

# BİR ÇİMENTO DÖNER FIRIN SİSTEMİ YÜZEYİNDEN ISI KAYIPLARININ AMPİRİK VE İSTATİSTİKİ MODELLENMESİ

Barış Şimşek<sup>1</sup>, Emir H. Şimşek<sup>2</sup>, Taner Altunok<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Tandoğan, ANKARA

<sup>3</sup>Çankaya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüzüncü yıl, ANKARA

[chem.eng.bsimsek@hotmail.com](mailto:chem.eng.bsimsek@hotmail.com), [simsek@eng.ankara.edu.tr](mailto:simsek@eng.ankara.edu.tr), [taltunok@cankaya.edu.tr](mailto:taltunok@cankaya.edu.tr)

(Geliş/Received: 14.12.2011; Kabul/Accepted: 19.12.2012)

## ÖZET

Çimento sektörü gibi üretimde çok fazla enerji tüketen sanayi dallarında, enerjinin kontrollü kullanımı, ancak enerjinin sistemde nasıl dağıldığının bilinmesi ile mümkün olur. Çimento üretim prosesinde enerji tüketiminin nedeni olan ısı kayıplarının büyük bölümünü, döner fırın yüzeyinden konveksiyon ve radyasyon ile olan ısı kayıpları oluşturmaktadır. Bu çalışmada, döner fırın yüzeyinden ölçülen sıcaklıklar yardımıyla fırın boyunca ısı kaybı için ampirik denklem ve istatistikî modelleme teknikleri kullanarak ampirik denklem türetilmiştir. Termal ölçüm kameraları ile ölçülen ve deneysel modelleme için gerekli olan veriler, fabrika merkezi kontrol odasından alınmıştır. Sistemin toplam ısı kaybı Matlab programı kullanarak hesaplanmıştır. Sonuçlar ile ilgili istatistikî analizler Minitab 15.1.1 programı ile gerçekleştirilmiştir. Fırın boyunca ısı kayıplarının özellikle fırın merkezine doğru arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ampirik Modelleme, Çimento, Döner Fırın, Isı Transferi, İstatistikî Metotlar

## EMPIRICAL AND STATISTICAL MODELING OF HEAT LOSS FROM SURFACE OF A CEMENT ROTARY KILN SYSTEM

### ABSTRACT

In branches of industry too much energy consuming such as cement sector, controlled use of energy, only it is possible to know how energy is distributed in the system. In cement production process, a large portion of the heat losses which is due to energy consumption consist of convection and radiation heat losses from the surface of rotary kiln. In this study, empirical equation was derived for heat loss from surface of rotary kiln in a cement factory using empirical equations and statistical modeling techniques by the help of temperatures measured surface of rotary kiln. Measured with thermal cameras and the data necessary for experimental modeling was obtained the factory central control room. Total heat loss of system was calculated using Matlab. Statistical analysis related to results was carried out by Minitab 15.1.1 program. It was concluded that heat losses throughout rotary kiln increased toward the center of the kiln.

**Key Words:** Cement, Empirical Modeling, Rotary Kiln, Heat Transfer, Statistical Methods

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket, vs.) yapıştırma kullanılan bir malzemedir. Kırılmış kalker; kil ve gerekiyorsa demir cevheri ve/veya kum katılarak öğütülüp toz haline getirilir. Bu malzeme 1400-1500°C' de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir. Daha sonra klinkere %4-

5 oranında alçı taşı eklenip, çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir [1].

Günümüzde artan enerji fiyatları ve çimento kalitesinde giderek artan kalite gereksinimleri, üretim aşamalarında optimizasyon çalışmalarının yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Ulusal ve uluslararası alanda rekabet edebilmek için; çimento fabrikaları enerji ve işçilik masraflarını minimize edip yüksek kaliteli ve uniform çimento üretmek durumundadır [2]. Bu

durum, hammadde sahalarının değerlendirilmesi ve üretim planlamasında yeni bilgisayar tekniklerin kullanılması, üretim aşamalarında enerji tasarrufu sağlayacak yeni makinelerin geliştirilmesi yanında mevcut makinelerin de optimum şartlarda işletilmelerinin önemini artırmıştır [3]. Çimento endüstrisi de yüksek miktardaki enerji tüketimi ve emisyon değerleri sebebiyle, enerji tüketimini kontrol altına almak için büyük çaba göstermektedir.

Literatürde refrakter fırınlar için çok sayıda ısı aktarım modelleri mevcuttur. Döner fırında ısı aktarım mekanizması; kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon ile ısı aktarım mekanizmalarını içerdiği ve fırın açısız yönde döner durumda olduğu için karmaşıktır. Bu modeller çok boyutlu doğası gereği sayısal yöntemler ile çözülmüştür. Bu ısı aktarım modellerini sayısal yöntemlerle çözmek için radyal ve açısız yönde termal ısı iletimi dikkate alınmıştır. Sonavane ve Specht, döner fırın duvarında ısı aktarımının sayısal analizi için sonlu elemanlar metodu kullanmıştır. Isı aktarım sürecini daha iyi anlamak için duvarın iç yüzeyinde sıcaklık dağılımını içeren bir sayısal benzetim programı tasarlamışlardır [4].

Engin 1997'de mevcut bir çimento fabrikası döner fırın sistemi üzerinden alınan ölçümler ve üretim parametrelerini baz alarak söz konusu fabrikanın döner fırın sisteminin ısı bilançosunu elde etmiş ve çalışma sonunda mevcut ısı kayıplarının bir kısmını geri kazanmayı hedefleyen önerilerde bulunmuştur. Engin çalışmasında döner fırın sisteminde olabilecek tüm ısı kazançlarını ve kayıplarını dikkate almıştır. Engin döner fırın sistemindeki ısı kayıplarını klinker oluşum ısısı, hammadde içindeki suyun buharlaşma gizli ısısı ve fırın sistemi yüzeyinden taşınım ve ışınlam ile ısı kayıpları olarak gruplamıştır. 25 ton/saat klinker üretim kapasitesine sahip bir fabrika için, 593 K sabit sıcaklıktaki döner fırın yüzeyinden taşınım ve ışınlam ile ısı kayıplarını 546 kJ/kg klinker olarak hesaplamıştır [5]. Yine Engin ve Arı 2005'de kuru tip çimento döner fırın sisteminde enerji denetimi çalışması yapmışlardır [6]. Bu çalışmada sabit 591 K sabit sıcaklıktaki döner fırın yüzeyinden taşınım ve ışınlam ile ısı kayıplarını 557 kJ/kg klinker olarak hesaplamıştır [6]. Bu değer toplam ısı kayıplarının %15.11'ini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada döner fırın yüzey sıcaklığı; fırın boyunca değişken olarak farklı noktalarda ölçülmüş ve ısı kaybının fırının hangi bölümlerinde daha çok olduğu tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, deneysel veriler; ampirik denklemler ve istatistiksel modelleme teknikleri ile birlikte kullanılarak ısı kaybı için ampirik denklem türetilmiştir.

Bu makalede, kurumdaki üretim prosesi bileşenleri ve döner fırın sistemi hakkındaki bilgi verilmiştir. Yoğun enerji kaybının bulunduğu döner fırın yüzeyinden

ölçülen sıcaklıkları yardımıyla fırın boyunca ısı kaybı için ampirik denklem ve istatistikî modelleme teknikleri kullanarak ampirik denklem türetilmiştir. Dolayısıyla, döner fırın yüzeyinden ısı kayıplarının fırın boyunca dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece bu çalışma yalıtım malzemelerinin seçimi ve kullanılma politikasının belirlemede önem arz etmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1 Malzeme (Material)

Döner fırın kimya, çimento, metalürji endüstrisinde, kurutma proseslerinde, atık arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Çimento fabrikasında bulunan döner fırın 64 metre uzunluğunda ve 3,5 metre çapında, %3,5-4,0 eğimli yatay bir silindiridir. Dört yerden mesnetlenmiş olup, bir elektrik motoru ile döndürülmektedir. Girişte bir ön ısıtıcı, çıkışta ise bir soğutma bölümleriyle bağlantılıdır.

Döner fırında, soğutmada ve ön ısıtıcı bölümünde yüksek ısı ve yüksek sıcaklığı haiz malzemeler ve gazlar bulunmaktadır. Fırın mantosunu yüksek sıcaklık ve ısı gerilmelerden korumak için fırının içi refrakter malzeme ile örülerek aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamaktadır [8]. Fırından ani soğutma işleminin gerçekleşeceği soğutma bölümüne dökülen malzemenin sıcaklığı 100-150 C<sup>0</sup>'ye düşürülür ve malzeme klinker adını alır. Klinker, bir taşıyıcı sistem ile klinker deposuna taşınır [9]. Fabrika 30 ton/saat klinker üretim kapasitesine sahiptir.

### 2.2 Metot (Method)

Tanımlanan sıcaklık sınır şartları ve ısı geçişi katsayıları kullanılarak yapı üzerindeki sıcaklık dağılımını bulmaya yönelik yapılan analize ısı analiz denilmektedir. Döner fırın ısı analizinde 5 adımdan oluşan bir akış izlenmiştir. Bu akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Döner fırın sistemi ısı analiz akış diyagramı (Flow diagram of rotary kiln system thermal analysis)

### 2.2.1 Döner fırın sistemi ısıl analizi hedefleri belirleme (Determine rotary kiln system thermal analysis objectives)

Enerjiyi verimli kullanmak, doğrudan ürün maliyetlerini azaltırken, dolaylı olarak da enerji üretiminden kaynaklanan emisyonları azaltmaktadır. Çimento endüstrisi de yüksek miktardaki enerji tüketimi ve emisyon değerleri sebebiyle, enerji tüketimini kontrol altına almak için büyük çaba göstermektedir. Çimento üretiminin en belirgin karakteristiği yoğun enerji kullanımındır [6]. 1 ton çimento üretimi için 3 Gigajoule'den fazla enerji gerekir; bunun yaklaşık %88'i termal enerji, %12'si ise elektrik enerjisinden oluşur. Kurumlar mevcut performans sisteminin iyileştirilmesi yönünde çaba sarf edilmesi büyük önem taşımaktadır [10].

Döner fırınla birlikte, çimento üretim prosesinin önemli bileşenleri olan önisütücü, kalsiner ve soğutucu ile ilgili başlangıçta ayrı modeller oluşturmuş ve bu modelleri bir benzetim programı ile bütünleştirilmiştir [11]. Bu çalışmada performans değerlendirmenin amacı; önisütücü siklonlu çimento fabrikasındaki döner fırın yüzeyinden toplam ısı kaybını modellemektir.

Böylece kurulan matematiksel model, tesisin enerji tüketimini en uygun duruma getirmek için ve önerilen yeni tasarımların veya yeni politikaların analizinde kullanılabilir. Ayrıca; sistemin performansının tespiti ile sistem üzerinde yapılacak iyileştirmeler ve alternatif tasarımlar belirlenebilir. Çimento sektöründe rekabet avantajı sağlanması ve enerji tasarrufunun sağlanmasında döner fırın yüzeyinden ısı kayıpları önemli rol oynamaktadır[9].

### 2.2.2 Isıl analiz metodunu belirleme (Determine thermal analysis method)

İstatistiksel teknikler ürünlerin ve sistemlerin geliştirilmesi, mevcut tasarımın iyileştirilmesi, üretim proseslerinin tasarımı, geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için kullanılabilir [12]. İstatistiksel sonuç çıkarma, Bir kitleden çekilen örneklemden kitle hakkında bazı sonuç çıkarma sürecidir [13].

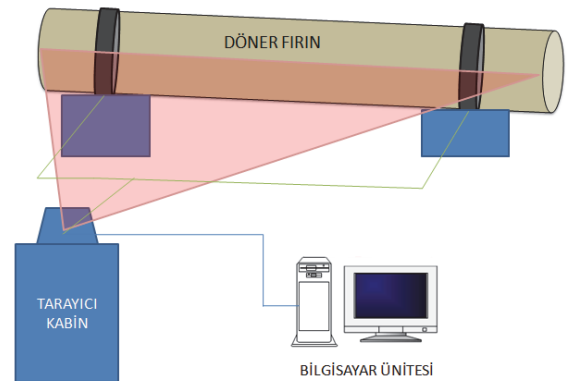
Matematiksel model inşasında iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bunlardan ilki teoriye dayalı modelleme tekniğidir [14]. Teoriye dayalı modelleme; probleme ilgili mevcut olan teoriye dayalı olarak model inşa edilmesidir [14]. Bu tip modeller, white-box olarak adlandırılır [14]. Örneğin; Sonavane ve Specht, döner fırın iç duvarında sıcaklık dağılımı için teoriye dayalı bir model inşa etmişlerdir [4]. İkinci yaklaşım ise deneysel modelleme yaklaşımıdır. Mekanizmanın temel formunun bilinmediği ya da karmaşık olduğu durumlarda, eldeki verinin formu, model inşasının temelini oluşturur [14]. Bu tip modeller, black-box olarak adlandırılır. Döner fırın yüzeyinden ısı kaybı dağılımı bilinmediğinden deneysel modelleme tekniği

kullanılmıştır. Deneysel modelleme için gerekli olan matematiksel formülasyonların tipi, eldeki verinin bir ön analizi ile elde edilir [14]. Deneysel modelleme yöntemi veri toplanması, veri analizi, model seçimi, parametre kestirimi ve modelin onaylanması olmak üzere ardışık beş adımı içerir [14]. Veri; laboratuvar koşullarında, kontrollü bir çevreden ve tam anlamıyla planlanmış deneylere dayalı olarak elde edilebilir. Veri analizi belirli bir modelin, veriye uygun olup olmadığının belirlenmesine yardımcı olmak için yapılan işlemdir [14]. Üçüncü adım olan model seçimi, verilen bir veri kümesine uygun bir model seçme aşamasıdır. Model seçimi yapıldıktan sonra model parametreleri kestirilir. Eldeki veriye göre model parametreleri belirlenir [14]. Verilen bir veri kümesine uygun birden fazla model belirlenebilir [14]. Bu modeller arasından, problemin çözümü için en uygun olan model belirlenir. Belirlenen bu modelin, veriyi temsil edip etmediğinin saptanması için model onaylanması yapılır [14].

### 2.2.3 Veri toplanması (Collect data)

Fırın sıcaklık ölçüm sistemleri, fırın sıcaklık dağılımını gerçek zamanlı olarak ölçen sistemlerdir. Temelde sıcaklık tarayıcı sistemi kızılötesi tarayıcı kafa, tarayıcı kabini, fırın pozisyonu izleme ünitesi, fan kontrol ünitesi, pirometre cihazı ve bilgisayar ünitesinden oluşmaktadır.

Kızılötesi tarayıcı görüntüleme ve sıcaklık ölçüm kamerası; -5 C° ile 50 C° arası ortam sıcaklığında çalışabilen, 100 ila 700 C° sıcaklıklar arasında % 1 C° doğrulukla ölçüm yapabilen, 100 derecelik tarama açısına sahip, genelde çimento ve diğer endüstrilerde kullanılan yatay döner fırınlarda, fırına 30-40 metrelik bir mesafede tarayıcı kabine monte edilerek sistemin noktasal sıcaklıklarını, alıcılar ile İzleme Merkezi Kontrol Odasına aktaran cihazlardır (Şekil 2).



Şekil 2. Fırın sıcaklık tarama sistemi (Kiln temperature scanner system)

Fırın pozisyonu izleme ünitesi, tarayıcı sistemlerinde sağlıklı bir ölçme için kritik bir unsurdur. Çünkü ölçüm yapılan noktanın daha önce alınan ölçümlerle

uyumlu olması gerekir. Bunun için, ölçüm yapılan her noktanın pozisyonunun sağlıklı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Ölçüm yapılan noktanın pozisyonunun doğru olarak bilinebilmesi için, fırın dönüşünün hassas bir şekilde takip edilmesi zorunludur [15].

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Döner fırın sistemi analizi, sistemin tanımlanması, fırın sistemi yüzeyinden ısı kaybının modellenmesi ve sistemin performans analizi bölümlerini ihtiva etmektedir.

#### 3.1 Sistemin Tanımlanması (Identification of The System)

Döner fırının tüm uzunluğu boyunca belli aralıklarla ölçülen yüzey sıcaklıkları Çizelge 1’de verilmiştir. Sıcaklık değerleri merkezi kontrol odasında ölçülmüştür.

#### 3.2 Fırın Sistemi Yüzeyinden Isı Kayıplarının Modellenmesi (Modeling Heat Losses From Surface of Kiln)

Radyasyon ısı transferi problemleri, konveksiyon problemleri ile yakından ilişkilidir. Analizin amacı genellikle, radyasyon ve konveksiyon ile toplam ısı transferini değerlendirmektir. Fırın yüzeyinden taşınım ve ışınilma olan ısı kaybı  $Q$ ,  $h_c$  konveksiyon ile ısı transferi katsayısı,  $h_f$  radyasyon ile ısı transferi katsayısı olmak üzere konveksiyon ile radyasyonun toplam ısı transferi (1) denklemi ile verilebilir [5].

$$Q = (h_c + h_f) * A * (T_y - T_c) \quad (1)$$

**Çizelge 1.** Döner fırın yüzeyinden ölçülen sıcaklık

**Çizelge 2.** Ortalama sıcaklık değerleri için atmosferik basınçta havanın özellikleri (Properties of air at atmospheric for average temperature value)

L(m)	Tort(K)	$\nu * 10^6$ (m <sup>2</sup> /sn)	$k * 10^3$ W/m <sup>0</sup> C	Re	L(m)	Tort(K)	$\nu * 10^6$ (m <sup>2</sup> /sn)	k	Re
2	439	30,58	36,27	228900	34	469	34,18	38,29	204800
4	437	30,34	36,14	230700	36	478	35,26	39,90	198500
6	438	30,46	36,21	229800	38	484	35,98	39,30	194600
8	432	29,74	35,80	235400	40	484	35,98	39,30	194600
10	439	30,58	36,27	228900	42	446	31,42	36,75	222800
12	453	32,26	37,22	217000	44	387	24,34	32,78	287600
14	447	31,54	36,81	221900	46	392	24,94	33,21	280700
16	451	32,02	37,08	218600	48	432	29,74	35,80	235400
18	442	30,94	36,48	226200	50	416	27,82	34,73	251600
20	431	29,62	35,74	236300	52	448	31,66	36,88	221100
22	417	27,94	34,79	250500	54	444	31,18	36,61	224500
24	409	26,88	34,26	260400	56	448	31,66	36,88	221100
26	416	27,82	34,73	251600	58	447	31,54	36,81	221900
28	462	33,34	37,82	210000	60	442	30,94	36,48	226200
30	465	33,70	38,02	207700	62	421	28,42	35,06	246300
32	476	35,02	38,61	199900	64	423	28,66	35,20	244200

değerleri (Measured temperture values from the surface of the rotary kiln)

L(m)	Ty(K)	L(m)	Ty(K)	L(m)	Ty(K)	L(m)	Ty(K)
2	580	18	461	34	641	50	534
4	576	20	565	36	658	52	599
6	578	22	505	38	670	54	591
8	566	24	433	40	670	56	599
10	580	26	535	42	595	58	597
12	609	28	626	44	477	60	587
14	597	30	626	46	460	62	544
16	605	32	654	48	480	64	464

#### 3.2.1 Taşınım ile ısı transfer katsayısı, $h_c$ (Convection heat transfer coefficient)

Fırın yüzeyinden taşınım ısı transferi, fırın döndüğünden ve açık havada bulunduğundan zorlanmış konveksiyon şeklinde gerçekleşir. Bu çalışmada fırın yüzeyinden olan taşınım ısı transfer katsayısı için Hilbert tarafından önerilen (2) denklemi kullanılabilir [5]. Hava için 1 atmosfer basınçta Prandtl sayısı 400 ile 500 K arasında çok fazla değişmediğinden, yaklaşık olarak 0,680 olarak kabul edilmiştir. Rüzgâr hızı da 2m/sn olarak alınmıştır.

$$h_c = 0,027 * \left( \frac{k}{D} \right) * Re^{0,805} * (Pr)^{1/3} \quad 40000 < Re < 400000 \quad (2)$$

Denklem (3) ile hesaplanan ortalama sıcaklıklar ile bu sıcaklıklarda ve 1 atmosfer basınçta hava için  $k$ ,  $\nu$  değerleri Çizelge 2’ye aktarılmıştır [16].

Denklem (4) ile Re değerleri hesaplanmış ve yine

**Çizelge 3.** Döner fırın yüzeyinden toplam ısı kaybı (Total heat losses from surface of the rotary kiln)

Örnek	Isı aktarımı yüzey alanı(m <sup>2</sup> )	Fırın uzunluğu (m)	Yüzey sıcaklığı (K)	Konveksiyon ile ısı transfer katsayısı, h <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Radyasyon ile ısı transfer katsayısı, h <sub>f</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Toplam ısı transfer katsayısı h <sub>c</sub> +h <sub>f</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Fırın yüzeyinden toplam ısı kaybı(kJ/kg klinker)
1	20,22	2	580	5,0808	14,93	20,0108	13,6370
2	20,22	4	576	5,0946	14,70	19,7946	13,2884
3	20,22	6	578	5,0884	14,82	19,9084	13,4655
4	20,22	8	566	5,1293	14,14	19,2693	12,4463
5	20,22	10	580	5,0808	14,93	20,0108	13,6370
6	20,22	12	609	4,9945	16,67	21,6645	16,3524
7	20,22	14	597	5,0291	15,94	20,9691	15,1918
8	20,22	16	605	5,0053	16,43	21,4353	15,9633
9	20,22	18	586	5,0616	15,28	20,3416	14,1717
10	20,22	20	565	5,1364	14,08	19,2164	12,3610
11	20,22	22	537	5,2404	12,60	17,8404	10,2064
12	20,22	24	520	5,3241	11,75	17,0741	9,0226
13	20,22	26	535	5,2498	12,50	17,7498	10,0635
14	20,22	28	626	4,9429	17,77	22,7129	18,1217
15	20,22	30	633	4,9251	18,22	23,1451	18,8742
16	20,22	32	654	4,8498	19,67	24,5198	21,3099
17	20,22	34	641	4,9043	18,77	23,6743	19,7827
18	20,22	36	658	4,9836	19,95	24,9336	21,7939
19	20,22	38	670	4,8308	20,82	25,6508	23,3057
20	20,22	40	670	4,8308	20,82	25,6508	23,3057
21	20,22	42	595	5,0373	15,81	20,8473	14,9965
22	20,22	44	477	5,5183	9,81	15,3283	6,4324
23	20,22	46	487	5,4824	10,24	15,7224	6,9889
24	20,22	48	567	5,1293	14,20	19,3293	12,5319
25	20,22	50	534	5,2498	12,44	17,6898	9,9867
26	20,22	52	599	5,0241	16,06	21,0841	15,3811
27	20,22	54	591	5,0489	15,58	20,6289	14,6310
28	20,22	56	599	5,0241	16,06	21,0841	15,3811
29	20,22	58	597	5,0291	15,94	20,9691	15,1918
30	20,22	60	587	5,0616	15,34	20,4016	14,2630
31	20,22	62	544	5,2097	12,96	18,1697	10,7202
32	20,22	64	548	5,1945	13,17	18,3645	11,0229
Σ	703,36	64					463,827

Çizelge 2'ye aktarılmıştır. Bütün bu veriler ile denklem (2) den hesaplanan h<sub>c</sub> değerleri de Çizelge 3'e aktarılmıştır.

$$T_{ort} = (T_y + T_c) / 2 \text{ Ortalama sıcaklık(K)} \quad (3)$$

$$Re = \frac{v * D}{\nu} \quad (4)$$

### 3.2.2 Radyasyon ısı transfer katsayısı, h<sub>f</sub> (Radiation heat transfer coefficient)

T<sub>y</sub> döner fırın yüzey sıcaklığı, T<sub>c</sub> ise çevre sıcaklığı olmak üzere; fırın ile çevre arasındaki radyasyon ile ısı transfer katsayısı (5) denklemi ile hesaplanabilir.

$$h_f = \frac{\sigma * \epsilon * F_{1,2}}{T_y - T_c} [T_y^4 - T_c^4] \quad (5)$$

Stephan-Boltzman sabiti; σ ve neşretme katsayısı; ε olmak üzere sırası ile 5,67\*10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> ve 0,8 (oksitlenmiş fırın yüzeyi için) olarak alınmıştır [5]. F<sub>1,2</sub> radyasyon şekil faktörüdür ve 1.yüzeyden ayrılan ve ikinci yüzeye ulaşan enerji oranı olarak tanımlanır [16].

Döner fırın yüzeyinden radyasyon ile ayrılan enerjinin tamamının ortama aktarıldığı düşünülerek bu değer 1,0 olarak alınmıştır.

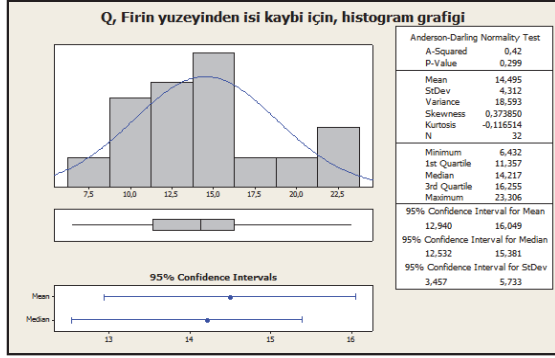
Çizelge 1'de verilen her iki metrelik 20,22 m<sup>2</sup>'lik alanlardaki tüm yüzey sıcaklıkları için radyasyon ısı transfer katsayısı denklem (5) esas alınarak, fırın yüzeyinden ısı kaybı Q'da denklem (1) esas alınarak Matlab programı ile hesaplanmıştır. 64 m uzunluğundaki reaktörün 2m'lik kesitlerinin yüzey sıcaklıkları ve bu kesit alanlarından kaybolan ısı miktarı Çizelge 3'de verilmiştir.

### 3.2.3 Fırın yüzeyi ısı kayıplarının matematiksel modellenmesi (mathematical modeling of kiln surface heat losses)

Bazı özel dağılımlar özel istatistik değerlere sahiptir [13]. Bu istatistikler veriden elde edilir ve teorik dağılımın nokta istatistikleri ile karşılaştırılır. Veri toplandıktan sonra veri için uygun bir dağılım belirlenir. Veri kümesine ilk olarak bir ön analiz yapılır.

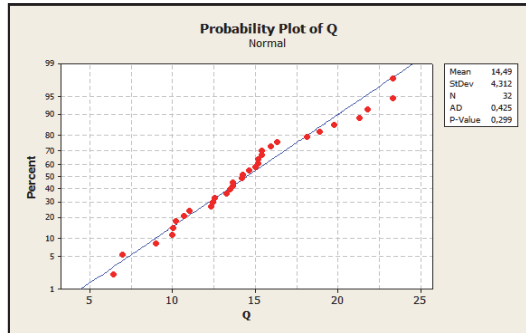
Ön analiz için verinin çizilen histogramı kullanılabilir. Histogram, veri için uygun bir model olarak araştırılan dağılımlar ile ilgili iyi bir ipucu verir [3].

Veriden yararlanılarak elde edilen histogram, teorik dağılımın şekli ile karşılaştırılır. Isı kayıplarının modellenmesi aşamasında ilk olarak toplam ısı kayıplarının minitab programında histogram grafiği çizilmiş ve Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Q için histogram grafiği (Histogram graphic for Q)

Histogram grafiğinden, özellikle çarpıklık değerinin 0’a yakın olması ile verinin normal dağılımdan geldiği söylenebilir.



Şekil 4. Q için Anderson-Darling test grafiği (Anderson-Darling test graph for Q)

Bunu netleştirmek için veriye Minitab programında Anderson-Darling normallik testi uygulanmıştır ve test grafiği Şekil 4’de verilmiştir. P-değerinin (0,299); 0,05 anlamlılık değerinden yüksek çıkması verinin normal dağılıma uyduğunu göstermektedir.

Veri için uygun bir dağılım belirlendikten sonra, bu dağılımın modellenmesi için parametre değerlerinin belirlenmesi gerekir [13]. Bu veriye

$$f_Q(Q;14.495,18.593) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 18.593}} * \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot 18.593} \{Q - 14.495\}^2\right), \quad (10)$$

$$(-\infty < \mu < \infty, \sigma^2 > 0) \quad (10a)$$

$$f_Q(Q) = 0.092 * \exp\left(-0.026 \{Q - 14.495\}^2\right), \quad (11)$$

$$(-\infty < \mu < \infty, \sigma^2 > 0) \quad (11a)$$

uygun olduğu tahmin edilen normal dağılım modelin parametreleri  $\mu$  ve  $\sigma^2$ , en çok olabilirlik yöntemi ile tahmin edilmiş ve sırasıyla 14,495 ve 18,593 bulunmuştur.

$$\hat{\mu} = 14,495 \text{ kJ/kg klinker} \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = 18,593 \text{ (kJ / kg klin ker)}^2 \quad (7)$$

Bunlar, kaba kestirim değerleri olup, parametre kestirimi aşaması için başlangıç değerleri olarak kullanılırlar. Parametre değerlerinin optimizasyonu için Levenberg – Marquardt optimizasyon yöntemi kullanılabilir [14]. Model için SPSS 17’de Levenberg – Marquardt optimizasyon yöntemi ile elde edilen parametre kestirimleri denklem (8) ve (9) de verilmiştir.

$$\hat{\mu} = 14,1659 \text{ kJ/kg klinker} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = 18,352 \text{ (kJ / kg klin ker)}^2 \quad (7)$$

Modelleme sürecindeki son adım, seçilen modelin onaylanmasıdır. Bu adım uyum iyiliği testlerini içerir.  $\chi^2$  uyum iyiliği testi ile modelin normal dağılım modeline uyumu test edilebilir [3]. Hesaplanan  $\chi^2$  değeri (3,95), %95 güven seviyesinde kritik  $\chi^2$  değerinden (5,99) küçük olduğu için hipotez reddedilemez ve fırın yüzeyinden ısı kaybı için 14,166 ortalama varyansı 18,352 olan normal dağılım uygundur. Dolayısıyla fırın yüzeyinden ısı kaybı modeli denklem (10) ve (11)’de verilmiştir.

### 3.2.4 MR kontrol şeması ile süreç performansı analizi (Process performance analysis with MR control charts)

Kontrol şemaları süreçteki değişkenliğin ortadan kaldırılması amacıyla saptanabilir sebepleri bulmak için kullanılabilen bir süreç izleme tekniğidir. Sürecin dinamik performansını gösterir. Süreçlerin performanslarının izlenmesi ve performansta zaman içerisinde meydana gelebilecek değişimlerin tespiti

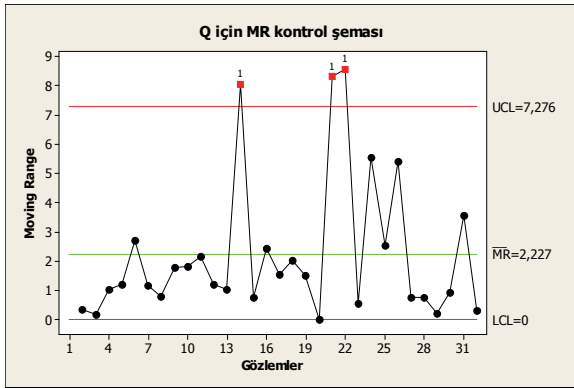
için kullanılırlar. Süreç kontrol altındaysa hemen hemen tüm gözlemler kontrol limitlerinin arasında değer alır.

Bireysel kontrol şemaları için uygulamada Süreç değişkenliğinin kestirimi için iki başarılı gözlemin kayan aralığı yani hareketli değişim aralığı (MR) kullanılır [17]. Hareketli değişim aralığı değerleri denklem (14)'den hesaplanabilir.

$$MR_i = |Q_i - Q_{i-1}| \quad (14)$$

Kontrol limitleri doğal süreç değişkenliğinden elde edilir. Western Electric karar kuralları uyarınca, bir noktanın 3-sigma kontrol limitlerinin dışında olması sistemlerin rastsal olmayan davranışlarının tespiti için yeterlidir.

Özellikle 13. ve 23. gözlemler arasında, yani döner fırının 26 ve 46 metreleri arasında ısı kaybı oldukça yüksektir. Toplam ısı kayıplarının %40'ı bu aralıkta meydana gelmektedir. Bu değerler arasında sürecin kendi değişkenliği dışında 3 kontrol dışı nokta tespit edilmiştir. Burada rastsal olmayan sebeplerin varlığından söz edilebilir. Bu noktada refrakter malzemesi değiştirilerek veya fırının bu bölgesinde yalıtım malzemesinin kalınlığını artırarak bu sebepler ortadan kaldırılır. Böylece sürecin değişkenliği azaltılarak süreç iyileştirmesi sağlanabilir. Döner fırın yüzeyinden toplam ısı kaybı için MR grafiği Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Q için MR kontrol şeması (MR control graph for Q)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüzde artan enerji ihtiyacına karşılık kaynakların sınırlı oluşu, enerjinin verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Özellikle çimento sanayi gibi endüstriyel alanlar, yaptıkları üretimler için büyük miktarlarda enerji tüketmektedir [18]. Dolayısıyla enerjinin kontrollü kullanımı, diğer sanayi dallarına nazaran, bu tür sanayi dallarında daha fazla önem kazanmaktadır. Enerjinin kontrollü kullanımı da, ancak enerjinin sistemde nasıl dağıldığını belirlemekle mümkün olur. Çalışmada, yüzeyden ısı kayıpları; ortalaması 14,166 kJ/kg klinker, standart sapması 4,283 (kJ/kg klinker)<sup>2</sup> olan

normal dağılıma sahip olarak bulunmuştur. Dolayısıyla ısı kayıplarının fırın merkezine doğru daha çok olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca, fırın gövdesindeki ısı kaybindan yararlanmak için gerekli düzeneklerin nereye ve nasıl kurulacağı belirlenebilir. Bu düzenekler için bazı modeller önerilmiştir [5].

Fırın yüzeyinden ısı kayıpları için oluşturulan MR kontrol grafiğinde, döner fırının 26 metre ile 46 metreleri arasında ısı kaybı, üst kontrol limiti 7,276 kJ/kg klinker'in oldukça üzerinde bulunmuştur. Kontrol dışına çıkan 3 nokta bulunması, bu değişkenliğin sebebinin rastsal olmadığını göstermektedir. Fırının bu bölümünde yalıtım malzemesinin türü veya kalınlığı değiştirilmesi yoluyla süreç değişkenliği azaltılmalıdır. Ayrıca MR kontrol grafikleri, fırında duruşlara ve hasara sebep olabilecek sıcak noktaların tespiti (istatistikî olarak kontrol dışı noktalar) ve fırın performansının izlenmesinde kullanılmıştır. Böylece sürecin istatistiksel olarak kontrol altına alınması ve sıcak noktalar tespit edilerek planlı bir bakım imkanı sağlanması hedeflenmektedir.

Çimento imalat sektörü, enerji kullanımını en uygun duruma getirmeye çalışırken, farklı türde zorluklarla karşılaşmaktadır. Bunlardan bazıları: Enerji verimliliğinin kurumsal kültür olarak yer almaması, Sürekli (On-line) görünürlüğün bulunmaması, Üretim ile enerji tüketimi arasında bir denklem kurulamaması, Enerjinin proses değişkeni olarak değerlendirilmemesi, Tesisler arasında performans kıyaslamasının olmamasıdır.

Bu çalışma özellikle tesisler arasında performans kıyaslama yapmada kullanılabilirliği açısından önemlidir. Çalışma çıktıları kurum ile paylaşılmış ve özellikle ileride kurulacak tesislerde fırın içinde refrakterin nasıl kullanılacağına planlaması çalışmaları planlanmıştır. Bununla beraber, Merkez kontrol odasında sadece sıcaklık değişimleri değil, uygun bilgisayar programları ile enerji kayıpları da sürekli izlenmesi çalışmaları başlatılmıştır.

#### 5. SİMGELER (NOMENCLATURE)

*A*: Isı transfer yüzey alanı, [m<sup>2</sup>]

*C*<sup>0</sup>: santigrat derece

*D*: fırın çapı, [m]

*ε*: Neşretme katsayısı

*K*: kelvin

*kJ*: kilojoule

*k*: Havanın ısı iletim katsayısı [W/m<sup>0</sup>C]

*L*: fırın uzunluğu, [m]

*LCL*: Alt kontrol limiti, [kJ/kgklinker]

*μ*: kitle ortalaması

*n*: Örneklem büyüklüğü

*Pr*: Prandtl sayısı

*π*: 3,14

*Re*: Reynold sayısı

$\sigma$ : Stefan-Boltzman sabiti,  $[W/m^2 K^4]$

$\sigma^2$ : kitle varyansı

$T$ : Sıcaklık,  $[K]$

$UCL$ : Üst kontrol limiti,  $[kJ/kg klinker]$

$v$ : rüzgar hızı,  $[m/s]$

$\nu$ : Kinematik vizkozite,  $[m^2/s]$

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Pelletier, L., Winnefeld F. ve Lothenbach, B., "The ternary system Portland cement–calcium sulphoaluminate clinker–anhydrite: Hydration mechanism and mortar properties", **Cement & Concrete Composites**, Vol 32, 497–507, 2010.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. ve Bolio, H., "Sustainable cement production—present and future", **Cement and Concrete Research**, Vol 41, 642–650, 2011.
- Montgomery, D.C. ve Runger C.R., **Applied Statistics and Probability For Engineers**, 4.th, John Wiley and Sons, USA, 2006.
- Sonavane, Y., Specht, E., "Numerical analysis of the heat transfer in the wall of rotary kiln using finite element method ANSYS", **Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries**, CSIRO, Melbourne, Australia, 9-11 December 2009.
- Engin, T., "Çimento Fabrikalarındaki döner fırın sistemlerinin ısı analizi", **1. Makina Mühendisliği Kongresi**, İ.T.Ü Makine Fakültesi, İstanbul, 29-35, 4-6 Haziran 1997.
- Engin, T., Ari, V., "Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems: A case study", **Energy Conversion and Management**, Vol 46, 551–562, 2005.
- Specht, E., Shi, Y.C., Woche, H., Knabbe, J. ve Sprinz, U., "Experimental investigation of solid bed depth at the discharge end of rotary kilns", **Powder Technology**, Vol 197, 17-24, 2010
- Stadler, S.K., Poland, J. ve Gallestey E., "Model predictive control of a rotary cement kiln", **Control Engineering Practice**, Vol 19, 1–9, 2011.
- Caputo, C.A., Pelagagge, M.P. ve Salini P., "Performance modeling of radiant heat recovery exchangers for rotary kilns", **Applied Thermal Engineering**, Vol 31, 2578-2589, 2011.
- Gryna, M.F., Chua, C.R. ve Defeo A.J., **Juran's Quality Planning and Analysis for Enterprise Quality**, 5.ed, McGraw-Hill, USA, 2007.
- Mujumdar, S.K., Ganesh, K.V., Kulkarni, S.B. ve Ranade V.V., "Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler", **Chemical Engineering Science**, Vol 62, 2590 – 2607, 2007.
- Walpole, E.R, Myers, H.R., Myers, L.S. ve Ye, K., **Probability & Statistics for Engineers & Scientists**, 8 ed, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2007.
- Hicks, C.R. **Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler**, Çeviren: Muluk, Z., Toktamış, Ö., Kurt, S. ve Karaağaoğlu, E., Gazi Kitabevi, Ankara, 2009.
- Lüküslü, D., **Modelleme Sürecinde Weibull Dağılımının Kullanılması**, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- Liu, X.Y. ve E. Specht, "Temperature distribution within the moving bed of rotary kilns: Measurement and analysis", **Chemical Engineering and Processing**, Vol 49, 147–150, 2010.
- Holman, J.P., **Heat Transfer**, 10th ed, McGraw Hill Company, NY, 2010.
- Montgomery, C.D., **Statistical Quality Control: A Modern Introduction**, 6Edition, John Wiley & Sons., USA, 2009.
- Madhool, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A., "A critical review on energy use and savings in the cement industries", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol 15, 2042–2060, 2011.