

## Sıcak haddeleme prosesinin deneysel modellenmesi

Ertan ÖZNERGİZ\*, Can ÖZSOY

İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Otomatik Kontrol Birimi, 34437, Gümüşsuyu, İstanbul

### Özet

*Bu çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak, sıcak haddeleme prosesinde haddeleme kuvveti, momenti, kütük sıcaklığı ve hadde sıçraması için deneysel modelleme yapıldı. Basamak cevabı formunda olan bu modelde haddeleme kuvveti ve momenti için paso, giriş sıcaklığı, kütük genişliği, hadde çapı ve karbon eşdeğeri; kütük sıcaklığı için giriş sıcaklığı ve enerji; hadde sıçraması için de paso, kuvvet ve kütük genişliğini kullanarak daimi rejim değerlerini hesaplamaktadır. İkinci olarak, dinamik model ile sıcak haddeleme proseslerinde yaygın olarak kullanılan ve katlı lineer regresyon yöntemini kullanan klasik ampirik modeller karşılaştırıldı. Modelleri geliştirmek için kullanılan veriler, Ereğli Demir Çelik Fabrikaları 2. sıcak haddehanesi tersinir kaba haddeleme tezgahından sağlanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel modelleme, tanılama, sıcak haddeleme.

### Experimental modeling for hot rolling system

#### Abstract

*This study consists of two 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, temperature and deflection. In this study; for roll force and roll torque models; draft, temperature, slab width, roll diameter, carbon equivalent, for temperature model; temperature and energy, for deflection model; draft, roll force and slab width are used as input. The step response model parameters are estimated via recursive least square (RLS) estimation algorithm by using input information related to the past. In the second part, the proposed dynamical models are compared with the classical empiric models commonly used by several author in the rolling practice. It has included mathematical models relating rolling force and torque to the deformation resistance of the work piece in the roll gap; models of heat transfer via radiation, convection and conduction processes and for the deflection model rolling mill force and slab width are used. For empiric model, Sims' formulae, in discrete-time form with multiple linear regressions method is used. The experimental data obtained from Ereğli Iron and Steel Factory was used for developing both of the models.*

**Keywords:** Experimental modeling, identification, hot rolling process.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ertan ÖZNERGİZ. oznergiz@itu.edu.tr; Tel: (212) 292 68 22.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Makina Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Kalınlık kontrolü için sıcak haddeleme prosesinin modellenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.05.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 18.08.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Bir prosesin matematiksel modeli, sonuçların önceden tahmini için gerekli bir araçtır. Matematiksel haddeleme modelleri haddeleme kuvveti, moment, kütük sıcaklığı ve hadde sıçramasının önceden tahmini ile ilgilidir. Haddeleme prosesi matematiksel modellerinin deneysel doğrulanması için çeşitli araştırmacılar tarafından oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır (Sims, 1954; Orowan, 1943; Hitchcock, 1935; Schultz ve Smith, 1965; Ford ve Alexander, 1964). Bu araştırmalar sonucunda güvenli ve kesin bir matematiksel model elde edilememiştir ve bunların çoğu ampirik yapıdadır. Üstelik bu modellerin katsayıları belirli bir malzeme, hadde tezgahı ve deneyin yapıldığı zaman için belirlenmiştir. Bu modellerdeki katsayılar haddeleme prosesi için adaptif kontrollerin kullanılmasıyla geçerleştirilebilir (Ruddle vd., 1983; Özsoy vd., 1992; Özsoy, 1993). Erdemir 2. Sıcak haddehanesi otomasyon sisteminde, sistem parametrelerini adaptif olarak güncelleştirmek için, Sims'in ve Alexander-Ford'un matematiksel kuvvet modelleri ya doğrudan veya değiştirilmiş halleri ile kullanılmaktadır. Oluşturulmuş olan bu adaptif modeller oldukça karmaşıktır ve yüklü bir maliyeti beraberinde getirmektedir (Sezer, 1999; İnceyan, 1989; Mielnik, 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 parametrelerinin 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 parametrelerin 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)) kullanılmalıdır. Bu durumda zaman içinde giriş ve çıkış değerleri değiştiğinde model de değişecek ve sürekli olarak kendini yenileyecektir (Özsoy, 1993).

## Sıcak haddelemenin ampirik modeli

Bu kısımda çalışmalarımızda kullandığımız ampirik ve teorik ifadeler açıklanacaktır

### Sıcak haddeleme de kuvvet ve momentin ampirik modeli

Bu bölümde, literatürde bahsedilen ampirik modellerden derlenen ve çeşitli araştırmacılar tarafından daha iyi sonuçlar verdiği saptanan ampirik modeller verilecektir. Haddeleme prosesini tanımlayan, hadde yükü ve momentini için, sistem denklemleri ayrık zamanlı olarak aşağıdaki gibi verilebilir. Bu hesaplama da Sims formülleri kullanılmaktadır.

i. geçiş için hadde kuvveti (ton) ifadesi:

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

i. geçiş için hadde momentini (kkgm) ifadesi:

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

burada  $R$  hadde yarı çapı (mm),  $R'$  yassılaştırılmış hadde yarı çapı (mm),  $h_i$  ve  $h_{i+1}$  haddelenmiş kütüğün giriş ve çıkış kalınlıkları (mm),  $\delta_i = h_i - h_{i+1}$  ezme miktarı (paso) (mm),  $k_{pi}$  ve  $k_{gi}$  sırasıyla kuvvet ve moment için uzama akma

gerilmesinin ortalama değerleri ( $\text{kg/mm}^2$ ), ve,  $Q_{pi}$  ve  $Q_{gi}$  geometrik fonksiyonlardır ( $R'$  ve  $h_i$  değerlerine bağlı). Kuvvet ve moment ifadelerindeki geometrik olmayan değişkenler sadece malzemenin deformasyon direnci ve dolayısıyla ortalama akma gerilmeleridir ( $k_{pi}$  ve  $k_{gi}$ ).

Ortalama akma gerilmeleri, kütüğün haddeye giriş ve haddeden çıkış kalınlıkları, sıcaklığı ve ortalama deformasyon hızının fonksiyonu olarak (Tarokh ve Seredynski, 1970) verilmektedir. Ortalama akma gerilmesi katsayıları, yukarıdaki denklemlerden (1 ve 2) hadde yükü ve momentini hesaplayabilmek amacıyla haddeleme sisteminde elde edilen deneysel verileri kullanarak ortalama akma gerilmelerinin katlı lineer regresyonu ile elde edilmektedir. Bu durumda Tarokh ve Seredynski tarafından verilen kuvvet ve moment için ortalama akma gerilmeleri ifadeleri aşağıda verilmektedir.

$$k_{pi} = b_1 + b_2 \frac{1}{T_i^2} + b_3 \sqrt{r_i} + b_4 \frac{\sqrt{r_i}}{T_i} + b_5 \sqrt{r_i} \log_e(\lambda_i) \quad (3)$$

$$k_{gi} = b_6 + b_7 \frac{1}{T_i^2} + b_8 \sqrt{r_i} + b_9 \frac{\sqrt{r_i}}{T_i} + b_{10} \sqrt{r_i} \log_e(\lambda_i) \quad (4)$$

burada  $i$ . geçiş için, giriş sıcaklığı  $T_i$  ( $^{\circ}\text{C}/1000$ ), ezme oranı  $r_i$  ve ortalama deformasyon hızı  $\lambda_i$  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 1 ve 2) elde edilen  $k_{pi}$  ve  $k_{gi}$  sayısal değerlerinin katlı lineer regresyonu ile elde edilmektedir. Ortalama şekil değiştirme hızı için Sims' tarafından önerilen ifadeler,  $n_m$  haddenin devir sayısı (rpm) ve  $r_i$  ezme oranı olmak üzere aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\lambda_i = \frac{2\pi n_m}{60} \sqrt{\left(\frac{R'}{h_{i+1}}\right)} \sqrt{\left(\frac{1-r_i}{r_i}\right)} \log_e\left(\frac{1}{1-r_i}\right), \quad (5)$$

$$r_i = \frac{h_i - h_{i+1}}{h_i} \quad (6)$$

Sims formüllerinde kullanılan basitleştirilmiş geometrik fonksiyon ifadeleri aşağıdadır (Ozsoy vd., 1994):

$$Q_{pi} = \frac{\pi}{4} + \frac{\sqrt{R(h_i - h_{i+1})}}{2(h_i + h_{i+1})}, \quad (7)$$

$$Q_{gi} = \frac{\alpha_i}{2} - \theta_i, \quad (8)$$

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

$$\alpha_i = \arccos\left(1 - \frac{h_i - h_{i+1}}{2R'}\right), \quad (9)$$

$$\theta_i = \tan\left[\frac{\pi}{8} \left(\frac{h_{i+1}}{R'}\right)^{1/2} \log_e(1 - r_i) + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{r_i}{1 - r_i}\right)\right]^{1/2} \times \left(\frac{h_{i+1}}{R'}\right)^{1/2} \quad (10)$$

şeklinde verilmektedir. Sıcak haddeleme prosesinde yaklaşık olarak  $R' = R$  şeklinde kabul etmek, sonuçları fazla etkilememektedir.

### Sıcaklık değişimini veren ampirik model

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

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

Burada  $T_i$  kütüğün haddeye giriş sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_i$  haddelemenin bir geçişi için gerekli süre (s),

$E_i$  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, merdenenin açılma hızı ve kütüğün boyutlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Lopresti ve Patton, 1967):

$$t_i = t_d + \left( \frac{V_s}{R\omega_m w} \right) \frac{1}{h_{i+1}}, \quad (12)$$

burada açılma hızı:

$$\omega_m = \frac{2\pi n_m}{60} \quad (13)$$

ve  $t_d$  iki geçiş arasında hadde stroku ayarı ve geri besleme için geçen süre (s),  $V_s$  kütük hacmi ( $\text{mm}^3$ ),  $R$  hadde yarı çapı (mm),  $\omega_m$  merdenenin açılma hızı ( $\text{rad s}^{-1}$ ),  $w$  kütüğün genişliği (mm), ve  $n_m$  hadde devir sayısı (rpm) şeklindedir.

Her bir geçiş için gerekli enerji miktarı basit olarak aşağıda verilmiştir:

$$E_i = 2a\omega_m G_i(t_i - t_d) \quad (14)$$

Bu ifadedeki  $a$  sabit bir faktör olup hadde tezgahının elektrik sisteminin verimi ile birim dönüşümünden dolayı meydana gelen etkiyi içermektedir. Buradaki katsayı  $a=0.5291 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{kWcm h}^{-1}\text{W}^{-1}\text{cm s}^{-1}$ ) olarak alınmıştır.

#### 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.

$$d_i = h_{i+1} - s_i \quad (15)$$

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).

$$d_i = b_{14} + b_{15} (P_i/w_i) + b_{16} P_i \quad (16)$$

burada  $w_i$ , kütüğün haddeye girişteki genişliğini vermektedir. Bu ifadede son terim küçük değerler verdiği için genellikle ihmal edilebilir.

#### Sıcak haddelemenin dinamik modeli

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

$$y(t) = \sum_{j=1}^n g_j \Delta u(t-j), \quad (17)$$

Bu ifadede kullanılan büyüklükler aşağıdaki gibi izah edilebilir:

$n$ , model derecesi (simülasyon çalışmalarında 6 olarak saptandı);  $\Delta u(t)$ , giriş vektörü;  $g_j$ , hesaplanan model sabitleri ve

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \quad (18)$$

şeklinde verilmektedir. Giriş vektörü, kuvvet ve moment modeli için paso, sıcaklık, genişlik, hadde çapı, karbon eşdeğeri bileşenlerini içeren  $5 \times 1$ 'lik bir vektör, sıcaklık modeli için giriş sıcaklığı ve enerji bileşenlerini içeren  $2 \times 1$ 'lik bir vektör, hadde sıçraması için, ezme miktarı, kuvvet, malzeme genişliği bileşenlerini içeren  $3 \times 1$ 'lik vektördür.

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

$$y(t+k/t) = \sum_{j=1}^n g_j \Delta u(t+k-j/t), \quad (19)$$

$$y = \Theta X \quad (20)$$

$\Theta$ , ardışık en küçük kareler yöntemi (RLS) ile hesaplanan bütün parametreleri içeren parametre vektörü;  $X$ , geçmiş ile ilgili bütün giriş bilgilerini içeren gözlem vektörüdür.

#### 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.

### Tanılama sonuçları

Haddeleme kuvveti, momenti, hadde sıçraması ve kütük sıcaklığına ait önerdiğimiz modelleri gerçekleştirmek için yapılan programlar sonucunda elde ettiğimiz tanılama sonuçları bu kısımda verilmiştir. Tanılama çalışmalarında programlama dili olarak MATLAB (Matrix Laboratory) paket programı kullanılmıştır. Matlab yüksek performanslı sayısal hesaplama ve grafik oluşturma ve görüntüleme işlemleri için teknik hesaplama ortamları sunmaktadır.

Deneysel modelleme için gerekli olan veriler Erdemir 2. Sıcak haddehanedeki tersinir kaba hadde tezgahından alınmıştır. Eldeki toplam 46 kütüğe ait 230 adet veriden 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.

Tanılama sonuçlarını veren diyagramlarda üst kısımda model sonuçları, alt kısımda ise model hataları verilmektedir. Model sonuçlarından hesaplanan değerler (+ ile) ölçülen değerler (o ile) ve bu iki değer arasındaki farklar ise alt kısımdaki diyagramda gösterilmektedir.

Şekil 1’de hadde kuvveti için ampirik model (a) ile geçerlilik (c) sonuçları, ve dinamik model (b) ile geçerlilik (d) sonuçları verilmektedir. Moment, kütük sıcaklığı ve hadde sıçramasına ait ampirik model ile geçerlilik sonuçları Şekil 2’de, dinamik model ile geçerlilik sonuçları da Şekil 3’de verilmektedir. Bu şekillerde a ve b haddeleme momentlerini, c ve d kütük sıcaklıklarını, e ve f de hadde sıçramasını göstermektedir.

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 17 adet regresyon sabiti hesaplanmıştır. Bu katsayılar Tablo 1’de verilmektedir.

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. Buradan bulunan  $\Theta$  parametreleri aşağıda matris formunda verilmektedir:

$$\Theta_{kuvvet} = \begin{bmatrix} -0.0056 & 0.0022 & 0.0012 & -0.0008 & -0.3755 \\ -0.0030 & 0.0002 & 0.0001 & -0.0007 & 2.4141 \\ -0.0088 & 0.0004 & -0.0002 & 0.0003 & -8.2318 \\ -0.0104 & -0.0003 & 0.0003 & -0.0000 & 8.3800 \\ -0.0115 & -0.0009 & 0.0003 & 0.0002 & 6.5154 \end{bmatrix} \quad (21)$$

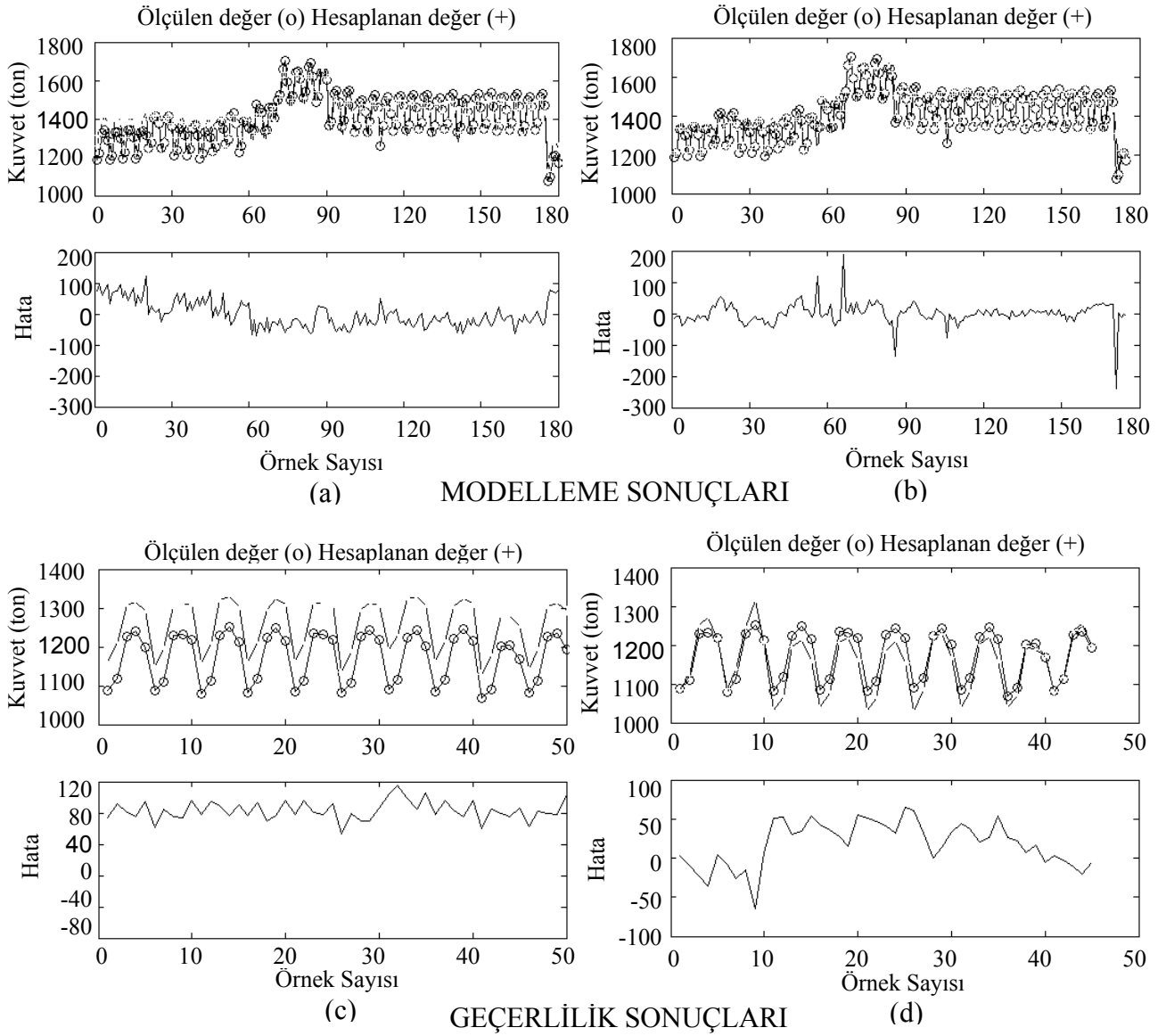
$$\Theta_{moment} = \begin{bmatrix} -0.0023 & 0.0004 & 0.0001 & -0.0001 & -0.0725 \\ -0.0021 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.2637 \\ -0.0027 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.6169 \\ -0.0030 & -0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0943 \\ 0.0004 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.3970 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\Theta_{sıcak} = \begin{bmatrix} 0.4249 & 0.0082 \\ 0.2705 & -0.0055 \\ 0.0514 & -0.0003 \\ -0.1194 & 0.0022 \\ 0.3495 & -0.0032 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Theta_{sıçrama} = \begin{bmatrix} 0.0150 & 0.0018 & 0.0005 \\ 0.0072 & -0.0003 & 0.0011 \\ -0.0052 & 0.0011 & -0.0026 \\ 0.0222 & -0.0008 & 0.0014 \\ 0.0124 & 0.0029 & -0.0050 \end{bmatrix} \quad (24)$$

### Sonuçlar ve tartışmalar

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



Şekil 1. Hadde kuvveti için ampirik model (a), geçerlilik testi (c) sonuçları ile dinamik model (b) ve geçerlilik (d) sonuçları

modeli ve benzeri tanımlama 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

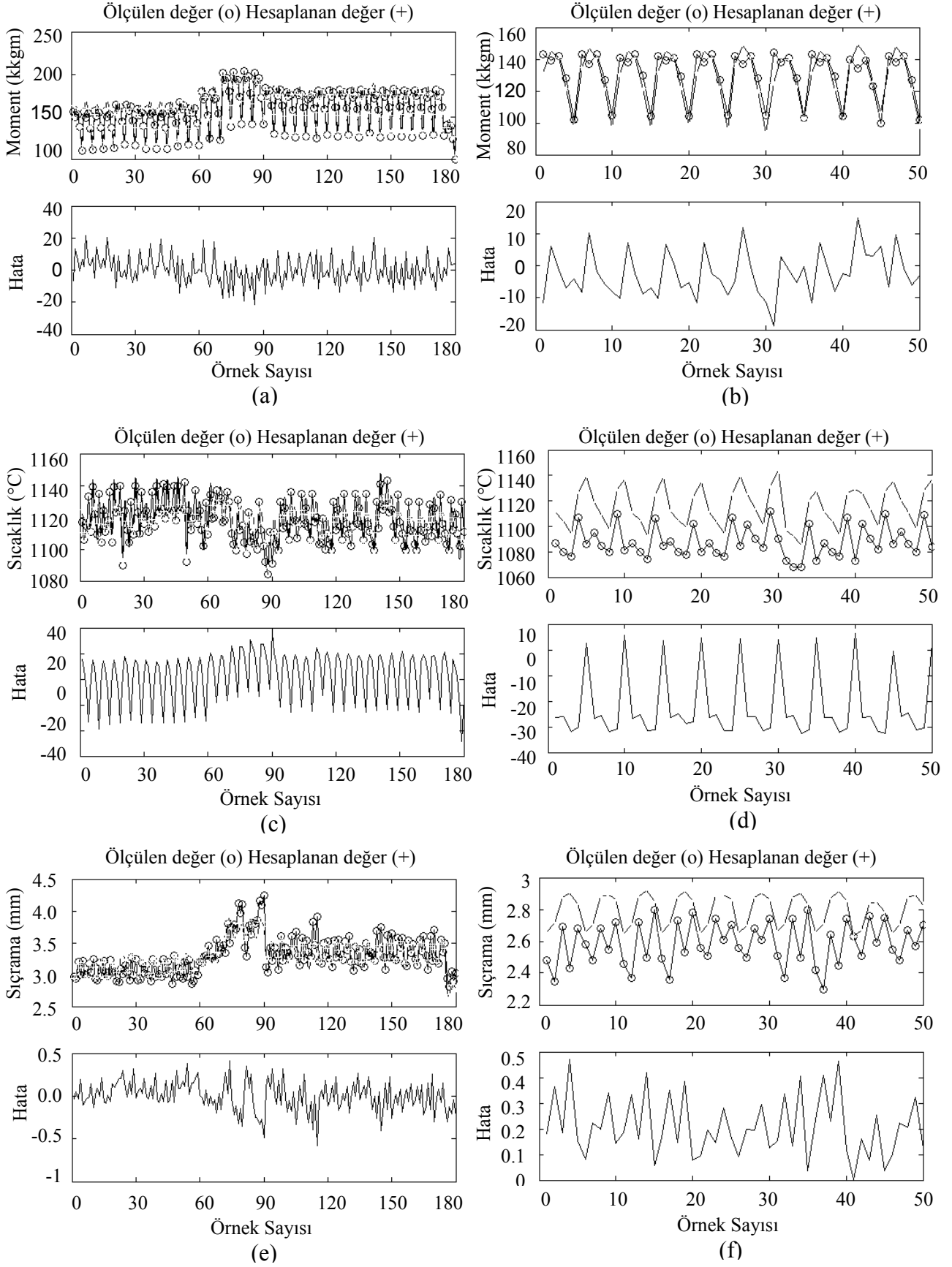
kısaltırlar ve parametreleri hızlı bir şekilde güncelleştirirler;

- Model parametrelerini dinamik olarak güncellenebilmesi dolayısıyla, model esaslı akıllı regülatörlerin dizaynını mümkün kılarlar;

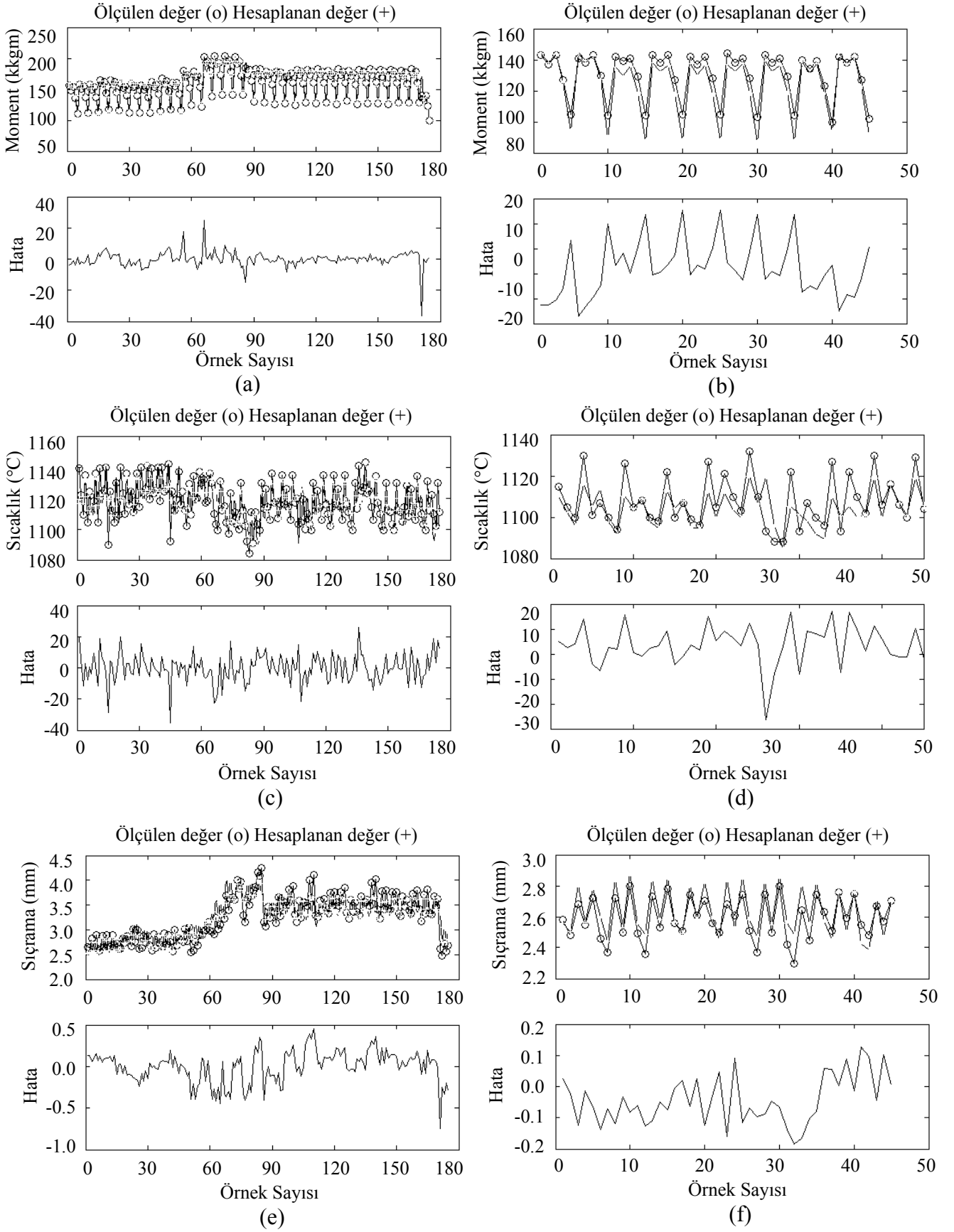
Tablo 1. Ampirik modelde hesaplanan regresyon sabitleri

BÜYÜKLÜK	PARAMETRELER				
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	$b_{11}=0$	$b_{12}=5.655e-8$	$b_{13}=4.28e-9$	$b_{14}=-0.03604$	
Sıçrama	$b_{15}=0.9921$	$b_{16}=-0.997$	$b_{17}=0.002583$		

## Sıcak haddeleme prosesi



Şekil 2. Ampirik model sonuçları (a), (c) ve (e) ile geçerlilik testi sonuçları (b), (d) ve (f)



Şekil 3. Dinamik model sonuçları (a), (c) ve (e) ile geçerlilik testi sonuçları (b), (d) ve (f)



- Dinamik yapıları gelişmiş kontrol uygulamalarını da mümkün kılmaktadır;
- Sistem ve malzeme değişiklikleri gibi proses de meydana gelebilecek planlama değişikliklerine uyum sağlayıp daimi rejim değerlerine yakınsarlar ve parametrelerini güncelleştirebilirler.

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

## Teşekkür

Bu çalışma için gerekli deneysel veriyi sağlayan Ereğli Demir Çelik Fabrikaları bünyesindeki 2. Sıcak haddehanesi yöneticilerine teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- Ford, H. ve Alexander, J. M., (1964). Simplified Hot Rolling Calculations, *Journal of the Institute of Metals*, **92**, 397-404.
- Hitchcock, J. H., (1935). *Roll Neck Bearings*, ASME Research Publication.
- İnceyan, T., (1989). *Haddeleme Tekniğinin Esasları*, **1**, T.D.Ç.İ. Eğitim yayınları, Ankara.
- Ljung, L., (1995). *System Identification*, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden.
- Lopresti, P. V. ve Patton, T. N., (1967). An Optimal Closed Loop Control of a Rolling Mill, *Joint Automatic Control Conference*. New York, 767-777.
- Mielnik, E. M., (1999). *Metal Working Science And Engineering*, McGraw Hill, Newyork.
- Orowan, E., (1943). The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **150**, 152.
- Özsoy, C., Ruddle, G. E., Crawley, A. F., (1992). Optimum Scheduling of A Hot Rolling Process By Nonlinear Programming, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **31**, 3, 217-224.
- Özsoy, C., (1993). A Self-Tuning Thickness Control In Plate Hot Rolling, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **32**, 2, 177-183.
- Özsoy, C., Ruddle, G. E., Crawley, A. F., (1994). Optimization Model of Recrystallization Hot Rolling of Ti-Va Steels, *Journal of Optimization Theory And Applications*, **82**, 1, 77-92.
- Ruddle, G. E., Milliken, K. S., Smelsky, G., Crawley, A. F., (1983). A Pilot Scale Rolling Mill for Process And Material Development, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **22**, 271.
- Schultz, R. G. ve Smith, A. W., (1965). Determination of a Mathematical Model For Rolling Mill Control, *Iron Steel Engineering*, 127.
- Sezer, A., (1999). Çelik Sacların Sıcak Haddelenmesinde Haddeleme Kuvvetinin Deneysel Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sims, R. B., (1954). The Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **168**, 191-219.
- Tarokh, M. ve Seredynski, F., (1970). Roll Force Estimation In Plate Rolling, *Journal of the Iron and Steel Institute*, **208**, 694.