

Termodinamik Analizlerde Çevre Sıcaklığının Değişiminin Etkisi ve Endüstriyel Uygulamalar

Ünal ÇAMDALI

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

Geliş Tarihi 14.09.2000

Özet

Bu çalışmada değişken çevre sıcaklığına bağlı olarak bir sistemin genel ekserji dengeliği elde edilmiştir. Bu dengelikten yararlanarak, endüstride çelik üretiminde kullanılan elektrik ark fırınında sisteme verilen tersinir iş ile çimento üretiminde kullanılan döner fırında ekserji kaybının matematiksel eşitlikleri elde edilmiştir. Bu eşitliklerin elde edilmesinde çevre sıcaklığının sinüzoidal olarak değiştiği varsayılmıştır. Her iki fırında elde edilen ekserji ifadelerinin ve çevre sıcaklıklarının gün boyunca değişimleri de grafik olarak verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Değişken çevre sıcaklığı, Ekserji dengeliği

The Effect of the Variation of the Temperature of the Surroundings on Thermodynamic Analysis and Industrial Applications

Abstract

In this study, the general exergy balance of a system was analyzed based on the variation of the temperature of the surroundings. Using this balance, the mathematical equations regarding both the reversible work given to the system in the electric arc furnace used in steel production and the exergy loss in the rotary burner used in cement production were obtained. The assumption that the temperature of the surroundings has a sinusoidal change was made in obtaining these equations. The changes of the exergy expressions and the temperature of the surroundings within a day are presented graphically.

Key Words: Variable surroundings temperature, Exergy balance

Giriş

Yaşadığımız yüzyılda enerji maliyetlerinin artması üzerine, enerjinin verimli kullanılması konusunda yapılan çalışmaların önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Ayrıca bu tür çalışmaların özellikle endüstriyel alanda ekserji analizleri şeklinde yoğunlaştığı görülmektedir. Sergio ve Jose (1990), çeşitli sektörlerde gerçekleştirilen birim üretim için minimum ekserji (enerji) miktarını belirlemişlerdir.

Son yıllarda bu türden yapılan bazı çalışmalarda, çevre koşullarının değişiminin sistemin verimi üzerindeki etkisi incelenmektedir. İnceleme sonucunda, çevre koşullarının değişiminin sistemin verimini etkilediği anlaşılmıştır (Göğüş ve Ataer, 1999). Dolayısıyla bu değişimin sistemin verimi üzerindeki etkisinin belirlenmesiyle, enerjinin daha verimli kullanılması konusunda önemli ipuçlarının elde edileceği bir gerçektir.

Çevre Sıcaklığının Değişimi

Pratikteki uygulamalarda çevre sıcaklığının bir gün boyunca periyodik olarak değiştiği ve bu periyodun 24 saat olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada çevrenin basıncının değişmediği, sadece sıcaklığının değiştiği ve bu değişimin de sinüzoidal olarak gerçekleştiği varsayılmıştır. Çevre sıcaklığının bir gün boyunca değişiminin matematiksel ifadesi (1) eşitliği şeklinde verilmiştir.

$$T_0(t) = T_{0m} + \Delta T_{0a} \cdot \sin(\tau t) \quad (1)$$

(sinüzoidal değişim)

(1) eşitliğinde,

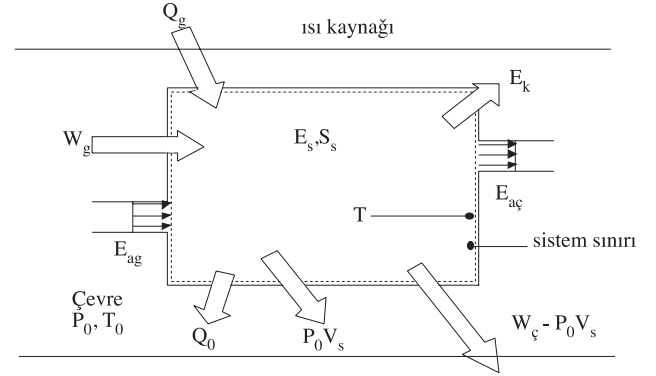
$$\begin{aligned} \tau &= 2\pi/24 : \text{açısal hız;} \\ T_{0m} &= (T_{\max} + T_{\min})/2; \\ \Delta T_{0a} &= (T_{\max} - T_{\min})/2 \end{aligned} \quad (1a),(1b),(1c)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $t, 0 \leq t \leq 24$ arasında değişen günün saatlerini ifade etmektedir. Problemin çözümünde, $t=0$ ve $t=24$ anlarının sabah saat: 6'ya karşılık geldiği kabul edilerek ekserji ve çevre sıcaklıklarının gün saatine göre değişimleri elde edilmiştir.

Bir Sistemin Çevre Sıcaklığının Değişimine Bağlı Olarak Genel Ekserji Denkleğinin Elde Edilmesi

Çevre ile iş, ısı ve madde akışı etkileşimlerinin gerçekleştiği düşünülerek tasarlanan genel bir sis-

temde, değişken çevre sıcaklığını da hesaba katarak elde edilecek ekserji denkleği ifadesi, uygulamaya esas alınacak diğer sistemler için de oldukça faydalı olacaktır. Bu çalışmada yapılan analiz, Şekil 1'de şematik resmi verilen ve çevre ile kütle, ısı ve iş alışverişlerinin olduğu genel bir sistem için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sisteme hem iş verildiği hem de sistemden iş alındığı da varsayılmıştır. Burada çevreye karşı yapılan ve kullanılmayan iş, sistemin yaptığı işten çıkartılmış ve faydalı iş elde edilmiştir.



Şekil 1. Çözüme esas alınan genel sistem.

Şekil 1'deki sistemin sonsuz küçük bir zaman aralığı için enerji denkleği, eşitliğin her iki tarafına $P_0 d(V_s)/dt$ terimi eklenerek yazılırsa (Göğüş ve Çamdalı, 2000) :

$$\begin{aligned} d(Q_g)/dt - d(Q_0)/dt - d(Q_k)/dt + d(W_g)/dt - d(W_ç - P_0 V_s)/dt \\ + \{[d(m_g)/dt]h_g - [d(m_ç)/dt]h_ç\} - [d(m_k)/dt]h_k = d(E_s)/dt + P_0 d(V_s)/dt \end{aligned} \quad (2)$$

elde edilir. Burada dQ ve dW tam diferansiyel anlamında değildir. Aynı sistemin yine sonsuz küçük

bir zaman aralığı için entropi dengesi ise aşağıdaki (3) eşitliği şeklinde yazılabilir:

$$\begin{aligned} [d(Q_g)/dt]/T - [d(Q_0)/dt]/T_0 + \{[d(m_g)/dt].s_g - [d(m_ç)/dt].s_ç\} - [d(Q_k)/dt]/T \\ - [d(m_k)/dt].s_k + d(S_{ürt})/dt = d(S_s)/dt \end{aligned} \quad (3)$$

(3) eşitliğinin her iki tarafı T_0 ile çarpılırsa:

$$\begin{aligned} \{[d(Q_g)/dt]/T\}.T_0 - \{[d(Q_0)/dt]/T_0\}.T_0 + T_0.\{[d(m_g)/dt].s_g - [d(m_ç)/dt].s_ç\} \\ - \{[d(Q_k)/dt]/T\}.T_0 - T_0.[d(m_k)/dt].s_k + T_0.[d(S_{ürt})/dt] = T_0.[d(S_s)/dt] \end{aligned} \quad (4)$$

bulunur. (2) eşitliği (4) eşitliğinden çıkartılır ve düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & \{d(W_g)/dt - d(W_\zeta - P_0V_s)/dt\} + \{[d(Q_g)/dt].(1 - T_0/T) - [d(Q_k)/dt].(1 - T_0/T)\} \\ & + \{[d(m_g)/dt](h_g - T_0s_g) - [d(m_\zeta)/dt](h_\zeta - T_0s_\zeta)\} - \{[d(m_k)/dt](h_k - T_0s_k)\} \\ & - \{T_0.[d(S_{\text{ürt}})/dt]\} = d(E_s)/dt + P_0d(V_s)/dt - T_0.[d(S_s)/dt] \end{aligned} \quad (5)$$

elde edilir. (5) eşitliğindeki akış terimlerine $[d(m_g)/dt].g_{g0}$ ve $[d(m_\zeta)/dt].g_{\zeta0}$ terimlerini; sistem terimi içerisine de $[d(m_g)/dt].g_{s0}$ terimi bir kez ilave edilip bir kez de çikartılır ve elde edilen bütün ter-

imler de t_1 ve t_2 zamanları arasında gerçekleşen bir proses için integre edilirse, genel ekserji denkliği için (6) eşitliği elde edilir.

$$\Xi_w + \Xi_q + \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_g e_g) dt - \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_\zeta e_\zeta) dt - \Xi_k - \Xi_y = \Xi_s + \Xi_d \quad (6)$$

Burada:

$$\Xi_w = \int_{t_1}^{t_2} [\dot{W}_g - (\dot{W}_\zeta - P_0.\dot{V}_s)] dt; \Xi_q = \int_{t_1}^{t_2} \{[\dot{Q}_g - \dot{Q}_k](1 - T_0/T)\} dt \quad (7); (8)$$

$$\Xi_k = \int_{t_1}^{t_2} \{[d(m_k)/dt](h_k - T_0s_k)\} dt; \Xi_y = \int_{t_1}^{t_2} T_0.\{[d(S_{\text{ürt}})/dt]\} dt \quad (9); (10)$$

$$\Xi_s = \int_{t_1}^{t_2} \{d[E_s + P_0.V_s - T_0.S_s]/dt\} dt - [d(m_g)/dt].g_{g0} + [d(m_\zeta)/dt].g_{\zeta0} + [d(m_g)/dt].g_{s0} \quad (11)$$

$$\Xi_d = \int_{t_1}^{t_2} \{[d(T_0)/dt](S_s)\} dt \quad (12)$$

$$e = (h - h_0) - T_0.(s - s_0); g_0 = h_0 - T_0s_0 \quad (13 a); (13b)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Kütle denkliği dikkate alındığında:

$$-[d(m_g)/dt].g_{g0} + [d(m_\zeta)/dt].g_{\zeta0} + [d(m_s)/dt].g_{s0} = 0 \quad (14)$$

olduğu anlaşılır. Bu durumda sisteme ait ekserji ifadesi ise :

$$\Xi_s = \int_{t_1}^{t_2} \{d[E_s + P_0.V_s - T_0.S_s]/dt\} dt \quad (15)$$

halini alır.

Uygulama

Örnek alınan elektrik ark fırını ve döner fırında termodinamik analiz, yukarıda ortaya konan (6) eşitliğine göre gerçekleştirilmiştir. Bu analizde

aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Sistemden kayıp olan ısı, döner fırına giren kömürün reaksiyon ekserjisi ile sisteme giren ve sistemden çıkan maddelerin Δh ve Δs değerleri sabit kabul edilmiştir.

- Hesaplar, üretimdeki ortalama değerlere göre yapılmıştır.

- Elektrik ark fırını için bir döküm, döner fırın için ise 1 saatlik üretim değerleri esas alınmıştır.

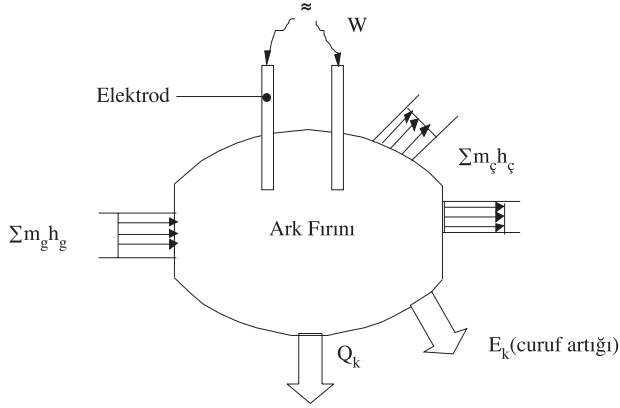
- Bu uygulama için gerekli veriler, elektrik ark fırını için (Çamdalı ve Tunç, 2000) referansından ve döner fırın için ise (Çamdalı, Çelen ve Erişen,

1999) referansından alınmıştır. Yani $Q \cdot (1 - T_0/T)$ ve $(\Delta h - T_0 \cdot \Delta s)$ ifadelerinin değerlerinin elde edilmesi için $Q, \Delta h$ ve Δs büyüklüklerine ihtiyaç vardır. Dolayısıyla ilgili referanslardan yararlanarak sistemler için $Q, \Delta h$ ve Δs büyüklükleri hesaplanmıştır.

• Her iki fırın da açık sistem olarak kabul edilmiştir.

Elektrik ark fırını

Şekil 2’de şematik olarak gösterilen ve Tablo 1’de de kütle denklığı verilen elektrik ark fırını, elektrodlar yardımıyla meydana getirilen arkın oluş-



Şekil 2. Elektrik ark fırını ve enerji dengesi.

$$\Xi_W = \Xi_q + \left\{ \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_\zeta e_\zeta) dt - \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_g e_g) dt \right\} + \Xi_k + \Xi_y + \Xi_s + \Xi_d \quad (16)$$

Bu eşitlikteki her bir ifadenin T_0 'a bağlı değerleri ise aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$\Xi_q = 1.6310 - 11,7T_0(MJ)(kayıp) \quad (16a)$$

$$\Xi_a = \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_\zeta e_\zeta) dt - \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_g e_g) dt = 62.205 - 124T_0(MJ, T_0(K)) \quad (16b)$$

$$\Xi_k = 415 - 0,3T_0(MJ, T_0(K)), \text{ (curuf artığı)} \quad (16c)$$

$$\Xi_y = 0(MJ) \quad (16d)$$

$$\Xi_s = 0(MJ) \quad (16e)$$

$$\Xi_d = 0(MJ) \quad (16f)$$

$$\Xi_W = 78.930 - 136T_0(MJ, T_0(K)) \quad (16g)$$

$$T_0 = 27,5 + 7,5 \cdot \text{Sin}([2 \cdot \pi / 24] \cdot t) (^\circ \text{C}) \quad (16h)$$

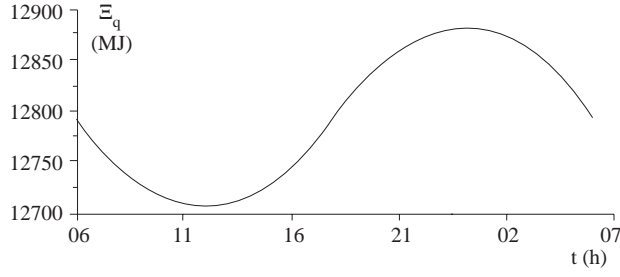
turduğu ısı enerjisinin radyasyon ve konveksiyon yoluyla fırın içerisine yüklenmiş olan hurda ve diğer maddelerin ergitilmesi esasına göre çalışmaktadır.

Tablo 1. Ark fırınının kütle dengesi.

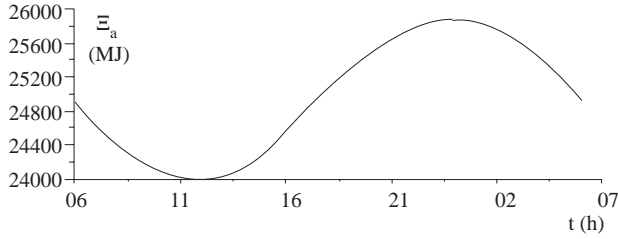
Fırına Giren Maddeler		Fırından Çıkan Maddeler	
Madde	Miktarı (kg)	Madde	Miktarı (kg)
Hurda	50.800	Sıvı çelik	55.750
Pik demir	7.400	Curuf	4.150
Curuf yapıcılar	2.100	Toz	790
Kok tozu	900	Baca Gazları	4.440
Deoksidasyon maddeleri	340	Curuf artığı	300
Elektrodlar	150	Toplam	65.430
Doğal gaz	160		
Oksijen	3.580		
Toplam	65.430		

Ark fırınına verilmesi gereken tersinir iş miktarını, yukarıdaki (6) eşitliğinden yararlanarak T_0 'a bağlı olarak bulmak mümkündür. Söz konusu eşitlik ark fırını için uygulandığında tersinir iş (ekserji) için aşağıdaki (16) eşitliği elde edilir.

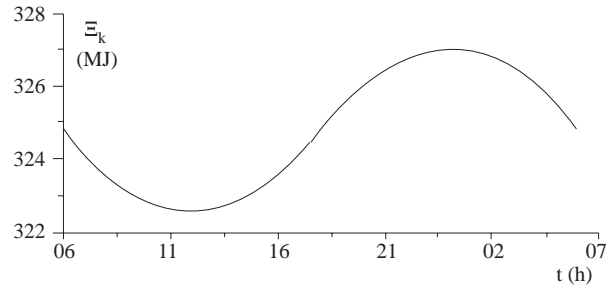
Yukarıdaki eşitliklerinin bir gün boyunca değişimleri Şekil 3-7 de verilmiştir.



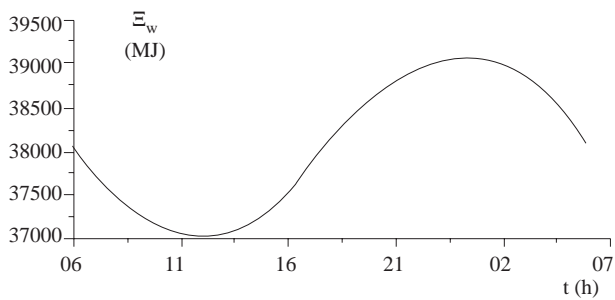
Şekil 3. E_q 'nin gün boyunca değişimi.



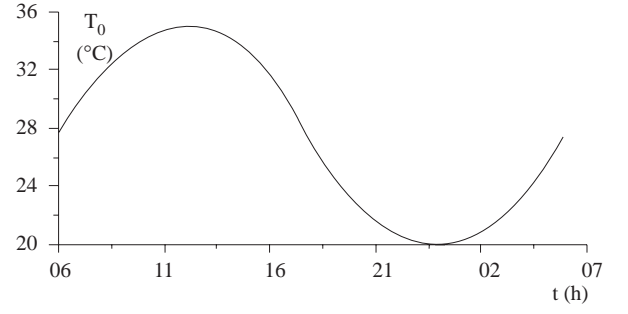
Şekil 4. E_a 'nın gün boyunca değişimi.



Şekil 5. E_k 'nin gün boyunca değişimi.



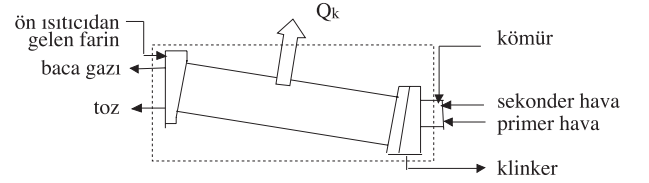
Şekil 6. E_w 'nin gün boyunca değişimi, $E_{w \min} = 37.042$ MJ, $E_{w \max} = 39.082$ MJ.



Şekil 7. Fırının çevre sıcaklığının gün boyunca değişimi, $T_{0 \min} = 20$ °C, $T_{0 \max} = 35$ °C.

Ön kalsinasyonlu kuru sistem döner fırın

Çimento üretiminde kullanılan ve Şekil 8'de şematik yapısı verilen döner fırın, ön ısıtıcı sisteminden gelen ve farin adı verilen maddenin pişmesini sağlayarak çimentoya esas teşkil eden klinkere dönüşmesini sağlamaktadır. Bu fırının kütle dengesi de Tablo 2'de, verilmiştir.



Şekil 8. Döner fırın ile fırına giren ve çıkan maddelerin şematik gösterimi.

Tablo 2. Döner fırının kütle dengesi.

Döner Fırına Giren Maddeler		Döner Fırından Çıkan Maddeler	
Madde	Kütle Miktarı (kg/h)	Madde	Kütle Miktarı (kg/h)
Farin	120.540	Klinker	93.000
Kömür	10.250	Toz	8.578
Hava (primer ve sekonder)	243.049	Baca Gazı	47.497
Toplam	373.839	O ₂ + N ₂ (Baca Gazı)	224.764
		Toplam	373.839

Denklem (6) benzer şekilde döner fırın için uygulandığında; aşağıdaki (17) eşitliği elde edilir.

$$\Xi_y = \Xi_w - \Xi_q + \left\{ \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_g e_g) dt - \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_c e_c) dt \right\} - \Xi_k - \Xi_s - \Xi_d \quad (17)$$

Bu eşitlikteki ekserji değerlerinin T_0 'a bağlı sayısal büyüklükleri ise şöyle bulunmuştur:

$$\Xi_w = 0(MJ) \quad (17a)$$

$$\Xi_q = 50.141 - 30T_0(MJ, T_0(K)) \quad (17b)$$

$$\Xi_a = \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_g e_g) dt - \int_{t_1}^{t_2} (\dot{m}_c e_c) dt = 130.984 + 89T_0(MJ, T_0(K)) \quad (17c)$$

$$\Xi_k = 0(MJ) \quad (17d)$$

$$\Xi_s = 0(MJ) \quad (17e)$$

$$\Xi_d = 0(MJ) \quad (17f)$$

$$\Xi_y = 80.843 + 119T_0(MJ, T_0(K)) \quad (17g)$$

$$T_0 = 18,5 + 6,5.Sin([2.\pi/24].t)(^\circ C) \quad (17h)$$

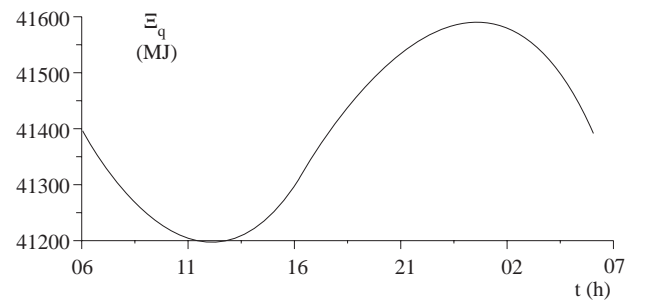
Yukarıda elde edilen eşitliklerin bir gün boyunca değişimleri ise Şekil 9-12 de verilmiştir.

Sonuç

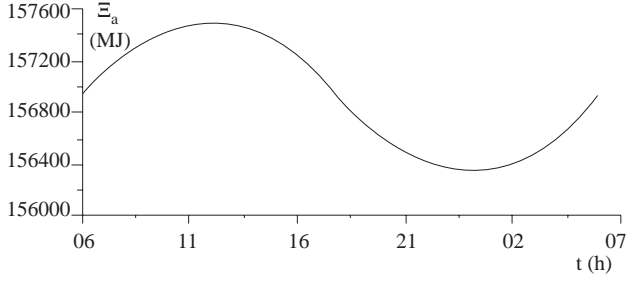
Ekserji analizi, bir sistemin ne kadar iyileştirilebileceğinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu potansiyel çevre sıcaklığı ile orantılıdır. Dolayısıyla değişken çevre sıcaklığı, sistemin performansını hem artırıcı hem de azaltıcı yönde sistemi etkileyebilmektedir. Ancak bu etkinin performansı ne zaman artırıcı yönde ve ne zaman performansı azaltıcı yönde olduğunun tespiti enerji maliyetlerinin azaltılması açısından faydalı olacaktır.

Gerçekleştirilen uygulamalar göz önüne alındığında; ark fırınına verilen tersinir işin bir döküm için maksimum miktarı 39.082 MJ iken, minimum miktar 37.042 MJ olarak elde edilmiştir. Aradaki fark 2.040 MJ dur. Ark fırınının çevre sıcaklığı arttıkça Ξ_q , Ξ_a , Ξ_k ve Ξ_w 'nin azaldığı ve çevre sıcaklığı azaldıkça da söz konusu büyüklüklerin arttığı görülmektedir (Şekil 3-7). Zira bu büyüklüklerin çevre ile enerji etkileşimleri birbirlerine zıttır. Bu bakımdan, çevre sıcaklığı arttıkça sistemden kayıp olan ekserjiler (enerjiler) azalmakta dolayısıyla sisteme daha az iş (ekserji) verilmekte; buna karşın çevre sıcaklığı arttıkça da ters durum gerçekleşmektedir.

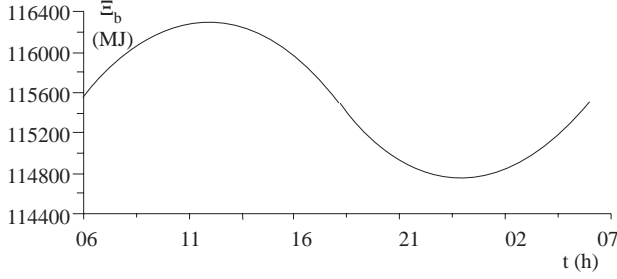
Döner fırında 1 saatlik üretim için kayıp olan maksimum ekserji 116.305 MJ, minimum ekserji miktarı ise 114.758 MJ dur. Aradaki fark 1.547 MJ. Burada da döner fırının çevre sıcaklığı arttıkça sistemden kayıp olan ısının ekserjisinin (Ξ_q) azaldığı; çevre sıcaklığı azaldıkça da bu ifadenin arttığı görülmektedir (Şekil 9 ve 12). Bununla birlikte çevre sıcaklığı arttıkça Ξ_a 'nın ve Ξ_y 'nin arttığı, çevre sıcaklığı azaldıkça da bu büyüklüklerin azaldığı görülmektedir (Şekil 10 ve 11). Gerçekten de sistemin giriş ve çıkış koşullarının değişmediği varsayıldığından; çevre sıcaklığı arttıkça, sisteme giren ile çıkan maddelerin ekserjileri azalmasına rağmen, aradaki fark (Ξ_a) artmaktadır. Meydana gelen artış ise kayıp (Ξ_y) olmaktadır.



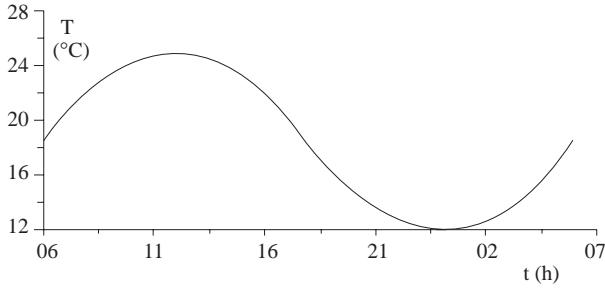
Şekil 9. Ξ_q 'nin gün boyunca değişimi.



Şekil 10. Ξ_a 'nın gün boyunca değişimi.



Şekil 11. Ξ_y 'nin gün boyunca değişimi, $\Xi_{y \max} = 116.305$ MJ, $\Xi_{y \min} = 114.758$ MJ.



Şekil 12. Fırın çevre sıcaklığının gün boyunca değişimi, $T_{\max} = 25$ °C, $T_{\min} = 12$ °C.

Bir çelik ve çimento tesisinin toplam kapasitesi dikkate alındığında yukarıda elde edilen değerlerin oldukça ciddi miktarlara çıkacağı kolaylıkla söylenebilir. Dolayısıyla sisteme herhangi bir müdahale olmadan, sadece çevre sıcaklığının değişiminden kaynaklanan bu değerlerin ne kadar

önemli olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca uygulamada gün boyunca sürekli olarak üretim yapmayan sistemlere rastlamak mümkündür. Bu bakımdan, bu tür endüstriyel sistemlerde sadece T_0 sıcaklığı dikkate alınarak üretimin gerçekleştirilmesinin, enerjinin daha verimli kullanılması açısından faydalı olacağı anlaşılmaktadır.

Semboller

E	Enerji (kJ)
e	Birim kütle başına ekserji (kJ/kg)
g	Gibbs fonksiyonu
h	Entalpi (kJ/kg)
m	Kütle (kg)
P_0	Çevre basıncı (kPa)
Q	Isı (kJ)
s	Entropi (kJ/kg.K)
T	Sıcaklık (°C,K)
T_{0m}	Çevre sıcaklığının ortalama değeri (°C,K)
ΔT_{0a}	Çevre sıcaklığının genliği (°C,K)
t	Zaman (s,h)
T_0	Çevre sıcaklığı (°C,K)
W	İş (kJ)
Ξ	Ekserji (MJ)

Alt indis

a	Akış
ç	Çıkış
d	Düzeltilme
g	Giriş
k	Kaçak, kayıp
q	Isıya ait
s	Sistem
ürt	Üretim
y	Yok oluş
0	Çevre koşullarındaki özellik
w	İşe ait

Üst indis

.	Zamana göre türev
---	-------------------

Kaynaklar

Çamdalı Ü., Çelen, F. ve Erişen, A., "Çimento Üretiminde Kullanılan Ön Kalsinasyonlu Kuru Sistem Döner Fırında Ekserji Analizi", Termodinamik Dergisi, 88, 71-80, 1999.

Çamdalı, Ü. ve Tunç, M., "Elektrik Ark Fırında

Ekserji Analizi ve Veriminin Tespit Edilmesi", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 2000 yılı yayın programında.

Gögüş Y. and Çamdalı, Ü.; "General Exergy Balance of a System with Variation of Environmen-

tal Conditions and Some Applications”, Proceedings of Energy Systems and Ecology Conference(ECOS) 2000, 1117-1130, July 5-7 2000.

Göğüş, Y. and Ataer, Ö.,E.; “Effect of variation of environmental conditions on exergy and on power conversion”, in A. Bejan and E. Mamut (eds). Ther-

modynamic Optimization of Complex Energy Systems, Netherlands, 231-240, 1999.

Sergio A. and Jose I.; “Minimum Energy Requirements in Industrial Processes: An Application of Exergy Analysis”, Energy 15(11), 1023- 1028, 1990.