

TEKNİK NOT/TECHNICAL NOTE

ELEKTRİK ARK FIRININDA TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASININ BAZI ÜRETİM PARAMETRELERİNE BAĞLI ANALİZİ

Ünal ÇAMDALI¹, Murat TUNÇ²

ÖZ

Bu çalışmada, çelik üretiminde kullanılan elektrik ark fırınında, sisteme yüklenen enerjinin ve sistemden kayıp olan ısının, gerçek ve tersinir işin, fırın kapak ağzının açık olma süresine ve hurda ön ısıtma sıcaklığına bağlı olan değişimleri, geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrik ark fırını, tersinir iş, ikinci kanun analizi.

THE SECOND LAW ANALYSIS OF THERMODYNAMICS IN THE ELECTRIC ARC FURNACE BASED ON SOME PRODUCTION PARAMETERS

ABSTRACT

In this note, the change of the energy charged into the electric arc furnace (EAF), the heat loss, the actual and reversible work are investigated using a computer program based on production parameters such as the duration, at which the EAF cover is open, and the scrap pre-heating temperature.

Key Words: Electric arc furnace, reversible work, second law analysis.

1. GİRİŞ

1999 yılında Dünyada toplam 770 milyon ton çelik üretilmiştir. Bu üretimin %67'si entegre tesislerde, %33'ü ise elektrik ark fırınlı tesislerde gerçekleştirilmiştir. Aynı yıl ülkemizde 14.3 milyon ton çelik üretilmiştir. Bu üretimin %64'ü yani 9.17 milyon tonu ark fırınına dayalı tesislerde gerçekleştirilmiştir (Şirin, Y., 2000). Bununla birlikte Dünyada üretilen enerjinin yaklaşık olarak %11'i bu sektörde tüketilmektedir (Toyota, S., 1974). Literatürde ark fırınlarında detaylı olarak enerji analizi yapan çalışmalara rastlamak pek mümkün görünmemektedir. Ancak verimli bir ark fırınında bir ton çelik üretimi için harcanan elektrik enerjisinin 344000-387000 kcal (400-450 kW) civarında olduğu ifade edilmektedir (Strohmeier, B., 1988). Dolayısıyla toplam kapasite dikkate alındığında bu fırınlarda yapılan enerji analiz çalışmalarının endüstriyel önemi hem dünya hem de ülkemiz açısından oldukça fazladır.

Bu çalışmada halen endüstride faaliyette bulunan

ve sıvı çelik üretiminde kullanılan elektrik ark fırınında, bazı üretim parametrelerine göre termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları baz alınarak enerji analizi gerçekleştirilmiştir.

SEMBOLLER

- c_p : Sabit basınçtaki özgül ısı (kcal/kg. K)
E : Enerji (kcal)
EAF : Elektrik ark fırını
 h°_0 : Standart oluşum entalpisi (kcal/kg)
 s°_0 : Mutlak entropi (kcal/kg.K)
 T_0 : Atmosfer sıcaklığı (K)
 ψ : Tersinir iş/gerçek iş
Q : Isı (kcal)
W : İş (kcal)

¹ Türkiye Kalkınma Bankası, Necatibey Cad., No:98, Bakanlıklar, 06100, Ankara. E-posta: ucamdali@yahoo.com.
² İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, Gümüşsuyu, İstanbul. E-posta: tunc@burgaz.mkn.itu.edu.tr.

Alt İndisler

a	: Absorbe
ç	: Çıkış
g	: Giriş
ger	: Gerçek
ilt	: İletim
kay	: Kayıp
rad	: Radyasyon
taş	: Taşınım
ter	: Tersinir

2. ELEKTRİK ARK FIRININDA SIVI ÇELİK ÜRETİMİ VE KÜTLE ANALİZİ

Bu yöntemle sıvı çelik üretimi, elektrodlarla hurda arasında düşük gerilim ve yüksek akımla karakterize edilen çok şiddetli ışık kolonu biçiminde meydana gelen ve sıcaklığı yaklaşık olarak 3500-4000 °C de elektriksiz boşalma sonucunda oluşan arkın oluşturduğu ısı enerjisinin radyasyon ve konveksiyon yoluyla transferi sonucunda; fırın içerisine yüklenmiş olan hurdanın eritilmesi esasına dayanmaktadır (Pluckinger, E. ve Etering, O., 1979).

Elektrik ark fırınında ham madde olarak hurdanın yanında alaşımlama, deoksidasyon ve redüklenme aşamalarında yardımcı maddelerde kullanılmaktadır. Dolayısıyla sisteme kütle girişi ve çıkışı ile birlikte enerji girişi ve çıkışı da olmaktadır. Bu bakımdan termodinamik analiz yapmadan önce, kütle analizinin yapılması gerekmektedir (George, W., Healy ve David L., 1982). Bunun için öncelikle, Şekil 1'de şematik resmi verilen 55-57 Ton/Döküm kapasiteli elektrik ark fırınına giren hammadde ve yardımcı maddeler ile fırından çıkan maddelerin kütle miktarları kimyasal analizleri ile birlikte tespit edilmiştir. Bu tespit (1) eşitliğindeki kütle korunumu yasasına göre oluşturulmuş; elde edilen maddelerin sayısal değerleri ise Tablo 1'de gösterilmiştir.

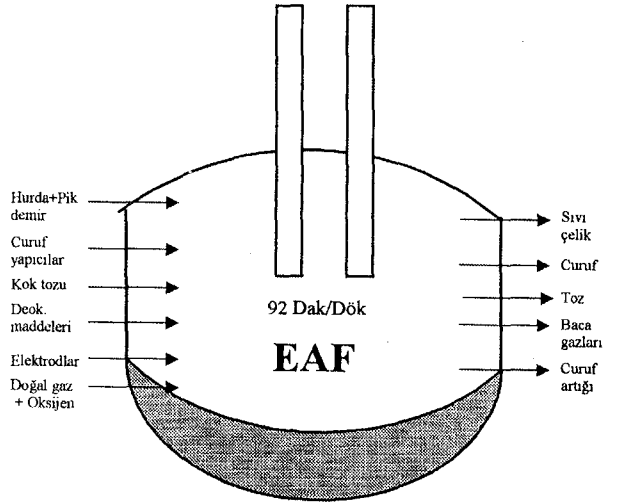
$$\sum m_g = \sum m_{\check{c}} \quad (1)$$

3. TERMODİNAMİK ANALİZ

3.1. Termodinamiğin Birinci Yasası

Termodinamiğin birinci yasası sürekli akışlı-sürekli açık sistem (SASA) kabul edilen ve Şekil 2'de modellenen elektrik ark fırınına potansiyel ve kinetik enerji değişimlerini de ihmal edilerek uygulandığında; fırına verilen gerçek iş miktarı (2) eşitliği ile verilebilir:

$$W_{ger} = \sum m_{\check{c}} h_{\check{c}} - \sum m_g h_g + \sum Q_{kay} \quad (2)$$



Şekil 1. Ark Fırınına Giren ve Çıkan Maddelerin Şematik Gösterimi.

3.2. Elektrik Ark Fırınının İkinci Yasa Çözümlemesi

İş verilerek üretim yapılan sistemlerde sisteme verilen tersinir iş, minimum iştir. Bu iş miktarını bulmak için yukarıda verilen varsayımlara ilaveten aşağıdaki varsayım yapılmıştır:

- Fırında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve kayıp ısı tersinir olarak gerçekleşmektedir.

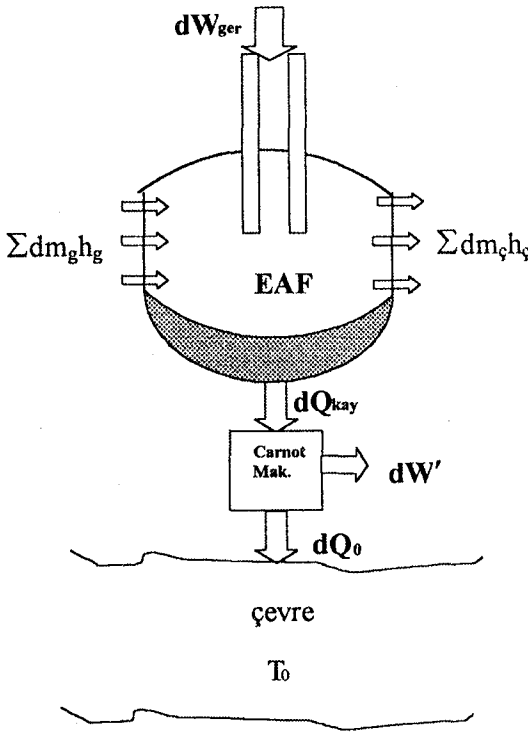
Elektrik ark fırına giren ve çıkan enerjiler Şekil 2'de, entropi dengesi ise Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekillerden yararlanarak termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları fırın için uygulanırsa :

1. Yasa(SASA):

$$dW_{ger} = \sum dm_{\check{c}} h_{\check{c}} - \sum dm_g h_g + dQ_{kay} \quad (3)$$

Tablo 1. Ark Fırını Kütle Dengesi.

Fırından Giren Maddeler		Fırından Çıkan Maddeler	
Madde	Miktarı (kg)	Madde	Miktarı (kg)
Hurda	50800	Sıvı çelik	55750
Pik demir	7400	Curuf	4150
Curuf yapıcılar	2100	Toz	790
Kok tozu	900	Baca Gazları	4440
Deoksidasyon maddeleri	340	Curuf artığı	300
Elektrodlar	150	Toplam	65430
Doğal gaz	160		
Oksijen	3580		
Toplam	65430		



Şekil 2. Elektrik Ark Fırınında Enerji Dengesi.

2. Yasa (Tersinir hal değişimi)

$$\Sigma dm_g s_g = \Sigma dm_ç s_ç + (dQ_{kay}/T)_{ter} \quad (4)$$

$$dQ_{kay} = T \cdot [\Sigma dm_g s_g - \Sigma dm_ç s_ç] \quad (5)$$

Şekil 2'deki Carnot makinasından:

$$dQ_0 = (T_0/T) \cdot dQ_{kay} \quad (6)$$

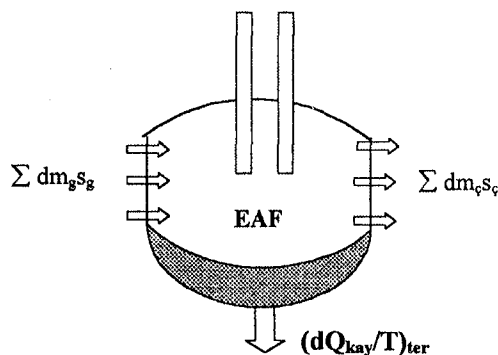
olduğu bilinmektedir. (5) eşitliğindeki dQ_{kay} ifadesi (6) da yerine yazılırsa,

$$dQ_0 = T_0 \cdot [\Sigma dm_g s_g - \Sigma dm_ç s_ç] \quad (7)$$

bulunur. Yine Şekil 2'deki Carnot makinasından,

$$dW' = dQ_{kay} - dQ_0 = dQ_{kay} (1 - T_0/T) \quad (8)$$

elde edilir.



Şekil 3. Sistemin Entropi Dengesi.

3.3. Sisteme Verilmesi Gereken Tersinir İş

Sisteme verilmesi gereken tersinir iş ifadesini aşağıdaki (9) eşitliği şeklinde yazmak mümkündür.

$$dW_{ter} = dW_{ger} - dW' + dQ_0 \quad (9)$$

burada:

dW' : Carnot makinasından elde edilen iştir. Bu iş sisteme tersinir olarak verilmesi gereken işin bir kısmını karşılamaktadır.

dQ_0 : Çevreye transfer edilen kayıp ısı. Bu ısı elektrik enerjisinden karşılanmaktadır.

(9) eşitliğindeki terimlerin yukarıda elde edilen Denklem (3), (7) ve (8) deki ifadeleri yerlerine yazılırsa:

$$dW_{ter} = \{\Sigma dm_ç h_ç - \Sigma dm_g h_g + dQ_{kay}\} - \{dQ_{kay} - (T_0/T) dQ_{kay}\} + \{T_0 \cdot [\Sigma dm_g s_g - \Sigma dm_ç s_ç]\} \quad (10)$$

$$dW_{ter} = \Sigma dm_ç (h_ç - T_0 s_ç) - \Sigma dm_g (h_g - T_0 s_g) + dQ_{kay} \cdot (T_0/T) \quad (11)$$

elde edilir. Bu ifadenin integre edilmiş hali:

$$W_{tnir} = \Sigma m_ç [h^o_ç + \Delta h - T_0(s^o_ç + \Delta s)]_ç - \Sigma m_g [h^o_g + \Delta h - T_0(s^o_g + \Delta s)]_g + \int dQ_{kay} (T_0/T) \quad (12)$$

olarak belirlenebilir. (12) eşitliğinde:

$$\Delta h = h_T - h_{T0} = \int_{T_0}^T c_p \cdot dT \quad (13)$$

$$\Delta s = s_T - s_{T0} = \int_{T_0}^T (c_p/T) \cdot dT \quad (14)$$

şeklinde tanımlanır. Bir çok madde için c_p 'nin T'ye bağlı fonksiyonları deneysel olarak bulunmuştur (Kubaschewski, O., Evans, E.L. ve Alcock, C.B., 1989).

Bununla birlikte (12) eşitliğindeki $\int dQ_{kay}$, (15) eşitliği şeklinde ifade edilebilir.

$$\int dQ_{kay} = \int dQ_{ilt} + \int dQ_{taş} + \int dQ_{rad} + \int dQ_{abs} \quad (15)$$

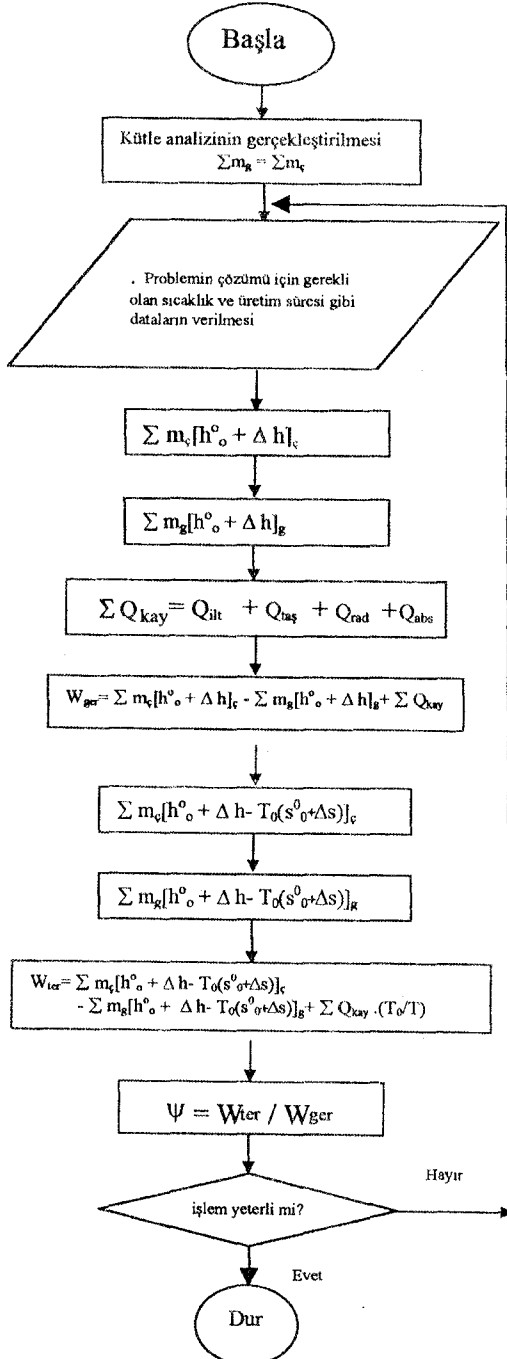
3.4. Gerçek İşin Değerlendirilmesi

Elektrik ark fırınında kullanılan elektrik enerjisinin değerlendirilebilmesi için bu enerjinin, fırına verilmesi gereken tersinir iş miktarı ile karşılaştırılması gerekmektedir. Bu karşılaştırma (16) eşitliği ile tanımlanan bir oran ile yapılmıştır.

$$\psi = W_{ter} / W_{ger} \quad (16)$$

4. BİLGİSAYAR ÇÖZÜMLEMESİ VE BULGULARIN GRAFİKSEL GÖSTERİMİ

Elektrik ark fırınında enerji analizi için Q-Basic dilinde bir program geliştirilmiştir. Bu program önce kütle ve birinci kanun analizini daha sonrada ikinci kanun analizini gerçekleştirmektedir. Programın özet akış diyagramı Şekil 4.'de verilmiştir. Burada program çeşitli parametrelere göre çalıştırılmaktadır. Bu durum *işlem yeterlimi* komutu ile denetlenmektedir. Programın çalıştırılması sonucunda elde edilen sayısal sonuçların grafiksel gösterimi de şekil 5-10' da verilmiştir.



Şekil 4. Bilgisayar Programının Özet Akış Diyagramı.

4.1. Elde Edilen Grafiklerin Yorumu

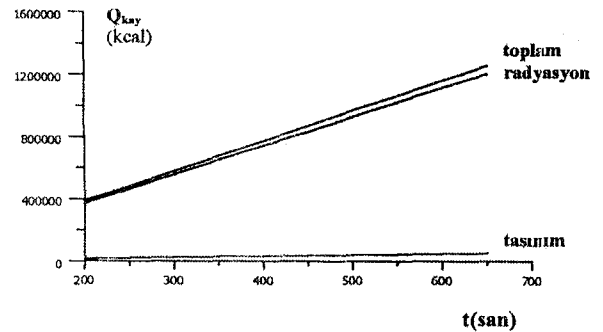
Fırın kapak ağzının açık olma süresi arttıkça fırından radyasyon ve taşınım kaybolarak ısı da artmaktadır. Radyasyonla kayıp olan ısı taşınım kaybolarak ısıya göre oldukça önemli miktardadır (Şekil 5). Bununla birlikte sisteme verilen gerçek ve tersinir iş de artmaktadır (Şekil 6). Ancak gerçek işin artışı tersinir işe göre daha fazla olduğundan Ψ azalmaktadır (Şekil 7).

Hurda ön ısıtma sisteminden çıkan hurdaların sıcaklığı arttıkça doğal olarak sisteme daha fazla enerji taşınmaktadır (Şekil 8). Bu durumda sisteme verilen gerçek ve tersinir iş de azalmaktadır (Şekil 9). Gerçek işin azalışı tersinir işten daha fazla olduğundan Ψ artmaktadır (Şekil 10).

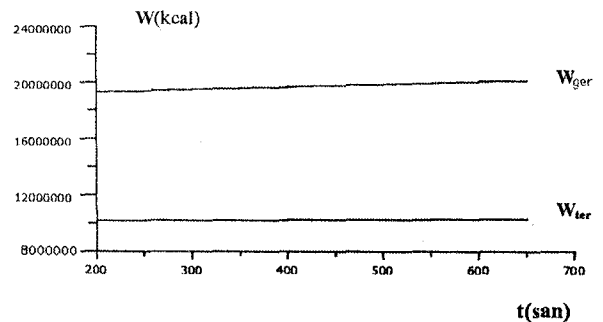
Bu değerlerin doğruluğunun kontrolü için hesap sonucu elde edilen gerçek iş miktarı, firmada bir döküm için fırına harcanan elektrik miktarı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta her iki değer birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ

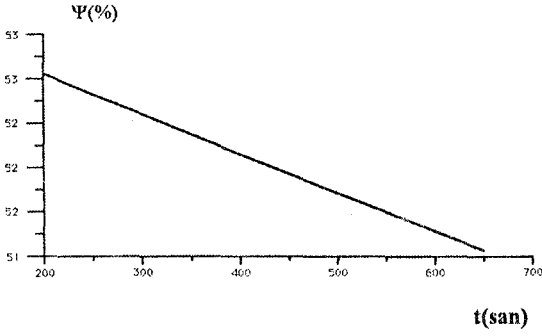
Yukarıda verilen bilgilere göre Dünyadaki benzer kapasitedeki fırınların bir döküm için harcadığı elektrik enerjisi $1.90 \times 10^7 - 2.16 \times 10^7$ kcal arasında değişmek-



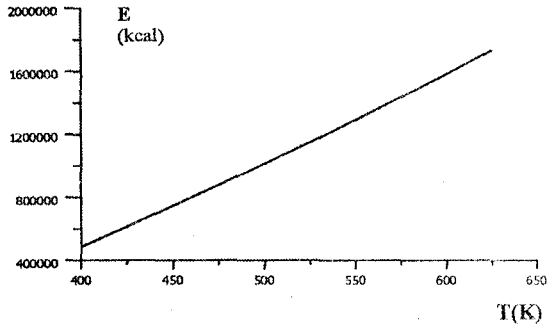
Şekil 5. Fırın Kapağından Radyasyon ve Taşınım Kayıp Isının, Fırın Kapağı Açık Olma Süresine Bağlı Olarak Değişimi.



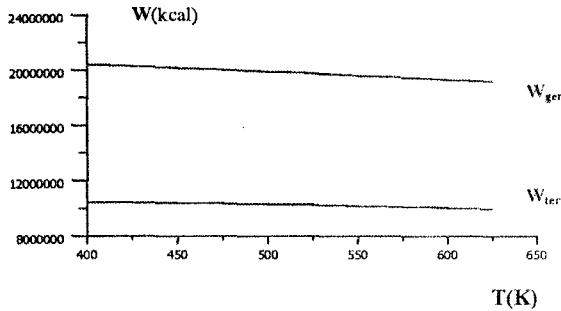
Şekil 6. Gerçek ve Tersinir İşin, Fırın Kapağı Açık Olma Süresine Bağlı Olarak Değişimi.



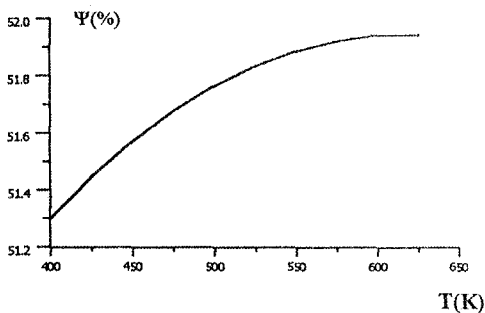
Şekil 7. Ψ 'nin Fırın Kapağının Açık Olma Süresine Bağlı Olarak Değişimi.



Şekil 8. Hurda Ön Isıtma Sıcaklığına Bağlı Olarak Hurdaların Fırına Taşıdığı Enerjinin Değişimi.



Şekil 9. Gerçek ve Tersinir İşin, Hurda Ön Isıtma Sıcaklığına Bağlı Olarak Değişimi.



Şekil 10. Ψ 'nin Hurda Ön Isıtma Sıcaklığına Bağlı Olarak Değişimi.

tedir. Dolayısıyla örnek alınan fırının harcadığı elektrik enerjisinin (gerçek iş olarak tanımlanmıştır) bu değerlerin ortasında olduğu görülmektedir. Bu, işletme için olumlu bir durumdur. Ancak ikinci yasa açısından olaya bakıldığında, sistemdeki hal değişimlerinin ve ısı transferlerinin tersinir olarak gerçekleştirilmesi durumunda sistemden %50 ye varan enerji kazanımları olabilecektir. Ancak yanma reaksiyonları gibi tersinir olmayan olayların bir kısmını ortadan kaldırmak mümkün olmayacaktır. Bununla birlikte, göz önüne alınan ark fırınında hurda şarjı gibi fırın kapağının açılmasını gerektiren koşulların en aza indirilmesi ile sistemden enerji tasarrufu sağlamak mümkün görünmektedir. Bu durum daha büyük hacimli fırınla çalışmakla sağlanacaktır. Ayrıca fırına yüklenecek hurdaların sıcaklığını artırarak, sisteme daha az enerji verilmesi de muhtemel görünmektedir.

KAYNAKÇA

- George, W.H. ve David L. (1982). *Steel Making*, Mc Bride.
- Kubaschewski, O., Evans, E.L. ve Alcock, C.B. (1989). *Metallurgical Thermo-Chemistry*, Pergamon Press.
- Pluckinger, E. ve Ettering, O. (1979). *Electric Furnace Steel Production*, John Wiley&Sons Inc.
- Strohmeier, B. (1988) Development and Present Status of Electric Arc Furnace Steelmaking, *BHM*, 133(1), 9-24.
- Şirin, Y. (2000). Türkiye Demir Çelik Sektörü ve İsdemir'in Özelleştirilmesi, *Dünya Gazetesi*, 23 Ağustos.
- Toyoda, S. (1974). Use of Energy in the Steel Industry During the Past Two Decades, *ISI General Meeting*, Munich.