



Orijinal Araştırma / Original Research

## HAMMADDE VE KLİNKER ÖĞÜTÜLEBİLİRLİKLERİNİN ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RAW MATERIAL AND CLINKER GRINDABILITY ON ENERGY CONSUMPTION IN CEMENT PRODUCTION

Abdul Vahap Korkmaz<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Dinar/Afyonkarahisar, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 08 Mayıs / May 2020

**Kabul Tarihi / Accepted** : 01 Temmuz / July 2020

#### Anahtar Sözcükler:

Klinker,  
Çimento,  
Ham Madde,  
Öğütme,  
Enerji.

#### ÖZ

Bu çalışmada kalker, mermer artığı, kil taşı, tras, alçı taşı ve klinker üzerinde Hardgrove ve Bond öğütülebilirlik testleri yürütülmüştür. İki farklı tesise ait klinker örnekleri üzerinde 35 ve 45 dakika öğütme süresi sonunda klinkerlerin incelik değerleri karşılaştırılmıştır. Endüstriyel ölçekte farklı tesislere ait özdeş iki değirmende Cem I 42,5 R ve Cem IV/B 32 R çimentoları öğütülerek 32 µm, 45 µm ve 90 µm elek üstü değerleri karşılaştırılmıştır. Endüstriyel değirmenlerde farklı tip çimento üretimleri için birim enerji tüketimleri hesaplanarak kıyaslanmıştır. Hammaddelerin öğütülebilirlik farkları, çimento üretiminde harcanan enerji miktarları deneysel ve endüstriyel testlerle ortaya konulmuştur. En kolay öğütülen malzemenin kil taşı, en zor ise klinker olduğu görülmüştür. HGI ve Bond testleri sonucunda öğütülmesi kolay malzemeler ile endüstriyel ölçekte çimento üretilmek istenildiğinde, öğütülmesi zor olan klinkere ikame olarak tras, kalker ve mermer artığı kullanılarak üretilen katkı çimentolarının öğütme enerjisi ihtiyaçlarının Cem I Portland çimentosundan daha az olduğu ve daha kolay öğütülebildikleri teyit edilmiştir.

#### ABSTRACT

#### Keywords:

Clinker,  
Cement,  
Raw Material,  
Grinding,  
Energy.

In this study, Hardgrove and Bond grindability tests were carried out on limestone, marble residue, clay stone, trass, gypsum and clinker. Grinding tests were performed on clinker samples belonging to two different facilities, and the fineness values were compared by grinding for 35 and 45 minutes. Cem I 42.5 R and Cem IV/B 32, R cements were ground in two identical mills in different industrial size plants and the fineness values of 32 µm, 45 µm and 90 µm were tested and compared. Unit energy consumption for different types of cement production in industrial mills is calculated and presented in comparison. Differences in the grindability of raw materials and the amount of energy spent in cement production were determined by experimental and industrial tests. The most easily ground material was clay stone, while the most difficult was clinker. As a result of HGI and Bond tests, it was confirmed that when cement is produced on an industrial scale with easy to grind materials, doped cements produced using trass, limestone and marble residues as substitutes for clinker, which is difficult to grind, their grinding energy needs are less than Cem I Portland cement and they can be ground more easily.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: [avkorkmaz@aku.edu.tr](mailto:avkorkmaz@aku.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0001-8691-1937>

## GİRİŞ

Hammaddeler genellikle belli bir elek üstünde % bakiye olarak tarif edilen inceliklere öğütülürler. Bu incelik kimyasal ve fiziksel analizlerle ortaya çıkacak ve üretilecek çimento tipine özgü testlerle ifade edilmektedir. Çimento ürün standartlarının öngördüğü inceliğe bağlı bir yüzey alanına göre öğütülmektedir (Çolak, 2018).

Çimento sektöründe seçilecek değirmen boyutları döner fırının garanti performansının üstünde bir potansiyel üretim miktarını gerçekleştirecek şekilde tayin edilmektedir. Bir çimento değirmeninin üretim kapasitesi, döner fırının kalite standartları dahilinde ürettiği klinkere ilave edilen alçıtaşı ve cüruf veya puzolan gibi diğer katkı maddelerini de hesaba katmak suretiyle saptanmaktadır. Enerji kaynağının maksimum limitleri de değirmen çalışma ve öğütülebilirlik süresini etkileyeceğinden göz ardı edilmemelidir. Kısaca öğütülecek olan hammaddenin özellikleri ve tipi değirmen sistemi seçimini etkileyen en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır (Hoşten ve Fidan, 2012).

Geçmişten günümüze öğütme teknolojisinde performans artırma çalışmaları öğütme elemanlarının yani bilyaların optimizasyonu üzerinden yürütülmüştür (Benzer, 2005). Bilyaların optimizasyonu için simülasyon ve model geliştirme metotları gerek endüstride gerekse literatür çalışmalarında en çok tercih edilen ve kabul gören yöntemler arasında olmuştur. Fakat hammaddelerin öğütmeye olan etkileri öğütücü elemanların optimizasyon çalışmaları kadar yeterince araştırmaya konu olmamıştır. Öğütme elemanları (bilyalar) kadar öğütülecek hammaddelerin özelliklerinin de öğütme işlemleri ve öğütme verimi için son derece önemli olduğu aşikardır (Venkatanarayanan ve Rangaraju, 2015).

Her hammaddenin mineralojik yapısı, kimyasal ve fiziksel özellikleri ayrı ayrı ve kendine özgü olup, hepsi birbirinden farklı kırılma ve öğütme davranışları göstermektedir. Bu nedenle bir çok endüstriyel tesis farklı ürünler üretmek için aynı minerali fakat farklı jeolojik yapı, mineralojik yapı ve farklı kimyasal içeriklere sahip hammaddeleri kullanmaktadırlar (Smith, 2013). Kaldı ki bir tesise ait kalker ocağının ya da kil ocağının farklı basamaklarında dahi kimyasal ve jeolojik

yapı değişmektedir. Bu nedenle de her mineralin bulunduğu yerde oluşum şekline ve geçirdiği metamorfizma ya da alterasyon neticesinde öğütülebilirlikleri de değişmektedir. Dolayısıyla bir üretim prosesine başlamadan önce o proses için karar verilmiş hammaddeler çok iyi tanımlanmalı ve analiz edilmelidir. Tüm üretim prosesleri sahip olduğu hammaddelere göre tasarlanmaktadır (Speight, 2012).

Klinker de yine bir çimento üretim sonucu üretilen bir üründür. Bazı fabrikalar klinker üretmek için kalker, bazıları mermer atığı, bazı fabrikalar ise marn hatta düşük silisli marn ve yüksek silisli marn olmak üzere bir çok farklı hammadde kullanmaktadırlar (Alp vd., 2009). Bir çok fabrika silis ihtiyacını kil mineralleri vasıtasıyla karşılamaktadır. Bazı fabrikalar kil taşı, bazı fabrikalar ise şist ya da silis kumu ve buna benzer bir çok tesis değişik kil türevli kayaçlar kullanabilmektedir. Bu hammaddelerin değişken özellikleri sonucu öğütülebilirlikleri de farklı olmakta, kolay öğütülebilen kayaçlar enerjiyi düşürürken zor öğütülenler ise enerji maliyetlerini arttırmaktadır (Gouda, 1979). Silikat modülü yüksek bir farin ya da klinkerin öğütülmesi silikat modülü düşük kayaçlara göre daha zor olmaktadır. Bu da doğrudan çimento üretim maliyetlerini etkilemektedir. Çimento endüstrisi, dünya enerjisinin yaklaşık % 3,5'ini kullanan en büyük endüstrilerden biridir. Çimento endüstrilerinde, üretim prosesinde kullanılan elektrik enerjisinin % 40'ı öğütmede harcanmaktadır (Deniz vd., 2001).

Başta çimento üretim prosesleri olmak üzere yapılan optimizasyon çalışmaları değişken sayısının artması nedeniyle çok zaman almakta ve her fabrika için değişen proses şartlarına uyum sağlamamaktadır. Her fabrikanın kendine özgü hammaddeleri de göz önüne alınarak optimizasyon ve modelleme çalışmaları bu şekilde yeniden her üretim prosesini için ayrı ayrı yapılmalıdır. Bu da işveren için pahalı ve zahmetli bir yöntem olmaktadır. Kısaca her hammaddenin özellikle klinker ve çimento gibi spesifik ürünlerin fabrikadan fabrikaya değişmesi nedeniyle bir tesis için optimizasyon ve modelleme çalışmaları diğer bir tesisin prosesine uymamaktadır (Koçkar ve Akgün, 2003; Akgün vd., 2014; Zou vd., 2019; Moussaie vd., 2019)

Bu çalışmada, çimento sektöründe kullanılan gerek kalker, kil gibi ana hammaddelerin gerekse

tras, alçıtaşı gibi yardımcı hammaddelerin Hardgrove ve Bond testleri ile iş indeksleri hesaplanmıştır. Bunlara ilave olarak bir çok çimento endüstrisinde yeni yeni değerlendirilmeye alınmış mermer atıklarının (traverten dahil) ve farklı tesislere ait iki klinker örneğinin de Hardgrove ve Bond iş indeksleri hesaplanmıştır. Daha sonra tüm ana hammaddeler ve yardımcı hammaddelerler kullanılarak endüstriyel çapta öğütülen hammadde karışımlarından Portland ve katkı çimento örneklerinin 35, 45 ve 90 µm incelikte öğütülebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Yine farklı iki tesise ait klinker örnekleri 35 ve 45 dakika süresince öğütülerek 90 µm boyutlarında elek analiz testleri yapılmıştır.

## 1. MALZEME VE METOT

Deneysel çalışmalarda, entegre çimento fabrikası ana ve yardımcı hammaddeleri kullanılmıştır. Söz konusu fabrikada Portland çimentosu üretilmekte ve bu çimentonun üretiminde kalker, mermer atıkları, kil taşı, tras ve alçı taşı kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında hammaddeler çeneli kırıcılarda kırılıp hazırlandıktan sonra farklı sürelerde 330x330 mm hacimli laboratuvar tipi bilyalı değirmende öğütülmüş ve öğütülebilirlikleri incelenmiştir. Ayrıca, Hardgrove ve Bond öğütülebilirlik deneyleri yapılmış ve bu testlerden yola çıkılarak iş indeksi değerleri hesaplanmıştır (Bond, 1961; Hardgrove, 1932).

Bond Eşitliği;

$$W=W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

Wi: Değirmenin çektiği enerji (kWs/t)

P: Kırılmış malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (µm).

F: Kırılacak malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (µm).

W: Bond iş indeksi (kWs/t) Kapalı devre öğütme

Ayrıca farklı iki tesiste üretilen klinker örnekleri 35 dakika ve 45 dakika süresince laboratuvar tipi bilyalı değirmende öğütülerek klinker incelikleri (+90 µm elek üstü) karşılaştırılmıştır.

Yine farklı iki tesise ait endüstriyel boyutta üretilen Cem I 42,5 R ve Cem IV 32,5 R çimento örneklerinden gün bazlı olarak saatlik numuneler alınarak 32,45,90 µm mluk elek analizi değerleri hesap edilerek çimento tiplerine göre incelik değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışma için çimento hammaddeleri olarak kullanılan kalker, kil, tras, alçıtaşı, demir cevheri ve traverten atıkları ve kil kaynaklı kayaçlardan alınan örneklerle XRF metodu kullanılarak kimyasal analizleri tespit edilmiştir. Rutubet ve kızdırma kaybı tayinleri yapılmıştır.

Hammadde ocak kademelerindeki kalite değişimlerini göstermek amaçlı yapılan kalker ve kil hammaddelerinin, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin ve klinkerlerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3 'te verilmiştir. Ayrıca alçıtaşı ile yapılan kimyasal analiz sonucunda alçı taşının %88,44'ü dihidrat alçıdan (2 molekül sulu alçı), %3,07'si anhidrit alçıdan oluşmaktadır. Anhidrit alçı, susuz kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>) anlamına gelmektedir. Hidrat terimi kristal yapısında su olan bileşikler için kullanılır.

Şekil 1'de gösterilen çimento hammaddeleri, öncelikli olarak havada kurutulmuştur. Genellikle çimento fabrikalarında bu hammaddeler termal kurutmaya maruz bırakılmadan havada kurularak tesise beslenmektedir. Dolayısıyla hammaddelerin içerisinde az da olsa bünye nemi bulunmaktadır. Yapılan ön çalışmalarda havada kuru kalkerde %0,5, mermer atığında %0,8, kil taşında %4, trasta %1,5 ve alçı taşında ise %2,5 nem tespit edilmiştir. Hammaddeler öğütme deneylerinden önce sırasıyla çeneli ve merdaneli kırıcılardan geçirilerek tamamı 8 mm'nin altına indirilmiştir. Daha sonra 1 mm'lik elekten elenmiş, elek altı ayrılarak elek üstü ile öğütme deneyleri yapılmıştır. 1 mm'nin altındaki malzemenin değirmene beslenmemesinin nedeni, değirmene her defasında homojen beslemenin yapılmak istenmesidir. Bu yüzden, değirmene beslenen tane boyutu daha dar bir fraksiyon olan -8+1 mm aralığındaki (d<sub>80</sub>~6mm) çimento hammaddeleridir. Boyutu -8+1 mm olan çimento hammaddeleri, laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen (Şekil 2) ile 4, 8, 12, 15 ve 30 dakika öğütme sürelerine tabi tutulmuş ve ardından kuru elek analizi yapılarak elek altı eğrileri çizilmiştir. Çimento hammaddelerinin öğütülmesindeki amaç,

çimento üretimi için gerekli olan tane boyutunun (en az %80'inin 75 µm'un altında olması istenir) elde edilmesidir.



Şekil 1. Çimento hammadde örnekleri



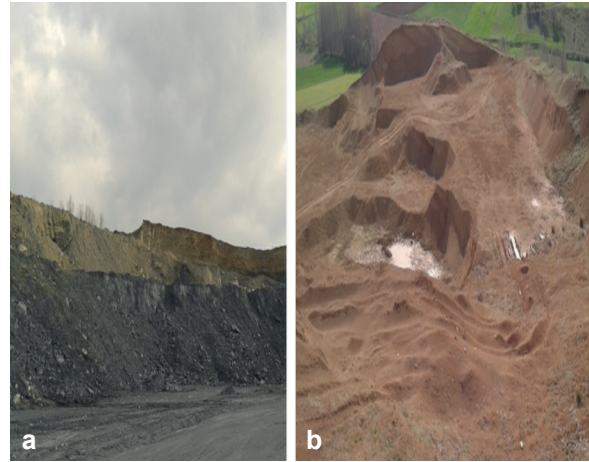
Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen

## 2. BULGULAR

### 2.1. Çimento Hammaddelerinin Kimyasal Analizleri

Çimento hammaddelerinin kimyasal özellikleri, genellikle ocağın jeolojik özellik ve mineralojik farklılıklarından dolayı hammaddelerin kimyasal analizleri de farklılık göstermektedir. Ocaktan çıkarıldıklarında doğal halleriyle işlenen temel hammaddeler, kimyasal kaliteleri açısından

birtakım değişiklikler göstermekte olup, çimento üretiminde de öğütme ya da pişirme proseslerinin kontrolü için tesislerin bu yönde gelişmesi sağlanmalıdır. Ocak kademelerinde farklı kalitede farklı özelliklere sahip stabil kalitedeki malzeme her kademede bulunmayabilir. Gerek yüksek silisli malzemeyi gerekse düşük silisli malzemeyi değirmene doğrudan beslemek zorunda kalınabilir (Şekil 3). Bu ise değirmenin stabil bir şekilde çalışmasını engeller ve enerji maliyetlerini arttıran bir husus olarak karşımıza çıkar. Bunu önlemek için bazı fabrikalar doğrudan besleme yerine ön homojenizasyon sistemleri kurmaktadır. Fakat her zaman minerallerin homojenizasyon işlemleri istenildiği şekilde gerçekleşmemektedir. Bunun için ocak işletme yöntemleri, gözle yapılan muayene, tecrübeye dayanan bilgiler, karot örneklerinin analizi önem taşımaktadır. Ayrıca analiz sonuçlarının çok iyi okunarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 3. Çimento fabrikalarına ait farklı kimyasal yapı ve özelliklere sahip kil ocakları; a) SiO<sub>2</sub> içeriği %50-55 arasında değişen yüksek alüminaya sahip kil ocağı b) %65 ve üzeri silis içeren ve çözünmez kalıntısının yüksek olması nedeniyle çimento fabrikası tarafından belli bir süre kullanıldıktan sonra kalitenin değişmesi nedeniyle terk edilmiş kil ocağı

Çimento fabrikası kalker ocağına ait farklı kademelerden alınan kalker örneklerine ait analiz sonuçları Çizelge 1'de ve kil örneklerine ait analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan hammadde örneklerinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.



Çizelge 1. Kalker hammaddesinin kimyasal analiz sonucu (K: Kademe)

İçerik	K1, %	K2, %	K3, %	K4, %
SiO <sub>2</sub>	6,4	23,6	0,51	1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	5,96	0,19	0,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	2,77	0,22	0,24
CaO	50,34	36,3	54,8	53,1
MgO	0,53	0,99	0,47	1,03
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,03	0,02	0,02
K <sub>2</sub> O	0,36	1,02	0,08	0,1
SO <sub>3</sub>	0,04	0,07	0,07	0,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,26	0,02	0,08
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,31	0,04	0,04
MnO	0	0,02	0	0
Kızdırma Kaybı	38,86	28,4	43,3	42,9
Toplam	99,35	99,6	99,7	99,7
Rutubet	1,8	2,2	2,3	2,7

Çizelge 2. Kil hammaddesinin kimyasal analiz sonucu (K: Kademe)

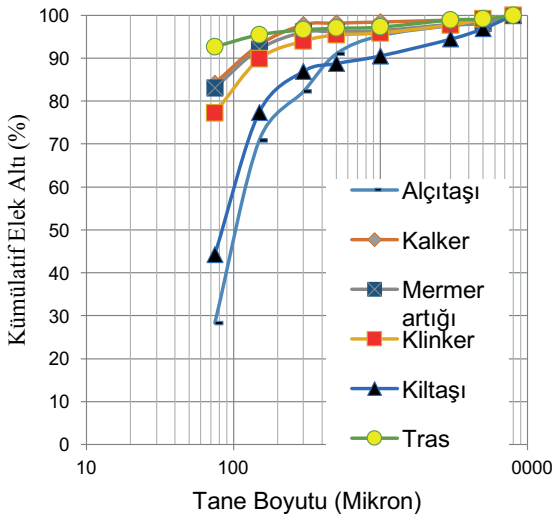
İçerik	K1, %	K2, %	K3, %	K4, %
SiO <sub>2</sub>	56,37	66,10	53,19	73,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,96	9,40	14,94	10,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,92	4,73	7,76	5,25
CaO	13,54	5,52	6,25	1,93
MgO	1,39	1,62	2,65	1,71
Na <sub>2</sub> O	0,42	0,41	0,55	0,46
K <sub>2</sub> O	0,91	1,04	1,8	1,13
SO <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,04	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,23	0,22	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,48	0,57	1,07	0,6
MnO	0,03	0,02	0,07	0,03
Kızdırma Kaybı	14,48	10,02	11,1	4,8
Toplam	99,73	99,69	99,64	99,68
Rutubet	9,1	5,52	8,6	8,1

Çizelge 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento hammaddelerinin kimyasal analiz sonuçları

İçerik	Kalker %	Mermer Atığı %	Tras %	Kil taşı %	Klinker 1 %	Klinker2 %
SiO <sub>2</sub>	0,77	9,31	65,89	58,89	20,94	21,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,86	1,98	10,99	16,07	5,37	5,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,73	0,38	5,54	5,1	3,68	3,65
CaO	54,32	48,59	4,11	5,73	66,45	65,73
MgO	0,2	0,34	0,59	1,84	1,10	1,21
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,20	0,17	0,32	0,33
K <sub>2</sub> O	0,03	0,01	1,42	2,23	0,67	0,70
SO <sub>3</sub>	0,21	0,12	2,28	1,84	0,71	0,66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,01	0	1,86	0,00	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,01	0	0	0,00	0,00
MnO	0,01	0,01	0	0	0,01	0,00
Kızdırma Kaybı	42,75	39,13	8,21	5,73	0,28	0,28
Toplam	99,93	99,91	99,23	99,46	99,52	99,44
Rutubet	0,8	0,5	0,5	4	0,1	0,1

## 2.2. Öğütme Deneyleri ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çimento hammaddelerinin  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'dan daha ince boyutta olması istenir.  $D_{80}$  boyutu 75  $\mu$ m ve altında olan bir ürün elde edebilmek için çimento hammaddelerinden kalker, mermer artığı, klinker, alçıtaşı, tras ve kil taşının laboratuvar tipi bilyalı değirmende ayrı ayrı 4, 8, 12, 15 ve 30 dakika süresince öğütülmüşlerdir. Öğütme işlemi sonucunda tras 8 dakika sonunda  $d_{80}$  boyutu 75  $\mu$ m'ye ulaşırken, kalker, mermer artığı ve klinker ancak 30 dakika sonunda  $d_{80}$  boyutu 75  $\mu$ m'un altına inebilmiştir. Fakat 30 dakika sonunda kil taşı ve alçıtaşının  $d_{80}$  tane boyutu 75  $\mu$ m'a ulaşamamıştır. Çimento hammaddelerinin öğütülmesi sonucu 30 dakika sonunda elde edilen ürünlerin kümülatif elek altı eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 30 dakika öğütme sonunda ürünlerin elek altı eğrileri

Literatürde 75  $\mu$ m'den daha iri tanelerin hidratasyona katılmadığı belirtilmektedir (Powers, 1939). Bu nedenle dar tane boyu örnekleri 75  $\mu$ m altındaki fraksiyonlardan oluşturulmuştur.

Kil taşının  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'den daha ince boyutta olması istenir. Ancak kil taşı ile 30 dakika sonunda 75  $\mu$ m tane boyutuna inilememiştir. Bunun nedeninin, havada kurutulmuş olan kil taşının içeriğinde bünye neminin bulunması ve bu nemin eleme işleminde topak oluşturarak öğütmede zorluk yaratmasıdır.

Yine alçı taşının  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'dan daha ince boyutta olması istenir. Ancak alçı taşı ile 30 dakika sonunda 75  $\mu$ m tane boyutuna inilememiştir. Bunun nedeninin, havada kurutulmuş olan alçı taşının içeriğinde bünye neminin bulunması ve bu nemin eleme işleminde topak oluşturarak öğütmede güçlük yaratmasıdır.

Tras hammaddesinin  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'dan daha ince boyuta öğütülebilmesi için gerekli olan öğütme süresi sadece 8 dakikadır. Tras hammaddesi, çimento eldesi için öğütme süresi bakımından kalker ve kil taşına göre 3,5 kat daha hızlı ufalanmaktadır. Bu sonuçlar bakımdan, tras hammaddesinin HGI değerinin büyük, iş indeksi değerinin küçük olması beklenmektedir.

## 2.3. Hardgrove Öğütülebilirlik Test Sonuçlarının Bond İş İndeksine Çevrimi

Hardgrove öğütülebilirlik testi kömürün öğütülebilirliğinin saptanması için kullanılmaktadır. (Eşitlik 2).

$$HGI=13.6+6.93 \times M \quad (2)$$

Bulunan HGI değerine göre aşağıdaki yorumlar yapılabilmektedir:

HGI>70 ise malzeme kolay öğütülebilir,

HGI=50-70 ise orta derecede öğütülebilirliğe sahip bir malzemedir,

HGI=30-50 ise zor öğütülebilir bir malzemedir.

Portland çimentosu hammaddelerine uygulanan orijinal Hardgrove testi sonucunda Çizelge 4'teki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, HGI değerleri Bond'un 1954 yılında önerdiği bir eşitlikle İş indeksi ( $W_i$ ) değerlerine dönüştürülmüştür. HGI değerinin iş indeksine dönüşüm formülü aşağıda verilmiştir (Bond, 1954).

$$W_i = \frac{88}{HGI^{0.5}} \quad (3)$$

Çizelge 4. Çimento hammaddelerinin HGI ve  $W_i$  değerleri sonuçları

Hammadde	HGI	$W_i$ (kws/t)
Kalker	86,37	9,47
Klinker	41,32	13,71
Alçıtaşı	94,68	9,04
Kil taşı	127,95	7,78
Tras	89,83	9,27
Mermer atığı	91,91	9,19

Yukarıdaki HGI sonuçlarına göre çimento hammaddelerinden klinker dışında kalan çimento hammaddelerinin HGI değeri 70'in üzerinde çıkmıştır. Buna göre bu hammaddeler kolay öğütülebilen hammaddelerdir. Diğer taraftan, iş indeksleri Çizelge 5'e göre değerlendirilecek olursa; hammaddelerden mermer atığı ve trasın kolay öğütülebildiği, diğer hammaddelerin ise kolay olmakla birlikte kısmen orta öğütmeye daha yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. İş indeksi değerine göre öğütülebilirlik sonuçları (Bond, 1954)

İş İndeksi ( $W_i$ )	6-9	10-14	15-20	>20
Öğütülebilirlik	Kolay	Orta	Zor	Çok Zor

Hesaplanan iş indeksi değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması durumunda, elde edilen sonuçların literatür verileri ile uyumluluk içerisinde olduğu görülmektedir. Örneğin; Nitta vd. (2002) yapmış olduğu bir çalışmada, 22 farklı kireç taşı numunesinin Bond iş indeksi değerini belirlemiş ve iş indeksi değerlerinin 7,75 ile 18,18 kWs/t arasında değiştiğini belirtmiştir. Yıldız (2014) ise, kitabında vermiş olduğu çizelgede, iş indeksi değerlerini kireç taşı için 10,18 kWs/t, kil için 7,10 kWs/t, çimento hammaddesi için 10,57 kWs/t, çimento klinkeri için 13,49 kWs/t olarak belirtmiştir. Hoşten ve Avşar (1997) Set Ankara Çimento fabrikasının

stok sahasından aldıkları kalker ve tras için iş indeksi değerlerini sırasıyla 12,28 ve 10,92 kWs/t olarak bulmuşlardır. Sonuç olarak; kalker, klinker ve tras hammaddeleri için bu çalışmada hesaplanan iş indeksi değerleri literatür verileri ile yaklaşık olarak benzer sonuçlar vermiştir. Hoşten ve Avşar'ın (1998) yapmış olduğu çalışmada klinker ve trasın Bond iş indeksi ve Hardgrove ve hacimsel Hardgrove deneyi sonuçlarını karşılaştırılmış, iş indekslerinin hesaplanmasıyla hacimsel Hardgrove deneyi sonuçlarının, Bond deneyi sonuçlarına standart Hardgrove deneyi sonuçlarından daha yakın olduğu görülmüş ve bu yöntemin hızlı yöntem olarak kullanılabilirliğinin daha doğru olacağı kanısına varılmıştır. Fakat hacimsel Hardgrove deneyi ile bulunan klinkerin iş indeksi, Bond iş indeksine oranla oldukça yüksek bulunmuştur. Bu durum, Hardgrove ve Bond yöntemlerinin öğütme mekanizmalarının tamamen farklı olmasına bağlı olarak malzemelerin öğütmeye karşı değişik dirençler göstermesi nedenine bağlanmıştır. Ayrıca karışımlar için yapılan Hardgrove öğütülebilirlik deneyleri sonucunda elde edilen ürünlerin tras miktarları orijinal malzemeye oranla oldukça fazla bulunmuştur. Bu sonuç Hardgrove yöntemlerinin karışımlar için çok da güvenilir olmadığını göstermektedir. Bu nedenle klinker ve tras karışımları için hacimsel Hardgrove yöntemi standart yöntemle göre daha güvenilir görünmesine rağmen hassasiyet gerektiren durumlarda Bond yönteminin kullanılması en uygunu olacaktır (Hoşten ve Avşar, 1998).

Literatürde Bond test yöntemi Hardgrove test yöntemine göre daha güvenilir kabul edildiği için çimento hammaddelerinin Bond deneyi sonucunda hesaplanan iş indeksleri Çizelge 6'da verilmiştir. Literatürde klinker, kalker, kil ve alçı taşı ile çalışılmış birçok Bond test çalışması ve hesaplanan iş indeksini bulmak mümkündür. Yapılan bu çalışmalara ilave olarak farklı iki tesise ait klinker ve yine literatürde rastlanmaması sonucu kil taşı ve mermer atıkları için de değişik zamanlarda Bond testleri yapılmış ve iş indeksleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda mermer atığı; 11,18 kWs/t, kil taşı (şist) 10,60 kWs/t, birinci çimento üretim tesisine ait klinker 13,65 kWs/t ve ikinci tesise ait klinker ise 14,64 kWs/t olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 6. Klinker ve katkı malzemelerinin bulunan iş indeksleri (Karakaş, 2006)

İçerik	Beslenen $d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	Ürün $d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	Öğünebilme değeri (Gbp)	İş indeksi (kWs/t)
Kalker	2546	94	1,272	13,85
Klinker	2308	112	1,463	13,96
Tras	1909	108	1,737	12,19
Alçı taşı	2308	102	1,618	12,11
Karışım	2000	109	1,519	13,59

Tüm değerlendirmeler ışığında çimento ham maddeleri ile yapılan Bond iş indeksi sonuçları karşılaştırıldığında (Çizelge 6) öğütülebilirlik kolaydan zora doğru sıralanacak olursa;

kil taşı < alçı taşı < tras < kalker < klinker

şeklinde olduğu görülmektedir. Yine kalkere alternatif olarak kullanılan mermer atıkları için hesaplanan iş indeksinin kalkerin iş indeksinden küçük olduğu görülmektedir. Burada kil taşının en düşük iş indeksine sahip olmasında en büyük rolün silis içeriğinin düşük olması (%50-60) ve mermer atığının iş indeksinin kalkerin iş indeksinden daha düşük olmasının nedeni ise mermer atıkları ile beraber stokta traverten atıklarının da karışım halinde bulunması ve traverten atıklarının porozitesinin yüksek olması yani boşluklu yapılaraya sahip olması ve altere özellikler içerdiğinden sertliğinin az da olsa azaldığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Karakaş (2006) Bond iş indekslerinden yola çıkarak katkı çimento karışımlarını

(kalker+tras+cüruf+alçı taşı) temel olarak yaptığı öğütülebilirlik karşılaştırmalarında klinker ve katkı maddelerinin ayrı ayrı ve beraber öğütülmeleri durumunda birlikte öğütmenin (13,59 kWs/t), ayrı ayrı öğütmeye (14,90 kWs/t) göre daha fazla enerji ihtiyacı gerektirdiğini görmüştür. Birlikte öğütmede klinker yerine puzolanik malzeme kullanılması öğütmeyi kolaylaştırmakta ve iş indeksini düşürmektedir. Puzolanik malzeme katılarak Cem IV 32,5 R çimento üretiminde %55'e kadar tras ilave edilebilmektedir (TS EN 197-1, 2012). Katkı oranı arttıkça öğütme kolaylaşmakta ve öğütme enerjisi de düşmektedir. Burada yine en önemli faktörlerden biri trasın porozitesinin yüksek, gevrek ve kırılğan bir yapıya sahip olması ve bu sayede kolay öğütülmesidir. Ayrıca öğütülebilirliğinin Bond iş indekslerinden de görüldüğü gibi klinkerinde daha düşük olması ile açıklanabilmektedir. Kaldı ki yapılan endüstriyel çalışmaların sonuçları da bunu desteklemektedir.

Hoşten ve Avşar (1997), trasın iş indeksini 11,65 kWs/t ve klinkerin iş indeksi 13,90 kWs/t olarak bulmuştur. Bond iş indeksleri, trasın klinkere oranla daha kolay öğünür bir malzeme olduğunu, buna ek olarak klinker ve trasın belirli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanan malzemelerin, bu iki çimento hammaddesine göre daha zor öğündüğünü göstermiştir.

Endüstriyel çalışmalar doğrultusunda iki farklı çimento üretim tesisine ait iki farklı hammadde kompozisyonları oluşturulmuş (Çizelge 7) ve hammadde kompozisyonu aynı tip ve aynı kapasiteye ve üreticiye ait farklı iki dikey değirmende öğütülmüştür. Endüstriyel değirmende bir ay süresince her saat 90  $\mu\text{m}$  incelik testleri yapılarak aylık sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 7. Hammadde kompozisyonları

İçerik	Kalker %	Mermer Atığı %	Kil taşı %	Demir cevheri %	Boksit %
Ham Karışım-A	78,70	0	19,30	2	0
Ham Karışım-B	40	32	25	2	1



Çizelge 8. Hammadde karışım kompozisyonları ve klinkerlerin incelik tablosu (90 µm üzeri bakiye %'si).

HAM KARIŞIM-A	HAM KARIŞIM-B	KLİNKER-A	KLİNKER-B	KLİNKER-A	KLİNKER-B
90 µm %	90 µm %	90µm, 35 dakika %	90µm, 35 dakika %	90µm, 45 dakika %	90µm, 45 dakika %
16,7	13,5	3,2	2,5	1,7	1,3
16,4	13,4	2,6	1,9	1,8	1,1
11,1	13,4	2,8	2,6	3,0	1,1
17,4	14	2,4	2,2	2,1	1,2
17,3	13	2,2	2,4	2,2	1,2
17,4	12,6	3,3	2,8	2,2	1,5
17,4	11,9	3,8	2,8	1,5	1,1
16,3	12,9	1,9	2,0	3,5	1,3
17,2	12,7	2,2	2,1	2,8	1,5
16,8	12,4	2,4	2,4	2,5	1,1
17,5	12,2	3,0	2,6	1,9	1,4
17,4	12,1	2,8	2,3	1,8	1,8
16,5	12,0	2,6	3,0	1,7	1,2
15	12,5	2,8	2,8	2,0	2,8
15,7	12,2	3,0	2,8	1,3	1,1
15,9	11,5	3,2	2,2	1,8	1,3
15	11,8	3,5	3,0	2,1	1,6
15,9	11,8	2,6	2,4	1,8	1,0
15,9	12,1	2,8	1,8	1,9	1,3
16	12,1	2,6	2,5	1,6	1,6
16,6	12,9	2,6	2,3	1,8	1,6
16,9	13,6	2,8	2,4	1,6	3,1
17,1	12,9	2,2	2,5	1,5	1,6
17,3	13,4	2,6	2,4	1,6	2,7
17	13,4	3	2,8	1,6	1,5
17,2	13,2	2,2	2,5	1,8	1,8
17,5	13,2	2,2	2,2	2,2	1,4
17,5	12,3	2,6	2,5	2,1	1,6
17,9	11,7	3,0	2,8	1,7	1,3
17,0	12,3	3,1	2,9	1,3	1,8

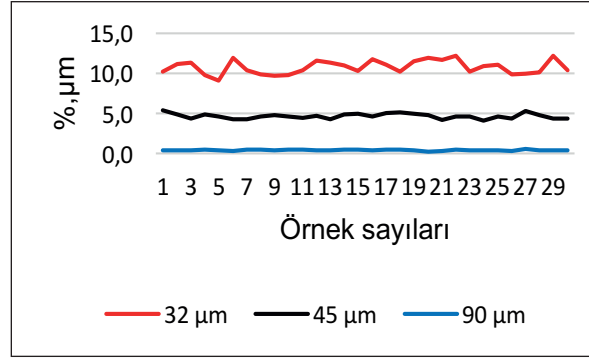
Çizelge 8'e göre ham karışım-A ham karışım B'den daha yüksek inceliğe sahiptir. Besleme miktarları

ve kapasiteleri aynı olmasına karşın aradaki incelik farkının kullanılan hammaddelerin kimyasal özellikleri, sertlik ve mineralojisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Farklı iki tesiste üretilmiş klinkerlerle 300 mmx300mm hacimli laboratuvar tipi bilyalı değirmende sırasıyla 35 ve 45 dakika sürelerde öğütme testi yapılmış ve 90 µm incelikte % elek üstü bakiyeleri incelenmiştir. İlk 35 dakika öğütme süresi boyunca A klinkeri B klinkerine göre elek üstü bakiyesi daha yüksektir. Fakat 45 dakika öğütme süresince aradaki fark daha da azalmaya başlamış fakat yine A klinkerinin elek üstü bakiyesi B klinkerinden fazla olmuştur. Klinkerlerin mineralojik yapıları öğütmeyi ciddi derecede etkilemektedir. Öğütme süresi arttıkça klinkerin inceliği artmakta fakat öğütme süresinin artması ile birlikte istenilen incelik hedefine ulaşırlırken diğer taraftan öğütme için gerekli enerji miktarı da artmaktadır. Burada asıl olan öğütmeye konu olan malzemeyi iyi tanımaktır. Klinkerin mineralojisi incelendiğinde sahip olduğu alit, belit miktarları dikkatlice incelenmelidir. Çünkü bilinmektedir ki alit miktarı artması öğütmeyi kolaylaştırmakta ve belit miktarının artması ise öğütmeyi zorlaştırmaktadır (Korkmaz, 2010). Yine klinker bünyesinde var olan serbest kireç miktarının artması öğütmeyi kolaylaştırmakta fakat çimento dayanımlarını düşürdüğünden dolayı klinker bünyesinde istenmediği için belli standartlar dahilinde kısıtlanmaktadır.

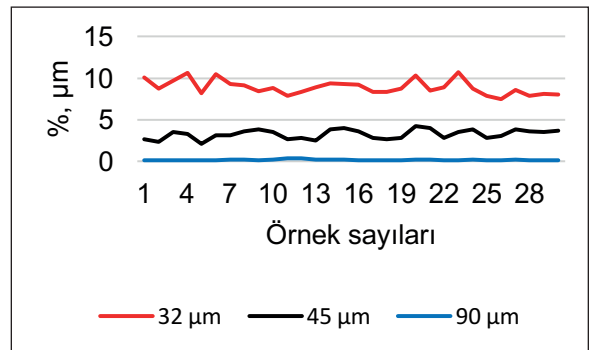
Endüstriyel çalışmalar doğrultusunda farklı iki tesiste fakat özdeş iki değirmene ait Cem I 42,5R ve Cem IV 32,5 R çimento üretimi esnasında gün içerisinde belirli saatlerde incelik testleri için örnekler alınarak günlük ortalama bulunmuş ve bir ay süresince 32,45 ve 90 µm incelik değerleri test edilmiştir.

Şekil 5'te Cem I 42,5 R-A üretiminde birinci gün 32 µm elek üstü bakiyesi 10 µm incelikte başlamış, 10-12 µm arasında seyretmiştir. 45 µm inceliğe yükseldiğinde 4-6 µm aralığında ve özellikle 90 µm'da inceliğin düşmesi ile birlikte sabit bir seyir izlemiştir.



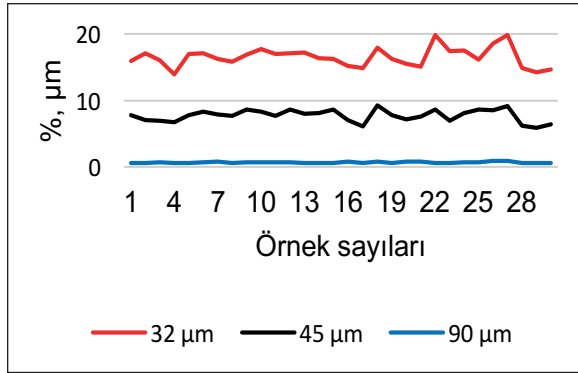
Şekil 5. Cem I 42,5 R-A incelik eğrisi

Şekil 6'da Cem I 42,5 R-B çimentosu 10 µm incelikte başlayıp 8 µm ve daha sonra 12 µm ve tekrar 8 µm incelikte son bulmuştur. 45 µm incelikte daha stabil bir seyir izlemiştir ve 2 µm inceliğe kadar düşmüştür. Burada B değirmeninin A değirmenine göre daha fazla enerji tüketeceğini söyleyebiliriz. Çünkü daha ince çimento üretmek için değirmene ya daha az malzeme besleme gerekmekte bu da düşük besleme şarjı ile daha fazla enerji tüketeceği anlamına gelmektedir. Burada önemli olan diğer bir parametre klinkerin mineralojik özellikleri, kalitesi stabil olduğunda ya da değirmen içerisine kolay öğütebilir bir klinker girmesinde ve stabil proses şartlarının da da benzer durum görülecektir.



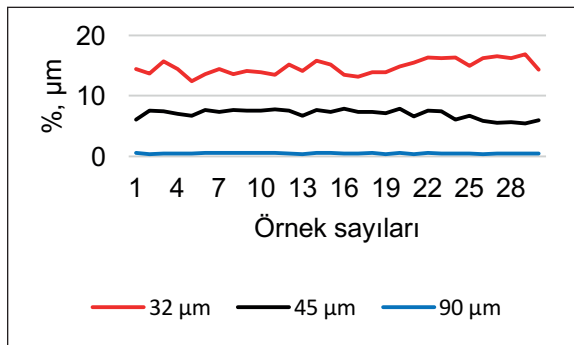
Şekil 6. Cem I 42,5 R-B incelik eğrisi

Şekil 7'de Cem IV 32,5 R çimentosu 32 µm elek üstü değeri 16 µm ile 20 µm arasında değişmektedir. 45 µm elek üstü değeri ise 5 µm ile 10 µm arasında değişmektedir. 90 µm incelik 1 µm'un altında stabil bir şekilde seyretmiştir.



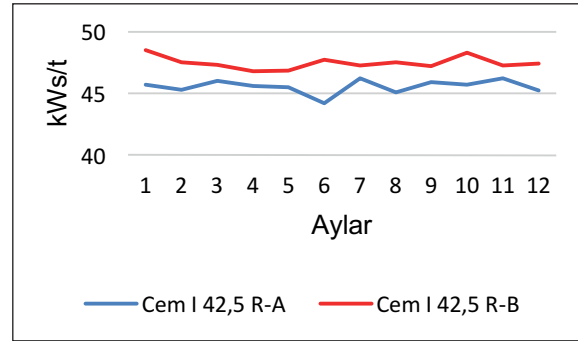
Şekil 7. Cem IV/B 32,5 R-A incelik eğrisi

Şekil 8'de Cem IV 32,5 R-B çimentosu yaklaşık 17  $\mu\text{m}$  ile başlayıp 18  $\mu\text{m}$  üzerine çıkmıştır. Yer yer 16  $\mu\text{m}$  ile 14  $\mu\text{m}$  arasında değişken şekilde ilerlemiştir. 45  $\mu\text{m}$  elek bakiyesi 6  $\mu\text{m}$  ile 8  $\mu\text{m}$  arasında daha stabil bir şekilde ilerlemiştir. Yine elek açıklığının artması ile birlikte 90  $\mu\text{m}$  elek üstü bakiyesi daha stabil kalmıştır.



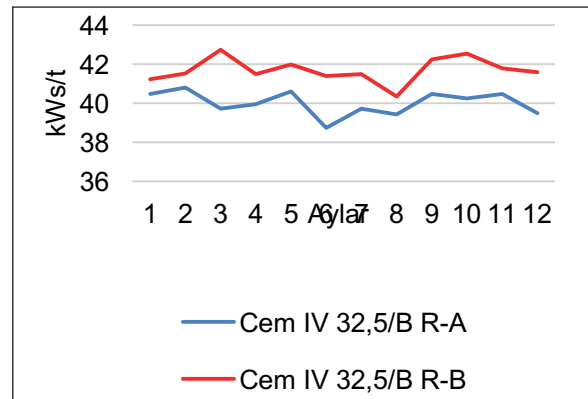
Şekil 8. Cem IV 32,5/B R-B incelik eğrisi

Her iki katkı çimento örneği de incelendiğinde Cem IV 32,5/B R-A katkı çimento örneğinin daha ince öğütüldüğü görülmektedir. Her iki katkı çimento örneği (Cem IV 32,5/B R-A) Cem I 42,5 R, A-B çimento örnekleri ile karşılaştırıldığında incelik değerlerinin katkı çimentolarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da Cem IV 32,5 R katkı çimentoların öğütülmesi için gerekli enerji maliyetinin daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Endüstriyel bilyalı değirmenlerden özdeş her iki değirmen karşılaştırılması yapıldığında Cem IV 32,5 R katkı çimento üretimi için harcanan enerjinin Cem I 32,5 R puzolanik çimento üretimi için harcanan enerjiden daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 9-10).



Şekil 9. Cem I 42,5 R çimento öğütme enerjisi karşılaştırma grafiği

Şekil 9'da Cem I 42,5 R üretimi için bilyalı değirmenlerde endüstriyel bazda harcanan enerji A çimentosu için harcanan enerjinin B çimentosundan daha az olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedeni değirmeni tam kapasite ya da üzerinde bir kapasiteyle çalıştırılması veya düşük incelikte değirmenin çalıştırılması olabilir. Yine diğer bir husus ise klinker üretim proseslerinin düzgün şekilde stabil olarak çalışması ve klinkerleşmenin tam olarak sağlandığı ürünlerdir.



Şekil 10. Cem IV 32,5/B-R çimento öğütme enerjisi karşılaştırma grafiği

Şekil 10'da Cem IV 32,5 R için gerekli olan enerji ihtiyacı A çimentosu için gerekli enerji B çimentosundan daha azdır. Burada çimento hammaddeleri için tras kullanıldığı için trasın silis içeriği, rutubeti ve çözünmez kalıntısı çok önemlidir. Ayrıca yine klinkerin mineralojik yapısı kadar çimento öğütme prosesinin de stabil çalışması çok önemlidir. Trasın rutubeti bazı durumlarda yüksek olup yüksek rutubete sahip

olan trasın doğrudan değirmene beslenmesi değirmenlerde besleme tonajını düşürmekte, rutubeti azaltmak için daha fazla sıcak havaya ihtiyaç duyulmaktadır. Klinker soğutma hattından gelen sıcak havanın bazı zamanlarda debisi azalmakta bazı zamanlarda ise sıcaklığı azaldığından dolayı değirmen içerisindeki rutubeti azaltmak için gerekli ısıyı sağlayamamaktadır. Bu da maalesef değirmen üretim kapasitesinin düşmesine, değirmende bilyalara ve diyafram plakalarına sarma yapışma yaparak değirmen çalışma verimini düşürmekte ve bu da sonuç olarak değirmen enerji tüketimlerini artıran bir sebep olarak karşımıza çıkmaktadır.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hammaddelerin ve klinkerlerin kendilerine has karakteristik özelliklerinin yani kimliklerinin doğru ve tam olarak bilinmesi öğütmenin etkinliği ve kontrolü açısından oldukça önemlidir. Klinkerin öğütülebilirliğinde kimyasal ve mineralojik bileşim önemli rol oynar. Silikat modülü arttıkça (bünyedeki silis) öğütülebilirliğin azaldığı, ayrıca  $Al_2O_3$  ve serbest kireç artmasıyla yine öğütülebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Çimento hammaddelerinden kil mineralleri, bünyesinde  $SiO_2$  bulundurup silikat modülünü ayarlayan ana mineraldir. Dolayısıyla kimyasal özelliklerin ocak kademelerinde çok çabuk değişmesinden dolayı doğru şekilde ve doğru yerden numunelerin alınması ve analiz sonuçlarına göre üretim proseslerinin dizayn edilmesi ve sürdürülmesi önemlidir.

Bunların yanısıra klinkerlerin öğütülebilirliğinde mikro yapının da önemi vardır. Mikro yapının oluşumunda soğutma hızı ve fırın tipi etkilidir. Klinkerlerin öğütülebilirliğinde hammaddenin yanısıra pişirme ve soğutma proses şartlarının da etkili olduğu bilinmektedir. Fırın şartlarının değişmesi ise tamamen fırına giren malzemenin kalitesine bağlıdır. Bu sonuç ise yine çimento üretiminde doğru hammadde seçimini göstermektedir. Bundan sonra yapılacak değirmen optimizasyonlarında optik mikroskop görüntü işleme tekniklerinden faydalanılarak klinkerlerin mineralojisi, fazların oranı ve tane boyut dağılımları da göz önüne alınarak modelleme ve simülasyon çalışmalarında dikkate alınması faydalı olacaktır.

Çimento hammaddelerinin ve klinkerlerin öğütme testlerinde Bond yönteminin uzun ve zahmetli olması ve son zamanlarda yapılan araştırmalarda tekrarlı testlerde birtakım tutarsızlıklar görülmesi nedeniyle Bond yöntemine karşılık Hardgrove yöntemi de alternatif olarak seçilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Hardgrove;

kil taşı<alçı taşı<mermer atığı<tras<kalker<klinker

Bond iş indeksi;

kil taşı<mermeratığı<alçı taşı<tras<kalker<klinker.

Hardgrove ve Bond iş indeksleri birbirlerinden farklı sonuçlar vermiştir. Fakat kendi içlerinde minerallerin iş indeksleri karşılaştırıldığında klinker, kalker ve trasın; mermer atıkları, alçı taşı ve kil taşından zor öğündüğünü ve mermer atıkları, alçı taşı ve kil taşının öğütülebilirliğinin de birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle Bond ve Hardgrove testlerinin birbirleri ile kıyaslandığında tutarsızlıklar olduğu fakat her iki test yönteminin de kendi içinde tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bütün aksaklıklara karşılık Bond ve Hardgrove formülleri özellikle bilyalı değirmenler için şu an tek dizayn ve kontrol mekanizmasıdır. Fakat mevcut teoriler tekrar gözden geçirilmeli ve yeni teoriler ortaya atılmalıdır ve daha güvenilir enerji hesaplamaları yapılmalıdır.

Endüstriyel çalışmalar neticesinde farklı tesislere ait klinkerlerle yapılan çimentoların incelik değerleri ve enerji tüketimlerinde de farklı sonuçlar görülmüştür. Malzemedeki ince ürün miktarı arttıkça değirmenlerin tüketmiş oldukları enerji miktarları da artmıştır. Ayrıca katkılı çimentolarla yapılan öğütme testleri sonucu enerji tüketim miktarı katkısız çimentolardan daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi öğünmesi zor klinker yerine öğünmesi daha kolay katkı malzemelerinin ikame edilmesidir.

## KAYNAKLAR

Alp, İ., Deveci, H., Yazıcı, E. Y., Türk, T., and Süngün, Y. H., 2009. Potential Use of Pyrite Cinders As Raw Material in Cement Production: Results of Industrial Scale Trial Operations. Journal of Hazardous Materials, 166(1), 144-149.

- Benzer, H.,2005. Modeling and Simulation of a Fully Air Swept Ball Mill in a Raw Material Grinding Circuit. *Powder technology*, 150(3), 145-154.
- Bond, Fred C., 1961, Kırma ve Öğütme Hesapları, Bölüm I-II., *Br. Chem. Müh.* , 6 : 378-385, 543-548.
- Çolak, S. S., 2018. Çimento Öğütme Uygulamalarında Bilya ve Malzeme Özelliklerinin Bilya Aşınma Sonuçları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Deniz, V., Erkan, D., ve Alyıldız, V., 2001. Kalker ve Klinker Örneğinde Kırılma Kinetiği Üzerine Bilya Çapının Etkisi. 4 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 118-19 Ekim 2001.
- Gouda, G.,1979. Klinker Bileşiminin Öğütülebilirlik Üzerindeki Etkisi. Çimento ve Beton Araştırmaları , 9(2), 209-218.
- Hardgrove, T. A.,1932. Infection with Monilia Following Extraction of Teeth. *Journal of the American Dental Association*, 19(3), 483-486.
- Hoşten, Ç., Avşar, Ç., 1997. Çimento Klinkeri ve Tras Karışımlarının Öğütülebilirlik Özellikleri. Türkiye 15. Madencilik Kongresi, Zonguldak, s. 291-298.
- Hoşten, C., Avsar, C.,1998. Grindability of Mixtures of Cement Clinker and Trass. *Cement and Concrete Research* concrete research, 28(11), 1519-1524.
- Hoşten, C., Fidan, B., 2012. An Industrial Comparative Study of Cement Clinker Grinding Systems Regarding the Specific Energy Consumption and Cement Properties. *Powder Technology*, 221, 183-188.
- Karakaş, F., 2006. Çimento Hammaddelerinin Öğütülmesinde Enerji Optimizasyonu. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Korkmaz, A., 2012. Klinker Ana Komponentlerin Öğütme ve Çimento Dayanımları Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nitta, S., Bissombolob, A., Furuyamab,T., Mori, S., 2002. Relationship Between Bond's Work Index (Wi) and Uniformity Constant (n) of Grinding Kinetics on Tower Mill Milling Limestone. *International Journal of Minereral Processing*, No. 66 s. 79–87.
- Smith, J. V., 2013. *Feldspar Minerals: Crystal Structure and Physical Properties 1*. Springer Science and Business Media.
- Sahasrabudhe, R., Sistu, P., Sardar, Sahasrabudhe, R., Sistu, P., Sardar, G., and Gopinath, R., G. A. U. T. A. M., Gopinath, R. A. V. I., 2006. Control and Optimization in Cement Plants. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(6), 56-63.
- Speight, J. G., 2012. *The Chemistry and Technology of Coal*. CRC Press.
- Venkatanarayanan, H. K., Rangaraju, P. R., 2015. Effect of Grinding of Low-Carbon Rice Husk Ash on the Microstructure and Performance Properties of Blended Cement Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 348-36.
- Yıldız, N., 2014. *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Cilt 1. Ankara.



