

PARALEL AKIŞLI ÖN KALSİNASYONLU ÇİMENTO FABRİKASINDA DÖNER FIRIN ÜNİTESİNDE KÜTLE VE ENERJİ DENKLİKLERİNİN METEMATİKSEL MODELLENMESİ

Ahmet Fevzi SAVAŞ*

Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Bölümü/ Meslek Yüksekokulu, /Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Türkiye

**(ahmetfevzi.savas@bilecik.edu.tr)*

Özet – Çimento klinkeri üretimi sırasında, hammaddenin sisteme siklonlu önısıtıcıdan beslenmesi ile başlayan ve klinkerin soğutucudan çıkması ile tamamlanan işlemler sırasında oluşan ısı ve madde taşınım olaylarını formülize etmek için matematiksel denklik yapılması mümkündür. Bu çalışmada, paralel akışlı kalsinatörlü dört siklon kademeli çimento üretim sistemlerinde enerji ve kütle denklıklarının birlikte çözümünü öngören bir matematik model geliştirilmiştir. Ayrıca matematik modele uygun bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu programda değişik yakıtlar ve değişik işletme koşullarında değişken parametre alınarak her üniteye ayrıntılı olarak sıcaklık, kütle, enerji ve ekserji değerleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada Döner fırın ünitesinin kütle, enerji, miktarları ile ilgili grafikler çizilerek standart parametrelerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Çimento, Döner Fırın, Enerji, Kütle, Modleme

1.Giriş

Çimentonun her çeşit inşaat ve alt yapı yatırımlarında kullanılması, çimento sektörünün ekonomik kalkınma ile birlikte gelişen bir sektör olmasına neden olmaktadır. 2018 yılında dünya çimento ihracatı 10,14 milyar dolardır. Türkiye'nin dünya çimento ihracatı içindeki payı bu gelişmelere bağlı olarak 2017 yılında yüzde 5,4 iken 2018 yılında yüzde 6,06'ya yükselmiştir. Türkiye'nin çimento ithalatı yaptığı ülkelerde ilk sırada Fransa yer almaktadır. 2. ve 3. sırada ise İngiltere ve Hollanda yer almaktadır. Ülkemiz Çimento

sektöründe, ihracatta dünya pazarında üçüncü sırada yer almaktadır [1]. Türkiye'de yıllar itibariyle çimento üretimi ve tüketimi karşılaştırıldığında üretim miktarının tüketim miktarından daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu açıdan Türk çimento sektörü, ortaya çıkan üretim fazlasını dış pazarlara satabilmek ve mevcut pazar kapasitesini koruyabilmek için diğer çimento üretici ülkelerle rekabet yapmak zorundadır.

Doğal enerji kaynaklarının hızla tükeniyor olması dünyanın her yerinde önemli bir problem olarak görülmekte ve enerji konusu bu bağlamda çok ciddi olarak ele alınmaktadır [2]. Enerjiyi yoğun olarak

kullanan endüstriler arasında % 31,2' lik bir oranla demir-çelik endüstrisi ilk sırayı almakta, ikinci sırada %17,9 ile çimento, üçüncü sırada %14,3 ile petrokimya endüstrisi bulunmaktadır [3]. Enerjiyi yoğun olarak kullanan endüstriler arasında ikinci sırada yer alan çimento endüstrisinde enerji tasarrufu ile ilgili çalışmalar son derece önem arz etmektedir. Son çeyrek yüzyılda çimento endüstrisi modernizasyon ve yeni teknolojilerin geliştirilmesinde ciddi adımlar atmıştır [4]. Ülkemiz çimento sektöründe birim üretim başına tüketilen enerji (ısı ve elektrik enerjisi cinsinden) toplam çimento maliyetinin ortalama % 45-50' sini oluşturmaktadır. Enerji tüketiminin bu denli yoğun olduğu çimento sektörünün sırf maliyetlerini düşürmek amacıyla değil, aynı zamanda enerji tasarrufu açısından da üzerine çok yük düşmektedir. Burada sunulan çalışmanın esas amaçlarından birisi de, çimento endüstrisinde enerji tasarrufu (özellikle ısı enerjisi) konusuna bilimsel platformda katkı sağlamaktır. Öncelikle enerji tasarrufuna yönelik olan bu araştırmada, kütle ve enerji denkliklerinin fabrika verileri kullanılarak hesaplanmasıyla ilgili bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu çalışmada fabrikaya ait her hangi bir parametrenin, kütle ve enerji denliğini nasıl etkilediği hususu grafiklerle gösterilmiştir. Döner fırın ünitesinde değişen bu parametrelere bağlı olarak döner fırın verimlerinin değişmesi vb sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Çimento Teknolojisi

Dünyada yıllık üretilen çimento miktarı yaklaşık iki milyar ton/yıl kadardır. Çimento üretimi ve

tüketimi, bir ülkenin gelişimini karakterize eden en önemli kriterlerden biridir. Çimento; silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demiroksit ihtiva eden hammaddelerin sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarımamül klinkerin bir veya daha fazla katkı maddesi ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Esas itibariyle kalsiyumoksit'in (CaO) alumina ve demiroksitle vermiş olduğu bileşiklerden meydana gelir. Dayanım ve hacim sabitliği gibi normlarla öngörülen şartlara haizdir [5]. Çimento üretiminde hem doğal mineraller hem de endüstriyel atık ürünler kullanılmaktadır. Kireç, silis, alüminyumoksit, demir ve demiroksit içeren mineraller çimento üretiminde hammadde olarak kullanılır. Kireç yönünden zengin minerallere kireç komponenti, kireç yönünden fakir olan fakat genelde fazla silis, alüminyumoksit ve demiroksit içeren minerallere de kil komponenti denir. Çimento üretiminde bu iki ana komponentin hesaplanmış karışımı seçilir. Çimento üretim yöntemleri gelişim sırasına göre şu şekilde sıralanırlar. Yaş çimento üretim yöntemi, Yarı Yaş Çimento üretim Yöntemi, Kuru sistem çimento üretim yöntemi, ön ısıtıcılı seri kuru sistem ve ön ısıtıcılı paralel sistem, ön kalsinasyonlu seri sistem ve ön kalsinasyonlu paralel sistemlerden oluşmaktadır. Günümüzde bütün üretim yöntemleri büyük çoğunluğu ön kalsinasyonlu sistemlerden oluşmaktadır.

2.1. Döner fırın

Döner fırınlar; endüstride çimentonun klinkerizasyonu, kireçtaşı kalsinasyonu, kok

kömürünün kalsinasyonu, cevher oksidini indirgeme vb. gibi geniş amaçlı kullanılmaktadırlar [6],[7]. Çimento endüstrisinde döner fırını ilk olarak İngiliz Frederik Ransome İngiltere'de 5 Mayıs 1885 yılında ve daha sonra da 20 Nisan 1886 yılında Amerika'da uygulamıştır. Bu döner fırın o tarihlerde kömür tozu yakılması bilinmediği için gazla ısıtılmıştır.

Döner fırınlar yavaşça dönen silindir şeklinde bir borudan ibarettir. Yatay olarak %3-4 eğime sahiptirler [8]. İç kısmı ateşe dayanıklı olan malzeme (refrakter) ile örülmüştür. Döner fırınların çevre hızı yaklaşık 0,15-0,30 m/s arasındadır. Fırının yukarı kısmından fırına beslenen hammadde pişirilerek klinker şeklinde alt ucundan soğutucuya dökülür. Yakma düzeni fırının aşağı kısmına yani boşaltma kısmına monte edilmiştir. Böylece fırın ters akım prensibine göre çalışmaktadır. Döner fırında katı, sıvı ve gaz yakıtlar kullanılabilir (toz kömür, fuel-oil veya doğalgaz), (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Döner fırın ters akım prensibi kesiti

Döner fırın kapasitelerinin artması geometrik boyutlarındaki artmayla ilgilidir. Böylece uzunluğu 200 m' ye ve çapı 7 m' ye kadar arttırmak mümkündür. Ancak yaş sistem fırınlar için bu durumlar mümkün olmamaktadır. Döner fırınların daha büyük olmaları her bir kg' lık klinker için daha fazla efektif hacim gerektirdiği gibi nadiren 4200 kJ/kg.klinker 'lik ısı değerinin altına düşülür [9],[10]. Yaş, yarıyaş, uzun kuru, önısıtıcı siklonlu ve önkalsinasyonlu sistemlerde fırın içerisindeki reaksiyonlar fırın uzunluğuna göre yaklaşık Tablo 2.1.' de olduğu gibi değerlendirilir [11].

Tablo 2.1. Fırın uzunluğuna göre çeşitli fırın sistemlerinde bölgeler

Fırın Sistemleri	Çamur ve önısıtmaya	Buharlaşma ve önısıtmaya
Yaş sistem fırınlar	% 5	%40
Yarıyaş (Lepol) fırınlar	-	-
Uzun kuru fırınlar	-	%30
Önısıtıcı siklonlu fırınlar	-	-
Önkalsinatörlü fırınlar	-	-

3. Çimento Fabrikalarında Kütle ve Enerji Denklikleri

Çimento üretim sistemleri bir bütün olarak ele alındığında kütle denkliği klinker üretimi esas

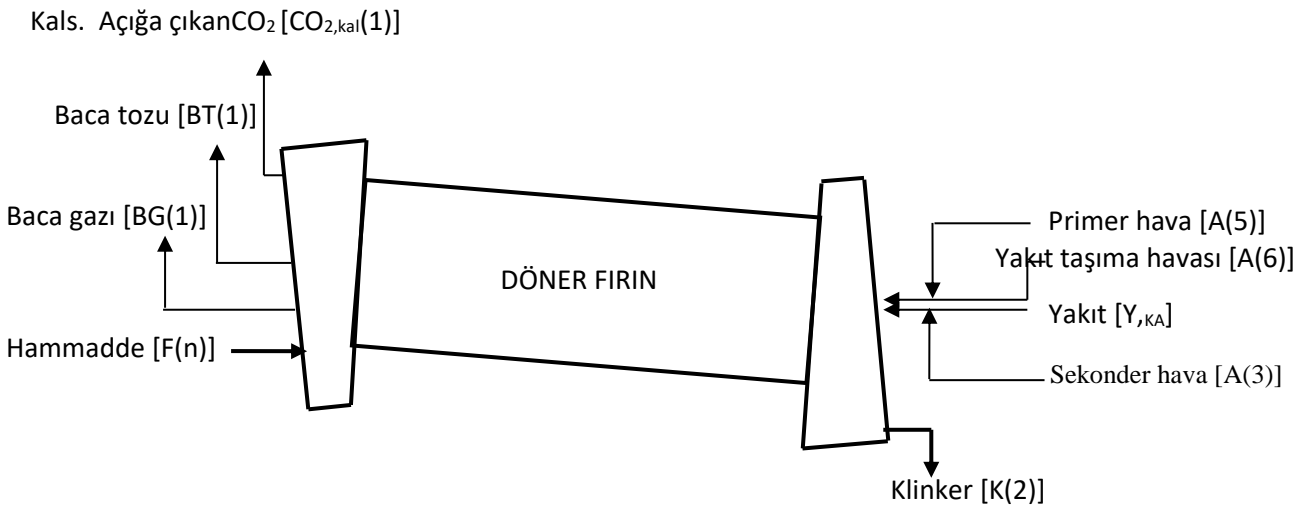
alınarak karbon, kükürt, azot, hidrojen ve oksijen dengelerinin yanı sıra kalsiyumoksit, silisyumoksit, alüminyumoksit, demiroksit, magnezyumoksit ve uçucu olmayan oksitler olmak üzere altı adet oksit denkliği ile kurulur [12],[13]. Bu denkliklerde

kolaylık olması için 1 kg veya 100 kg klinker üretimi esas alınarak gerekli kuru hammadde, yakıt, yanma havası, kuru baca gazı, yanma ve buharlaşmadan oluşan su buharı ve baca tozu miktarları hesaplanır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için baca gazı, baca tozu, hammadde, klinker ve yakıtın kimyasal kompozisyonlarının bilinmesi gerekir. Yukarıda sayılan altı adet bilinmeyen çözülebilmesi için ilk dört denkleme ilave olarak herhangi iki oksit denkleminin kullanılması hesaplamada kolaylık sağlar [12],[14],[15]. Bu çalışmada “Paralel akışlı akışlı ön kalsinasyonlu çimento fabrikasında enerji ve ekserji analizi modellemesi” isimli doktora çalışmasındaki denklemler ve algoritma kullanılarak döner fırın

ünitesinde kütle ve enerji denklemlerine bağlı olarak değişken parametrelerin döner fırın özelinde etkileri değerlendirilecektir[16].

3.1. Döner fırın ünitesinde katı ve gaz kütle denklemleri

Döner fırın ünitesine giren katı kütle akımı kısmen kalsine olmuş hammaddedir. Çıkan katı kütle akımı döner fırında pişen klinker ve baca gazı içerisinde sürüklenen baca tozudur. Giren gaz kütle ise yakıtın yanması için gerekli olan primer ve sekonder havadır. Çıkan gaz kütle yanma ürünleri ve hammaddenin geri kalan kalsinasyonundan açığa çıkan CO₂ dir (Şekil 3.1. ve Tablo 3.1.)



Şekil 3.1. Döner fırın ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi[16]

Tablo 3.1. Döner fırın ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları

GİREN KÜTLELER	ÇIKAN KÜTLELER
----------------	----------------

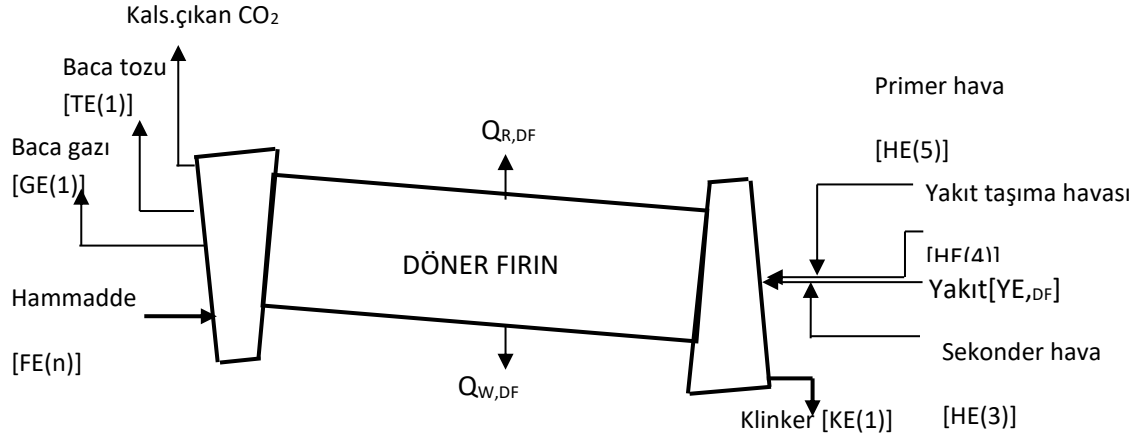
- Hammadde	[F(n)]	- Sıcak klinker	[K(1)]
- Sekonder hava	[A(3)]	- Baca tozu	[BT(1)]
- Yakıt taşıma havası	[A(4)]	- Baca gazı	[BG(1)]
- Primer hava	[A(5)]	-Kalsinasyondan açığa çıkan CO ₂	[CO _{2,kal} (1)]
-Yakıt taşıma hava	[A(6)]		

3.2. Çimento Fabrikalarında Enerji Denkliklerinin Kurulması

Isının büyük oranda önemli olduğu çimento üretim proseslerinde kütle ve enerji denkliklerinin çıkarılması üzerine bir çok çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan en önemlileri [17],[18],[19],[20],[21],[23] dir. Yaş sistem çimento üretiminde birim klinker başına enerji tüketimi 4500 kJ/kg.klinker iken bu değer klasik önısıtıcı siklonlu sistem çimento üretiminde 3300 kJ/kg.klinker, geliştirilmiş önkalsinasyonlu sistemlerde ise 3070 kJ/kg.klinker değerine kadar düşürülebilmektedir. Özgül ısı tüketimi, çimento üretiminde maliyeti doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özgül ısı tüketimi; kullanılan yakıt kalitesinden, hammaddenin pişebilirlik kabiliyetinden ve fabrikanın sahip olduğu teknoloji imkanlarından etkilenmektedir. Minimum çimento maliyeti için kütle ve enerji denkliklerinin iyi yapılması ve takip edilmesi gerekir [24],[25].

3.3. Döner fırın ünitesinde enerji denkliği

Çimento fabrikalarında döner fırın ünitesinde enerji denkleğinin kurulması yanmanın yanında diğer faktörlerin de bilinmesini gerektirmektedir [26],[27]. Çimento üretim sistemlerinin tümünde hammaddenin pişirilerek klinker haline getirilmesi döner fırın ünitesinde gerçekleşmektedir. Döner fırın ünitesi, bütün üretim metotlarında aynıdır ve ters akım prensibine göre çalışan bir ısı değiştiricisi (ısı eşanjörü) gibidir. Yaş, yarı yaş ve kuru önısıtıcı siklonlu sistemlerde yakıtın tamamı döner fırında yakılır. Önkalsinasyonlu sistemlerde ise yakıtın bir kısmı kalsinatör ünitesinde yakılmaktadır. Döner fırında enerji akışı, yakıtın her iki ünite de yakılabilme hali göz önünde bulundurularak bütün sistemler için geçerli olan durum Şekil 3.2.' de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Döner fırın ünitesinde giren-çıkan enerji akımlarının şematik gösterilişi[16]

Şekil 3.2. göz önüne alınarak döner fırın ünitesinde Tablo 3.2.' da verilmiştir.

enerji denkliği düzenlenerek

Tablo 3.2. Döner fırın ünitesine giren-çıkan enerji akımları[16]

GİREN ENERJİLER		ÇIKAN ENERJİLER	
- Hammadde ile	[FE(n)]	-Klinker ile	[KE(1)]
-Sekonder hava ile	[HE(3)]	-Baca tozları ile	[TE(1)]
-Yakıt taşıma havası ile	[HE(4)]	-Baca gazları ile	[GE(1)]
-Primer hava ile	[HE(5)]	-Kalsinasyondan açığa	
-Yakıt ile	[YE,DF]	çıkan CO ₂ ile	[CE(1)]
		-Reaksiyon ısısı ile	[Q _{R,DF}]
		-Radyasyon ve konveksiyon	
		ile olan ısı kaybı	[Q _{W,DF}]

4.Çimento Üretim Sisteminde Matematiksel Modelleme ve Numerik sonuçlar

Endüstrinin pek çok dalında matematiksel modelleme proselere yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Çimento endüstrisinde döner fırınlarda çimento klinkeri pişme prosesi için geliştirilen model sayısı azdır. Bunun önemli bir

sebebi, ısı transferinin karmaşık bir reaksiyon olması ve fırında kimyasal, fiziksel ve mineralojik reaksiyonların aynı anda gerçekleşmesidir. Prosesleri incelemek için yapılan işletme ölçümleri karmaşık olup, bazı durumlarda teknik açıdan yeterli değildir. Bu ölçümlerin başlıcaları, döner fırın ile kalsinatör arasındaki ısı transferi, her bir

siklon kademesinde gaz ile farin beslemesi ve ayrıca ızgaralı soğutucuda soğutma havası ve klinker arasında meydana gelen ısı transferleri ile ilgili ölçümlerdir [28].

Bu çalışmadan önce kütle ve enerji denklikleri ile ilgili yapılmış modelleme çalışmalarında [29] sadece önısıtıcı siklonlarda ısıl analiz için modelleme yapmıştır. [28],[20],[24],[25] Çimento üretim sistemlerinde kalsinatör, döner fırın ve soğutucu üniteleri ile yanma üzerine ayrı ayrı çalışmalar yapmıştır. [12] ise seri akışlı önısıtıcı siklonlu ve önkalsinasyonlu çimento fabrikalarında enerji ve ekserji analizi isimli doktora çalışmasında bu konuda ilk olarak kütle, enerji ve ekserji modellemelerinin üçünü birlikte yapmıştır. Ayrıca Klinker soğutucusu üzerinde bir çok çalışma [13] tarafından yapılmıştır.

Bu çalışmada Savaş ve Kolip [16] yapış oldukları paralel akışlı ön kalsinasyonlu çimento üretim fabrikası için matematiksel model ve geliştirdikleri bilgisayar programının sadece döner fırın verileri sonuçları ele alınmıştır. Ayrıca girdi parametrelerin tamamına yakın bir kısmı hesapla bulunmaktadır. Hesapla bulunmayan parametreler fiili çalışma ve literatüre uygun olarak kabul edilmektedir. Ayrıca geliştirilen bilgisayar programı ile paralel akışlı önkalsinasyonlu çimento üretim sisteminde değişik parametrelerin (yakıt kalitesi, hava fazlalık katsayısı, kalsinasyon oranı, döner fırın ve kalsinatör arasındaki yakıt dağılımı, soğutucu kaybı, v.b) sistemin özgül enerji tüketimi üzerine etkilerini incelemek mümkündür. Programda kullanılan genel değişken sayılar Tablo 4.1 ve döner fırına ait Tablo 4.2 de verilmiştir.

Tablo 4.1. Paralel akışlı kalsinatörlü dört siklon gruplu çimento fabrikasında değişkenler listesi[16]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
F	BT(1)	BG(1)	A(1)	T _k (1)	Q _{w,DF}	η ₁	T _F (1)	X _s	X ₀	Y ₀	Z ₀	V ₀
F(2)	BT(2)	BG(2)	A(2)	T _k (2)	Q _{w,KA}	η ₂	T _F (2)= T1(5)	P ₁	X ₁	Y ₁	Z ₁	V ₁
F(3)	BT(3)	BG(3)	A(3)	Th(1)	Q _{w,soğ}	η ₃	T _F (3)= T2(5)	P ₂	X ₂	Y ₂	Z ₂	V ₂
F(4)	BT1(3)	BG1(3)	A(4)	Th(2)	Q _{w(1)}	η ₄	T _F (4)= T1(4)	R ₁	X ₃	Y ₃	Z ₃	V ₃
F(5)	BT1(4)	BG1(4)	A(5)	Th(3)	Q _{w(2)}	η ₅	T _F (5)= T2(4)	R _{DF}	X ₄	Y ₄	Z ₄	V ₄
F(6)	BT1(5)	BG1(5)	A(6)	Th(4)	Q _{w(3)}	η ₆	T _F (6)= T1(3)	R _{KA}	X ₅	Y ₅	Z ₅	V ₅
F(7)	BT2(3)	BG2(3)	A(7)	Th(5)	Q _{w(4)}	η ₇	T _F (7)= T2(3)	λ _{DF}	X ₆	Y ₆	Z ₆	V ₆
F(8)	BT2(4)	BG2(4)	A(8)	Th(6)	Q _{w(5)}	η ₈	T _F (8)= T(3)	λ _{KA}	X ₇	Y ₇	Z ₇	W ₇
F(9)	BT2(5)	BG2(5)	GKO	Th(7)	Q _{w(6)}	K	T _F (9)= T(2)	Y _{DF}	X ₈	Y ₈	Z ₈	W ₈
			H ₂ O _F	Th(8)	Q _{w(7)}	FA	T(1)	Y _{KA}	X ₉	Y ₉	Z ₉	W ₉
			T _{y,KA}	T _{y,DF}								
9	18	27	38	49	59	69	79	89	99	109	119	129

Not: 10.11.12 ve 13.sutundakideğişkenler yüzde (%) olarak alınacaktır.

Toplam değişken sayısı 129' dur.

Tablo 4.2. Döner fırın ünitesinde değişken listesi[16]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F(9)	BT(1)	A(3)	Th(3)	T _{y,DF}	T(1)	Y _{DF}	X ₈	Y ₈	Z ₈	W ₈
K(1)	BG(1)	A(4)	Th(4)	T _F (9)	λ _{DF}	X _s	X ₉	Y ₉	Z ₉	W ₉
		A(5)	Th(5)	T _k (1)	R _{DF}	Q _{w,DF}				
2	4	7	10	13	16	19	21	23	25	27

Döner fırın ünitesinde değişken sayısı 27 tanedir.

Bu durumda serbestlik derecesi ise;

$$n_{sd,df} = 27-8= 19$$

Çalışmanın genel olarak ; hammadde, yakıt ve yakıt külü analizleri esas alınarak paralel akışlı önkalsinasyonlu dört kademeli çimento üretim

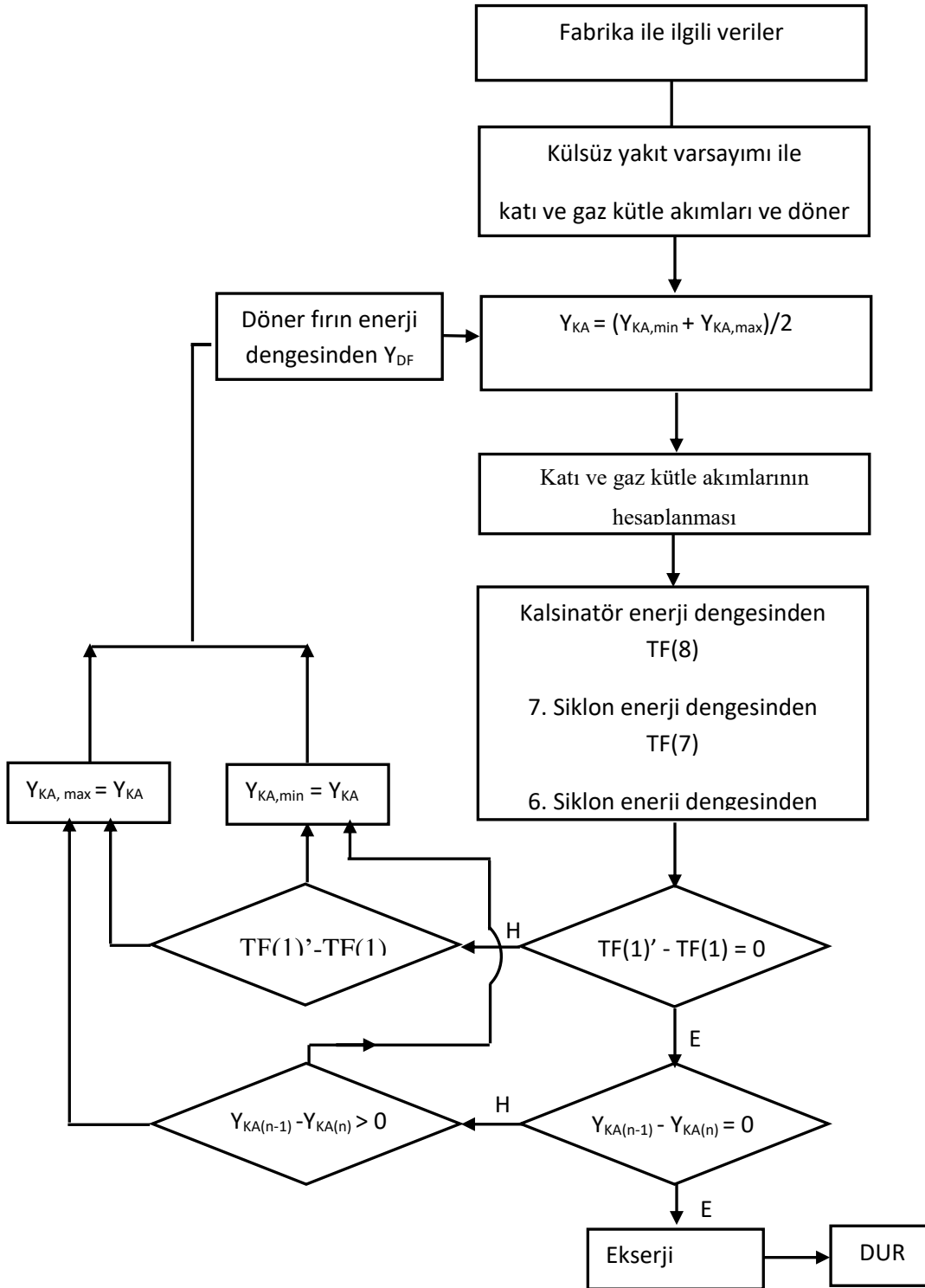
sistemlerinde kütle ve enerji denklıklarının hesap sonuçları döner fırın özelinde değerlendirilmiştir.

4.1. Matematik Modelin Program Algoritması

Önkalsinasyonlu sistem çimento fabrikası için yukarıda belirtilen değişkenlerin çözümü için geliştirilen bilgisayar programının akış şeması Şekil 4.1.' de verilmiştir.

Bu programın çözüm algoritması şu şekildedir. İlk önce önkalsinasyonlu çimento fabrikasına ait veriler programa data olarak girilir. Döner fırın çıkış sıcaklığı sabit parametre ve önkalsinatör yakıtı için minimum ve maksimum değerler belirlenerek

hedef parametre seçilir (programda ısıtıcı siklon guruplarına giren hammadde sıcaklığı). Böylece döner fırın enerji denklığından döner fırın yakıtı, kalsinatör için minimum ve maksimum değerlerle yapılan iteratif yaklaşımla bulunan yakıt miktarı dikkate alınarak tüm sistem için kütle ve enerji denklıkları hesaplanır. Programda iteratif yaklaşım, yarıya bölme metodu ile yapılmıştır. Kalsinatör enerji denklığı yardımıyla kalsinatöre gelen hammadde sıcaklığı TF(8) hesaplanır. Kalsinatörün hemen üzerindeki siklondan itibaren yukarıya doğru gidilerek her bir siklon için enerji denklıkları yapılır ve her defasında siklona giren hammadde sıcaklığı hesaplanır.



Şekil 4.1. Paralel akışlı kalsinatörlü çimento fabrikasında kütle, enerji ve ekserji denklemlerinin hesaplayan bilgisayar programı akış şeması[16].

En üst yani birinci siklonda yapılan enerji denkliği sonucu bulunan hammadde giriş sıcaklığının TF(1) başlangıçta verilen

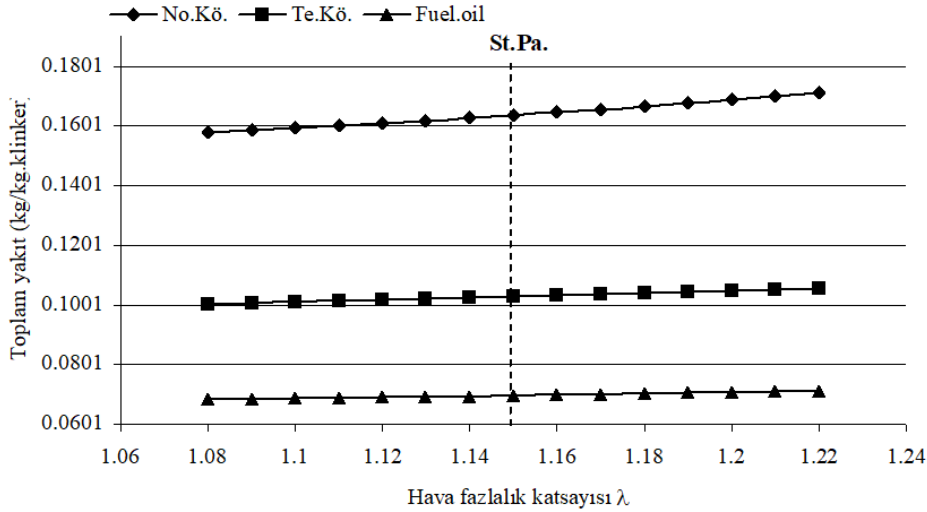
hedef parametre sıcaklığına eşit olup olmadığı karşılaştırılır. Sıcaklık eşit çıkarsa işleme ekserji denkliği ile devam edilir. Eğer eşit çıkmaz ise hesapla bulunan sıcaklığın başlangıçta kabul edilen

sıcaklıktan büyük veya küçük olması durumuna göre iterasyonla yeni yakıt hesaplanır ve yukarıdaki işlemler yeniden tekrarlanır. Başlangıçta kabul edilen hammadde giriş sıcaklığı ile programda hesaplanan sıcaklığın denkleştiği iterasyonda hesaplanan kütle ve enerjiler esas alınarak ekserji analizi hem tüm sistem hem de üniteler bazında yapılır.

5.Sonuçlar ve Tartışma

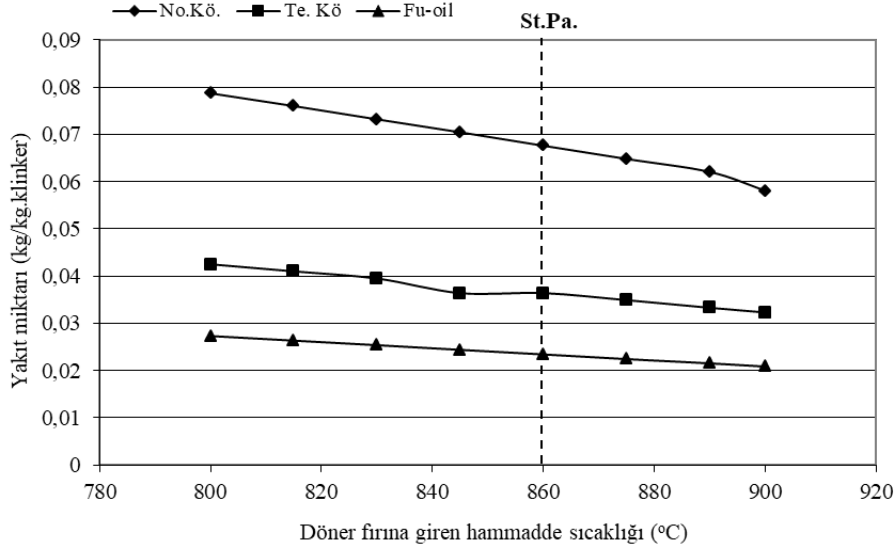
Elde edilen nümerik sonuçlar ile çizilen grafikler incelendiğinde farklı üç yakıt türü (normal kömür, test kömürü ve fuel-oil) ile elde edilmiştir. Burada

döner fırın ünitesi için yukarıdaki üç farklı yakıt ile birlikte hava fazlalık katsayısı ve tersiyer havanın değişik değerlerinin etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 5.1.'de hava fazlalık katsayısının üç farklı yakıt değerlendirilmesi yapıldığında normal kömür miktarı bütün değişken parametre şartlarında test kömürü ve fuel-oil yakıtlarına nazaran miktar olarak daha fazla olmaktadır. Hava fazlalık katsayısının üç farklı yakıt türünde Şekil 5.1.'e göre standart parametre gözönünde bulundurularak % 1' lik artış yakıt enerjisi tüketimini yaklaşık % 0,45 (14-22 kJ/kg.klinker), artmasına sebep olmaktadır.



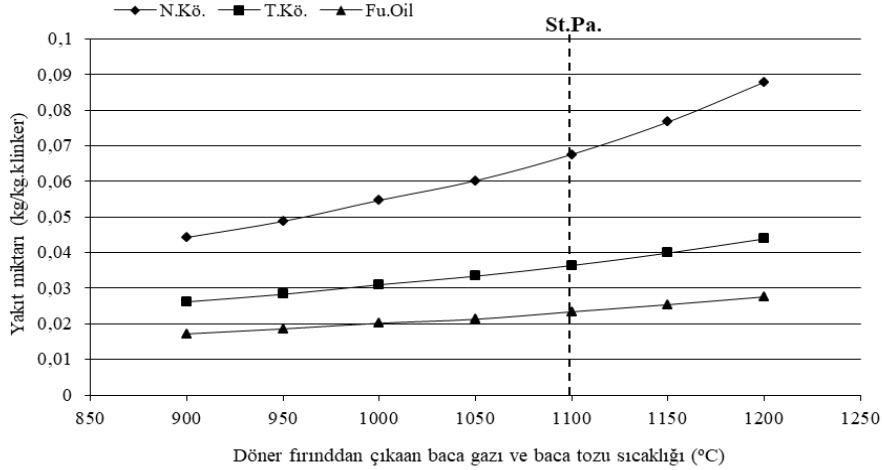
Şekil 5.1. Hava fazlalık katsayısı parametresinin toplam yakıt miktarı değişimine etkisi

Şekil 5.2.'de görüldüğü üzere döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresindeki artış döner fırının üç farklı yakıtını da azaltmaktadır.



Şekil 5.2. Değişken parametre olarak döner fırına giren hammadde sıcaklığının döner fırın yakıt değişimine etkisi

Kullanılan üç farklı yakıt türüne göre Şekil 5.3. Standart parametre sıcaklığı gözönüne alınca döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığındaki artış özgül yakıt enerjisini ve atmosfere atılan baca gazı enerjisini arttırmaktadır. 50°C'li artış kalsinatör yakıtında % 5 (178 kJ/kg.klinker) kadar azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 5.3. Değişken parametre olarak döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığının yakıt tüketimine etkisi

Döner fırın duvar ısı kaybı ve soğutucunun toplam ısı kaybı arttıkça özgül yakıt enerjisi tüketimi ve siklon kademelerindeki sıcaklık gradyeni ile atmosfere atılan baca gazının ve baca tozunun çıkış sıcaklığına etkisi olumsuz olmaktadır. Kaçak hava miktarındaki artış bu çalışmada ihmal edilmiştir, fakat özgül yakıt enerjisi tüketimini ve siklon

kademelerindeki hammadde ile baca gazı ve baca tozu sıcaklıklarını olumsuz etkilemektedir.	O_2	:Oksijen gazı
	$Q_{R,DF}$:Döner fırında olan reaksiyon enerjisi (kJ)
Simgeler		
A :Yakma havası (kmol)	$Q_{W,DF}$:Döner fırın duvarından olan ısı kaybı (kJ)
A(1) : Klinker soğutma havası (kmol)		
A(2) :Klinker soğutucudan dışarı atılan hava (kmol)	$TE(n)$:Döner fırın, kalsinatör ve siklon kademelerindeki baca tozunun enerjisi (kJ)
A(3) :Döner fırın sekonder havası (kmol)	$V(n)$:Hammaddedeki $MgCO_3$ miktarı (kg)
A(4) :Döner fırın yakıt sevk havası (kmol)		
A(5) : Döner fırın primer havası (kmol)	$\underline{V(n)}$:Hammaddedeki $MgCO_3$ miktarı (%)
A(6) : Kalsinatör tersiyer havası (kmol)	$Y(n)$:Hammadde ve klinkerdeki CaO miktarı (kg)
A(7) : Kalsinatör yakıt sevk havası (kmol)	$\underline{Y(n)}$: Hammadde ve klinkerdeki CaO miktarı (%)
A(8) : Kalsinatör primer havası (kmol)		
BG(n) Döner fırın, kalsinatör ve siklon kademelerinde baca gazı miktarı (kmol)	Y_{DF}	: Döner fırın yakıtı (kg)
	$Z(n)$: Hammadde ve klinkerdeki diğer oksitler miktarı (kg)
BT(n) :Döner fırın, kalsinatör ve siklon kademelerinde baca tozu miktarı (kg)	$\underline{Z(n)}$: Hammadde ve klinkerdeki diğer oksitler miktarı (%)
C : Karbon		
$CO_{2,DF}$:Dönerfırında hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan karbondioksit (kmol)	$X(n)$: Hammadde ve klinkerdeki $CaCO_3$ miktarı (kg)
FE(n) :Giriş ve siklon kademelerinde hammadde enerjisi (kJ)	$\underline{X(n)}$: Hammadde ve klinkerdeki $CaCO_3$ miktarı (%)
GE(n) :Döner fırın çıkışında ve siklon kademelerinde baca gazlarının enerjisi (kJ)	X_{T1}	: Döner fırın çıkışında baca tozundaki $CaCO_3$ miktarı (kg)
HE(n) :Klinker soğutma ünitesine giren çıkan hava akımlarının enerjisi (kj)	$W(n)$: Hammadde ve klinkerdeki MgO miktarı (kg)

$W(n)$: Hammadde ve klinkerdeki MgO miktarı (kg)

λ : Hava fazlalık katsayısı

İndisler

DF : Döner fırın

F : Hammadde

Y : Yakıt

Kaynaklar

[1] (2023) Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı websitesi [online] Çimento sektörü Raporu (2019), www.sanayi.gov.tr>asset>PDF,2023

[2] SİPAHİ, F., "Teknolojik Gelişmeler Vasıtası ile Enerji Verimi", Çimento Dünyasından Tercümelere, (Çeviri), Sayı 148, s.11-19, Aralık, 1996

[3] GÜRER, T., İLERİ, A., "Türk Sanayiinde 2010 Yılına kadar Enerji ve Ekserji Kullanımı", Mühendis ve Makine, Cilt. 40, Sayı 473, Sayfa 19-28, Temmuz, 1999

[4] KARAKOÇ, T.H., "Çimento Endüstrisinde Elektrik Enerjisi Yönetimi ve Elektrik Enerjisi Tasarrufu", Çimento Sanayinde Enerji Tasarrufu Semineri Tebliğler, 1989

[5] ÖZDEN, N., "Çimento Teknolojisi", ÇİTOSAN, Ankara, 1973

[6] BOATENG, A.A., BARR, P.V., "A Thermal Model for the Rotary Kiln Including Heat Transfer Within the Bed", Heat Mass Transfer, Vol.39, No:10, pp.2131-2147, 1996

[7] ERHARD, H.S., SCHEUER, A., "Burning Technology and Thermal Economy", ZKG INTERNATIONAL, Vol.47, No:2, pp.34-41, 1994

[8] E. BAHADIR, "Döner Fırınlarda Klinker Pişirme Tekniği", Çitosan Yayınları, Ankara, 1985

[9] LUDERA, L.M., "Design Methods For Cyclone Preheaters of Rotary Kilns", ZKG, No:1, 1989

[10] KOTHARI, S.S., UNNIKRISSHANNAN, A.N., "Optimum Capacity for A Clinker Production Line", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:1, pp.70-79, 2002

[11] PERAY, K.E., WADDELL, J.J., "The Rotary Cement Kiln", Chemical Publishing Co., New York, 1972

[12] KOLİP, A., "Çimento Üretiminde Enerji ve Ekserji Analizi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen. Bil. Enstitüsü, 1993

[13] GARDEİK, H.O., "Fuel Energy Consumption in Cement Burning With Precalcining", ZKG, No:12, pp.611-617, 1981

[15] GÜRÜZ, H.K., "Çimento Fabrikalarında Kütle ve Enerji Denklikleri", Kimya Mühendisliği Dergisi, No:84, s.15-24, 1977

[16] SAVAŞ A.F., kolip A., BAÇ, N., " Paralel Akışlı Ön Kalsinasyonlu Çimento Fabrikasında Enerji ve Ekserji Analizi Modllemesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen. Bil. Enstitüsü, 2004

[17] LOCHER, G., "Mathematical Models for the Cement Clinker Burning Process Part I:Reactions and Unit Operations", ZKG INTERNATIONAL, Vol.55, No:1, pp. 29-37, 2002

[18] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 4: Great Cooler" ,ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:2, pp.46-58, 2002

[19] LOCHER, G."Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 2:Preheater, Calclner and Bypass", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:1, pp.39-50, 2002

[20] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 3:Rotary Kiln", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:3, pp.68-80, 2002

[21] GARDEİK, H.O., LUDWIG, H. And STEINBIB, E., "Calculation of Heat Loss Trough the Walls of Rotary Kiln and Mills:Part I", ZKG, No:2, 1980

[22] GARDEİK, H.O., LUDWIG, H. "Calculation of Heat Loss Trough the Walls of Rotary Kiln and Mills:Part II", ZKG, No:5, 1985

[23] ONISSI, T.R., "Some Considerations on Heat Transfer in The Rotary Kiln", ZKG, No:8, 1970

[24] SCHEUER, A., ELLERBROCK, H.G., "Possible ways of saving energy in cement production", ZKG, No:7, pp.175-182, 1992

[25] DİŞCİOĞLU, A., "Basit Yöntemle Döner Fırın Isı Bilançosunun Çıkarılması", TÇMB, No:189, 1983

[26] GOCER, C., "Döner Fırın Mühendisliği", Adana Çimento Sanayii T.A.Ş. Yayınları, No.2, Ocak-2001

[27] CARVALHO, M., MODIVATE, De O. "Theoretical Energy Requirement for Burning Clinker", Cement and Concrete Research , Vol.29, pp.695-698, 1999

[28] LABAN, O., "Cement Engineers Handbook", Fourth Edition , 1983

[29] OKBAŞ, Y., "Matematiksel Model Uygulayarak Dört Kademeli Siklonlu Önsıstıcıda Isı Harcamasının Tayini", TÇMB Yayınları, (Çeviri), No:241, 1987