



## KURU TİP ÇİMENTO ÜRETİMİNDE FARİN DEĞİRMENİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Ziya SÖĞÜT\*, Zuhâl OKTAY\*\*, Hikmet KARAKOÇ\*\*\* ve Yılmaz YÖRÜ\*\*\*\*

\* KHO Teknik Bilimler Bölüm Başkanlığı Makina ABD, Ankara, mzsogut@yahoo.com

\*\* Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Makina Müh.Bölümü, 10110 Balıkesir, zoktay@yahoo.com

\*\*\* Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Y.O. 26470, Eskişehir, hkarakoc@anadolu.edu.tr

\*\*\*\* Kırmızıtoprak M. Kaan S. 15/1, 26020, Eskişehir, Turkey

(Geliş Tarihi: 06. 02. 2009, Kabul Tarihi: 31. 08. 2009)

**Özet:** Termoekonomi ısı sistemlerinin tamamında verimsizliğin potansiyelini tespit etmekte kullanılan ve ekserji hesaplamalarını temel alan maliyet analizleridir. Bu yaklaşım ekserji maliyetleri olarak da tanımlanır ve eksergoekonomi olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada ısı sistemleri için oluşturulan yeni bir eksergoekonomik metodoloji; yüksek enerji tüketen bir çimento fabrikasının hammadde prosesi üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada prosesin bir haftalık çalışma dataları kullanılarak termodinamik analizler ile eksergoekonomik analizler yapılmıştır. Analizlerin sonucunda değirmenin enerji ve ekserji verimi sırasıyla ortalama % 82.9 ve % 18.44 bulunmuştur. Değirmenden çıkan ve farin ismi verilen ürünün birim maliyeti 0.00708-0.01078 \$/kg arasında hesaplanmıştır. Hesaplanan maliyetler fabrikanın farin maliyetleri ile karşılaştırılmış ve ekserji tüketiminin maliyet üzerinde etkileri değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çimento, Farin değirmeni, Enerji, Ekserji, Eksergoekonomik.

## THERMOECONOMIC ANALYSIS OF FARINE MILL IN DRY TYPE CEMENT PRODUCTION

**Abstract:** Thermoeconomics is the cost analysis based on the cost and exergy calculations which are used to determine the potential of unproductiveness in all of the thermal systems. This approach is also defined as 'exergy cost' and is named as 'exergoeconomics'. In this study, the new methodology of exergoeconomic analysis created for thermal systems has been applied on the raw material process of a cement plant which consumes high energy. In this study, two sets of analyses have been conducted by using operation data of the process weekly: the thermodynamic analyses and the exergoeconomic analyses. At the end of these analyses, the average energy and exergy efficiencies of the mill have been found 82.9% and 18.44% respectively. The unit cost of the output product named 'farine' has been calculated and found between 0.00708 - 0.01078 \$/kg. These costs have been compared with the farine costs of the cement plant, and the effects of exergy consumption on the cost have been evaluated.

**Key Words:** Cement, Farine mill, Energy, Exergy, Exergoeconomics

### SEMBOLLER

E	Enerji [kJ]
Ex	Ekserji [(kJ)]
h	Özgül entalpi [kJ/kg]
m	Kütle [kg]
Q	Isı akımı [kJ]
s	Özgül entropi [kJ/kgK]
T	Sıcaklık [K]
W	İş [kW]
C <sub>p</sub>	Özgül ısı kapasitesi [kJ/kgK]
a,b,c,d	Özgül ısı kapasite sabitleri
Ψ	Akış ekserjisi [kJ]
η <sub>I</sub>	Enerji verimi
η <sub>II</sub>	Ekserji verimi

### Indisler

in	Giriş
out	Çıkış
k	kinetik
ph	Fiziksel
ch	Kimyasal
p	Potansiyel
l	Ürün
0	Çevresel
la	Sızıntı hava
g	Gaz
lim	Kalker
cl	Kil
p	Pirit(Marn)
lh	Kalker nem

clh	Kil nem
pn	Pirit nem
sr	Seperatörden dönüş
d	Toz
hu	nem
d	Kayıp
a	Hava
s	Buhar
f	Farin

## GİRİŞ

Enerjinin etkin kullanımı, enerji verimliliği ile enerji tasarrufu çalışmaları, tüm dünyada ve özellikle yükselen enerji tüketimi ve maliyetleri nedeniyle sanayi sektörlerinde yoğun şekilde yapılmaktadır. Çimento sektörü; sanayi sektörleri arasında yüksek enerji tüketimine sahip önemli bir sektördür. Enerji tüketiminin yüksek olduğu bu tip sanayi kuruluşlarında yapılan enerji tasarruf çalışmalarının temel hedefi, enerji girdilerinde süreklilik, kalite ve düşük maliyetin sağlanması olmuştur. Bu hedefin gerçekleşmesine yönelik olarak, enerji tüketen bölümlerde, enerji taramaları ve termodinamik analizler yanında termoeconomik analizler de gerçekleştirilmelidir.

Ekserji; bir sistemin termodinamik sürecinde, referans alınan çevreyle denge haline gelirken, sistemde madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda iş olarak tanımlanmaktadır (Özgener ve Hepbaşlı, 2003). Ekserji kavramında çevrenin tanımlanması mutlak bir özelliktir. Enerjiden farklı olarak ekserji, gerçek sistemlerde tersinmezlikler nedeniyle, tüketilir veya yok edilir. Bir sistemde ekserji tüketimi tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropiyle orantılıdır. Termodinamiğin ikinci yasasına göre sistemlerde yapılan ekserji analizlerinin sonuçları; bir sistemde enerji tüketen bölümlere daha fazla duyarlılık gösterilmesini sağlamak için göz önüne alınmaktadır (Keenan, 1984; Wall ve Cong 2001). Bu yüzden ekserji analizi, sistemlerin analizinde önemli bir araçtır. Analizler sonucunda elde edilen veriler; mevcut sistemlerde enerjiye dayalı verimsizlikleri azaltmaya ve daha verimli sistemleri tasarlamaya yönelik değerlendirmeler için önemli bir bilgi sağlar. Bu bilginin işletmelere yansması ekonomik bir değerle ifade edilir. Bilimsel olarak bu değerlendirmenin kapsadığı alan enerjinin verim ve maliyet etkilerinin inceleyen termoeconomidir.

Termoeconomik bilimsel yaklaşımlarda bir mühendislik dalı olarak değerlendirilmektedir. Termoeconomik, sadece geleneksel enerji analizleri ile ekonomik değerlendirmeleri içermez, bunun yanında ekserji analizleri ile birlikte, sistemlerin verimli çalıştırılması ve tasarımına yönelik önemli bilgileri ve ekonomik

prensipleri de kapsamaktadır (Tsatsaronis ve Moran 1997). Termoeconomik analizlerde hedef, enerji akışına bağlı olarak maliyetlerin indirgenmesidir. Bu prensiple

amacın ısı sistemlerinde yapılan ve ekserji analizlerini içeren analizlerde, ekserji maliyetinin indirgenmesi olduğunu düşünülebilir. Bu değerlendirme bilimsel literatürlere eksergoekonomik analiz olarak girmiştir.

Eksergoekonomik analiz konusunda yapılan yayınlar incelendiğinde; ekserjetik maliyet hesaplamalarına ilişkin yöntem ve uygulamalarda farklı yaklaşımlar gözlenmektedir (Tsatsaronis ve Moran 1997; Hua vd.,1997; Lenti vd.,1997;Hebecker vd., 2005; Casarosa vd., 2004; Zhang vd., 2000; Tsatsaronis, 2007; Lazzaretto ve Tsatsaronis, 2005; Rosen ve Dinçer, 2003; Vieira vd., 2006). Bu yaklaşımlar iki grupta toplanabilir; Birinci yaklaşım; enerji sistemlerinin tekrarlayan optimizasyonu ile sistem veya elemanların değerlendirilmesinde, ürün akışlarının maliyetlerini temel alan eksergoekonomik hesaplama metotları, ikinci yaklaşım ise, sınırsal maliyetlerin hesaplanması ile tüm sistemin optimizasyonunu hedefleyen, Lagrange'a dayanan yaklaşımlardır. Bu iki temel yaklaşım bu alanda yapılan tüm çalışmaları özetlemektedir. Bu çalışmada, bu iki yaklaşımın temel ilkelerinden yararlanılarak, ısı bir proste ürünün ekserjetik maliyetinin hesaplanması için yeni bir yaklaşım oluşturulmuştur.

Eksergoekonomik analizlerin yapılmadığı çimento sektöründe, çoğunlukla enerji analizleri ve az da olsa ekserji analizlerinin yapıldığı gözlenmiştir. Bu analizlere örnek olarak aşağıdaki çalışmalar verilebilir. Koreneos ve diğ. (2003) Yunanistan'da beton ve çimento üretim hatlarının ekserji analizleri yapmışlar, üretim hattında bölümler ve prosesler üzerinde enerji kullanımının çevresel etkilerini incelemişlerdir. Khurana ve diğ. (2003) bir çimento tesisinde enerji dengesi oluşturarak elde edilen bulgular ışığında kojenerasyon sisteminin kurulmasına yönelik çalışma yapmışlardır. Çamdalı ve diğ. (2003) Türkiye'de kuru tip üretim yapan bir çimento fabrikasının üretim hattı üzerinde bulunan ön ısıtıcı döner fırının sisteminin kütle, enerji ve ekserji analizlerini yaparak ekserji verimliliğini hesaplamışlardır. Engin ve Arı (2004) kuru tip döner fırın sisteminde enerji taraması ve hammadde değirmeninde enerjinin geri dönüşümüne yönelik çalışma yapmışlardır. Ünlü (2002) tez çalışmasında Türkiye'de bir çimento fabrikasının verileri kullanılarak tipik bir çimento fabrikası için enerji ve kullanılabilirlik analizini incelemiştir. Ünal ve Üzümcü (2003) tez çalışmalarında Türkiye'de Batı Çimento Fabrikasında kütle, enerji ve ekserji analizi uygulamasını çalışmıştır.

Çimento sektörünü esas alan çalışmalarda genelde çimento fabrikasının üretim hattı üzerindeki döner fırın bölümü hedef alınmıştır. Çimento fabrikasının enerji tüketim dağılımı incelendiğinde, üretim hattı üzerinde bulunan her bölümde enerji tüketiminin yüksek olduğu görülmektedir. Fabrikada enerji tasarruf potansiyellerini ve maliyetlerini belirlemek için enerji, serji ve eksergoekonomik analizlerin, üretim hattı üzerinde diğer bölümlerde de yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, kuru sistem çimento fabrikalarında üretim hattı üzerinde yer alan her bölümün, verimlilik açısından ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamak amacıyla; gerçek çalışma verileri alınan bir çimento fabrikasının hammadde hazırlama (farin değirmeni) bölümünün öncelikle termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Daha sonra ekserji analiz sonuçları ve işletme maliyet verileri kullanılarak oluşturulan yeni bir yaklaşım ile değirmenin eksergoekonomik analizi yapılmış ve farinin ekserjetik maliyeti hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda elde edilen enerji ekserji analiz sonuçları ve bulunan ekserjetik maliyet, fabrika verileri ile karşılaştırılarak değerlendirmelerde bulunulmuştur.

## ÇİMENTO ÜRETİM SİSTEMİNİN TANITIMI

Kuru sistem çimento fabrikalarında üretim akışı; hammadde hazırlama, farin hazırlama, yakıt hazırlama, klinker hazırlama, katkı hazırlama, çimento üretimi ve paketleme bölümlerini içermektedir. Isıl enerjilerin çoğu üretim hattı üzerindeki farin, klinker, yakıt ve katkı hazırlama bölümlerinde kullanılmaktadır.

Hammadde hazırlamada kil, kalker vb. doğal hammaddeler; maden sahasından çıkarıldıktan sonra kırıcılardan iki aşamada geçirilerek tane boyları küçültülür ve ham madde silolarına gönderilir. Doğrultucu hammaddeler boksit, demir madeni, kum v.b. ile günümüzde sanayi artığı olarak gelen alternatif hammaddeler ve doğal hammaddeler birleştirilerek ön homojenizasyon sağlanır (Onat, 1997).

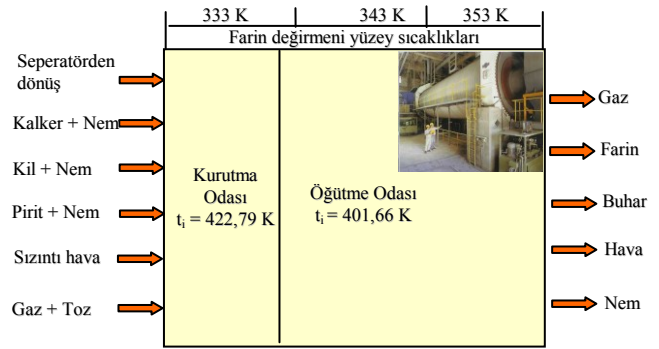
Kuru sistemde farin oluşumu; farin değirmeninde hammadde silolarından gelen kalker kil ve piritin önce kurutulması ve sonra öğütülmesi ile sağlanmaktadır. Elde edilen farin; farin depolarına alınır ve burada ortalama 323–333 K’de üretim politikasına göre bekletilir.

Farin değirmeni, çimento üretim hattında hammaddenin ısıl işlem ile karşı karşıya kaldığı ilk bölümdür. Uygulama yapılan fabrikadaki farin değirmeni; 3.8 metre çapında 10.5 metre uzunluğunda, karışım ve öğütme olmak üzere iki bölümden oluşmakta ve elektriksel güçle 15 dev/dak. hızla döndürülmektedir.

Farin değirmeninin karışım odasında; karışım ve savurma plakaları ile giren ürünlerin karışımı sağlanır. Öğütme odasında ise fırın içinde yer alan çelik bilyeler vasıtasıyla oluşan karışım, istenilen tane büyüklüğünde öğütülür. Farin değirmeni ve ürün akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.

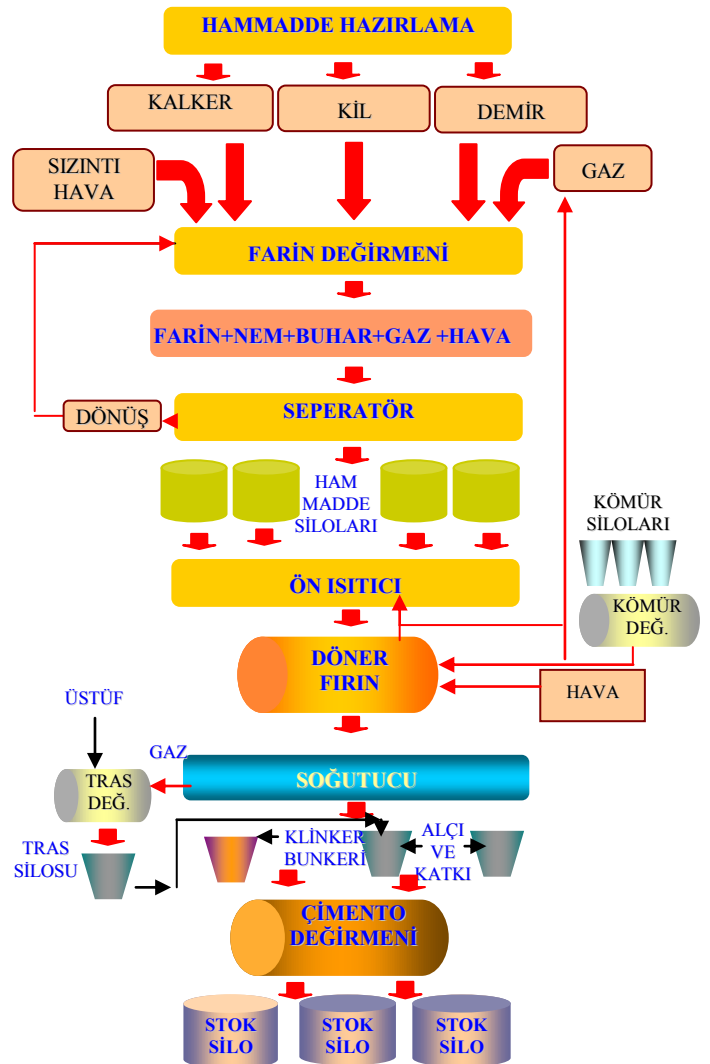
Farin, daha sonra ön kalsinasyon işlemi için döner fırın bölümünün ön ısıtıcı ünitesine gönderilir. Ön ısıtıcı siklonlarda 973–1073 K sıcaklığa getirilen farin, buradan klinker oluşumu için döner fırın ünitesine

gönderilir. Farin döner fırına bir uçtan girerken yakıt ve sıcak gazlar diğer uçtan fırına verilir.



Şekil 1. Farin değirmeni (Yeğinbolu, 2004).

Döner fırın ünitesi 1573–1973 K iç sıcaklıkta ve 2.5 devir/dak.’da dönmektedir. Bu devir, hem malzemenin iyi pişmesini, hem de malzemenin fırın çıkışına doğru ilerlemesini sağlamaktadır.



Şekil 2. Çimento üretim hattı akış şeması (Sogut, 2008).

Fırında yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi sonunda klinker oluşumu gerçekleştirilir. Döner fırından çıkan

sıcak klinker daha sonra yüksek kapasiteli fanlar ile soğutucudan geçirilir. Soğutma; yüksek kapasiteli fanlarla hızlı bir şekilde yapılır. 373–423 K sıcaklık aralığında soğutucudan çıkan klinker, çimento değirmeninde katkı maddeleri ile öğütülerek çimento haline getirilir. Kuru tip çimento üretim akış şeması Şekil 2’de verilmiştir.

## ANALİZ

### Ekserji Analizi Bağlıları

Sistemlerde enerji ve ekserji analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle sisteme giren ve çıkan maddelerin sıcaklık, özgül ısı kapasiteleri, kütsel debileri ve çevresel parametrelerin tanımlanması gerekir. Buna göre; sürekli akış halindeki bir sistemde giren ve çıkan maddeler için oluşturulan kütle dengesi (Szargut, 1986; Çomaklı 2004);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varphi \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Sürekli akış halindeki açık sistemlerde nükleer, manyetik, kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edildiğinde; sistemin, iş ve ısı etkisi dahil olmak üzere oluşan genel enerji dengesi;

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_\varphi \quad (2)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W} + \sum \dot{m}_\varphi h_\varphi \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\sum \dot{E}_g$  giren toplam enerji miktarını,  $\sum \dot{E}_\varphi$  çıkan toplam enerji miktarını,  $\dot{Q} = \dot{Q}_{net}$  toplam ısı akımını,  $\dot{W} = \dot{W}_{net}$  iş akımını, “h” ise giren ve çıkan maddelerin entalpi değerini ifade eder. Sürekli akış halindeki açık sistemlerde nükleer, manyetik, elektrik, ile kinetik ve potansiyel etkiler ihmal edildiğinde, genel ekserji dengesi;

$$\sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_\varphi = \sum \dot{E}x_D \quad (4)$$

olarak yazılabilir. Daha açık bir ifade ile;

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T_1}) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\varphi \psi_\varphi = \sum \dot{I} \quad (5)$$

şekline dönüşür (Kotas, 1995). Burada  $\dot{Q}_k$ ,  $T_1$  ürün sıcaklığında sistem sınırlarından geçen ısı transfer oranını,  $\dot{W}$  iş akımını,  $\psi$  akış ekserjisini, ifade etmektedir. Sistemde kimyasal, ısı ve iş etkileri ihmal edildiğinde; sisteme giren ve çıkan ekserji yükleri akış (fiziksel) ekserjisine eşit olur. Bu durumda akış ekserjisi;

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (6)$$

olarak yazılabilir (Wall ve Gong., 2001). Burada s entropiyi,  $h_0$  indisi ise belirli bir sıcaklık ve basınca göre referans alınan çevrenin durumunu belirtmektedir.

Isıl sistemlerde enerji ve ekserji analizlerine bağlı olarak sistemlerin enerji ve ekserji verimleri hesaplanabilir. Enerji verimi, sürekli akış halindeki ısı sistemlerde basit verimlilik bağıntısı ile bulunur. Nükleer, manyetik, kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edildiğinde sistemin enerji verimi; toplam çıkış enerji akışının, toplam giren enerji akışına oranıdır. Bu durumda farin değirmeni için enerji verimi ;

$$\eta_i = \frac{\sum \dot{E}_\varphi}{\sum \dot{E}_g} = \frac{\sum \dot{m}_\varphi \cdot h_\varphi}{\sum \dot{m}_g \cdot h_g} \quad (7)$$

Eşitliğinden bulunur (Özgener vd. 2005). Burada  $\sum \dot{E}_\varphi$  sistemden çıkan toplam enerjiiyi,  $\sum \dot{E}_g$  sisteme giren toplam enerjiiyi gösterir. Ekserji verimi temel formu da basit verimliliklidir. Buna göre ekserji verimi, toplam çıkış ekserji akışının, toplam giren ekserji akışına oranıdır. Bu durumda sistemin ekserji verimi;

$$\eta_u = \frac{\sum \dot{E}x_\varphi}{\sum \dot{E}x_g} \quad (8)$$

eşitliği ile hesaplanır (Balkan vd., 2005). Ekserji veriminin hesaplanmasında  $\sum \dot{E}x_\varphi$  sistemden çıkan toplam ekserjiiyi,  $\sum \dot{E}x_g$  ise sisteme giren toplam ekserjiiyi ifade eder. Isıl sistemlerde ekserjetik verimin bir başka ifadesi ürün ile yakıt arasında tanımlanabilir.

$$\eta_{u_3} = \frac{\text{istenilen ekserjetik verim}}{\text{kullanılan ekserji}} = \frac{\text{Ürün}}{\text{Yakıt}} \quad (8b)$$

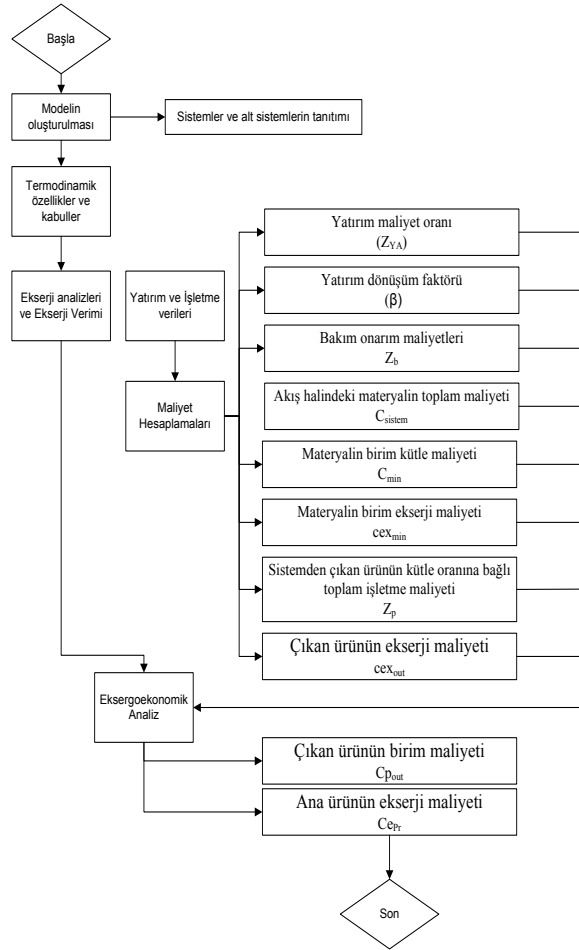
Sistemde istenilen ürün için gerekli ekserjinin, doğal gaz, fuel-oil ve kömür gibi tüketilen mevcut fosil yakıtların ekserjetik yüküne bağlı olarak ifade edilir (Özgener vd., 2005).

### Eksergoekonomik Analiz Bağlıları

Eksergoekonomik analizlerde genellikle uygulanan metodoloji; çıkan ürünün maliyetinin, sistemin yatırım bedeline, sisteme giren ve çıkan ürünün ekserjisine bağlı olarak yakıt maliyetleri cinsinden hesaplanmasıdır.

Tek akışkanlı güç sistemlerinde bu yaklaşım geçerli olabilir, ancak materyal giriş ve çıkışın fazla olduğu ısı sistemlerde yeterli olmadığı gözlenmiştir. Özellikle ısı sistemlerde, ürünün yanında giren ve çıkan materyallerin sayısal fazlalığı, sistemden elde edilen ürünün ekserji maliyetini etkileyecektir. Bu etki de sistemin çıkış maliyetini doğrudan etkileyecektir. Bu temel yaklaşımdan hareket ile bu çalışmada, sanayi tesislerinde ısı sistemlerinin eksergoekonomik analizlerinin yapılabilmesi için yeni bir metodoloji

oluşturulmuştur. Bu metodolojinin akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Eksergoekonomik analiz akış şeması.

Ekonomik ömür verilen tesislerde, sistemin yatırım bedeli çalışma yapılan yıla göre yapılmalıdır. Elde edilen yatırım bedeli etkisi, ürünün yanında sistemde akışı olan diğer materyaller için de hesaplanmalıdır. Eksergoekonomik analizlerin yapılabilmesi için sistemin ve alt sistemlerin yatırım maliyetleri, yatırım maliyet oranları, belirlenmelidir. Yatırım maliyet oranını ( $Z_{YA}$ ); yatırım dönüşüm faktörü( $\beta$ ), yıllık çalışma süresi( $H_{yil}$ ), sistemin maliyeti( $C_a$ ) ve bakım onarım maliyeti ( $Z_{bm}$ ) arasındaki bağıntı ile ifade edilir. Yatırım maliyet oranını ( $Z_{YA}$ );

$$Z_{YA} = \frac{\beta}{H_{yil}} \cdot (C_a + Z_{bm}) \quad (9)$$

dir. Yatırım dönüşüm faktörünün hesaplanabilmesi için tesisin ekonomik ömrü ve hesaplama yapılan yıla ait yıllık ortalama faiz oranları dikkate alınmalıdır. Yatırım dönüşüm faktörü ( $\beta$ );

$$\beta = \frac{I_r \cdot (I_r + 1)^n}{(I + I_r) - 1} \quad (10)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada  $n$  tesis ömrünü,  $I_r$  yıllık ortalama faiz oranı ifade eder. Bu çalışmada faiz oranları için Merkez Bankası verileri kullanılmıştır. Sistemin bakım onarım maliyeti; bakım onarım giderleri( $Z_b$ ), yedek parça giderleri( $Z_y$ ), nakil montaj giderlerinin ( $Z_m$ ) toplamıdır. Bu giderler işletme bilgilerinden alınmalıdır. Ancak bu bilgilere ulaşılama durumlarında bakım onarım maliyeti;

$$Z_b = 0,13 \frac{C_y}{n}, Z_y = 0,53 \frac{C_y}{n},$$

$$Z_m = 0,02 \frac{C_y}{n}$$

$$Z_{bm} = Z_b + Z_y + Z_m \quad (11)$$

dir. Burada  $C_y$  bakım onarımı yapılan elemanın yatırım maliyeti,  $n$  tesis ömrüdür. Bakım onarım maliyetlerinde özellikle yedek parça giderleri, sistemin özelliğine göre işleme katılıp katılmayacağı sorgulanmalıdır. Sistemin hesaplanan bakım onarım giderleri işletmenin yıllık bütçe harcamaları ile karşılaştırılmalıdır. Bu tür ısı sistemlerde akış halindeki her bir materyal ürün için prosesin genel yatırım maliyetinin etkisi değerlendirilmelidir. Bu, özellikle sisteme kontrolsüz giren sızıntı hava gibi materyal akışlarının maliyetlerinin belirlenmesinde de geçerlidir.

$$C_{sistem} = (Z_{YA} \cdot \%om) \quad (12)$$

Burada  $C_{sistem}$  toplam sistem maliyetine bağlı akış halindeki materyalin toplam maliyetini ifade etmektedir. Materyalin birim kütle maliyeti ( $C_{m_m}$ );

$$C_{m_m} = C_{rm} + C_c \text{ (\$/kg)} \quad (13)$$

bağıntısı ile hesaplanır.  $C_{rm}$  ürünün birim kütle ham maliyeti,  $C_c$  materyalin yatırım maliyet katkısını tanımlar. Bu sisteme giren her materyal için ayrı ayrı yapılmalıdır. Bulunan maliyete bağlı olarak birim ekserjinin maliyeti birim maliyetin kütlelen ekserjisine oranıdır. Sisteme giren materyalin birim ekserji  $Cex_{m_m}$ ;

$$Cex_{m_m} = \frac{C_{min}}{e_x} \text{ (\$/kJ)} \quad (14)$$

dir.  $Cex_{m_m}$  Sistemin her bir giren materyali için ayrı ayrı hesaplanır. Endüstriyel uygulamalarda ısı sistemden çıkan ürünlerin ekserji maliyeti; giren ekserji maliyeti, sistemin ekserji verimi ve ürünün çevreye bağlı ısı değişimi arasındaki fonksiyon ile işletme maliyeti ve ürünün çıkan toplam ekserjisi arasındaki fonksiyonunun toplamına bağlıdır. Sistemde veya alt sistemlerde materyal akışlarına etki eden elemanların (fan, motor vb.) taşıdıkları materyal birim kütleyle bağlı bakım

onarım maliyetleri, birim kütleye bağlı elektrik tüketim maliyetleri işletme maliyetini verir.

$$\Sigma Z_p = Z_e + Z_f \quad (15)$$

Burada  $Z_p$  sistemden çıkan ürünün birim kütle toplam işletme maliyetini,  $Z_e$  sistem elemanın bakım onarım maliyetinin birim kütle maliyetini,  $Z_f$  elemanın tükettiği elektrik yüküne bağlı birim kütle tüketim maliyetini ifade etmektedir. Çıkan ürünün ekserji maliyeti;

$$Cex_{out} = \frac{Cex_{mout}}{\mu_u \cdot \xi_T} + \frac{Z_p}{\Sigma E_x \text{ ürün}} \quad (16)$$

$$Cex_{out} = \frac{Cex_{mout}}{\mu_u \cdot \left( \frac{(T_1 - T_0)}{1 - \frac{T_m \cdot (T_1 - T_0)}{T_1}} \right)} + \frac{Z_p}{\Sigma E_x \text{ ürün}} \quad (17)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada  $Cex_{mout}$  ürünün oluşumuna katkı sağlayan giren ürün maliyetlerinin toplamı,  $Z_p$  ürünün tüketim maliyeti,  $\mu_u$  sistemin ekserji verimi,  $\Sigma \dot{E}x$  ürünün toplam ekserjisi,  $T_1$  çıkan ürünün sıcaklığı,  $T_0$  referans alınan ölü hal sıcaklığı,  $T_m$  birim Kelvin ve  $\xi_T$  ürün maliyeti sıcaklık sabitidir. Ürün maliyet sıcaklık sabiti, ürünün verimi ile maliyeti arasındaki ters bağıntıyı veren bir sabittir. Çıkan ürünün birim maliyeti, çıkan ürünün ekserjisinin birim kütle ekserjisi ile çarpımına eşittir.

$$C_{p_{out}} = ex \cdot Cex_{p_{out}} \text{ (\$/kg)} \quad (18)$$

Burada  $ex$  birim kütlenin ekserjidir. Sistemde üretilen ve ekserjiye bağlı ana ürün maliyeti sistemden çıkan ürünlerin toplam ekserjetik maliyetinin sistemden çıkan ana ürünün toplam kütlesine oranıdır.

$$Ce_{pr} = \frac{\Sigma Cex_p}{\dot{m}} \text{ (\$/kg)} \quad (19)$$

Burada  $\Sigma Ce_{pr}$  üretilen ana ürünün ekserji maliyetini,  $\Sigma Cex_p$  sistemden çıkan ürünlerin toplam ekserjetik maliyetidir.

## HESAPLARIN YAPILMASI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Farin değirmeni için, enerji ve ekserji, eksergoekonomik analizlerinin yapılabilmesinde öncelikle farin değirmenine giren ve çıkan maddelerin; ürün sıcaklıkları, özgül ısı kapasiteleri, giren ve çıkan materyallerin kütleli debileri giren hammadde maliyetleri, çalışma yapılan 7 günün ortam sıcaklığı gibi bilinmesi zorunlu değerler tespit edilmiştir. Farin değirmenine kütle analizi için giren maddeler ile çıkan

maddeler arasında denge kurulmuş ve kütle akışı Şekil 4'de verilmiştir. Farin değirmenine hammadde silolarından % 0.92–1.72 nem oranına sahip kalker, % 20.02–21.54 nem oranına sahip kil ve % 8.54–9.14 nem oranına sahip demir cevheri gelmektedir. Ayrıca ön ısıtıcı siklonlardan gelen ve 602–614 K sıcaklığa sahip gaz ve toz karışımı ile farin çıkışında uygun tane büyüklüğüne sahip olmayan farin, seperatörden geri döndürülerek değirmene verilir. Tüm sistem vakumda çalışmakta olduğundan, vakum etkisi ile değirmene sızıntı hava da girmektedir. Değirmende karıştırılıp kurutulan karışım öğütme bölümünde öğütüldükten sonra % 0.38-0.67 nem oranına sahip farin olarak değirmenden çıkmaktadır.

Özgül ısı kapasitesinin ( $C_p$ ) tespiti için deneysel olarak bulunmuş aşağıdaki bağıntıdan yararlanılmıştır. Her bir maddenin bileşimlerinin kütle debileri esas alınarak maddenin toplam özgül ısı kapasitesi hesaplanmıştır.

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (20)$$

Farin değirmenine giren ürünlere ait a,b,c,d sabitleri ilgili kaynaktan tanımlanmıştır Weast, 1976; Kılıç ve Yiğit 2000). Bu verilere göre hesaplanan 7 günlük ortalama  $C_p$  değerleri, değirmene giren ve çıkan maddelerin kütle debileri ve sıcaklık değerleri Tablo 2'de verilmiştir.  $C_p$  hesaplamalarında her maddenin elementer analizleri dikkate alınmıştır. Tablo 1'de değirmene giren sızıntı havanın, elementer analizine bağlı olarak hesaplanan özgül ısı kapasitesi örnek olarak verilmiştir.

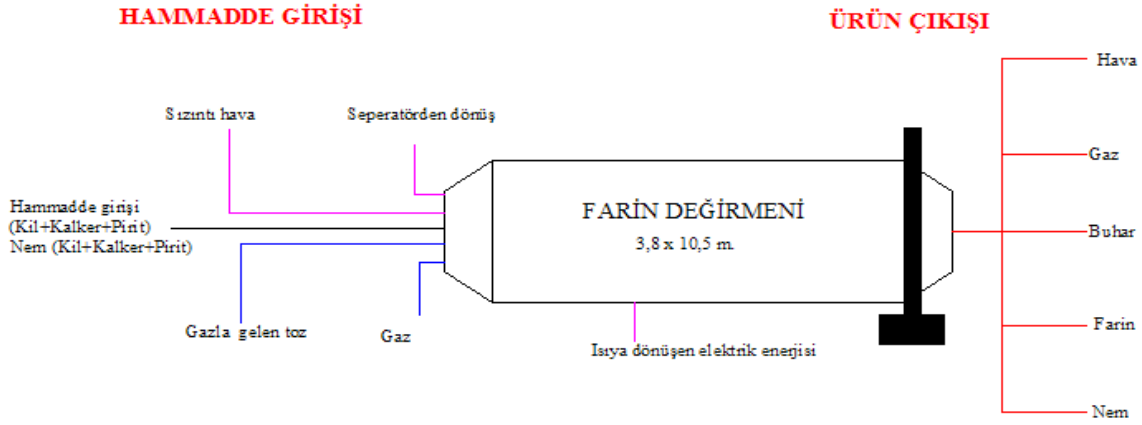
**Tablo 1** Sızıntı havanın özgül ısı kapasitesinin hesaplanması.

Madde	$T_p$	Bileş.	% oranı	m kg/h	Bileş. $C_p$ kJ/kgK	$M \cdot C_p$	$C_p$ kJ/kgK
	295	N <sub>2</sub>	77.37	3909.51	1.041	4069.8	
	295	O <sub>2</sub>	20.76	1049.0	0.925	970.33	
Sızıntı Hava	295	CO <sub>2</sub>	0.030	1.52	0.846	1.28	1.053
	295	Ar	0.920	46.49	4.97	231.04	
	295	H <sub>2</sub> O	0.010	0.51	4.181	2.11	
	295	Diğer	0.910	45.98	1.007	46.30	
TOPLAM				5053		5320.87	

**Tablo 2.** Farin değirmi giren ve çıkan maddelerin termodinamik özellikleri (kütle, sıcaklık,  $C_p$ ).

Durum	Materyal	01 Tem.			02 Tem			03 Tem.			04 Tem			05 Tem			06 Tem.			07 Tem		
		$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)	$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)	$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)	$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)	$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)	$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)	$T_p$ (K)	$C_p$ (kJ/kgK)	$\dot{m} * 10^3$ (kg/h)
Giren	Sızıntı hava	303	1.052	5.447	303.56	1.052	5.462	305	1.052	5.413	303.56	1.052	5.398	303	1.052	5.436	304.11	1.052	5.284	302	1.052	5.495
	Gaz	573	1.247	86.977	566	1.274	87.222	571	1.151	86.441	566	1.150	86.197	562	1.148	86.799	564	1.149	84.382	580	1.154	87.745
	Kalker	308	0.647	66.937	308	0.647	67.206	310	0.649	65.350	308.5	0.647	65.930	308	0.648	64.381	309	0.648	62.028	306	0.645	62.588
	Kil	308	1.178	21.114	308	1.178	21.113	310	1.183	21.996	308.5	1.179	21.185	308	1.181	23.069	309	1.181	23.015	306	1.173	25.447
	Pirit	308	2.755	1.747	308	2.755	1.745	310	2.764	1.708	308.5	2.757	1.823	308	2.760	1.782	309	2.760	1.601	306	2.745	1.764
	Seperatör den dönüş	354	1.032	35.357	353	1.032	35.456	353	0.848	35.139	352	0.848	35.040	352	0.847	35.284	352	0.847	34.302	352	0.847	35.669
	Kalker nem	308	4.178	1.151	308	4.178	1.156	310	4.178	1.124	308.5	4.178	1.134	308	4.178	1.107	309	4.178	1.067	306	4.178	1.077
	Kil nem	308	4.178	4.459	308	4.178	4.459	310	4.178	4.646	308.5	4.178	4.474	308	4.178	4.872	309	4.178	4.861	306	4.178	5.374
	Pirit nem	308	4.178	0.149	308	4.178	0.149	310	4.178	0.146	308.5	4.178	0.156	308	4.178	0.152	309	4.178	0.137	306	4.178	0.151
	toz	573	1.131	6.436	566	1.128	6.454	571	0.990	6.397	566	0.988	6.379	562	0.986	6.423	564	0.986	6.244	580	0.996	6.493
	Toplam			229.776			230.421			228.358			227.714			229.305			222.920			231.803
	Çıkan	Hava	374	1.164	5.447	373	1.057	5.462	373	1.057	5.413	373	1.057	5.398	372	1.057	5.436	372	1.057	5.284	371	1.057
Gaz		374	1.246	86.977	373	1.104	87.222	373	1.104	86.441	373	1.104	86.197	372	1.104	86.799	372	1.104	84.382	371	1.104	87.745
Buhar		374	2.032	5.101	373	2.028	4.979	373	2.028	5.001	373	2.028	5.124	372	2.025	5.611	372	2.025	5.398	371	2.021	2.025
Farin		374	0.886	131.592	373	0.885	131.974	373	0.885	130.589	373	0.885	130.355	372	0.884	130.939	372	0.884	127.189	371	0.884	131.962
Nem		374	4.218	0.659	373	4.217	0.785	373	4.217	0.915	373	4.217	0.640	372	4.215	0.521	372	4.215	0.666	371	4.214	2.025
Toplam				229.776			230.421			228.358			227.714			229.305			222.920			229.250



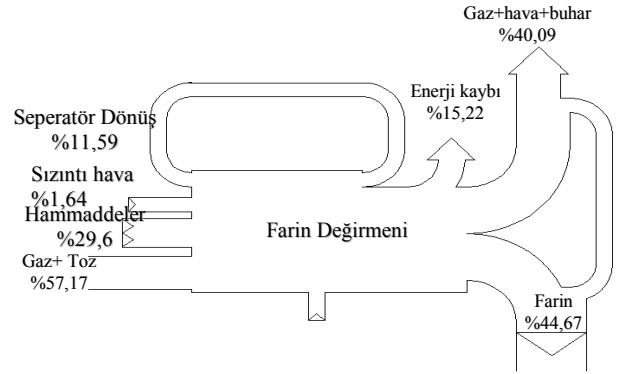


Şekil 4 Farin değirmeni kütle akışı.

Farin değirmeni sürekli akış halindeki açık bir sistem olarak değerlendirilmiş ve enerji dengesi için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Sisteme dışarıdan ısı verilmemektedir.
- Farin değirmeninin dönmesini sağlayan elektrik enerjisi analize iş olarak dahil edilmiştir.
- Farin değirmeni sürekli akış halindedir. Değirmene giren ve çıkan maddelerin kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir. Bu kabullere göre farin değirmeninin enerji dengesi Eşitlik (2.3)'den yararlanılarak hesaplanmış ve enerji dengesi Tablo 3'de verilmiştir.

Farin değirmeni enerji verimini, değirmende üretilen farinin ve çıkan ilave ürünlerin toplam enerjisinin değirmene giren maddelerin toplam enerjisine oranları olarak ifade etmek mümkündür. Buna göre Eş. 9'dan yararlanılarak hesaplanan değirmenin enerji verimleri Tablo 3'de, enerji akış grafiği Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Farin değirmeni enerji dağılımı

Sürekli akış halinde açık bir sistem olarak değerlendirilen farin değirmeninde, termodinamiğin ikinci yasasına göre ekserji analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle referans alınan çevrenin tanımlanması gerekir. Çevre tüm sistem için bir referans olarak alınmıştır. Referans sıcaklığı ( $T_0$ ) ortalama günlük ortam sıcaklığı ve referans basıncı ( $P_0$ ) 1 atm olarak alınmıştır.

Farin değirmenine giren ve çıkan maddelerin akış özelliğine bağlı olarak bünyelerinde sadece ısı değişimleri gözlenmekte, atomik yapılarında kimyasal reaksiyonlar olmamaktadır. Ayrıca bu ısı alışverişinde değirmene dışarıdan ısı verilmemektedir. Bu nedenle sürekli akış halinde; değirmenin ekserji analizleri yapılırken iş, ısı, kimyasal ekserjiler ile potansiyel ve kinetik ekserjiler ihmal edilmiştir. Farin değirmeninin ekserji analizi için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Baca gazları ideal gaz karışımı olarak ele alınmıştır. Hesaplamalarda değirmende kurutma işlevinde materyallerin atomik yapıları değişmediğinden dolayı kimyasal ekserji etkileri ihmal edilmiş, sadece fiziksel ekserjiler hesaplanmıştır.
- Farin değirmenine giren ve çıkan katıların entalpi ve entropi özellikleri üzerinde basıncın etkisi ihmal edilmiştir.
- Farin değirmeni sürekli akış halindedir. Değirmene

Tablo 3. Farin değirmeninin enerji dengesi.

Tarih	$\sum \dot{E}_g$ kJ/h	$\sum \dot{E}_ç$ kJ/h	$\eta_1$
01. Temmuz	88190.851	76811.395	0.871
07. Temmuz	100087.517	83681.769	0.836
05. Temmuz	101684.030	85547.934	0.841
06. Temmuz	102469.806	85899.576	0.838
04. Temmuz	103017.799	86070.517	0.835
08. Temmuz	106250.156	86026.198	0.810
02. Temmuz	110851.200	91416.409	0.825
03. Temmuz	111625.429	86648.203	0.776



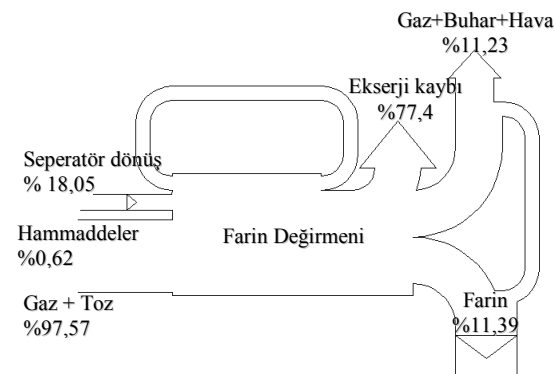
giren ve çıkan maddelerin kinetik ve potansiyel enerjiye ilişkin ekserji değerleri ihmal edilmiştir.

Yapılan bu kabullere ve elde edilen verilere göre değirmenin ekserji analizleri, Eş. (4-8)'den yararlanılarak yapılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Farin değirmenine ekserji analizi ( $T_0=295$  K).

Tarih	01 Tem.		02 Tem.		03 Tem.		04 Tem.		05 Tem.		06 Tem.		07 Tem.	
	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h	$T_0$ K	$\sum \dot{E}_x * 10^3$ kJ/h
<b>Materyal</b>														
Sızıntı hava	295	0.610	295	49.175	296	52.504	297	37.251	297	34.308	297	39.525	297	28.264
Gaz	295	8907.642	295	8753.193	296	8012.239	297	7677.190	297	7533.711	297	7419.496	297	10188.274
Kalker	295	12.052	295	12.101	296	13.606	297	9.265	297	8.292	297	9.486	297	-109.182
Kil	295	6.922	295	6.921	296	8.353	297	5.423	297	5.414	297	6.414	297	-51.004
Pirit	295	1.340	295	1.338	296	1.516	297	1.091	297	0.978	297	1.043	297	-8.379
<b>Giren</b>														
Seperatörden dönüş	295	190.275	295	185.884	296	144.628	297	134.843	297	135.688	297	133.274	297	172.199
Kalker nem	295	1.339	295	1.344	296	1.507	297	1.028	297	0.920	297	1.052	297	-11.957
Kil nem	295	5.185	295	5.185	296	6.230	297	4.058	297	4.047	297	4.795	297	-36.814
Pirit nem	295	0.174	295	0.173	296	0.196	297	0.141	297	0.126	297	0.135	297	-1.053
toz	295	598.058	295	573.406	296	510.143	297	488.064	297	478.904	297	471.389	297	656.157
<b>Toplam</b>		9723.596		9588.720		8750.924		8358.353		8202.388		8086.610		10826.505
<b>Çıkan</b>														
Hava	295	57.093	295	50.750	296	48.964	297	47.516	297	46.679	297	45.379	297	46.023
Gaz	295	975.294	295	846.609	296	816.803	297	792.656	297	778.692	297	757.008	297	767.749
Buhar	295	93.313	295	88.793	296	86.824	297	86.578	297	92.321	297	88.821	297	32.431
Farin	295	1049.679	295	1027.152	296	989.450	297	961.194	297	941.087	297	914.137	297	924.130
Nem	295	25.036	295	29.107	296	33.009	297	22.471	297	17.843	297	22.824	297	67.619
<b>Toplam</b>		2200.415		2042.411		1975.050		1910.415		1876.622		1828.170		1837.954
Verim		0,226		0.213		0.226		0.229		0.229		0.226		0.170

Farin değirmeninin ekserji verimini, değirmenden çıkan tüm maddelerin toplam ekserji değerlerinin, değirmene giren tüm maddelerin toplam ekserji değerlerine oranı, olarak ifade etmek mümkündür. Bu tanımlamaya göre; değirmenin ekserji verimleri Eş. 10'dan yararlanarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'de, ekserji akış grafiği de Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 6.** Farin değirmeni ekserji dağılımı.

Farin değirmeninin 7 günlük ortalama verilerine göre hesaplanan ekserjetik verimlerin %17 ile %22.9 aralığında değiştiği gözlenmiştir.

Farin değirmeninde üretilen ana ürün farindir. Farin maliyetini değirmene giren tüm materyallerin maliyetleri etkilemektedir. Değirmende farin maliyeti, ekserjetik etkilere bağlı önerilen eksergoekonomik metodoloji kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada fabrikaya ait işletme, yatırım, ürün maliyeti, faiz oranları, enerji maliyetleri gibi veriler işletmeden alınmıştır.

İlk yatırım bedeli 60,000,000 \$ olan çimento fabrikasında, farin değirmeninin yatırım bedeli 12,000,000 \$'dır. Farin değirmeninin 2004 yılı toplam çalışma saati 6282 saat, yıllık faiz oranı ortalaması % 19.55, değirmenin ömür yılı 20 yıldır.

Farin değirmeni ve değirmende mevcut farin değirmeni sirkülasyon fanı, abgaz vantilatörü, konkasör ve bunker arası motorlar, seperatör, çıkış motorlarının yatırım ve bakım onarım maliyeti 11347.74 \$'dır. Merkez bankası 2004 yılı yıllık faiz ortalaması ve değirmenin ömrüne bağlı olan ve Eş. 10'dan yararlanılarak hesaplanan

değirmenin yatırım dönüşüm faktörü 0.20, Eş. 9'dan yararlanılarak hesaplanan değirmenin yatırım maliyet oranı 384.616 \$ olarak bulunmuştur.

**Tablo 5.** Farin değirmenine giren ve çıkan materyallerin işletme maliyetleri .

Materyal	1 Tem.		2 Tem.		3 Tem.		4 Tem.		5 Tem.		6 Tem.		7 Tem.	
	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg	Kütle %	Z <sub>p</sub> \$/kg
Sızıntı hava	2.371	2.641	2.371	2.641	0.024	2.641	2.371	2.641	2.371	2.641	2.371	2.641	2.371	2.641
Gaz	37.853	41.655	37.853	41.655	0.379	41.655	37.853	41.655	37.853	41.655	37.853	41.655	37.853	41.655
Kalker	29.132	36.595	29.166	37.786	0.286	37.786	28.617	37.074	28.953	37.509	28.076	36.374	27.825	36.048
Kil	9.189	11.543	9.163	11.870	0.096	11.870	9.632	12.479	9.303	12.053	10.060	13.033	10.324	13.375
Pirit	0.760	0.955	0.757	0.981	0.007	0.981	0.748	0.969	0.800	1.037	0.777	1.007	0.718	0.930
Seperatörden dönüş	15.387	34.746	15.387	36.381	0.154	36.381	15.387	36.381	15.387	36.381	15.387	36.381	15.387	36.381
Kalker nem	0.501	0.629	0.502	0.650	0.005	0.650	0.492	0.638	0.498	0.645	0.483	0.626	0.479	0.620
Kil nem	1.941	1.339	1.935	1.335	0.02	1.335	2.034	1.403	1.965	1.356	2.125	1.466	2.180	1.504
Pirit nem	0.065	0.082	0.065	0.084	0.066	0.084	0.064	0.083	0.068	0.089	0.066	0.086	0.061	0.079
toz	2.801	3.557	2.801	3.669	0.028	3.669	2.801	3.669	2.801	3.669	2.801	3.669	2.801	3.669
Toplam	100	133.742	100	137.052	100	136.992	100	137.034	100	136.937	100	136.904	100	136.820
Hava	2.371	3.170	2.371	3.249	2.371	3.247	2.371	3.248	2.371	3.246	2.371	3.245	2.397	3.279
Gaz	37.853	50.626	37.853	51.878	37.853	51.856	37.853	51.872	37.853	51.835	37.853	51.822	38.275	52.367
Buhar	2.220	2.969	2.161	2.961	2.190	3.000	2.250	3.084	2.447	3.351	2.422	3.315	0.883	1.208
Farin	57.270	76.594	57.275	78.496	57.186	78.340	57.245	78.445	57.102	78.194	57.056	78.112	57.562	78.757
Nem	0.287	0.384	0.341	0.467	0.401	0.549	0.281	0.385	0.227	0.311	0.299	0.409	0.883	1.208
Toplam	100	133.742	100	137.052	100	136.992	100	137.034	100	136.937	100	136.904	100	136.820

**Tablo 6.** Farin değirmenine giren ve çıkan materyalleri hammadde ve yatırım maliyetleri.

Materyal	1 Tem.		2 Tem.		3 Tem.		4 Tem.		5 Tem.		6 Tem.		7 Tem.	
	ex kJ/kg	Cex \$/kJ	ex kJ/kg	Cex \$/kJ	ex kJ/kg	Cex \$/kJ	ex kJ/kg	Cex \$/kJ	ex kJ/kg	Cex \$/kJ	ex kJ/kg	Cex \$/kJ	ex kJ/kg	Cex \$/kJ
Sızıntı hava	8.41	0.0002	8.39	0.0002	8.47	0.0002	8.49	0.0002	8.43	0.0002	8.67	0.0002	8.34	0.0002
Gaz	102.41	0.0001	102.13	0.0001	103.05	0.0001	103.34	0.0001	102.62	0.0001	105.56	0.0001	101.52	0.0001
Kalker	0.18	0.0277	0.18	0.0278	0.18	0.0271	0.18	0.0273	0.19	0.0266	0.19	0.0259	0.19	0.0258
Kil	0.33	0.0180	0.33	0.0180	0.31	0.0188	0.33	0.0181	0.30	0.0197	0.30	0.0198	0.27	0.0216
Pirit	0.77	0.0044	0.77	0.0044	0.78	0.0043	0.73	0.0046	0.75	0.0045	0.84	0.0041	0.76	0.0044
Seperatörden dönüş	5.38	0.0170	5.37	0.0004	5.41	0.0168	5.43	0.0168	5.39	0.0167	5.55	0.0163	5.33	0.0165
Kalker nem	1.16	0.0043	1.16	0.0043	1.19	0.0042	1.18	0.0042	1.21	0.0041	1.25	0.0040	1.24	0.0040
Kil nem	1.16	0.0020	1.16	0.0020	1.12	0.0021	1.16	0.0020	1.06	0.0022	1.07	0.0022	0.96	0.0024
Pirit nem	1.16	0.0029	1.16	0.0029	1.19	0.0028	1.11	0.0030	1.14	0.0030	1.27	0.0027	1.15	0.0029
toz	92.92	0.0001	92.66	0.0001	93.50	0.0001	93.76	0.0001	93.11	0.0001	95.78	0.0001	92.11	0.0001
Toplam		0.0766		0.0600		0.0764		0.0765		0.0771		0.0753		0.0779
Hava	10.48	6.4E-05	9.29	0.00007	9.05	0.00007	8.80	0.00008	8.59	0.00008	8.59	0.00008	8.38	0.00008
Gaz	11.21	5.5E-05	9.71	0.00006	9.45	0.00006	9.20	0.00007	8.97	0.00007	8.97	0.00007	8.75	0.00007
Buhar	18.29	0.00014	17.83	0.00015	17.36	0.00015	16.90	0.00015	16.45	0.00015	16.45	0.00016	16.02	0.00021
Farin	7.977	0.00103	7.78	0.00111	7.58	0.00105	7.37	0.00106	7.19	0.00107	7.19	0.00106	7.00	0.00142
Nem	37.97	0.00012	37.07	0.00013	36.09	0.00013	35.12	0.00013	34.26	0.00013	34.26	0.00014	33.40	0.00019
Toplam		0.00140		0.00153		0.00146		0.00148		0.00150		0.00150		0.00197

Değirmende ürün akışlarına etki eden elemanların (fan, motor vb.) taşıdıkları materyallerin birim külesine bağlı maliyetleri, birim küleye bağlı elektrik tüketim maliyetlerinin toplamını veren değirmenin işletme maliyeti, Eş.15'den yararlanılarak hesaplanmış ve değirmene giren her elemana etki eden işletme maliyetleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. İşletme maliyetinin etkisi incelendiğinde, giriş materyallerinde en büyük payı 41.65 \$/kg ile gaz, 36.62 \$/kg ile kalker, 36.14 \$/kg ortalama ile seperatörden dönen farin almakta çıkış materyallerinde ise en büyük payı 78.13 \$/kg ile farin, 51.75 \$ ortalama ile gaz almaktadır. Değirmene giren materyallerin ürün hammadde ve yatırım maliyetleri Eş. (13,14) kullanılarak hesaplanmış ve ürün maliyetleri Tablo 6 'da verilmiştir.

Ürün maliyetlerinde yatırım maliyet etkisinin hesaplanmasında, değirmene giren her materyalin kütle oranları dikkate alınmıştır. Çıkan ürünlerin maliyetleri, değirmenin çıkış ekserji maliyetlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Burada özellikle sisteme giren sızıntı havanın ekserjetik etkilerinin maliyet yansımaları değerlendirilebilir. Sızıntı hava hammadde maliyet 0 \$/kg olmasına karşın sistemin yatırım maliyeti oranından kaynaklanan bir maliyeti vardır. Bu da değirmene giren toplam maliyeti arttırmaktadır. Çıkan ürünlerin ekserjetik maliyetlerinin hesaplanmasında, giren her bir ürünün çıkan ürüne katkı sağladığı birim kütle ekserjetik

maliyetleri, değirmenin ekserjetik verimi, işletme maliyeti katkısı, ürün maliyet sıcaklık faktörü ve çıkan ürünün toplam ekserjisi dikkate alınmıştır. Değirmende giren her bir ürünün çıkan ürüne katkı sağladığı birim kütle ekserjetik maliyetlerine ilişkin örnek Tablo 7'de verilmiştir. Buna göre çıkan buharın giriş maliyetini, giren ekserjetik maliyetlerden kalker, kil ve piritin oransal maliyetleri etkilemektedir.

**Tablo 7.** Buharın giriş ekserji maliyetinin hesaplanması.

Giren Maddeler	$\dot{m}$ kg/h	$\dot{m}$ %	$Cex_{m_{in}}^*$ $10^{-3}$ \$/kJ	$Cex_{m_{out}}^*$ $10^{-4}$ \$/kJ
Kalker nem	1151.323	19.989	4.285	8.570
Kil nem	4459.321	77.421	1.977	15.310
Pirit nem	149.2253	2.591	2.902	0.752
Toplam	5759.869	100		24.620

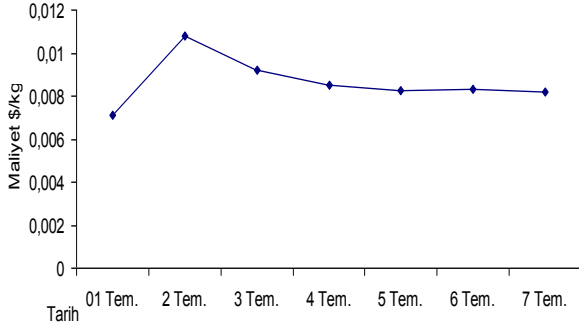
Elde edilen verilere göre değirmenden çıkan ürünlerin ekserjetik maliyetleri Eş. (16,17) kullanılarak bulunmuştur. Değirmenden giren ve çıkan ürünlerin birim ekserjileri ve birim ekserji maliyetleri Tablo 8'de verilmiştir.

Ana ürün farinin ekserji maliyeti; çıkan ürünlerin toplam ekserji maliyetinin farinin çıkan külesel debisine oranı olarak tanımlanır.

**Tablo 8.** Farin değirmenine giren ve çıkan materyallerin ekserji maliyetleri.

Materyal	1 Tem.		2 Tem.		3 Tem.		4 Tem.		5 Tem.		6 Tem.		7 Tem.			
	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg	$C_{rm}$ \$/kg	$C_m$ \$/kg		
Giren	Sızıntı hava	0.0000	0.0017	0.0000	0.0017	0.0000	0.0017	0.0000	0.0017	0.0000	0.0017	0.0000	0.0017	0.0000	0.0017	
	Gaz	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	0.0049	0.0115	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	
	Kalker	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	0.0033	0.0083	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	
	Kil	0.0042	0.0059	0.0042	0.0059	0.0042	0.0101	0.0042	0.0059	0.0042	0.0059	0.0042	0.0060	0.0042	0.0059	
	Pirit	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	0.0017	0.0051	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	
	Seperatörd en dönüş	0.0002	0.0019	0.0002	0.0019	0.0002	0.0021	0.0002	0.0019	0.0002	0.0019	0.0002	0.0020	0.0002	0.0019	
	Kalker nem	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	0.0033	0.0083	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	0.0033	0.0050	
	Kil nem	0.0006	0.0023	0.0006	0.0023	0.0006	0.0029	0.0006	0.0023	0.0006	0.0023	0.0006	0.0024	0.0006	0.0023	
	Pirit nem	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	0.0017	0.0051	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	0.0017	0.0034	
	toz	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	0.0049	0.0115	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	0.0049	0.0066	
	Toplam	0.0249	0.0416	0.0249	0.0416	0.0249	0.0665	0.0249	0.0418	0.0249	0.0417	0.0249	0.0422	0.0249	0.0415	
	Çıkan	Hava	0	0.00067	0	0.00068	0	0.00066	0	0.00068	0	0.00068	0	0.00068	0	0.00070
		Gaz	0	0.00061	0	0.00062	0	0.00061	0	0.00063	0	0.00062	0	0.00062	0	0.00063
		Buhar	0	0.00257	0	0.00269	0	0.00258	0	0.00250	0	0.00247	0	0.00255	0	0.00332
Farin		0	0.00818	0	0.00862	0	0.00794	0	0.00782	0	0.00770	0	0.00759	0	0.00993	
Nem		0	0.00443	0	0.00494	0	0.00458	0	0.00454	0	0.00450	0	0.00487	0	0.00627	
Toplam		0	0.01647	0	0.01755	0	0.01637	0	0.01617	0	0.01596	0	0.01631	0	0.02086	

Değirmenden çıkan farinin birim kütle ekserjetik maliyeti Eş. (18,19)'dan yararlanılarak hesaplanmış ve günlük ortalamalara bağlı bulunan farin maliyetleri Şekil 6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; hesaplanan farinin birim kütle ekserjetik maliyetinin 0.0071 \$/kg ile 0.011 \$/kg değerleri arasında değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 6. Farinin birim kütle ekserjetik maliyeti.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Farin değirmeni için yapılan enerji ve ekserji analizlerinin değerlendirilmesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Farin değirmeninde enerji verimliliği 62 %, ekserji verimliliği ise 25 % bulunmuştur. Enerji verimi değirmenin verimlilik potansiyelini ifade ederken, ekserji verimi verimliliğin niteliğini ifade etmektedir. Bu sonuç; farin değirmeninin termodinamiğin birinci kanununa göre kabul edilebilir bir verim değerine sahip olduğunu gösterse de, gerçekte farin değirmeninin çalışma şartlarına bağlı olarak, ürünlerin sahip olduğu gerçek entalpileri ve yarattıkları entropi değerlerine göre, çok düşük bir verime sahip olduğu saptanmıştır.
- Farin değirmeninde çıkan farinin birim kütle ekserjetik maliyeti 0.0071 \$/kg - 0.011 \$/kg arasında bulunmuştur. Farinin yıl maliyetleri 0.007-0.015 \$/kg arasındadır. Elde edilen sonuçlar işletmenin kendi günlük maliyet ortalamaları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine çok yaklaştığı gözlenmiştir.
- Farinin ekserjetik maliyetinin hesaplanmasında farin değirmeninin ekserji veriminin doğrudan etkisi vardır. Değirmenin ekserji veriminin yükseltilmesi farin maliyetinin düşmesine neden olacaktır.
- Ekserji verimliliğinin oldukça düşük değerde bulunması, farin değirmeninde yüksek miktarda enerji kaybının olduğunu göstermektedir. Farin değirmenine giren kalker, kil ve demir cevheri ile seperatörden dönen farinin yüksek miktarda debisel akışlarının olması, farin değirmenine giren maddelerin bünyelerinde barındırdığı nemin alınması için yüksek miktarda ve sıcaklıkta gaz girişine neden olmakta, bu da değirmendeki enerji potansiyelini yükseltmektedir. Dolayısıyla yüksek enerji girişine karşın kurutma ve öğütme bölümlerinde aşırı

enerji kayıpları oluşmaktadır. Farin değirmeni kurutma ve öğütme bölümünde farinin karıştırılması, kurutulması ve öğütülmesi için değirmenin 15 dev/dak. hızla döndürülmesi, kayıpların birim zamandaki etkilerinin artmasına neden olmaktadır. Farin değirmenine giren sızıntı hava değirmende enerji ve ekserji kaybını arttıran diğer önemli faktördür. Giriş ekserjisi sıfır olmasına rağmen değirmenden bünyesine ısı olarak enerji kaybına yol açmaktadır. Özellikle değirmen giriş ağzı, sızıntı hava girişinin azaltılması için dikkat edilmesi gereken bölümdür.

- Farin değirmeninde oluşan bu yüksek kayıpların giderilmesinde, değirmenin yapısal özelliklerini bozmayacak, kızgın yağ veya su akışkanlı serpantinli sistem gibi, enerji geri kazanım sistemlerinin değerlendirilmesi uygun olacaktır.

Sonuç olarak ısı sistemlerinin verimlilik analizlerinde ekserji analizlerinin kullanılması, verimsizliklerin azaltılmasına ve sistemlerin daha verimli çalıştırılması yönelik önemli katkılar sağlayacaktır. Bununla birlikte ürünlerde enerji maliyetlerinin etkilerinin değerlendirilebilmesi, enerji maliyetlerinin düşürülmesi, verimliliğin iyileştirilmesi ve ürün maliyetlerinin azaltılmasına yönelik optimizasyon çalışmalarında, enerjinin etkilerinin görülebilmesi açısından, önerilen eksergoekonomik analiz yönteminin tercih edilmesi, büyük kolaylıklar yaratacaktır.

## KAYNAKLAR

- Balkan, F., Çolak, N., Hepbaşlı, A., Performance evaluation of a triple effect evaporator with forward feed using exergy analysis, *International Journal of Energy Research Int.J.Energy Res.*,29, 455-470, 2005.
- Çamdalı, Ü., Erişen, A., Çelen, F., Energy and Exergy analyses in a Rotary Burner With Pre-calcinations in Cement Production, *Energy Conversion and Management*, Elsevier Ltd, Aralık 2003.
- Casarosa, C., Donatini, F., Franco, A., Thermoeconomic optimization of heat recovery steam generators operating parameters for combined plants, *Energy*, 29, 389-414, Mart 2004.
- Çomaklı, K., Karslı, S., Yılmaz, M., Termal Sistemlerin Ekserjetik Analizi, *Atatürk Ü. Müh- Fak. Makina Müh. Bölümü*, Atatürk Ü. Pasinler M.Y.O., Termodinamik, Ocak 2004.
- Engin, T., Arı, V., Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study, *Energy Conversion and Management*, Nisan 2004.
- Hua, B., Chen, Q. L., ve Wang, P., A New Exergonomic Approach for Analysis and Optimization of Energy System, *Energy*, 22, 11, 1071-1078, 1997.

- Hebecker, D., Bittrich, P., Riedl, K., Hierarchically structured exergetic and exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion processes, *Energy Conversion and Management*, 46, 1247-1266, Mayıs 2005.
- Keenan, J.H., *Thermodynamics, 3 rd. Ed. Wiley*, New York, 1948.
- Kenti, T. G., Moran, M., Exergy-Aided Cost Minimization, *Energy Conversation Management*, 38, 15-17, 1535–1542, 1997.
- Khurana, S., Banerjee, R., Gaitonde, U., Energy balance and cogeneration for a cement plant, *Indian Institute of Technology, Energy Systems Engineering*, Kasim 2001.
- Kılıç, M., Yiğit, A., *Isı Transferi*, VipaşA.Ş. Uludağ Üniv. Güçlendirme Vakfı ROTA Ofset Matbaacılık ve Ambalaj San. A.Ş. Bursa, Sayfa 101-107, 2000.
- Koroneos, C., Vasilakis, N., Theodosiou, and Moussiopoulos, N., Exergy Analysis of Cement and Concrete Production, *International Exergy, Energy and Enviroment Symposium*, İzmir, Haziran 2003.
- Kotas, T.J., *The exergy method of thermal plant analysis*, Kriger publishing, USA 1995.
- Lazzaretto, A., Tsatsaronis, G., SPECO: A systematic and general metedology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy*, Sayfa 1-33, 2005.
- Lenti F., Massardo A., Sata A., *Thermoeconomic Optimization of a Simple Thermal Power Plant Using Mathematical Minimization Algorithms*, 1997.  
<http://ieeexplore.org/iel5/52/2490/00074706.pdf?amumber=74706>.
- Rosen, M.A., Dinçer, I., Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal system and processes, *Energy Conversion and Management*, 44, 1633-1651, 2003.
- Onat, L., *Çimentonun Kimyası ve Üretimi*, Balıkesir Çimento yayınları, Balıkesir, Aralık 1997.
- Özgener, L., Hepbaşlı, A., HVAC sistemlerinde ekserji analizinin gerekliliği ve uygulamaları, *VI Ulusal Tesisat Mühendisliği kongresi ve sergisi*, İzmir, 2003.
- Özgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Exergy Analysis of Salihli Geothermal District Heating System in Manisa, Turkey, *International Journal of Energy Research*, 29(5),398-408, 2005.
- Sogut, Z., Oktay, Z., Energy and Exergy analyses in a thermal process of a Production Line For a Cement Factory and Application, *International J. Exergy*, 5, 2, 2008.
- Szargut, Standart Chemical Exergy of some Elements and Compounds on the planet Earth, *Energy*, 11, 8, 7333-735, 1986.
- Yeğınbolu, A., *Çimento –Yeni Bir Çağın Malzemesi*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, Ankara, 2004.
- Tsatsaronis, G., Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, *Energy*, 32, 249-253, 2007.
- Ünal, S., Üzümcü, M., Mass, Energy and Exergy Applicationin Batıçim Cement Industry, *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü*, İzmir, Haziran 2003.
- Ünlü N., Tipik Bir Çimento Fabrikası İçin Enerji ve Kullanılabilirlik Analizi, *Gebze Yüksek Teknolojiler Enstitüsü Müh. ve Fen Bilim. Enstitüsü*, Gebze, 2002.
- Vieira, L.S., Donatelli J.L., Cruz M.E., Mathematical exergoeconomic optimization of a kompleks cogeneration plant aided by a Professional process Simulator, *Applied Thermal Engineering*, 26, 654-662, 2006.
- Wall, J. and Cong M., “Un exergy and sustainable development-Part2; Indicators and methods ”, *Exergy Int. J.*, 1(4), 217-233, 2001.
- Wall, J. and Gong, M., Un exergy and sustainable development-Part2:Conditions and concepts, *Energy Int. J.*, 1(3), 128-145, 2001.
- Weast, R.C., *Handbook of Chemistry and Physics*, 56th. Edition, CRC Pres Cleveland., 1976.
- Zhang, G., Hua B., Chen Q., Exergoeconomic methodology for analysis and optimization of process systems, *Computers and Chemical Engineering*, 24, 613–618, 2000.



Ziya SÖĞÜT, 1964 Mardin doğumludur. Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina ABD Tesisat Öğretmenliğinden 1988 yılında Teknik Öğretmen olarak mezun olmuştur. 2005 yılında Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Makine mühendisliği Yüksek Lisans Programını, 2009 yılında aynı enstitünün doktora programını tamamlayıp doktor ünvanını almıştır. Halen Kara Harp Okulu Dekanlığı Teknik Bilimler Böl. Bşk.lığı Makine ABD'da Makine Öğretim Elemanı olarak görev yapmaktadır. Ekserji ve eksergoekonomik analizler, Isı geri kazanımı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları konularında çalışmaları vardır.



Zuhal OKTAY , 1991 yılında Uludağ Üniversitesinden Makina Mühendisi olarak mezun olmuş, 1993 yılında yüksek lisans ve 1999 yılında da doktorasını tamamlamıştır. 2005 yılında Kanada da postdoktora yapmış, 2007 yılında Doçent ünvanını almıştır. Halen Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesinde Enerji Anabilim Dalı Başkanlığı ve öğretim üyeliği görevini sürdürmektedir. Jeotermal enerji, ısı pompaları, kurutma, ve sanayide enerji verimliliği konularında birçok yurtiçi ve yurt dışı çalışmaları mevcuttur ve sertifikalı Enerji Yöneticisidir. İlgili alanları olarak yenilenebilir enerji, sanayide enerji tasarrufu, enerji verimliliği konuları sayılabilir.



Hikmet KARAKOÇ, 1959 yılında Eskişehir doğumludur. 1980 yılında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin Makine Mühendisliği Bölümünden Mezun olmuş, 1982 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliğinde doktora eğitimini tamamlamış ve doktor ünvanını almıştır. 1987 yılında doçentlik ve 1992 yılında Profesörlük ünvanlarını almıştır. Isıtma, soğutma iklimlendirme, iç hava kalitesi, gaz türbinleri, Enerji ekonomisi yakıtlar ve yanma, doğal gaz konularında çalışmaları vardır. Pek çok endüstriyel projede araştırmacı, yürütücü ve yönetici görevlerinde bulunmuştur.



Yılmaz Yörü, 1974 yılında Eskişehir'de doğumludur. 1997 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Bir yıl sonra mezun olduğu bölümde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini de aynı bölümde yapmıştır. Termodinamik (Ekserji), akışkanlar mekaniği, yapay zeka ve bilgisayar programlama ilgi alanları arasındadır.