

**BİLYALI DEĞİRMENLERDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN
MODELLENMESİ ve OPTİMİZASYONU**

Nuh AKÇİÇEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

2007

**BİLYALI DEĞİRMENLERDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN
MODELLENMESİ ve OPTİMİZASYONU**

Nuh AKÇİÇEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
2007

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nevzat ASLAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Bu çalışma, jürimiz tarafından, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Meftuni YEKELER

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nevzat ASLAN

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KUL

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

.../.../2007

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan “Yüksek Lisans ve Doktora Tez Yazım Kılavuzu” adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

Bu Tez alışması, CÜBAP komisyonunun M-317 no'lu projesi kapsamında desteklenmiştir.

TUTANAK

YÜKSEKÖĞRETİM KURULU

ULUSAL TEZ MERKEZİNE

numaralı tezlerin bir nüshasını, sadece kişisel çalışmalarımda kullanmak amacıyla elden teslim aldım.

Bilgilerinize.

Adres:

Tel:

e-mail:

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren danışman hocam; Yrd. Doç. Dr. Nevzat ASLAN'a (Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Böl.), ayrıca tez çalışmalarım esnasında bana moral verip destek olan tüm bölüm hocalarıma,

Çalışmanın bir bölümüne maddi destek sağlayan Cumhuriyet Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğüne (CÜBAP Proje No: M-317),

Çalışmanın her aşamasında manevi katkı, emek ve anlayış gösteren eşime ve biricik oğlum Onur'a teşekkürlerimi sunarım.

Nuh AKÇİÇEK

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No:

Şekil 1. Bazı Açık ve Kapalı Devre Öğütme Sistemleri.....	11
Şekil 2. Klinker Öğütme Değişken Parametrelerin S/N Üzerine Etkileri.....	20
Şekil 3. Mangan Öğütme için Deneysel ve Model Tahmini (d_{80}) Değerleri.....	28
Şekil 4. Değirmen Hızı ve Bilya Oranının (d_{80}) Üzerine Etkisi.....	30
Şekil 5. Değirmen Hızı ve Bilya Çapının (d_{80}) Üzerine Etkisi.....	31
Şekil 6. Bilya Oranı ve Bilya Çapının (d_{80}) Üzerine Etkisi.....	31
Şekil 7. Kalsit Öğütme Değişken Parametrelerin S/N Üzerine Etkileri.....	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No:

Çizelge 1. Ufalama Kanunlarına Göre Harcanan Enerji Miktarı.....	9
Çizelge 2. Yaygın Taguchi Dizileri.....	13
Çizelge 3. Klinker Öğütme Deney Koşulları	17
Çizelge 4. Klinker Öğütme optimizasyonu için kullanılan bağımsız değişkenler ve Seviyeleri	18
Çizelge 5. Klinker Taguchi Ortogonal Dizayn L9(3 ³) ve Deneysel (d ₈₀) Sonuçları	19
Çizelge 6. Klinker Öğütme için değişkenlerin çok yanıtı S/N oranları ve sıralama (önemlilik) Değerleri	21
Çizelge 7. Mangan cevheri öğütme koşulları.....	23
Çizelge 8. Mangan Öğütme optimizasyonu için kullanılan bağımsız değişkenler ve Seviyeleri	24
Çizelge 9. Mangan Box-Behnken dizayn ve deneysel sonuçları (Mangan).....	25
Çizelge 10. Mangan Öğütme için deneysel ve model tahmini d ₈₀ değerleri.....	27
Çizelge 11. Mangan Öğütme için modeli için varyans analizi (Anova Tablosu)	29
Çizelge 12. Kalsit Öğütme Deney Koşulları	33
Çizelge 13. Kalsit Öğütme optimizasyonu için kullanılan bağımsız değişkenler ve Seviyeleri	34
Çizelge 14. Kalsit Taguchi Ortogonal Dizayn L18(6 ¹ ,3 ²) ve Deneysel (d ₈₀) Sonuçları	36
Çizelge 15. Kalsit Öğütme için değişkenlerin çok yanıtı S/N oranları ve sıralama (önemlilik) Değerleri	38

SİMGELER DİZİNİ

ΔE : Harcanan enerji,

E_1 : Kırılmış tanedeki enerji,

E_2 : Kırılacak tanedeki enerji

E : Özgül öğütme enerjisi tüketimi, kwh/t,

F : Beslenen malzeme boyutu, μm .

P : Ürün parça boyutu, μm .

C_R : Rittinger sabiti.

P/F : Ufalama oranı

C_K : Kick sabiti.

W_1 : İş indeksi, kWs/t

P : Kırılacak malın % 80'ini geçtiği elek açıklığı, μm .

F : Kırılmış malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı, μm .

n : Schuhmann eğrisinin düz bölümünün eğimi

A : Malzeme dayanımına bağlı bir faktör

X : Boyut modülü

r : Malzeme inceliğine bağlı olarak artan bir sabit

S/N : Sinyal Gürültü Oranı.

μ : Ortalama.

y_{it} : i. deneyin tahmin edilen performans değeri,

x_i : i. deneyde kullanılan parametre seviyelerinin toplam etkinlik boyutu

e_i : deneysel hata

N_k : Kritik Hız

D :Değirmen İç Çapı (m)

d : Bilya Çapı (m)

J_B :Bilya Dolum Oranı

U :Malzeme – Bilya Doldurma Oranı

F_C : Dolum Oranı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİLYALI DEĞİRMENLERDE BAZI ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN MODELLENMESİ ve OPTİMİZASYONU

Nuh AKÇİÇEK

Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nevzat ASLAN

Bu çalışmada; bilyalı değirmenlerde bazı öğütme parametrelerinin modellenmesi ve optimizasyonunu araştırılmıştır. Çalışmada, üç farklı materyal (klinker, mangan cevheri ve kalsit) kullanılmış olup, modelleme ve optimizasyon için ise, Taguchi Metot ve Cevap Yüzey Yöntemi (Response Surface Method) kullanılmıştır. Her üç materyal için, önceden belirlenen deney planına göre bilyalı değirmende kuru öğütme testleri yapılmış olup, daha sonra öğütülmüş ürünlerin d_{80} tane boyutu değerleri hesaplanmıştır. Mangan cevheri için; Box-Behken deney tasarım yöntemi ve Cevap Yüzey Yöntemi; klinker ve kalsit öğütme için ise Taguchi Optimizasyon Metot kullanılmıştır. Bilya çapı, değirmen dönüş hızı, bilya dolum oranı ve öğütme süresi gibi parametreler önemli öğütme parametreleri olarak seçilmiştir. Daha sonra, öğütme testlerinden elde edilen deneysel d_{80} tane boyutu değerleri kullanılarak her üç materyal için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma, Taguchi Optimizasyon Metot ve Cevap Yüzey Yöntemi'nin bazı öğütme sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonunda efektif olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Öğütme, Modelleme, Optimizasyon

ABSTRACT

Master of Science Thesis

MODELING AND OPTIMIZATION OF SOME GRINDING PARAMETERS FOR BALL MILL

Nuh AKÇIÇEK

Cumhuriyet University

Graduate School of Natural

And Applied Sciences

Department of Mining Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Nevzat ASLAN

In this study, modelling and optimization of some grinding parameters was investigated for ball mill grinding. Three different materials: clinker, manganese ore and calcite were used for grinding tests. Taguchi Method and Response Surface Method were used for optimization tools. As a base for this study, dry grinding tests were initially done based on experimental design defined for three materials and d_{80} sizes were calculated for each grinding product. Box-Behken experimental design and Response Surface Method was used to provide data for modelling and optimization for manganese grinding. Taguchi method was used for optimization both clinker grinding and calcite grinding. Ball diameter, speed of rotation, fractional ball filling and grinding time were chosen significant operation parameters for grinding systems. Using sets of experimental d_{80} data, modelling and optimization study were then done for three materials. This study proved that Taguchi Method and Response Surface Methodology can efficiently be applied for modelling and optimization of some grinding systems.

Key Words: Grinding, Modelling, Optimization

1. GİRİŞ

Cevher Hazırlama proseslerinde en önemli temel işlemlerden biri olan öğütme işlemi çok fazla enerji tüketilmesi sebebiyle en pahalı işlemlerden biridir. Özellikle ince ve mikronize öğütmelerde bu enerji tüketimi çok yüksek boyutlara ulaşmaktadır. A.B.D’ de ufalama için harcanan enerji elektrik tüketiminin %1,5’ ine karşılık gelmektedir. Endüstrileşmiş ülkelerde ise üretilen elektriğin yaklaşık %3’ ü boyut küçültme amacıyla kullanılmaktadır. A.B.D Enerji Bakanlığı tarafından yayımlanmış “Communiton and Energy Conversation” raporunda yapılacak iyileştirmeler ile; öğütme makineleri tasarımı ile %3-6, sınıflandırıcıların tasarımı ile %9-13, proses kontrolü ile %9, öğütme katkı maddesi kullanımı ile %3-6, diğer makine tasarımı ile %3 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir. (Herbst, J.A., Chairmen, 1981).

Bu değerler dikkate alındığında, cevher hazırlamada öğütmenin araştırılmasının çok önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bütün cevherlerin çeşitli faktörlere bağlı olarak, ekonomik bir optimum öğütme derecesi vardır. Az öğütme, ekonomik ayırmanın yapılmamasına, konsantrasyon kademesinde randıman ve tenörün düşmesine; aşırı öğütme ise kıymetli minerallerin verimli ayırma boyutlarından fazla öğütülmesine, gang minerallerinin şlam meydana getirerek ayırmayı engellemesine ve lüzumsuz enerji kaybına neden olur. Bu nedenle boyut küçültme ve özellikle öğütme devrelerinin iyi tasarlanmış olması çok önemlidir. Modelleme ve optimizasyon çalışmaları son zamanlarda diğer mühendislik disiplinlerinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, cevher hazırlama proseslerinde kullanımı ve uygulanması sınırlı olmuştur.

Bu çalışma, bilyalı değirmenin bazı öğütme parametrelerinin modellenmesi ve optimizasyonunu kapsamaktadır. Çalışmada, üç farklı materyal (klinker, mangan cevheri ve kalsit) kullanılmıştır. Seçilen bu üç materyal endüstride yaygın olarak kullanılmakta olup, bunların öğütme sistemlerinde sağlanacak enerji tasarrufu düşünüldüğünde, bu çalışmanın anlamlılığı ortaya çıkmaktadır.

Çimento üretimi enerji kullanımının yoğun olduğu bir prosestir. Klinker ve katkı maddelerinin öğütülmesi aşamasında, öğütülen klinkerin ve katkı maddelerinin özelliklerine bağlı olarak ton başına 26-40 kW’s lik enerji tüketilmektedir. (Ellerbrock, ve diğ., 1994). Çimento endüstrisi, dünya enerjisinin yaklaşık %3,5’ unu kullanan en büyük endüstrilerden birisidir. Çimento endüstrilerinde, üretim prosesinde harcanan

toplam enerjinin %40' ı öğütme aşamasında harcanmaktadır (Öner, 1999). Enerjinin bu kadar çok harcandığı bir endüstride, öğütme randımanını artırmak için hem enerjiyi az tüketen ufalama makinelerini geliştirmeli, hem de öğütme devre sistemlerini ve çalışma parametrelerinin optimum dizaynı sağlanmalıdır.

Kalsit ülkemizde zengin rezerve sahip bir endüstriyel mineraldir. Endüstride boya ve plastik sanayinde, ayrıca inşaat sektöründe beyaz çimento esaslı sıva ve macun olarak kullanılmaktadır. Kalsitin pek çok kullanım alanı için, ince hatta mikronize tane boyutunda olması istenmektedir.

Ülkemizde tüketilen mangan büyük bir kısmı parça mangan cevheri ve alaşımları şeklinde demir çelik sanayisinde kullanılmaktadır. Geriye kalan kısmı ise kimya sanayinde özellikle batarya (pil) üretiminde kullanılır. Özellikle kimya ve pil sanayinde kullanılacak manganın ince boyutlara öğütülmesi gerekmektedir.

Endüstride proses geliştirme araştırmalarında yapılan deneyleri tasarlamak için, en çok bilgiyi en az kısa sürede, en az maliyet ve işgücüyle elde edilebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Deney tasarımı için klasik sayılabilecek bazı yöntemlerin zorlukları, bu konuda yeni yöntemlerin gelişmesine neden olmuştur. Bu bağlamda, Cevap Yüzey Yöntemi (Response Surface Method) ve Taguchi Metod bu yöntemlerden ikisidir. Bu yöntemler kullanılarak yapılan modelleme ve/veya optimizasyon çalışmaları ile proseslerin iyileştirmesini sağlarken; aynı zamanda malzeme, işçilik ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır.

DeneySEL tasarım yöntemleri ile istatistiksel esaslı modelleme ve/veya optimizasyon çalışmaları pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen, cevher hazırlama sistemlerindeki uygulamaları pek yaygın görünmemektedir. Bu bağlamda; Aslan ve Cebeci tarafından Box–Behnken deneySEL tasarım ve Cevap yüzey Yöntemi kullanılarak kömür öğütme sisteminin modelleme ve optimizasyonu yapılmıştır (Aslan ve Cebeci , 2007). Obeng ve diğerleri tarafından, Central composite design ve cevap yüzey yöntemi kullanılarak üç ürünlü hidrosiklonun modellenmesi yapılmıştır (Obeng ve diğ., 2005). Benzer şekilde multi gravite seperatör ile selestit zenginleştirmenin modellenmesi ve optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır (Aslan N, 2007). Faktöriyel deneySEL tasarım ve istatistiksel analiz kullanılarak selestit flotasyonunun optimizasyonu yapılmıştır (Martinez ve diğ., 2003).

Bu çalışmada, yukarıda sözü edilen üç materyal için, farklı deneysel tasarım yöntemlerine göre belirlenen koşullarda, kuru öğütme testleri yapılmıştır. Öğütülmüş ürünlerin kalite faktörü olarak d_{80} tane boyutu seçilmiş olup, her bir öğütme testi sonunda elek analizi yapılarak d_{80} değerleri belirlenmiştir. Mangan cevheri öğütme sisteminin modellenmesi ve optimizasyonu için, Box-Behken deney tasarımı ile cevap yüzey yöntemi; Klinker ve kalsit öğütme için ise ortogonal deneysel tasarım ile Taguchi Metot kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Öğütme testlerinde bilya çapı, değirmen dönüş hızı, bilya dolun oranı ve öğütme süresi gibi parametreler proses değişkenleri olarak seçilmiştir.

Her bir materyal için seçilen proses parametreleri ile bunların d_{80} tane boyutu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen verilerle, modelleme sonucu elde edilen tahmini verilerin uyum içinde olduğu düşünüldüğünde, bir çok endüstriyel proseste başarıyla metodun öğütme sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonunda da efektif olarak kullanılabilceği anlaşılmaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. ÖĞÜTME

Öğütme, kırma sonrası boyut küçültme prosesinin son aşamasıdır. Cevherin içerdiği farklı mineralleri birini diğerinden serbest hale getirmek, proseye uygun boyut ya da yüzey alanı veya kullanım amacına uygun boyut sağlamak amacı ile öğütmede değişik değirmenler kullanılırken, öğütme şekli prosesin akışına bağlı olarak kuru ya da yaş olarak seçilebilir.

Öğütmede uygulanan kuvvetler: darbe, sıkıştırma veya ezme, kesme, sürtme kuvvetleridir. Sürtme ile boyut küçültme aşınma sonucu oluşur. Diğer kuvvetler ile taneler genellikle kırılarak küçültülürler. Malzemenin sert veya yumuşak olması kolay veya zor öğütülebilecekleri anlamına gelmemektedir. Öğütülebilirlik malzemenin kristal yapısı, bu yapının içindeki kristal ve fiziksel yapı bozuklukları ile ilgilidir. Malzemenin fiziksel yapıları ve boyut dağılımlarının homojen olmayışı nedeni ile değirmen içinde pülpün ve bilyanın oluşturduğu her öğütme ortamı ayrı bir özellik gösterir. Öğütücü ortam bilya, çubuk, çakıl, öğütülecek cevherin iri parçaları veya başka bir cevher olabilir. Öğütme işleminde partiküller genel olarak 2,5 cm' den 10 µm' ye kadar olabilmektedir.

Bütün cevherlerin çeşitli faktörlere bağlı, ekonomik bir optimum öğütme derecesi vardır. Bu faktörler arasında en önemlileri olarak kıymetli mineral veya minerallerin serbestleşme tane iriliği ve daha sonraki zenginleştirme işlemleri için uygun boyutlar sayılabilir. Bu optimum öğütme derecesinin sağlanması ve kontrolü, iyi bir cevher hazırlamanın anahtarını oluşturmaktadır. Az öğütme, ekonomik ayırmanın yapılamamasına, konsantrasyon kademesinde randıman ve tenörün düşmesine, aşırı öğütme ise kıymetli minerallerin verimli ayırma boyutlarından fazla öğütülmesine, gang minerallerinin şlam meydana getirerek ayırmayı engellemesine ve lüzumsuz enerji kaybına neden olur (İpekoğlu, Ü., 1989).

Öğütme kaba, ince ve çok ince öğütme olarak üç bölüme ayrılabilir. Günümüzde öğütme genellikle çubuklu, bilyalı, çakıllı ve otojen döner değirmenler ile titreşimli değirmenlerde gerçekleştirilmektedir. Cevher Hazırlama tesislerinde birinci ve ikinci kademe kırmada 0,1 – 2 kW/s/t, ince öğütmede 5-20 kW/s/t, çok ince öğütmede 20-100 kW/s/t, 10 mikrometrenin (µm) altındaki öğütmelerde de 100-1000 kW/s/t civarında enerji tüketilmektedir. Boyut küçültmede kullanılan net enerjiyi bulmak için toplam enerjiden ses ve ısıya dönüşen enerjinin çıkarılması gerekir. Bake 1964'te boyut küçültmeye

harcanan enerjinin toplam enerjinin ancak %0,6' sını, Austin ise %3' ten daha az olduğunu savunmuşlardır. Bu oranlar kesin olmamakla birlikte, boyut küçültmede harcanan enerjinin, harcanan toplam enerjiye oranının çok küçük olduğu bilinen bir gerçektir (Lynch, 1977).

Bu nedenle boyut küçültmede özellikle öğütme devrelerinin iyi tasarlanmış olmaları çok önemlidir. Öğütme devrelerinde projelendirme aşamasında yapılmış bir hatanın daha sonra düzeltilme maliyeti çok yüksektir. Öğütme devrelerinden daha iyi sonuçlar alabilmek için sürekli bir arayış içinde olunması da mühendisliğin bir gereğidir. En iyi şekilde projelendirilmiş öğütme devrelerinde de işletme sürecinde istenilen öğütmenin sağlanabilmesi ve verimliliğin artırılması için mutlaka değiştirilmesi gerekli parametrelerin olduğu unutulmamalıdır. Besleme, öğütücü boyutu ve miktarı, pülp yoğunluğu (yaş öğütmede) öğütme sürecinde kontrol altında tutulması gerekli en önemli parametrelerdir.

2.1.1. Boyut Küçültme Teorileri

Boyut küçültme ile ilgili üç prensip vardır. (Bond, 1961):

I. Prensip: Boyutu küçülecek her tanenin bir enerji seviyesi vardır. Tanenin boyutunu küçültmek için bu enerji seviyesini artırmak gerekir.

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

ΔE = Harcanan enerji,

E_1 = Kırılmış tanedeki enerji,

E_2 = Kırılacak tanedeki enerji.

II. Prensip: Boyut küçültmede harcanan faydalı enerji, yeni oluşan parçaların çatlak uzunlukları ile orantılıdır. Kırılma ve öğütmede kırılacak parça kullanılan enerjiyi belirli bir süre absorbe eder. Bu sürenin sonunda parça içindeki en zayıf kısımdan çatlayarak absorbe edilen enerji boyut küçültme işine dönüşür. Bu olay, tanelerin bünyesinde bir reaksiyon zinciri olarak devam ederek, taneler daha ufak boyutlara ayrılır.

III. Prensip: Bu prensip malzemenin kırılması ile malzemedeki yapısal bozukluklar arasındaki ilişkiye dayanır. Yapısal bozukluklar, malzeme içindeki zayıflıklar ile ilgili olup belirli bir kuvvetin, belirli bir süre etkisi ile çatlaklara dönüşebilir. Parça içindeki en zayıf yapısal bozukluk, kırma ve öğütme için gerekli kuvvet seviyesini belirler.

2.1.2. Boyut Küçültme Yasaları

Enerji ile malzeme boyutu arasındaki ilişkilerin ifade edildiği değişik yasalar mevcuttur.

2.1.2.1. Rittinger Yasası

Rittinger, boyut küçültmede kullanılan enerjinin, öğütme sonucu oluşan yeni yüzey alanı ile orantılı olduğunu savunmuştur. Bu orantıya karşın oluşan yeni yüzeylerin yüzey enerjisi, kırma ve öğütmede gereken enerjinin 1/100 gibi çok az bir kısmını oluşturmaktadır. Boyut küçültmede gerekli enerjinin tamamına yakın bir kısmı, parça küçüldükten sonra ısı olarak açığa çıkmaktadır.

Rittinger yasası aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir.

$$E = C_R.(1/P - 1/F)$$

Burada;

E = Özgül öğütme enerjisi tüketimi, kW/s/t,

F = Beslenen malzeme boyutu, μm .

P = Ürün parça boyutu, μm .

C_{Rn} = Rittinger sabiti.

Rittinger yasası, deneysel ve matematiksel olarak kanıtlanmamıştır. Deneysel olarak bu yasanın kanıtlanabilmesi için küçülmüş malzemelerin moleküler boyutta ölçümü gerekmektedir. Bu yasada kırma öncesi parçanın deformasyonunun göz önüne alınmaması teorik olarak yasanın en önemli eksikliğidir. (Yıldız, N., 1999).

2.1.2.2. Kick Kanunu

İkinci boyut küçültme yasası, 1883 yılında Kick tarafından savunulmuştur. Kick olayı tane hacmi küçülmesi yönünden ele almakta ve homojen kayaçların kırılmasında hacim küçültme ile orantılı bir enerji sarfı gerektiğini iddia etmektedir.

Kanunun ifadesi “geometrik olarak birbirine benzer iki cisimden aynı derecede ufalama elde etmek için gerekli enerji, bu cisimlerin hacimleri (veya ağırlıkları) ile orantılıdır”. Diğer bir deyişle; belirli hacimsel değişimler için aynı enerji sarfiyatı gereklidir. (İpekoğlu, Ü., 1989).

Ufalamanın kollektif karakterini de göz önünde bulundurarak Kick kanununu matematiksel olarak;

$$E = C_K \cdot \log (P/F) \text{ şeklinde formülize etmiştir.}$$

Burada:

$$P/F = \text{Ufalama oranı}$$

$$C_K = \text{Kick sabiti.}$$

2.1.2.3. Bond Kanunu

Bu kanun çok sayıda kırma-öğütme deneyi sonuçlarının analizine dayanılarak ortaya atılmıştır. Bond, Rittinger ve Kick teorilerine karşı çıkmış ve “Boyut küçültmede faydalı iş, meydana getirilen çatlak uzunlukları ile orantılıdır” görüşünü savunmuştur.

Çatlak uzunluklarının ise kırılma sonunda yeniden meydana gelen yüzeylerin karekökü ile ters orantılı olduğu bulunmuştur.

Boyut küçültmede çatlak teşekkülü tane içindeki yapısal zayıflıklara bağlıdır. Bunlar kuvvet uygulandığı zaman çatlak haline gelebilecek strüktürel zayıflıklardır.

Her malzemenin ufalanma için ihtiyaç göstereceği enerji miktarı farklıdır. Bond “İş Endeksi” – “Work İndex”, (malzemelerin kırılma ve öğütmeye karşı gösterdikleri direnci ifade eden bir parametre) diye bir değer tanımlamış ve bunu “sınırsız büyüklükteki parçalardan meydana gelmiş bir malzemenin birim ağırlığının % 80’i 100 mikronmetrenin (μm) altına geçecek şekilde ufalanması için gerekli enerji” olarak ifade etmiştir.

$$E = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Buradan:

$$E = \text{Birim ağırlığı kırmak için gerekli enerji, kWs/t}$$

$$W_i = \text{İş indeksi, kWs/t}$$

$$F = \text{Kırılacak malın \% 80' inin geçtiği elek açıklığı, } \mu\text{m.}$$

$$P = \text{Kırılmış malın \% 80' inin geçtiği elek açıklığı, } \mu\text{m.}$$

Homojen cisimlerin ufalama işlemlerinde W_i sabittir. Cevher hazırlamada ise çoğunlukla heterojen cisimler söz konusudur. Bu nedenle W_i her malzeme için değiş-

mektedir. Minerallerin doğal hallerinde bir tane büyüklüğü vardır. Bu büyüklükten daha iri ve daha ince boyutlara ufalama işlemlerinde iş indeksi değişir. Ayrıca kırıcı aletin randımanı da iş indeksini etkiler. Bazı maddelerin iş indeksleri literatürde tablolar halinde verilmektedir. Ancak tam doğru sonuç için her malzemenin iş indeksini laboratuvarlarda, uygulamada kırılacak boyuta yakın bir boyutta tayin etmek gerekir (İpekoğlu, Ü., 1989).

2.1.2.4. Charles Yasası

Charles, boyut küçültmede gerekli enerjiyi aşağıdaki eşitlik ile ifade etmiştir (Charles, 1952).

$$E = A.(X)^n$$

E = Boyut küçültme için gerekli enerji, kW/s/t

n = Schuhmann eğrisinin lineer kısmının eğimi

A = Malzeme dayanımına bağlı bir faktör

X = Boyut modülü

Eşitlikte n değeri Schuhmann eğrisi kullanılarak belirlenmektedir.

2.1.2.5. Holmes Yasası

Holmes, boyut küçültmede harcanan enerjiyi aşağıda verilen eşitlik ile ifade etmiştir (Holmes, 1957).

$$E = W_i[(100/P)^r - (100/F)^r]$$

Burada;

E = Boyut küçültme için gerekli enerji, kW/s/t

W_i = İş indeksi, kW/s/st

P = Boyutu küçülmüş parçanın çapı, μ m.

F = Boyutu küçülecek parçanın çapı, μ m.

r = Malzeme inceliğine bağlı olarak artan bir sabit

Charles (1957) ise geçerlikte olan bütün ufalama kanunlarını genel bir diferansiyel denklem olarak ifade etmiştir (Kinasevich ve ark., 1964).

$$\frac{dE}{dx} = -C \frac{1}{x^n}$$

$E =$ Boyut küçültme için gerekli enerji

$x =$ Tane boyu

Bu diferansiyel denklemde;

$n = 2$ için Rittinger,

$n = 1$ için Kick

$n = 1,5$ için, Bond kanunları elde edilir.

2.1.2.6. Hukki Yasası

Ufalamada enerji-tane boyutu ilişkisinin her üç kanunun ortak bir karışımı ile ifade edilmesi gerektiğini savunmuştur. Hukki ufalamada parçalama olasılığının büyük taneler için yüksek olduğunu ve küçük taneler için bu olasılığın hızla kaybolduğunu iddia etmektedir. Rittinger, Kick ve Bond kanunları arasındaki ilişkiyi pratikte elde edilen değerlerle karşılaştıran Hukki Tablosu Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Ufalama Kanunlarına göre Harcanan Enerji Miktarı (İpekoğlu, Ü., 1989).

	Enerji, (kWs/ton)			
	1m-100mm	100-10mm	10-1 mm	1mm-100µm
Rittinger Kanununa göre hesaplanan enerji	0,009	0,090	0,900	9,000
Kick Kanununa göre hesaplanan enerji	2,500	2,500	2,500	2,500
Bond Kanununa göre hesaplanan enerji	0,220	0,690	2,180	6,910
Pratikte ufalama esnasında harcanan enerji	0,350	0,600	1,600	10,000
	Primer Kırma	Sekonder Kırma	İri Öğütme	İnce Öğütme

2.2. ÖĞÜTME UYGULAMALARI

Öğütme, prosesin akışına ve cevherin durumuna göre yaş ya da kuru olarak yapılır. Öğütme şekline göre, sistemdeki sınıflandırıcı ve diğer proses makineleri seçilir. Otojen öğütme, klasik öğütmeye göre, yaklaşık 1/3 daha ekonomiktir. Kuru öğütme, yaş öğütme ile karşılaştırıldığında yaklaşık 1,3 kat daha fazla enerji gerektirir.

2.2.1 Kuru öğütme

Çimento, bentonit, kömür, fosfat ve bazı mineral konsantreleri ile kuru kullanılması gerekli ve üretildiğinde yüksek nem içermeyen mineraller kuru olarak öğütülebilir. Kuru öğütme için, öğütülecek malzemenin öğütme öncesi veya öğütme süresinde sıcak hava ile nem oranının düşürülmesi gerekir. Öğütülmüş malzeme, fan veya basınçlı hava ile çalışan pnömatik pompalarla taşınır.

Kuru öğütmede malzemenin değirmen içindeki hareketini sağlamak için değirmenin çıkış tarafına vakum, ya da giriş tarafına basınçlı hava uygulanır. Bazen vakum ve basınçlı hava birlikte de kullanılabilir. Uygulanacak vakum veya basınç, malzemenin değirmen içinde yığılmasını önlemeli, malzemenin değirmen içinde öğütülebilmesi için yeterli süre kalmasını sağlamalıdır.

Kuru öğütmede, bilyalı değirmen içindeki hava akımı öğütme esnasında ısınan değirmenin gövdesini de soğutmaktadır. Bazen de değirmen gövdesi için ayrı bir soğutma sistemi kullanılmaktadır. Genellikle kuru öğütmede değirmen durdurulduktan sonra, sıcak gövdenin hasar görmemesi için değirmen gövdesi soğuyuncaya kadar düşük devirde döndürülmelidir.

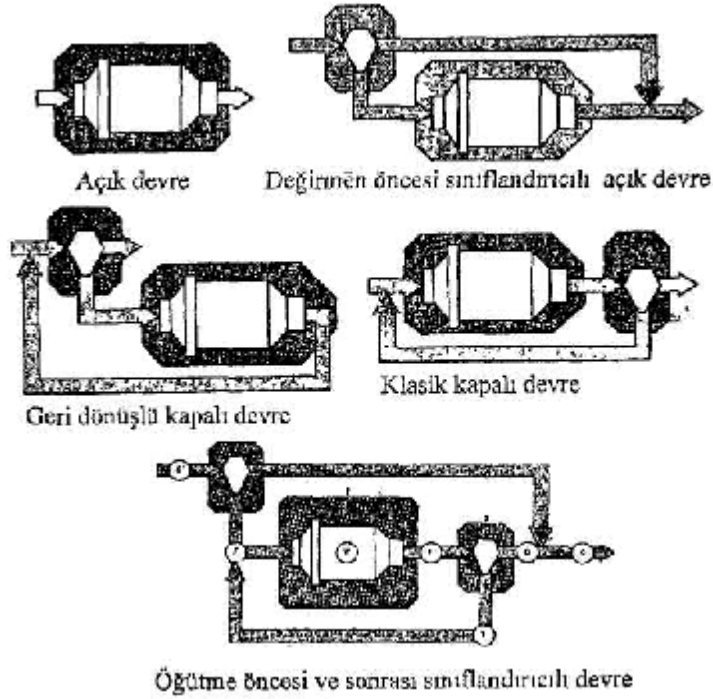
Kuru öğütme devrelerinde valsli, bilyalı, otojen veya yaygın olmasa da çubuklu değirmen kullanılmaktadır.

2.2.2. Yaş Öğütme

Cevher hazırlama tesislerinin çoğunda öğütme yaş olarak yapılmaktadır. Çünkü öğütme sonrası zenginleştirme işlemlerinde genellikle su kullanılır. Proses makinelerinin çoğu sulu ortamda çalışmak üzere dizayn edilmiştir.

Yaş olarak öğütmede pülp hazırlanır ve hazırlanan pülpün istenilen basınç ile, genellikle doğal kauçuk astarlı lastik borular kullanılarak belirli mesafelere taşınması çok kolaydır. Açık ve kapalı devre şeklinde iki türlü yapılan bu işlem daha sonra klasifikatörler aracılığı ile sınıflandırılır.

Klasik kapalı devrelerde, malzemenin tamamı önce değirmene sonra sınıflandırıcıya gönderilir. Değirmene gönderilen malzemenin belirli bir kısmı istenilen öğütme boyutundadır. Bu malzeme, değirmenden geçerken gereksiz yere daha küçük boyuta öğütülecektir. Bu durum öğütme kapasitesini düşürürken, gereksiz enerji tüketimine de neden olduğundan istenmeyen bir durumdur. Sınıflandırıcı sonrası kapalı devrelerde öğütülecek malzeme öncelikle sınıflandırıcıya gönderilerek, öğütülmesi gerekli malzeme, ince boyutlu malzemedan ayrıldıktan sonra değirmene beslenir. Bu devrelerin kapasiteleri yüksektir; ancak sınıflandırıcıya gönderilen, genellikle kırıcı ya da çubuklu değirmen çıkışı köşeli malzeme siklon, pompa ve akış hattında aşırı aşındırmalara neden olmaktadır.



Şekil 1. Bazı açık ve kapalı devre öğütme sistemleri.

Cevher hazırlama tesislerindeki en büyük sorunlardan biri de aşınmadır. Klasik ve sınıflandırıcı sonrası kapalı devreleri birlikte kullanmak da mümkündür. Devre seçimi proses mühendislerince belirlenir ve tesislerde zaman değiştirilebilir.

2.2.3. Kuru ve Yaş Öğütme Karşılaştırması

Kuru ve yaş öğütme karşılaştırıldığında yaş öğütme kuru öğütmeye göre daha az (kuru öğütmenin %60-90'ı oranında) güç sarfı gerektirir. Yaş öğütmede değirmen hızı

%10 daha hızlı, kapasite daha fazladır. Ürün kontrolü daha kolay olup toz problemi yoktur. Kuru öğütmede ise astar ortam sarfiyatı ve klasifikatör eskimesi azdır. Öğütücü ortam hacmi yaş öğütmede %40-50, kuru öğütmede %35-45' dir.

Laboratuar ölçekli çalışmalarda, yaş öğütmenin iri taneler için daha seçimli olduğu görülmüştür (Ersayın ve Aksarı 1991).

2.3. TAGUCHI METOT

Deneysel tasarım, ürüne etki eden değişkenlerin en uygun seviyelerini bulmak için testler yapmayı öneren bir yöntemdir. Tüm değişkenlerin olası etkilerinin hepsini aynı anda görmek çok büyük sayılarda deneme gerektirmektedir. Bu hem uzun hesaplama süreleri hem de büyük maliyetler gerektirdiğinden zor bir yöntemdir. Örneğin üç seviyeli dört değişkenli bir prosesin tüm etkilerini görebilmek için tam faktöriyel bir çözümleme yapıldığında gerçekleştirilecek deney sayısı $3^4 = 81$ dir. Yine benzer şekilde 2 seviyeli 7 değişkenli bir proses için aynı çözümleme yapıldığında $2^7 = 128$ deney yapmak gerekmektedir. Görüldüğü gibi gerekli deney sayıları oldukça fazladır. Özellikle benzeşim dışında fiziksel olarak gerçekleştirilmek zorunda olunan alanlarda bu nerdeyse olanaksız hale gelebilmektedir.

İşte bu zorlukları azaltmak için Japon bilim adamı Genichi Taguchi "Taguchi Yöntemi" (Taguchi, 1987) adını verdiği ortogonal dizilerden oluşan daha az sayıda deneme içeren ancak faktörlerin tüm etkilerini ortaya koyabilen standart tablolar geliştirmiştir. Taguchi ortogonal dizileri olarak adlandırılan bu tablolar L_4 , L_9 , L_{16} , L_{32} gibi simgelerle betimlenip rakamlar tablodaki deney sayılarını göstermektedir. Bu tabloların hangisinin seçilmesi noktasında belirli bir ilke olmamakla birlikte değişken sayısı, değişkenlerin seviyeleri ve değişkenler arası etkileşimlerin durumları belirleyici olmaktadır. Çizelge 2' de yaygın olarak kullanılan standart Taguchi tabloları görülmektedir.

Taguchi tablolarında tüm satır ve sütunlar kendi içlerinde dengeli olup ayrıca değişken etkileşimlerinin etkilerini de içerirler. Taguchi' nin bu dizileri, başta Amerika olmak üzere Avrupa ve Asya'nın birçok uluslar arası kuruluşunda tasarım geliştirme aracı olarak kullanılmaktadır. Sistemin akış dizgesi şu şekilde sıralanır; Planlama, Tasarlama, Deney Yapma, Çözümleme ve Doğrulama. Bu süreçte faktörlerin ve derecelerinin seçimi oldukça önemlidir. Özellikle değişkenlerin doğrusal olup olmadıklarını da hesaba katmak için 3 seviyeli çalışma yapmak daha sağlıklı olacaktır.

Çizelge 2. Yaygın Taguchi Dizileri

Dizi	Değişken sayısı	Değişken seviyesi
$L_4 (2^3)$	3	2
$L_8 (2^7)$	7	2
$L_{12} (2^{11})$	11	2
$L_{16} (2^{15})$	15	2
$L_{32} (2^{11})$	31	2
$L_9 (3^4)$	4	3
$L_{18} (2^1, 3^7)$	1	2
$L_{27} (3^{13})$	13	3
$L_{16} (5^4)$	5	4
$L_{32} (2^1, 4^9)$	1	2

Taguchi Yöntemi'nin diğer istatistiksel deney tasarım yöntemlerinden farkı; bir deneyi etkileyen parametreleri, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen olmak üzere iki grupta incelemesi ve çok sayıda parametreyi ikiden fazla seviyede incelemeye imkan sağlamasıdır. Genellikle ürün veya prosesin her birinin performans karakteristiği nominal değer veya hedef değere sahip olmalıdır. Amaç, bu hedef değer etrafındaki değişebilirliği azaltmaktır. Deneysel çalışma sonunda belirlenecek optimum çalışma şartları, farklı çalışma ortamları veya farklı zamanlarda her zaman aynı veya birbirine çok yakın performans değerini verebilmelidir. Bunun için kullanılacak optimizasyon kriteri, performans değeri etrafındaki değişkenliğin minimum düzeyde tutulmasını kontrol edebilmelidir. Taguchi'ye göre böyle bir optimizasyon kriteri performans istatistiğidir. Bir proseste amaç minimum değere ulaşmak ise, parametrelerin optimum seviyelerinin tespit edilmesinde aşağıdaki performans istatistiği formülü kullanılır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2 \right)$$

Burada;

n: tekrar edilen deney sayısı,

y: d_{80} tane boyutudur.

Bir prosesinde, amaç minimuma ulaşmaksa S/N'yi maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur (Montgomery, 1991) . Taguchi yönteminde belirlenen optimum çalışma şartlarına karşılık gelen performans değeri,

$y_{it} = \mu + x_i + e_i$ eşitliği yardımı ile tahmin edilebilir. Burada;

y_{it} : i. deneyin tahmin edilen performans değeri,

μ : ortalama

x_i : i. deneyde kullanılan parametre seviyelerinin toplam etkinlik boyutu,

e_i : deneysel hatadır.

2.4. CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ (RSM)

Cevap Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology, RSM) deneysel sistemli proseslerde problemlerin analiz edilmesi ve modellenmesi için, deneysel faktörlerle bunların ölçülen cevapları arasında bağıntılar kuran matematiksel ve istatistiksel tekniklerden oluşur. Yöntemin temeli, çok sayıda giriş değişkeni (bağımsız değişken) ve bunlara bağlı bir ya da birkaç cevap (bağımlı değişken) arasındaki ilişkinin belirlenmesidir. RSM uygulanmasının amacı, elde edilecek cevapları önceden öngörebilecek, sistemi ifade edebilen uygun fonksiyon bulmak ve optimum işletme koşullarını belirlemektir.

RSM'nin uygulanabilir olması için aşağıdaki varsayımların yapılması gerekmektedir (Khuri ve Cornell 1987):

1. Bağımlı değişkenleri (ölçülen cevap), bağımsız değişkenleri (giriş değişkeni) bağlayan, $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ yapısındaki fonksiyonun değişkenleri, nicel ve sürekli olmalıdır.

2. RSM'nin başarısı, giriş değişkenlerinin bölgesinde, olası en düşük dereceli bir polinom yardımıyla "f" fonksiyonuna yaklaşıma bağlıdır.

3. İşletim sırasında, bağımsız değişkenler $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ (ihmal edilebilir hatalar olması koşuluyla) kontrol edilebilir ve ölçülebilir olmalıdır.

Fonksiyon yaklaşımı doğrusal (1. dereceden) alınırsa;

$$y = b_0 + b_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Fonksiyon yaklaşımı 2. dereceden alınırsa;

$$y = b_0 + b_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3$$

veya

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k b_{ij} x_i x_j + e$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada;

x_1, x_2, \dots, x_k bağımsız değişkenler,

y: modelin cevabı,

b_0, b_{ii} (I=1,2,...,k), b_{ij} (I=1,2,..., k; j=1,2,...,k): denklemin bulunması gereken katsayıları,

e : hata değeridir.

b bilinmeyen denklem katsayıları, en küçük kareler yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Cevap Yüzey Yöntemi "Response surface" model (RSM), ikinci dereceden bir modeldir ve tüm parametre etkileşimlerini, eğrileri ve lineer olmayan değerleri kapsayabilmektedir. Böylece, RSM dizaynın sonuç yüzeyi hakkında önemli bilgiler verebilmektedir. Bu dizayn yöntemi kullanılarak, optimal dizayn kurulumuna ulaşılabilir. Dolayısıyla, dizayn geliştirilebilir, dizayndaki sorunlar ve zayıf noktalar tespit edilebilir ve böylece dizayn daha güçlü bir hale getirilebilir. En çok kullanılan RSM dizaynları; CCD-central composite dizayn ve Box-Behnken dizayndır.

3. MALZEME ve YÖNTEM

3.1. KLİNKER ÖĞÜTME

Öğütme deneylerinde kullanılan klinker numunesi Sivas Çimpor Tesislerinden temin edilmiştir. Numuneler merdaneli kırıcıda -2 mm'ye indirilmiştir.

3.1.1. Klinker Öğütme Deney Koşulları

Klinker Öğütme deneylerinde kullanılacak standart bilyalı değirmen özellikleri, bilya özellikleri ve numune özelliklerini belirtir deney koşulları Çizelge 3' de özetlenmiştir.

Çizelge 3. Klinker Öğütme Deney Koşulları

DEĞİRMEN	DÖNME HIZI	ÖĞÜTME ORTAMI	NUMUNE
İç çapı, D, mm : 200	Kritik hız, dev/dak. : 102	Cinsi : Çelik bilyalar	Cinsi : Klinker
Uzunluğu, L, mm : 200	Çalışma hızı %60N _k , %70N _k ve %80N _k	Bilya çapı : İnce (13, 20, 25 mm) Orta (25, 30, 35 mm) İri (35, 40, 45 mm)	Özgül ağırlığı, gr/cm ³ :1,983
Hacmi, V, cm ³ : 6283,19		Özgül ağırlık, gr/cm ³ : 7,81	Ağırlığı, gr : 300
		Bilya dolum oranı, J _B : 0,15 - 0,20 - 0,25	Besleme boyutu, µm :- 2000
		Bilya ağırlığı, gr : J _B =0,15 için 4415 gr J _B =0,20 için 5885 gr J _B =0,25 için 7360 gr olarak hesaplanmıştır	Dolum oranı, f _C : 0,04
		Öğütme türü : Kuru	Malzeme-bilya doldurma oranı, U* : 0,5
		Öğütme süresi : 20 dakika	
<p>Silindir Hacmi = $\pi r^2 h$</p> $J_B = \frac{\text{bilya ağırlığı} / \text{bilya yoğunluğu}}{\text{deg irmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6} \quad U = \frac{F_C}{0,4 \times J}$ <p>Kritik Hız: $N_k = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}}$</p> $F_C = \frac{\text{numune ağırlığı} / \text{numune yoğunluğu}}{\text{deg irmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6}$			
*(Bilyalar arası boşluğun cevherle dolma oranı. 0,5 - 1,1 arasında bir değer kabul edilir. Austin ve ark.,1984)			

Klinker öğütmenin optimizasyonu için, bilya çapı, değirmen dönüş hızı ve bilya dolum oranı bağımsız öğütme parametreleri olarak seçilmiş ve bu parametrelerin öğütmeye olan etkileri Taguchi Deney Tasarımı tekniği kullanılarak incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü oranı kullanılmış, deneyler ise Taguchi $L_9 (3^3)$ düzeninde toplam 9 deneyle tasarlanmıştır.

Çizelge 4. Klinker öğütme optimizasyonu için kullanılan bağımsız değişkenler ve seviyeleri

Değişken parametre	Sembol	Değişken seviyeleri		
		Düşük	Orta	Yüksek
		1	2	3
Bilya çapı	<i>A</i>	ince	orta	iri
Değirmen hızı	<i>B</i>	%60N _k	%70N _k	%80N _k
Bilya oranı, J	<i>C</i>	0,15	0,20	0,25

3.1.2. Sabit öğütme şartları:

Besleme boyutu: -2000 μ m

Besleme d_{80} : 930 μ m

Besleme miktarı: 300 gr

Öğütme süresi: 20 dakika

Öğütme türü: kuru

3.1.3. Bağımsız değişkenlerin tanımları:

Bilya çapı (A):

İnce:13mm, 20mm, 25mm

Orta:25mm, 30mm, 35mm

İri:35mm, 40mm, 45mm

Değirmen hızı (B):

$N_k=102$ dev/dak

%60 $N_k \rightarrow 61$ dev/dak

%70 $N_k \rightarrow 71$ dev/dak

%80 $N_k \rightarrow 82$ dev/dak

Bilya oranı (C):

$J=0,15 \rightarrow 4415$ gr

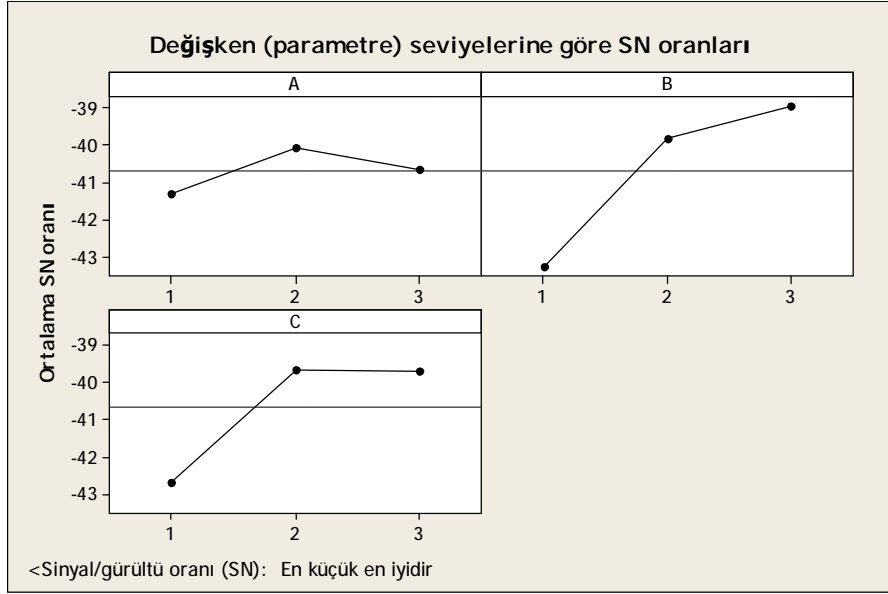
$J=0,20 \rightarrow 5885$ gr

$J=0,25 \rightarrow 7360$ gr bilya kullanılmıştır.

Çizelge 5. Klinker Taguchi Ortogonal Dizayn $L9(3^3)$ ve deneysel d_{80} sonuçları

Deney No	Bağımsız değişkenlerin gerçek ve kod değerleri			Deneysel sonuçlar
	Bilya çapı (mm)	Değirmen hızı (% N_k)	Bilya oranı (J)	d_{80} (μm)
	A	B	C	
1	ince (1)	60 (1)	0,15 (1)	250
2	orta (2)	60 (1)	0,20 (2)	115
3	iri (3)	60 (1)	0,25 (3)	107
4	orta (2)	70 (2)	0,15 (1)	95
5	iri (3)	70 (2)	0,20 (2)	110
6	ince (1)	70 (2)	0,25 (3)	90
7	iri (3)	80 (3)	0,15 (1)	106
8	ince (1)	80 (3)	0,20 (2)	70
9	orta (2)	80 (3)	0,25 (3)	94

Çizelge 5’deki deney tasarım planı ve d_{80} değerleri kullanılarak, en küçük d_{80} değeri en iyidir yaklaşımı ile yapılan Taguchi optimizasyon çalışması sonucu elde edilen S/N oranları değerleri Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2. Klinker öğütme değişken parametrelerin S/N üzerine etkileri

(A- Bilya çapı, B- Değirmen hızı, C- Bilya oranı).

Değişkenlerin çok yanıtlı S/N oranları ve önemlilik dereceleri Çizelge 6’ da verilmiştir.

Çizelge 6. Klinker öğütme için değişkenlerin çok yanıtli S/N oranları ve sıralama (önemlilik) değerleri

Seviye	A	B	C
1	136,67	157,33	150,33
2	101,33*	98,33	98,33
3	107,66	90,00*	97,00*
Fark (max-min)	35,33	67,33	53,33
Sıralama	3	1	2

* Optimum değerler

Çizelge 6' da görülen sıralama değerleri, klinker öğütme sisteminde değişken etkinlik sırasını göstermektedir. Buna göre klinker öğütme sisteminde, B (Değirmen hızı) en etkin parametre (değişken), ikinci önemli parametre C (Bilya oranı) ve üçüncü önemli parametre olarak A (Bilya çapı) görülmektedir.

3.1.4. Optimum parametre değerleri

Taguchi optimizasyon yönteminde; en büyük S/N değerlerini veren parametre seviyeleri optimum değerler olarak alınır. Şekil 2'den de kolayca görülebileceği üzere:

Bilya çapı : orta

Değirmen hızı : %80 N_k

Bilya oranı, (J): 0,25 optimum parametre değerleri klinker öğütme için olarak belirlenmiştir.

Bu durumda d_{80} değeri ise 58 μm olarak tahmin edilmektedir. Çizelge 5' de minimum d_{80} tane boyutunun 70 μm olduğu dikkate alınır, Taguchi optimizasyon yönteminin klinker öğütme sistemine katkısı açıkça görülmektedir.

3.2. MANGAN CEVHERİ ÖĞÜTME

Öğütme deneylerinde kullanılan mangan cevheri psilomelan mineralinden oluşmaktadır ve Sivas/Hafik bölgesinden alınmıştır. Numuneler çeneli ve merdaneli kırıcılar kullanılarak kontrollü olarak -1 mm'ye indirilmiştir.

3.2.1. Mangan Cevheri Öğütme Koşulları

Mangan cevheri öğütme deneylerinde kullanılacak standart bilyalı değirmen özellikleri, bilya özellikleri ve numune özelliklerini belirtir deney koşulları Çizelge 7' de özetlenmiştir.

Çizelge 7. Mangan Cevheri Öğütme Koşulları.

DEĞİRMEN	DÖNME HIZI	ÖĞÜTME ORTAMI	NUMUNE
İç çapı, D, mm : 200	Kritik hız, dev/dak : 102	Cinsi: Çelik bilyalar	Cinsi : Mangan Cevheri
Uzunluğu, L, mm : 200	Çalışma hızı %60N _k , %70N _k ve %80N _k	Bilya çapı: İnce (20 mm, 25mm, 30 mm), Orta (25 mm, 30 mm, 35 mm), İri (30 mm, 35mm, 40 mm)	Özgül ağırlığı, gr/cm ³ : 3,40
Hacmi, V, cm ³ : 6283,19		Özgül ağırlığı, gr/cm ³ : 7,81	Ağırlığı, gr : 515
		Bilya dolum oranı, J _B : 0,15 -0,20-0,25	Besleme boyutu μm :- 1000
		Bilya ağırlığı, gr : 4415 gr, 5885 gr, 7360 gr	Dolum oranı f _C : 0,04
		Öğütme türü : Kuru	Malzeme-bilya doldurma oranı, U* : 0,5
		Öğütme süresi : 15 dakika	
<p>Silindir Hacmi = $\pi r^2 h$</p> $J_B = \frac{\text{bilya ağırlığı} / \text{bilya yoğunluğu}}{\text{deg irmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6} \quad U = \frac{F_C}{0,4 \times J}$ <p>Kritik Hız: $N_k = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}}$</p> $F_C = \frac{\text{numune ağırlığı} / \text{numune yoğunluğu}}{\text{deg irmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6}$			
*(Bilyalar arası boşluğun cevherle dolma oranı: 0,5-1,1 arasında bir değer kabul edilir. Austin ve ark., 1984)			

Mangan cevheri öğütme optimizasyonu için, değirmen hızı, bilya dolum oranı ve bilya çapı bağımsız öğütme parametreleri olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin d_{80} değerlerine olan etkileri Cevap Yüzey Yönteminin Box-Behnken deney tasarım tekniği kullanılarak yapılmıştır. Seçilen bağımsız öğütme parametreleri ve seviyeleri ile toplam 15 deney sayısı belirlenmiştir.

Çizelge 8. Mangan Cevheri Öğütme Optimizasyonu için Kullanılan bağımsız değişkenler ve seviyeleri

Değişken parametre	Sembol	Değişken seviyeleri		
		Düşük	Orta	Yüksek
		-1	0	+1
Değirmen hızı, % N_k	<i>A</i>	%60 N_k	%70 N_k	%80 N_k
Bilya oranı	<i>B</i>	0,15	0,20	0,25
Bilya çapı	<i>C</i>	ince	orta	iri

3.2.2. Sabit öğütme şartları:

Besleme boyutu: -1000 μm

Besleme d_{80} : 0,885 μm

Besleme miktarı: 515 gr

Öğütme süresi: 15 dakika

Öğütme türü: kuru

3.2.3. Bağımsız değişkenlerin tanımları:

Değirmen hızı (A):

$N_k = 102$ dev/dak

%60 $N_k \rightarrow 61$ dev/dak

%70 $N_k \rightarrow 71$ dev/dak

%80 $N_k \rightarrow 82$ dev/dak

Bilya oranı (B):

J=0,15 → 4415 gr

J=0,20 → 5885 gr

J=0,25 → 7360 gr bilya kullanılmıştır

Bilya çapı (C):

İnce: 20 mm, 25 mm, 30 mm

Orta: 25 mm, 30 mm, 35 mm

İri: 30 mm, 35 mm, 40 mm

Çizelge 9. Mangan Box-Behnken dizayn ve deneysel d_{80} sonuçları

Deney No	Bağımsız değişkenlerin gerçek ve kod değerleri			Deneysel sonuçlar
	Değirmen hızı, (% N_k)	Bilya oranı, (J)	Bilya çapı, (mm)	d_{80} , (μm)
	A	B	C	
1	70 (0)	0,20 (0)	Orta (0)	106
2	60 (-1)	0,20 (0)	ince (-1)	140
3	80 (+1)	0,20 (0)	iri (+1)	117
4	70 (0)	0,25 (+1)	iri (+1)	143
5	80 (+1)	0,15 (-1)	orta (0)	163
6	70 (0)	0,20 (0)	orta (0)	150
7	60 (-1)	0,15 (-1)	orta (0)	136
8	80 (+1)	0,20 (0)	ince (-1)	200
9	70 (0)	0,20 (0)	orta (0)	140
10	70 (0)	0,25 (+1)	ince (-1)	188
11	80 (+1)	0,25 (+1)	orta (0)	148
12	70 (0)	0,15 (-1)	ince (-1)	193
13	60 (-1)	0,25 (+1)	orta (0)	138
14	70 (0)	0,15 (-1)	iri (+1)	200
15	60 (-1)	0,20 (0)	iri (+1)	245

Çizelge 9'daki deney tasarım planı ve d_{80} değerleri Cevap Yüzey Yöntemi kullanılarak, değişken parametreler ile d_{80} tane boyutu arasında Matlab bilgisayar programı ile, ikinci dereceden matematiksel bir fonksiyon türetilmiştir. Söz konusu üç bağımsız öğütme değişkeninin kod değerleri ile d_{80} tane boyutu arasındaki ilişki aşağıdaki model denklemden gibidir:

$$d_{80} = 143,67 - 12,75A - 40,63B + 8,38C + 11,17A^2 + 18,92B^2 + 1,42C^2 \\ + 7,25AB - 19,25AC + 11 BC$$

A: Değirmen hızı, % N_k

B: Bilya oranı, J

C: Bilya çapı olmak üzere kodsallı değerleri ifade etmektedir.

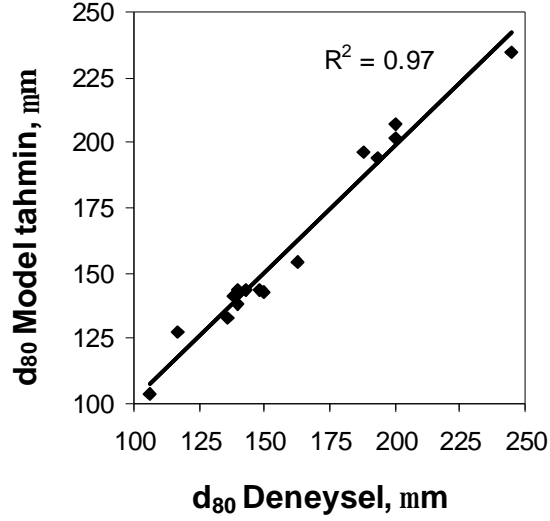
Modelin tutarlılığını göstermek üzere model denklem kullanılarak elde edilen model d_{80} tahmin değerleri ile deneysel d_{80} değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Mangan öğütme için deneysel ve model tahmini d_{80} değerleri

Deney No	$d_{80}, \mu\text{m}$	
	<i>Deneysel</i>	<i>Model Tahmin</i>
1	106	104
2	140	143
3	117	127
4	143	143
5	163	154
6	150	142
7	136	133
8	200	207
9	140	139
10	188	197
11	148	144
12	193	194
13	138	141
14	200	202
15	245	234

İyi bir modelin, cevaptaki değişimin tümünü açıklaması gerekir. Regresyon katsayısı da bu kriter için bir ölçüdür ve model tarafından açıklanan değişimin toplam değişime bölünmesi ile hesaplanır (Khuri ve Cornel, 1987), R^2 değeri 1' e yaklaştıkça deneysel ve model sonucu bulunan değerler arasındaki ilişkinin daha iyi olduğu söylenebilir.

Çizelge 10'daki değerler grafik olarak Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3'den de açıkça görüleceği üzere deneysel d_{80} değerleri ile model tahmini d_{80} değerleri uyumludur. R^2 değeri 0,97 olup, model denklem mangan öğütme sisteminin %97' sini açıklamaktadır.



Şekil 3. Mangan öğütme için deneysel ve model tahmini d_{80} değerleri.

Çizelge 11. Mangan öğütme modeli için varyans analizi(ANOVA) tablosu

	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Ortalama toplamı	Düz.Ort. kareler Top.	F değeri	P
Model	9	18914,8	18914,8	2101,65	19,21	0,002
Linear	3	15064,7	15064,7	5021,58	45,91	0,000
Kareler	3	1673,6	1673,6	557,86	5,10	0,056
Etkileşimler	3	2176,5	2176,5	725,50	6,63	0,034
Kalan hata	5	546,9	546,9	109,38		
Uyumsuzluk	3	514,3	514,3	171,42	10,49	0,088
Teorik hata	2	32,7	32,7	16,33		
Toplam	14	19461,7				

Mangan öğütme için oluşturulan model denkleme ait varyans analizi (ANOVA) tablosu Çizelge 11’de özetlenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere model denklemini oluşturan lineer, kareler ve değişkenlerin birbirileri ile olan etkileşimleri anlamlı düzeydedir.

3.2.4. Optimum parametre değerleri

Model denklem kullanılarak, en küçük d_{80} değerine hangi değişken seviyeleri ile ulaşılabileceğini bulabilmek için Matlab programı yardımıyla quadratik programlama yapılmış olup, elde edilen optimum sonuçların aşağıdaki gibi olduğu belirlenmiştir.

Değirmen hızı (A) : -0.6155 (% 63,85 N_k)

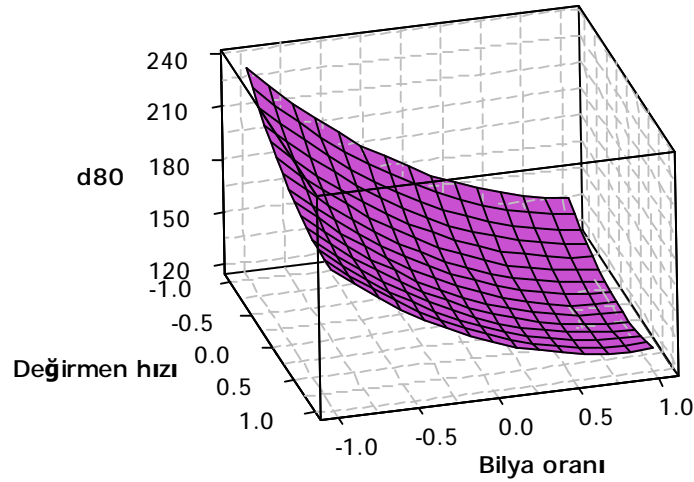
Bilya oranı(B): +1 (J= 0,25)

Bilya çapı(C): -1 (ince)

Bu optimum değerlerde tahmin edilen model tahmini d_{80} değeri ise $99 \mu\text{m}$ dir. Yapılan testlerde en küçük d_{80} değeri (Çizelge 9’da 1’ nolu deney sonucu) $106 \mu\text{m}$ olduğu düşünüldüğünde model denklemin ve optimizasyonun başarısı açıkça görülmektedir.

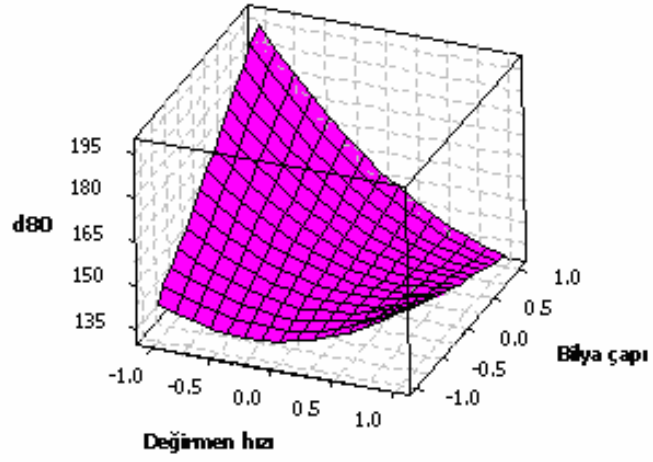
3.2.5. Üç boyutlu (3D) grafikler:

Mangan öğütme için oluşturulan model denklem kullanılarak, bağımsız değişkenler olan değirmen hızı (A), bilya oranı (B) ve bilya çapının (C) birbirleri ile olan ilişkilerininin d_{80} boyutu üzerindeki etkilerini ifade etmek açısından üç boyutlu grafikler (3D) çizilmiştir. Bu grafiklerde bir bağımsız değişken “sıfır” düzeyinde sabit tutularak diğer iki bağımsız değişkenin d_{80} üzerine olan etkileri gösterilmektedir.

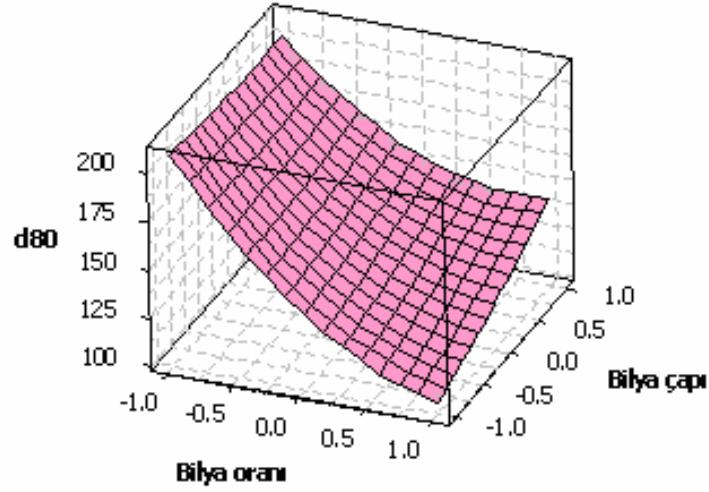


Şekil 4. Değirmen hızı ve bilya oranının d_{80} üzerine etkisi

(Bilya çapı sabit ve 0 (sıfır) seviyesinde).



Şekil 5. Değirmen hızı ve bilya çapının d_{80} üzerine etkisi
(Bilya oranı sabit ve 0 (sıfır) seviyesinde).



Şekil 6. Bilya oranı ve bilya çapının d_{80} üzerine etkisi
(Değirmen hızı sabit ve 0 (sıfır) seviyesinde).

3.3. KALSİT ÖĞÜTME

Öğütme deneylerinde kullanılan kalsit numunesi Sivas Kangal civarından temin edilmiştir. Numuneler birincil çeneli ve merdaneli kırıcılarla kontrollü olarak -1 mm' ye indirilmiştir.

3.3.1. Kalsit Öğütme Koşulları

Kalsit Öğütme deneylerinde kullanılacak standart bilyalı değirmen özellikleri, bilya özellikleri ve numune özelliklerini belirtir deney koşulları Çizelge 12' de özetlenmiştir.

Çizelge 12. Kalsit Öğütme Deney Koşulları

DEĞİRMEN	DÖNME HIZI	ÖĞÜTME ORTAMI	NUMUNE
İç çapı, D, mm : 200	Kritik hız, dev/dak. : 102	Cinsi : Çelik bilyalar	Cinsi : Kalsit
Uzunluğu, L, mm : 200	Çalışma hızı: %60 N _k , %65 N _k , %70N _k , %75N _k , %80N _k ve %85N _k	Bilya çapı : 20 mm, 30mm, 40 mm	Özgül ağırlığı, gr/cm ³ : 2,71
Hacmi, V, cm ³ : 6283,19		Özgül ağırlığı, gr/cm ³ : 7,81	Ağırlığı, gr : 408
		Bilya dolum oranı, J _B : 0,20	Besleme boyutu μm :- 1000
		Bilya ağırlığı : 5880 gr hesaplanmıştır	Dolum oranı f _C : 0,04
		Öğütme türü : Kuru	Malzeme-bilya doldurma oranı, U* : 0,5
		Öğütme süresi :10 dak, 20 dak ve 30 dak	
<p>Silindir Hacmi = $\pi r^2 h$</p> $J_B = \frac{\text{bilya ağırlığı} / \text{bilya yoğunluğu}}{\text{değ irmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6} \quad U = \frac{F_C}{0,4 \times J}$ <p>Kritik Hız: $N_k = \frac{42,3}{\sqrt{D-d}}$</p> $F_C = \frac{\text{numune ağırlığı} / \text{numune yoğunluğu}}{\text{değ irmen hacmi}} \times \frac{1}{0,6}$			
*(Bilyalar arası boşluğun cevherle dolma oranı. 0,5-1,1 arasında bir değer kabul edilir. Austin ve ark.,1984)			

Kalsit öğütme için optimizasyon çalışmaları yapılırken, değirmen hızı, bilya çapı ve öğütme zamanı işletme parametreleri olarak seçilmiş ve bu parametrelerin öğütmeye olan etkileri Taguchi Deney Tasarımı tekniği kullanılarak incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde varyans analizi ve sinyal/gürültü oranı kullanılmış, deneyler ise Taguchi L18 ($6^1, 3^2$) düzenine göre yapılarak, Tam Faktöriyel Deney Tasarımında gereken deney sayısının sadece üçte biri ile (54 yerine 18 deney) hedeflenen sonuçların elde edilmesi mümkün olmuştur.

Kalsit öğütmenin optimizasyonu için kullanılan üç değişken ve bunların seviyeleri Çizelge 13'de verilmiştir.

Çizelge 13. Kalsit öğütme optimizasyon için kullanılan değişkenler ve seviyeleri

Değişken parametre	Sembol	Değişken seviyeleri					
		1	2	3	4	5	6
Değirmen hızı, (dev/dak)	A	%60 N_k	%65 N_k	%70 N_k	%75 N_k	%80 N_k	%85 N_k
Bilya çapı, (mm)	B	20	30	40	-	-	-
Öğütme süresi, (dak)	C	10	20	30	-	-	-

3.3.2. Sabit öğütme şartları:

Toplam bilya ağırlığı: 5880 gr

Besleme miktarı: 408 gr

Besleme boyutu: -1000 μm

Besleme d_{80} : 753 μm

3.3.3. Bağımsız Değişkenlerin Tanımı:

Değirmen Hızı (A) :

$N_k = 102$ dev/dak

%60 $N_k \rightarrow 61$ dev/dak

%65 $N_k \rightarrow 66$ dev/dak

%70 N_k → 71 dev/dak

%75 N_k → 77 dev/dak

%80 N_k → 82 dev/dak

%85 N_k → 87 dev/dak

Bilye Çapı (B):

20 mm, 30 mm, 40 mm.

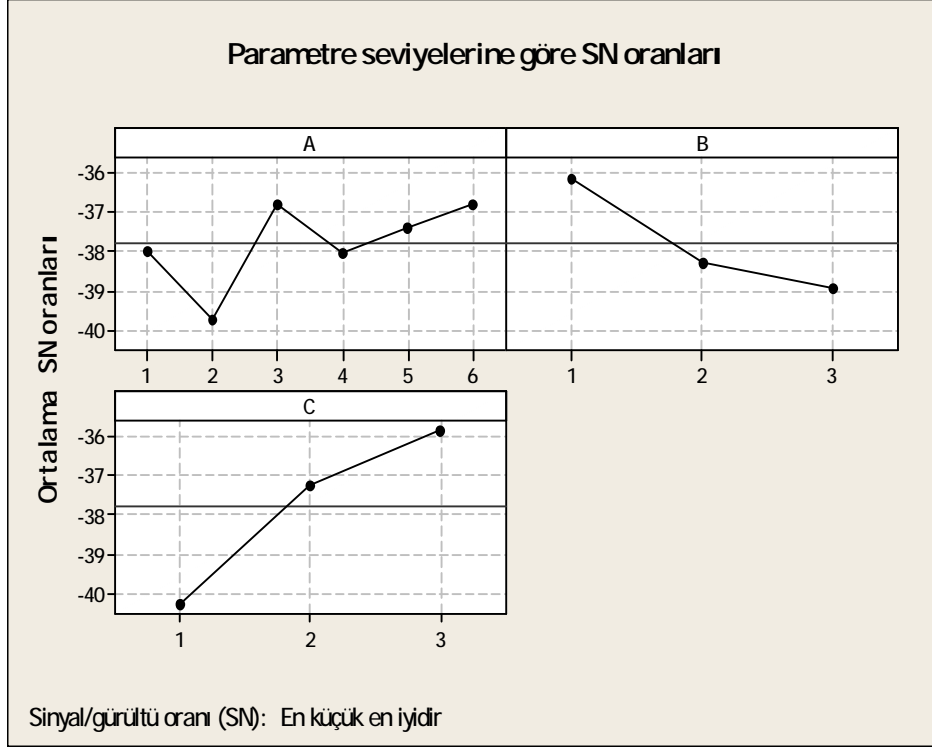
Öğütme Süresi (C):

10 dak, 20 dak, 30 dak.

Çizelge 14. Kalsit öğütme için Taguchi Ortogonal Dizayn L18 ($6^1, 3^2$) ve deneysel d_{80} sonuçları

Bağımsız değişkenlerin gerçek ve kod değerleri				
Deney No	Değirmen Hızı	Bilye Çapı	Öğütme Süresi (dak.)	Deneysel sonuçlar $d_{80}(\mu\text{m})$
	(%N _k)	(mm)		
	A	B	C	
1	60 (1)	20 (1)	10 (1)	81
2	60 (1)	30 (2)	20 (2)	88
3	60 (1)	40 (3)	30 (3)	70
4	65 (2)	20 (1)	10 (1)	136
5	65 (2)	30 (2)	20 (2)	85
6	65 (2)	40 (3)	30 (3)	79
7	70 (3)	20 (1)	20 (2)	55
8	70 (3)	30 (2)	30 (3)	59
9	70 (3)	40 (3)	10 (1)	112
10	75 (4)	20 (1)	30 (3)	53
11	75 (4)	30 (2)	10 (1)	106
12	75 (4)	40 (3)	20 (2)	90
13	80 (5)	20 (1)	20 (2)	53
14	80 (5)	30 (2)	30 (3)	75
15	80 (5)	40 (3)	10 (1)	103
16	85 (6)	20 (1)	30 (3)	45
17	85 (6)	30 (2)	10 (1)	88
18	85 (6)	40 (3)	20 (2)	84

Çizelge 14' deki deney tasarım planı ve d_{80} değerleri kullanılarak, en küçük d_{80} değeri en iyidir yaklaşımı ile yapılan Taguchi optimizasyon çalışması sonucu elde edilen S/N oranları değerleri Şekil 7' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kalsit öğütme değişken parametrelerin S/N üzerine etkileri.

(A- Değirmen dönüş hızı, B- Bilya çapı, C- Öğütme süresi).

Kalsit öğütme için kullanılan değişkenlerin çok yanıtlı S/N oranları ve önemlilik dereceleri Çizelge 15’de verilmiştir.

Çizelge 15. Kalsit öğütme için değişkenlerin çok yanıtı S/N oranları ve sıralama (önemlilik) değerleri

Seviye	A	B	C
1	79,67	70,50*	104,33
2	100,00	83,50	75,83
3	75,33	89,67	63,50*
4	83,00		
5	77,00		
6	72,33*		
Fark (max-min)	27,67	19,17	40,83
Sıralama	2	3	1

* Optimum değerler

Çizelge 15’de görülen sıralama değerleri sistemde değişken parametrelerinin etkinlik sırasını göstermektedir. Buna göre kalsit öğütme sisteminde, C (öğütme süresi) en etkin parametre, A (değirmen hızı) ikinci önemli parametre ve B (bilya çapı) üçüncü önemli parametre olarak sıralanmaktadır.

3.3.4. Optimum parametre değerleri:

Kalsit öğütme için, en büyük S/N değerlerini veren parametre seviyeleri optimum değerler olarak alınır. Şekil 7’den de kolayca görülebileceği üzere:

Değirmen hızı: Seviye 6 (%85 N_k)

Bilya çapı : Seviye 1 (20 mm)

Öğütme süresi : Seviye 3 (30 dak) optimum parametre değerleri olarak belirlenmiştir.

Bu değişken seviyeleri bir tesadüf sonucu Çizelge 14'deki 16 nolu deney koşullarıyla çakışmıştır. Bu koşullarda d_{80} değeri Taguchi optimizasyon yöntemi ile 43,6 μm olarak tahmin edilmiştir. Deneysel sonuçlarda en küçük d_{80} değerinin 16 nolu deneyde elde edilen 45 μm lik değere çok yakın olması yapılan optimizasyon işleminin anlamlılığını ortaya koymaktadır.

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan üç farklı materyal (klinker, mangan ve kalsit)'in bilyalı değirmen ile kuru olarak öğütülmesinin modellenmesi ve optimizasyonu yapılmıştır. Klinker ve kalsit öğütme sistemi için Taguchi metot, mangan öğütme sistemi için ise Cevap Yüzey Yöntemi kullanılmıştır. Her materyal öncelikle kırıcılar kullanılarak belirli tane boyutuna indirilmiş, daha sonra öğütme sistemi için önemli olabilecek değişken parametreler ve seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra farklı deneysel tasarım yöntemlerine göre deney planları hazırlanmış olup, bu deney planlarına göre laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen kullanılarak, kuru öğütme deneyleri yapılmıştır. Her bir deney sonucunda elde edilen ürünün d_{80} tane boyutu değerleri, elek analizleri ile belirlenmiştir.

Öğütme sistemlerinde elde edilen deneysel veriler kullanılarak işletme parametreleri ve bunların etkileşimlerinin d_{80} tane boyutu üzerine olan etkileri belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen verilerle, modelleme sonucu elde edilen tahmini verilerin uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu çalışma, Taguchi Optimizasyon Metot ve Cevap Yüzey Yöntemi (RSM)'nin bazı öğütme sistemlerinin modellenmesi ve optimizasyonunda efektif olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Klinker öğütme sistemi için; orta çap bilya, %80 N_k değirmen hızı ve 0,25 bilya doluluk oranı optimum parametre değerleri olarak belirlenmiştir. Bu optimum koşullarda d_{80} tane boyutu değeri 58 μm olarak tahmin edilmektedir. Yapılan denelerdeki en iyi d_{80} tane boyutunun 70 μm olduğu dikkate alınır, Taguchi optimizasyon yönteminin klinker öğütme sistemine katkısı açıkça görülmektedir.

Mangan cevherinin modellenmesi ve optimizasyonu için Cevap Yüzey Yöntemi kullanılmış olup, öğütme için: %63,85 N_k değirmen hızı, 0,25 bilya oranı ve ince bilya çapının optimum değerler olduğu bulunmuştur. Bu optimum değerlerde tahmin edilen d_{80} değeri ise 99 μm dir. Yapılan testlerde en küçük d_{80} değeri 106 μm olduğu düşünülürse oluşturulan modelin ve optimizasyonun başarısı açıkça görülmektedir.

Kalsit öğütme sistemi için ise: %85 N_k lık değirmen hızı, 20 mm bilya çapı ve 30 dakikalık öğütme süresi optimum parametre değerleri olarak belirlenmiştir. Bu değişken seviyeleri bir tesadüf sonucu yapılan bir deney koşulları ile çakışmış olup, bu koşullarda d_{80} değeri Taguchi optimizasyon yöntemi ile 43,6 μm olarak tahmin edilmiştir. Deneysel olarak aynı koşullarda bulunan d_{80} değeri ise 45 μm dir. Deneysel sonuç ile optimizasyon sonucu tahmin edilen değerlerin çok yakın olması yapılan optimizasyon işleminin anlamlılığını ortaya koymaktadır.

5. KAYNAKLAR

- Aslan, N., ve Cebeci, Y., “Application of Box-behnken Design and Response Surface Methodology for Modeling of Some Turkish Coals ” *Fuel*, Volume 86, Issues 1-2, Pages 90-97, 2007.
- Aslan, N., Modeling and optimization of Multi Gravity Separator to produce celestite concentrate, *Powder Technollogy*, Volume 174 (2007) 127–133.
- Austin, L.G., Klimpel, R.R., and Luckie, P.T., *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*, AIME, New York, USA, 1984.
- Bond, F.C., 1961, “Crushing and Grinding Calculation”, *Allis-Chalmers Industrial Pres Department*.
- Charles, R.J., 1952, “Energy Size Reduction Relationship in Comminution” *Tras. AIME*, 208, 80-88.
- Ellerbrock, H.G., Mathiak. H.,1994, *Zement-Talk-Gips Dergisi*, 9-1994.
- Ersayın, S., Aksarı, B., “Yaş ve Kuru Öğütmenin Boyut Küçültme İşleminin Kinetik Parametreleri Üzerine Etkisi”, *Türkiye 12.Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongre*, Mayıs, 1991, Ankara.
- Herbst, J.A., Chairman, 1981, “Comminution and Energy Conseiruation” *Dept. Of Energy, Nationals Materials Advisory Board, Committee On Comminution and Energy Consumpiton*, Publication Nm+FB-364, *National Academy Pres*, Washington, D.C.
- Holmes, J.A., 1957, “A Contribution to the Study of Comminution: a Modified From of Kick’s Law”, *Trons. Ins. Chem. Eng.*, 35, 125-156.
- İpekoğlu, Ü., 1989, *Cevher Hazırlama*, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi MMF/MAD-89 EY 179*, İzmir.
- Kinasevich, R.S., Fuerstenau, D.W., 1964, “Research on the mechanism of comminution in tumbling mill”, *Canadian Metal Q3*, 1-20.
- Khuri, A.I., and Cornell, J.A., “*Response Surfaces: Design and Analysis* ” *Marcel, Dekker*, New York, 1987.
- Lynch, A.J., 1977, “*Mineral Crushing and Grinding Circuit*” *Elsevier Scientific Publishing Com*.
- A.L. Martinez, A.S, Uribe, F.R.P. Carrillo, J.A. Coreno, J.C. Ortiz, Study of celestite flotation efficiency using sodium dodecyl sulfonate collector: factorial experiment and statistical analysis of data, *International Journal of Mineral Processing* 70 (2003) 83–97.
- Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, *John Wiley & Sons Inc.*, A.B.D., 1991.
- D.P. Obeng, S. Morrell, T.J. Napier-Munn, Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone, *International Journal of Mineral Processing* 76 (2005) 181–192.
- Öner, M., “Çimento ve Beton Endüstrisinde Eski Düşünceler Yeni Öğütme Teknolojilerine Dönüşüyor 1.Bölüm ”, *Çimento ve Beton Dünyası*, sayı:2, 1999.
- Taguchi, G., *System of Experimental Design Quality Resources*: New York, vol.1, 1987.
- Yıldız, N., 1999, “Öğütme Teorisi, Uygulaması Değirmen ve Sınıflandırıcılar” *Kozan Ofset 1.Baskı*, Ankara.