

**GRANİT SERAMİK ÜRETİM PROSESİNDE
ÖĞÜTME ÖNCESİ BOYUT KÜÇÜLTMENİN
ENERJİ TASARRUFUNA
KATKISININ ARAŞTIRILMASI**

Özkan BAŞKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart 2006

**THE EFFECT OF PRE-COMMINUTION
ON THE ENERGY SAVING IN
PORCELAIN STONEWARE BODY PREPARATION**

Özkan BAŞKAN

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

March 2006

**GRANİT SERAMİK ÜRETİM PROSESİNDE
ÖĞÜTME ÖNCESİ BOYUT KÜÇÜLTMENİN
ENERJİ TASARRUFUNA
KATKISININ ARAŞTIRILMASI**

Özkan BAŞKAN

**Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Cevher Hazırlama Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.**

Danışman: Doç. Dr. Volkan BOZKURT

Mart 2006

Özkan BAŞKAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Granit Seramik Üretim Prosesinde Öğütme Öncesi Boyut Küçültmenin Enerji Tasarrufuna Katkısının Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye:

Üye:

Üye:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun.....tarih ve
sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Taneli malzeme yığınlarının basınç altındaki yüzeyler arasında öğütülmesi prensibine dayanan Yüksek Basınçlı Merdaneli Pres (YBMP) uygulamaları, son yıllarda öğütme devrelerinde kapasite iyileştirmelerine ve enerji tasarruflarına olanak sağlamalarından dolayı popülaritelerini arttırmışlardır. YBMP'lerde tane yığınlarının öğütme mekanizması, tanelerin merdaneler arasından geçerken, bu taneler arasında oluşturulan yüksek gerilimin sonucu olarak tane boyutunun küçültülmesi şeklindedir. Çimento ve cevher hazırlama endüstrilerinde YBMP uygulamaları daha çok klasik bilyalı öğütme sürecinden önce bir ön öğütme süreci şeklindedir. Bu hibrid öğütme sistemi, YBMP'nin kapasitesinden ve enerji etkinliğinden faydalanılırken, diğer taraftan klasik bilyalı öğütmenin yüksek küçültme oranlarından faydalanılmaktadır. Bu sistemin başarısı, YBMP ön öğütme sürecinde bir kısım malzemenin hali hazırda istenilen nihai boyuta küçültülmesi ve diğer tanelerin de bu süreçten geçerken taneler arasındaki gerilimler sonucu oluşturulan zayıf noktaların klasik bilyalı değirmendeki öğütülmesine kolaylık sağlaması şeklindedir.

Bu çalışmada, granit seramik bünyenin öğütülmesi iki değişik öğütme sisteminde denenmiştir. Klasik sistemde, bünye doğrudan hızlı değirmende öğütülmüştür. Hibrid sistemde ise, bünye önce merdaneli kırıcı kullanılarak kırılmış daha sonra hızlı değirmende öğütülmüştür. Tüketilen özgül enerjiler her iki öğütme sistemi içinde belirlenmiştir. Belirlenen enerji değerleri karşılaştırıldığında, hibrid öğütme sisteminde klasik öğütme sistemine göre %41,4 daha az enerji tüketildiği bulunmuştur. Ayrıca, bu iki öğütme sisteminin, nihai seramik ürünlerin bazı teknolojik özellikleri üzerine etkisi de incelenmiş ve öğütme sistemi farklılığının ürünlerin teknolojik özelliklerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı bulunmuştur.

SUMMARY

High-pressure roll grinding has achieved considerable popularity over the last several years given its potential of improving capacity and reducing energy consumption in a grinding circuit. Comminution in the High-Pressure Grinding Roll (HPGR) is the result of the high interparticle stresses generated when a bed of solids is compressed as it moves down the gap between two pressurized rolls. A particularly attractive use of the HPGR in the minerals and cement industries is as a pre-grinding stage prior to conventional ball milling. In this hybrid mode, the energy efficiency of high-pressure roll grinding is combined to the ability of the ball mill in achieving high reduction ratios. It was pointed out that the success of the hybrid mode of grinding would depend on the HPGR producing already a fraction of the circuit product and weakening those particles remaining unbroken.

In this study, grinding tests with porcelain stoneware body were carried out in two modes. In the conventional mode, porcelainized stoneware body was ground in the fast mill directly. In the hybrid mode, the same material was first crushed using roll crusher and then subsequently ground in the fast mill. Specific energy consumptions were determined for both modes. Comparing the results it was found that hybrid grinding system offers 41.4% of energy saving. In addition, the effect of different grinding modes on some important properties of ceramic products were also investigated and it was found that different grinding modes did not have a significant effect on the properties of ceramic products.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren, ilgi, bilgi ve her konuda desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Volkan BOZKURT'a teşekkürü borç bilirim.

Yine bu tezin vücut bulmasında büyük pay sahibi olan Sayın Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ'a, Termal Seramik A.Ş. ARGE Bölüm Müdürü Sayın Kağan KAYACI'ya katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi her konuda en büyük destekçim, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan aileme de şükranlarımı sunarım.

Mart 2006
Özkan BAŞKAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. GRANİT YER KAROSU ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER..	3
2.1 Sınıflandırma	3
2.2 Granit Bünyeyi Oluşturan Ana Hammaddelerin Mineralojik ve Teknolojik Özellikleri	5
2.2.1 Kuvars	5
2.2.2 Feldspat	6
2.2.3 Kil	8
2.2.4 Kaolen	11
2.2.5 Diğer hammaddeler.....	12
3. GRANİT SERAMİK KARO ÜRETİM TEKNOLOJİSİ.....	14
3.1 Hammadde ve Çamur Hazırlama.....	15
3.2 Öğütme.....	16
3.3 Granülasyon	18
3.4 Şekillendirme	19
.....	
3.5 Pişirme	20
4. BOYUT KÜÇÜLTME	21
4.1 Genel Bilgiler.....	21
4.2 Kırılmanın Fiziği.....	21
4.3 Ufalama İlkeleri	25
4.4 Ufalamada Enerji-Boyut Küçültme İlişkileri	28

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
5.1 Kullanılan Malzemeler	37
5.2 Yöntem.....	38
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	42
6.1 Özgül Enerji Ölçümleri.....	42
6.2 Teknolojik Testler.....	45
7. ÖNERİLER	47
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Granit Seramik Karo Üretimi Proses Akım Şeması.....	14
4.1 Çekme ve basma kuvvetlerinin oluşturduğu bir kristal kafesin birim deformasyonu.....	25
4.2 Çatlak ucundaki gerilim birikmesi	26
4.3 Kırılma ile parçalanma.....	27
4.4 Ufalamada parça boyutu ve enerji girdisi arasındaki ilişki	36
6.1 Reçetenin tane boyut dağılımı.....	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Seramikte hammadde olarak kullanılacak feldspatlarda aranan özellikler	8
5.1 Granit karo reçete hammaddeleri	37
5.2 Granit karo reçete kimyasal analizi	37
6.1 Orijinal ve kırılmış reçetenin tane boyut dağılımı.....	42
6.2 Seramik ürünlerin teknolojik özellikleri.....	46

1. GİRİŞ

Türkiye'de seramik sanayi hızlı bir şekilde gelişmektedir. Bunun nedeni, ülkemizde hammaddelerin rezerv ve kalite açısından yeterli olması, ucuz işçilik imkanları ve piyasa talebinin büyük oluşu, bu sektörü yatırımcılar için cazip hale getirmiştir. Seramik sektörü inşaat sektörü ile paralel olarak büyümektedir. Ülkemizdeki konut açığının çok fazla olduğu düşünülürse bu sektöre yatırım yapmanın ne kadar cazip olduğu görülür.

Seramik sanayinin Eskişehir, Bilecik ve Söğüt'te gelişmesinin başlıca sebepleri ise, hammadde kaynaklarına olan yakınlığı, ulaşım açısından merkezi konumda bulunması, işgücü potansiyelinin çok oluşu ve enerjinin kolay ulaşmasıdır.

Seramik üretiminde temel amaç dünya standartlarına uygun iyi kalitede yer ve duvar karosu üretmektir. Bugünkü rekabet ortamında üretim maliyetleri de optimum seviyelerde olması gerekir. Aksi halde ayakta durmaları mümkün değildir. Söz konusu hedefe ulaşabilmek için seramik üreticileri iyi kalitede hammadde kullanmalı, üretim anında proses kontrolleri iyi olmalı, üretim öncesi ve sonrası gerekli testler çok iyi yapılmalıdır.

Granit seramik karo üretim teknolojisi, tek pişirimli karo teknolojileri sınıfına dahil bir kaplama malzemesi üretim disiplini. Granit seramik karoların en belirgin özellikleri, üretim süreçlerinde sır kullanılmamasıdır. Malzeme, sır ve bünye olarak iki tabakadan değil, sadece sır özelliği kazandırılmış bünyeden oluşmaktadır. Bu yekpare yapı, sır gibi renklendirilmeye ve yüksek sıcaklıklarda pişirilerek sıfır poroziteye düşürülmeye çalışılmıştır. Dolayısıyla granit seramik karonun pişirim maliyetlerinin seramik karolardan fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu maliyetleri azaltıcı alternatif çözümlerden birisi şüphesiz hammadde öğütme maliyetlerinin azaltılmasıdır.

Katı tanelerin elastik sınırlarını aşacak düzeydeki germeler sonucu yenilerek daha küçük boyutlara indirgenmesi, bir diğer deyişle yeni yüzeylerin oluşması ufalama, ufalamanın da son aşaması öğütme olarak tanımlanmaktadır. Bilindiği gibi öğütme enerji yoğun bir işlemdir. Günümüzde tüm dünyada üretilen elektrik enerjisinin %5

kadarı öğütmede harcanmaktadır (Öner, 1996). Bu göz önüne alındığında, enerji tüketiminde sağlanacak en az tasarruf dahi, üretim maliyetlerinin azaltılmasına, dolayısıyla öz kaynakların daha tasarruflu kullanılmasına olanak sağlayacaktır (Fuerstenau vd., 1999).

Taneli malzeme yığınlarının basınç altındaki yüzeyler arasında öğütülmesi prensibine dayanan yüksek basınçlı merdaneli pres (YBMP) uygulamaları, son yıllarda öğütme devrelerinde kapasite iyileştirmelerine ve enerji tasarruflarına olanak sağlamalarından dolayı popülaritelerini arttırmışlardır. YBMP'lerde tane yığınlarının öğütme mekanizması, tanelerin merdaneler arasından geçerken, bu taneler arasında oluşturulan yüksek gerilimin sonucu olarak tane boyutunun küçültülmesi şeklindedir. Çimento ve cevher hazırlama endüstrilerinde YBMP uygulamaları daha çok klasik bilyalı öğütme sürecinden önce bir ön öğütme süreci şeklindedir. Bu hibrid öğütme sistemi, YBMP'nin kapasitesinden ve enerji etkinliğinden faydalanılırken, diğer taraftan klasik bilyalı öğütmenin yüksek küçültme oranlarından faydalanılmaktadır. Bu sistemin başarısı, YBMP ön öğütme sürecinde bir kısım malzemenin hali hazırda istenilen nihai boyuta küçültülmesi ve diğer tanelerin de bu süreçten geçerken taneler arasındaki gerilimler sonucu oluşturulan zayıf noktaların klasik bilyalı değirmendeki öğütülmesine kolaylık sağlaması şeklindedir (Tavares, 2005; Aydoğan vd., 2006). Bu sistemde çimento klinkerinin öğütülmesinde %20-50 enerji tasarrufu sağlanmıştır (Apling ve Bwalya, 1997).

Hibrid öğütme sisteminin etkisinin, yoğun bir öğütme sürecinin gerçekleştirildiği seramik sektöründe de denenmesinde fayda vardır. Granit seramik karo üretiminde öğütme seramik hammaddelerinin boyutunun küçültülmesi ve homojenizasyonu amacıyla yapılmaktadır. Öğütme derecesi bünyenin pişme sırasında camlaşma davranışını etkilemektedir. Granik karo bünye hazırlanmasında klasik süresiz ve sürekli bilyalı öğütme sistemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, granik seramik bünye hazırlanmasında klasik ve hibrid öğütme sistemlerinin tüketilen enerji ve nihai ürün kalitesi bakımından karşılaştırılmasıdır.

2. GRANİT YER KAROSU ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

2.1 Sınıflandırma

Granit yer karosu üretiminde kullanılan hammaddeler, özlü (plastik) ve özsüz (plastik olmayan) olmak üzere 2 ana grup altında toplama mümkündür.

Özlü seramik hammaddeleri; su ile yoğrulabilen, dağılmadan kolaylıkla şekillendirilebilen ve kurdukları zaman verilen şekli koruyabilen hammaddelerdir. Feldspatların asidik ortamda bozunması sonucu oluşan kaolen, kaolenlerin doğal olaylarla taşınıp başka yerlerde yataklanması sonucu oluşan killer ve bazik ortamda feldspatların bozunması ile oluşan bentonit mineralleri özlü seramik hammaddeleridir.

Özsüz seramik hammaddeleri; su ile karıştırıldıklarında kolayca şekil verilemeyen, şekil verilse bile bir dış etkenle şekillerini kolayca kaybedip dağılan maddelerdir. Kuvars, feldspat, talk, magnezit ve dolomit bu gruba girmektedir (Avcı, 1998).

Özlü ve özsüz seramik hammaddelerinin daha ayrıntılı şekilde sınıflandırılmış hali aşağıda verilmiştir [3]:

I. Özlü (Plastik) Hammaddeler

- Kil, kaolen, bentonit

II. Özsüz (Plastik Olmayan) Hammaddeler

A. Anorganik Özsüz Hammaddeler

- Silis grubu mineraller
 - Kuvars
 - Opal
 - Kalsedon

- Feldspat
 - Alkalen feldspat (potasyumlu feldspat)
 - Plajiyoklas (sodyumlu feldspat)

- Pegmatit ve feldspatlı kum

- Korund

- Dolomit

- Mermer+kireçtaşı+dolomit

- Boksit

- Andaluzit-Silimanit-Disten

- Bor mineralleri (boraks,tinkal, kolemanit,pandermit)

- Fluorit

- Talk

- Vollastonit

- Magnezit

- Pirofilit
- Yapay özsüz hammaddeler
 - Şamot
 - Kalsiyum karbür
 - Zirkon oksit – Zirkon silikat

B. Organik Katkı Maddeleri

- Kömür, odun kömürü, grafit, talaş vb.

2.2 Granit Bünyeyi Oluşturan Ana Hammaddelerin Mineralojik ve Teknolojik Özellikleri

2.2.1 Kuvars

Hekzagonal sistemde kristalleşmiştir. Kimyasal bileşimi SiO_2 (Si : %46.7 , O : %53.0) olup, mol ağırlığı 60'dır. Kuvarsa ait fiziksel özellikler aşağıda belirtilmiştir :

- **Sertlik** : Sertlik derecesi Mohs'a göre 7'dir.
- **Yoğunluk** : Yoğunluğu 2.65 gr/cm^3 'tür.
- **Renk** : Renksiz ve çeşitli renklerde (sarı, açık veya koyu gri vb.) olabilir.
- **Kırılma** : Kuvars, konkoidal (gelişigüzel) kırıklıdır.
- **Dilinim** : Kuvars, kayaç içinde gelişigüzel taneler halinde bulunur. Bu nedenle de belli bir dilinimleri yoktur.

Kuvars minerali çok çeşitlidir. Kuvarsın birtakım modifikasyonları vardır. Örneğin; α kuvars, β kuvars, tridimit, kristobalit gibi. Bu kuvars çeşitlerinin her birinin oluşum ısıları farklıdır. Bunlar ısıtma ve pişirme esnasında birbirine dönüşürler.

Dönüşümler esnasında 2.7 ile 7.0 arasında bir hacim değişimi olduğundan, kritik dönüşüm noktalarında kolaylıkla çatlamlar olur. Bu dönüşüm noktaları şu şekildedir;

α -kuvars (573-870°C) \Rightarrow β -kuvars (870-1470°C) \Rightarrow Tridimit (1470-1713°C) \Rightarrow Kristobalit

Kuvarın granit seramik karo yapımında kullanım nedenleri aşağıda maddeler halinde sayılmıştır:

- Çamura konulan kuvars miktarı arttıkça, çamurun sertliği artar.
- Ne kadar ince öğütülmüş ise tesiri o kadar fazla olur.
- Seramik hammaddelerinin hepsi ısı karşısında hacim olarak küçülürken, kuvars büyür ve böylece yapının kuru küçülmesini azaltır.
- Plastik olmayan ve yapıyı yüksek sıcaklıklarda ayakta tutan bir hammaddedir. Plastikliği düzenlemeye yardımcı olmasından dolayı kullanılır.
- Pişme sırasında deformasyon olmaksızın gaz çıkışına izin verir.
- Kuvars ısıtıldığında kristal şeklini değiştirir yani çeşitli modifikasyonlara dönüşür. Bu sebeple kritik ısı geçişleri sırasında dikkatli olunmalıdır [3,4].

2.2.2 Feldspat

Kristalin kayalardaki en yaygın mineraldir. Sertliği 6.0-6.5 mohs ve yoğunluğu 2.6 gr/cm³ civarındadır. Feldspatlar; potasyum, sodyum, kalsiyum ve baryum alüminyum silikatlardır. Kimyasal yönden katyon türlerine bağlı olarak K-Feldspatlar (ortoklas, K₂O.Al₂O₃.6SiO₂), Na-Feldspatlar (albit, Na₂O.Al₂O₃.6SiO₂), Ca-Feldspatlar (anortit, CaO.Al₂O₃.6SiO₂), Ba-Feldspatlar (celsian, BaO.Al₂O₃.6SiO₂) ve Sodyum-Potasyum feldspatlar (Na₂O.K₂O.3Al₂O₃.22SiO₂) şeklinde isimlendirilirler.

Bunlardan en nadir olarak bulunan feldspat minerali Ba-feldspattır. Bu nedenle feldspatlar, bileşenlerini ortoklas, albit ve anortitinin meydana getirdiği üç bileşenli sistemde incelenebilir. En çok rastlanan ve seramik sektöründe kullanılan feldspat mineralleri ortoklas ve albittir. Ortoklas saf halde %16.9 K₂O ve albit %11.9 Na₂O içeriğine sahiptir. Seramik sektöründe kullanılan feldspatların çoğu ise bu iki mineralin karışımı şeklinde olmaktadır.

Kimyasal olarak WZ₄O₈ şeklinde formülize edilebilir. Burada W: Sodyum, potasyum, kalsiyum, baryum ve Z: Silis ve alüminyumunu temsil eder. Si:Al oranı 3:1 ile 1:1 arasında değişir.

Feldspatların içinde demirli bileşikler de bulunur. Bunlar ötektik sıcaklığı düşürür ve üründe lekelenmelere neden olur. Bunun için feldspatlar mümkün mertebe zenginleştirildikten sonra kullanılmalıdır.

Feldspatların granit seramik bünye içinde kullanım nedenleri aşağıda belirtilmiştir:

- Feldspatların seramik bünyelerde kullanılmasının nedeni K₂O, Na₂O, CaO bileşiklerini çamura kazandırmaktır. Seramik yapıdaki cam faz, bu oksitlerin yardımı ile sağlanmaktadır. Bunların eriticilik özelliklerinden faydalanılarak pişme esnasında kuvars ile birlikte cam faz oluşturulur

- Feldspat 1165 - 1250°C' de erimektedir ve massenin eriyebilen akışkanlarındandır

- Çamurda feldspat oranının arttırılması, kaolenin erime noktasını ve mukavemetini düşürür.

- Yaklaşık 1040°C'de pekiştirici (sertleştirici) rol oynar ve 1200°C'nin üstünde eriyerek massenin mukavemetini arttırır, poroziteyi düşürür.

- Pişme sırasında eriyerek, erimeyen maddeler arasındaki boşlukları (porları) doldurarak massenin pürüzsüzlüğünü sağlarlar.

- Fazla feldspat içeren karışım madde (masse) üzerinde pembe benekler oluşabilmektedir.

- Feldspat, diğer maddelere göre pahalı olduğundan karışıma az miktarda katılır.

- Feldspatların ince öğütülmesi (ortalama $-74\mu\text{m}$) ve pişme renklerinin beyaz olması gerekmektedir.

- Seramikte hammadde olarak kullanılacak feldspatlarda aranan özellikler aşağıda verilmiştir [3,4].

Çizelge 2.1 Seramikte hammadde olarak kullanılacak feldspatlarda aranan özellikler

K_2O	%8'den fazla olmalı
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	%10'dan fazla olmalı
Fe_2O_3	%1.5'den az olmalı
$\text{TiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO}$	%1.5'den az olmalı
Nem	%3.3'den az olmalı

2.2.3 Kil

Kil; çoğunlukla sulu alüminyum silikat minerallerinden (albit, ortoz vb.) oluşan, yeterince ıslatıldığında plastik, kütle olarak kurutulduğunda sert ve yeterince yüksek ısıda pişirildiğinde camsılaşan doğal bir hammaddedir.

Kil yatakları, daha önceden oluşmuş kaolen yataklarının killi şist, grovak ve feldspat bakımından zengin kayaçların fiziksel ve kimyasal ayrışması sonucu, ayrışan bu malzemelerin tatlı su havzalarına taşınmasıyla oluşur ve tabakalar halinde bulunur. Eğer taşınma ve aşınma süresi kaolenleşmenin tam olmasına imkan verecek kadar uzun değilse meydana gelen kil ve kaolen yatakları homojen değildir. Kil yataklarının materyalinde tane inceliği, plastisite ve ateşe dayanıklılık gibi değişiklikler görülebilir. Denizlerde oluşan kil yatakları zamanla killi şist tanelerine dönüştüklerinden ekonomik değerleri yoktur.

Kil mineralleri 4 ana gruba ayrılmaktadır:

Kaolinit grubu : Sulu alüminyum silikatlarıdır ve $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ şeklinde formülize edilmektedir. Elektron mikroskopta ince levhalar halinde görülür. Hekzagonal sistemde kristalleşmiştir. Feldspatların asidik ortamlardaki sıcak, soğuk ve hidrotermal eriyiklerin direkt etkisiyle oluşur.

Montmorillonit grubu : Bu gruba dahil kil mineralleri daha çok alkali ve toprak alkali tuzlardan oluşur. Bunlar tabakalar arasına girerek, o tabakaların hacimlerinin artmasına neden olur. Beyaz, sarı, açık yeşil, mavimsi ve siyahımsı renkte olabilirler. Plastik olmalarına karşın, pişme renkleri taşıdıkları safsızlıklar nedeniyle koyu olduğundan seramik sanayiinde az kullanılırlar. Montmorillonit grubu minerallerin su emmesi çok karakteristiktir. Su emdiği takdirde hacmi 10-15 kat artar.

İllit grubu : K_2O içeren, mika kökenli oldukça plastik killerdir. Potasyumca zengin ortamlarda oluşurlar. Elektron mikroskopta ufak, yassı ve düzgün olmayan levhalar şeklinde görülür. Atom yapısı montmorillonite benzer, fakat silika tetrahedronlarında daha fazla alüminyum silisin yerini almıştır.

Klorit grubu : İç yapısı, illite benzer. İnce taneli ve yeşil renklidirler. Sekonder mineraller grubuna girer.

Granit seramik karo reçetesinde kullanılacak killerde Şu parametreler göz önüne alınmaktadır :

- Plastisite
- Pişme rengi
- Su emme derecesi
- Bağlama kuvveti
- Mukavemeti
- Geçirimsizlik (permeabilite)
- Kclme ve çeşitli sıcaklıklardaki durumu
- İçeriğindeki karbonat miktarının azlığı veya çokluğu

Killerin granit seramik çamurunda kullanılmasının başlıca nedenleri Şu Şekilde sıralanabilir :

- Killerin plastiklik özelliği, hammaddenin hamur gibi yoğrulabilmesini sağlayan bir özelliktir.

- Plastik olduklarından, massenin kuru mukavemetini arttırlar (kuru mukavemet, çamurun kuruduktan sonra kazandığı mukavemettir).

- Daha abuk sinterleŐmeyi (pişme sırasında oluşan sertlik) sağlarlar.

- Killer, sulu seramik çamurlarında süspansiyon malzeme görevini üstlenirler. Bu özelliklerinden dolayı kendileri yavaş okerken, diğer kolay ken ağır malzemeleri de taŐıyarak karışımın çökmesini geciktirirler.

- Al_2O_3 ve SiO_2 miktarı arttığa ısıya dayanım özellikleri de artar. Bu tip killerin pişme renkleri de daha beyaz olur.

- Fe_2O_3 ve MnO_2 miktarının artması ile sinterleŐme azalır. Bu tip killerin pişme renkleri ise kahverengi ve kırmızı olur [3,4].

2.2.4 Kaolen

Kaolen, alkali feldspatların bozuşması ile meydana gelen alüminyum hidrosilikattır. Kile göre daha saf bir kaolinit olup, bünyesinde killerde olduğu kadar çok yabancı organik ve anorganik maddeler bulunmaz. Bu nedenle daha yüksek ısılara dayanıklı ve pişme renkleri daha beyazdır. Kimyasal yönden bileşimi $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ 'dur.

Kaolen oluşumu sırasında asit karakterli hidrotermal eriyiklerin etkisiyle feldspatların içindeki SiO_2 'nin bir kısmı ile sodyum ve potasyumun tamamı kaybolur. Böylece mineral bünyesine bir miktar su girer ve kaolinit minerali oluşur. Yani kaolenleşme; alkali silikatlardan, alüminyumlu hidrosilikatların oluşması olayıdır.

Kaolenleşme olayına, feldspat ile birlikte bulunan kuvars, mika grubu mineraller ve demirce zengin mineraller de değişik biçimlerde katılırlar. Feldspat grubu mineraller ile bu mineral gruplarının ayrışması sonucu açığa çıkan silis ile kayaç içinde serbest silis olarak bulunan kuvarsın birleşmesi sonucu opal oluşur.

Damar halinde bulunan opalin kaolenden ayrılması daha kolaydır. Çok ince taneli kuvars içeren kaolenleşmiş kayaçlarda açığa çıkan silis, kaolen yatağını silis çimentosu ile çimentolaştıracığından kaolenleşmiş ana kayaç ve dolayısıyla kaolen yatağı sertleşir.

Kaoliniti meydana getiren iyonlar kuvarsça zengin ortamdan fazla uzaklaşamazlar. Bu bakımdan ana kayaç kuvarsça zenginse, kaolinit mineralince de zengindir. Kayaçın mineralojik bileşiminde yer alan potasyum, demir ve magnezyumca zengin mineraller de hidrotermal eriyiklerin etkisiyle hidrate olurlar. Bir kaolen yatağının ekonomik olabilmesi için demirce zengin minerallerin ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir.

Kaolen, aşağıda sayılan sebeplerden 6t6r6u masse içerisinde kullanılır :

- Kaolen, kristal suyunu 300-450°C arasında kaybeder. Sinterleşme noktası 1410°C, ergime noktası 1730-1800°C civarındadır.

- Kaolen, beyaz olmayan killerin rengini 6rt6p kapattığından karışıma beyazlık vermek 6zere katılır.

- Massede kaolen miktarı arttıkaa, oluşan 6r6n6n mukavemeti artar.

- Kaolen miktarı massede fazlalaştığı oranda, karışımın pişme derecesi y6kselir ve ısı değişimlerinden etkilenmez.

- İri taneli kaolen, karışım maddenin porozitesini y6kseltir. Kuru k66lme ve dolayısıyla çekme azalır. İnce taneli kaolende ise durum tam tersidir.

- Kaolen plastik bir madde olmasına rağmen, plastisitesi ve bağlanması fazla değildir [3,4].

2.2.5 Diğer hammaddeler

Mermer

K66k kristalli ve basıncı altında sağlamlaşmış kalsiyum karbonattır.seramikte kullanılacak mermerde demir ve renk veren yabancı maddelerin bulunmaması gerekir. Mermer, 900 °C de ısıtıldığında Ca ve CO₂'e ayrırır.

Mermer kuvars ile birlikte ısıtılacak olursa , kolay eriyip camlaşan kalsiyum silikatu meydana getirir.

Mermer saf feldspat ile ısıtılacak olursa, feldspatın 1280 °C olan erime noktası düşer ve daha kolay eriyen bir cam meydana gelir. Bu özelliğinden dolayı sır üretiminde kullanılır.

Vollastonit

Bileşimi kalsiyum silikattır. Elyafı bir yapısı vardır. Fayans masselerinde ve seramik üretiminde çekmeyi azaltmak için mermer yerine kullanılır.

Manyezit

MgCO₃ bileşiminde olup tabiatta bol miktarda bulunur. Tek başına ısıtıldığında refrakterdir. Bu nedenle refrakter sanayiinde erime noktasının yüksekliği ve cürufa dayanıklılık yönünden çok önemli bir hammaddedir. Diğer maddelerle karıştırıldığında eritici vazifesi görür. Kuvars ile ısıtılırsa magnezyum silikası meydana getirir.

Manyezit, massenin pişme sırasında sinterleşmesini ve sağlamlaşmasını sağlar.

Dolomit

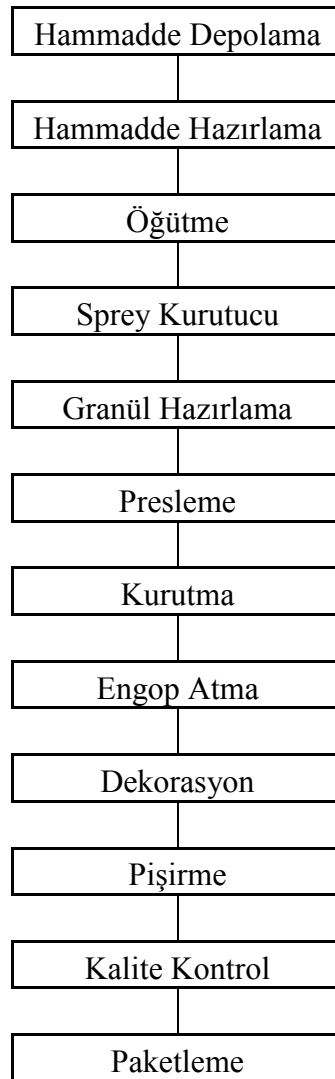
Bileşimi kalsiyum magnezyum karbonattır (CaCO₃.MgCO₃). Magnezyumlu kireç taşı olarak bilinir. Demir, silis vb. gibi safsızlıklar içerebilir. Seramik yapıda kireç gibi davranır.

Kaolen

Kaolenler seramikte dolgu maddesi olarak kullanılır. Kaolenler killer gibi asidik karakterlidir. Ancak killer gibi bağlayıcı özellikte değildir.

3. GRANİT SERAMİK KARO ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

Granit seramik karo üretim teknolojisi ile sırlı seramik karo üretimi arasındaki en önemli fark, seramik çamurun sırlar gibi temiz hammaddelerle renklendirilerek hazırlanması, granüle edilmesi, elde edilen granüllerin belirli oranlarda karıştırılarak pişirilmesi ve pişme işleminden sonra yüzeyinin parlatılmasıdır (Sayarer, 2006; Sacmi, 2002).



Şekil 3.1 Granit Seramik Karo Üretimi Proses Akım Şeması

Bütün karo bünyesinin renkli hazırlanmasından dolayı sırlı seramik karoda 25 gr/m² boya kullanımı olduğu halde bu miktar granit seramik karoda 750 gr/m²'ye kadar yükselmektedir. Bu da sırlı seramik karoya göre 30 kat fazla boya maliyeti getirmektedir. Seramik ürünlerde en pahalı girdi boya olduğu için granit seramik karoların maliyetleri de yüksek olmaktadır. Granit seramik karo üretimi Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir.

Granit seramik karo üretiminde diğer seramik karolardan farklı kriterler takip edilmelidir. Bu kriterler aşağıda sıralanmıştır.

- Kullanılan hammaddeler, mümkün olduğu kadar saftır ve maksimum demir içeriği % 1' den daha az ve tane iriliği 150 µm'den daha küçük olan hammaddeler kullanılır.
- Granit çamurunda 63 µm elek üstü oranı % 1'den daha az ve çamur yoğunluğu 1700-1720 gr/lt olmalıdır.
- Şekillendirmede granül rutubeti % 5-6 ve pres basıncı 400-450 kg/cm² referans aralığındadır.
- Pişirmede ise fırın sıcaklığı 1220-1250 °C, pişme küçülmesi % 8-9 ve su emmesi % 0,05'dir.

3.1 Hammadde ve Çamur Hazırlama

Granit seramik karo üretiminde kullanılan hammaddeler, sırlı karo üretiminde kullanılan hammaddelere oranla çok daha saftır ve tane boyutları daha incedir. Bünye rengi, ayrı bir sırlama işlemi yapılmadığından dolayı çamurun pişme rengidir. Çamur rengi ise boyanın hammaddelerle birlikte öğütülmesi ile verilebileceği gibi ayrı bir değirmende açılmış boyanın çamur karıştırma havuzlarında renksiz çamura ilavesi ile de

verilebilir. Böylece değirmenin yıkanma ve temizlenme zamanından ve çamurdan tasarruf sağlanabilir.

Standartlara uygun hammaddeler reçete oranına göre karıştırıldıktan sonra değirmene şarj edilir. Belirli oranda su ve elektrolit ile birlikte değirmen çalıştırılır. Reçeteye bağlı olarak elde edilmek istenen ton ve renk verici boyalar ilave edilerek renkli çamur yapılabilir. Çamur belirli bir inceliğe (tane boyutuna) geldiğinde stok havuzlarına alınır. Stok havuzlarında çökmeyi önlemek için çamur sürekli karıştırılır. Çamurun bu havuzlarda en az bir gün dinlendirilmesi diğer proseslerin işlerliği açısından çok önemlidir. Ayrıca farklı havuzların stok amaçlı kullanılması üründe meydana gelebilecek ton farklılıklarının düzeltilebilmesine olanak sağlar. Stok havuzlarında ve havuzlar boşaltılmadan önce çamurdan alınan numunelere ilk kontroller yapılır ve doğabilecek hataların başlangıçta giderilmesi sağlanır. Çünkü granit seramik karo prosesi sonucu oluşan ürünün geri dönüşümü mümkün değildir. Kontrolü yapılan ve ürün kalitesini en çok etkileyen hata renkte meydana gelebilecek ton farklılıklarıdır. Kontroller yapıldıktan sonra uygun nitelikteki çamur hidrolik pompalar yardımı ile spray (atomizör) kurutucuya aktarılır. Çamur, spray kurutucunun mikron ölçekli deliklerinden püskürtülür ve sıcak hava ile teması sağlanarak, belirli miktarda nem içeren granüler forma getirilir. Elde edilen granüller konveyör bantlarla silolara taşınır. Bu proseste granüllerin tane dağılımı ve rutubeti sürekli olarak kontrol edilmelidir. Çünkü granit prosesi, diğer proseslere oranla daha yüksek basınçlarda yapılır ve nihai üründe porozite miktarı daha az istenir. Bu sebeplerden dolayı granül dağılımlarının optimum düzeyde elde edilmesi ve bu dağılımların pres silolarına kadar korumaları granit seramik karo üretim sürecinin çok önemli bölümlerinden birisidir.

3.2 Öğütme

Karo üretiminin en önemli kademelerinden öğütme, çekme yüzdesi, su emme, darbe mukavemeti ve ısıl genleşme değerini belirleyen en önemli parametredir.

Öğütme ne kadar kontrollü yapılırsa ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri de o derece kontrol edilebilir.

Öğütme zamanı hem enerji hem de kapasite açısından son derece önemlidir. Dolayısıyla öğütme, üretimin hassas dengelerini oluşturur. Karo üretiminde bu işlem genellikle bilyalı değirmenlerde ve sulu ortamda yapılır. Öğütülecek hammaddelerin tane boyutu, sertliği, reolojik özellikleri öğütme zamanını etkileyen parametrelerdendir.

Yer karolarının bünyelerinde %50'ye varan oranda sert hammaddeler bulunur. Bu nedenle öğütme zamanları uzundur.

Bilyalı değirmenler silindirik şekilde olup tesis kapasitesine göre değişik hacimlere sahiptirler. Kaplama malzemesi lastik, alümina tuğla veya sileks taşıdır. Kaplama malzemesinin kalınlığına bağlı olarak değirmen kapasitesi azalır veya artar. Değirmen bilyası olarak flint taşı, alümina bilya veya bunların karışımı kullanılır. Son yıllarda toplam öğütmenin %30'unun cidarlarda, %70'inin de bilyalar arasında olduğu düşünülmüşür. Bu değirmenlerin kapasitesi sileks taşı kaplamalı değirmenlere göre daha fazladır. Değirmenlerde kullanılan bilyalar küresel şekilli olmalıdır. Çünkü değirmen içindeki öğütme iki türlü gerçekleşir. İlki yuvarlanarak meydana gelen öğütme, ikincisi çarpışma ile meydana gelen öğütmedir. Yuvarlanma esnasında kürenin yüzey alanının büyük olması öğütmeyi iyi yönde etkileyecektir. Değirmen içine ilave edilen bilyalar öğütme ortamının hacimce %25-35'idir.

Genelde çamur değirmenlerinde çapı 8-10 cm'lik bilyalar %20-35, çapı 6-8 cm'lik bilyalar %25-35, çapı 4-6 cm'lik bilyalar %35-50 oranlarında kullanılır. Bilya dağılımı küçüldükçe çarpışmayla yapılan öğütme artar. Bilyalar irileştikçe yuvarlanmayla yapılan öğütme artar. Yuvarlanma ile yapılan öğütme, değirmende öğütme zamanının ilk iki saatinde aktiftir. Daha sonraki zamanlarda çarpma ile yapılan öğütme etkilidir. Bu yüzden öğütmenin son bölümünde elek bakiyesini düşürmek zorlaşır. Değirmenin öğütme zamanı, belirlenen elek bakiyesiyle sınırlanır. Daha düşük bir elek bakiyesine ulaşmak için daha çok öğütme zamanı gereklidir. Çamurun

viskozitesi düştükçe öğütme zamanı azalır. Bu nedenle viskoziteyi düşürmek için değirmenlere elektrolit ilavesi yapılır. Özellikle yer karosu reçetelerinde kil oranı arttıkça viskozite yükselir. Bu nedenle kullanılacak elektrolit son derece önem kazanır. Genellikle elektrolit olarak sodyum silikat, sodyum tripolifosfat veya nadiren de hegzametafosfat kullanılır. Çamur değirmenlerine ilave edilen suyun viskozite üzerinde etkisi büyüktür. Bu nedenle düşük sertlikte ve sülfatsız su kullanılarak viskozite düşürülebilir. Çamurun litre ağırlığı azaldıkça viskozitesi de düşecektir. Ayrıca öğütme zamanı azalacaktır. Değirmene ilave edilen hammaddelerin miktarında öğütme zamanı açısından önemli parametrelerdendir. Öğütme işlemi sonrası elde edilen çamurun elek bakiyesi, viskozitesi ve litre ağırlığı ölçülebilen kolay parametrelerdendir. Bu parametreler bir sonraki üretim kademesi için sabitlenmelidir.

Günümüzde büyük kapasitenin istendiği tesislerde yukarıda bahsedilen kesikli öğütme sisteminin yerine değirmen özellikleri benzer fakat sürekli çalışan bilyalı değirmenler kullanılmaktadır.

3.3 Granülasyon

Renk ve akışkanlık kontrolü yapılmış, %35 su içeren çamur, stok havuzlarından hidrolik pompalar yardımı ile püskürtmeli kurutucuya aktarılır. püskürtmeli kurutucuda nem içeriği %5-6 aralığına gelene kadar kurutulur. Kurutma işlemi, kurutucunun mikron ölçekli deliklerinden çamurun yüksek basınçla püskürtülmesi esasına dayanır. Çamur pülverize edilerek granüler bir form kazanır. Granülasyon sonucu elde edilen granüllerin tane dağılımı çok önemlidir. Çünkü özellikle küçük tane boyutlu parçalar stok silolarında beklerken ve şekillendirme aşamasında, kalıpta düzensiz dağılım gösterirler. Karo yüzeyinde farklı bölgelerde yoğunlaşarak homojen renkli görünümün bozulmasına ve karolar arasında renk-ton hatası oluşmasına neden olur. Bu olay granit seramik karo üretiminde en çok görülen hata tipidir. Bu problemi ortadan kaldırmak için granül elek dağılımının 150 µm altının maksimum %5 olmasına dikkat edilmelidir.

3.4 Şekillendirme

Hazırlanan renkli granüller çelik silolarda depolanır. Bu siloların altında bulunan bilgisayarlı tartım ünitelerinde belirli oranlarda karıştırılarak istenilen formu verecek karışım elde edilir. Bu karışımın homojenizasyonu çok önemlidir. Bu sebeple birkaç kez kuru karıştırıcılarla karıştırılır. Karıştırma işlemi süresince nem ve elek bakiyelerinin standartlara uygunluğu, değişip değişmediği kontrol edilir. Karışım buradan pres haznelere verilir. Şekillendirmede kullanılan pres basıncı diğer seramik karo proseslerine oranla % 60 daha fazladır. Yaklaşık olarak 1 cm² ye 425 kg basınç uygulanır. Granit seramik karonun özelliklerinden dolayı şekillendirmede, düzgün şekil ve standart boyutlar elde etmek amacı ile özel pres kalıpları kullanılır. Pres parametreleri tamamen dijital ortamda düzenlenir ve kontrol edilir. Şekillendirilmiş yarı mamuller pres çıkışında bulunan dikey ve yatay kurutucularda belirli nem oranına kadar kurutularak pişirime hazır hale getirilirler.

Değişik renklerdeki granüllerin, belirli yüzey görünümü verecek oranlarda karışımı ve yüzey efektleri, şekillendirme prosesi sürecinde yapılmaktadır. Granit seramik karoların yüzeyinin sıfır poroziteye sahip olması ve taneciklerin pişirim sırasında camlaşarak poroziteleri kapatabilmesi için pres basıncı 400-450 kg/cm² olarak seçilmelidir. Bu amaçla kullanılan presler 2500 tona kadar olan hidrolik preslerdir. Boyut farklılığı problemini minimize etmek amacı ile izostatik kalıplar ile şekillendirme yapılmaktadır.

3.5 Pişirme

Yarı mamuller fırına girmek üzere vagonlara yüklenir ve otomatik roller transfer sistemi yardımı ile fırın girişine gelirler. Yarı mamullerin fırına girişleri yine otomatik olarak rulolarla yapılır. Diğer seramik karo üretim teknolojilerinde olduğu gibi granit seramik karo üretiminde de pişirim sıcaklık, basınç ve hız ayarları kontrol

edilebilen rulo fırınlarla yapılmaktadır. Granit seramiklerin pişme sıcaklığı diğer seramik karoların pişme sıcaklıklarına göre 80-100°C daha yüksektir. Bunun amacı daha düşük porozite elde edebilmektir. Yer karoları maksimum 1180°C, duvar karoları maksimum 1130°C'de pişirilirken granit seramik karolar minimum 1190-1250°C aralığında pişirilmektedir. Ayrıca yeterli vitrifikasyonu sağlamak için yavaş bir fırın rejimi düzenlenmektedir. Pişirim süresi 64-70 dakika arasındadır. Pişirim prosesi tamamlandığında mat granit seramik karoların üretimi tamamlanmış olur.

4. BOYUT KÜÇÜLTME

4.1 Genel Bilgiler

Kırılma ve öğütmeyle gerçekleştirilen boyut küçültme, mineral, metalürji, kimya ve seramik endüstrilerinde kullanılan önemli bir işlemdir. Seramik endüstrisinde malzemenin ortalama parça boyutunu düşürmek, parça porozitesini azaltmak, kolloit içeriğini arttırmak ve parçanın şeklini değiştirmek için oldukça yoğun kullanılır. Ayrıca bazı öğütme işlemleri de etkili dağıtma ve karıştırma sağlar (Reed, 1995). Seramik endüstrisinde boyut küçültmenin amacı, özellikle presleme, kurutma ve pişirme esnasında, tanelerin birbirleriyle olan reaksiyonları hızlandırmaktır.

4.2 Kırılmanın Fiziği

Boyut küçültmede parçaların kırılma davranışlarını anlamak çok zordur. Uzunca bir süredir birçok araştırmacı kırılma fiziğinin temel ilkelerinden yararlanarak parçaların kırılma mekanizmasını anlamaya çalışmışlardır. Bunların birçoğu tek tane kırılmasından yararlanır. Tek tane kırılma bilgisi çok parçalı kırılmayı anlamak için temel teşkil etmektedir (Cho, 1987).

Malzemelerin teorik gerilmesi için bir yaklaşım aşağıdaki denklemle verilmektedir (Dieter, 1976).

$$\sigma_t \equiv E / 10 \dots \dots \dots (4.1)$$

Burada σ_t malzemenin teorik gerilmesi, E ise Young modülüdür. Genelde gerçek gerilme, tahmin edilen gerilmeden çok daha düşüktür. Bu çelişki Griffith teorisi ile açıklanır. Bu teoriye göre gevrek malzemede var olan çatlaklar, gerilme birikimleri hareket ederler ve düşük gerilmelerde kırılmayı tetiklerler.

Kırılma için Griffith ölçütü, ya enerji ya da gerilme yaklaşımı olarak elde edilir. Enerji yaklaşımında Griffith ölçütü, yeni yüzeyler yaratmak için gereken enerjideki hızın serbest kalan gerilme enerjisindeki hıza eşitlenmesiyle elde edilir. Kırılgan bir malzemenin geniş bir tabakasının $2C$ uzunluğunda eliptik bir çatlak içerdiği hesaba katılırsa,

$$\sigma_c = (2E\gamma / \pi C)^{1/2} \dots\dots\dots(4.2)$$

Burada σ_c çatlak yayılmasını başlatan kritik gerilme ve γ ise yeni bir yüzey alanı yaratmak için birim alan başına yüzey enerjisidir.

Gerilme yaklaşımında Griffith kriteri, çatlakın gerilme birikimi olduğu düşünülerek ele alınabilir. Bu yaklaşım çatlak ucundaki çekme gerilmesi ve uygulanan gerilme alanı arasındaki ilişkiyi göz önünde bulundurur. Bir eliptik çatlak için gerilme birikimi, σ_m , aşağıdaki denklemlerle verilir.

$$\sigma_m = [1 + 2(C/\rho)^{1/2}] \dots\dots\dots(4.3)$$

Burada, σ tek eksenli çekme gerilmesi, C çatlak uzunluğu ve ρ ise çatlak ucunun eğrilik yarıçapıdır. Çatlak uzunluğuna göre çok küçük olan yarıçap ucu için σ_m aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\sigma_m \equiv 2 \sigma [1 + 2(C/\rho)^{1/2}] \dots\dots\dots(4.4)$$

σ_m σ_t 'ye eşit bir değere ulaştığında, atomlar arası bağın kopmasıyla kırılma başlar. Denklem 4.4 teki $\rho = 8 a / \Pi$ değeri, enerji denge yaklaşımından elde edilen ve denklem 4.2 de verilen σ_c ile aynı değeri verir. Çatlağın ucundaki eğriliğin minimum yarıçapının atomlar arası boşluğun, a , büyüklüğünün derecesine eşit olduğunu belirtmiştir (Cho, 1987). $\rho \equiv a$ koşulu altında aşağıdaki değeri alır.

$$\sigma_c = (E\gamma / 4C)^{1/2} \dots\dots\dots(4.5)$$

Özellikle plastik malzemeler için Griffith teorisinin aşağıdaki denklemlerle uygulanabileceğini belirtmiştir.

$$\sigma_c = [E(\gamma + \gamma_p)/C]^{1/2} \dots\dots\dots(4.6)$$

Burada γ uygulanan kritik gerilme ve γ_p çatlamanın başlaması için gereken plastik veya viskoz işittir. Griffith kriteri kırılmanın başlaması için şarttır. Kırılma başladığında, kırılma yayılması hesaba katılmalıdır. Yavaş bir yayılma için, Irwin (1960) ilave çatlama kuvveti, G , kavramının kullanılmasını önermiştir. Ayrıca çatlak yayılması esnasında elastik gerilme alanından enerjinin kaybolma oranı, serbest kalan bir birim deformasyon enerjisi oram olarak ta ifade edilebilir.

$$G = \pi r^2 / E \dots\dots\dots(4.7)$$

Bu nedenle, Griffith teorisi yeniden yazılabilir.

$$\sigma = G E / \pi C)^{1/2} \dots\dots\dots(4.8)$$

Burada G gerilme yoğunluk faktörü için ilişkidir. Hızlı yayılma için, yavaş yayılma ilişkisi artık geçerli değildir. Irwin (1960) eğer aşağıdaki denklem geçerliyse, ince bir plaka örneği durumunda kırılmanın hızlı olacağını önermiştir (Cho, 1987).

$$\sigma = (G_c E / \pi C_c)^{1/2} \dots\dots\dots(4.9)$$

Burada G_c yayılmanın hızlı olduğu birim çatlak yüzeyi başına serbest kalan enerji oranının kritik değeri ve C_c ise buna ait çatlak yan uzunluğudur. G_c değeri, uygulanan gerilmenin, σ_c , ve hızlı çatlak yayılmasının başlangıcındaki aşağıdaki ilişkiyi kullanan, çatlak yarı uzunluğunun ölçülmesiyle deneysel olarak belirlenebilir.

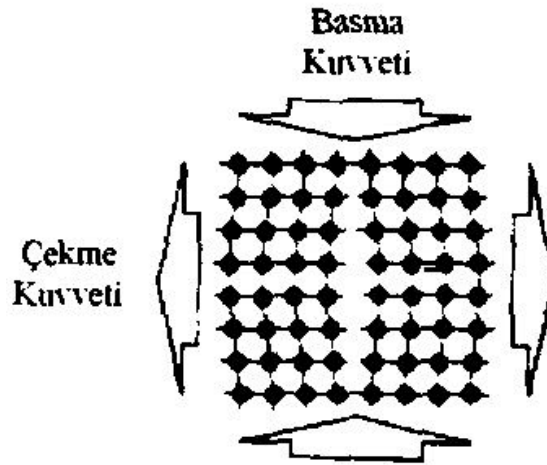
$$G_c = \pi \sigma_c^2 C_c / E \text{ net gerilme için} \dots\dots\dots(4.10)$$

$$G_c = \pi \sigma_c^2 C_c (1 - \nu^2) / E \text{ net birim deformasyon için} \dots\dots\dots(4.11)$$

Burada ν Poisson oranıdır.

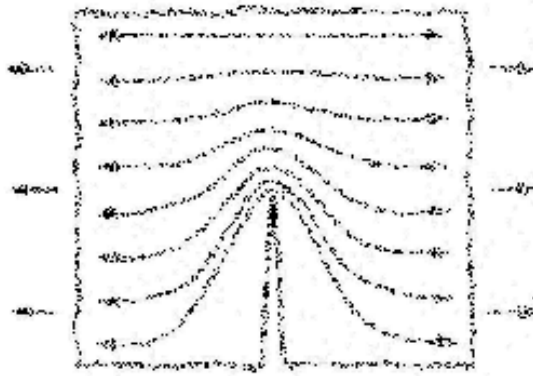
4.3 Ufalama İlkeleri

Birçok mineral atomların üç eksen boyunca düzenli olarak dizildiği kristal malzemelerdir. Atomların biçimi onları bir arada tutan fiziksel ve kimyasal bağların tipi ve boyutuyla belirlenir. Minerallerin kristal kafeslerinde bu atomlar arası bağlar sadece çok küçük mesafelerde etkilidirler ve bir çekme gerilmesiyle kolayca kırılmabilmektedirler (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Çekme ve basma kuvvetlerinin oluşturduğu bir kristal kafesin birim deformasyonu

Kayaçlar, farklı tane boyutunda saçılmış değişik minerallerden oluştuklarından, düzenli yüklendikleri zaman bile oluşan iç gerilmeler düzenli olarak dağılmazlar. Gerilme dağılımları, her bir mineralin mekanik özelliklerine ve daha da önemlisi gerilme birikimine yol açan matristeki kırık ve çatlakların varlığına bağlıdır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Çatlak ucundaki gerilim birikmesi

Gerilmedeki artışın gerilme yönüne dik çatlak uzunluğunun karekökü ile orantılı olduğunu göstermiştir (Wills, 1997). Bu yüzden çatlak ucunda arttırılan gerilme seviyesinin, o noktada kopardığı herhangi bir gerilim seviyesindeki çatlak boyu için kritik bir değeri vardır. Bağın bu biçimde koparılması çatlak uzunluğunu arttıracaktır. Böylece gerilme birikimi artacak ve matris yoluyla çatlağın hızlı bir şekilde yayılmasına neden olacak ve sonunda kırılma gerçekleşecektir.

Ufalama teorilerinin malzemenin kırılma olduğunu varsaymalarına karşılık, aslında kristaller kırılma olmaksızın enerji depolayabilirler ve gerilme ortadan kalktığında bu enerjiyi serbest bırakabilirler. Bu hareket elastik davranış olarak adlandırılmaktadır. Kırılma gerçekleştiğinde depolanan enerjinin bir kısmı yeni üretilmiş yüzeylerdeki atomların potansiyel enerjisi olan serbest yüzey enerjisine dönüşür. Yüzey enerjisindeki bu artıştan dolayı yeni oluşturulan yüzeyler çoğunlukla kimyasal olarak daha aktifirler.

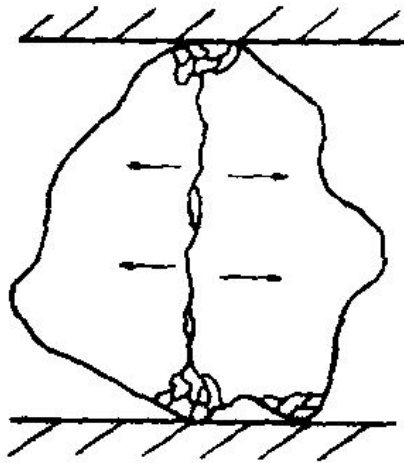
Birim deformasyon enerjisinin serbest kalmasıyla açığa çıkan enerjinin, üretilen yeni yüzey enerjisinden büyük olduğunda malzemelerin çatlak yayılması ile zayıfladıklarını göstermiştir (Wills, 1997 ve Sönmez, 1992). Dayanıklı malzemeler çatlak üretimi olmaksızın plastik akma mekanizmasıyla birim deformasyon enerjilerini boşaltmalarına karşılık, kırılma malzemeler çatlak üretimiyle birim deformasyon enerjilerini azaltırlar.

Plastik akma mekanizmasında atomlar veya moleküller birbirlerinin üzerinden kayarlar ve enerji, malzemenin şeklinin değiştirilmesinde tüketilir.

Ufalama için gereken enerji su ile düşürülebilir ve katılara adsorblanan ilave kimyasallarla daha da düşürülebilir (Hartley,1978). Bu, kimyasalın çatlakın içerisine girebilmesi ve adsorpsiyon sonucunda kırılmadan önce çatlak ucundaki bağ gerilmesini düşürmesiyle, yüzey enerjisinin azalmasından dolayı olabilir.

Gerçekte malzemeler düzensiz şekillerdedirler ve bu yüzden düzenli olarak yüklenememelerinden dolayı yüklenme kontaklarının küçük alanlarında veya noktasal olarak gerçekleşmektedir. Kırılma esas itibariyle sıkıştırma, darbe ve aşındırma mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir ve bu üç tür kırma mekanizması kaya mekaniği ve kuvvet yüklenme türüne bağlı olarak birbirinden ayırt edilebilmektedir.

Düzensiz şekilli malzemeler sıkıştırılmayla kırıldığında çekme yenilmesi sonucu ortaya çıkan iri taneler ve yüklenme noktası yakınında sıkışma yenilmesi veya çıkıntılardaki kesme ile ortaya çıkan ince taneler olmak üzere iki farklı tane dizisinde olan ürünler elde edilmektedir (Şekil 4.3) . Üretilen ince miktarı yüklenme alanının en aza indirilmesiyle azaltılabilir ve bu daima kırılmı ikinci yüzeyi kullanan sıkıştırımalı kırıcıyla yapılır (Partridge, 1978).



Şekil 4.3 Kırılma ile parçalanma

Darbe ile kırılmada hızlı yüklemekten dolayı tane, daha yüksek bir ortalama gerilime maruz kalır. Tanenin basit bir şekilde kırılması için gerekenden daha çok enerji absorpsiyonu ve çekme yenilmesi ile, çabucak ayrı taneler olarak kırılmaya eğimli olmasının bir sonucu olarak elde edilen tane irilikleri ve şekilleri birbirine benzemektedir.

Aşındırma (kesme yenilmesi) çok ince malzemeler üretir ve genellikle istenmemektedir. Uygulamada aşınma tanelerin birbirlerine sürtünmelerinden dolayı olmaktadır (taneler arası ufalama). Bu eğer kırıcıya malzeme çok fazla beslenirse parçaların birbirleriyle temasının artmasından dolayı gerçekleşmektedir. Böylece sıkıştırma gerilmesinin derecesi artacak ve sonuçta kesme yenilmesi açığa çıkacaktır.

4.4 Ufalamada Enerji-Boyut Küçültme İlişkileri

Bir ufalama işleminde boyut küçültme ile enerji arasındaki ilişkiyi açıklamak için tutarlı bir teori arayışı yıllar boyunca olağanüstü miktarda tesis ve laboratuvar verisi oluşturmuştur. Bu verilerin bazı ilişkileri mühendislik dizayn amaçları ve kırılmadaki ileri araştırmalar için mümkün olmasına karşılık, mekanik kuvvetlerle boyut küçültüldüğünde bir katının davranışını tahmin etmek anlamında hala büyük araştırmalara ihtiyaç vardır.

Kırılgan bir katının kırılmasında enerji ve boyut küçültme arasında var olan çoğu ilişki tek ve basit, deneysel bir öneriden kaynaklanmaktadır. Boyut küçültme ve enerji arasındaki ilişkinin en genel matematiksel ifadesi aşağıdaki diferansiyel denklemlerle verilmiştir (Charles, 1957).

$$dE = - C dx/x^n \dots\dots\dots(2.12)$$

Burada, dE son derece küçük enerji değişimi, C malzemenin karakteristiğine ve kullanılan ekipmana özgü bir sabiti, dx son derece küçük boyut değişimini, x tane boyutunu ve n de bir sabiti göstermektedir.

Yukarıdaki denklem ufalama birim işleminde, bir tanenin boyutunda küçük bir değişiklik yapmak için gereken enerji boyut değişimiyle doğru orantılı, aynı değişikliği yapmak için gereken enerjinin ilk tane boyutuyla ters orantılı olduğunu ifade etmektedir.

Bir grup araştırmacı öğütme süresi boyunca harcanan enerjinin sabit olduğunu varsayarak, zaman ve tane boyutu arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bazı araştırmacılar ise enerji girdisi ile tane boyutu arasındaki değişimi incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucunda Rittinger, Kick ve Bond yasaları olarak adlandırılan bir dizi ufalama teorileri ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu teoriler yasa olarak görülmemekte ve kesikli öğütme için deneysel ilişkiler olarak kabul edilmektedir (Marshall, 1966; Sönmez, 1992).

Ufalama konusundaki çalışmalar on dokuzuncu yüzyılda Rittinger ve Ki ek'in yasalarının açıklanmasından sonra başlamıştır. Bu yasalar hala tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Günümüzde Bond yasası, ufalama enerjisi ve tane boyutu arasındaki ilişkiyi açıklayan en güvenilir ve kullanışlı yasa olarak varsayılır (Tanaka, 1966).

1857 de Rittinger, bir boyut küçültme yöntemi için harcanacak enerjinin, yeni yüzeyler yaratmak için kullanıldığını ve özgül yüzey enerjisinin malzemenin bir özelliği olduğu önermiştir. İlk bakışta bu uygun bir hipotez gibi görünmüş ve yüzey alanındaki artışlara karşı enerji girdisi ölçümleri özgül enerjinin tahmini hesabında kullanılmıştır. Fakat hipotezin teklifinden bu yana geçen yıllar boyunca yapılan araştırmalar hipotezin fazlaca basitleştirildiğini ortaya çıkarmıştır. Hipotez, harcanan enerjinin tamamen öğütülen malzemeye aktarıldığını kabul etmektedir. Bu doğru değildir ve gerçekte malzemeye aktarılan enerji makine tiplerine ve farklı işletme koşullarına göre değişmektedir. Ayrıca, yavaş yükleme ile bir katı kırıldığında birim deformasyon enerjisinin yüzey enerjisinden başka, örneğin ilerleyen dalga enerjisi, kırılmış parçanın kinetik enerjisi, plastik bozulma enerjisi gibi, farklı enerji türlerine dönüştüğü bulunmuştur. Yüzey enerjisine dönüşen toplam enerji fraksiyonu, kırılma koşullarına bağlı olarak, fazlasıyla değişken olacaktır.

Hemen hemen bütün öğütme işlemlerinde taze yüzeyler yaratmak için harcanacak enerji fraksiyonunun %1'den az olduğunu gösteren oldukça çok delil vardır. Rose bir bilyalı değirmende öğütülmüş kırılğan malzemeler üzerindeki enerji dengelerini belirleyerek yeni yüzeye dönüştürülen enerji fraksiyonununun %3'ten az olduğunu göstermiştir (Austin vd., 1982a, b). Rittinger hipotezi aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$E_r = K (\sigma_2 - \sigma_1) \dots\dots\dots(4.13)$$

Burada E_r birim hacim başına enerji girdisi, K bir sabit, σ_1 başlangıçtaki özgül yüzey ve σ_2 nihai özgül yüzeydir.

Daha küçük x_2 boyutlu parçalar için x_1 boyutlu parçaların küçültülmesinde denklem 4.13 daha iyi bilinen ilişkiyi verir:

$$E = K' (1/x_2 - 1/x_1) \dots\dots\dots(4.14)$$

Burada K' bir sabittir. Denklem 4.14 Denklem 4.12'nin integre edilmesiyle de elde edilebilir ve burada n 'nin değeri 2'dir.

$$\int_0^{E_r} dE = \int_{x_1}^{x_2} - C dx / x^2$$

$$E_r = K' (1/x_2 - 1/x_1) \text{ burada } K' = C \dots\dots\dots(4.15)$$

1885'de Kick gerilim birim deformasyon eğrilerinden yola çıkarak yaptığı hesaplamalarda, bir katının ufalanması için harcanacak enerji ile ufalanan katının aynı

oranda tekrar ufalanması için harcanacak enerjinin eşit olacağını ileri sürmüştür. Örneğin bir parçayı yarıya indirmek için harcanacak enerji ile yarıya indirilmiş parçayı dörtte bire indirmek için harcanacak enerji eşittir (Charles, 1957). Her ne kadar bu kabul edilebilir gözükse de Rittinger'in yasası ile bağdaşmamaktadır Kick kavramı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$E_k = K'' \log x_1 / x_2 \dots\dots\dots(4.16)$$

Burada K'' bir sabittir ve E_k da birim hacim başına enerjidir.

Kick kanunu denklem 2.12'nin integralinin alınmasıyla da elde edilebilir bu durumda n'nin değeri 1'dir.

$$\int_0^{E_r} dE = \int_{x_1}^{x_2} - C dx / x$$

$$E_r = -C \ln(x_1 / x_2) \\ = K'' \log(x_1 / x_2) \text{ burada } K'' = 2.3 C$$

Walker ve Show (1954) bir mikrondan daha ince parçaların öğütülmesinde Kick'in hipotezinin geçerli olduğunu, Rittinger hipotezinin de iri parçaların boyutunun azaltılmasında geçerli olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak, kırma ve öğütmenin pratik uygulamaları için yukarıdaki hipotezlerin hiçbiri genel anlamda kabul görmemiştir.

Rittinger ve Kick'in hipotezlerinin tesis dizaynı için doğru olmayacağından ve enerji-boyut küçültme ilişkisi iki hipotezin arasında bir yerde uygulanabilir olacağından

Bond (1952) öğütmenin üçüncü teorisini önermiştir. Bu teori gereken enerjinin öğütme esnasında üretilen yeni çatlak ucu uzunluğuyla orantılı olacağı temeline dayanmaktadır. Benzer şekilli parçalarda malzemenin birim hacminin yüzey alanı çapla ters orantılıdır. Birim hacimdeki çatlak uzunluğunun o alandaki bir bölümle doğru orantılı, bu yüzden çapın kareköküyle ters orantılı olduğunu göz önünde bulundur (Bond ve Maxson, 1943; Bond, 1947).

Deneyimler göstermiştir ki, logaritmik ölçekte elek açıklığına karşılık çizilen kırılmış veya öğütülmüş ürünün boyut dağılımının eğimi $1/\sqrt{2}$ 'ye veya 0.7071'e çok yakındır. Eğimler malzemenin doğası veya tarihiyle biraz değişir fakat ortalamalar göstermiştir ki, ufalama hareketiyle boyutu küçültülen bir homojen malzemenin normal eğimi $1/\sqrt{2}$ dir (Bond, 1952).

$$Y=80\left(\frac{X}{P}\right)^{1/\sqrt{2}} \dots\dots\dots(4.17)$$

Burada Y, herhangi bir X çaplı malzemenin geçtiği % ağırlık, P %80'nin geçtiği çaptır. X çaplı benzer şekilli parçalarda malzemenin birim hacminin yüzey alanı $1/X$ 'le değişir. Normal malzemelerle $\sqrt{2}$ elek serisinde her bir boyut fraksiyonunda ki yüzde ağırlık $1/\sqrt{2}$ olarak değişir. Bu nedenle, her bir fraksiyondaki yüzey alanı $X^{1/\sqrt{2}}/X$ veya $1/X^{0.2929}$ olarak değişir. Eğer eğim $1/2$ olsaydı, yüzey alanı $1/X^{1/2}$ olarak değişecekken, eğim 1 olsaydı, her bir boyut fraksiyonundaki yüzey alanı ya aynı olacaktı yada $1/X^0$ olarak değişecekti (Bond 1952).

Temelde birçok ufalama işlemi, üretilen iri tane iriliği ile ilgilidir. Fakat %100'ün geçtiği tane iriliği sürekli belirsizdir ve aynı şekilde %95 'in geçtiği tane iriliği de tam olarak net değildir. Bununla beraber %80'in geçtiği tane iriliği uygulamada kabul edilebilir bir değerdir (Bond, 1962).

Rittinger'e göre D çapındaki bir küpü kırmak için gereken enerji girdisi D^2 olarak değişecek iken, Kick'e göre bu D^3 olarak değişir. Basınç altındaki bir küpte absorplanan birim deformasyon enerjisi onun hacmi ile veya D^3 ile değişecektir. Bununla beraber, ilk çatlak ucunun oluşumuyla, birim deformasyon enerjisi D^2 olarak değişen yüzeye akar. Düzensiz şekilli parçalar kırıldıklarında, birim deformasyon enerjisi kayaç yüzeyine eşit olarak dağılmaz ve absorplanan orantılı enerji D^2 ve D^3 arasında olduğunda ilk çatlak oluşur ve kırılmayı büyüten bir enerji akışı başlar. Bu D çaplı benzer şekilli küreleri kırmak için gereken teorik enerji $D^{5/2}$ ile orantılı olduğu izlenimini göstermektedir.

Yüzey ve hacim faktörlerinin her ikisi birden kayacın kırılmasını etkiler ve bu etkiler eşit olduğunda kırma enerjisi Rittinger ve Kick hipotezleri arasında olan $D^{5/2}$ ile orantılı olacaktır. Birim hacimdeki benzer şekilli parçaların sayısı $1/D^3$ olarak değişir, böylece birim hacim veya birim ağırlığı kırmak için gereken enerji girdisi $D^{5/2}/D^3$ veya $1/\sqrt{D}$ ile orantılı olacaktır. Bu üçüncü teorinin temelidir. Üçüncü teori kısaca, belirli ağırlıktaki homojen bir malzemeyi kırmak için gereken faydalı enerji ürün çapının kareköküyle ters, oluşturulan çatlak uzunluğu ve yüzey alanının kareköküyle doğru orantılı olduğunu ifade eder.

Benzer şekilli parçalarda çatlak ucu uzunluğu, yüzey alanının yarısının kareköküne eşittir ve $1/\sqrt{P} - 1/\sqrt{F}$ ile orantılıdır. Pratik hesaplama için %80'nin geçtiği parça boyutu seçilir, %80'nin geçtiği ürün boyutu P olarak, %80'nin geçtiği besleme boyutu da F olarak gösterilir. Ayrıca short ton başına kilowatt saatteki enerji girdisi de W olarak gösterilirse, Bond'un temel eşitliği aşağıdaki şekilde verilir.

$$W = \frac{10W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10W_i}{\sqrt{F}} \dots\dots\dots(4.18)$$

Burada W_i iş indeksidir. İş indeksi kırma ve öğütme için malzemenin dayanımını ifade eden ufalama parametresidir. Sayısal olarak iş indeksi teorik olarak sonsuz büyüklükteki malzemeyi %80'i 100 mikronun altına indirmek için gerekli olan enerjidir, bu da

malzemenin yaklaşık %67'sinin 75 mikronun altına geçmesi anlamına gelmektedir (Bond 1961).

Ayrıca bu denklem Charles (1957) tarafından türetilen denklem 4.12'den de türetilir burada n' nin değeri 1 ve 2'nin aritmetik ortalaması olan 1,5 dir.

$$\int_0^{E_b} dE = -C \int_0^{E_b} dx/x^{1.5}$$

$$E_b = K''' (1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}) \dots\dots\dots(4.19)$$

Burada K''' 2C, E_b birim hacim başına enerji girdisi, C sabit, x₁ ve x₂ sırasıyla besleme ve ürün boyutlarıdır.

Eğer malzeme homojen ise, tüm ufalama adımlarında iş indeksi sabittir. Malzemeler doğal oluşum boyutuna sabittirler ve malzemeleri bu boyutun altındaki iriliğe ufalamak, bu boyutun üzerindeki iriliğe ufalamaktan daha zordur. Dolayısıyla malzemelerin oluşum boyutlarının altındaki tane iriliklerinde sahip oldukları iş indeksi değerleri daha yüksektir (Bond, 1961). Ufalama ekipmanının etkinliği de iş indeksine etki etmektedir. Ufalama olayı Bond (1960) tarafından üç prensip altında incelenmiştir.

Parça boyutunu küçültmek için enerji girdisi gerekmektedir, böylece sınırlı boyuttaki tüm bölünmüş parçalar onların oluşumları için gerekli enerji girdilerine sahiptirler. Ufalamaya beslenen parçalar enerji girdi seviyesi gösterirler ve ufalama esnasında enerji girdisi ufalama ürünüyle gösterilen enerji seviyesini elde etmek için ufalamadan önce beslemenin enerjisine eklenmelidir. Diğer bir ifadeyle, sonsuz boyutlu parçalar için ufalama enerjisi sıfırdır ve bir sınırlı besleme boyutundan ufalama için gereken enerji girdisi sadece ürünle gösterilen toplam enerji girdisinin bir fraksiyonudur. Bu ufalamanın birinci prensibidir.

İkinci ilke, kırma ve öğütmedeki yararlı iş girdisinin, oluşan çatlak yan boyu uzunluğu ile orantılı olduğunu ifade eder. Sıradan kırma ve öğütmede malzeme gerilim enerjisini soğurur ve malzemedeki zayıf yapısal hatalar yenilip çatlak ucu oluşturuncaya kadar sıkıştırma ve makaslama altında deforme olur. Malzeme şeklindeki bir anlık değişim, diğer yapısal hatalarda çatlak uçları oluşumuna neden olur ve tane kırılır. Gerilim enerjisinin büyük bir kısmı ısı olarak dışarıya verilir. Kırma için çatlak ucunun yayılmasını sağlayan ek enerji gereksinimi çatlak uçlarını çevreleyen kalıcı gerilim enerjisi akışı ile sağlandığından malzemeyi kırmak için gerekli gerilim enerjisi, çatlak yan boyu uzunluğu ile orantılıdır (Sönmez, 1992).

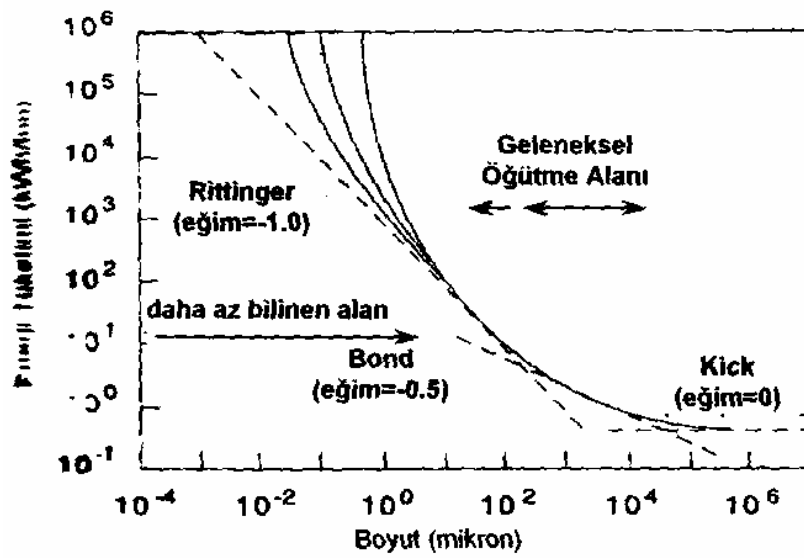
Üçüncü ilke, malzemenin kırılması ile ilişkili yapısal tane hataları ile ilgilidir. Yapısal hata, gerilim altında çatlak uçlarında gelişebilecek, tanecikleri herhangi bir yapısal zayıflık olarak tanımlanabilir. Yapısal hatalar genellikle gevrek malzemelerde görülür ve benzer tanelerin kırılma dayanımlarında büyük farklılıklara neden olur. Üçüncü ilke tanecikteki zayıf yapısal hataların tanenin kırılma dayanımını belirlediğini, fakat iş indeksini belirlemediğini ifade eder.

Bu kuramdaki bir zayıflık, yüzeyin kırılmasını sadece doğrusal bir boyutta ele almasıdır. Aslında bu yeni yüzeyin bir parçasıdır (Pryor, 1965). İş indeksi eşitliğinde ürünün tek bir tane iriliği dağılımı gösterdiği varsayılır. Ancak ürün, birden fazla tane iriliği dağılımına sahiptir, dolayısıyla her bir dağılımı elde etmek için gereken enerji farklı olacaktır (Charles, 1957).

Rittinger, Kick ve Bond tarafından açıklanan her üç teoride kullanılan x_1 ve x_2 değerleri farklı anlamlarda kullanılmıştır. Ayrıca eşitlik 2.12 de n sabiti her kuram için farklı değerlere sahiptir. Her üç yasada enerji hesaplamalarında kullanıldıklarında kesinlikle farklı değerler elde edilecektir. (Marshall, 1966)

Hukki (1961) endüstride yaptığı uzun çalışmalar sonucunda tek bir ilişkinin olmadığı sonucuna varmıştır. Şekil 4.4' te bu üç teorinin uygulama alanları gösterilmiştir. Hukki'ye göre Kick kuramı kırıcı boyutlarında, Bond kuramı çubuklu ve bilyalı öğütme boyutlarında ve Rittinger kuramı ise ince boyutlarda kullanılabilir (Napier-Munn et.al, 1996). Ayrıca Hukki (1975) enerji ve boyut küçültme arasındaki ilişkinin bu üç

kanunun bir karışımı olduğunu belirtmiştir. Ufalamadaki kırılma olasılığı iri parçalar için yüksekken ince boyutlar için bu olasılık hızla düşmektedir. Bunun sonucunda Hukki (1975) Kick kanununun İcm'nin üzerinde, Rittinger kanununun 10-1000 μm boyutlarında Bond kanununun da bunların arasında geçerli olduğunu belirtmiştir. Rose ise Hukki'nin tersi olarak Rittinger kuramının kaba öğütmede Kick kuramının da ince öğütmede geçerli olduğunu ileri sürmüştür (Marshall, 1975).



Şekil 4.4 Ufalamada parça boyutu ve enerji girdisi arasındaki ilişki (Lynch, 1977)

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmanın amacı, granik seramik bünye hazırlanmasında klasik ve hibrid öğütme sistemlerinin tüketilen enerji ve nihai ürün kalitesi bakımından karşılaştırılmasıdır.

5.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada Termal Seramik A.Ş.'de işletme şartlarında üretimi yapılan standart granit karo bünye reçetesi kullanılmıştır. Bu reçetenin hammaddeleri ve oranları Çizelge 5.1'de, reçetenin kimyasal bileşimi de Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Granit Karo Reçete Hammaddeleri

Hammaddeler	Oranları(%)
Pegmatit	34,5
Albit	27,0
Kil 1	22,0
Kil 2	15,0
Altere Manyezit	1,5

Çizelge 5.2 Granit Karo Reçete Kimyasal Analizi

Oksitler	(%)
SiO ₂	67,45
Al ₂ O ₃	20,19
Al ₂ O ₃	0,71
TiO ₂	0,70
CaO	0,44
MgO	0,90
Na ₂ O	2,95
K ₂ O	1,69
AK*	4,89

* Ateş Kaybı

Öğütme deneylerinde laboratuvar tipi jet değirmen (Gabbrielli MILL-2) kullanılmıştır. Jet değirmenin kavanozunun hacmi 1000 cc'dir. Değirmen şarjı olarak, 500 gr ağırlığında alümina bilyalar (18,8 ve 9,8 mm çaplarında ve 1:1 karışım halinde), 500 gr numune (kırılmış ve orijinal) ve 250 cc su kullanılmıştır.

Hibrid öğütme deneylerinde ön öğütmede kullanılan yüksek basınçlı merdaneli pres yerine, çalışma şekli benzer olan laboratuvar tipi merdaneli kırıcı (250 mm çaplı, 200 mm genişlikli) kullanılmıştır. Merdaneler arası uzaklık merdanelerin birbirine sürtünemeyeceği en az mesafe olacak şekilde ayarlanmıştır.

Jet değirmenin ve merdaneli kırıcının çalışma sırasında çektiği güç değerleri, güç ölçer (PQM, Power Quality Meter, General Electric) yardımıyla bilgisayar kontrolünde akım (A), voltaj (V) veya güç (kW) cinsinden zamana bağlı olarak ölçülmüştür.

5.2 Yöntem

Öğütme deneyleri klasik ve hibrid olmak üzere iki farklı sistemde gerçekleştirilmiştir. Klasik sistemde, reçete doğrudan jet değirmende öğütülürken, hibrid sistemde, reçete önce merdaneli kırıcıda kırılmış daha sonra jet değirmende öğütülmüştür.

- i. Klasik sistem; 500 g orijinal reçete numunesi jet değirmende 45 µm'luk elek bakiyesi %5 olacak şekilde yaş olarak öğütülmüştür. Değirmenin öğütme sırasında tükettiği toplam güç (öğütme ortamı, su ve örnek birlikte), kW cinsinden güç ölçer kullanılarak bilgisayar kontrolünde zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Daha sonra, değirmenin boş olarak (ortam, su ve örnek olmadan) çalıştırılması durumunda tüketilen güç ölçülmüştür. Tüketilen toplam güçten değirmenin boş olarak çalıştırılması sırasında tüketilen güç değerinin çıkartılmasıyla değirmenin öğütme işlemi için harcadığı net güç hesaplanmıştır. En son olarak klasik sistemde harcanan

özellik enerji, değirmenin öğütme için harcadığı net gücün toplam katı miktarına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

- ii. Hibrid sistem; 5 kg orijinal reçete örneği öncelikle merdaneli kırıcıdan geçirilmiş ve bu esnada tüketilen toplam güç ölçülmüştür. Daha sonra merdaneli kırıcı boş olarak (örnek olmadan) çalıştırılmış ve tüketilen güç ölçülmüştür. Tüketilen toplam güçten merdaneli kırıcının boş olarak çalıştırılması sırasında tüketilen güç değerinin çıkartılmasıyla merdaneli kırıcının kırma için harcadığı net güç hesaplanmıştır. Merdaneli kırma aşamasında harcanan özgül enerji ise, merdaneli kırma için harcanan net gücün toplam katı miktarına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Merdaneli kırıcıdan çıkan üründen 500 gr örnek alınmış ve jet değirmende yukarıda bahsedilen şartlarda öğütülmüştür. Bu öğütme aşamasında harcanan özgül enerji klasik öğütme sistemde bahsedildiği gibi hesaplanmıştır. Hibrid sistemde harcanan özgül enerji, merdaneli kırıcı için harcanan özgül enerji ile kırmayı izleyen öğütme aşamasında harcanan özgül enerjinin toplanmasıyla bulunmuştur. Klasik ve hibrid sistemde harcanan özgül enerji tüketimleri deneysel sonuçlarda karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Klasik ve hibrid öğütme sistemlerinden elde edilen numunelere, öğütme sistemlerinden dolayı olabilecek farklılıkları belirlemek üzere standart seramik testleri uygulanmıştır. Bu testler için numuneler aşağıda belirtilen aşamalar izlenerek hazırlanmış ve gene aşağıda bahsedilen testlere tabii tutulmuştur.

Reçete Hazırlama: Klasik ve hibrid sistemde elde edilen numuneler, % 45 oranında su ve % 0,5 oranında STTP ilavesi ile laboratuvar tipi jet değirmende 45 µm üstü elek bakiyesi %5 olana kadar öğütülmüştür.

Granül Hale Getirme: Değirmende hazırlanan çamurlar kurutulduktan sonra, elde edilen toz yaklaşık % 5-6 neme getirilip, 1 mm'lik elekten geçirilerek granül masse haline getirilmiştir.

Presleme: Hazırlanan granül masselerden, Gabbrielli marka laboratuvar tipi otomatik el presi kullanılarak 300 kg/cm^2 basınçta, 50 x 100 mm kalıp boyutlarında tabletler şekillendirilmiştir. Şekillendirilen tabletlere yaş mukavemet kontrolü yapılmıştır.

Kurutma: Şekillendirilen tabletler Gabbrielli-Selectra marka etüvde 110°C 'de %0 neme gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutmadan çıkan tabletlerin Mitutoyo marka dijital kumpas ile boyut ölçümleri alınmış ve tabletlere kuru mukavemet kontrolü yapılmıştır.

Pişirme: Kurutmadan çıkan tabletler endüstriyel döner fırında 1198°C 'de 34 dakikada pişirilmiştir.

Uygulanan Testler

Boyut Değişimi: Toplam küçülme aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Toplam Küçülme} = \frac{(L1 - L3)}{L1} \times 100$$

L1 : Numunenin ham uzunluğu

L3 : Numunenin pişmiş uzunluğu

Mukavemet: Preslenen numunelerin ham, kuru ve pişmiş mukavemet ölçümleri Gabbrielli marka mukavemet test cihazında ölçülmüştür.

Numuneler mukavemet cihazı mesnetleri arasına yerleştirilir. Numune üzerine sabit hızda kuvvet uygulanarak kırılır. Numunenin kırıldığı andaki kırılma yükü değeri cihaz üzerinden okunur. Numunenin kırılma bölgesindeki genişliği ve yüksekliği kumpas ile ölçülür. Mukavemet değeri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$\sigma = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2}$$

formülde σ : Mukavemet (kg/cm²), P: Kırılma yükü (kg), L: Mesnet aralığı (cm), b: Numunenin kırılma bölgesindeki genişliği (cm), h: Numunenin kırılma bölgesindeki yüksekliği (cm).

Su Emme: Su emme testi yapılacak numunelerin Sartorius-CP 3202S marka hassas terazide değişmez ağırlıkta tartımı yapılmıştır. Daha sonra su içine konulup 3 saat kaynatılmış ve 20 saat suda bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numuneler, üzerlerindeki parlaklık tam olarak giderilmeden kurulanmış ve yaş tartımları yapılmıştır. % su emme aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Su emme} = \frac{(\text{İkinci tartım} - \text{İlk tartım})}{\text{İlk tartım}} \times 100$$

Renk Değerleri Ölçümü: Pişmiş numunelerin L, a, b renk değerleri Minolta 3600d marka renk ölçüm cihazıyla bulunmuştur. Burada L beyazlığı, a kırmızılığı ve b sarılığı ifade etmektedir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

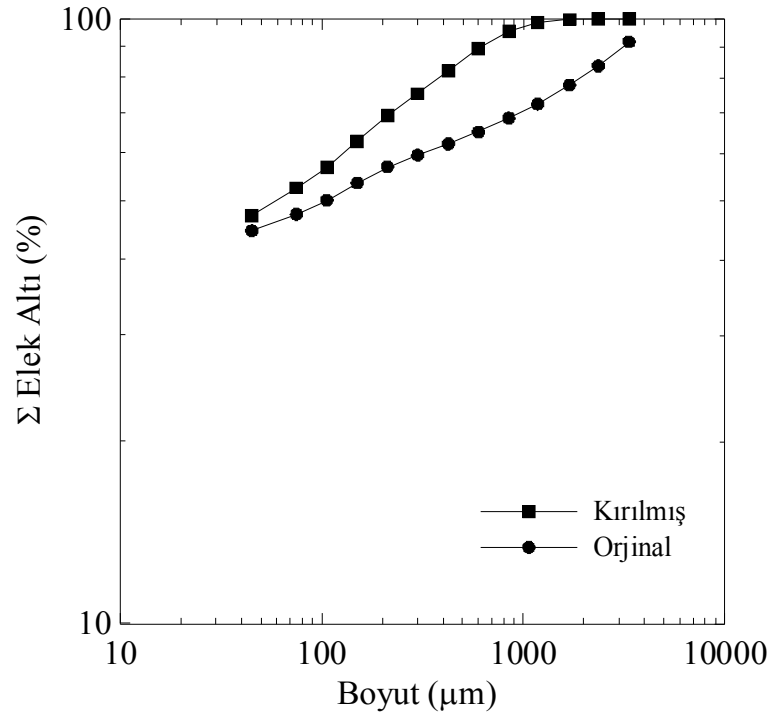
6.1 Özgül Enerji Ölçümleri

Orijinal ve merdaneli kırıcı sonrası hazırlanan reçetenin tane boyut dağılımı Çizelge 6.1. ve Şekil 1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Orijinal ve kırılmış reçetenin tane boyut dağılımı

Boyut (μm)	KIRILMIŞ	ORJINAL
	Σ Elek altı (%)	Σ Elek altı (%)
3350	100,00	91,60
2360	99,90	83,60
1700	99,80	77,70
1180	98,60	72,30
850	95,30	68,50
600	89,20	65,00
425	81,90	62,10
300	75,20	59,50
212	69,30	56,90
150	62,70	53,50
106	56,80	50,10
75	52,50	47,50
45	47,30	44,60

Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1 incelendiğinde merdaneli kırıcıda kırılmış reçetenin tane boyut dağılımının orjinal reçetenin tane boyut dağılımından oldukça farklı olduğu görülmektedir. Beklendiği üzere bu farklılık iri boyutlarda daha bariz iken ince boyutlarda bir miktar azalmıştır.



Şekil 6.1 Reçetenin tane boyut dağılımı

Klasik öğütme sistemi için hesaplanan özgül enerji değeri 70,0 kWs/ton'dur. Hibrid öğütme sisteminde kırma aşamasında harcanan özgül enerji değeri 5,5 kWs/ton iken, kırmayı izleyen öğütme aşamasında harcanan özgül enerji değeri 35,5 kWs/ton'dur. Dolayısıyla hibrid öğütme sisteminde harcanan özgül enerji değeri 41,0 kWs/ton'dur. Görüldüğü üzere hibrid öğütme sisteminde klasik öğütme sistemine göre 29,0 kWs/ton enerji tasarrufu elde edilmiştir. Bir diğer deyişle %41,4'lük bir enerji tasarrufuyla aynı öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu enerji tasarrufunun nedeni olarak ön kırma aşamasında tane boyutunun azaltılması (Şekil 6.1) ve ilaveten kırma sırasında iri tanelerin tane dayanımını azaltıcı yönde etki gösteren kırılma çatlaklarının oluşması gerekçe olarak gösterilebilir (Fuerstenau vd., 1999; Tavares, 2005).

Özgül enerji değerlerinin hesaplanması:

Klasik öğütmede,

Ölçülen değerler;

Değirmen boş iken tüketilen enerji = 0,305 kW

Toplam tüketilen enerji = 0,333 kW

Tüketilen net enerji = 0,333 - 0,305 = 0.028 kW

500 gr örneğin öğütme süresi = 75 dk ise ton başına tüketilen enerji aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{0,028 \times \frac{75}{60}}{\frac{500}{1000000}} = 70,0 \text{ kWs/ton}$$

Böylece klasik öğütme için

Harcanan özgül enerji = 70 kWs/ton olarak hesaplanmıştır.

Hibrid öğütmede,

Ölçülen değerler;

Kırıcı boş iken tüketilen enerji = 1,7 kW

Toplam tüketilen enerji = 2,2 kW

Tüketilen net enerji = 2,2 - 1,7 = 0.5 kW

Değirmen boş iken tüketilen enerji = 0,305 kW

Toplam tüketilen enerji = 0,333 kW

Tüketilen net enerji = 0,333 - 0,305 = 0.028 kW

500 gr örneğin kırıcıda kırılma süresi = 20 sn, öğütme süresi = 38 dk ise;
kırma ve öğütme işlemleri için ton başına tüketilen enerji sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{0,5 \times \frac{20}{3600}}{500} = 5,5 \text{ kWs/ton}$$

$$\frac{0,028 \times \frac{38}{60}}{500} = 35,5 \text{ kWs/ton}$$

Hibrid sistem için

Harcanan özgül enerji = 35,5 + 5,5 = 41,0 kWs/ton olarak hesaplanmıştır.

6.2 Teknolojik Testler

Klasik ve hibrid öğütme sistemlerinde hazırlanan seramik örnekleri üzerinde uygulanan bazı teknolojik testler karşılaştırmalı olarak Çizelge 6.2.'de gösterilmektedir. Çizelge 6.2. incelendiğinde, öğütme sisteminin farklılığının örneklerin teknolojik özellikleri üzerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmektedir. Bu yüzden hibrid öğütme sistemi seramik ürün kalitesinde herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadığı için klasik öğütme sistemine alternatif bir öğütme sistemi olarak kullanılabilir.

Çizelge 6.2 Seramik ürünlerin teknolojik özellikleri

Çamur Özellikler	Klasik	Hibrid
Viskozite (sn)	18	18
Litre Ağırlığı (gr/lt)	1680	1670
Elek Bakiyesi (+45 μ m)	5,0	5,1
Kuru Mukavemet (N/mm ²)	6,6	6,7
Pişme Özellikleri		
L.O.I.	5,52	5,35
Küçülme (%)	5,76	5,59
Su Emme (%)	0,04	0,05
Mukavemet (N/mm ²)	52,71	51,05
Renk Özellikleri		
<i>L</i> *	64,47	63,44
<i>a</i> *	3,05	3,23
<i>b</i> *	11,14	10,84

7. ÖNERİLER

Seramik sektörü nünde içinde bulunduğu üretiminde temel amaç dünya standartlarına uygun iyi kalitede mamul üretmek ve pazarlamaktır. Bugünkü rekabet ortamında üretim maliyetleri de optimum seviyelerde olması gerekir. Söz konusu hedefe ulaşabilmek için seramik üreticileri iyi kalitede hammadde kullanmalı, üretim anında proses kontrolleri iyi olmalı, üretim öncesi ve sonrası gerekli testler çok iyi yapılmalıdır.

Daha öncede bahsettiğimiz gibi öğütme üretim maliyetleri içerisinde en çok değişiklik arz edebilecek kalemlerden biridir. Bilindiği gibi öğütme enerji yoğun bir işlemdir. Günümüzde tüm dünyada üretilen elektrik enerjisinin %5 kadarı öğütmede harcanmaktadır.

Yapmış olduğumuz pilot ölçekli deneysel çalışma sonucunda Hibrid öğütme sistemi klasik öğütme sistemine göre % 40 gibi bir enerji tasarrufuna olanak sağlamıştır.

Yapılan bu deneyin endüstriyel boyutlara taşınarak uygulanması seramik sektörü için büyük bir kazanım olacağı inancındayım.

8. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Apling, A. ve Bwalya, M. 1997, Evaluating High Pressure Milling for Liberation Enhancement and Energy Saving, Minerals Engineering, 10, 9, 1013-1022.
- Austin, L. G., Shoji, K., and Bell, D., 1982 a, Rate Equations for Non-Linear Breakage in Mills Due to Material Effects, Powder Tech., 31, 127-133.
- Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T., and Rogers, R. S. C., 1982 b, Simulation of Grinding Circuits for Design, Design and Installation of Comminution Circuits, SME/AIME, 301-324.
- Bond, F. C., 1947, Standart Grindability Tests Tabulated, Trans. SME/AIME, 183, 313-329.
- Bond, F. C., 1952, The Theory of Comminution, Mining Engineering, May, 484-494.
- Bond, F. C., 1952, The Theory of Comminution, Mining Engineering, May, 484-494.
- Bond, F. C., 1960, Three Principles of Comminution, Mining Congress Journal, August, pp. 3-56.
- Bond, F. C., 1961, Crushing and Grinding Calculations Part 1, British Chemical Engineering, 6, 6, 378-385.
- Bond, F. C., 1962, Crushing and Grinding with Pyroprocessing, Pit and Quarry, January, 162-166.
- Bond, F. C., ve Maxson, W. L., 1943, Standart Grindability Test and Calculations, Trans. SME/AIME, 153, 362-372.

- Cankurt, G., Granit seramik karolarda görülen leke tutma hatasının giderilmesi ve seramik atıklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 2004, Eskişehir, 4-11.
- Charles, R. J., 1957, Energy-Size Reduction Relationship in Comminution, Mining Eng., January, 80-88.
- Cho, K., 1987, Breakage Mechanisms in Size Reduction, PhD Thesis University of Utah, 131 p.
- D.W. Fuerstenau, J.J. Lutch, A. De, 1999, The effect of ball size on the energy efficiency of hybrid high-pressure roll mill/ball mill grinding, Powder Technology, 105, 199–204.
- Dieter, G. E., 1976, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill.
- Hartley, J. N., Prisdrey, K. A., and Wick, O. J., 1978, Chemical Additives for Ore Grinding: How Effective are They?, Engng Min. J., October, 105.
- Hukki, R. T., 1961, Proposal for a Solomonic Settlement Between the Theories of Rittinger, Kick and Bond, Trans. SME/AIME, 220, 403-403.
- Hukki, R. T., 1975, The Principles of Comminution: an Analytical Summary, E&MJ, May, 106-110.
- Irwin, G. R., 1936, Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Sheet and Aluminum Alloys, U. S. Naval Res. Lab. Report 4763.
- Tavares, L.M., 2005, Particle weakening in high-pressure roll grinding, Minerals Engineering, 18, 651–657.

- Lynch, A.J., 1977, Mineral Crushing and Grinding Circuits, their Simulation, Optimisation, Design and Control, Elsevier, Amsterdam, 340.
- Marshall, V. C., 1966, Crushing and Crushing-Critique of Existing Laws, Chem. And Process Eng., April, 177-183.
- Marshall, V. C., 1975, Comminution: I, Engineering Chem., 12-14.
- Aydoğan, N. Ergün, L. ve Benzer, 2006, H. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. Minerals Engineering, Volume 19, Issue 2, 130-139.
- Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., and Kojovic, T., 1996, Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation, JKMRRC , University of Queensland, 413
- Öner, M., 1996, Çimento Endüstrisinde Eski Düşünceler Yeni Öğütme Teknolojilerine Dönüşüyor, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Sayı 2, 25-41.
- Partridge, A. C., 1978, Principles of Comminution, Mine and Quarry 7 July/Aug., 70.
- Pryor, E. L., 1965, Mineral Processing, Elsevier, London, 35.
- Reed, J. S., 1995, Principles of Ceramic Processing, John Wiley & Sons Inc., 658 .
- Sacmi, 2002, Applied Ceramic Technology, İmola, İtaly, Vol. 2, 24.
- Sayarer, G., Seramik yer karosu bünyede bazaltın alternatif bir hammadde olarak kullanımı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 2006, Eskişehir, 16-22.

- Sönmez, B., 1992, Gümüş Cevherinin Kırılma Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Öğütme Devresinin Benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 112.
- Tanaka, T., 1966, Comminution Laws, I&EC Process Design and Development, Vol. 5 No. 4, October, 353-358.
- Walker, D. R., and Shaw, M. C., 1954, A Physical Explanations of The Emprical Laws of Comminution Trans. SME/AIME, 199, 313-320.
- Wills, B. A., 1997, Mineral Processing Thechnology, 6th ed., Butterwoth&Henimann, 486