

Elektrik Ark Fırınında Bir Cins Sıvı Karbon Çeliği Üretimi için Enerji Analizi

Ünal ÇAMDALI

*Türkiye Kalkınma Bankası, Necatibey Cad., No:98,
Bakanlıklar, 06100 Ankara- TÜRKİYE*

Murat TUNÇ

*İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Gümüşsuyu, İstanbul-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 28.11.2000

Özet

Bu çalışmada, alaşımli çelik üretiminde Türkiye’de önemli bir yere sahip olan bir firmada kullanılan elektrik ark fırınında gerçekleştirilen bir cins sıvı karbon çeliği üretimi için termodinamiğin birinci yasası esas alınarak geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla enerji analizi yapılmış ve bu analizin sonuçları verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Enerji analizi, Elektrik ark fırını, Karbon çeliği.

An Energy Analysis for a Type of Liquid Carbon Steel Production in an Electric Arc Furnace

Abstract

In this study, an energy analysis is done for the production of a type of liquid carbon steel in the electric arc furnace of an important alloy steel producer of Turkey, using a computer program based on the first law of thermodynamics, and the results of the analysis are presented.

Key Words: Energy analysis, Electric arc furnace, Carbon steel.

Giriş

Dünyada üretilen enerjinin yaklaşık olarak % 12’sinin Demir-Çelik sektöründe tüketilmesi, bu sektörde kullanılan enerjinin büyüklüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte günümüzde çelik üretiminin artmasıyla birlikte, birim üretim başına harcanan enerji miktarının azaltılması çalışmaları, sektörde harcanan enerjinin büyüklüğü göz önüne alındığında hayli önem kazanmaktadır. Ancak, çelik üretiminde kullanılan enerjinin yaklaşık % 50’si çeşitli nedenlerle kayıp (kullanılabilir enerji

açısından) olmaktadır (Çamdalı, 1998). Bu kayıpların azaltılması için yapılan çalışmalar sonucunda tasarruf edilen enerji miktarı da doğal olarak oldukça yüksek olacaktır.

Bu çalışmada Şekil 1’de şematik şekil verilen elektrik ark fırınında (EAF) gerçekleştirilen ve fırından çıkışı karbon çeliği olarak tanımlanan sıvı çeliğin üretimi için harcanan enerjinin bu fırında nerelerde ve ne miktarda kullanıldığının ve kayıp olduğunun tespiti yapılmıştır. Diğer bir ifadeyle, elektrik ark fırınında gerçekleştirilen genel bir üretim için enerji

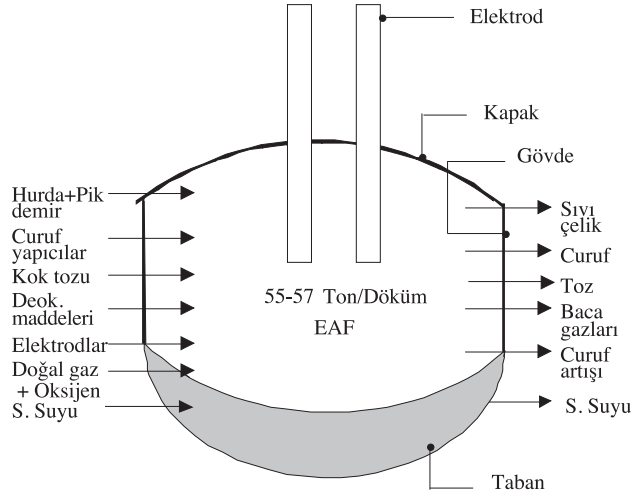
analizi yapan bilgisayar programı Şekil 2’de akış şeması verilen program haline getirilerek, sadece söz konusu sıvı çelik üretimi için çalıştırılmış ve elde

edilen sonuçlar ortaya konmuştur. Üretimi yapılan çeliğin kimyasal bileşimlerinin kütlesi ile birim şarj başına elde edilen miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Elektrik ark fırınında üretilen sıvı çeliğin analizi.

Kimyasal Yapısı	Yüzde (% m_i/m_{TOP})	Üretilen Miktar (kg)	Birim Şarj Başına Çelik Miktarı (kg/kg) (*)
Fe	98,863	55.116	0,8424
C	0,100	56	0,0009
Si	0,050	28	0,0004
Mn	0,360	201	0,0031
P	0,015	8	0,0001
S	0,040	22	0,0003
Cr	0,150	83	0,0013
Ni	0,123	69	0,0011
Mo	0,089	50	0,0008
Cu	0,210	117	0,0018
Toplam	100	55.750	0,8522

(*) : Fırına şarj edilen maddelerin toplam miktarı: 65.424,812 kg dır.



Şekil 1. Elektrik ark fırınının şematik şekli ile fırına giren ve çıkan maddeler.

Termodinamik Analiz

Elektrik ark fırınında termodinamik analiz gerçekleştirilmeden önce aşağıdaki kabuller yapılmıştır (Çengel ve Boles, 1989):

- Ark fırını, sürekli akışlı sürekli açık sistem (SASA) kabul edilmiştir.
- Fırına giren ve fırından çıkan maddelerin kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

- Fırın sabit cidara sahip olduğundan sistem sınırına karşı yapılan iş sıfır alınmıştır.
- Fırına giren ve çıkan maddeler üniform kabul edilmiştir.
- Sıvı çelik ile refrakter tuğlalar arasındaki reaksiyonlar hesaba dahil edilmemiştir.

Yukarıda ortaya konan kabuller dikkate alınarak ark fırınında sıvı çelik üretimi için gerekli olan ısı,

termodinamiğin birinci yasasına göre aşağıdaki (1) eşitliği şeklinde yazılabilir.

$$\Sigma Q_{kh} = \Sigma n_{\zeta} [\bar{h}_{\zeta}^{\circ} + \Delta \bar{h}]_{\zeta} - \Sigma \bar{n}_g [\bar{h}_{\zeta}^{\circ} + \Delta \bar{h}]_g + \Sigma Q_{kay} \quad (1)$$

Burada:

$$\Sigma Q_{kh} = E_{elk} + Q_{egz} + Q_{hurön} \quad (1a)$$

$$\Sigma Q_{kay} = Q_{end} + Q_{ilet} + Q_{taş} + Q_{rady} + E_{abs} \quad (1b)$$

$$\Delta \bar{h} = \bar{h}_T - \bar{h}_{298} = \int_{298}^T \bar{c}_p dT \quad (2)$$

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^{-2} \quad (3)$$

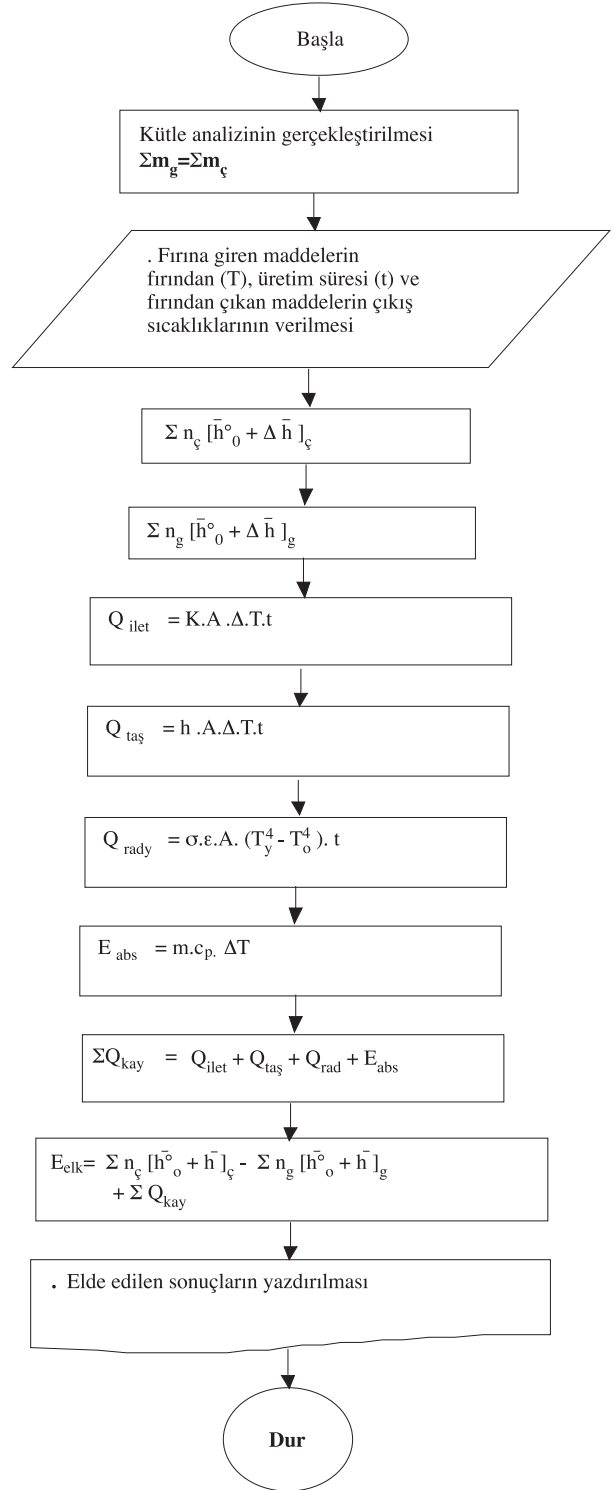
(3) eşitliğindeki a, b ve c katsayıları ile \bar{c}_p ifadeleri bazı maddeler için Tablo 2’de verilmiştir. (1-1b) eşitliklerinde ortaya konan ark fırınına giren, çıkan ve fırından değişik yollarla kayıp olan ısı ve enerji ifadeleri aşağıda belirtilmiştir. Bu ifadeler üretimi yapılan çeliğin mol değerleri de dikkate alınarak bilgisayar programına aktarılmıştır.

Elektrik Ark Fırınına Giren, Çıkan ve Kayıp Olan Isı ve Enerjiler

Sisteme giren enerji ve ısı

Elektrik enerjisi: Fırında arkın oluşmasını sağlayarak çeliğin ergitilmesinde en etkin olan enerjidir. Değeri (1) ve (1a) eşitliklerine göre edilmiş ve elde edilen değer söz konusu üretim için firma kayıtları ile karşılaştırılmıştır.

Kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen ısı: Çelik üretiminde, üretim prosesi boyunca yüksek sıcaklıklarda meydana gelen egzotermik reaksiyonlar sonucunda, ısı açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonlar aşağıda standart halde gösterilmiştir (George ve arkadaşları, 1982; Wiley, 1985).



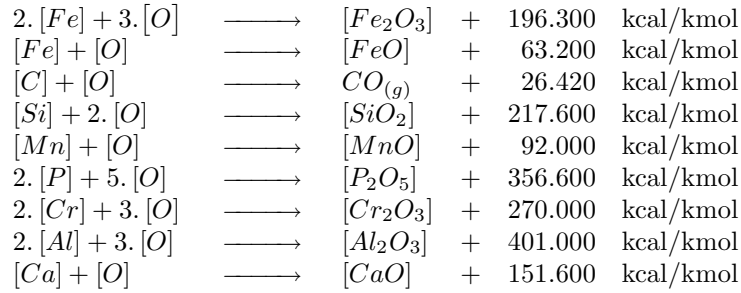
Şekil 2. Bilgisayar programının özet akış diyagramı.

Tablo 2. EAF’da kullanılan bazı maddelere ait özgül ısı (\bar{c}_p) ile a,b ve c katsayıları (Kubaschewski ve arkadaşları, 1989).

Madde	a	b	C	$\bar{c}_p = a + bT + c.T^{-2}$ (kcal/kmol K)
$\langle Fe \rangle_\alpha$	4,18	$5,92 \cdot 10^{-3}$	0	$4,18 + 5,92 \cdot 10^{-3} T$ (273<T<1.033)
$\langle Fe \rangle_\beta$	9	0	0	9 (1.033<T<1.181)
$\langle Fe \rangle_\gamma$	1,84	$4,66 \cdot 10^{-3}$	0	$1,84 + 4,66 \cdot 10^{-3} T$ (1.181<T<1.674)
$\langle Fe \rangle_\delta$	10,5	0	0	10,5 (1.674<T<en)
{Fe}	10	0	0	10 (en<T<1.873)
C	4,1	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$-2,1 \cdot 10^5$	$4,1 + 1,02 \cdot 10^{-3} T - 2,1 \cdot 10^5 T^{-2}$
$\langle Si \rangle$	5,72	$0,59 \cdot 10^{-3}$	$-0,99 \cdot 10^5$	$5,72 + 0,59 \cdot 10^{-3} T - 0,99 \cdot 10^5 T^{-2}$ (298<T<en)
{Si}	6,12	0	0	6,12 (en<T<1.873)
$\langle Fe_2O_3 \rangle_\alpha$	23,5	$18,6 \cdot 10^{-3}$	$-3,55 \cdot 10^5$	$23,5 + 18,6 \cdot 10^{-3} T - 3,55 \cdot 10^5 T^{-2}$ (298<T<950)
$\langle Fe_2O_3 \rangle_\beta$	36	0	0	36 (950<T<1.050)
$\langle Fe_2O_3 \rangle_\delta$	31,7	$1,76 \cdot 10^{-3}$	0	$31,7 + 1,76 \cdot 10^{-3} T$ (1.050<T<1.873)

$\langle \rangle$: katı-fazı $\{ \}$: sıvı-fazı
 $\langle \rangle_\alpha$: α -fazı $\langle \rangle_\beta$: β - fazı
 $\langle \rangle_\gamma$: γ - fazı $\langle \rangle_\delta$: δ - fazı
en : ergime noktası

Elektrik ark fırınında meydana gelen standart egzotermik reaksiyonlar:



Hurda ön ısıtma enerjisi: Hurdalar fırına yüklenmeden önce, bir önceki üretim sırasında fırından çıkan sıcak gazların yardımı ile ön ısıtma işleminden geçmektedir. Hurdaya yüklenen enerjinin miktarı, hurdayı oluşturan her bir element için (2) ve (3) eşitliklerine göre hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir.

Sistemden çıkan enerji ve ısı

Ark fırını tabanında absorbe edilen enerji:

Elektrik ark fırını, belirli zamanlarda periyodik olarak bakım ve tamir işlemleri için durdurulup soğutulmaktadır. Dolayısıyla, bu işlemlerden son-

raki ilk dökümde fırın tabanı daimi rejim haline gelinceye kadar çok önemli miktarda enerjiyi absorbe ettiğinden, bu dökümde fırına verilen enerji diğer dökümlere göre oldukça yüksek olmaktadır. Ancak enerji hesapları ortalama döküm başına yapıldığından, birinci dökümde sisteme verilen bu enerji, fırının yeniden durdurulmasına kadar geçen süre zarfında gerçekleştirilen döküm sayısına bölünmüştür. Elde edilen değer bir döküm için harcanan ortalama enerji miktarına eklenmiştir. Bu işlem yapılmamış olsaydı, fırına birinci dökümde daha fazla, diğer dökümlerde daha az enerjinin ver-

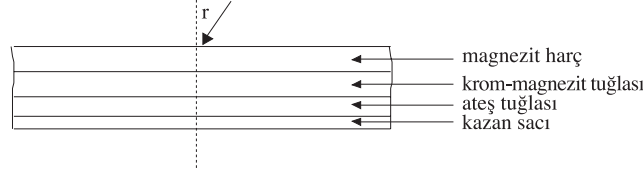
ilmesi gibi bir durum ortaya çıkacaktı.

Absorbe edilen enerjiyi hesap etmeden önce fırının tabanı incelenmiştir. Elektrik ark fırını tabanı Şekil 3’de şematik olarak gösterildiği gibi, ana

gövde kazan sacı olmakla birlikte fırın içerisinden dışarıya doğru sırasıyla: magnezit harç, krom-magnezit tuğla ve ateş tuğlası şeklinde örülmüştür. Bunların özellikleri de Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. EAF tabanı malzemelerinin özellikleri.

Malzeme	Kalınlık (mm)	k(kcal/hmK)
Magnezit harç	261	1
Krom-magnezit tuğla	261	1,7
Ateş Tuğlası	78	1,05
Kazan Sacı	30	44,7



Şekil 3. EAF tabanının şematik kesiti.

Enerji hesabı için önce taban malzemelerinin kimyasal analizi tespit edilmiş ve daha sonra da bu analize göre bunların (3) eşitliğinde tanımlanan \bar{c}_p fonksiyonları oluşturulmuştur. Ayrıca her bir malzemenin kütlelerini, dolayısıyla da hacminin bulunulması gerekmektedir. Bu bakımdan hacim (4), malzemelerin absorbe ettiği enerji miktarı da (5) eşitliklerinden yararlanılarak elde edilmiştir.

$$V = \iiint_V dx dy dz \quad (4)$$

$$E_{abs} = \frac{\rho \cdot V}{M} \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

Ark fırını tabanından iletim ile kayıp olan ısı: Fırın tabanından iletimle kayıp olan ısıyı bulmak için önce (6) eşitliğinden yararlanılarak fırın taban yüzey alanının “r” e bağlı ifadesi elde edilmiştir (Courant, 1968). Daha sonra elde edilen ifade (7) eşitliğinde yazılarak (8) eşitliği elde edilmiştir.

$$\iint_{(B)} dA_{rad} = \iint_{(\bar{B})} \sqrt{MB - C^2} d\theta d\phi \quad (6)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{r}^2, \mathbf{B} = \mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{Sin}^2\theta, \mathbf{C} = \mathbf{0} \quad (6a), (6b), (6c)$$

$$0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

$$\dot{Q}_{ilt} = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{A}_{rad} \cdot \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{ilt} = \mathbf{1}, \mathbf{2} \cdot \mathbf{K} \cdot (\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_{DY}) \quad (8)$$

Elektrik ark fırını kapak ağzından radyasyon ve taşınım yoluyla kayıp olan ısı: Bir üretim prosesi boyunca ark fırını kapağı hurda ve diğer madde şarjı yapılmak için açılmaktadır. Kapak açıldığında sıvı çelik yüzeyinden çevreye radyasyon ve taşınım yoluyla ısı transfer edilmektedir. Radyasyon yoluyla kayıp ısı Denklem (9), taşınım yoluyla kayıp ısı ise Denklem (10)’a göre hesap edilmiştir (Holman, 1982).

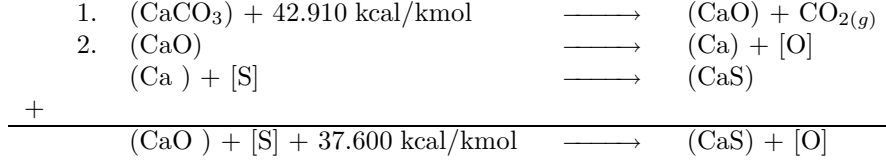
$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{T}_Y^4 - \mathbf{T}_0^4) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{taş} = \mathbf{c} \cdot (\mathbf{Gr} \cdot \mathbf{Pr})^m \cdot \left(\frac{\mathbf{k}}{\mathbf{L}}\right) \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{T} \quad (10)$$

Elektrodlardan kayıp olan ısı: Elektrodlar, çok büyük akımları üzerlerinde taşıyarak elektrik enerjisini ark bölgesine aktarmaktadırlar. Bu durum, bunların belli bir enerjiyi absorbe ederek ısı kaynağı gibi çalışmasına neden olmaktadır. Ark fırınına yapılan hurda ve diğer madde şarjlarında, fırından çekilen elektrodlardan çevreye radyasyon ve taşınım yolu ile ısı transfer edilmektedir (Schroeder, 1990;

Pluckinger ve Ettering, 1979). Radyasyon yoluyla kayıp olan ısı (9), taşınım yoluyla kayıp olan ısı da (10)'a göre hesap edilirken; absorbe edilen enerji de (5) ifadesine göre hesap edilmiştir (Çamdalı, 1999; Wiley,1985).

Ark fırından kütle transferi ile taşınan enerjiler: Üretilen sıvı çelik, curuf, curuf artığı, toz, baca gazları ve soğutma suyu kütlelerine bağlı olarak belli bir miktarda enerjiyi fırından taşımaktadırlar. Bunların taşıdığı enerji (2) ve (3) eşitliklerine



göre tasarlanan bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir.

Endotermik Reaksiyonlar

Ark fırınında meydana gelen kimyasal reaksiyonların çoğu egzotermik reaksiyonlar olmakla birlikte; az da olsa endotermik reaksiyonlar da meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar, curuf yapıcı maddeler tarafından meydana getirilmekte olup, aşağıda gösterilmiştir (Çamdalı, 1999):

Tablo 4. EAF'na verilen enerjiler.

Egzotermik Reaksiyonlar Sonucunda Meydana Gelen Isı (**)			Sıcak Hurda Şarjları İle Fırına Giren Enerji	
Kimyasal yapısı	Mol miktarı (kmol)	Isı miktarı (kcal)	Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)
Fe ₂ O ₃	4,940	969.720	Fe	1.058.192
MnO	7,115	654.572	C	19.040
Al ₂ O ₃	1,379	553.046	Si	6.582
Cr ₂ O ₃	1,523	411.166	Mn	7.567
SiO ₂	8,746	1.903.223	P	723
ZnO	0,009	763	S	1.116
FeO	12,076	763.173	Cr	4.619
P ₂ O ₅	0,285	101.502	Ni	1.328
CO	98,506	2.602.491	Mo	488
CO ₂	22,128	2.079.992	Cu	1.758
H ₂ O	19,366	1.119.375	Toplam	1.101.413
CaO	0,006	853		
Toplam		11.159.876		
Fırına Verilen Elektrik Enerjisinin Değişik Birimlerdeki Değeri				
Enerji miktarı (kcal)	Enerji miktarı (kJ)	Enerji miktarı (kWh)		
18.850.458	78.926.864	21.924		

(**) : Bu ısının 2.032.592 Kcal'si doğal gazın yanması sonucu meydana gelmiştir.

Tablo 5. EAF'dan çıkan sıvı çeliğin taşıdığı enerji ile endotermik reaksiyon ısısı.

Fırından Çıkan Sıvı Çeliğin Taşıdığı Enerji (T= 1.873 K)		Endotermik Reaksiyon Isısı		
Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)	Kimyasal yapısı	Mol miktarı (kmol)	Isı miktarı (kcal)
Fe	18.188.092	CaCO ₃	7,360	316.480
C	35.349	CaS	0,188	7.068
Si	21.625	Toplam		323.548
Mn	69.448			
P	3.363			
S	12.727			
Cr	20.882			
Ni	20.448			
Mo	4.965			
Cu	25.765			
Toplam	18.402.664			

Tablo 6. EAF tabanında iletimle ve kapak ağzından radyasyonla kayıp olan ısı ile EAF tabanında absorbe olan enerji miktarları.

Fırın Tabanından İletimle Kayıp Olan Isı (t=92 dak)		EAF Kapak Ağzından Radyasyonla Kayıp Olan Isı (t=300 san)	
Isı İletiminin Gerçekleştiği Yer	Isı Miktarı (kcal)	Gerçekleştirilen Şarj	Isı Miktarı (kcal)
Fırın tabanı	87.736	2. Şarj	252.000
Toplam	87.736	3. Şarj	303.900
Magnezit Harcı Tarafından Absorbe Edilen Enerji (T=1.425 K)		Toplam	555.900
Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)	Krom-Magnezit Tuğla Tarafından Absorbe Edilen Enerji (T=744 K)	
MgO	1.155.582	Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)
SiO ₂	94.305	MgO	335.216
CaO	19.573	Cr ₂ O ₃	149.799
Toplam	1.269.460	Fe ₂ O ₃	91.578
		Al ₂ O ₃	90.656
		SiO ₂	37.084
		CaO	13.017
		Toplam	717.350

Sonuç

Bilgisayar programının çalıştırılması sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 4-8 arasında verilmiştir. Tablo 4 ve 5 fırına giren enerji ile fırından

çıkan bazı enerji değerlerini, Tablo 6 EAF tabanında iletimle ve kapak ağzından radyasyonla kayıp olan ısı ile EAF tabanında absorbe edilen enerji değerlerini ve Tablo 7 ise ark fırından çıkan bazı maddelerin

fırından taşıdığı enerji değerlerini göstermektedir. Bunların dışında kalan ve EAF'da harcanan diğer

enerji ve kayıp ısılar ise Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. EAF'dan çıkan maddelerin fırından taşıdığı enerji.

Curufu Oluşturan Bileşiklerinin Fırından Taşıdığı Enerji (T=1.873 K)		Toz Bileşiklerinin Fırından Taşıdığı Enerji (T=1.673 K)		Baca Gazlarının Fırından Taşıdığı Enerji (T=1.673 K)	
Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)	Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)	Kimyasal yapısı	Enerji miktarı (kcal)
CaO	510.829	Fe ₂ O ₃	157.239	CO	1.047.486
SiO ₂	271.546	CaO	15.992	CO ₂	497.472
FeO	267.605	MnO	12.567	H ₂ O	287.605
MnO	131.697	Al ₂ O ₃	26.813	N ₂	813
Fe ₂ O ₃	94.914	Cr ₂ O ₃	8.152	Toplam	1.833.376
P ₂ O ₅	26.606	SiO ₂	9.806		
Al ₂ O ₃	101.053	C	12.825		
CaS	3.792	ZnO	157		
MgO	35	Toplam	243.551		
Toplam	1.408.077				

Tablo 8. EAF'da harcanan diğer enerji ve kayıp ısılar.

Enerji veya Isının Cinsi	Miktarı (kcal)
Curuf Artığının Taşıdığı Enerji	99.028
Ateş Tuğlası tarafından Absorbe Edilen Enerji	32.103
Kazan Sacı Tarafından Absorbe Edilen Enerji	1.603
Elektrodlardan Taşınım Kayıp Isı	5.610
Elektrodlardan Radyasyonla Kayıp Isı	647.718
Elektrodların Absorbe Ettiği Enerji	553.584
EAF Kapak Ağzından Taşınım Kayıp Isı	23.772
Soğutma Suyunun Taşıdığı Enerji (T _g =303 K, T _c =311 K)	4.906.667
Toplam	6.270.085

Yukarıda ortaya konan söz konusu üretimi gerçekleştirmek için EAF'na verilen elektrik enerjisinin değerinin 18.850.458 kcal olduğu Tablo 4'te görülmektedir. Dünyadaki benzer kapasitedeki fırınların bir döküm için harcadığı elektrik enerjisi 19.000.000-21.600.000 kcal arasında değişmektedir (Strohmeier,1988). Dolayısıyla değerlendirme yaptığımız fırın için verilen enerji miktarı her ne kadar alışsız bir çelik üretimi için olsa da; bunun Dünya değerlerine yakın olduğu ve bu anlamda da fırının verimli çalıştığı anlaşılmaktadır.

Semboller

- A : Yüzey alanı (m²)
- B : Bölge (m²)
- E : Enerji (kcal)
- EAF : Elektrik ark fırını
- h : Isı taşınım katsayısı (kcal/h.m².K)
- k : Isı iletim katsayısı (kcal/h.m.K)
- K : Toplam ısı iletim katsayısı (kcal/h.m².K)
- M : Molekül kütlesi (kg/kmol)
- m : Kütle (kg)
- n : Mol sayısı
- Q : Isı (kcal)
- r : Radyal parametre (m)
- t : Zaman
- T₀ : Çevre sıcaklığı (K)
- T_{DY} : Fırın dış yüzey sıcaklığı (K)
- T_i : Fırın içi yüzey sıcaklığı (K)
- T_Y : Sıvı çelik yüzey sıcaklığı (K)
- V : Hacim (m³)
- \bar{B} : Değiştirilmiş bölge (m²)
- \bar{c}_p : Sabit basınçtaki özgül ısı (kcal/mol.K)
- \bar{h} : Molar entalpi (kcal/mol)
- \bar{h}° : Standart molar oluşum entalpisi (kcal/mol)

Grek sembolleri

ε	: Emisyon katsayısı
σ	: Stefan-Boltzman sabiti (1,35.10 ⁻⁸ cal/san. m ² .K ⁴)
ρ	: Özgül kütle (kg/m ³)

Üst indisler

c ve m	: Gr ve Pr sayılarının çarpımına göre literatürlerde belirtilen sabitler
.	: Birim zamanda

Alt indisler

abs	: Absorbsiyon
ç	: Çıkış

egz	: Egzotermik
elk	: Elektrik
end	: Endotermik
g	: Giriş
hurön	: Hurda ön ısıtma
i	: i. Bileşen
ilt	: İletim
kay	: Kayıp
kh	: Kontrol hacmi
rad	: Radyal
rady	: Radyasyon
taş	: Taşım
TOP	: Toplam

Kaynaklar

Courant, R., Differential and Integral Calculus, Interscience Publishers, John Wiley, Volume I-II, 1968.

Çamdalı, Ü., Elektrik Ark Fırını Yöntemi İle Çelik Üreten Bir Tesiste Termodinamiğin İkinci Kanununun Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1998.

Çamdalı, Ü., Elektrik Ark Fırınında Gerçekleştirilen Sıvı Çelik Üretimi İçin Enerji Analizi, Mühendis ve Makina, Sayı: 473, 29-33, 1999.

Çengel, Y.A., Boles, M.A., Thermodynamics: An Engineering Approach, McGraw Hill Book Company, 1989.

George, W., Healy and David L., Steel Making, Mc Bride, 1982.

Holman, J.P., Heat Transfer, Mc Graw-Hill International Book Company, 1982.

Kubaschewski, O., Evans, E.L., Alcock, C.B., Metallurgical Thermo-Chemistry, Pergamon Press, 1989.

Pluckinger, E., Ettering O, Electric Furnace Steel Production, John Wiley & Sons Inc., 1979.

Schroeder, D.L., Use of Energies in Electric Furnace Steelmaking Shops, New York, John Wiley & Sons Inc., 1990.

Strohmeier, B., Development and Present Status of Electric Arc Furnace Steelmaking, BHM, Heft 1, 9-24, 133. Jg. 1988.

Wiley J., Electric Furnace Steel Production, John Wiley & Sons Inc., 1985.