



Elektrik Ark Fırınındaki Çelik Üretiminin Termodinamik Açından Analizi

Thermodynamic Analysis of Liquid Steel Production in an Electric Arc Furnace

Ünal Çamdalı¹, Murat Tunç²

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 06100 Ankara, TÜRKİYE

²İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 34060 İstanbul, TÜRKİYE

Başvuru/Received:11/01/2024 Kabul/Accepted: 18/01/2024 Çevrimiçi Basım/Published Online: 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

Öz

Demir-Çelik sektörünün dünyadaki toplam enerji üretiminin, yaklaşık olarak %12'sini kullanması, sektörde enerji tasarrufu yöntemlerinin ne anlama geldiğini çok iyi ortaya koymaktadır. Dolayısıyla enerji tasarruflarında oldukça yaygın olarak kullanılan termodinamiğin birinci yasasına göre tanımlanan enerji verimi ile birlikte, süreç boyunca enerji kalitesindeki farklılaşmaya bağlı olarak daha niteliksel sonuçlar veren, termodinamiğin ikinci yasası uygulamaları, oldukça fazla önem ifade etmektedir.

Bu çalışmada alaşımlı çelik üretimi yapan bir firmada kullanılan, elektrik ark fırınında (EAF), bir cins çelik üretim için *termodinamik analiz* gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, termodinamiğin birinci yasasına göre sistemde enerji analizi ile birlikte termodinamiğin ikinci yasasına göre tespit edilen iş potansiyellerinin hesabı ve tersinir iş elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda da her iki analizden yararlanarak hurda ön ısıtma sistemi, baca gazları, fırından çıkan tozlar ve soğutma suyu ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Elektrik ark fırını, sıvı çelik, termodinamik analiz”

Abstract

The fact that the iron and steel sector uses approximately 12% of the world's total energy production clearly demonstrates the meaning of energy saving methods in the sector. So, along with the energy efficiency defined according to the first law of thermodynamics, which is widely used in energy savings, the applications of the second law of thermodynamics, which gives more qualitative results depending on the variation in energy quality throughout the process, are of great importance.

In this study, thermodynamic analysis is applied to electric arc furnace (EAF) which is used at a steel company. The company has a very considerable position in producing of alloy steels in Turkey. In this regard, energy analysis and availability analysis are carried out for EAF according to first and second laws of thermodynamics. The scrap pre-heating system, stack gases, dusts and cooling water leaving the furnace are investigated by using analysis of thermodynamics.

Key Words

“Electric arc furnace, liquid steel, thermodynamic analysis”

Terminoloji

\bar{B}	Değiştirilmiş bölge
\bar{h}	Molar entalpi
$\bar{h}^{\circ}_{BÜ}$	Reaksiyon entalpisi
\bar{h}°_o	Oluşum entalpisi
A	Sıvı çelik yüzey alanı
A_{rad}	Radyal alan
B	Bölge
B, C, M	Yüzey alanı ile ilgili parametreler
c ve m	Sabit katsayılar
ζ	Çıkış
C_P	Sabit basınçtaki molar özgül ısı
ζ	Çıkış
g	Giriş
h	Isı taşınım katsayısı
K	Toplam ısı iletim katsayısı
k_1	Magnesit harcın ısı iletim katsayısı
k_2	Krom-magnesit tuğlanın ısı iletim katsayısı
k_3	Ateş tuğlanın ısı iletim katsayısı
k_4	Kazan sacının ısı iletim katsayısı
Q	Isı
r	Radyal parametre
\bar{s}	Molar entropi
T_0	Çevre sıcaklığı
T_1	Fırın içi sıcaklığı
T_5	Fırın dış yüzey sıcaklığı
T_Y	Yüzey sıcaklığı
W_{ter}	Tersinir iş

GreK**Sembolleri**

ε	İkinci yasa verimi
ε	Işıma katsayısı
ψ	İş potansiyeli
ξ	İş potansiyeli fonksiyonu
σ	Stefan-Boltzman katsayısı

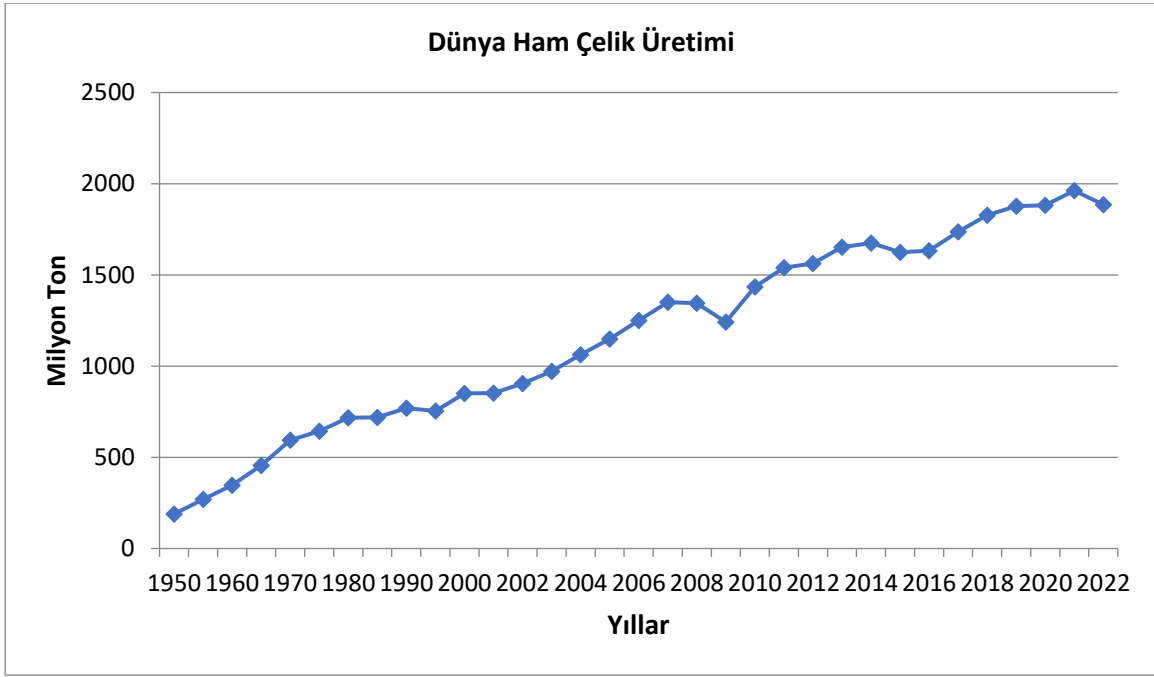
1. Giriş

Bir ülkedeki demir-çelik sektörünün yapısı yani üretim kapasitesi, çeşitliliği ile diğer özellikleri; o ülkenin gelişmişlik durumunu gösteren önemli kriterlerdendir. Zira gelişmiş ülkelerin çeliği en çok üreten ve tüketen ülkeler olduğu bir gerçektir. Dolayısıyla çelik üretimi ve tüketimi, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini gösteren önemli göstergelerden biridir. Sektör ayrıca diğer sektörlerle de hammadde veya mamul madde sağlaması açısından önem ifade etmektedir. Üretilen çeliğin ülke ekonomisine sağladığı katkı da açıktır.

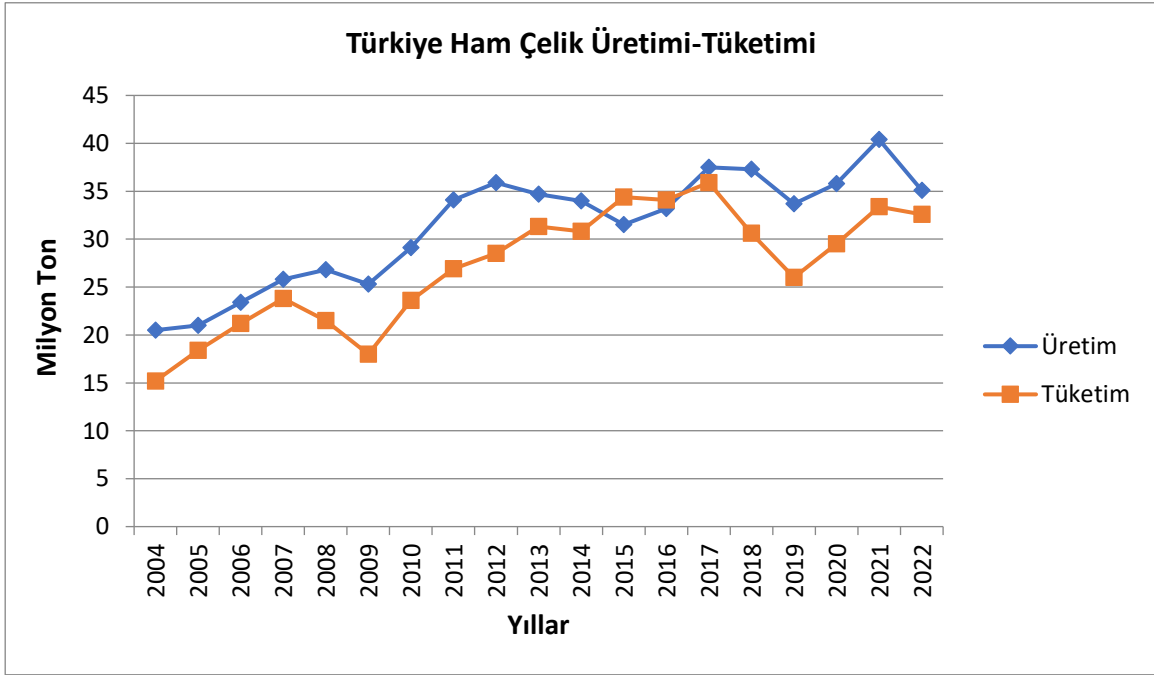
Dünyada ve ülkemizde çelik üretim ve tüketim değerleri Şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere 2022 yılında dünyadaki ham çelik üretim (ve tüketimi) 2 milyar ton olarak gerçekleşirken, ülkemiz için aynı değerler 35 milyon ton civarında gerçekleşmiştir.

Ülkemizdeki çelik üretiminin yaklaşık %72'si elektik ark fırınlarında gerçekleşmektedir (Abdullayeva ve Konak, 2023; www.worldsteel.org, 2023; Kapan, 2023; Tamsöz ve Elmas, 2021).

Demir-Çelik sektörünün Dünyadaki toplam enerji üretiminin, yaklaşık olarak %12'sini kullanması, sektörde enerji tasarrufu yöntemlerinin ne anlama geldiğini çok iyi ortaya koymaktadır. Bu noktada enerji tasarruflarında oldukça yaygın olarak kullanılan termodinamiğin birinci yasasına göre tanımlanmış enerji verimi ile birlikte, süreç boyunca enerji kalitesindeki farklılaşmaya bağlı olarak daha niteliksel sonuçlar veren, termodinamiğin ikinci yasası uygulamaları, oldukça fazla önem ifade etmektedir.



Şekil 1. Dünya Ham Çelik Üretimini ve Tüketimini Yıllara Göre Değişimi (www.worldsteel.org, 2023)



Şekil 2. Türkiye'nin ham çelik üretimi ve tüketiminin yıllara göre değişimi (www.cib.org.tr, 2023)

2. Elektrik Ark Fırınlarında Çelik Üretimini Metalürjik Süreci

Bir ark fırınında gerçekleştirilen çelik üretim süreci aşağıdaki gibi gerçekleştirilmektedir.

- Hurdanın şarjı
- Ergitme
- Oksidasyon (Kaynatma)
- Redüksiyon (İşleme)
- Alaşımlama
- Deoksidasyon (Oksijen uzaklaştırma)

- Döküm alma
- Ocağın hazırlanması

3. Elektrik Ark Fırınındaki Kimyasal Reaksiyonlar

Gerek EAF yöntemi ile gerekse de diğer yöntemlerle çelik üretiminde, kimyasal reaksiyonların önemli bir yeri vardır. Belli bileşimdeki herhangi bir çeliğin üretimi, yüksek sıcaklıklardaki elementler ve/veya bileşikler arasında değişik hızlarda meydana gelen birçok kimyasal reaksiyonlardan sonra, bazı elementlerin istenilen ölçülere getirilmesi ve bazı ihtiyaç duyulan elementlerin de alaşım maddeleri ilavesi ile bileşimde yer almaları sonucunda gerçekleştirilir (Çamdalı; 1998). Dolayısıyla elektrik ark fırınında meydana gelen temel kimyasal reaksiyonlar; literatür (Dikeç, 1982; Plessing, 1981; Çamdalı, 1989, Çamdalı; 1998, Topbaş, 1991) ile firmada oluşturulan üretim kartları üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Çamdalı, 1998). Bu reaksiyonların bazıları aşağıda tablolarda standart reaksiyonlar şeklinde gösterilmiştir. Gerçek mol sayılarına göre oluşan reaksiyonlar ise bilgisayar programı yardımıyla tespit edilmiştir.

Tablo 1. Elektrik Ark Fırınında Meydana Gelen Standart Reaksiyonlar

Bileşenler	Ürünler
$2\text{Fe} + 3/2\text{O}_2$	Fe_2O_3
$\text{Fe} + 1/2\text{O}_2$	FeO
$\text{C} + 1/2\text{O}_2$	CO
$\text{Si} + \text{O}_2$	SiO_2
$\text{Mn} + 1/2\text{O}_2$	MnO
$2\text{P} + 5/2\text{O}_2$	P_2O_5
$2\text{Cr} + 3/2\text{O}_2$	Cr_2O_3
$\text{CaO} + \text{S}$	$\text{CaS} + 1/2\text{O}_2$
CaCO_3	$\text{CaO} + \text{CO}_2$
$2\text{Al} + 3/2\text{O}_2$	Al_2O_3
$\text{Ca} + 1/2\text{O}_2$	CaO
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
$\text{C}_2\text{H}_6 + 7/2\text{O}_2$	$2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$	$3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$
N_2	N_2
$2\text{P} + 5/2\text{O}_2$	P_2O_5
$\text{Zn} + 1/2\text{O}_2$	ZnO
$2\text{B} + 3/2\text{O}_2$	B_2O_3

4. Elektrik Ark Fırınında Kütle Analizi

Elektrik ark fırınında Tablo 2’de kimyasal analizi verilen çeliğin üretilmesi ile ilgili kütle analizi yapılabilmesi için Şekil 3’de görülen 55 ton/döküm kapasiteli ark fırınına giren hammadde ve yardımcı maddeler ile çıkan maddelerin kimyasal analizleri, firmadaki ölçümlerden, literatürden (Çamdalı, 1998) ve firmada kullanılan satış sözleşmelerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Şekil 3’de verilen diyagramda EAF’na giren ve çıkan maddeler, (1) eşitliğinde verilen, kütle korunumu yasası gereğince oluşturulmuştur.

$$\Sigma m_g = \Sigma m_c \quad (1)$$

Tablo 2. Elektrik ark fırınında üretilen bir tip sıvı çeliğin kimyasal analizi

Kimyasal Bileşimi	Kütle Miktarı (Kg)	Yüzde (%)	Mol Miktarı (Kmol)
Fe	55 117,176	98,865	984,235
C	55,750	0,1	4,646
Si	27,875	0,05	0,996
Mn	200,7	0,36	3,649
P	8,363	0,015	0,27
S	22,3	0,04	0,697
Cr	83,625	0,15	1,608
Ni	68,495	0,123	1,202
Mo	49,563	0,089	0,516
Cu	116,151	0,208	1,829
TOPLAM	55 750	100	

5. Termodinamik Analiz: Birinci ve İkinci Kanunlara Göre

Enerjinin korunumu ilkesine dayanan Termodinamiğin birinci yasası, potansiyel ve kinetik enerji değişimlerinin ihmal edilebilir seviyede olduğu açık sistemlerde, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_{kh} + \sum n_g [\bar{h}^\circ_o + \Delta \bar{h}]_g = W_{k,h} + \sum n_\phi [\bar{h}^\circ_o + \Delta \bar{h}]_\phi + \Delta E_{sist} \quad (2)$$

5.1. Tersinir reaksiyon işi

Kimyasal reaksiyonların tersinir olarak gerçekleştirildiği açık sistemlerde, sisteme verilecek minimum iş miktarı; sistemin çıkışı ile girişi arasında kinetik ve potansiyel enerjide meydana gelen değişimin ihmal edilebilmesi halinde, aşağıdaki(3) eşitliği şeklinde yazılır (Aytekin, 1980; Van Wylen ve Sonntag, 1985; Büyüktür, 1995).

$$\begin{aligned} W_{ter} &= \sum n_\phi [\bar{h}^\circ_o + \Delta \bar{h} - T_0 \bar{s}]_\phi - \sum n_g [\bar{h}^\circ_o + \Delta \bar{h} - T_0 \bar{s}]_g + [(m_2 u_2 - m_1 u_1) - T_0 (m_2 s_2 - m_1 s_1)]_{sist} \\ &= -h^\circ_{BÜ} - T_0 [\sum n_\phi \bar{s}_\phi - \sum n_g \bar{s}_g] + [(m_2 u_2 - m_1 u_1) - T_0 (m_2 s_2 - m_1 s_1)]_{sist} \end{aligned} \quad (3)$$

Burada:

$$\Delta \bar{h} = \bar{h}_T - \bar{h}_{298} = \int_{T_0}^T \bar{C}_p dT \quad (4)$$

$$\Delta \bar{s} = \bar{s}_T - \bar{s}_{298} = \int_{T_0}^T \frac{\bar{C}_p}{T} dT \quad (5)$$

$$\bar{C}_p = a + b.T + c.T^{-2} \quad (6)$$

(6) ifadesindeki a, b ve c katsayıları, pek çok element ve bileşik için belirlenmiştir (Kubaschewski, 1989).

5.2. İş Potansiyeli ve Fonksiyonu

İş potansiyeli; sistemin bulunduğu halden, çevre ile termodinamik dengede olduğu hale kadar gerçekleşen bir süreçte (hal değişiminden), elde edilebilecek maksimum faydalı iş olarak tanımlanmaktadır. Bu ifade açık sistemler için (7) eşitliği ile verilmiştir. İş potansiyeli fonksiyonu da (8) eşitliği şeklindedir.

$$\psi = (h + gz - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) + [(m_2 u_2 - m_1 u_1) - T_0 (m_2 s_2 - m_1 s_1)]_{sist} \quad (7)$$

$$\xi = (h + V^2/2 + gz - T_0 s) \quad (8)$$

5.3. Ekserji Verimi

Elektrik ark fırını gibi sistemlerin değerlendirilebilmesi için sisteme verilen (elektrik ve diğer kaynaklara dayalı) gerçek işin, hal değişimlerinin tersinir olması durumunda sisteme verilmesi gereken tersinir iş (elektrik ve diğer kaynaklara dayalı) ile karşılaştırılması gerekmektedir. $W_{gerçek} > W_{ter}$ olduğundan karşılaştırma (9) eşitliği ile tanımlanan, ekserji verimi ile yapılabilir.

$$\varepsilon = W_{ter} / W_{gerçek} \quad (9)$$

6. Elektrik Ark Fırınında Termodinamik Analiz

6.1. Sisteme Giren Enerjiler

Sisteme giren enerji aşağıda açıklanmıştır (Camdali, 1998; Camdali, 2003):

Elektrik Enerjisi: Fırında arkın oluşmasını sağlayan ve çeliğin ergitilmesinde en etkin olan enerjidir.

Ekzotermik Reaksiyonlardan Kaynaklı Isı: Çelik üretiminde, üretim süreci boyunca yüksek sıcaklıklarda meydana gelen, ekzotermik reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ısı.

Hurda Ön Isıtma: Ergitilmek amacıyla fırına yüklenecek hurdalar, yüklenmeden önce bir önceki üretim sırasında fırından çıkan sıcak gazların yardımı ile ön ısıtmaya tabii tutulmaktadır. Hurdanın entalpi ve entropi değeri, hurdayı oluşturan her element için (4) ve (5) eşitliklerine göre hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla elde edilmiştir.

6.2 Sistemden Çıkan Enerjiler

Sistemden giren enerjiler de aşağıda verilmiştir (Camdali, 1998; Camdali, 2003):

Elektrik Ark Fırını Tabanında Absorbe Edilen Isı: EAF belli aralıklarla yani periyodik olarak bakıma alınmaktadır. Sonrasında belli termal koşullara gelinceye kadar ısıtılmaktadır. Hesaplarda bu ısı da dikkate alınmıştır. Dolayısıyla tabanın yapısı belirlenmiştir. Elektrik ark ocağı tabanı, ana gövde kazan sacı (Güneş, 1981; Orhon, 1986) olmakla birlikte sırasıyla magnezit harç, krom-magnezit tuğla ve ateş tuğlası şeklinde gerçekleştirilmiştir. Burada önce taban malzemelerinin kimyasal analizi tespit edilmiş ve daha sonra da bu analize göre malzemelerin \bar{C}_p fonksiyonu oluşturulmuştur. Söz konusu malzemelerin absorbe ettiği ısıyı bulmak için önce her bir malzemenin kütlelerini dolayısıyla da hacmini bulmamız gerekmektedir. Hacim (10), malzemelerin absorbe ettiği ısı da (11) eşitliğinden yararlanılarak elde edilmiştir.

$$V = \iiint_V dx dy dz \quad (10)$$

$$Q_{abs} = (\rho \cdot V \cdot / M) \cdot \bar{C}_p \cdot \Delta T \quad (11)$$

Ark Fırını Tabanından İletim ile Kayıp Olan Isı: Fırın tabanından iletim ile kayıp olan ısıyı bulmak için önce (12) eşitliğinden fırın taban yüzeyinin r'e bağlı ifadesi elde edilmiş; bu ifade (13) eşitliğinde yazılarak sonuçta (14) eşitliği elde edilmiştir.

$$\iint_B dB = \iint_B \sqrt{MB - C^2} d\theta d\phi \quad (12)$$

$$Q = -k \cdot A_{rad} \cdot dT/dr \quad (13)$$

$$Q = 1,2 \cdot K \cdot (T_1 - T_5) \quad (14)$$

Burada,

$$1/K = 1/k_1 \cdot (1/r_1 - 1/r_2) + 1/k_2 \cdot (1/r_2 - 1/r_3) + 1/k_3 \cdot (1/r_3 - 1/r_4) + 1/k_4 \cdot (1/r_4 - 1/r_5)$$

Elektrik Ark Fırını Kapak Ağzından Radyasyon ve Taşınım Yolu ile Kayıp olan Isı: Bir üretim süreci boyunca ark ocağı kapağı, hurda şarjı yapılmak üzere açılmaktadır. Kapak açıldığında, sıvı çelik yüzeyinden çevreye, radyasyon ve taşınım yolu ile ısı transfer edilmektedir. Radyasyon yolu ile kayıp ısı (15) eşitliği ile elde edilir. Taşınım yolu ile kayıp ısı ise (16)'da verilen koşulun gerçekleşmesi halinde, (17) eşitliğinden elde edilen h'nin, (18) ifadesinde yerine konulmasıyla elde edilir (Holman 1982).

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_Y^4 - T_0^4) \quad (15)$$

$$D/L \geq 35/Gr_L^{1/4} \quad (16)$$

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^m = h \cdot L / k \quad (17)$$

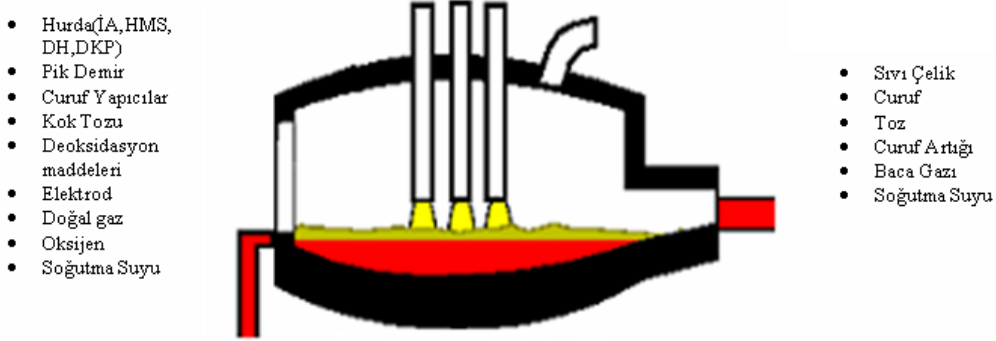
$$Q_{taş} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (18)$$

Elektrotlardan Kayıp Olan Isı: Elektrotlar, çok büyük akımları üzerlerinde taşıyarak elektrik enerjisini ark bölgesine aktarmaktadır. Bu durum onların belli bir enerjiyi absorbe ederek ısı kaynağı gibi çalışmasına neden olmaktadır. Ark ocağına yapılan hurda şarjlarında, fırından çekilen elektrotlardan çevreye, radyasyon ve taşınım yolu ile de ısı transfer edilmektedir. Radyasyon yolu ile kayıp olan ısı (15), taşınım yolu ile kaybolan ısı da (16-18) eşitliklerine göre elde edilirken absorbe edilen enerji ise (11) eşitliğine göre elde edilmiştir.

Elektrik Ark Fırından Kütle Transferi ile Taşınan Enerjiler: Kütle transferi ile taşınan enerjileri; sıvı çeliğin, cürufun, cüruf artığının, tozların, baca gazlarının ve soğutma suyunun fırından taşıdığı enerjiler şeklinde tanımlayabiliriz.

7. Bulgular

Aşağıda Şekil 3’de şematik olarak gösterilen EAF’da üretilen sıvı çeliğin kimyasal analizi Tablo 2’de, fırına şarj edilen maddeler ile çıkan maddeler Tablo 3 ve 4’de, EAF’a giren ve çıkan enerjiler de Tablo 5 ve 6’da verilmiştir. İkinci yasaya göre hesaplanan maddelerin iş potansiyelleri ise Tablo 7 ve 8’de verilmiştir.



Şekil 3. Elektrik Ark Fırını ve Kütle Dengesi

Tablo 3. Elektrik Ark Fırınına Yüklenen Maddeler

Giren Maddeler	Miktarı (Kg)
İmalat artığı hurda	21 700
HMS hurda	16 300
Değirmen hurdası	12 800
Pik	7 400
Kok	900
Kireç	1 100
Kireçtaşı	800
Aldexo	200
Siliko Ferro Mangan	300
Alüminyum	40
Elektrot	150
Doğal gaz	157
Oksijen	3 574
Soğutma suyu	613 333
TOPLAM	678 754

Tablo 4. Ark Fırınından Çıkan Maddeler

Çıkan Maddeler	Miktarı (Kg)
Sıvı çelik	55 750
Cüruf artığı	300
Toz	788
Cüruf	4 144
Baca gazları	4 439
Soğutma suyu	613 333
TOPLAM	678 754

Tablo 5. Ark Fırınına Giren Enerji

Giren Enerji	Miktarı (kcal)
Elektrik enerjisi	18 926 054
Ekzotermik reaksiyon enerjisi	9 116 114
Doğal gaz yanma enerjisi	2 032 592
Hurda ön ısıtma enerjisi	1 101 414
TOPLAM	31 176 174

Tablo 6. Elektrik Ark Fırınından Çıkan Enerji

Çıkan Enerji	Miktarı (kcal)
Sıvı çelik için harcanan enerji	18 402 798
Tozun taşıdığı enerji	243 916
Cürufun taşıdığı enerji	1 407 800
Baca gazlarının taşıdığı enerji	1 831 535
Cüruf artığının taşıdığı enerji	100 056
İletim ile kayıp ısı	87 736
Magnezit harcımın absorbe enerjisi	2 538 922
Krom-Magnezit absorbe enerjisi	23 912
Ateş tuğla absorbe enerjisi	1 070
Kazan sacı absorbe enerjisi	3 206
Elektrotlardan taşınım enerjisi	5 610
Elektrotlardan radyasyon enerjisi	647 718
Elektrot absorbe (1.Bölge)	54 467
Elektrot absorbe (2.Bölge)	17 545
Fırın ağzı radyasyon	555 900
Fırın ağzı taşınım	23 772
Endotermik reaksiyon enerjisi	323 544
S. Suyunun taşıdığı enerji	4 906 667
TOPLAM	31 176 174

Tablo 7. Elektrik Ark Fırınına Yüklenen Maddelerin İş Potansiyelleri Fonksiyonu

Ark ocağına Yüklenen Maddeler	İş Potansiyeli Fonksiyonu (kcal)
1. Hurda şarjı	-965 606
2. Hurda şarjı	-421 032
3. Hurda şarjı	-371 164
Kok	-376 424
Cüruf yapıcılar	-6 081 419
Deoksidasyon maddeleri	-15 497
Elektrot	-6 057
Doğal gaz	-302 070
Oksijen	-1 630 859
Soğutma suyu	-2 497 692 928
TOPLAM	-2 507 863 056

Tablo 8. Ark Fırından Çıkan Maddelerin İş Potansiyelleri Fonksiyonu

Ark Fırından Çıkan Maddeler	İş Potansiyeli Fonksiyonu (kcal)
Sıvı çelik	11 077 951
Toz	-1 164 888
Cüruf	-4 522 663
Cüruf artışı	60 323
Baca gazı	-7 561 101
Fırın taban malzemeleri	2 110 249(*)
Elektrot	777 249(*)
Soğutma suyu	-2 497 549 312
TOPLAM	-2 496 772 192

(*): İş potansiyeli değeri

8. Sonuç

Bu çalışma sonucunda firmadaki ark fırını ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Hurda ön ısıtma enerjisi, genel olarak sisteme giren toplam enerjinin, yaklaşık %3,5'dir. Oran düşük sayılabilir. Sistemden bu yolla geri kazanılan enerji miktarının artırılması için ön ısıtma sisteminin gözden geçirilerek modernize edilmesi veya yeni bir sistem ile değiştirilmesinin, firmaya uzun vadede önemli kazançlar sağlayacağı açıktır.
- Baca gazları ve sistemden çıkan tozların taşıdığı enerji, hurda ön ısıtmada daha etkin kullanılabileceği gibi ön ısıtmada kullanılmayan kısmından ise diğer ısıtma alanlarında kullanmak mümkün görünmektedir.
- Fırın kapağının, ana gövdesinin ve refrakterlerin (ateş tuğlalarının) uzun ömürlü olması ve maliyetlerinin azaltılması için kullanılan soğutma suyunun, sistemden taşıdığı enerji oldukça yüksektir. Genel olarak soğutma suyunun enerjisinden buhar, sıcak su elde edilmesi gibi tesiste yapılacak yeni yatırımlarla farklı alanlarda yararlanmak mümkün görünmektedir.
- Kapak ağzından ve elektrotlardan kaynaklanan ısı kayıplarının en aza indirilmesi için ocağa yapılan şarj sayısının, mümkün olduğu kadar en aza indirilmesi ile bir üretim için geçen zaman kısılacağı gibi kapak ağzından ve elektrotlardan kaynaklanan ısı kayıpları da azalacaktır.
- Birinci yasa verimi %61 (18 402 798/30 074 760) civarında olurken ekserji veriminin %37 civarında (11 090 864/30 074 760) olması, sistemden oldukça önemli miktarda enerji ve ekserji kaybının olduğunu göstermektedir.

Referanslar

Abdullayeva, B. ve Konak, A. (2023) Türk Demir Çelik Sektörünün 2000-2022 Döneminde Uluslararası Rekabet Gücünün Seçilmiş AB Üyesi Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Analizi, Journal of International Banking Economy and Management Studies, 6 (2), 164-200.

Aytekin, V. (1980). Metalürji Termodinamiği, İ.T.Ü.

Büyüktür, A.R. (1995). Termodinamik Cilt 2, Birsen Yayınevi.

Çamdalı, Ü, Tunc, M, Karakas A. (2003). Second Law Analysis of Thermodynamics in The Electric Arc Furnace at a Steel Producing Company, Energy Conversion and Management 44, 961-73.

Çamdalı, Ü. (1998). Elektrik Ark Fırını Yöntemi İle Çelik Üreten Bir Tesiste Termodinamiğin II. Kanununun Analizi, İ.T.Ü. Fen Bilim. Ens, Doktora Tezi.

Çamdalı, Ü. (1989). Türk ve Dünya Demir Çelik Sanayilerinin Karşılaştırması ve II. Kanun Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, İstanbul.

Dikeç, F., (1982). Çözümlü Metalürji Termodinamiği Problemleri, İ.T.Ü.

Güneş, A., Yalkıncaya, M. (1981). Ekipman El Kitabı, Asil Çelik A.Ş.

Holman, J.P. (1982). Heat Transfer, McGraw-Hill International Book Company.

<https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>, Erişim Tarihi:2023.

<https://www.cib.org.tr/istatistikler.html>, Erişim Tarihi:2023.

Kapan, S. (2023). Bir Ferrokrom Tesisinin Eksergoekonomik Analiz Yöntemiyle Verimliliğinin Değerlendirilmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bil. Ens, Doktora Tezi.

Kubaschewski, O. Evans, E.L., Alcock, C.B., (1989), Metallurgical Thermochemistry, Pergamon Press.

Orhon, K.T. (1986). Ark Ocağı Elektriği, Asil Çelik A.Ş. Teknik Yayını.

Plessing, R. (1981). Ark Ocaklarında Çelik Yapımı, SEGEM, Yayın No:94, Ankara.

Tamsöz, H. ve Elmas, E.T. (2021). Çelik Üretiminde Elektrik Ark Ocaklarında Enerji Maliyetlerinin ve Enerji Verimlilik Faktörlerinin Araştırılması, Fenerbahçe Üniversitesi Tasarım Mimarlık ve Mühendislik Dergisi, 1(3), 163-180.

Topbaş, M.A. (1991). Endüstri Fırınları, Yıldız, Cilt:1-2.

Van Wylen, G.J. and Sonntag, R.E. (1985). Fundamentals of Classical Thermodynamics, SI Version,