tasarlanmasına yardımcı olmak,
- Operatöre yol göstermek,
- Bilgisayar kontrolüne temel oluşturmaktır.

Haddemele prosesi; silindirleri, yağlayıcıları ve iş parçasını kapsayan bir işlemdir. Herbirinin haddemele sırasında davranışı çok karmaşık olmasına rağmen, ilgili modeller geliştirilirken bazı ihmaller ve basitleştirmeler yapılır. Geliştirilen bu modellerde hadde parametreleri arasında uygun matematiksel bağıntılar kurulur ve gerçeği en iyi temsil edebilecek parametreler arası ilişki geliştirilmeye çalışılır. Haddemele işleminin şematik gösterimi ve modellemede kullanılan geometrik parametreler Şekil 2.3'te verilmektedir.

Litaratürde bir çok araştırmacı tarafından geliştirilen ampirik ve yarı ampirik hadde modellerine rastlamak mümkündür, bu araştırmacılara örnek verecek olursak, Sims, Cook-McCrum, Siebel, von Karman, Ekelund, Hitchcock, Orowan, Bland, Geleji, Smith, Ford, Jorther ve Cross'u sıralayabiliriz. Burada verilmesinde fayda görülen bazı modeller takip eden bölümlerde verilmektedir (Mielnik, 1999, Yılmaz, 1988, İnceyan, 1989, Lenard ve Pietrzyk, 1989, Vlademir, 1989).



Şekil 2.3. Haddeme prosesinin mekanik modellenmesinde kullanılan parametreler ve bunların şematik gösterimi

Şekilde gösterilen büyüklükleri aşağıdaki gibi açıklayabiliriz

- R' : Yassılaştırmış merdane yarı çapı
- R : Hadde merdane yarıçapı
- h_0 : İlk parça kalınlığı
- h_f : Son parça kalınlığı
- t_f : Ön çekme
- t_0 : Arka çekme
- v_0, v_f : Parça giriş ve çıkış hızları
- P : Hadde yükü
- N : Nötr nokta
- W : Parça genişliği
- μ : Sürtünme katsayısı
- d : Hadde yükünün asıl etki ettiği mesafe

2.2.1 Sims metodu:

Sims metodunda, deformasyon yayı boyunca yapışma sürtünmesi (sticking friction) olduğu varsayılarak hadde yükünün (P) hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir (Sims 1954):

$$P = K L W_s = k_a Q_p L W_s \quad (2.1)$$

Burada;

K : Deformasyon direnci,

L : Temas yayı boyu,

W_s : Haddelenen kütüğün genişliği,

Q_p : Geometrik faktör,

k_a : Ortalama dinamik akma gerilmesi,

h_1, h_2 : Sırasıyla haddeye giriş ve çıkış kalınlıkları olmak üzere,

geometrik faktör:

$$Q_p = \left[\frac{\pi}{2a} \tan^{-1} \left[\left(a \frac{\pi}{4} \right) - \frac{R'}{h_2} \left(L \frac{h_N}{h_2} - \frac{1}{2} L \frac{a^2}{r} \right) \right] \right] \text{ şeklinde verilir.} \quad (2.2)$$

Burada,

$r = (h_1 - h_2)/h_1$, ezme oranı

$a = r(1-r)$ ve $x_n = (h_2 L)/(h_1 + h_2)$ olmak üzere

$h_n = h_2 + (x_n^2 / rR)$ nötr noktadaki kalınlıktır.

2.2.2 Cook-McCrum metodu:

Cook-McCrum metodu, Sims eşitliğinin bir çeşit modifikasyonudur ve değişik malzeme boyutlarını ve akma gerilmelerini kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. BISRA olarakta bilinen bu eşitlikler;

$$P = R' W_s C_p I_p L \quad (2.3)$$

Şeklindedir. Burada;

R' : Yassılaştırmış merdane yarıçapı,

C_p : Cook-McCrum geometrik faktörü ve

I_p : Ezme ve deformasyon hızı faktörüdür ve aşağıda verilmektedir.

$$C_p = Q_p (h_2 / r) (r / (1+r)) \quad (2.4)$$

$$I_p = k_a (1 + r/1-r) \quad (2.5)$$

2.2.3 Ford-Alexander metodu:

Ford-Alexander metodu, deformasyon bölgesindeki dinamik akmayı ve aritmetik ortalama en-boy oranını (Z_a) esas almaktadır. Bu metotta aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$P = 0.25 W_s L (\pi + a Z_a) k_a \quad (2.6)$$

Burada; $a = r (1-r)$ ve

$Z_a = L/h_a$ deformasyon bölgesindeki aritmetik ortalama en/boy oranı

$h_a = (h_1 + h_2) / 2$ ortalama kalınlık

2.2.4 Dentone-Crane metodu:

Dentone-Crane metodu, Ford-Alexander metoduna benzemekle birlikte, katsayılarının farklı olmasının yanında, geometrik şekil oranı (Z_g) kullanılmıştır ve bu en-boy oranının geometrik ortalaması olarak tanımlanmıştır.

$$P = W_s L (0,655 + 0,265 Z_g) k_a \quad (2.7)$$

$Z_g = L/h_g$ deformasyon bölgesinde geometrik ortalama en/boy oranı

$h_g = \sqrt{(h_1 h_2)}$ geometrik ortalama kalınlık

2.2.5 Green-Wollace metodu:

Green – Wollace hadde yükü için aşağıdaki ampirik bağıntıyı önermektedir.

$$P = 0,5 W_s L (Z_a + 1 / Z_a) k_a \quad (2.8)$$

2.2.6 Ekelund metodu:

Ekelund ezme bölgesinde giriş düzleminden nötr noktaya kadar kayma sürtünmesi, nötr nokta ile çıkış düzlemi arasında ise yapışma sürtünmesi olduğunu kabul etmektedir ve yük hesaplanmasında kimyasal bileşime ve sıcaklığa bağlı akma gerilmesinin kullanılmasını önermektedir. Bu eşitlik aşağıda görülmektedir.

$$P = (1 + (0.8 \mu L - 0.6 h)/h_a) (Y + (n_p v h/R')/h_a) W_s L \quad (2.9)$$

Burada;

v : Merdane yüzey hızı

R : Merdane yarı çapı

Y : Sıcaklığa ve kimyasal bileşene bağlı akma gerilmesi (kg/mm^2)

μ : Merdane cinsine bağlı sürtünme katsayısı

T : Haddemeleme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) olmak üzere,

$n_p = 0.01 (14 - 0.01 T)$ Plastisite katsayısı şeklindedir.

Bu formülasyon ancak minimum 800°C sıcaklıkta maksimum 7 m/s hadde hızında ve malzemede maksimum %1 manganez içeren durumlarda daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

2.2.7 Geleji metodu:

Geleji hadde yükünün hesaplanması için aşağıdaki bağıntıyı önermektedir.

$$P = 1.15 Y (1 + C_g \mu Z_a v^{1/4}) W_s L \quad (2.10)$$

Burada,

C_g = Geleji geometrik faktörü,

$$Y = 0.015 (1400 - T)$$

Geometrik faktör C_g ; Z_a ya bağlı olarak aşağıdaki gibi değişmektedir;

$$\text{a) } 0.25 \leq Z_a \leq 1 \quad \Rightarrow \quad C_g = 17 Z_a^2 - 29.85 Z_a + 18.3$$

$$\text{b) } 1 \leq Z_a \leq 3 \quad \Rightarrow \quad C_g = 0.8 Z_a^2 - 4.9 Z_a + 9.6$$

$$\text{c) } 3 \leq Z_a \leq 12 \quad \Rightarrow \quad C_g = 0.013 Z_a^2 - 0.29 Z_a + 2.85$$

Bu formüller, haddelenen malzemenin sıcaklığının $800-1300^{\circ}\text{C}$ arasında olması ve malzemenin mukavemetinin 60 Kg/mm^2 den küçük olması durumlarında doğru sonuç vermektedir.

2.2.8 Tselikov metodu:

Hadde yükünün hesaplanması amacıyla, Tselikov tarafından geliştirilen bir çok bağıntı vardır. Bunlardan önemli bir tanesi,

$$P = [(1.15 k_a (2-r) / r D)] [(1/(1-r))^{D/2}] L W_s \quad (2.11)$$

(D = 2 olarak kabul edilir)

Bu metotta, “T” haddeleme sıcaklığı (°C) ve “r” ezme oranı olmak üzere haddelenen malzemenin 800-1200 °C arasındaki akma gerilmesi:

$$k_a = 7.5 + 0.0157 (900-T) \quad (2.12)$$

ve burada $r = (h_1 - h_2) / h_1$ olmaktadır.

2.2.9 Ride metodu:

Ride 1958 yılında 4000 kütük üzerinde yaptığı araştırmalar sonunda denklem 2.1'deki (K) deformasyon direncinin parabolik bir fonksiyon olduğunu kabul ederek deformasyon direnci için,

$$K = (a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 r + a_4 r^2 + a_5 h_1 + a_6 h_1^2 + a_7 T + a_8 T^2) / L \quad (2.13)$$

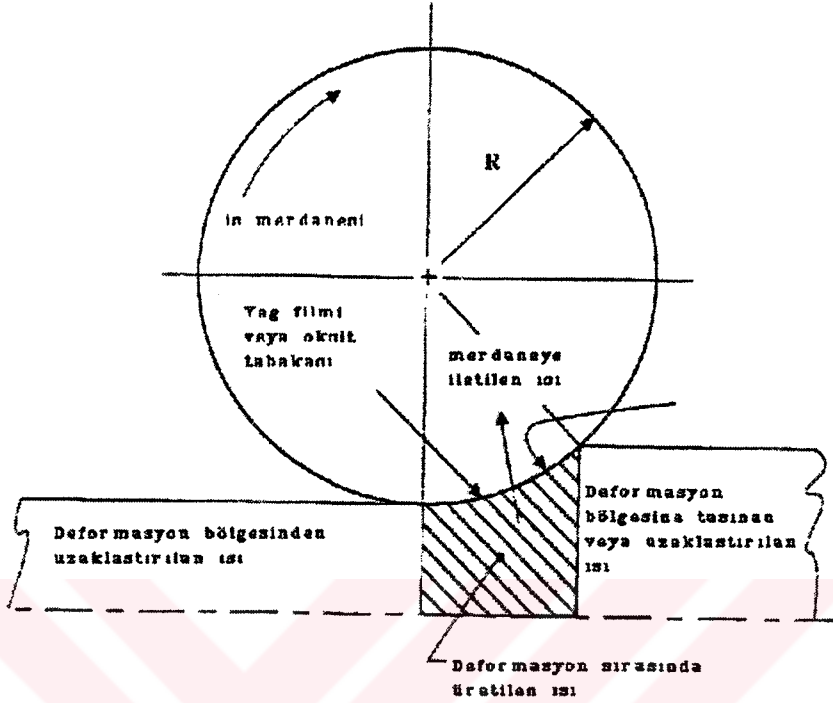
ifadesini önermiştir. Bu denklemdeki $a_0 \dots a_8$ katsayıları korelasyon katsayıları olup en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmaktadır.

2.3 Haddelemede Sıcaklığın Önemi Ve Hesaplanması:

Daha öncede değinildiği üzere sıcak haddelemede, akma dayanımının düşürülmesi ve haddeleme sırasında şekil değiştirmenin kolaylaştırılması amacıyla haddeleme öncesi iş parçaları belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Buna karşın, gerek haddeleme kuvvetlerinin ve gerekse döndürme momentlerinin hassas bir şekilde hesaplanabilmesi için haddeleme sıcaklığında dikkatli bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Haddeleme sıcaklığı, genel olarak, parçanın fırından çıkış sıcaklığı, daha sonra haddeye nakli sırasında meydana gelebilecek ısı kayıplarını, tufal oluşumunu, haddeleme sırasında merdaneler ve iş parçası arasında oluşacak sürtünmeyi, haddelenen parçanın şekil değiştirmesi sırasında üreteceği iç ısınmayı, Şekil 2.4 ve

gerek iş parçasına temas eden diğer elemanların gerekse ortamın termal özelliklerini de içine alan kompleks bir etkileşim zincirine bağlı olacaktır.



Şekil 2.4. Haddeledede şekil değiştirme işi sırasında enerji dengesi

Literatürde haddeleme sırasında parça sıcaklığının hesaplanmasında kullanılan bir çok modellere rastlamak mümkündür. Bu modellerde, genellikle diğer faktörler ihmal edilip sadece ışıma ile olan ısı kaybı dikkate alınmıştır; bunlara örnek olarak Stefan-Boltzmann denklemi, Geleji ve Tjagunov formülleri verilebilir (İnceyan, 1989).

2.3.1 Stefan-Boltzman formülü:

Haddelemeye başlama ve bitiş noktaları arasındaki sıcaklık farkı, Stefan-Boltzmann kanunundan yararlanılarak şu şekilde bulunmuştur;

$$\Delta T = \frac{4 \cdot t_i \cdot A}{0.166 \cdot m} \left[\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - 74 \right] (^{\circ}\text{C}) \quad (2.14)$$

t_i : Işıma süresi (sn)

A : İş parçasında ışıma olan yüzey alanı (m^2)

T_1 : Malzemenin başlangıç yüzey sıcaklığı, (°C)

m : İş parçasının kütlesi (kg)

2.3.2 Geleji metodu:

Bu metotta parçanın ilk ve son sıcaklığı arasında şu ilişki vardır;

$$T_n = T_0 \cdot e^{-\alpha R_s} \quad (2.15)$$

$$\alpha = 0.036 \left(\frac{T_g - 800}{500} \right) + 0.02 \quad (2.16)$$

$$R_s = \frac{1}{mc} \left[A \cdot t + 0.5 \cdot (S_1 - S_2) \frac{z^2}{z_g} \right] \quad (2.17)$$

$$T_g = \frac{2I_d \cdot W_s \cdot (T_y - T_w) \cdot z_g \cdot \phi}{m \cdot c} \quad (2.18)$$

$$\Delta T = \frac{L}{A \cdot m \cdot c} = \frac{A \cdot k_{wm} \cdot v}{m \cdot c} \cdot T_{Umg} \text{ (°C)} \quad (2.19)$$

T_0 : İlk sıcaklık (°C)

T_n : Son sıcaklık (°C)

R_s : Katsayı

S_1 : Haddeleme öncesi ısıtma alanı

S_2 : Haddeleme sonrası ısıtma alanı

t : Haddeleme süresi (30 saniyelik zaman dilimi alındı)

z_g : Toplam haddeleme zamanı

T_y : Malzeme yüzey sıcaklığı (°C)

T_w : Merdane yüzey sıcaklığı (°C)

ϕ : Isı geçiş katsayısı

k_{wm} : Ortalama akma dayanımı

2.3.3 Tjagunow metodu:

Tjagunow, bir çok malzemenin haddeleme verilerini inceleyerek, kendi adıyla anılan ve levha haddeleme esnasında her bir pasoda oluşan sıcaklıkları hesaplayabilecek

formülleri geliştirebilmiştir. Tjagunow, haddeleme sırasında sıcaklık düşmesini şu formülle hesaplamaktadır;

$$\Delta T = (T/100)^2 / 4.5 \cdot t/h = K.t/h \quad (2.20)$$

Burada;

T : İlgili paso sırasında malzemenin mutlak sıcaklığı (°K)

t : İlgili pasoda haddeleme süresi

h : İlgili pasoda saç kalınlığı



3. SİSTEM TANILAMA VE MODELLEME

Tanılama, dinamik bir sistemin modelinin giriş-çıkış ölçümleriyle bulunması anlamına gelir. Eğer bir model; bir çok çıkış (veya ölçüm) ile bir çok giriş (veya kumanda) arasındaki değişimi inceliyorsa; çok değişkenli (multivariable) model olarak adlandırılır. Sistem tanılama süreci, modellerin kurulması ve deney verilerinden bilinmeyen sistem parametrelerinin tahmin edilmesini içerir. Modelin bilinmesi, yüksek performanslı kontrol sistemlerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi için önemlidir.

Tanılamada kullanılan matematiksel modeller lineer ve lineer olmayan olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Lineer olmayan modellerin karmaşıklığının yanı sıra çok iyi tesis edilmiş genel teorilerinin olmaması, bu modellerin belirli bir çalışma bölgesi civarında lineerleştirilmiş olarak kullanılmasına yol açmaktadır. Uygun bir giriş sinyalinin seçimi, tanılama problemlerinin en önemli adımlarından biridir. Bu seçimdeki temel ölçüt, giriş-çıkış verilerinin farklı modeller arasında ayırım yapmaya yetecek ölçüde bilgi içerip içermemesidir. Giriş-çıkış verileriyle sistem tanılama yapılırken frekans cevabı, basamak cevabı, vs. teknikleri kullanan parametrik olmayan modeller, transfer fonksiyonu, diferansiyel veya fark denklemleri vs. tekniklerle parametrik modeller kullanılabilir.

Günümüzde bilgisayarların da gelişimi ile, parametrik modellerin diğer yaklaşımlara karşı üstünlükleri de ortaya çıkmıştır. Ardışık formülasyonu olan yüksek performanslı tanılama algoritmaları, gerçek zamanlı tanılama problemlerini bile gerçekleştirebilecek seviyeye ulaşmıştır.

3.1 Sistem Tanılama Teorisi

Sistem tanılamasının (System Identification) kökleri standart istatistiksel tekniklere dayanmaktadır. Hatta temel iş programlarının bir çoğu en küçük kareler ve maksimum olasılık metotları gibi çok iyi bilinen istatistiksel tekniklerle direk olarak ilgilidir.

Kontrol biliminde, 1960'lı yılların başında modern kontrol teorilerinin oluşmasından hemen sonra dinamik sistemlerde bu basit tekniklerin uygulanmaları ve geliştirilmesiyle aktif döneme girilmiştir. Maksimum olasılık kestirimi değişik denklemlere (ARMAX modeli) Åström ve Bohlin tarafından uygulanmıştır. Bundan sonra kestirim teknikleri geniş bir alana yayılmıştır. Bugün, bu alan daha iyi anlaşılmış ve yayınlanmış teknikler ile iyice olgunlaşarak endüstriyel kullanımı ve tekniklerin uygulanmaları standart hale gelmiştir (Ljung, 1995).

Kontrol sistemlerinde sistemin bir matematik modelinin olması yani sistemin tanılanmış olması gerekmektedir. Bir sistemin çözümünde ilk adım onun modelini çıkarmaktır. Modeller sistem davranışının matematiksel ifadeleridir.

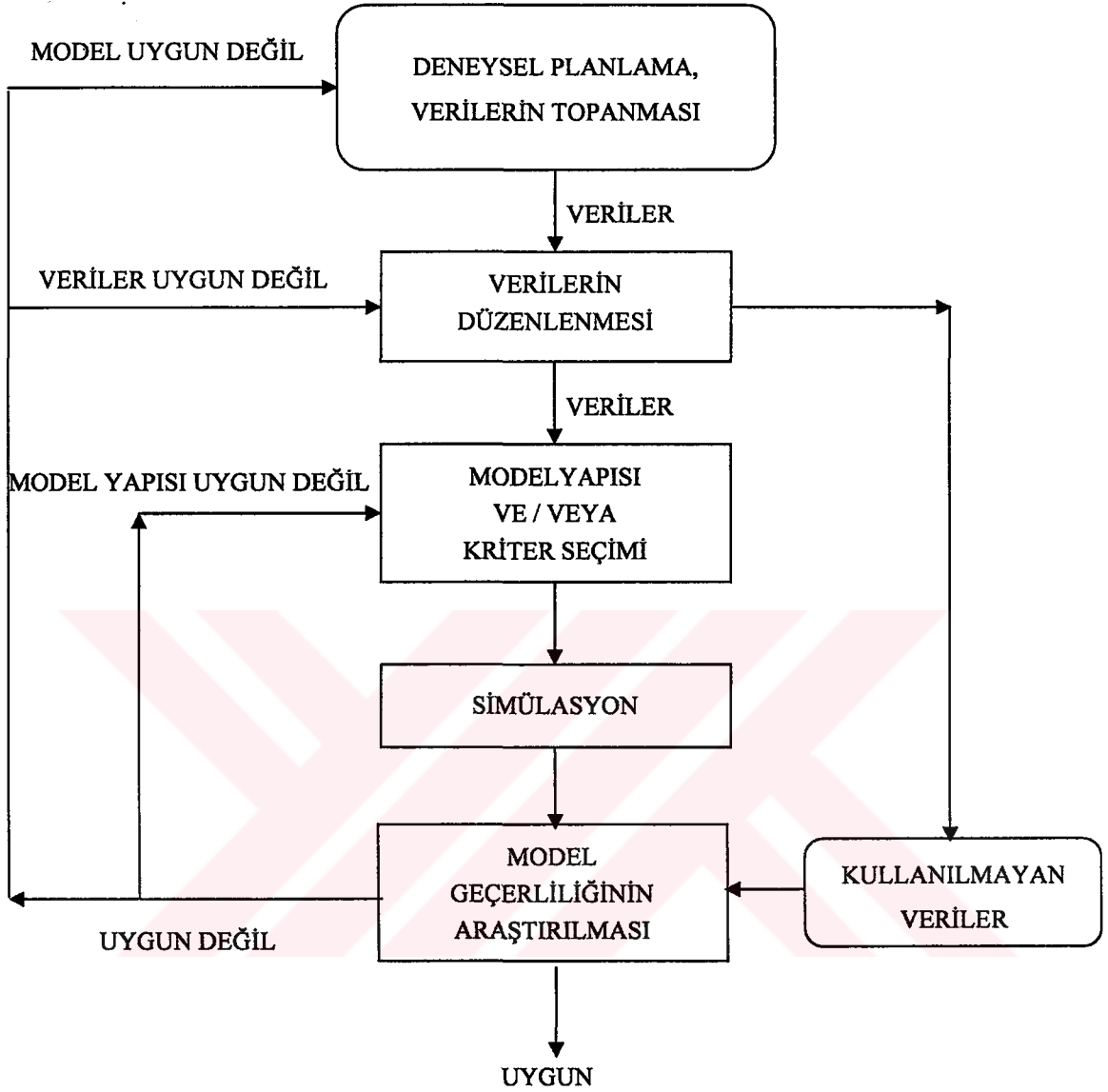
3.2 Sistem Tanılama İlkeleri

Sistem tanılama proses modellemeye deneysel bir yaklaşımdır. Sistem tanılama şu dört aşamadan oluşur (Åström ve Wittenmark, 1984).

- Deneysel planlama,
- Model yapısının seçimi,
- Parametre tahmini,
- Model geçerliliğinin araştırılması.

Tam bir tanılama işleminin yukarıda belirtilen dört aşamayı da içermesi zorunlu olup; her aşamada kullanılacak yöntemler istenen model tipine (parametrik, parametrik olmayan, sürekli zamanlı, ayrık zamanlı vs.) bağlıdır.

Pratikte sistem tanılamanın prosedürü yenilemedir. Bir proses incelenirken ön bilgilerin yetersiz kaldığı durumlarda, sistem dinamiğinin ve bozucuların kaba bir tahminini yapabilmek için geçici rejim veya frekans cevabı analiziyle başlamak daha uygundur. Elde edilecek sonuçlar ileride yapılacak deneyleri planlamak için kullanılabilir. Elde edilen veriler, modeldeki bilinmeyen parametreleri tahmin etmekte kullanılır. Alınacak sonuçlara göre model yapısı geliştirilebilir veya yeniden yapılandırılabilir (Åström ve Wittenmark, 1984). Sistem tanılama sürecini pratik olarak Şekil 3.1'de verilen şema ile özetleyebiliriz.



Şekil 3.1. Sistem tanılama akış diyagramı

3.2.1 Deneysel planlama

Endüstriyel proseslerde deney yapılması sistem itibariyle genellikle zor ve pahalıya mal olan bir işlemdir. Bu yüzden özel giriş sinyalleri gerektirmeyen tanılama metodu tercih edilir. Birçok klasik metot giriş sinyali olarak sinüs darbe veya basamak formundaki giriş sinyalleri kullanmaktadır. Giriş sinyalinden istenen, prosesin bütün modellerini uyarmasıdır. Burada giriş sinyalinin frekansı da önemlidir. Bu nedenle zengin bir frekans içeriğine sahip, genliği sabit değişik genişlikte darbe formundaki PRBS sinyali kullanılması iyi sonuçlar almak için tavsiye edilebilir.

Sistem tanılamayı prosesin kapalı çevrim kontrolünde elde edilen veriler üzerine kurmak da mümkün olmaktadır. Örneğin adaptif kontroller çoğunlukla kapalı çevrim tanılama üzerine kurulmuşlardır. Bir prostesten veriler elde edilirken ana zorluk modelin gereksinim duyduğu bütün parametreleri belirlemenin güçlüğünden kaynaklanmaktadır. Bu parametreler açık çevrim deneylerden sağlansa bile sistem tanılanamamaktadır. (Åström ve Wittenmark, 1984).

3.2.2 Model yapıları

Model yapısı proses ve bozucuların ön bilgilerinden tayin edilir. Bazı durumlarda ön bilgi sadece prosesin belirli bir işlem aralığında doğrusal olarak tanımlanabilmesidir. Bu durumda doğrusal sistemlerin genel özelliklerini kullanmak doğaldır. Buna tipik bir örnek;

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_ny(t-n) = b_1u(t-1) + \dots + b_mu(t-m) \quad (3.1)$$

Denklemden y çıkış u ise giriş olarak tanımlanmıştır.

3.2.2.1 Kriterler

Bir tanılama problemini formüle ederken modelin deneysel verileri ne kadar karşıladığının ölçümü için bir kriter verilir. Kriter bir ön gerçek olarak ifade edilebilir. İstatistiksel varsayımlar yapılarak kriteri olasılık argümanlarından da elde etmek mümkündür. Ayırık zaman sistemlerinde kriter genellikle aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \quad (3.2)$$

Burada ε giriş hatası, çıkış hatası veya bir genelleştirilmiş hatadır. Bir tanılama probleminin ilk formülasyonu, çözümü ve uygulaması Ceres Astroid'inin yörüngesini belirleyebilmek için Gauss tarafından verilmiştir. Gauss tanılama problemini bir optimizasyon problemi olarak formüle etti ve en küçük kareler prensibini önerdi. Bu metod hataların karelerinin toplamının minimum hale getirmek üzerine kurulmuştur. Sonraları en küçük kareler kriteri yaygın olarak kullanılmaya başlandı.

En küçük kareler metodu oldukça basit ve anlaşılması kolaydır. Bazı durumlarda yanlış ortalamalı değerler verse de değişik eklemelerin kullanılmasıyla bu sorunun üstesinden gelinebilmektedir. En küçük kareler metodu bilinmeyen parametrelerin doğrusal olduğu model yapısında kullanılabilir (Åström ve Wittenmark, 1984).

3.2.3 Parametre tahmin metotları

Parametre tahmin probleminin çözümü için;

- Prosese ait giriş ve çıkış verileri
- Modelin türü
- Bir kriter

gerekmektedir. Parametre tahmini bir optimizasyon problemi olarak formüle edilebilir. Verilen kritere göre sistem verilerine mümkün olduğunca uyan model en iyi modeldir.

Problemin tahmin sonuçları problemin nasıl formüle edildiği ile ilgilidir. Deney şartlarını, model tiplerini ve kriterleri birleştirmek için birçok olasılık vardır. Aynı zamanda hesaplamaları düzenlemek için birçok değişik yol vardır. Bu ikisini göz önüne aldığımızda çok fazla sayıda değişik tanılama metotları bulunabilir. Genel olarak model tiplerini ikiye ayırmak mümkündür.

- On-line modeller
- Off-line modeller

On-line metotlar, sistemden ölçümlerin alınmasıyla tahminleri aynı zamanlı olarak verir. Sistem tanılama için adaptif kontroller kullanılıyorsa ve proses zamanla değişkenlik gösteriyorsa on-line metot tek alternatiftir.

Birçok durumda off-line metotlar daha güvenilir ve doğru tahminler vermektedir (Åström ve Wittenmark, 1984). Bu çalışmada model geliştirme işlemi off-line olarak yapılmaktadır.

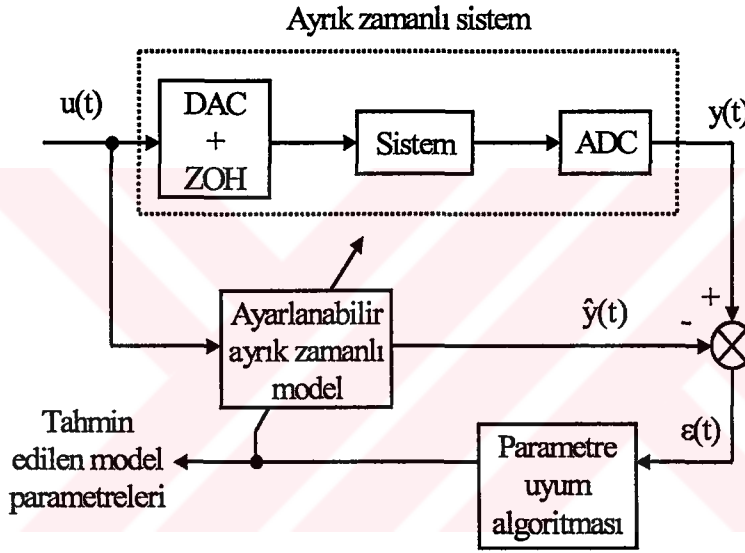
3.2.4 Model geçerliliği tespiti

Sistemden ölçülen veriler yardımıyla bir model oluşturulduğunda, modelin varsa yetersiz kaldığı yerleri görmek için modeli kontrol etmek yani geçerliliğini araştırmak gereklidir. Modelin geçerliliğini araştırmak için bulunan modelin

basamak, darbe veya sinüs girişe cevabı incelenerek model hataları ve tahmin hataları gibi faktörlerin belirlenmesi gerekir. Modelde değişimlere duyarlı veri bölümlerinin ve bunun nedenlerinin araştırılmasına olanak sağlar. Bu sayede model geliştirilebilir veya değişiklik yapılabilir (Åström ve Wittenmark, 1984).

3.3 Sistem Tanılama

Örneklenmiş (ayrık zamanlı) modeller için parametre tanılama blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmektedir (Zorlu, 2002).



Şekil 3.2 Parametre tanılama blok diyagramı

Burada ayrık zamanlı, parametreleri ayarlanabilir bir modelin bilgisayarla nasıl gerçekleştirildiği gösterilmektedir. “t” anındaki sistem çıkışı $y(t)$ ile, kestirilen model çıkışı $\hat{y}(t)$ arasındaki hata ($\varepsilon(t)$ kestirim hatası olarak da bilinir), her örnekleme anında parametre uyum (adaptation) algoritması tarafından bu hatayı minimize etmek için model parametrelerini düzeltmek üzere kullanılır. Parametre uyum algoritmaları ardışık bir yapıya haiz olup, yeni bir değeri tahmin etmek için eski tahmin edilen değerlere, son ölçümlere bağlı olan bir düzeltme terimi ekler. Bütün parametre uyum algoritmaları aşağıda verilen ardışık yapıyı kullanırlar.

$$\begin{bmatrix} \text{Yeni} \\ \text{parametrelerin} \\ \text{tahmini} \\ \text{(vektör)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Tahmin edilen} \\ \text{eski parametreler} \\ \text{(vektör)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Uyum} \\ \text{kazancı} \\ \text{(matris)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Ölçüm} \\ \text{fonksiyonu} \\ \text{(vektör)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Kestirim} \\ \text{hatası} \\ \text{fonksiyonu} \\ \text{(skalar)} \end{bmatrix}$$

Ardışık tanılamanın ardışık olmayana göre üstünlükleri şöyledir:

- Sistem evrimleştikçe yeni model parametrelerinin tanılanmasına imkan verir.
- Tüm giriş-çıkış verilerinin bir anda kullanılması yerine sadece az sayıda giriş-çıkış verilerinin işlenmesine ihtiyaç duyduğu için önemli ölçüde bilgisayar belleğinden kazanım sağlar.
- Oldukça az bellek ve bilgisayar kapasitesine ihtiyaç gösterir.
- Mikro-bilgisayarlarda kullanılması kolaydır.
- Gerçek zamanlı tanılama uygulamalarında kullanılabilirler.
- Zamanla değişen sistem parametrelerini izlemek kolaydır.

Ardışık tanılamaya yönelik parametre uyum algoritmalarından Ardışık En Küçük Kareler Yöntemi (RLS) veya Genişletilmiş En Küçük Kareler Yöntemi (ELS), parametre kestirimi amacıyla kullanılabilir.

3.4 Parametre Uyum Algoritmaları

Farklı ardışık tanılama yöntemleri temelde aynı parametre uyum algoritması (PAA) yapısını kullanırlar. Birbirinden farklılıkları aşağıda belirtilen sebeplerden dolayıdır:

- Kestirimci (predictor) yapısı
- Gözlem vektörü $\mathbf{X}(t)$ bileşenlerinin yapısı
- Ayarlanabilir parametre vektörü $\boldsymbol{\Theta}(t)$ ve gözlem vektörü $\mathbf{X}(t)$ 'nin boyutları
- Kestirim hatalarının tipi.

Tanılama yöntemleri, kestirim hatasının beyazlatılmasına (whitening) (içinde ardışık en küçük kareler yöntemi (RLS), genişletilmiş en küçük kareler yöntemi (ELS), ardışık en çok olasılık yöntemi (RML), vs.) ve gözlem vektörüyle kestirim hatasının ilişkisizliğine (decorrelation) dayanan (aletsel değişken yöntemi (instrumental variable) ve çıkış hatası yöntemi (output error), vs.) iki ana gruba ayrılabilir (Landau, 1988). Bu çalışmada sadece RLS yöntemine değinilmekle yetinilecektir.

3.4.1 En küçük kareler yöntemi

En küçük kareler yöntemine göre sistemde ölçülen ve modelden hesaplanan değerlerin farklarının kareleri toplamı, minimum olmalıdır. Genel olarak en küçük kareler probleminde hesaplanan değer $\hat{y}(t)$, Gauss terminolojisinde model tarafından aşağıdaki şekilde verilir;

$$\hat{y}(t) = \Theta_1 \varphi_1(x) + \Theta_2 \varphi_2(x) + \dots + \Theta_n \varphi_n(x) \quad (3.3)$$

Burada $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ bilinen fonksiyonlar ve $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ bilinmeyen parametrelerdir. Gözlemlenen çiftler $\{(x_i, y_i); i=1,2,3,\dots,N\}$ sistemde ölçülen değerlerden elde edilmektedir. Buradaki problem, model tarafından hesaplanan $\hat{y}(t)$ çıkış değerlerini, deneysel x_i değerleri için ölçülen çıkış değerleri olan y_i değerlerine mümkün mertebe yakınlaştırmaktır. Ölçümlerin tümünün aynı hassasiyet ile alındığı varsayarsak, en küçük kareler prensibine göre parametreler kayıp fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde seçilebilir.

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \quad (3.4)$$

Değerinin minimum olması gerekmektedir. Burada;

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \Theta_1 \varphi_1(x_i) - \Theta_2 \varphi_2(x_i) - \dots - \Theta_n \varphi_n(x_i) \quad (3.5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

hesaplamayı kolaylaştırmak için, aşağıdaki vektörler sembollerle gösterilmişlerdir.

$$\Phi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \dots \varphi_n]^T \quad (3.6)$$

$$\Theta = [\Theta_1 \ \Theta_2 \ \Theta_3 \dots \Theta_n]^T \quad (3.7)$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \dots y_N]^T \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3 \dots \varepsilon_N]^T \quad (3.9)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \phi^T(x_1) \\ \vdots \\ \vdots \\ \phi^T(x_N) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

En küçük kareler problemi şimdi kısa bir şekilde formüle edilebilir. Kayıp fonksiyonu $J(\Theta)$ ifadesi aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$J(\Theta) = 1/2 \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = \|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2 \quad (3.11)$$

Burada,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad \text{ve} \quad (3.12)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \Theta \quad (3.13)$$

denklem 3.13, denklem 3.12’de yerine konursa

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y} - \mathbf{X} \Theta \quad (3.14)$$

bulunur.

Θ parametreleri $\|\boldsymbol{\varepsilon}\|^2$ yi minimal yapılarak elde edilebiliriz. Denklem 3.14’deki $\boldsymbol{\varepsilon}$, denklem 3.11’de yerine konursa kayıp fonksiyonu aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\begin{aligned} 2J(\Theta) &= \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{y} - \mathbf{X} \Theta]^T [\mathbf{y} - \mathbf{X} \Theta] \\ &= \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X} \Theta - \Theta^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \Theta^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \Theta \end{aligned} \quad (3.15)$$

$J(\Theta)$ ’nın Θ ’te göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse kayıp fonksiyonu minimum olur.

$$dJ(\Theta)/d(\Theta) = 0 \quad (3.16)$$

$$0 = -\mathbf{y}^T \mathbf{X} - \Theta^T \mathbf{y} + \mathbf{X}^T \mathbf{X} \Theta + \mathbf{X}^T \Theta^T \mathbf{X}$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \Theta + \mathbf{X}^T \Theta^T \mathbf{X} = \mathbf{y}^T \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{y}$$

$$2 \mathbf{X}^T \mathbf{X} \Theta = 2 \mathbf{X}^T \mathbf{y}$$

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \Theta = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (3.17)$$

elde edilir. Eğer $X^T X$ matrisi tekil değil ise minimum tektir ve aşağıdaki gibi verilir (Wittenmark ve Åström, 1984).

$$\Theta = \Theta^* = [X^T X]^{-1} X^T y \tag{3.18}$$

3.4.2. En küçük kareler yöntemi ile parametre kestirimi

En küçük kareler yöntemini, bir sistemin parametrelerinin hesaplanmasında kullanabiliriz. Bir sisteme giriş ve çıkış verilerini genellikle k örnekleme anında u ve y ile gösteririz. “ k ” örnekleme anında verilen sistem;

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) \tag{3.19}$$

sistemin giriş ve çıkışları:

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots \ u_N] \tag{3.20}$$

$$y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_N] \tag{3.21}$$

şeklindedir. Bilinmeyen parametreler sütun vektörü olarak gösterilir.

$$\Theta = [\ a_1 \ \dots \ a_n \ b_1 \ \dots \ b_n]^T \tag{3.22}$$

Çok kullanışlı bir yol olarak bir sonraki değeri geçmiş gözlemlerden belirleyebiliriz.

$$\varphi(k+1) = [-y(k) - \dots - y(k-n+1) \ u(k) + \dots + u(k-n+1)]^T \tag{3.23}$$

ve kriterimiz

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \quad \text{değerinin minimumudur.}$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - y^*(k) = y(k) - \varphi^T(k) \Theta \quad \text{ve}$$

$$X = \begin{bmatrix} \varphi(n+1) \\ \vdots \\ \vdots \\ \varphi(N) \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

olacaktır. Bu durumda,

$$\Theta^* = [X^T X]^{-1} X^T y \text{ ve}$$

$$y = \begin{bmatrix} y(n+1) \\ y(n+2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} \text{ olacaktır.}$$

3.5 Basamak Giriş Cevabı Modeli

Çok girişli ve tek çıkışlı (MISO) sistemler için Matlab paket programının sistem tanılama programı kullanılarak, sistemden alınan çıkış değerleri $y(k)$ ve giriş değerleri,

$$u_1(k), u_2(k), u_3(k), \dots, u_{nu}(k),$$

olmak üzere giriş ve çıkış vektörleri

$$y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} \text{ ve } u = \begin{bmatrix} u_1(1) & u_2(1) & \dots & u_{nu}(1) \\ u_1(2) & u_2(2) & \dots & u_{nu}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1(N) & u_2(N) & \dots & u_{nu}(N) \end{bmatrix} \text{ şeklinde yazılır.}$$

Bu ifadelerdeki N değeri sistem mertebesini veren sayı olup göz önüne alınacak geçmiş bilgisinin sayısını, n_u değeri de tanılamada kullanılan giriş sayısını belirlemektedir (Ljung, 2001). Bu durumda çok girişli ve tek çıkışlı (MISO) bir sistem için basamak cevabı katsayıları:

$$s = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{2,1} & \dots & s_{nu,1} \\ s_{1,2} & s_{2,2} & \dots & s_{nu,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{1,N} & s_{2,N} & \dots & s_{nu,N} \end{bmatrix} \text{ şeklinde belirlenir.}$$

Basamak cevabı katsayılarını (s) belirleyebilmek için tek giriş-tek çıkışlı (SISO) bir model aşağıdaki formda yazılabilir:

$$y(k) = \sum_{j=1}^n g_j \Delta u(k-j) \quad (3.25)$$

burada

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3.26)$$

$$g_j = s_j - s_{j-1} \quad (3.27)$$

Buradaki g_i 'ler kestirilen model katsayılarıdır. Bu model dizayncılara bütün giriş değerleri (u) ve çıkış değerleri (y) bilgilerinin çoğunlukla istenen sapma formunda verilmesine imkan sağlar.

Genellikle parametrelerin belirlenebilmesi için bütün değişkenlerin aynı tür ve büyüklükte ölçeklendirilmesi tavsiye edilir. Daha sonra veriler yeniden düzenlenerek aşağıdaki formda yeniden elde edilir.

$$y = X \Theta \quad (3.28)$$

Burada y bütün çıkış değerlerini ve X bütün giriş değerlerini içermektedir. Θ bir vektördür ve kestirilen parametreleri içermektedir.

Öncelikle sisteme giriş verilerini içeren X giriş vektörü belirlendikten sonra Θ parametre vektörü Matlab gibi modern sayısal yazılımlar sayesinde kolayca hesaplanabilmektedir. Bu Θ parametreler vektörünü belirlemek için Matlab'de model kestirimci denetim kutusundaki çokterimli en küçük kareler regresyonunu [Multivariable Least Squares Regression (MLR)] kullanıldı. Kısmi en küçük kareler regresyonu (Partial Least Squares, PLS) yöntemi de kullanılabilir. (Morari vd., 1994, Mathworks, 1994).

4. SICAK HADDELEME PROSESİNİN MODELLENMESİ

Bir prosesin matematiksel modeli, sonuçların önceden tahmini için gerekli bir araçtır. Matematiksel haddeleme modelleri haddeleme kuvveti, haddeleme momenti, kütük sıcaklığı ve hadde sıçramasının önceden tahmini ile ilgilidir. Haddeleme prosesi matematiksel modellerinin deneysel doğrulanması için çeşitli araştırmacılar tarafından oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda güvenli kesin bir matematiksel model elde edilememiştir ve bunların çoğu ampirik yapıdadır. Üstelik modellerin katsayıları belirli bir malzeme için, belirli bir hadde tezgahı veya deneyin yapıldığı zaman için belirlenmiştir. Bu modellerdeki katsayılar haddeleme prosesi için ancak adaptif kontrolörlerin kullanılmasıyla geçerlilik kazanırlar (Özsoy, 1993, Özsoy ve diğ. 2001). Şu an Erdemir 2. Sıcak haddehanesi otomasyon sisteminde sistem parametrelerinin adaptif olarak güncelleştirilmesi için, ikinci bölümde incelenen Sims' ve Alexander-Ford'un matematiksel kuvvet modelleri ya olduğu gibi veya değiştirilmiş halleri ile kullanılmaktadır. Oluşturulmuş olan bu ampirik modeller oldukça karmaşıktır ve iyi bir maliyet optimizasyonunu zorlaştırmaktadırlar (Sezer, 1999).

Sıcak haddeleme modelinin oluşturulmasında diğer bir araç da deneysel modellemedir. Deneysel modellemede amaç kullanılan haddeleme prosesinin tanımlanmasını sağlamaktır. Sistem tanımlama proses modellemeye deneysel bir yaklaşımdır. Bunu yaparken modele etki eden ana parametrelerin sisteme giriş ve çıkış verilerinin kaydedilmesi, düzenlenmesi gerekmektedir. Bu durumda ölçümlerden alınan verilerden sistemin bilinmeyen parametrelerin belirlenebilmesi için bir metoda ihtiyacımız vardır. Genel olarak problem, bir optimizasyon problemi olduğundan temel en küçük kareler yöntemi genel bir yaklaşım olacaktır. Sistemin bilinmeyen parametrelerini belirleyebilmek için çok terimli en küçük kareler regresyonu metodu seçilmiştir .

Deneysel modellemenin ana prensibi sistemin geçmiş verilerini kullanarak bir sonraki adımda sistemin çıkış değerinin ne olacağını tahmin etmektir. Model

parametrelerinin belirlenebilmesi için kullanılacak verilerin sistemle alakalı tüm özellikleri sergilemesi gerekmektedir. (Ljung, 1995).

Bu çalışmada off-line olarak deneysel model oluşturulmuştur. Bu yüzden model parametreleri güncelleştirilememektedir. Modelin on-line çalışması durumunda model parametrelerinin güncelleştirilmesi için ardışık en küçük kareler yöntemi algoritması (Recursive least squares estimation algorithm (RLS)) kullanılabilir. Bu durumda zaman içinde giriş ve çıkış değerleri değiştikçe model de değişecek ve sürekli olarak kendini yenileyecektir (Özsoy, 1993)

Bu bölümde ilk önce kısaca kullanılan verilerin elde edildiği malzeme ve sistem ele alınacak daha sonra modelleme çalışmaları izah edilecektir.

4.1 Sıcak Haddeleme Prosesi

Bu çalışmada kullanılan veriler Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası ikinci sıcak haddehanedeki kaba haddeleme kısmında kütük işleyen tersinir haddeden alınmıştır.

4.1.1 Kullanılan hadde tezgahı ve özellikleri

Kaba hadde 4 merdaneli olup tersinir haddeleme yapmaktadır. Malzemeler kaba haddeye gelmeden önce bir ön haddeden geçirilerek yaklaşık %17'lik bir ezme verilmektedir. Malzemeye kaba haddede 5 veya 7 paso verilmek suretiyle, malzeme istenilen kalınlığa getirilmektedir.

Paso sayısı malzemenin özelliğine, istenilen kalınlığa ve haddeleme şartlarına göre artırılabilir yada azaltılabilir. Genelde şerit ön malzemesi elde edebilmek için toplam verilen paso 6 ile 8 arasında değişmektedir. Malzemelere kaba hadde girişinde basınçlı su püskürtmek suretiyle scal temizleme işlemi işlem şartlarına göre yapılmaktadır.

Hadde tezgahı Wean United firması tarafından kurulmuş, elektrik aksamı General Electric firması tarafından yapılmıştır. Kullanım özellikleri aşağıda verildiği gibidir:

Maksimum yük	: 3000 ton
Maksimum çalışma yükü	: 2500 ton
Merdanenin malzemesi	:Yüksek kromlu dökme demir veya dökme çelik
İş merdanesi yarıçapı	: 950-1050 mm
Destek merdanesi yarıçapı	: 123.19 –135.89mm

Maksimum haddeme hızı : ± 100 rpm

Su püskürtme basıncı : 180 bar

1995 yılında I.H.I ve General Electric tarafında genel bir modernizasyondan geçirilmiştir. General Electric'in kurduğu 4 seviyeli otomasyon sistemiyle çalışılmaktadır.

4.1.2 Verilerin toplanması

Modellerimizde kullanılan veriler her bir geçiş için, ikinci sıcak haddehanedeki General Electric'in kurduğu kapalı çevrim, adaptif otomasyon sisteminde kaydedilen verilerden elde edilmiştir. Ayrıca mevcut otomasyon sisteminin önerdiği proses modellerinin hesapladığı verilerden de karşılaştırma amacıyla yararlanılabilmektedir.

4.1.3 Kullanılan malzemeler

Haddeme prosesinin malzeme bazında tanımlanması için aşağıda kimyasal kompozisyonları verilen 4009 ve 5009 Erdemir kalitesi sıcak mamul çelikler kullanılmıştır. Boru ve profil imalatında kullanılan bu çeliklerin yaygın kullanımı nedeniyle daha zengin bir verinin işlenmesi mümkün olmuştur.

Tablo 4.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri

STANDART			KİMYASAL BİLEŞİM (%)				
Erdemir kalite no:	Standart Karşılığı		C	Mn	P	S	Si
4009	ASTM A53-96 Gr.A	Standart	0.25	0.95	0.050	0.045	0.35
		Erdemir	0.12	0.25	0.025	0.020	0.05
5009	ASTM A53-96 GrA	Erdemir	0,04	0,25	0.025	0.020	0.040

4.2 Sıcak Haddeme Modeli

Bu bölümde ilk önce modeli geliştirilen büyüklükler, daha sonra kullanılan ampirik model ve en son olarak basamak cevabı modeli verilecektir.

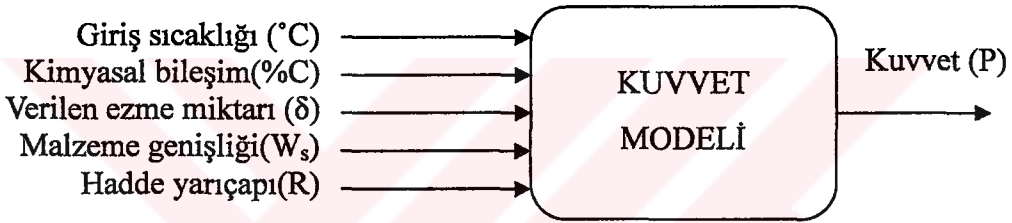
4.2.1 Modeli geliştirilen büyüklükler

Bu alt bölümde model geliştirmeye konu olan haddeme kuvveti, haddeme momenti, kütük sıcaklığı ve hadde sıçraması için yapılan çalışmalar verilmektedir.

4.2.1.1 Haddelenme kuvveti modeli

Haddelenme kuvveti haddelenme sırasında çoğu ölçülemeyen birçok faktöre bağılıdır. Bu faktörler çalışmamızın ikinci bölümünde incelenmiştir. Haddelenme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan teorik kuvvet modelleri incelendiğinde, haddelenme kuvvetine etki eden ana parametrelerin malzemenin haddeye giriş ve çıkış kalınlığı yani malzemeye verilen ezme miktarına, malzemenin genişliğine, kimyasal kompozisyonuna, sıcaklığına ve hadde çapına bağılı olduğu tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak sistem tanılama çalışmasında kuvvet modeli 5 girişli bir çıkışlı olarak geliştirildi. Kuvvet modelinin blok diyagramı Şekil 4.1’de verilmektedir.

$$P_i = \text{fonksiyon}(\text{sıcaklık, ezme oranı, genişlik, hadde çapı, kimyasal bileşim})$$

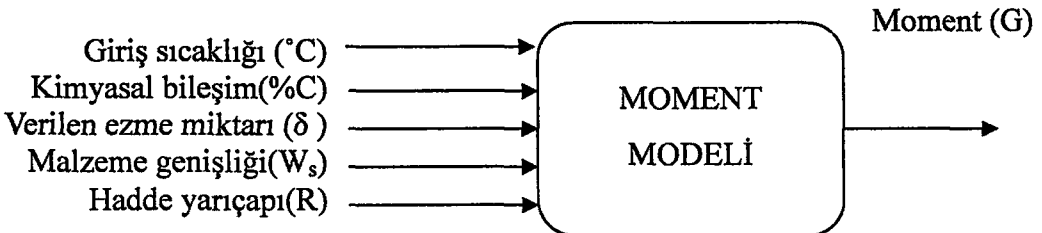


Şekil 4.1. Haddelenme kuvveti modelinin blok diyagramı

4.2.1.2 Haddelenme momenti modeli

Haddelenme momentinin bulunmasında da, momentin kuvvet ile ilişkisi göz önüne alınarak, kuvvet modelinde kullanılan giriş büyüklükleri için model geliştirilmiştir. Haddelenme momenti modelinin blok diyagramı Şekil 4.2’de verilmektedir.

$$G_i = \text{fonksiyon}(\text{sıcaklık, ezme oranı, genişlik, hadde çapı, kimyasal bileşim})$$

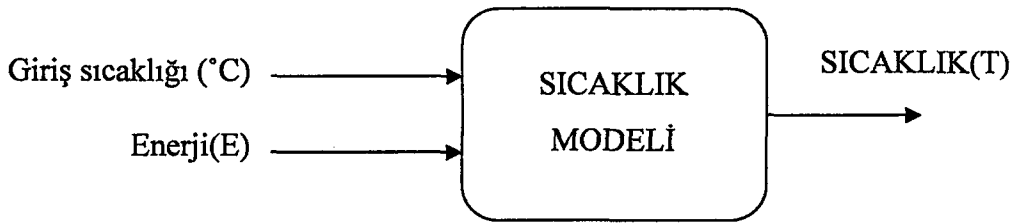


Şekil 4.2. Haddelenme momenti modelinin blok diyagramı

4.2.1.3 Kütük sıcaklığı modeli

Haddelenen malzemenin sıcaklık değişimini veren ifadeler incelendiğinde sıcaklık değişimine etki eden en önemli bileşenlerin malzemenin sıcaklığı ve malzemeyi ezmek için harcanan enerji olduğu görülür. Kütük sıcaklığı modelinin blok diyagramı Şekil 4.3’de verilmektedir.

$$T_{i+1} = \text{fonksiyon}(\text{giriş sıcaklığı, enerji})$$



Şekil 4.3. Kütük sıcaklığı modelinin blok diyagramı

4.2.1.4 Hadde sıçraması modeli

Metaller herhangi bir yüke maruz kaldıkları zaman şekil değişikliğine (deformasyon, sünme, akma) uğrarlar. Bu şekil değişikliği düşük yüklerde elastik (eski duruma dönen), yüksek yüklerde plastiktir (eski durumuna dönmeyen). Malzemede kalıcı şekil değişikliği yapmak için plastik akmanın gerçekleşmesine yetecek kadar yük uygulanması gerekmektedir. Haddeleme sırasında malzeme elastik+plastik, hadde ekipmanları da elastik şekil değişikliğine uğramaktadır. Hadde ekipmanlarında meydana gelen bu elastik şekil değişikliğine hadde sıçraması denmektedir. (Taşkın, 1991).

Sıcak haddeleme işi darbeli çalışan bir prosestir. Malzemeyi istenilen kalınlığa getirebilmek için vermemiz gereken hadde açıklığında hadde sıçramasını göz önüne almak zorundayız. Bunu formüle edersek;

$$h_{i+1} = s_i + d_i \quad (4.1)$$

Burada,

h_{i+1} : i pasosundaki malzeme çıkış kalınlığı.

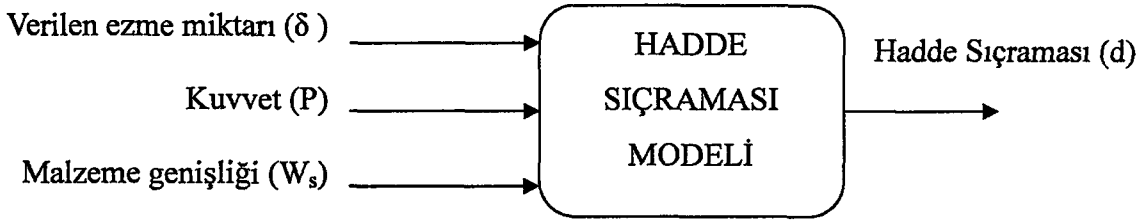
s_i : Hadde merdanesi vida seti ayarı (strok-hadde merdaneleri açıklığı).

d_i : Hadde sıçraması

Her paso sonunda malzemeyi istediğimiz kalınlığa getirebilmek için verilecek vida seti ayarını (strok) dolayısıyla hadde sıçramasını bulmamız gerekiyor.

Buradan yola çıkarak modelimizin girişleri malzemeye verilen ezme miktarı, kütüğün genişliği ve kuvvettir. Modelimizin çıkışı ise hadde sıçramasıdır. Bu modele ait blok diyagramı Şekil 4.4'te verilmektedir.

$d_i = \text{fonksiyon}(\text{verilen ezme miktarı, malzeme genişliği, kuvvet})$



Şekil 4.4. Hadde sıçraması modelinin blok diyagramı

4.3 Sıcak Haddelemenin Ampirik Modeli

Bu kısımda çalışmalarımızda kullandığımız teorik ifadelerden elde edilen ampirik ve yarı ampirik ifadeler açıklanacaktır.

4.3.1 Sıcak haddelemede kuvvet ve momentin ampirik modeli

Bu bölümde, ikinci bölümde bahsedilen ampirik modellerden derlenen ve çeşitli araştırmacılar tarafından daha iyi sonuçlar verdiği saptanan ampirik modeller verilecektir. Haddeleme prosesini tanımlayan, hadde yükü ve momenti için, sistem denklemleri ayırık zamanlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir. Bu hesaplama da Sims formülleri kullanılmaktadır (Özsoy ve diğ. 1985, Öznergiz ve diğ. 2002).

i. geçiş için hadde kuvveti (ton) ifadesi:

$$P_i = k_{pi} \sqrt{(R' \delta_i)} Q_{pi} \left(\frac{R'}{h_{i+1}}, r_i \right) \quad (4.2)$$

i. geçiş için hadde momenti (kkgm) ifadesi:

$$G_i = 2R'Rk_{gi}Q_{gi}\left(\frac{R'}{h_{i+1}}, r_i\right), \quad (4.3)$$

burada R hadde çapı (mm), R' deforme olmuş hadde çapı (mm), h_i ve h_{i+1} haddelenmiş kütüğün giriş ve çıkış kalınlıkları (mm), $\delta_i = h - h_{i+1}$ ezme miktarı (paso) (mm), k_{pi} ve k_{gi} sırasıyla kuvvet ve moment için uzama akma gerilmesinin ortalama değerleri (kg/mm^2) ve Q_{pi} ve Q_{gi} de geometrik fonksiyonlardır (R' , H ve h_i değerlerine bağlı). Kuvvet ve moment ifadelerindeki geometrik olmayan değişkenler sadece malzemenin deformasyon direnci ve dolayısıyla ortalama akma gerilmeleri k_{pi} ve k_{gi} dir.

Ortalama akma gerilmeleri, kütüğün haddeye giriş ve haddeden çıkış kalınlıkları, sıcaklığı ve ortalama deformasyon hızının fonksiyonu olarak verilmektedir (Partington, 1980, Gittens ve diğ., 1974, Tarokh ve Seredynski, 1970). Ortalama akma gerilmeleri katsayıları, yukarıdaki denklemlerden 4.2 ve 4.3 hadde yükü ve momentini hesaplayabilmek amacıyla haddelme sisteminden elde edilen deneysel verileri kullanarak ortalama akma gerilmelerinin katlı lineer regrasyonu ile elde edilmektedir

Bu durumda, Tarokh and Seredynski tarafından verilen kuvvet ve moment için ortalama akma gerilmeleri ifadeleri aşağıda verilmektedir:

$$k_{pi} = b_1 + b_2 \frac{1}{T_i^2} + b_3 \sqrt{r_i} + b_4 \frac{\sqrt{r_i}}{T_i} + b_5 \sqrt{r_i} \log_e(\lambda_i) \quad (4.4)$$

$$k_{gi} = b_6 + b_7 \frac{1}{T_i^2} + b_8 \sqrt{r_i} + b_9 \frac{\sqrt{r_i}}{T_i} + b_{10} \sqrt{r_i} \log_e(\lambda_i) \quad (4.5)$$

burada i. geçiş için, giriş sıcaklığı, T_i ($^{\circ}\text{C}/1000$), ezme oranı, r_i ve ortalama deformasyon hızı λ_i dir. b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , b_6 , b_7 , b_8 , b_9 , b_{10} katsayıları, deneysel veriler kullanılarak, Sims tarafından kuvvet ve moment için verilen ifadelerden (denklem 4.2 ve 4.3) elde edilen k_{pi} ve k_{gi} sayısal değerlerinin katlı lineer regresyonu ile elde edilmektedir. Ortalama şekil değiştirme hızı için Sims tarafından önerilen ifadeler aşağıda verilmiştir.

$$\lambda_i = \frac{2\pi n_m}{60} \sqrt{\left(\frac{R'}{h_{i+1}}\right)} \sqrt{\left(\frac{1-r_i}{r_i}\right)} \log_e \left(\frac{1}{1-r_i}\right), \quad (4.6)$$

burada n_m haddenin devir sayısıdır (rpm) ve r_i ezme oranının ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$r_i = \frac{h_i - h_{i+1}}{h_i}. \quad (4.7)$$

Sims formüllerinde kullanılan basitleştirilmiş geometrik fonksiyon ifadeleri aşağıdadır (Özsoy ve diğ., 1994).

$$Q_{pi} = \frac{\pi}{4} + \frac{\sqrt{R(h_i - h_{i+1})}}{2(h_i + h_{i+1})}, \quad (4.8)$$

$$Q_{gi} = \frac{\alpha_i}{2} - \phi_i. \quad (4.9)$$

burada, sırasıyla giriş, nötr ve çıkış açılarının ($\alpha, \theta, 0^\circ$) ifadeleri

$$\alpha_i = \arccos \left(1 - \frac{h_i - h_{i+1}}{2R'} \right),$$

$$\theta_i = \tan \left[\frac{\pi}{8} \left(\frac{h_{i+1}}{R'} \right)^{1/2} \log_e (1 - r_i) + \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{r_i}{1 - r_i} \right) \right]^{1/2} \left(\frac{h_{i+1}}{R'} \right)^{1/2}$$

şeklinde verilmektedir. Sıcak haddeleme prosesinde yaklaşık olarak $R' = R$ şeklinde kabul etmek, sonuçta önemli bir hata vermemektedir.

4.3.2 Sıcaklık değişimini veren ampirik model

İki geçiş arasında kütüğün sıcaklığındaki değişimi bulmak için Schultz and Smith tarafından verilen, ısıma ile ısı geçişi prensibini esas alan ve deneysel sonuçlara dayanan ısı iletimi ve taşınımı yoluyla olan ısı geçişini de içeren efektif bir yayılım katsayısı kullanılarak bulunan yarı ampirik ifadeler kullanılmıştır (Schultz ve Smith, 1965). Haddeleme sırasında malzeme ezmek için harcanan enerjiden dolayı oluşan sıcaklık artışını da içeren bir terim ilave edilmiştir.

$$T_{i+1} = T_i - V_s \left[b_{11} - b_{12} \frac{T_i}{1000} h_{i+1} \right] \left(\frac{T_i}{1000} \right)^4 \frac{t_i}{h_{i+1}} + b_{13} E_i \quad (4.10)$$

burada T_i kütüğün haddeye giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), t_i haddelenin bir geçişi için gerekli süre (sn), E_i her bir geçiş için harcanan enerji ve b_{11} , b_{12} , b_{13} deney verilerinden katlı lineer regresyon ile hesaplanan katsayılarıdır.

Her bir geçiş için geçen süre, tersinir haddenin strok ayarı vs. sebeplerden gereken zaman gecikmesi, haddenin açısal hızı ve kütüğün boyutlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Lopresti ve Patton, 1967).

$$t_i = t_d + \left(\frac{V_s}{R \omega_m W_s} \right) \frac{1}{h_{i+1}} \quad (4.11)$$

burada açısal hız, $\omega_m = \frac{2\pi n_m}{60}$

ve t_d iki geçiş arasında hadde stroku ayarı ve geri besleme için geçen süre (sn), V_s kütük hacmi (mm^3), R hadde yarıçapı (mm), ω_m haddenin açısal hızı (rad sn^{-1}), ve W_s kütüğün genişliği (mm), n_m hadde devir sayısı (rpm) şeklindedir.

Her bir geçiş için gerekli enerji miktarı basit olarak aşağıda verilmiştir (Lopresti ve Patton, 1967).

$$E_i = 2a \omega_m G_i (t_i - t_d) \quad (4.12)$$

Bu ifadedeki 'a' sabit bir faktör olup hadde tezgahının elektrik sisteminin verimi ile birim dönüşümünden dolayı meydana gelen etkiyi içermektedir. Buradaki katsayı:

$$a = 0.5291 \cdot 10^{-5} (\text{kWcm h}^{-1} \text{W}^{-1} \text{cm sn}^{-1}) \text{ olarak alınmıştır.}$$

4.3.4 Hadde sıçramasının ampirik modeli

Hadde sıçraması (d_i), kütüğün haddeden çıkış kalınlığı (h_{i+1}) ile hadde silindirlerinin aralığının ayar değeri strok (s_i) arasındaki fark olarak verilir.

$$d_i = h_{i+1} - s_i \quad (4.13)$$

Haddeleme de kalınlık değerinin doğru tespit edilebilmesi için bu sapmanın bilinmesi gerekmektedir. Literatürde bu ifade, b_{14} , b_{15} , b_{16} regresyon sabitleri olmak

üzere, Ruddle tarafından aşağıdaki şekilde verilmektedir (Özsoy, vd. 1992):

$$d_i = b_{14} + b_{15} (P_i / W_{s,i}) + b_{16} P_i \quad (4.14)$$

burada $W_{s,i}$, kütüğün haddeye girişteki genişliğini vermektedir. Bu ifadede son terim küçük değerler verdiği için genellikle ihmal edilebilir.

4.4 Sıcak Haddelemenin Dinamik Modeli

Sıcak haddeleme prosesini dinamik modelini bulmak için Basamak Cevabı Modeli kullanıldı. MISO (çok girişli tek çıkışlı) basamak cevabı modeli aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$y(t) = \sum_{j=1}^n g_j \Delta u(t-j) \quad (4.15)$$

Bu ifadede kullanılan büyüklükler aşağıdaki gibi izah edilebilir.

n : model derecesi (simülasyon çalışmalarında 5 olarak alındı)

$\Delta u(t)$: giriş vektörü,

g_j : hesaplanan model sabitleri vektörüdür

Burada giriş vektörü

$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$ şeklinde hesaplanır.

Giriş vektörü; kuvvet ve moment modeli için paso, sıcaklık, genişlik, hadde çapı, karbon eşdeğeri bileşenlerini içeren 5×1 'lik bir vektör, sıcaklık modeli için giriş sıcaklığı ve enerji bileşenlerini içeren 2×1 'lik bir vektör, hadde sıçraması için, giriş sıcaklığı, kuvvet, malzeme genişliği bileşenlerini içeren 3×1 'lik vektördür.

$y(t + k/t)$: hesaplanan işlem çıktısı olmak üzere,

$$y(t + k/t) = \sum_{j=1}^n g_j \Delta u(t + k - j/t) \quad (4.16)$$

$y = \Theta X$

Θ : hesaplanan bütün parametreleri içeren parametre vektörü,

X : geçmiş ile ilgili bütün giriş bilgilerini içeren geçmiş vektörüdür.

Buradaki Θ parametre vektörü, Matlab’de model kestirimci denetim kutusundaki çokdeğişkenli en küçük kareler kestirimi yöntemi [Multivariable Least Squares Regression (MLR)] kullanılarak belirlenmiştir (Shahian ve Hassul, 1993, Mościński, ve Ogonowski, 1995).

4.5 Model Geçerliliğinin Araştırılması

Modelin geçerliliğini araştırmak bir modelin oluşturulmasında önemli bir süreçtir. Çalışmamızda model geçerliliği, daha önce kullanılmayan verilerin, modelleme aşamasında bulunan parametrelerden oluşturulan modelde test edilmesiyle hesaplanan değerler ile sistemden ölçülen değerleri karşılaştırmak yoluyla test edilmiştir.



5. HADDELEME PROSESİ TANILAMA SONUÇLARI

Haddeleme kuvveti, momenti, kütük sıcaklığı ve hadde sıçramasına ait önerdiğimiz modelleri gerçekleştirmek için yapılan programlar ve elde ettiğimiz tanılama sonuçları bu bölümde verilmiştir. Modelleme çalışmalarında programlama dili olarak MATLAB (Matrix Laboratory) paket programı kullanılmıştır. Matlab yüksek performanslı sayısal hesaplama, grafik oluşturma ve görüntüleme işlemleri için teknik hesaplama ortamları sunmaktadır (Yüksel, 1996, Uzunoğlu ve diğ. 2002).

Dinamik model için Matlab bilgisayar paket programının model kestirimci kontrol programında bulunan çok değişkenli en küçük kareler regresyonu algoritması ile sistem tanılama programı kullanılarak hazırlanan, Ek A.1 de verilen program kullanılmıştır. Ampirik model için de katlı lineer regresyonu algoritmasını kullanan, Matlab paket programının sistem tanılama programı kullanılarak Ek A.2 de verilen program kullanıldı. Ampirik model geçerliliğinin araştırılması için ise Ek A.2 deki programdan elde edilen katsayılar ve daha önce kullanılmamış veriler kullanılarak model test edilmiştir.

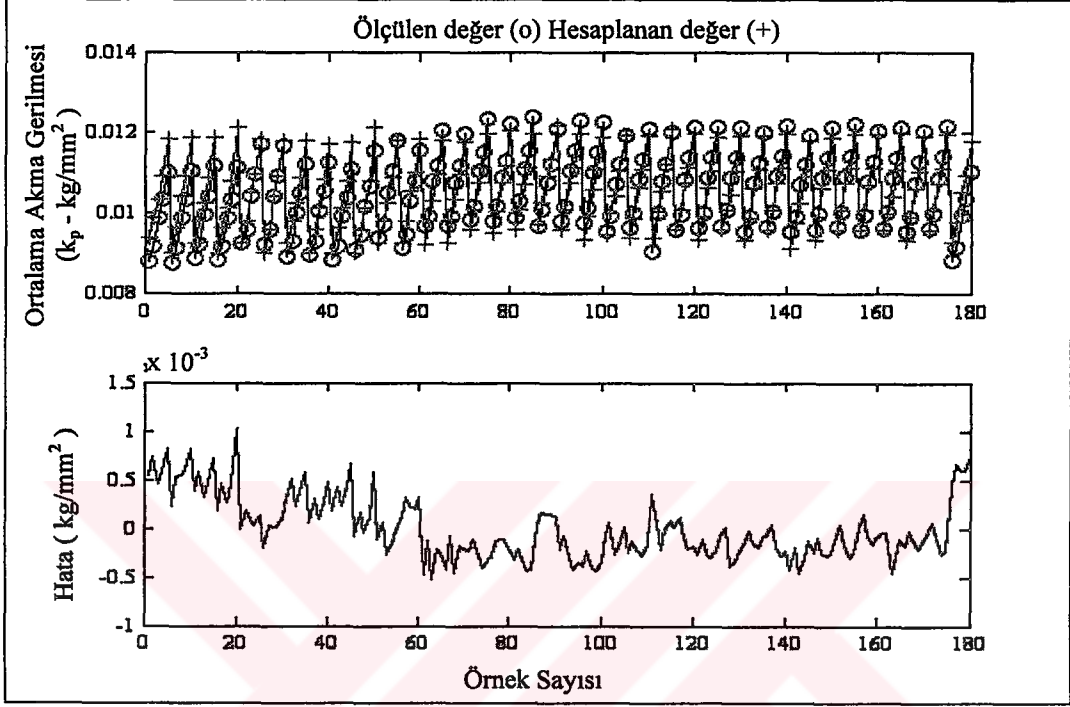
Deneysel modelleme için gerekli olan veriler Erdemir 2. Sıcak haddehanedeki tersinir kaba hadde tezgahından alınmıştır. Eldeki toplam 46 kütüğe ait 230 geçiş verisinden 36 kütüğe ait 180 tanesi gerek ampirik model gerekse dinamik model tarafından model oluşturmak amacıyla kullanılmış, kalan 10 kütüğe ait 50 veri ise model geçerliliğinin test edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

5.1 Model Tanılama Sonuçları

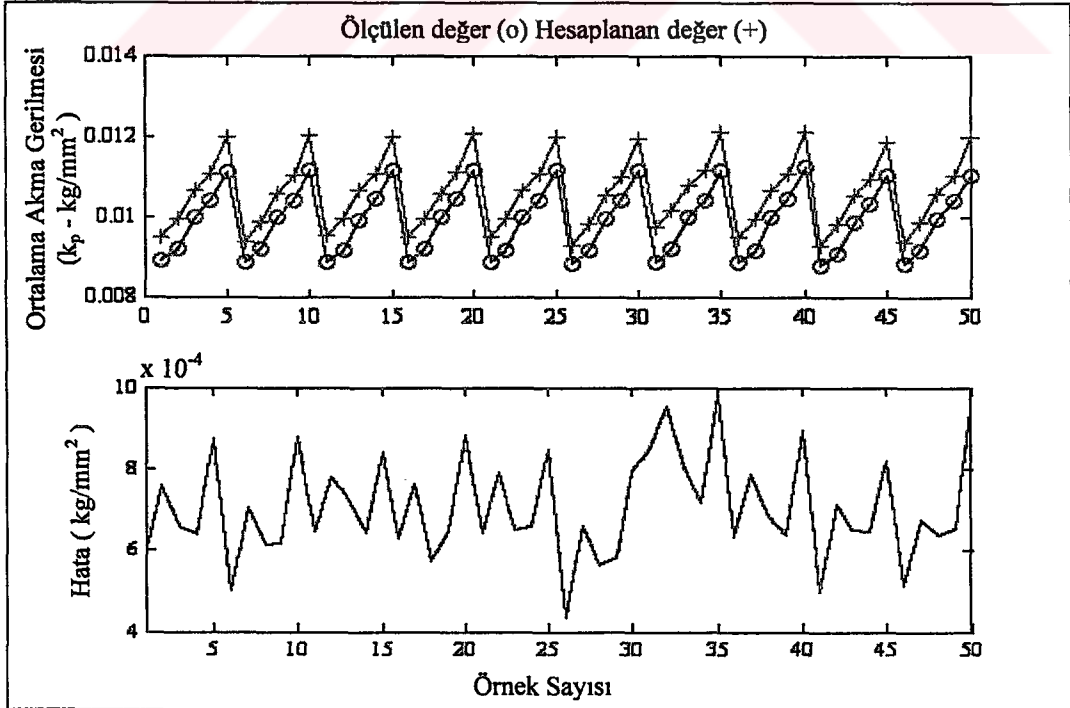
Bu bölümde model tanılama sonuçları grafik olarak sunulmaktadır. Elde edilen diyagramlarda, her bir şeklin üst kısmında model sonuçlarından hesaplanan tanılama değerleri (+) ile ölçülen değerler (o), alt kısmında ise bu iki değer arasındaki farklar (tanılama hatası) verilmiştir. Ortalama akma gerilmelerine ait şekillerde tanılama (a) ve geçerlilik (b) sonuçları verilmekte diğer şekillerde ise, ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama ve geçerlilik sonuçları verilmektedir.

5.1.1 Haddeleme kuvveti modeli tanılama sonuçları

Bu bölümde verilen Şekil 5.1’de hadde yükünü belirleyen ve çok değişkenli en küçük kareler yöntemi ile hesaplanan ortalama akma gerilmeleri (k_p) (a) ile



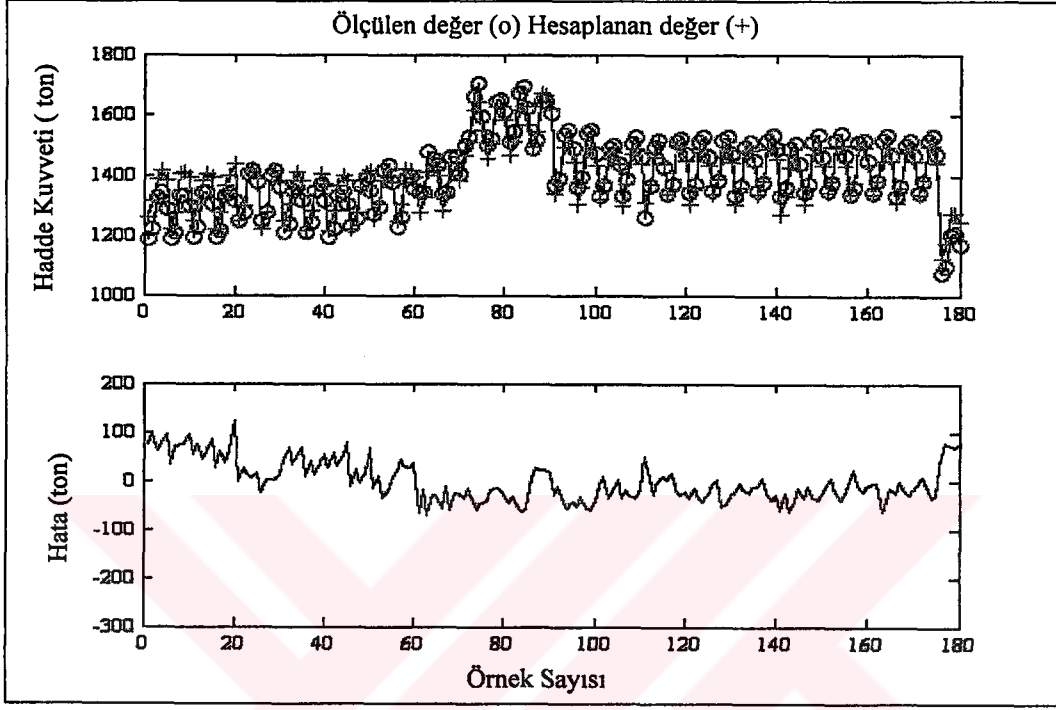
(a)



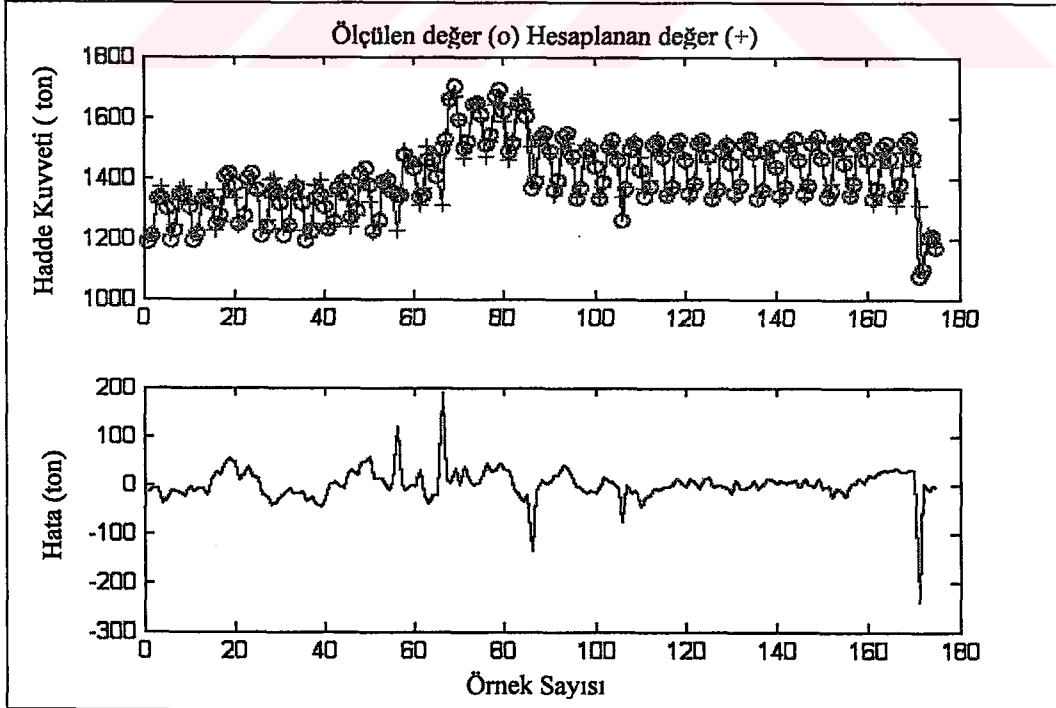
(b)

Şekil 5.1 Haddeleme kuvveti için bulunan ortalama akma gerilmesinin (k_p) ampirik model tanılama (a) ve geçerlilik (b) sonuçları (kg/mm^2).

bunlara ait geçerlilik testi sonuçları verilmektedir. Bulunan ortalama akma gerilmelerinden hesaplanan ampirik kuvvet modeli tanılama sonuçları Şekil 5.2a'da ve bu modele ait geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.3a'da verilmektedir.



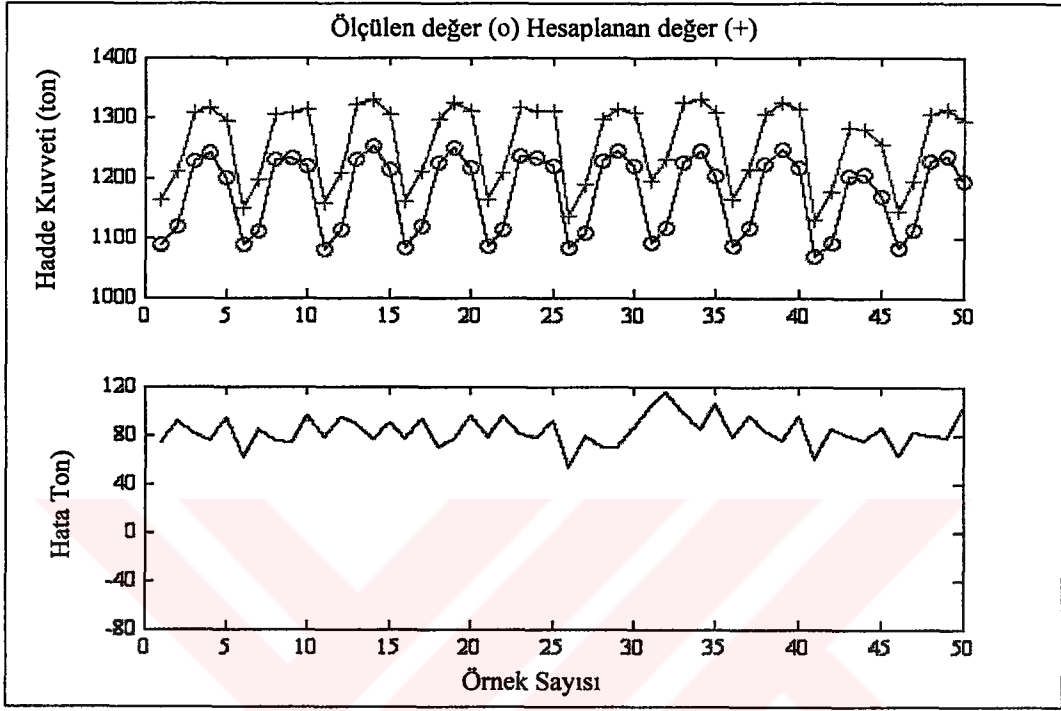
(a)



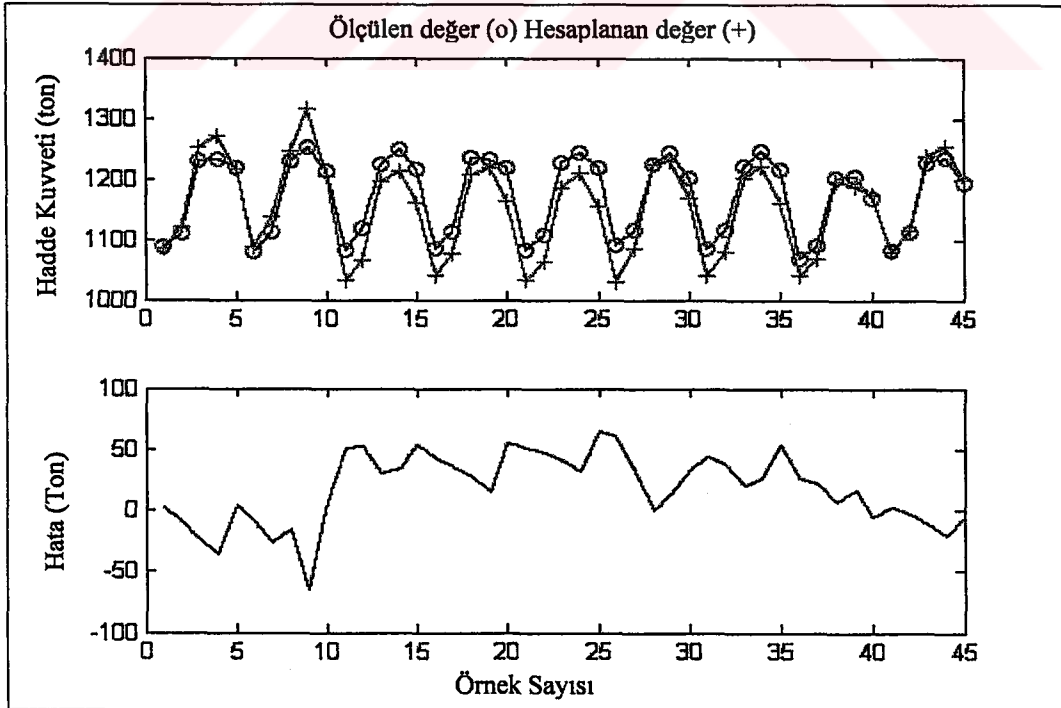
(b)

Şekil 5.2 Haddemeleme kuvveti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (ton).

Hadde kuvveti için önerilen dinamik model tanılama sonuçları da Şekil 5.2b'de ve bu modele ait geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.3b'de verilmektedir. Geçerlilik sonuçları incelendiğinde dinamik modelin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir.



(a)

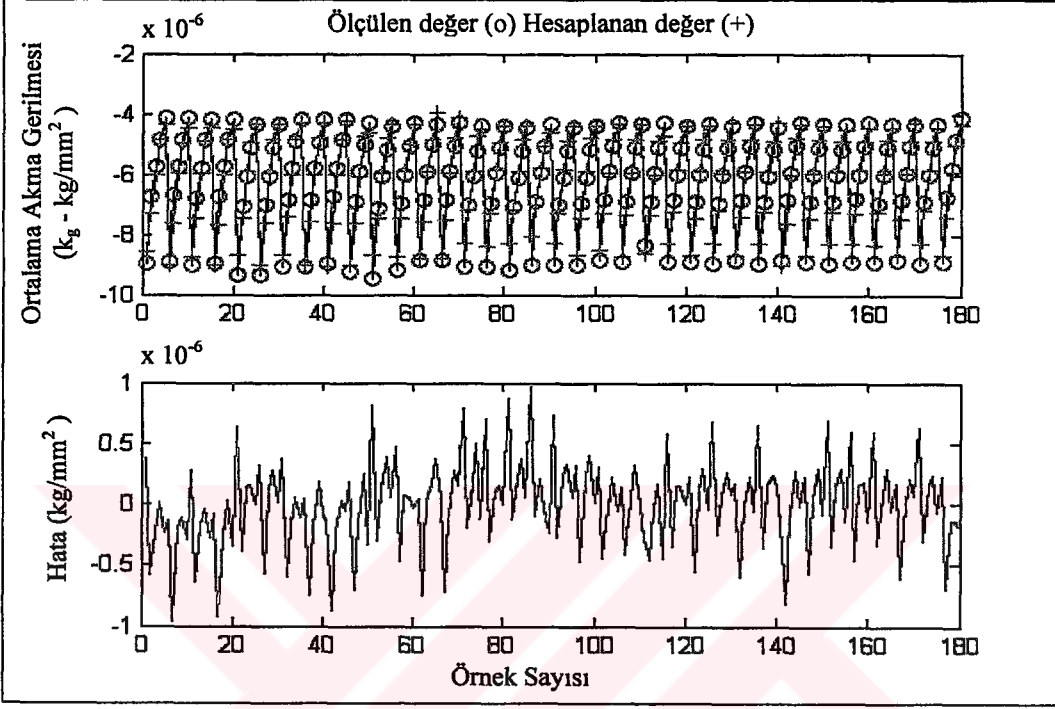


(b)

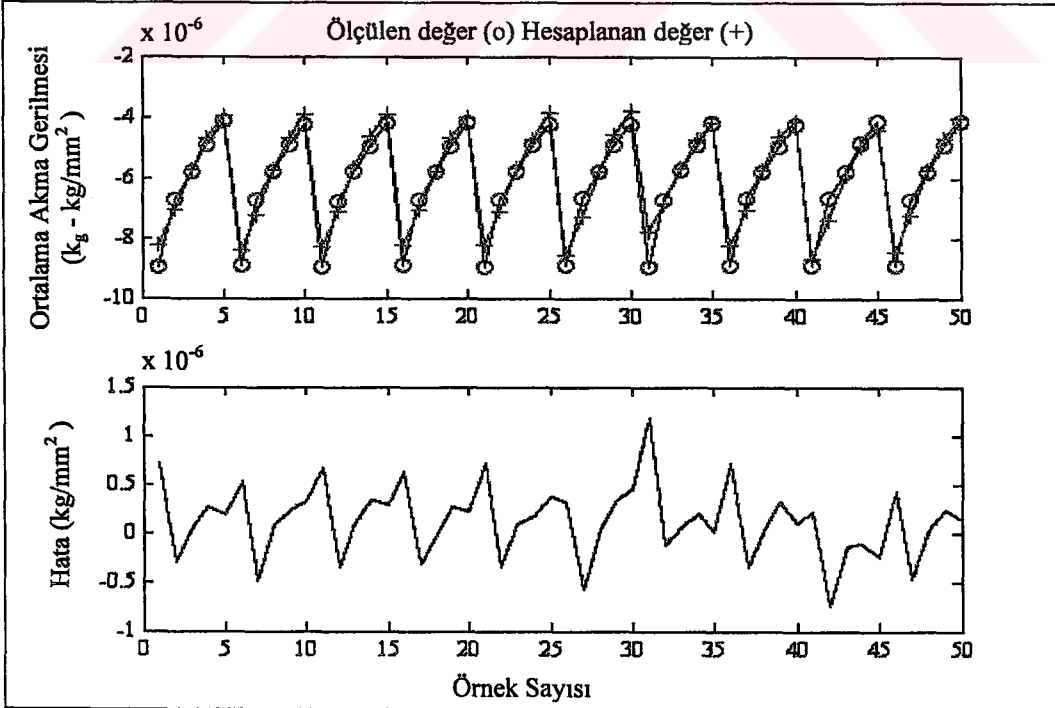
Şekil 5.3 Haddelenme kuvveti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (ton).

5.1.2 Haddeleme momenti modeli tanılama sonuçları

Bu bölümde verilen Şekil 5.4’de hadde momentini belirleyen ve çok değişkenli en küçük kareler yöntemi ile hesaplanan ortalama akma gerilmeleri (k_g) (a) ile



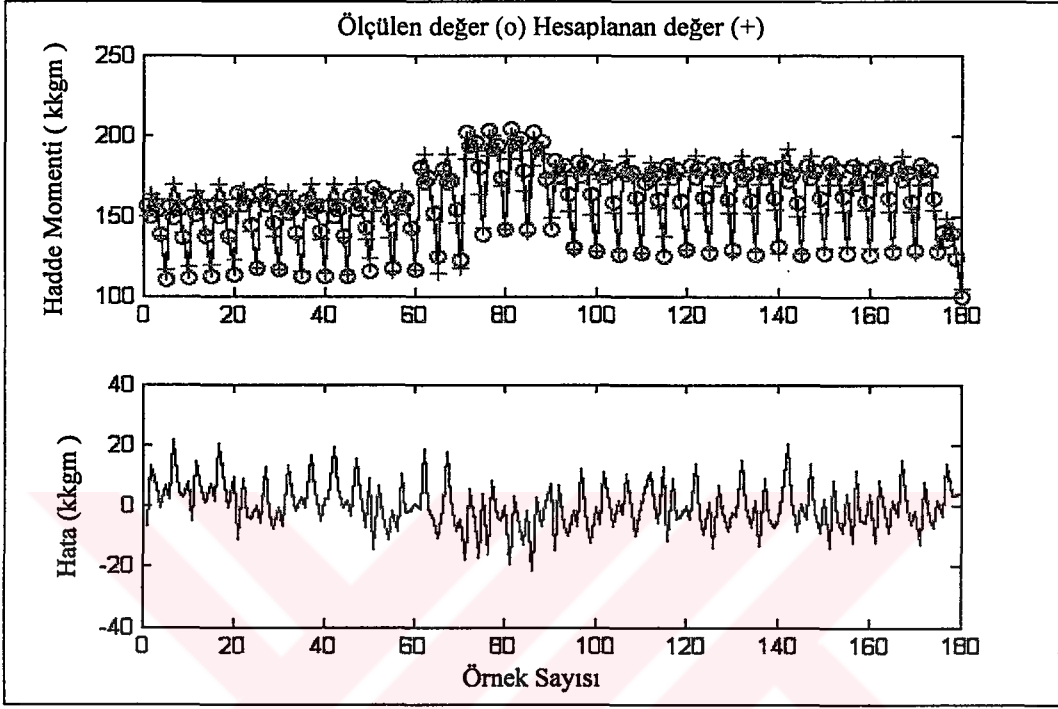
(a)



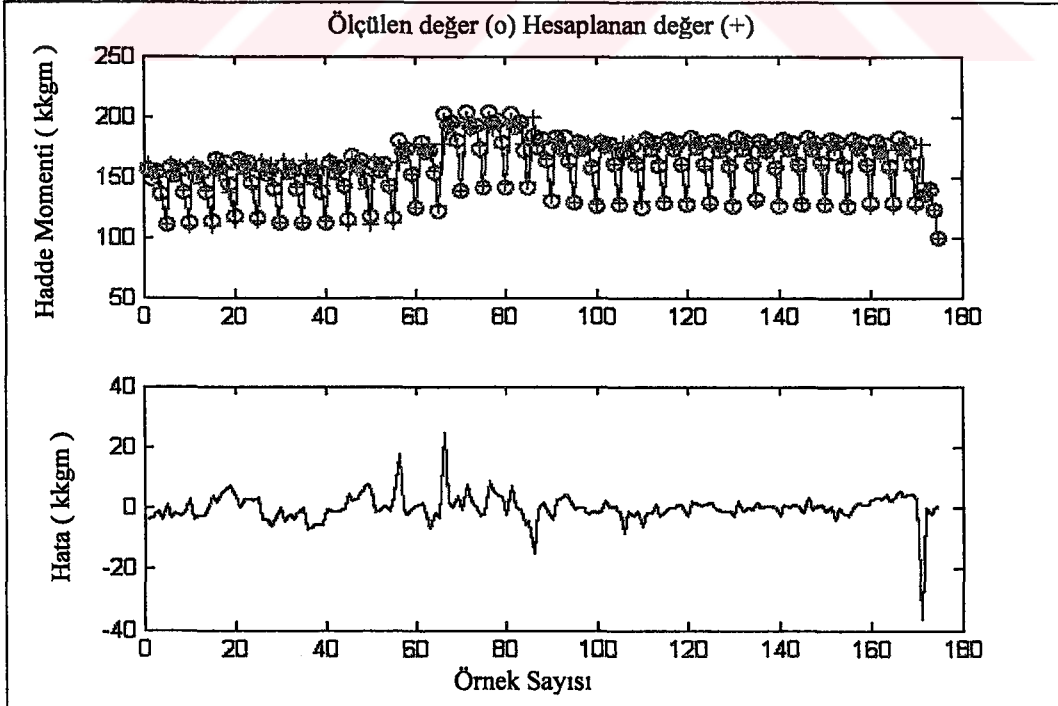
(b)

Şekil 5.4 Haddeleme momenti için bulunan ortalama akma gerilmesinin (k_g) ampirik model tanılama (a) ve geçerlilik (b) sonuçları (kg/mm^2).

bunlara ait geçerlilik testi sonuçları verilmektedir. Bulunan ortalama akma gerilmelerinden hesaplanan ampirik kuvvet modeli tanılama sonuçları Şekil 5.5a'da ve bu modele ait geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.6a'da verilmektedir.



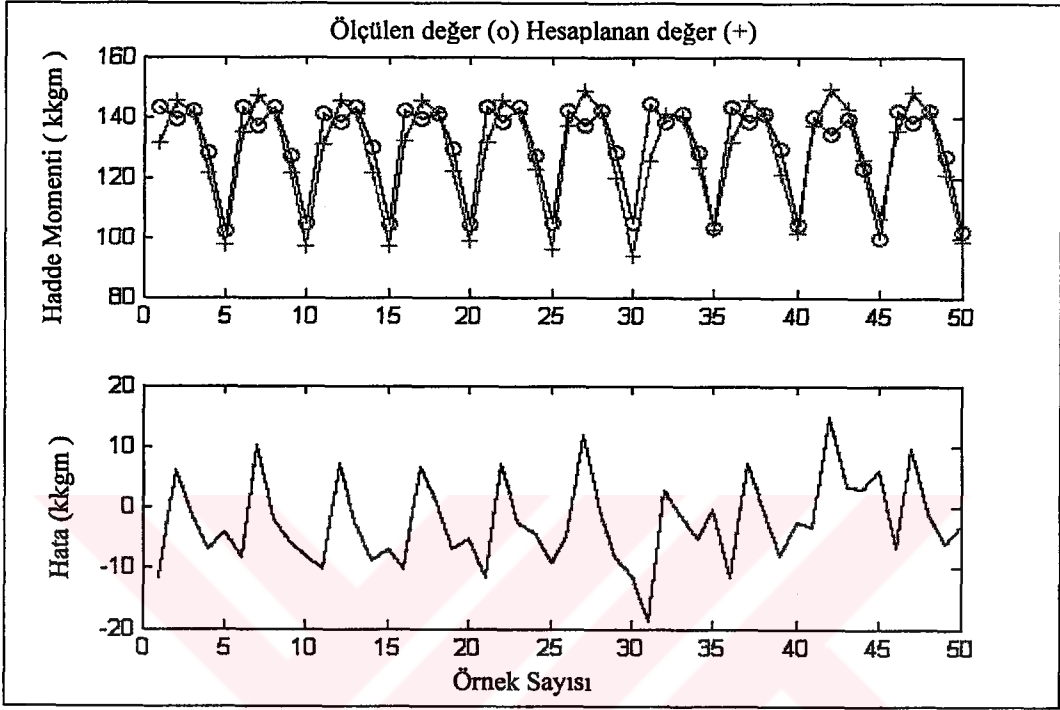
(a)



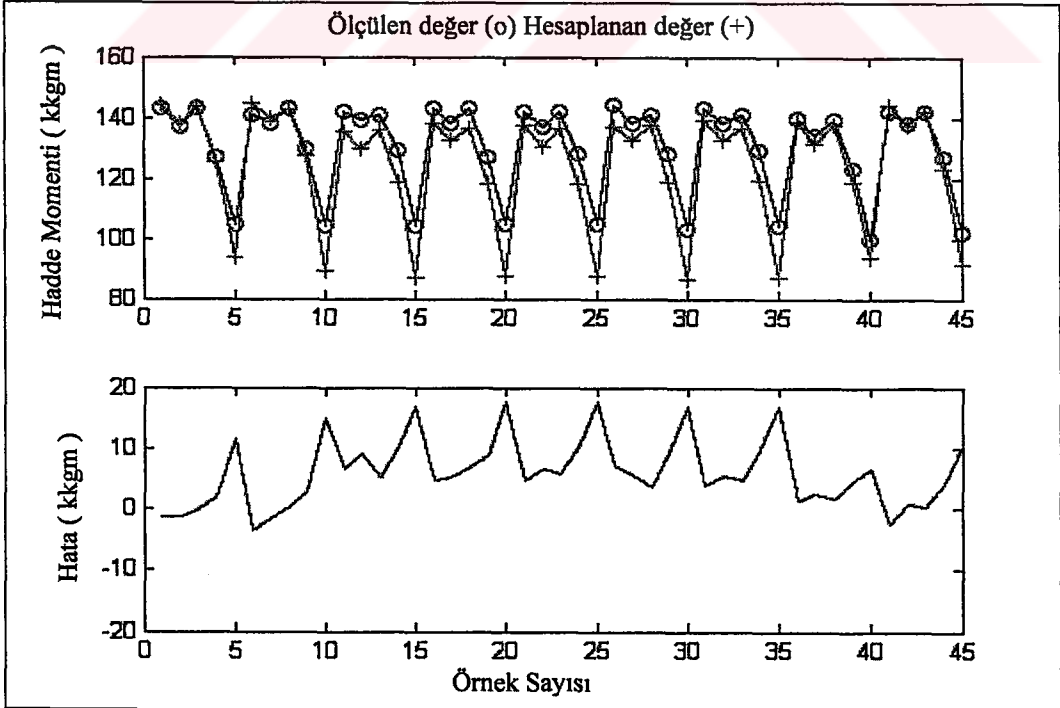
(b)

Şekil 5.5 Haddemele momenti için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (kkgm).

Hadde momenti için geliştirilen dinamik model tanılama sonuçları da Şekil 5.5b'de ve bu modele ait geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.6b'de verilmektedir. Geçerlilik sonuçları incelendiğinde dinamik modelin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir.



(a)

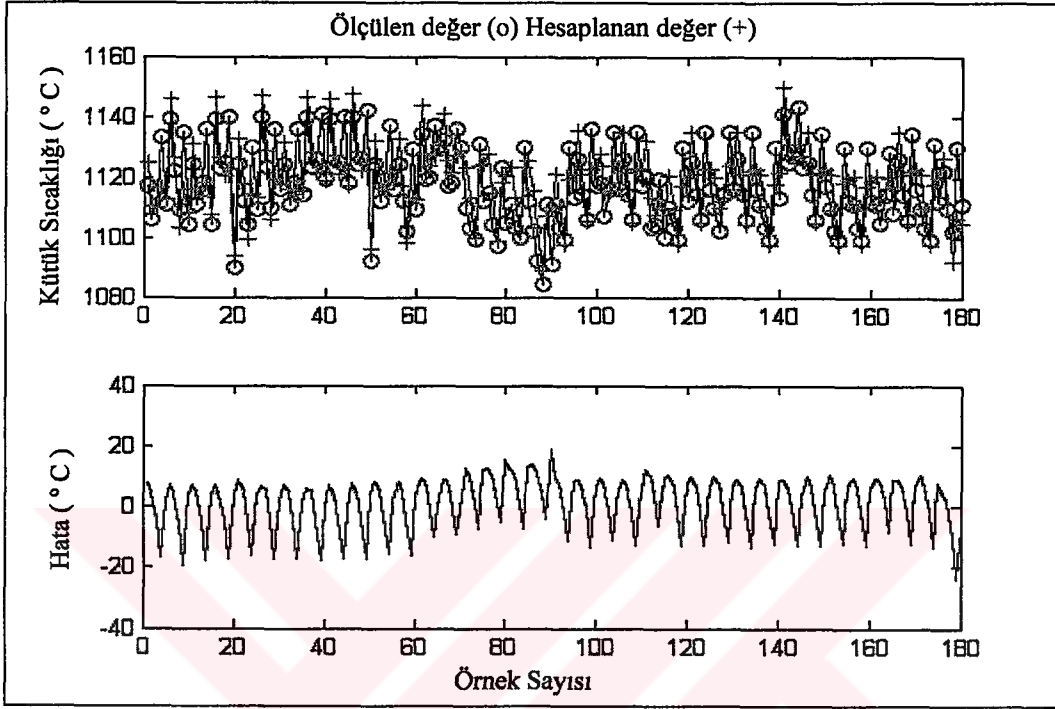


(b)

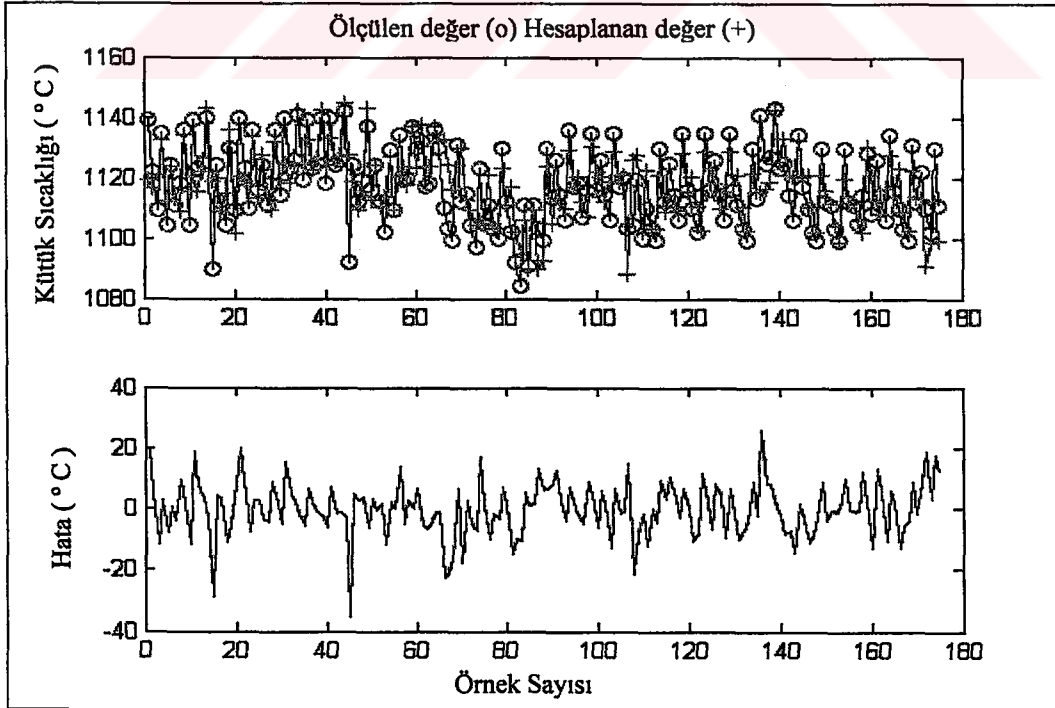
Şekil 5.6 Haddelerle moment için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (kkgm).

5.1.3 Kütük Sıcaklığı modeli tanılama sonuçları

Bu bölümde verilen Şekil 5.7a’da kütük sıcaklığı için geliştirilen, çok değişkenli en küçük kareler yöntemine dayanan ampirik model tanılama sonuçları ve Şekil 5.8a’da



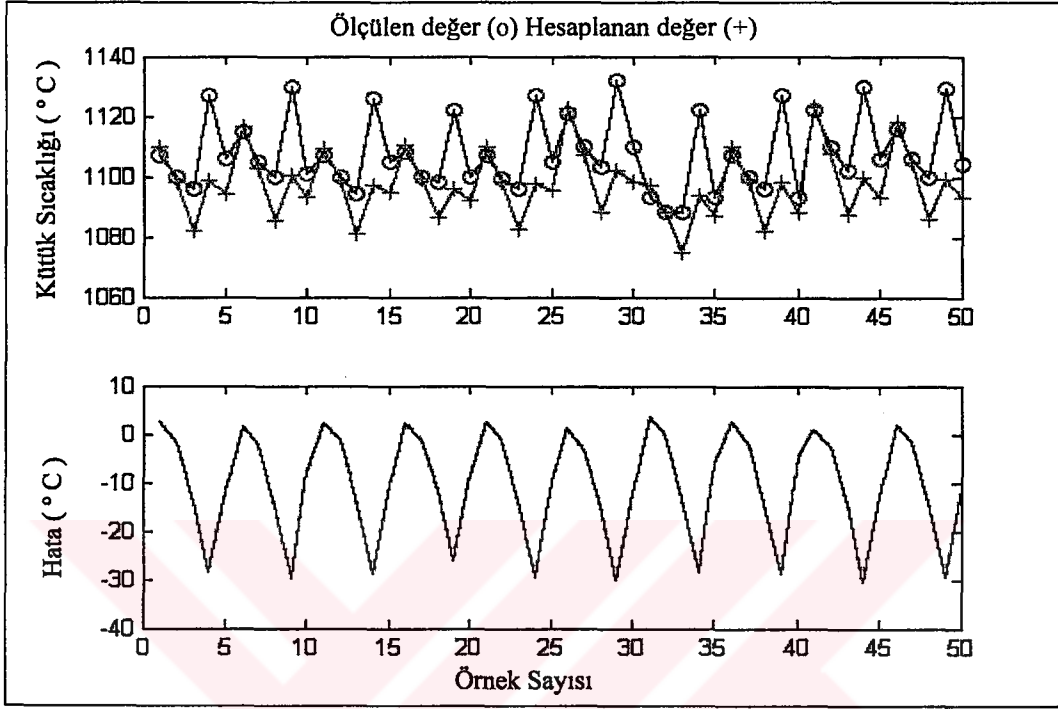
(a)



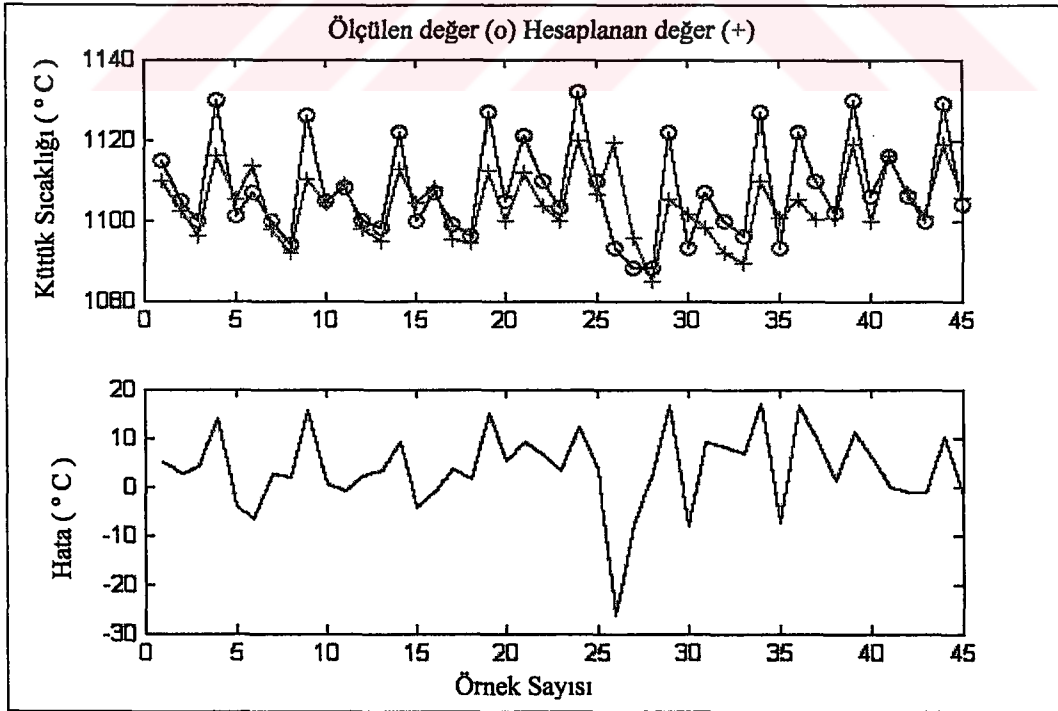
(b)

Şekil 5.7 Kütük sıcaklığı için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (°C).

ise ampirik model geçerlilik testi sonuçları verilmektedir. Sıcaklık için geliştirilen dinamik model tanılama ve geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.7b ve Şekil 5.8b'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre dinamik model daha iyi sonuçlar vermektedir.



(a)

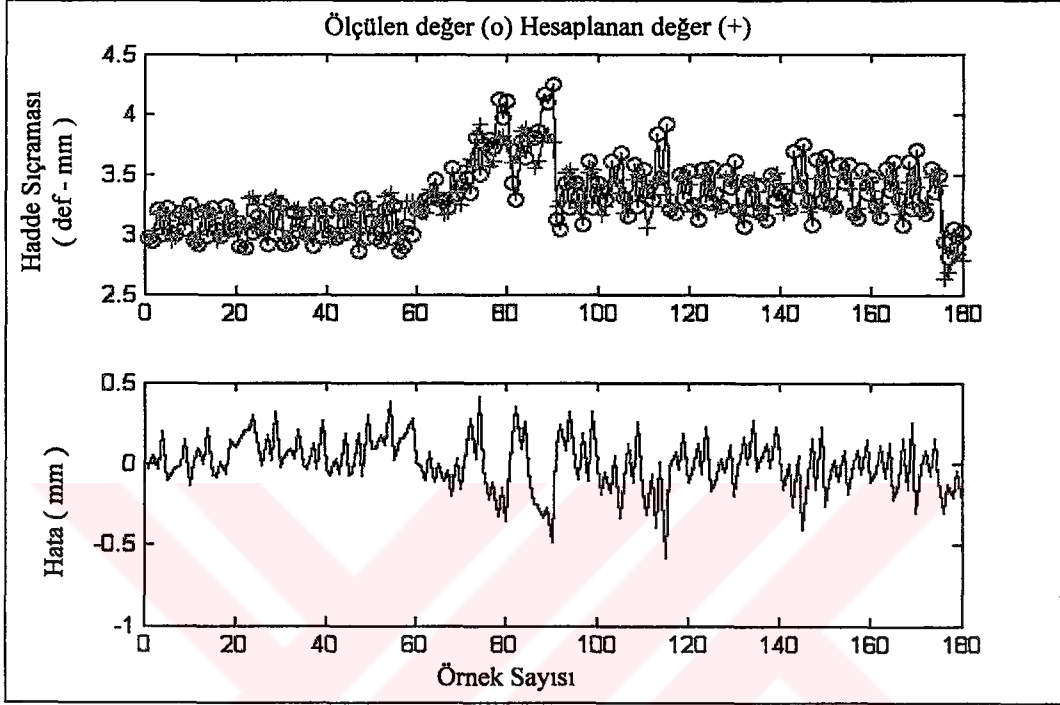


(b)

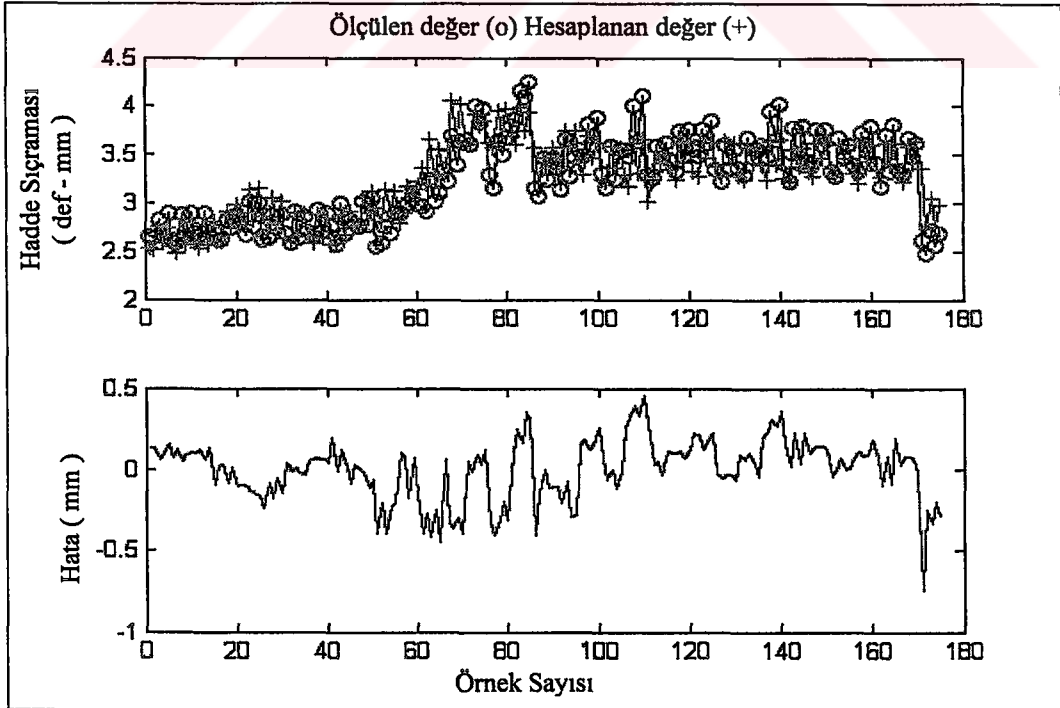
Şekil 5.8 Kütük sıcaklığı için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (°C).

5.1.4 Hadde sıçraması modeli tanılama sonuçları

Bu bölümde, hadde sıçraması için geliştirilen ve çok değişkenli en küçük kareler yöntemine dayanan ampirik model tanılama sonuçları Şekil 5.9a'da ve ampirik

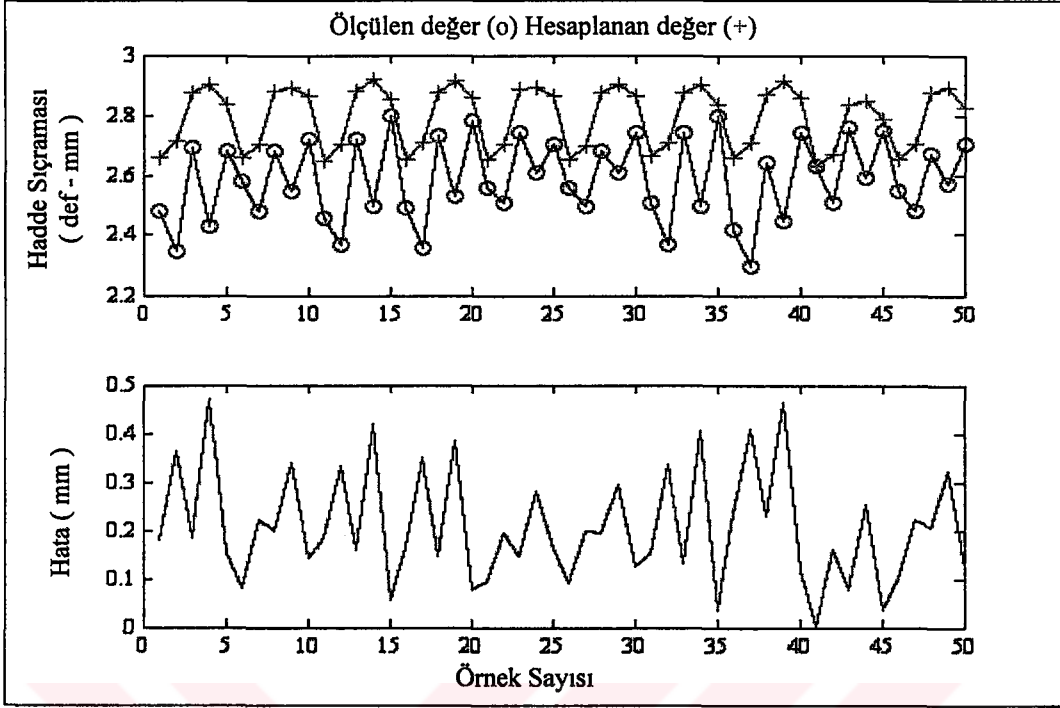


(a)

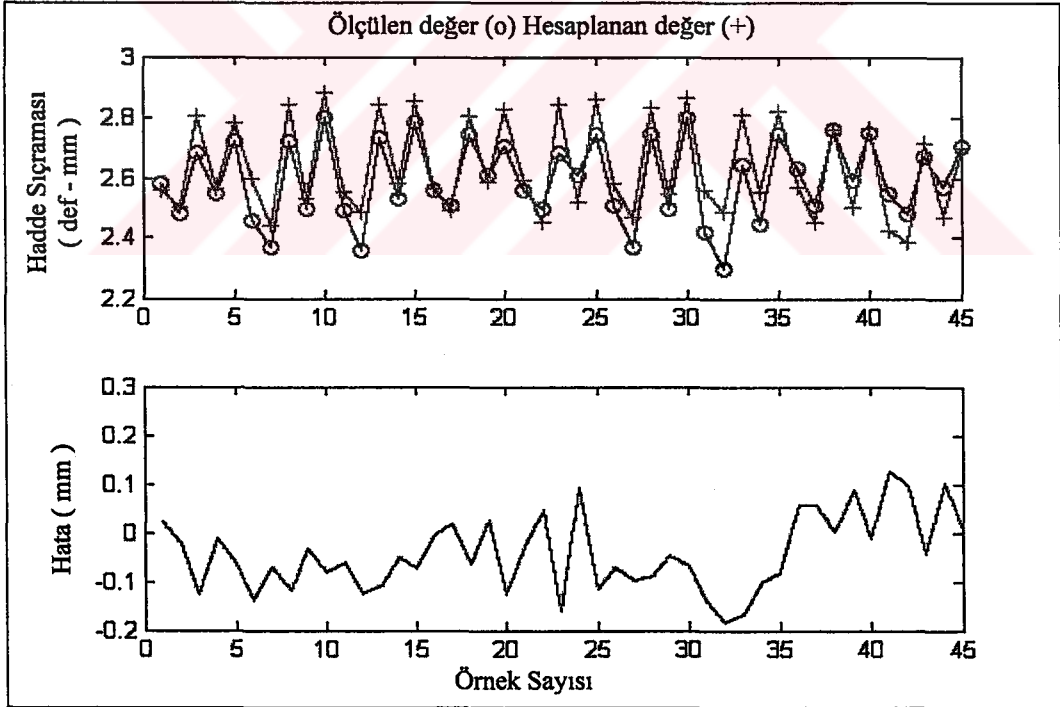


(b)

Şekil 5.9 Hadde sıçraması için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) tanılama sonuçları (mm).



(a)



(b)

Şekil 5.10 Hadde sıçraması için geliştirilen ampirik model (a) ve dinamik model (b) geçerlilik testi sonuçları (mm).

model geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.10a'da verilmektedir. Hadde sıçraması için geliştirilen dinamik model tanılama ve geçerlilik testi sonuçları da Şekil 5.9b ve Şekil 5.10b'de verilmektedir. Geçerlilik testi sonuçları incelendiğinde hadde

sıçramasının modellenmesinde de dinamik modelin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

5.2 Haddelme Prosesi Model Tanılama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, geliştirilen modellerin kıyaslaması yapılacak ve elde edilen parametreler verilecektir. Ampirik modelle yapılan çalışmada hadde kuvveti ve momenti için 5'er tane, kütük sıcaklığı için 4 tane ve hadde sıçraması için de 3 tane olmak üzere toplam 16 adet regresyon sabiti hesaplanmıştır. Bu katsayılar Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1 Ampirik modelde hesaplanan regresyon sabitleri.

Kuvvet	$b_1=0.001326$	$b_2=0.02214$	$b_3=0.002678$	$b_4=-0.04391$	$b_5=0.009376$
Moment	$b_6=-0.0001253$	$b_7=0.0001333$	$b_8=0.0004175$	$b_9=-0.0004469$	$b_{10}=2.893e-6$
Sıcaklık	$b_{11}=5.655e-8$	$b_{12}=4.28e-9$	$b_{13}=-0.03604$		
Sıçrama	$b_{14}=0.9921$	$b_{15}=-0.997$	$b_{16}=0.002583$		

Dinamik modelleme için yapılan çalışmada birim basamak için sistem mertebesi $n=5$ olarak alındığından her bir büyüklük için giriş sayısı ile mertebenin çarpımı kadar sayıda parametre hesaplanmaktadır.

Dinamik modellemede kuvvet ve moment için 5 giriş (giriş sıcaklığı, kimyasal bileşim, ezme miktarı, malzeme genişliği ve hadde yarıçapı), sıcaklık için 2 giriş (giriş sıcaklığı ve haddenin enerjisi), hadde sıçraması için 3 giriş (ezme miktarı, malzeme genişliği ve haddelme kuvveti) alınarak bulunan Θ parametre matrisleri aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$\Theta_{kuvvet} = \begin{bmatrix} -0.0056 & 0.0022 & 0.0012 & -0.0008 & -0.3755 \\ -0.0030 & 0.0002 & 0.0001 & -0.0007 & 2.4141 \\ -0.0088 & 0.0004 & -0.0002 & 0.0003 & -8.2318 \\ -0.0104 & -0.0003 & 0.0003 & -0.0000 & 8.3800 \\ -0.0115 & -0.0009 & 0.0003 & 0.0002 & 6.5154 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

$$\Theta_{moment} = \begin{bmatrix} -0.0023 & 0.0004 & 0.0001 & -0.0001 & -0.0725 \\ -0.0021 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.2637 \\ -0.0027 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.6169 \\ -0.0030 & -0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0943 \\ 0.0004 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.3970 \end{bmatrix}_{(5 \times 5)}$$

$$\Theta_{sıcak} = \begin{bmatrix} 0.4249 & 0.0082 \\ 0.2705 & -0.0055 \\ 0.0514 & -0.0003 \\ -0.1194 & 0.0022 \\ 0.3495 & -0.0032 \end{bmatrix}_{(5 \times 2)} \quad \Theta_{sıçrama} = \begin{bmatrix} 0.0150 & 0.0018 & 0.0005 \\ 0.0072 & -0.0003 & 0.0011 \\ -0.0052 & 0.0011 & -0.0026 \\ 0.0222 & -0.0008 & 0.0014 \\ 0.0124 & 0.0029 & -0.0050 \end{bmatrix}_{(5 \times 3)}$$

Her bir büyüklük için yapılan geçerlilik testi incelemelerinde dinamik modelin ampirik modele kıyasla daha iyi sonuçlar sergilediği belirtilmişti, burada bu grafikler tekrardan daha detaylı incelendiğinde aşağıda verilen sonuçlara varılmaktadır.

- Dinamik model verileri daha hızlı takip edebilmektedir,
- Çıkış büyüklüklerinin değişim formunu daha iyi izleyebilmektedir,
- Hataların daha az olduğu gözlenmektedir.



6. HADDELEME PROSESİNİN OPTİMİZASYONU VE SONUÇLARI

Optimizasyon probleminin amacı, belirli bir $f(x)$ maliyet fonksiyonunu esas alarak verilen bir problemin optimal değerlerini diğer bir deyişle maksimum veya minimumunu $x_1, x_2, \dots, x_n$ değerlerine bağlı olarak bulmaktır. Optimizasyon problemi değişkenlerin ve maliyet fonksiyonunun durumuna göre çeşitli isimler almakta ve uygun teknikler ile çözüme gidilmektedir.(Mathwork, 2002)

Genel bir optimizasyon problemi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$\min_{x \in R^n} f(x) \quad (6.1)$$

Burada $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ şeklinde verilen parametrelere bağlı maliyet fonksiyonunun optimal değerleri bazı durumlarda bir takım kısıt veya sınırlamalara bağlı olmaktadır. Bu durumda problemimiz “Kısıtlı Optimizasyon” problemi adını almaktadır, herhangi bir kısıt olmadığı takdirde “Kısıtsız Optimizasyon” olarak adlandırılmaktadır.

Optimizasyon problemi, verilen “ x ” parametrelerinin durumuna göre, eğer parametreler zamandan bağımsız ise “Statik Optimizasyon” veya $x = x(t)$ şeklinde x zamanın fonksiyonu ise “Dinamik Optimizasyon” olarak adlandırılmaktadır.

Maliyet fonksiyonu ve kısıtların lineer olup olmamasına göre de bir takım sınıflamalar yapılmaktadır. Hem maliyet fonksiyonu hem de kısıtlar lineer ise optimizasyon problemi, “Lineer Programlama (LP)” problemi olarak, eğer her ikisi de parametrelerin lineer olmayan fonksiyonları ise “Lineer Olmayan Programlama (NP)” problemi olarak bilinir. “Kuadratik Programlama (QP)” problemi ise lineer olarak kısıtlanmış kuadratik maliyet fonksiyonunun söz konusu olduğu optimizasyon problemidir.

Optimizasyon problemine kabul edilebilir hassasiyette bir çözüm bulabilmek, sadece kısıtların ve parametrelerin sayısına bağlı olmayıp, aynı zamanda maliyet fonksiyonunun ve kısıtların özelliklerine de bağlıdır. Örneğin lineer programlama ve

kuadratik programlama problemlerinde güvenilir bir çözüme kolayca ulaşılabilirken, lineer olmayan programlama probleminde aynı kolaylık gözlenememektedir. NP probleminin çözümü sırasında arama yönünü tespit edebilmek için genellikle iterasyon yöntemine dayalı işlemler gerçekleştirilmektedir. Bu çözüme ulaşabilmek de genellikle optimizasyon problemini LP, QP veya kısıtsız optimizasyon problemine dönüştüren algoritmalar kullanılması ile mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada haddeleme prosesi kısıtlı lineer olmayan programlama problemi biçiminde ele alınmış ve sıralı kuadratik programlama yöntemi ile çözülmüştür. Bu amaçla bundan sonraki ilk alt bölümde kısıtlı optimizasyon yöntemine genel bir bakış yapıldıktan sonra çözüm için kullanılan yöntem, ikinci kısımda haddeleme prosesi için kullanılan optimizasyon modeli ve üçüncü kısımda ise optimizasyon sonuçları verilmektedir.

6.1 Kısıtlı Optimizasyon Problemi

Denklem 6.1 de verilen genel bir optimizasyon problemi tanımına aşağıda verilen şartların ilavesi ile kısıtlı optimizasyon tanımı elde edilebilir. Burada $m < n$ olmak üzere verilen şartlar aşağıdaki şekildedir:

$g_i(x) = 0$	$i = 1, 2, \dots, m$	Eşitlik kısıtları,
$g_i(x) \leq 0$	$i = m+1, \dots, n$	Eşitsizlik kısıtları,
$x_l \leq x_i \leq x_u$		Sınırlamalar.

Burada x ($x \in R^n$) dizayn parametreleri vektörü ve $f(x)$ ($f(x): R^n \rightarrow R$) ise skaler bir maliyet fonksiyonudur. Ayrıca vektörel bir fonksiyon olan $g(x)$ ise $x:(g(x): R^n \rightarrow R^m)$ uzayında değerlendirilen eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarının değerlerini vermektedir (Mathwork, 2002).

Kısıtlı optimizasyonda genel hedef ele alınan problemi bir iteratif sürecin temeli olarak kullanılabilecek daha basit bir alt probleme dönüştürmektir. Bu yöntemlerin büyük bir çoğunluğunun özelliği, kısıt sınırlarının civarındaki kısıtlar için bir takım fonksiyonlar kullanarak kısıtlı optimizasyon problemini kısıtsız optimizasyon problemine dönüştürmektir. Bu fonksiyonlar bir takım çarpanlarla çarpılıp maliyet fonksiyonuna ilave edilmektedir. Bu şekilde kısıtlı problem, sınırlarda kısıtlı probleme yakınsayan bir dizi parametrize edilmiş kısıtsız optimizasyon teknikleri ile

çözülür. Bu yöntemler “Ceza Fonksiyonu Yöntemi” olarak adlandırılmaktadır. Yukarıda bahsedildiği üzere elde edilen dönüşüm fonksiyonu, yani yeni maliyet fonksiyonuna da ceza fonksiyonu denilmektedir. Bu amaçla geliştirilen diğer yöntemlerde de yaklaşık olarak benzer prensip kullanılmaktadır.

Bir dönüşüm yöntemi olan ceza fonksiyonu yönteminden başka son zamanlarda kullanılan en yaygın yöntemlerden biride yine bir dönüşüm yöntemi olan “Sıralı Kuadratik Programlama (SQP)” yöntemidir. Bu yöntem bu adın verilmesinin nedeni her iterasyonda QP alt probleminin çözülmesidir. Ayrıca bu yöntem “İteratif Kuadratik Programlama”, “Ardışık Kuadratik Programlama” veya “Kısıtlı Değişken Metrik Yöntemi” olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemin bir uygulamasında Lagrange denklemleri, diğer bir uygulamasında da Kuhn-Tucker (KT) denklemleri dönüşüm fonksiyonu olarak kullanılmaktadır (Mathwork, 2002).

Yukarıda verilen yöntemlerde de görüldüğü üzere kısıtlı lineer olmayan programlama probleminin çözümü için bir çok algoritmanın önerilmesi mümkündür ve bunlardan birinin diğerlerine kesin bir üstünlüğü söylenemez. Seçilen tekniğin isabet derecesinde problemin niteliğini göz önünde bulundurma ve analizcinin yeteneği rol oynamaktadır.

6.1.1 Sıralı kuadratik programlama (SQP) problemi

Sıralı kuadratik programlama yöntemi, kısıtsız optimizasyonda olduğu gibi, kısıtlı optimizasyon problemini Newton yöntemine benzetme imkanı sağlamaktadır (Mathwork, 2002).

Sıralı kuadratik programlama probleminin bir uygulaması olarak KT denklemlerinin çözümüne dayanan yöntemde KT denklemleri kısıtlı optimizasyon probleminin optimum olması için gerekli koşulları vermektedir. KT denklemlerinin çözümü bir çok lineer olmayan programlama algoritmasına temel teşkil etmektedir. Bu algoritmalar doğrudan doğruya Lagrange çarpanlarını hesaplamaya çalışır. Kısıtlı quasi-Newton yöntemleri, KT denklemlerini içeren ikinci mertebe bilgileri göz önüne alarak üstün bir lineer yakınsama sağlar ve bunu yaparken quasi-Newton güncellemesini kullanır.

SQP programlaması için kullanılan diğer bir yöntem ise dönüşüm fonksiyonu olarak Lagrange denklemlerinin kullanılmasıdır. Bu yöntemde Quasi-Newton güncellemesi kullanılarak, her ana iterasyonda Lagrangian fonksiyonunun Hessian matrisi

kestirilmektedir. Bu Hessian matrisi daha sonra satır arama (line search) işlemi için gerekli arama yönünü bulmaya yarayan QP alt problemini oluşturmak üzere kullanılır. Burada metodun esasını veren temel fikir, denklem 6.1’de tanımlanan genel problem GP için, Lagrangian fonksiyonunun kuadratik kestirimini esas alan bir QP alt probleminin elde edilmesidir. Bu durumda Lagrange denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(x) \quad (6.2)$$

Bu denklemde, $L(x, \lambda)$ Lagrange denklemini, λ_i , ($i=1,2,...,m$) Lagrange çarpanlarını ve $g_i(x)$ ise kısıtları içeren fonksiyon olarak alınmaktadır. Denklem 6.1, sınır kısıtlarının eşitsizlik kısıtları şeklinde varsayılması ile basitleştirilebilir ve lineer olmayan kısıtlar lineerleştirilerek QP alt problemi elde edilebilir. Bu QP alt problemi de herhangi bir QP algoritması ile çözülebilir.

Optimizasyon problemini çözmek için bu çalışma kapsamında geliştirilen ve Ek A.3 de verilen Matlab programında kullanılan “fmincon” komutu QP alt problemini quasi-Newton güncellemesi ve satır arama (line search) yöntemi ile çözmektedir.

6.2 Haddelme Prosesinin Optimizasyon Modeli

Optimizasyon probleminin formülasyonu, haddelenen kütüğün maliyetine bağlı olup ve bu maliyet fonksiyonu denklem 6.3’teki gibi tanımlanabilmektedir (Ozsoy ve diğ., 1992).

$$f(h_2, h_3, ..., h_N) = \sum_{i=1}^N w_1 t_i + w_2 E_i \quad (6.3)$$

Bu denklemde verilen büyüklükler, w_1 ve w_2 sırasıyla zaman ve enerji terimlerinin ağırlık faktörleri, N geçiş sayısı, t_i haddelme süresi (denklem 4.11) ve E_i ’de bir geçişte malzemeyi ezmek için harcanan enerjidir (denklem 4.12) (Lopresti ve Patton, 1967). Her geçişte malzemeyi ezmek için harcanan enerji, moment için geliştirdiğimiz basamak cevabı modelinden elde edilen moment ile her bir geçiş için gereken süreden hesaplanmaktadır.

Haddeleme yapılan tezgahı ve elektriksel tahrik sisteminin üretim sınırlarına ve fabrikanın fiziksel şartlarına bağlı olarak, kuvvet ve moment için verilen kısıtlar sırasıyla denklem 6.4 ve 6.5’de verilmektedir.

$$P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max} \quad i=1,2,\dots, N \quad (6.4)$$

$$G_{\min} \leq G_i \leq G_{\max} \quad i=1,2,\dots, N \quad (6.5)$$

Sıcak haddeleme prosesinde malzemeden istenen metalurjik özellikleri elde etmek için, malzeme sıcaklığını kontrol etmemiz gerekmektedir. Bu amaçla verilen sıcaklık kısıtları aşağıdaki gibi verilebilir:

$$T_{\min} \leq T_i \leq T_{\max} \quad i=1,2,\dots, N \quad (6.6)$$

Diğer bir kısıt olarak da her geçişteki δ_i ezme miktarının alt ve üst sınırları denklem 6.7’deki gibi verilmektedir.

$$\delta_{\min} \leq \delta_i \leq \delta_{\max} \quad i=1,2,\dots, N \quad (6.7)$$

Son kısıt olarak da haddelenen kütüğün nihai kalınlığını belirleyecek aşağıdaki kısıtlar verilebilir. Burada kütüğe verilmesi gereken h_i toplam ezme miktarı, kütüğün ilk kalınlığı ($h_{\max}$) ile istenen nihai kalınlık ($h_{\min}$) arasındaki farktır.

$$h_{\min} \leq h_i \leq h_{\max} \quad i=1,2,\dots, N+1 \quad (6.8)$$

Matlab paketinin optimizasyon programı kullanılarak yapılan program ile, seçilen N adım için elde edilebilir minimum zaman ve enerji sarfiyatını gerektiren ve verilen kısıtları sağlayan optimum paso seti hesaplanmıştır.

Matlab program paketinin “optimizasyon toolbox”ında yer alan ve genel optimizasyon probleminin çözümü için kullanılan bu program, sıralı (sequential) kuadratik programlama (SQP) yöntemini esas almaktadır.

Optimizasyon için 4009 ASTM A53-96 Gr.A çeliğine ait veriler kullanılmıştır. Bu proseste 2. sıcak haddehanenin imkanları göz önüne alınarak tesbit edilen kuvvet ve momente ait kısıtlar ve üretilen çelik kütüğün boyutlarına ait fiziksel kısıtlarla kullanılan çeliğin sıcak haddelenmesine uyan sıcaklık kısıtları Tablo 6.1’de verilmektedir.

Tablo 6.1. Haddeleme prosesi için kullanılan kısıtlar

	Minimumu	Maksimumu
Kuvvet	1000 ton	2500 ton
Moment	100 kkgm	260 kkgm
Sıcaklık	1050 °C	1250 °C
Kalınlık	30 mm	170 mm
Ezme miktarı	10 mm	40 mm

6.3 Haddeleme Prosesinin Optimizasyon Sonuçları

General Electric otomasyon sisteminden elde edilen veriler 5 pasolu bir üretim sonucunda elde edilmektedir.

Alınan herhangi başlangıç paso kümesi için, program verilen kısıtlara uygun aynı optimum paso kümesi değerlerini vermektedir. Programın istenen kalınlık değerlerini sağlamak için kesin değerleri verdiği gözlenmiştir.

Optimizasyon sonunda elde edilen değerlerin bütün kısıtları sağladığı Tablo 6.2’de verilen değerlerden görülmektedir. Kabul edilebilir bir maliyet azaltması sağlayan optimizasyon programının bulduğu optimum paso kümesi ile programın başlangıç şartları olarak kullandığı başlangıç paso kümesi Tablo 6.3’te verilmektedir.

Tablo 6.2. Optimizasyon probleminde elde edilen sonuçlar

	Minimumu	Maksimumu
Kuvvet	1155 ton	1402 ton
Moment	122 kkgm	137 kkgm
Sıcaklık	1137 °C	1155 °C
Kalınlık	35 mm	162 mm
Ezme miktarı	15 mm	38 mm

Tablo 6.3. Optimizasyon sonucu elde edilen ezme miktarları

	Küme No	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
Ezme başlangıç değerleri kümesi	1. Küme	34.01	30.24	27.08	21.62	15.2
	2. Küme	40.0	38.7	38.6	39.12	21.84
	3. Küme	37.56	33.12	30.16	28.12	19.34
	4. Küme	36.66	31.62	28.66	23.05	16.05
Optimum ezme kümesi		15	15	23.92	38	38

Elde edilen sonuçlar kısaca değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır:

- Hesaplanan optimal paso dizisi bütün kısıtları sağlamaktadır.
- Başlangıç noktası olarak kullanılan ve Ereğli Demir Çelik Haddehane'sinde halen kullanılan maksimum paso stratejisini esas alan paso dizileri Tablo 6.3'te verilmektedir.
- Optimizasyon algoritması mümkün olmayan başlangıç noktaları ile de doğru çalışmaktadır.
- Değişik başlangıç noktalarıyla aynı optimal noktaya yakınsanmaktadır.
- Endüstride yaygın olarak kullanılan maksimum paso stratejisinin, önerilen minimum maliyet stratejisi ile çelişkili olduğu görülmektedir. Bunun sebebi de endüstride, daha çok zaman maliyetini önemseyen bir maliyet fonksiyonu kullanılmasıdır.
- Önerilen optimizasyon modeli, değişik tipteki haddeleme prosesleri için kullanılabilir ve geniş bir uygulama alanı bulabilir. Bunun için sadece proses modelini değiştirmek yeterli olacaktır.
- Önerilen maliyet fonksiyonunun seçimi keyfi olup, ele alınan prosese göre ilave maliyet faktörleri katılabilir. Keza ilave kısıtlamalar da modele dahil edilebilir.
- Pratikte kütük giriş kalınlığının ve sıcaklığının değiştiği göz önüne alınırsa her kütük için optimizasyon algoritması çalıştırılarak yeni bir optimal paso dizisi hesaplanabilir.
- Yukarıda açıklandığı üzere bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon programı çok geniş bir uygulama alanında güvenli sonuçlar vermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ilk kısmında, ampirik ve basamak cevabı modeli sıcak haddeleme prosesinin özelliklerini belirlemede kullanılmakta ve birbiriyle kıyaslanmaktadır. Basamak cevabı modeli dinamik yapısından dolayı prosesin sürekli rejim değerlerini daha iyi kestirebilmektedir. Ampirik modeller, eğri uydurma ve regresyon tekniklerini kullanırken, dinamik modeller tanılama tekniklerini kullanmaktadır. Kestirim yeteneği ve dinamik yapı, basamak cevabı modeli ve benzeri tanılama yapan modellere, diğer eğri uydurma ve regresyon özelliğine sahip modellere nazaran önemli avantajlar sağlar. Bu avantajları şöyle sıralayabiliriz;

- Basamak cevabı modeller, basit yapılarından dolayı hesaplama süresini önemli oranda kısaltırlar ve parametreleri hızlı bir şekilde güncelleştirirler,
- Model parametrelerinin dinamik olarak güncellenebilmesi dolayısıyla, model esaslı akıllı regülatörlerin dizaynını mümkün kılarlar,
- Dinamik yapıları gelişmiş kontrol uygulamalarını da mümkün kılmaktadır,
- Sistem ve malzeme değişiklikleri gibi proseste meydana gelebilecek planlama değişikliklerine uyum sağlayıp daimi rejim değerlerine yakınsarlar ve parametrelerini güncelleştirebilirler.

İkinci kısımda ise sıcak haddeleme prosesinde, zaman ve enerji maliyetinin optimizasyonu için bir çözüm sunulmaktadır. Maliyet optimizasyonu için dinamik yapısından ve daha iyi bir yakınsama sağlamasından dolayı basamak cevabı modeli esas alınmıştır.

Alınan herhangi başlangıç paso kümesi için; programın, verilen kısıtlara uygun aynı optimum paso kümesi değerlerini verdiği, aynı zamanda programın istenen kalınlık değerlerini sağlamak için kesin değerler verdiği gözlenmiştir. Optimizasyon sonunda elde edilen değerler bütün kısıtları sağlamakta ve kabul edilebilir bir maliyet azalması temin edilmiştir.

İncelenen maliyet fonksiyonu ve optimizasyon probleminin sağladığı avantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Değişik maliyet faktörleri ilavesini mümkün kılmaktadır,
- Özel malzemeler, uygulamalar ve üretim hattından gelen fiziksel kısıtlamalara uygun şekilde kısıtlar eklenebilmektedir,

Optimizasyon sonuçları minimum maliyet için her bir geçiş başına maksimum azaltmanın uygun çözüm olmadığını göstermektedir. Geçiş başına maksimum paso yerine, optimum planlama sonuçları artan miktarlardaki bir paso planlamasını vermektedir.

İleriki çalışmalarda, daha zengin, farklı üretim şartlarında ve tiplerde, değişik malzemelerin üretim verilerinin kullanımı ile elde edilen modelin performansı ve optimizasyon sonuçları geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Åström, K., J. and Wittenmark, B., 1984, "Computer Controlled System Theory and Design" Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey,
- Buckman, B. J., 1972, *BHP Tech. Bull.*, Vol. 16, pp. 9
- Fazan, B., Boubel, D., Ratte, P., Bouvard and Weber, F., 1980, *Iron Steel Engr.* pp. 58
- Ford, H. and Alexander, J.M., 1964, Simplified Hot Rolling Calculations, *Journal of the Institute of Metals*, pp. 92, 397-404.
- Gittens A. , R. H. Molier and J. R. Everett, 1974, *BHP Tech. Bull.*, Vol. 18, pp.
- Hitchcock, J. H., 1935, Roll neck bearings, *ASME Research Publication*,
- İnceyan , T., 1989, Haddemeleme Tekniğinin Esasları, C.1, T.D.Ç.İ. Eğitim yayınları, Ankara
- Landau, I.D., 1988, System identification and control design using PIM + software, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Lenard, J. G. and Pietrzyk, M., 1992, Rolling Process Modeling And Numerical Modeling Of Material Deformation Processes, Springer Verlag, London
- Ljung, L., 1995, System Identification, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden. e-mail ljung@isy.liu.se
- Ljung, L., 2001, *System Identification Toolbox for Use with MATLAB*, The MathWorks, Inc. Natick, MA.
- Lopresti P. V. and Patton T. N., 1967, An Optimal Closed Loop Control of a Rolling Mill, *Joint Automatic Control Conf.*, New York, pp. 767—777
- Mathworks, 1994. *Simulink Dynamic System Simulation Software Release Notes*, version 1.3, The Mathworks Inc., Massachusetts.
- Mathworks, 2002, *Optimization Toolbox*, User's Guide for Use with MATLAB, version 2.2, (online only), The Mathworks Inc., Massachusetts.
- Mielnik, E. M., 1999, Metal Working Science and Engineering, McGraw Hill, Newyork,
- Mościński, J., Ogonowski, Z., 1995, Advanced Control With Matlab&Simulink, The University Press, Cambridge.
- Morari, M. and Ricker, N. L., 1994, *Model Predictive Control Toolbox*, User's Guide For Use With Matlab, The MathWork, Inc., Massachusetts.
- Orowan, E., 1943, The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling, *Proc. Inst. Mech. Engineers*, Vol. 150, pp 152.
- Özdaş, M. N., Dinibütün, A. T., Kuzucu, A., 1988, Otomatik Kontrol Temelleri, İ.T.Ü. Matbaası, Gümüşsuyu

- Öznergiz, E., Özsoy, C., Baykara, C., Kural, A., Palabıyık, M., 2002, Identification of a Hot Plate Rolling Process and Comparison With The Empirical Model, *Proceedings of ESDA 2002*, İstanbul
- Ozsoy, C., Ruddle, G. E. and Crawley, A. F., 1985, A Drafting Model for Hot Plate Rolling To Minimize Processing Cost and Crop Losses, *Proc. Seventh IASTED mt. Symp. Measurement and Control*, İstanbul, Turkey, 23-25 July 1985, pp. 195-199
- Özsoy, C., Ruddle, E. D. and Crawley, A. F., 1992, Optimum Scheduling of a Hot Rolling Process By Nonlinear Programming *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 31, No. 3, pp. 217-224
- Özsoy, C., 1993, A Self –Tuning Thickness Control In Plate Hot-Rolling, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 32, No. 2, pp. 177-183
- Özsoy, C., Ruddle, E. D. and Crawley, A. F., 1994 Optimization Model of Recrystallization Hot Rolling of Ti-Va Steels, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol.82, No.1, pp. 77-92,
- Özsoy, C., Baykara, C., Baş, E., Ala, F., 2001, Identification of a Plate Hot Rolling Process, *Proc. 15th European Simulation Multiconference*, Prague, Czech Republic, pp. 342-345
- Partington, D., 1980, *Proceedings of Int. Conf. on Steel Rolling*, Tokyo, Vol. 1, pp. 205— 216,
- Ruddle, G. E. , Milliken, K. S., Smelsky, G. and Crawley, A. F., 1983, “A Pilot-Scale Rolling Mill For Process And Material Development” *Canadian Metall. Q.*, Vol. 22, pp. 271,
- Roberts, W. L., 1983, “Hot Rolling of Steel”, Marchel Dekker, Inc, New York.
- Roberts, W. L., 1988, “Flat Processing of Steel”, Marchel Dekker, Inc, New York.
- Sarioğlu, A., 1994, Sıcak Haddedeleme Yük Hesabı Metotlarının Karşılaştırılması ve Uygun Metotun Pratik Bir Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Schultz, R. G. and Smith, A. W., 1965, “Determination Of A Mathematical Model For Rolling Mill Control”, *Iron Steel Engr.*, pp. 127
- Sezer, A., 1999, Çelik Sacların Sıcak Haddelenmesinde Haddedeleme Kuvvetinin Deneysel Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Shahian, B., Hassul, M., 1993. Control system design using Matlab, Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- Shohet, K. N. and Townsend, N. A., 1968, *J. Iron Steel Inst.*, Vol. 206, pp. 1068,
- Siciliano, Jr. F., Minami, K., Maccagno, T. M. and Jonas, J. J., 1996, Mathematical Modeling off the Mean Flow Stress, Fractional Softening and Grain Size during Hot Strip Rolling of C-Mn Steels, *ISIJ International*, Vol.36, No.12, pp.1500-1506
- Sims, R. B., 1954, The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills, *Proc. Instn. Mech. Engineers*, Vol. 168, pp. 191-219.

- Tarokh M. and Seredynski, F.**, 1970, Roll Force Estimation In Plate Rolling, *J. of Iron Steel Inst.*, JISI, Vol., 208(7), pp. 695-700,
- Taşkın, A.**, 1991, Hadde Sıçraması ve Şerit Hadde Çıkış Kalınlığı Hesaplanması 2. Sıcak Haddehane İşletme Mühendisi Notları, EDÇİ, Ereğli
- Tozlu, İ.**, 1992, Yassı Çelik Mamullerin Sıcak Haddelenmesinde Haddelenme Yükünün Hesaplanmasında Kullanılan Metodların İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uzunoğlu, M., Kızıl, A., Onar, Ö. Ç.**, 2002, MATLAB 6.0-6.5, Türkmen Kitabevi, İstanbul
- Vladimir, G. G.**, 1989, Steel Rolling Technology, Theory and Practice, International Rolling Mill Consultants, Inc, Pittsburg, Pennsylvania.
- Yılmaz, M.**, 1988, Metallerin Haddelenmesi, T.D.Ç.İ. Eğitim yayınları, Ankara
- Yüksel, İ.**, 1996, Matlab ile Mühendislik Sistemleri Analizi ve Çözümü, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, Bursa
- Zorlu, A.**, 2002, Pnömatik Bir Sistemin Deneysel Modellenmesi Ve Simülasyonu, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



EK A. YAPILAN PROGRAMLAR

A.1. Basamak Cevabı Modeli İçin Matlab'de Yazılan Program

Kütük sıcaklığı için verilmiştir giriş ve çıkışlar ayarlanarak diğerleri de bulunur.

```
cho off
load roll_mod.txt
pause
%
x4=roll_mod(71:250,11);%T entry
x6=roll_mod(71:250,16);%energy
x=[x4 x6];
y=roll_mod(71:250,12);% Çıkış Sıcaklığı
%
[ax,mx,stdx] = autosc(x);
pause
%
mx =[0 0];
sx = scal(x,mx,stdx);
n = 5;
[xreg,yreg] = wrtreg(sx,y,n);
pause
%
ninput = 2;
plotopt = 2;
[theta,yres] = mlr(xreg,yreg,ninput,plotopt);
%
theta = scal(theta,mx,stdx);
pause
%
nout = 1;
delt = 1;
model = imp2step(delt,nout,theta);
%
plotstep(model)
pause
newx4=roll_mod(251:300,11);
newx6=roll_mod(251:300,16);
newx=[newx4 newx6];
newy=roll_mod(251:300,12);
[newxreg,newyreg] = wrtreg(newx,newy,n);
ypred = validmod(newxreg,newyreg,theta,plotopt);
save tetasic.dat theta -ascii
echo off
```

A.2. Ampirik Model İçin Matlab'de Yazılan Program

Kütük sıcaklığı için verilmiştir giriş ve çıkışlar ayarlanarak diğerleri de bulunur.

```
clear all
ns=71;
n=250;
m=n-ns+1;
nm=60;
a3=0.52917e-5;
td=100;
gen=970;
kal=200;
boy=6000;
% veri okuma
load e:\tez\roll_mod.txt
%
Ws=roll_mod(ns:n,4);
Ps=roll_mod(ns:n,2);
dr=roll_mod(ns:n,5);
hc=roll_mod(ns:n,7);
T=roll_mod(ns:n,11);
D=roll_mod(ns:n,13);
df=roll_mod(ns:n,9);
Gs=roll_mod(ns:n,17);
Tci=roll_mod(ns:n,12);
Power=roll_mod(ns:n,16);
% hesaplama
wm=2*pi*nm/60;
Vs=gen*kal*boy;
for i=1:m
G(i)=Gs(i);
Rr(i)=D(i)/2;
h(i)=dr(i)+hc(i);
r(i)=(h(i)-hc(i))/h(i);
lamda(i)=wm*(Rr(i)/hc(i))^0.5*((1-r(i))/r(i))^0.5*log(1/(1-r(i)));
fi1=pi*(hc(i)/Rr(i))^0.5*log(1-r(i))/8;
fi(i)=tan((fi1+0.5*atan(r(i)/(1-r(i))))^0.5)*(hc(i)/Rr(i))^0.5;
alfa(i)=acos(1-(h(i)-hc(i))/(2*Rr(i)));
Y(i)=hc(i)*(1+2*Rr(i)*(1-cos(fi(i)))/hc(i));
Qg(i)=0.5*alfa(i)-fi(i);
Qp(i)=pi/4+(Rr(i)*dr(i))^0.5/(2*(h(i)+hc(i)));
Ty(i)=T(i)/1000;
t(i)=(Vs/(Rr(i)*wm*Ws(i)))/hc(i);
E(i)=Gs(i)*t(i);
Pf(i)=Ps(i);
df(i)=df(i);
kp(i)=Pf(i)/((Rr(i)*(h(i)-hc(i)))^0.5*Qp(i)*Ws(i));
kg(i)=G(i)/(2*Rr(i)*D(i)*Qg(i)*Ws(i));
DT(i)=T(i)-Tci(i);
u1(i)=1/Ty(i)^2;%kuvvet ve moment
u2(i)=r(i)^0.5;%kuvvet ve moment
u3(i)=r(i)^0.5/Ty(i);%kuvvet ve moment
```

```

u4(i)=r(i)^0.5*log(lamda(i));%kuvvet ve moment
u5(i)=Pf(i)/Ws(i);%hadde sıçraması
u6(i)=Pf(i);%hadde sıçraması
u7(i)=-Vs*((T(i)/1000)^4)*t(i)/hc(i);%Sıcaklık
u8(i)=Vs*((T(i)/1000)^5)*t(i);%Sıcaklık
u9(i)=E(i);%Sıcaklık

end

z=[DT' zeros(size(u7')) u7' u8' u9'];
th1=arx(z,[0 1 1 1 1 0 0 0]);
present(th1)
[A,B1]=th2arx(th1);
DTc=idsim([zeros(size(u7')) u7' u8' u9'],th1);
Tch=T-DTc;
yres=Tch-Tci;
subplot(211);
plot(1:m,Tci,1:m,Tci,'or',1:m,Tch,1:m,Tch,'+g');
title('Actual value (o) versus Predicted Value (+)');
xlabel('Sample Number');
ylabel('Output(DT)');
subplot(212)
plot(yres);
title('Output Residual or Prediction Error');
xlabel('Sample Number');
ylabel('Residual');
pause

save B1.dat B1 -ascii

```

A.3. Optimizasyon Programı

```

echo off;
x0=[37.56 33.12 30.6 28.12 21.84]
options = optimset('LargeScale','off','Display','iter');

lb = 15*ones(5,1); % Lower bounds  $X \geq 0$ 
ub = 38*ones(5,1); % No upper bounds
%pause
[x,fval,exitflag,output] =
fmincon('obj_hadde',x0,[],[],[],[],lb,ub,'con_hadde',options);
%[x,fval,exitflag,output] =
fmincon('obj_hadde',x0,[],[],[],[],[],[],'con_hadde',options);

x
%pause % Strike any key to continue
fval
%pause % Strike any key to continue
% Both the constraints are active at the solution:
[c, ceq] = con_hadde(x);
%pause % Strike any key to continue
output.funcCount

```

Kısıtları Veren Alt Program

```
function [c, ceq] = con_hadde(x)
% Nonlinear inequality constraints:
load P_Force.dat
load P_Torque.dat
load P_Temp.dat
load P_Def.dat
load Z_Force.dat
load Z_Torque.dat
load Z_Temp.dat
load Z_Def.dat
h=zeros(1,6);
h(1)=162;
h(6)=35;
Wt=1056;
R=1000.4;
V=6.2e8;
w=2*pi;

for i=1:5;
    Z_Force(1)=x(i);
    y_force(i)=P_Force*Z_Force;
    Z_Torque(1)=x(i);
    y_torque(i)=P_Torque*Z_Torque;

    t(i)=(V/(R*w*Wt))*(1/h(i));
    Z_Temp(2)=y_torque(i)*t(i);
    En(i)=y_torque(i)*t(i);
    y_temp(i)=P_Temp*Z_Temp;

    Z_Def(1)=y_force(i);
    Z_Def(2)=y_force(i)/Wt;
    y_def(i)=P_Def*Z_Def;

    Z_Force(2)=y_temp(i);
    Z_Torque(2)=y_temp(i);
    Z_Temp(1)=y_temp(i);
    if i<=3
        h(i+1)=h(i)-x(i);
    else if i==4
        h(5)=h(6)+x(5);
    end
end
end

c=[(y_temp-1200)';(y_force-2100)';(y_torque-210)';(1090-y_temp)';(1080-
y_force)';(105-y_torque)';(h-165)';(-h+32)';(x-40)';(-x+10)'];
% no nonlinear equality constraints:
ceq = [(sum(x)-129.92)];
```

Maliyet Fonksiyonunu Veren Alt Program

```
function f = obj_hadde(x)
% objective function

load P_Force.dat
load P_Torque.dat
load P_Temp.dat
load P_Def.dat
load Z_Force.dat
load Z_Torque.dat
load Z_Temp.dat
load Z_Def.dat

h(1)=162;
Wt=1056;
R=1000.4;
V=6.2e8;
w=2*pi;
    for i=1:5;
Z_Force(1)=x(i);
y_force(i)=P_Force*Z_Force;
Z_Torque(1)=x(i);
y_torque(i)=P_Torque*Z_Torque;

t(i)=(V/(R*w*Wt))*(1/h(i));
Z_Temp(2)=y_torque(i)*t(i);
En(i)=y_torque(i)*t(i);
y_temp(i)=P_Temp*Z_Temp;

Z_Def(1)=y_force(i);
Z_Def(2)=y_force(i)/Wt;
y_def(i)=P_Def*Z_Def;

Z_Force(2)=y_temp(i);
Z_Torque(2)=y_temp(i);
Z_Temp(1)=y_temp(i);

h(i+1)=h(i)-x(i);
end

W1=1;
W2=1;
for i=1:5;
f(i)=W1*t(i)+W2*En(i);
end

f=f(1)+f(2)+f(3)+f(4)+f(5);
```

ÖZGEÇMİŞ

Ertan ÖZNERGİZ 1961 yılında Adana’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adana’da tamamladı. 1979 yılında, Adana Seyhan Işık Lisesi’nden mezun oldu. Aynı sene İTÜ Makina Fakültesi Genel Makina Bölümü’ne girip 1984 yılında Genel Makina Bölümü Kuvvet ve Isı Kolu’ndan mezun oldu. 1984 yılı kış döneminde İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programı Hazırlık Sınıfı’na başladı. 1988 yılı Mart ayında Yüksek Lisans eğitimini tamamlayarak yedek subay olarak askerlik görevine başladı. Askerliğini, Ankara İnşaat Emlak Daire Başkanlığı’nda Kontrol ve Proje Mühendisi ve Asteğmen olarak yaptı. 1989 Ağustos ayında askerliğini tamamladı. 1991 yılı kış döneminde İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Programı’nda doktora eğitimine başladı. 1986 yılı Ocak ayından itibaren İ.T.Ü. Makina Fakültesi Otomatik Kontrol Birimi’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

