

DÖRT KADEMELİ PARALEL AKIŞLI ÖNISITICI SIKLONLU ÇİMENTO FABRİKASINDA KÜTLE VE ENERJİ DENKLİKLERİNİN MATEMATİK MODELENMESİ

Ahmet KOLİP* Ahmet Fevzi SAVAS**

**Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, 54187, Esentepe Kampüsü, Sakarya, TÜRKİYE*

***Bilecik Üniversitesi, Osmaneli MYO, 11500, Osmaneli, Bilecik TÜRKİYE*

akolip@sakarya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, paralel akışlı dört önısıtıcı siklonlu çimento fabrikası için kütle ve enerji denklikleriyle ilgili bir matematik model kurulmuştur. Matematik modelde katı maddenin CaCO_3 , CaO , MgCO_3 (veya MgO) ve diğer oksitlerden meydana geldiği kabul edilmiştir. Bu modele, dip siklon ve döner fırında gerçekleşen kalsinasyon oran ve miktarları ile dip siklondan önceki siklonlarda meydana gelen yeniden karbonatlaşma oran ve miktarları da dahil edilmiştir. Matematik modele uygun olarak geliştirilen bilgisayar programı vasıtasıyla döner fırın ve paralel akışlı önısıtıcı siklonların her birinin giriş ve çıkışlarındaki katı ve gaz akımlarının miktarları, enerji girdi-çıkışları ve sıcaklıkları hesaplanabilmektedir. Özellikle enerji maliyetlerinin toplam işletme giderleri içindeki payının oldukça yüksek olduğu (%55) bu sektör için geliştirilen bu model, enerji maliyetleri ve ünitelerin verimli kullanımı açısından optimum çalışma aralıklarının belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca problemin hangi ünite ve hangi parametreden kaynaklandığı belirlenerek gerekli iyileştirme çalışmalarının yapılmasında da yararlı olabilir.

Anahtar kelimeler: Paralel akış, Önısıtıcı siklon, Kütle, Enerji Dengesi, Matematik modelleme

MATHEMATICAL MODELLING OF MASS AND ENERGY BALANCES AT A FOUR STAGE PARALLEL FLOW WITH PREHEATER CYCLONE CEMENT PLANT

ABSTRACT

In the present study, a mathematical model concerning the mass and energy balances is developed for a parallel flow preheater cyclone cement plant. The model assumes that the solid material is composed of CaCO_3 , CaO , MgCO_3 (or MgO) and other oxides. Calcination ratios and amounts of solid materials which take place in deep cyclone and rotary kiln, recarbonation ratio and amounts of solid materials in the nearest upper cyclone to the deep cyclone are also taken into account in the model. By means of a program algorithm developed for the study, the amounts of the mass and the energy of solids and gas flows and their temperatures at inlets and outlets of each cyclone stage can be easily calculated. Since the ratio of the energy input cost in the total operation costs is rather high (~55%) in the cement plants, it is shown that the program developed may be a useful tool in terms of determining the optimum operation ranges which govern the units operating with energy savings and productivity modes.

Keywords: Parallel flow, Preheater, Mass, Energy balance, Mathematical modeling

1. GİRİŞ

Paralel akışlı önısıtıcı siklonlu çimento üretim sistemlerinde hammadde ve gaz akışı şöyle olmaktadır. Döner fırından çıkan baca gazları, paralel siklon gruplarında eşit olarak yukarıya doğru çıkarken hammaddenin tamamı 1 nolu siklona beslenir. Tüm hammadde önısıtıcı siklon grubunun bir tarafından diğer tarafına geçmek suretiyle bütün siklonlardan seri bir şekilde geçer. Bu sistemin ana özelliği, seri hammadde akımının her iki paralel gaz akımından geçmesidir. Yani gaz miktarının sadece yarısı hammaddenin tamamı ile temas eder (Şekil 1). Paralel siklon grubun en altında yer alan dip siklondan çıkan kısmen kalsine olmuş hammadde döner fırına girmektedir. Hammaddenin geri kalan kalsinasyon işlemi döner fırında olmaktadır. Ayrıca hammadde döner fırında pişme sürecinden de geçerek çimentonun ana hammaddesi olan klinker'e dönüşür.

Döner fırından çıkan baca gazları bir damper sistemi vasıtasıyla arzu edilen oranlarda (çoğunlukla eşit miktarda) paralel akışlı siklon grubunun her birine paylaşılır. Fırın gazlarının önısıtıcı siklon gruplarına dağıtımının kontrolü damperler vasıtasıyla sağlanır. Damper sisteminin pozisyonu, iki gaz akımında CO ve O₂ miktarlarını gösteren iki gaz analizörü ile ayarlanır. Dip siklonlardan sonra yerleştirilen bu gaz analizörü normal olarak fırın gazlarında % 1 O₂ ve dip siklon gazlarında %2 O₂ gösterir. CO miktarı ise pratikte sıfır kabul edilir [1, 2].

2. KÜTLE DENKLİKLERİNİN MATEMATİK MODELLEMESİ

Farklı çimento üretim sistemleri için (yaş, yarıyaş, kuru vb.) değişik kütle denklik hesaplama yöntemleri vardır. Yaş ve yarıyaş sistem çimento üretimi hemen hemen terk edildiğinden kuru sistem üzerinde durulacaktır. Kuru sistem ve yaş sistem üzerine yapılan çalışmalardan kayda değer olanlardan bazıları aşağıda verilmiştir. GÜRÜZ, K. [3], yaş sitem ile çalışan çimento fabrikalarında kütle ve enerji denkliği hesaplama yöntemi konulu bir çalışma yapmıştır. Yapılan bu çalışmada çamur suyunun buharlaşma entalpisi için fazla yakıt harcandığını tespit ederek kuru sistemi önermişlerdir. . ELKJAER, H.P. [4], FEI, P. [5], seri akışlı kuru sistem önısıtıcı siklon gruplarında ısı enerjisi denkliğiyle ilgili bir matematiksel modelleme çalışmışlardır. GERDEİK, H.O. ve ROSEMANN, H. [6], seri akışlı önkalsinatörlü çimento fabrikalarında kütle ve enerji denkliği yardımı ile yakıt enerjisinin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. FRISCH,

V., JESCHAR, R. ve GERDEİK, H.O. [7], seri akışlı önkalsinatörlü sistemde tersiyer havaya bağlı olarak döner fırındaki enerji denkliği üzerine matematik modelleme yapmışlardır. GERDEİK, H.O [8], seri akışlı önkalsinatörlü çimento fabrikalarında döner fırın ve önkalsinatör ünitesinin yakıt paylaşımının katı kütle ve tersiyer hava parametreleriyle değişimini incelemişlerdir. VASTEEN, V.B. [9], dört ve beş kademeli önısıtıcı siklon gruplarında siklon sayısı ile döner fırın çıkış gaz sıcaklığının ısı verime etkisi üzerine çalışmıştır. ROSEMANN, H. [10], önkalsinatör ünitesinde yanma ve enerji transferini incelemişler hammaddenin kalsinatörde kalma süresi uzaması ile kalsinatörde yakıt tüketiminin azalacağını tespit etmişlerdir. KOLYFEETİS, E.,ve VAYANES, C. G. [11], kalsinasyon başlangıç sıcaklığının ve kalsinasyon oranının kalsinatör ünitesinde kütle ve enerji denkliği üzerine etkilerini incelemişlerdir.

Çimento üretim sistemleri bir bütün olarak ele alındığında kütle denkliği klinker üretimi esas alınarak; karbonkükürt, azot, hidrojen ve oksijen denkliklerinin yanısıra kalsiyumoksit, demiroksit, magnezyumoksit ve uçucu olmayan oksitler (U_{oo}) olmak üzere altı adet oksit denkliği ile hesaplanabilir.

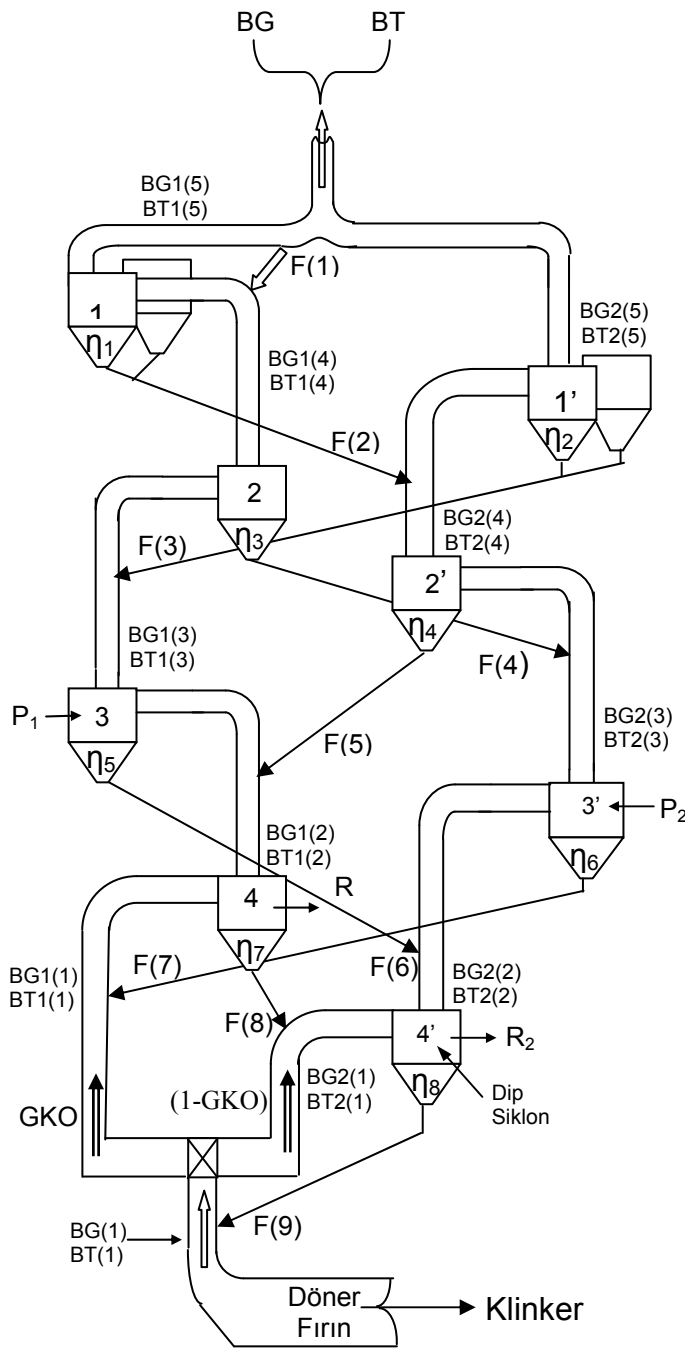
Bu çalışmada ortaya konulan matematik modelde hammaddenin; CaCO₃(X), CaO(Y), MgCO₃ (V) veya MgO(W) ile diğer oksitler (Z) olmak üzere dört bileşenden oluştuğu var sayılmıştır [12, 13, 14]. Böylece, bu matematik modele uygun olarak GW-BASIC dilinde geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla tüm sistem ve döner fırın ile paralel akışlı önısıtıcı siklonların her birinin giriş ve çıkışlarındaki katı ve gaz kütlelerin miktar ve bileşimleri hesaplanabilmektedir.

2.1. Yanma Denklikleri ve Baca Gazı Miktarının Hesaplanması

Döner fırın çıkışındaki gaz kütleler, yanmadan ve hammaddenin kalsinasyonundan meydana gelmektedir. Burada yanma ile ilgili denklikler verilecektir [12, 13, 14].

Gerekli yanma havası:

$$A = \frac{Y \cdot \lambda \cdot \frac{100}{23} \cdot \left[\frac{8}{3} \cdot C_Y + S_Y + (8 \cdot H_Y - O_Y) \right]}{28.97} \quad (1)$$



Şekil 1. Paralel akışlı önısıtıcı siklonlu çimento fabrikasının gaz ve katı akım şeması

Yanma gazları:

$$CO_{2,Y} = Y.C_Y \cdot \frac{\eta_Y}{12}$$

$$CO_Y = Y.C_Y \cdot \frac{1-\eta_Y}{12}$$

(2.a)

$$O_{2,Y} = 0,21.A.(\lambda - 1)$$

$$N_{2,Y} = 0,79.A$$

$$SO_{2,Y} = Y \cdot \frac{S_Y}{32}$$

(2.b)

$$H_2O_Y = Y \cdot \left[\frac{H_2O_Y}{18} + \frac{H_Y}{2} \right] \quad (2.c)$$

Baca gazı içinde yanma gazlarından başka hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan CO₂ ile hammadde nemi ve hammadde kristal suyunun buharları da yer almaktadır.

Baca gazı içerisindeki toplam CO₂:

$$CO_2 = CO_{2,Y} + \frac{44}{100} \cdot X_0 + \frac{44}{84} \cdot V_0 \quad (3)$$

Baca gazı içerisindeki toplam su buharı

$$\sum H_2O = H_2O_Y + A \cdot X_s + F_w + K_{Kw} \quad (4)$$

Toplam baca gazı miktarı:

$$BG = CO_2 + CO + O_2 + SO_2 + N_2 + \sum H_2O \quad (5)$$

2.2. Hammaddedeki MgCO₃ ve Toplam CO₂ Mol Miktarlarının Hesaplanması

Kuru hammadde içindeki MgCO₃, CaCO₃ ve toplam CO₂ mol miktarları; kuru hammadde içinde bulunan ve kızdırma kaybının tamamen karbonatların bozunmasıyla kristal suyunun uçurulmasından meydana geldiği varsayılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

MgCO₃ mol miktarı (MCM):

$$MCM = \frac{MgO_F}{40} \quad (6)$$

CaCO₃ mol miktarı (CCM):

$$CCM = \frac{\text{Hammaddedeki toplam karbonat} - (84 \cdot MCM)}{100} \quad (7)$$

Toplam CO₂ mol miktarı (TCM):

$$TCM = MCM + CCM \quad (8)$$

2.3. Önısıtıcı Siklonlara Girişte ve Siklon Kademelerinde Katı ve Gaz Kütle Denglikleri

Önısıtıcı siklon kademelerinde katı ve gaz kütle denglikleri kurulurken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır: [12, 13, 14]

- Klinkerdeki uçucu olmayan oksitlerin toplamı 1.0' dir,
- Döner fırında yakılan yakıt külünün tamamı klinker tarafından absorbe edilir,
- Döner fırından fırın gazlarıyla sürüklenerek çıkan baca tozları tamamen klinkerin kimyasal analiziyle aynıdır [4, 5, 6],
- Girişte hammaddedeki MgO tamamen MgCO₃ halindedir,
- P₁ kadar CaO dip siklonun üzerindeki üçüncü siklonda (3. siklon) yeniden karbonatlaşmaktadır.
- P₂ kadar CaO ve baca tozundaki MgO in tamamı dip siklonun üzerindeki ikinci siklonda (3'. siklon) yeniden karbonatlaşmaktadır.
- Hammaddedeki MgCO₃ dip siklonun hemen üzerindeki siklonda (4. siklon) tamamen kalsine olmaktadır.
- R₁ kadar CaCO₃ dip siklonun üzerindeki birinci siklonda (4. siklon) kalsine olmaktadır.
- R₂ kadar CaCO₃ dip siklonda (4'. Siklon) kalsine olmaktadır.

Önısıtıcı siklonlara girişte tozsuz hammadde miktarı; klinker, yakıt külü ve hammaddenin uçucu olmayan oksitleri yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$F = \frac{U_{ooK} - (Y \cdot Ash \cdot U_{ooY})}{U_{ooF}} \quad (9)$$

Paralel akışlı dört kademeli önısıtıcı siklonlu çimento fabrikasında girişte ve siklon kademelerinde CaCO₃(X) ve CaO(Y) miktarları Tablo 1.a ve Tablo 1.b'de verilen matris yardımıyla hesaplanır.

$$X_0 = [CaO_K - (Y \cdot Ash \cdot CaO_Y)] / 56 \quad (10)$$

$$YT(1) = BT(1) \cdot [CaO_K - (Y \cdot Ash \cdot CaO_Y)] \quad (11)$$

$$X = X_0 + (1 - \eta_1) \cdot X_1 + (1 - \eta_2) \cdot X_2 \quad (12)$$

$$Y = Y_0 + (1 - \eta_1) \cdot Y_1 + (1 - \eta_2) \cdot Y_2 \quad (13)$$

Tablo 1. a Paralel Akışlı Dört Önısıtıcı Siklon Kademeli Sistemde CaCO₃ (X) Matrisi

	1	2	3	4	5	6	7	8
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
1	0,56.η(1)	-0,56.[1-η(2)]	-0,56.[1-η(3)]	0	0	0	0	0
2	0	0,56.η(2)	-0,56.[1-η(3)]	-0,56.[1-η(4)]	0	0	0	0
3	0	0	0,56.η(3)	-0,56.[1-η(4)]	-0,56.[1-η(5)]	0	0	0
4	0	0	0	0,56.η(4)	-0,56.[1-η(5)]	-0,56.[1-η(6)]	0	0
5	0	0	0	0	0,56.η(5)	-0,56.[1-η(6)]	-0,56.[1-η(7)]	0
6	0	0	0	0	0	0,56.η(6)	-0,56.[1-η(7)]	-0,56.[1-η(8)]
7	0	0	0	0	0	-0,56.S(6)	0,56	

Tablo 1.a'nın Devamı

8	0	0	0	0	0	0	0	-0,56.S(7)	0,56
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	-0,56.R ₁ .η(6)	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	-0,56.R ₂ .η(7)	0

Tablo 1.b Paralel Akışlı Dört Önısıtıcı Siklon Kademeli Sistemde CaO (Y) Matrisi

	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	
1	η(1)	-[1-η(2)]	-[1-η(3)]	0	0	0	0	0	0,56.X ₀
2	0	η(2)	-[1-η(3)]	-[1-η(4)]	0	0	0	0	0,56.X ₀
3	0	0	η(3)	-[1-η(4)]	-[1-η(5)]	0	0	0	0,56.X ₀
4	0	0	0	η(4)	-[1-η(5)]	-[1-η(6)]	0	0	0,56.X ₀
5	0	0	0	0	η(5)	-[1-η(6)]	-[1-η(7)]	0	0,56.X ₀
6	0	0	0	0	0	η(6)	-[1-η(7)]	[1-η(8)]	0,56.X ₀
7	0	0	0	0	0	-S(6)	1	0	(1-GKO).YT(1)
8	0	0	0	0	0	0	-S(7)	1	GKO.YT(1)
9	η(1)	-[1-η(2)]	-[1-η(3)]	0	0	0	0	0	0
10	0	η(2)	-[1-η(3)]	-[1-η(4)]	0	0	0	0	0
11	0	0	η(3)	-[1-η(4)]	-[1-η(5)]	0	0	0	0
12	0	0	0	η(4)	-[1-η(5)]	-[1-η(6)]	0	0	0
13	0	0	0	(1-P ₁).η(4)	-1	0	(1-P ₁).[1-η(7)]	0	0
14	0	0	0	0	(1-P ₂).η(5)	-1	0	(1-P ₂).[1-η(8)]	0
15	0	0	0	0	0	-η(6)	1	0	(1-GKO).YT(1)
16	0	0	0	0	0	0	-η(7)	1	GKO.YT(1)

Tablo 2. Paralel Akışlı Dört Önısıtıcı Siklon Kademeli Sistemde MgCO₃ (V) ve MgO (W) Matrisi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	W ₇	W ₈	
1	η(1)	-[1-η(2)]	-[1-η(3)]	0	0	0	0	0	V ₀
2	0	η(2)	-[1-η(3)]	-[1-η(4)]	0	0	0	0	V ₀
3	0	0	η(3)	-[1-η(4)]	-[1-η(5)]	0	0	0	V ₀
4	0	0	0	η(4)	-[1-η(5)]	-[1-η(6)]	0	0	V ₀
5	0	0	0	0	η(5)	-[1-η(6)]	-[1-η(7)].84/40	0	V ₀
6	0	0	0	0	0	η(6)	-[1-η(7)].84/40	-[1-η(8)].84/40	V ₀
7	0	0	0	0	0	0	η(7)	-[1-η(8)].84/40	V ₀ .(40/84) + (1-GKO).WT(1)
8	0	0	0	0	0	0	0	S(8)	V ₀ .(40/84) + WT(1)

Giriş ve siklon kademelerinde MgCO₃ (V) ve MgO (W) miktarları Tablo 2'de verilen matris yardımıyla hesaplanır.

$$V = V_0 + (1 - \eta_1).V_1 + (1-\eta_2).V_2 \quad (14)$$

$$WT(1) = BT(1). [(MgO_K - (Y.Ash.MgO_Y))] \quad (15)$$

$$V_0 = [(MgO_K - (Y.Ash.MgO_Y)).84/40] \quad (16)$$

Benzer şekilde girişte ve siklon kademelerinde diğer oksitler (Z) ile ilgili matris Tablo 3'te verilmiştir.

$$Z_K = U_{00,K} - [CaCO_{3,K} + CaO_K + MgO_K] \quad (17)$$

$$Z_Y = U_{00,Y} - (X_Y + CaO_Y + MgO_Y) \quad (18)$$

$$ZT(1) = BT(1). [(Z_K - (Y.Ash.Z_Y))] \quad (19)$$

$$Z_0 = [(Z_K - (Y.Ash.Z_Y))] \quad (20)$$

$$Z = Z_0 + (1 - \eta_1).Z_1 + (1-\eta_2).Z_2 \quad (21)$$

Tablo 3. Paralel Akışlı Dört Önısıtıcı Siklon Kademeli Sistemde Diğer Oksitler (Z) Matrisi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	
1	η(1)	-[1-η(2)]	-[1-η(3)]	0	0	0	0	0	Z ₀
2	0	η(2)	-[1-η(3)]	-[1-η(4)]	0	0	0	0	Z ₀
3	0	0	η(3)	-[1-η(4)]	-[1-η(5)]	0	0	0	Z ₀
4	0	0	0	η(4)	-[1-η(5)]	-[1-η(6)]	0	0	Z ₀
5	0	0	0	0	η(5)	-[1-η(6)]	-[1-η(7)]	0	Z ₀
6	0	0	0	0	0	η(6)	-[1-η(7)]	-[1-η(8)]	Z ₀
7	0	0	0	0	0	0	η(7)	-[1-η(8)]	Z ₀ + (1-GKO).ZT(1)
8	0	0	0	0	0	0	0	η(8)	Z ₀ + ZT(1)

Girişte ve siklon kademelerinde hammadde ve baca tozu miktarları aşağıdaki şekilde hesaplanır;

Hammadde miktarları,

$$F(1) = X + Y + V + Z \quad (22)$$

n=1'den 6 ya kadar olmak üzere,

$$\left. \begin{aligned} F(n+1) &= \eta(n) \cdot [X(n) + Y(n) + V(n) + Z(n)] \\ F(8) &= \eta(7) \cdot [X(7) + Y(7) + W(7) + Z(7)] \\ F(9) &= \eta(8) \cdot [X(8) + Y(8) + W(8) + Z(8)] \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

BT(1)= Klinkerin belli bir yüzdesi olarak kabul edilir

Önısıtıcı siklon grubu kademelerinde baca tozu miktarları;

$$\left. \begin{aligned} BT1(1) &= (1 - GKO) \cdot BT(1) \\ BT1(2) &= [1 - \eta(7)] \cdot [X(7) + Y(7) + W(7) + Z(7)] \\ BT1(3) &= [1 - \eta(5)] \cdot [X(5) + Y(5) + V(5) + Z(5)] \\ BT1(4) &= [1 - \eta(3)] \cdot [X(3) + Y(3) + V(3) + Z(3)] \\ BT1(5) &= [1 - \eta(1)] \cdot [X(1) + Y(1) + V(1) + Z(1)] \\ BT2(1) &= GKO \cdot BT(1) \\ BT2(2) &= [1 - \eta(8)] \cdot [X(8) + Y(8) + W(8) + Z(8)] \\ BT2(3) &= [1 - \eta(6)] \cdot [X(6) + Y(6) + V(6) + Z(6)] \\ BT2(4) &= [1 - \eta(4)] \cdot [X(4) + Y(4) + V(4) + Z(4)] \\ BT2(5) &= [1 - \eta(2)] \cdot [X(2) + Y(2) + V(2) + Z(2)] \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Döner fırında kalsinasyondan açığa çıkan CaO ve CO₂ ;

$$CaO_1(1) = 0,56 \cdot \eta(8) \cdot X(8) \quad (25)$$

$$CO_2(1) = CaO_1(1) / 56 \quad (26)$$

Dip siklonda (4'.Siklon) kalsinasyondan açığa çıkan CaO ve CO₂ ;

$$CaO(2) = 0,56 \cdot [X(7) \cdot \eta(7) + GKO \cdot X(9) - X(8)] \quad (27)$$

$$CO_2(2) = CaO(2) / 56 \quad (28)$$

4.Siklondan açığa çıkan CaO, MgO ve CO₂

$$CaO(3) = 0,56 \cdot [X(6) \cdot \eta(6) + (1 - GKO) \cdot X(9) - X(7)] \quad (29)$$

$$MgO(3) = (40/84) \cdot V(6) \cdot \eta(6) \quad (30)$$

$$CO_2(3) = CaO(3) / 56 + MgO(3) / 40 \quad (31)$$

3. Siklonda yeniden karbonatlaşan CaO ve tutulan CO₂

$$CaO_{ykar}(1) = P_1 \cdot \{\eta(4) \cdot Y(4) + [(1 - \eta(7)) \cdot Y(7)]\} \quad (32)$$

$$MgO_{ykar}(1) = [1 - \eta(7)] \cdot W(7) \quad (33)$$

$$CO_{2,tut}(1) = CaO_{ykar}(1) / 56 + MgO_{ykar}(1) / 40 \quad (34)$$

3'. Siklonda yeniden karbonatlaşan CaO ve tutulan CO₂

$$CaO_{ykar}(2) = P_2 \cdot \{\eta(5) \cdot Y(5) + [1 - \eta(8)] \cdot Y(8)\} \quad (35)$$

$$MgO_{ykar}(2) = [1 - \eta(8)] \cdot W(8) \quad (36)$$

$$CO_{2,tut}(2) = CaO_{ykar}(2) / 56 + MgO_{ykar}(2) / 40 \quad (37)$$

Dip siklon girişinde görünür kalsinasyon oranı,

$$Rg(1) = \frac{\frac{100}{56} Y(7)}{X(7) + \frac{100}{56} Y(7)} \quad (38)$$

Döner fırın girişinde görünür kalsinasyon oranı,

$$Rg(2) = \frac{\frac{100}{56} Y(8)}{X(8) + \frac{100}{56} Y(8)} \quad (39)$$

Bu durumda, siklon kademelerinde baca gazı içerisindeki CO₂ miktarı şöyle hesaplanır:

$$CO_2(1) = Yanmadan + CO_2, kal(1) \quad (DF çıkışında) \quad (40)$$

$$CO_2(2) = \frac{CO_2(1)}{2} + CO_2, kal(2) \quad \text{Dip siklon çıkışı} \quad (41)$$

$$CO_2(3) = \frac{CO_2(1)}{2} + CO_2, kal(3) \quad \text{4. siklon çıkışı} \quad (42)$$

$$CO_2(4) = CO_2(3) - CO_2, tut(3) \quad \text{3'. siklon çıkışı} \quad (43)$$

$$CO_2(5) = CO_2(4) - CO_2, tut(4) \quad \text{3. siklon çıkışı} \quad (44)$$

Diğer siklonlarda baca gazı miktarı sabit kalır ve bileşenlerinde herhangi bir değişiklik olmaz.

2.4. Katı ve Gaz Maddelerin Entalpileri

Çimento üretim sürecinde hammadde, baca tozu ve klinker katı akımları; kaçak hava, soğutma havası, kalsinasyondan açığa çıkan CO₂ ve yakıtın yanmasından oluşan yanma gazları da gaz akımlarını meydana getirirler[15]. Katı ve gaz madde akımlarının entalpileri, özgül ısı (C_p) ifadesinden faydalanılarak hesaplanır. Özgül ısı kapasite ifadeleri katı madde akımları için Tablo 4 verilmiştir. Gaz madde akımları için özgül ısı değerleri Ref 16 ve Ref 17'den alınmıştır.

Tablo 4. Katı akımların özgül ısı fonksiyonları [3, 4, 18, 19]

Madde	C _p (kJ/kg.K), T(K)
Hammadde ve baca tozu	0,8 + 2,93.10 ⁻⁴ .T
Sıcak klinker	0,7934 + 3.10 ⁻⁴ .T
Soğuk klinker	0,6783 + 3.10 ⁻⁴ .T

2.5. Dip Siklon ve Üstü Siklonlardaki Reaksiyon Enerjileri

Hammadde fırına girmeden önce dip siklonda bir miktar kalsine olmaktadır. Bu reaksiyon endotermik (ısı alan) olup aşağıdaki ifade ile hesaplanır

$$QR1 = 3200.CaO(2) \quad (45)$$

Dip siklonun hemen üzerindeki siklonda da hammadde bir miktar kalsine olmaktadır. Bu reaksiyon enerjisi dip siklondakine benzer olup aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$QR2 = 3200.CaO(3) + 2715.MgO(3) \quad (46)$$

Hammadde ve baca tozundaki CaO ve MgO' in P₂ kadarlık kısmı dip siklonun hemen üzerindeki ikinci (3².

siklon) ve P₁ kadarlık kısmı üçüncü siklonda (3. siklon) yeniden karbonatlaşmaktadır [20].

Yeniden karbonatlaşma reaksiyonları ekzotermik (ısı veren) olup aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$YKE(1) = 3200.CaO_{ykar}(1) + 2715.MgO_{ykar}(1) \quad (47)$$

$$YKE(2) = 3200.CaO_{ykar}(2) + 2715.MgO_{ykar}(2) \quad (48)$$

ifadeleri ile hesaplanır.

2.6. Döner Fırında Klinker Oluşum Entalpisi

Çimento klinkeri döner fırınlarda pişirilmektedir. Klinker oluşum entalpisi çeşitli yollarla hesaplanabilmektedir. Burada kullanılan oluşum entalpisinin hesaplanması, H. Zur Strassen' in vermiş olduğu faktörlerle klinkerin kimyasal analizlerinin çarpılıp toplanmasıyla yapılmaktadır [21].

$$H_K = 3200.CaO_k + 2715. MgO_k + 1721.Al_2O_{3,k} - [247.Fe_2O_{3,k} + 2142. SiO_{2,k}] \quad (49)$$

Çimento fabrikasında önısıtıcı siklon grubunda da kısmen kalsinasyon olduğu için döner fırın ünitesinde hem geri kalan kalsinasyon ve hem de hammaddenin pişirilmesi yer almaktadır.

Döner fırında reaksiyon enerjisi;

$$QR_{DF} = 3200.(CaO_I + CaO_Y) + 1721.AL_2O_{3,K} + 2715.MgO_Y - 2142.SiO_{2,K} - 247.Fe_2O_{3,K} \quad (50)$$

Tablo 5-7 de verilen değerler, kütle ve enerji dengliği hesaplamaları için kullanılmıştır. Bu veriler, dört kademe paralel önısıtıcı siklonlu çimento fabrikasının modellenmesi amacıyla hazırlanan bir bilgisayar programına veri olarak girilmiştir.

Tablo 5. Kütle ve enerji dengliğinde kullanılan parametreler

Standart parametreler (kg klinker başına)	Sembol	Değer
Döner fırından çıkan baca tozu, [kg]	BT (1)	0,15
Soğutucuya giren hava miktarı, [m ³]	A(1)	2,50
Çevre havasının özgül nemi [kg H ₂ O / kg kuru hava]	Xs	0,0128
Hava fazlalık katsayısı	λ	1.15
Döner fırın gazlarının siklon gruplarına dağılım oranı, (%)	GKO	58
(7) siklondaki kalsinasyon oranı, [%]	R ₁	5,00
Dip siklondaki kalsinasyon oranı, [%]	R ₂	25,00

Tablo 5'in Devamı

Yakıt sıcaklığı, [°C]	T _Y	25,00
Döner fırından çıkan klinker sıcaklığı, [°C]	Tk (1)	1300,00
Soğutucuya giren klinker sıcaklığı, [°C]	Tk (1)	1300,00
Soğutucudan çıkan klinker sıcaklığı, [°C]	Tk (2)	140,00
Birinci siklona giren hammadde sıcaklığı, [°C]	TF (1)	65,00
Döner fırına giren hammadde sıcaklığı, [°C]	TF (9)	820,00
Döner fırından çıkan baca gazı sıcaklığı, [°C]	T(1)	1100,00
Soğutucuya giren çevre havası sıcaklığı, [°C]	TA(1)	25,00
Soğutucudan dışarı atılan hava sıcaklığı, [°C]	TA(2)	240,00
Döner fırına giren primer hava sıcaklığı, [°C]	TA(3)	90,00

Tablo 6. Yakıt özellikleri

Yakıt türü	Hu [kJ/kg]	C [%]	H [%]	O [%]	S [%]	N [%]	Kül [%]	Nem [%]
Kömür	20600	78.0	5.0	6.0	1.0	1.5	8.5	0.0

Tablo 7. Hammadde ve klinkerin kimyasal bileşimleri

	CaO [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MgO [%]	H ₂ O [%]	SO ₃ [%]	Uçucu olmayan oksitler, [%]
Hammadde (farin)	43.1	13.37	3.47	2.60	1.18	2.0	0.36	63.72
Klinker	66	20.14	5.72	3.80	1.54	0.0	0.81	97.2
Yakıt külü	10.94	48.80	14.25	21.0	0.63	0.0	0.55	95.62

Tablo 5-7'de verilen değerler kullanılarak hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla, dört kademe paralel

önısıtıcı siklonlu çimento fabrikasına ait aşağıdaki parametrik değerler hesaplanarak Tablo 8-11'de verilmiştir.

Tablo 8. Dört kademe paralel önısıtıcı siklonlu çimento fabrikasında katı bileşen miktarları (kg/kg.klinker)

Siklon kademesi	CaO	CaCO ₃	MgO	MgCO ₃	Diğer Oksitler
Döner fırından çıkan baca tozu	0.09579271	-	0.003382306	-	0.04279175
Dip siklondan çıkan ve döner fırına giren hammadde	0.3983356	0.98088	0.03346	-	0.42332
7. Siklondan çıkan hammadde	0.238497	1.56533	0.03937	-	0.49812
6. Siklondan çıkan hammadde	0.1615587	1.96959	-	0.09376	0.56488
5. Siklondan çıkan hammadde	0.0846273	2.05752	-	0.09171	0.55251
4. Siklondan çıkan hammadde	0.041031	1.938285	-	0.08353	0.50321
3. Siklondan çıkan hammadde	0.018664	1.825385	-	0.07718	0.46497
2. Siklondan çıkan hammadde	0.006284	1.59659	-	0.06676	0.40221
1. Siklondan çıkan hammadde	0.0022953	1.47659	-	0.06148	0.37041
Birinci siklona beslenen hammadde	1.140389	-	-	0.0473523	0.2852783

Tablo 9. Dört kademe paralel önısıtıcı siklonlu sistemde katı, gaz kütle miktarları ve sıcaklıklar

Siklon kademesi	Hammadde (kg/kg.klinker)	Baca Tozu (kg/kg.klinker)	Baca Gazı [kmol /kg.klinker]	Sıcaklıklar (°C)
Döner fırından çıkan katı ve gaz kütle	-	0.15	0.06651214	1146.7
Dip siklona giren katı ve gaz kütle	-	0.08700	0.0385770	1146.7
Dip siklondan çıkan katı ve gaz kütle	1.422891	0.41310	0.0412909	820.0
7 . Siklona giren katı ve gaz kütle	-	0.06300	0.0279351	1146.7
7 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	1.873059	0.46826	0.0299720	798.3
6 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	2.371325	0.41847	0.0411027	756.7
5 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	2.368415	0.41796	0.0297751	705.5
4 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	2.309445	0.25661	0.0411027	641.4
3 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	2.147581	0.23862	0.0297751	545.0
2 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	1.968245	0.10359	0.0411027	430.3
1 . Siklondan çıkan katı ve gaz kütle	1.815232	0.09554	0.0322707	229.5
Siklon grubundan katı ve gaz kütle	-	0.1991304	0.07337341	371.2
Birinci siklona giren hammadde	1.67215	-	-	67.7
Siklon grubuna giren tozsuz hammadde	1.47302	-	-	-

Tablo 10. Tüm sistemin enerji dengesi

		ENERJİLER
		[kJ/kg.klinker]
GİRENLER	Yakıtle	3632.76
	Hammadde ile	63.80
	Primer hava ile	15.59
	Soğutma havası ile	0.00
	Toplam giren enerji	3712.15
ÇIKANLAR	Klinker ile	90.27
	Soğutucudan atılan hava ile	404.73
	Baca gazları ile	795.40
	Baca tozları ile	57.67
	Su buharlaşması ile	112.34
	Isı transferi ile	495.46
	Çıkan enerji	1955.87
	Klinker oluşum enerjisi	1756.28
	TOPLAM ÇIKAN	3712.15
Verim		% 47,3

Tablo 11. Ünitelere göre enerji denkliği

	GİREN ENERJİLER [kJ/kg.klinker]		ÇIKAN ENERJİLER [kJ/kg.klinker]	
	1. SIKLON	Hammadde	63.80	Hammadde
	Baca gazı	546.83	Baca gazı	219.72
	Baca tozu	119.56	Baca tozu	17.92
	Toplam	730.19	Su buharlaşma	112.34
			Siklon kayıpları	40.00
			Toplam	730.47
1'. SIKLON	Hammadde	340.49	Hammadde	755.20
	Baca gazı	909.94	Baca gazı	575.68
	Baca tozu	154.62	Baca tozu	39.75
	Toplam	1405.05	Siklon kayıpları	35.00
			Toplam	1405.62
2. SIKLON	Hammadde	755.20	Hammadde	1076.07
	Baca gazı	735.75	Baca gazı	546.83
	Baca tozu	280.72	Baca tozu	119.56
	Toplam	1771.67	Siklon kayıpları	30.00
			Toplam	1772.46
2'. SIKLON	Hammadde	1076.07	Hammadde	1391.57
	Baca gazı	1101.15	Baca gazı	909.94
	Baca tozu	304.53	Baca tozu	154.62
	Toplam	2481.75	Siklon kayıpları	25.00
			Toplam	2481.13
3. SIKLON	Hammadde	1391.57	Hammadde	1590.75
	Baca gazı	855.93	Baca gazı	735.75
	Baca tozu	362.31	Baca tozu	280.72
	Yeniden karbonatlaşma (P ₁)	21.37	Siklon kayıpları	25.00
	Toplam	2631.19	Toplam	2632.22
3'. SIKLON	Hammadde	1590.75	Hammadde	1725.67
	Baca gazı	1215.52	Baca gazı	1101.15
	Baca tozu	329.65	Baca tozu	304.53
	Yeniden karbonatlaşma (P ₂)	20.43	Siklon kayıpları	25.00
	Toplam	3156.35	Toplam	3156.35
4. SIKLON	Hammadde	1725.67	Hammadde	1449.24
	Baca gazı	1191.45	Baca gazı	855.93
	Baca tozu	74.53	Baca tozu	362.31
	Toplam	2991.65	Reaksiyon (R ₁)	298.05
			Siklon kayıpları	25.00
			Toplam	2990.53
DİP SIKLON	Hammadde	1449.24	Hammadde	1135.48
	Baca gazı	1645.34	Baca gazı	1215.52
	Baca tozu	102.92	Baca tozu	329.65
	Toplam	3197.50	Reaksiyon (R ₂)	486.42
			Siklon kayıpları	30.00
			Toplam	3197.07
DÖNER FIRIN	Yakıt	3632.76	Sıcak klinker	1369.41
	Hammadde	1135.48	Baca gazları	2836.79
	Sekonder hava	874.41	Baca tozları	177.45
	Toplam	5658.23	Reaksiyon	1013.61
			Duvar ısı kaybı	252.02
			Su buharlaşma	8.82
			Toplam	5658.10
SOĞUTUCU	Sıcak klinker	1369.41	Soğuk klinker	90.27
	Soğutma havası	0.00	Sekonder hava	874.41
	Toplam	1369.41	Atık hava	404.73
			Toplam	1369.41

3. SONUÇLAR VE İRDELEME

Paralel akışlı önısıtıcı siklonlu çimento fabrikası için hazırlanan matematik modele uygun bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. CaO, CaCO₃, MgCO₃ (veya MgO) ve diğer oksitler şeklinde dört bileşen varsayımıyla hesaplanan katı kütlelerin program çıktıları Tablo 8'de verilmiştir. 7. siklonda MgCO₃ tamamen kalsine olarak MgO 'ya dönüşmektedir. Tablo 8'deki değerlerle siklon kademelerinde sirküle eden hammadde, baca tozu, döner fırın çıkışı ve siklon grubu kademelerinde yanma ürünleri, su buharları ve kalsinasyondan açığa çıkan CO₂ den oluşan baca gazı kütlesi ve bütün kademelerde enerji denkliği yardımıyla hesaplanan sıcaklıklar Tablo 9'da verilmiştir. Bu modelle kg klinker başına hesaplanan tozsuz hammadde miktarı 1.47 kg, paralel siklon grubundan çıkan baca tozu miktarı 0.203 kg dır. Bu değerler, hesaplamada kullanılan fabrika parametreleri ile çalışan gerçek üretim değerlerinden daha iyi bir sonuçtur (teorik kabüllerden dolayı). Tozsuz hammadde ile birlikte bu toz birinci siklondan tekrar sisteme verilmektedir. Bu sıcaklıklar, fabrika fiili çalışma değerleriyle uyusmaktadır. Sistemin genel enerji denkliği Tablo 10'da yer almaktadır. Tüm sistem göz önüne alınarak ünite bazında enerji denkliği Tablo 11'de verilmiştir. Ünitelere göre yapılan enerji denklik hesaplamalarında her bir kademede reaksiyon enerjileri hesaplanmıştır. Ayrıca Tablo 11'deki sonuçlar, atmosfere atılan baca gazı enerjisinden maksimum yararlanma şeklinde açıklanabilecek olan paralel sistem mantığının, atık baca gazı enerjisinin oldukça düşük miktarda olması ile doğrulandığı görülmektedir. Uygulamada, fiili değerlerin Tablo 10'deki değerlerle karşılaştırılması yapılarak düzgün çalıştırılmayan üniteler tespit edilerek ilgili parametrenin özelliğine göre iyileştirici önlemler alınabilir.

Bu çalışmada sunulan model ile kullanılan çeşitli kalitelere yakıtların ve sistemdeki diğer parametrelerin enerji ve kütle denkliklerine etkileri hem sistem bazında hem de tek tek üniteler bazında görülebilir.

Semboller

A(1)	: Klinker soğutma havası (m ³)
A(2)	: Soğutucudan atmosfere atılan hava (m ³)
A(3)	: Sekonder hava (m ³)
A(4)	: Primer hava (m ³)
Ash	: Kül (%)
BG(n)	: Baca gazı (kmol)
BT(n)	: Baca tozu (kg)
DF	: Döner fırın
F(n)	: Hammadde (kg)
FA(n)	: Giriş- çıkış sızdırmazlıklarından sisteme giren çıkan kaçak hava (kmol)
Fw	: Hammadedeki nem miktarı (kmol)
GKO	: Döner fırından çıkan baca gazının siklon gruplarına dağıtım oranı (%)

H _K	: Klinker formasyon entalpisi (kJ)
η _Y	: Yanma verimi (%)
KKw	: Hammadedeki kristal suyu miktarı (kmol)
P(n)	: Yeniden karbonatlaşma oranı (%)
QR1	: 7. Siklondaki kalsinasyon enerjisi (kJ)
QR2	: Dip Siklondaki kalsinasyon enerjisi (kJ)
R(n)	: Kalsinasyon oranı (%)
Rg(n)	: Görünür kalsinasyon (%)
U _{oo}	: Uçucu olmayan oksit (%)
YKE(n)	: Yeniden karbonatlaşma oranı (%)
YT(1)	: Döner fırın çıkışında baca tozundaki CaCO ₃ miktarı (kg)
Xs	: Havanın özgül nemi (g/kmol. kuru hava)
λ	: Hava fazlalık katsayısı (%)
η (n)	: Siklon verimi (%)

Alt indisler

Cal	: Kalsinasyondan açığa çıkan (CaO, MgO, and CO ₂)
DF	: Döner fırın
F	: Hammadde
G	: Görünür (kalsinasyon oranı)
K	: klinker
tut	: Tutulan (CO ₂)
Y	: Yakıt
Ykar	: Yeniden karbonatlaşan (CaO and MgO)

KAYNAKLAR

1. LOCHER, G. "Mathematical Models for the Cement Clinker Burning Process" Part.2 (ZKG), No.1, pp.39-50, 2002
2. LOCHER, G. "Mathematical Models for the Cement Clinker Burning Process" Part.3 (ZKG), No.3, pp.69-80, 2002
3. GÜRÜZ, K., "Çimento Fabrikalarında Kütle ve Enerji Denklikleri", Kimya Mühendisliği Dergisi, No.84, pp.15-24, 1977
4. ELKJAER, H.P., çev: OKBAŞ, Y., "Matematiksel Model Uygulayarak Dört kademeli Siklonlu Önısıtıcıda Isı Harcamasının Tayini", Türkiye Çimento Müstahsilleri Bülteni (TÇMB), No:241, pp.1-29,1987
5. FEI, P., "Thermal Analyses of Cyclone Preheater System Based on a Mathematical Model", (ZKG), No.5, pp.139-142, 1986
6. GARDEIK, H.O., and ROSEMANN, H., "Fuel Energy Consumption and Fuel Energy Apportionment in the Precalcining Process", (ZKG), No.11, pp.234-239, 1981

7. FRISCH, V., JESCHAR, R., and GARDEIK, H.O., "Precalcining With and Without a Tertiary Air Duct -a Heat Technological Comparison With Aid of a Mathematical Model for Energy Transfer in the Rotary Kiln", (ZKG), No.4, pp.81-85, 1982
8. GARDEIK, H. O., "Fuel Energy Consumption in Cement Burning With Precalcining", (ZKG), No.12, pp.611-617, 1982
9. VOSTEEN, V. B., "The Thermal Efficiency of Cement Raw Meal Preheaters: Teil IV", (ZKG), No.4, pp.194-201, 1972
10. ROSEMANN, H., "Energy Transfer in Precalcining Installations", (ZKG), 1986 No.2, pp.84-86
11. KOLYFETIS, E., and VAYENAS, C. G., "Mathematical Modelling of Separate Line Precalciners (SLC)", (ZKG), 1988 No.11, pp.59-63
12. KOLİP, A., "Çimento Üretiminde Enerji ve Ekserji Analizi", PhD Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak 1993
13. BAHAT, M., "Paralel Akışlı Dört Siklon Kademeli Çimento Üretim Tesisinde Matematik modelleme", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996
14. SAVAS, A., F., "Paralel Akışlı Dört Siklonlu Önkalsinasyonlu Çimento Fabrikasında Enerji ve Ekserji Analizi Modellemesi", PhD Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003
15. KURT, E. P., JOSEPH, J. W."The Rotary Cement Kiln" Chemical Publishing Co., New York 1972
16. CENGEL, Y., A., "Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer", 1997
17. BÜYÜKTÜR, A., R., "Termodinamik, cilt I ", Uludağ Üniversitesi, 1982
18. DİŞCİOĞLU, A., "Basit Yöntemle Döner Fırın Isı Bilançosunun Çıkarılması", TÇMB, No:189, 1983.
19. LABAHN, O., "Cement Engineers Handbook", Fourth Edition , 1983
20. OKBAŞ, Y., "Klinker Üretim Prosesinde Hava Kaçakları ve Bedeli ", Çimento Sanayinde Enerji Tasarrufu Semineri Tebliğleri, 1989
21. PERAY, E.K., "Cement Manufacturers Handbook" Chemical Publishing Co., USA 1979