



Araştırma Makalesi

FARKLI ÖĞÜTME KOŞULLARININ SERAMİK ÜRÜN ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Erdal KARA^{1, a} A. Dilek ÇUHADAROĞLU^{2, b}

¹ Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği, Zonguldak, Türkiye

² Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği, Zonguldak, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-7043-6270; ^bORCID:0000-0002-4164-3446

✉ Sorumlu Yazar: erdalkara@beun.edu.tr

Geliş tarihi: 07/04/2025

Kabul tarihi: 21/05/2025

Özet: Bu çalışma kapsamında, seramik sektöründe döküm çamuru eldesinde konvansiyonel olarak kullanılan öğütme yöntemine alternatif bir bakış açısı getirilmiştir. Kuvars kumu ve albit karışımının bilyalı değirmende artan sürelerde sulu öğütülmesi sonunda alınan ürünlerden hazırlanan seramik çamurları ile aynı malzemelerin ayrı ayrı artan sürelerde sulu öğütülerek elde edilen öğütme ürünlerinden hazırlanan seramik çamurları karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemin seramik ürün üzerindeki etkileri seramik test ve deneyleriyle değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan deneyler özetle; Öncelikle albit ve kuvars kumu numuneleri ile, ayrı ayrı ve karışım halde, farklı farklı öğütme sürelerinde öğütme deneyleri yapılmıştır. 3 saat öğütme süresi sonunda alınan öğütülmüş albit ve 5 saat öğütme süresi sonunda alınan öğütülmüş kuvars kumu ile reçeteye uygun olarak döküm çamurları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu döküm çamurlarının reolojik özellikleri ve bu çamurlardan elde edilen sinterlenmiş ürünlerin testleri yapılmıştır. Karışım halde farklı sürelerde yapılan öğütme deneylerinde kuvars kumu ve albit karışımının 5 saat birlikte öğütülmesi ile alınan öğütme ürününden hazırlanan döküm çamurunun reolojik özellikleri belirlenmiş ve bu çamurlardan elde edilen sinterlenmiş ürünlerin testleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları arasında belirgin bir fark olmadığı, dolayısıyla ayrı ayrı öğütmenin öğütme süreleri açısından daha avantajlı olduğu, daha düşük öğütme enerjisi tüketimiyle konvansiyonel öğütme prosesine alternatif olabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Albit, Bilyalı değirmen, Boyut küçültme Kuvars kumu, Öğütme, Seramik.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT GRINDING CONDITIONS ON CERAMIC PRODUCT

Abstract: This study proposes an alternative to the conventional grinding method used in producing casting sludge in the ceramic industry. Quartz sand and albite were ground both separately and as a mixture for varying durations. Ceramic sludges were prepared using albite ground for 3 hours and quartz sand ground for 5 hours, and their rheological properties along with the characteristics of the sintered products were tested. Additionally, sludge was prepared by co-grinding both materials for 5 hours, and similar tests were conducted. The findings showed no significant difference in the properties of the final ceramic products between the two methods. However, individual grinding reduced total grinding time and proved to be more energy-efficient. Thus, separate grinding of raw materials can be considered a viable alternative to the traditional method, offering benefits in terms of time and energy savings without compromising product quality.

Keywords: Albite, Ball mill, Size reduction Quartz sand, Grinding, Ceramic

1. Giriş

Endüstriyel seramik çamuru üretiminde kullanılan temel hammaddeler kuvars kumu, Na-Feldspat (albit) ve kil grubu hammaddelerdir. Seramik çamuru reçetesinde yer alan bu özsüz hammaddeler bilyalı değirmenlerde tane boyutu %95'i (d_{95}) 63 μ m olacak şekilde çoğunlukla alümina bilyalar kullanarak sulu şekilde öğütülür (Köseoğlu vd. , 2018). Geleneksel olarak öğütme işlemlerinde bilyalı

değirmenler kullanılmaktadır. Öğütülecek malzeme miktarı ve boyutu, öğütücü ortam şekli ve doluluk oranı, öğütme süresi, öğütme devir hızı öğütmeyi etkileyen faktörlerdir (İpek, 2006; Qian vd. , 2013; Cuhadaroglu, 2008). Bu faktörler birçok araştırmacı tarafından farklı cevher ve malzemeler ile çalışılarak incelenmiştir (Cuhadaroglu ve Kara, 2016; Kizgut vd., 2010; Samanlı vd. , 2010; Pilevneli vd. , 2004). Bilyalı değirmenlere alternatif olarak dikey pinli karıştırıcı değirmenler enerji tüketimi ve tane boyut dağılımı açısından daha verimli bulunsa da küçük ölçekli çalışmaların dışında sektörde yaygın olarak kullanılmamaktadır (Cuhadaroglu & Kara, 2015; Cuhadaroglu vd. , 2013; Pilevneli vd. , 2004; Kara, 2011).

Bilyalı değirmenlerde istenilen tane boyutuna indirilen öğütme ürünü, değirmenden açıcılara alınarak özlü plastik hammaddeler (kil grubu) ile karıştırılır. Reolojik düzenleyicilerin ilavesi ile döküm çamuru hazırlanmış olur. Seramik çamurunun şekillendirme kabiliyetinin iyi olması reolojik özelliklerine bağlıdır. Reoloji tane boyut dağılımı, katı miktarı, kimyasal ve minerolojik kompozisyon, kullanılan elektrolitin cinsi, sıcaklık, pH gibi birçok parametrenin, çeşitli katkı maddelerin ilavesiyle (deflokülant, plastikleştirici ve bağlayıcı vb.) düzenlenmektedir (Golder, 2007; Stefano, 2019; Aydın, 2011).

Çamur içindeki tane dağılımının istenilen boyutta ve aralıkta olması çamur reolojisi, sinterleme süresi, camsı faz ve müllit oluşumu, küçülme ve deformasyon miktarı, mukavemet değeri, porozite ve su emme miktarlarını doğrudan etkilemektedir (Reed, 1995). Geleneksel yöntemlerle karışım halinde öğütülen kuvars kumu ve albitin tane boyutu ayrı ayrı kontrol edilememekte, nihai karışımın tane boyut dağılımı üzerinden yorum yapılmaktadır. Ancak ayrı ayrı her hammaddenin karışım içindeki etkisi farklıdır. Bu etki, tane dağılımındaki değişikliklerle olumlu ya da olumsuz çamurun reolojisinden, sinterleme özelliklerine kadar üretim sürecinde her aşamayı etkileyebilmektedir. Her cevherin kendine has boyut küçültme davranışı olduğundan bu çalışmada; cevherler ayrı ayrı ve birlikte sulu olarak öğütülmüş nihai döküm çamurun reolojisi ve bu çamurlardan elde edilen seramik ürünlere etkileri incelenmiştir. Benzer çalışmalar literatürde yer almaktadır. Bunlardan bazıları;

İpek (2006), tarafından yapılan çalışmada seramik hammaddelerinin farklı karışım oranlarıyla birlikte kuru olarak öğüterek, öğütülebilirlik özelliklerini, kırılma hızı ve dağılım fonksiyonları açısından değerlendirmiştir. Araştırma sonuçları, hammaddelerin ayrı ayrı kuru olarak öğütülmesinin en az %10 oranında enerji tasarrufu sağladığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, seramik üretim süreçlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir yaklaşım sunmaktadır.

Buna karşın karışım halde öğütülen cevherlerin öğütülmesi esnasında birinin diğerine öğütücü ortam gibi davrandığının tespit edildiği araştırmalarda bulunmaktadır, Cuhadaroglu vd. (2013), kolemanit katkılı çimento üretiminde klinker ile kolemanitin ayrı ayrı ve birlikte öğüterek, öğütülebilirliğini ve kinetik davranışlarını inceledikleri çalışmada; klinker parçacıklarının bir aşındırıcı etkiye sahip olduğu ve dolayısıyla kolemanit parçacıkları üzerinde ekstra bir öğütme etkisi olduğunu bildirmişlerdir.

Tane boyut dağılımının etkilerinin incelendiği çalışmalarda; Dağ (2009), yaptığı araştırmada kuvarsın tane boyutu küçüldükçe belirli özelliklerin değiştiğini tespit etmiştir. Özellikle, kuvars daha küçük tane boyutuna sahip olduğunda mukavemet ve su emme değerlerinde artış gözlemlendiğini belirtmiştir. Ayrıca, tane boyutu küçüldükçe paketleme yoğunluğunun, kuru küçülme ve pişme küçülme oranlarının ve sinterleme sıcaklığının arttığını, kuvarsın mikroyapısal özelliklerinin tane boyutu ile önemli ölçüde etkilendiğini ve bu parametrelerin seramik malzemelerin performansında kritik rol oynadığını bildirmiştir.

Kartal ve diğerleri (2004), yaptıkları çalışmada tane boyut dağılımlarının seramik çamur ve nihai ürün üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, tane boyutunun küçülmesi, süspansiyonun akışkanlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, artan tane spesifik yüzey alanının, taneler arası bağ oluşumunu destekleyerek sinterleşme sürecini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu durum, porozite ve su emme değerlerinin düşmesine, tanelerin birbirine daha yaklaşarak daha yoğun bir yapı oluşturmaya yol açmıştır. Sonuç olarak, mukavemet ve küçülme

değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu bulgular, seramik hammaddelerinin tane boyutunun, ürün performansı ve kalite üzerindeki kritik rolünü ortaya koyduğunu göstermektedir.

Karışım içindeki cevherleri farklı boyut küçültme davranışları farklı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. Umucu ve Deniz (2014), yaptığı çalışmada aynı öğütme şartları altında kuvars ve feldspatın kırılma özelliklerini incelemiştir. Çalışma, feldspatın kuvars ile karşılaştırıldığında daha kolay öğütülebildiğini ve daha düşük Bond iş endeksine sahip olduğunu ortaya koymuştur; bu durum feldspatın, kuvarstan daha hızlı bir şekilde kırıldığını göstermektedir. Bu bulgulara göre, seramik üretim süreçlerinde farklı hammadde malzemelerinin öğütme performanslarının optimize edilmesi enerji verimliliği açısından önemlidir.

Sodyum feldspatın tane boyutundaki küçülmenin sinterleme sıcaklığını düşürdüğü ve aynı zamanda pişirme büzülmesi, yığın yoğunluğu ve eğilme dayanımı gibi teknik özellikleri artırdığı bildirilmiştir. Öğütme işlemi sonucunda, hammadde partikül boyutu küçülürken, spesifik yüzey alanı artış gösterir. Bu durum, malzemelerin daha homojen bir şekilde karışmasını mümkün kılar. Aynı zamanda, tane temas yüzeyinin artması, faz oluşum hızını ve sinterleme yeteneğini olumlu yönde etkiler. Bu süreçler, seramik malzemelerin mikroyapısal özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlarken, elde edilen nihai ürünün performansının da artmasına olanak tanır (Vari 2004; Reed 1995).

Günbay ve diğerleri (2023), çalışmasında Na-Feldspatın tane boyutunun 63 μm altına indirilmesiyle pişirme büzülmesi, yığın yoğunluğu ve eğilme dayanımını azaldığı belirtilmektedir. Kalsit, kuvars ve hematit minerallerinin ikili karışımlarını geleneksel bilyalı değirmende hem yaş hem de kuru öğütme yöntemleriyle incelemiştir. Araştırma bulguları iki mineralin karışımının öğütme ürün boyut dağılımlarının, bu minerallerin aynı süre zarfında tek başına öğütülmesiyle elde edilen ürün boyut dağılımları ile pratik olarak benzer olduğunu göstermektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada albit ve kuvars kumu numuneleri, vitrifiye üretimi yapan bir işletmenin stok sahasından sağlanmıştır. Numuneler 3350 μm altına kırılarak öğütme deneylerine hazırlanmıştır. Öğütme deneyleri ZBEUN Gökçebey MMÇ MYO Seramik Laboratuvarı'nda bulunan porselen bilyalı değirmende yapılmıştır. Kullanılan değirmene ait görseller Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Porselen bilyalı değirmen.

Çalışmada kullanılan porselen bilyalı değirmenin iç çapı 16 cm, boyu 17,5 cm olup toplam hacmi 3518 cm^3 'tür. Değirmen, sabit 90 dev/dk dönüş hızında çalıştırılmıştır. Öğütme ortamı olarak, yoğunluğu 3,6 g/cm^3 olan alümina bilyalar kullanılmış ve bilya dolum oranı (J) %54 olarak belirlenmiştir. Kullanılan bilyalar 25, 30 ve 35 mm çaplarında olacak şekilde üç farklı boyutta

seçilmiştir. Öğütülen malzemeler karışım, albite ve kuvars kumu olmak üzere üç grupta değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin yoğunlukları sırasıyla 2,56, 2,60 ve 2,50 g/cm³ olup; malzeme yükü (fc) 0,23, 0,22 ve 0,24 olarak ayarlanmıştır. DeneySEL koşullarda, boşluk doldurma oranları (U) ise; karışım için 1,07, albit için 1,04 ve kuvars kumu için 1,11 olarak belirlenmiştir.

Öğütme deneyleri sonucu elde edilen ürünlerin tane boyut dağılımları ZBEUN Maden Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Malvern Mastersizer S2000 cihazı ile belirlenmiştir. Lazer difraksiyon tekniği, partikül boyut dağılımının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde helyum-neon lazer kaynağından çıkan ışın, partiküller üzerine gönderilir ve yüzeylerine çarptığında kırınımına uğrar. Elde edilen kırınım desenleri algılayıcılar aracılığıyla analiz edilerek partikül boyut dağılımı hesaplanır. Özellikle 0,1–2000 µm aralığındaki partiküllerin ölçümünde yüksek doğruluk sağlar. Cihaza ait görsel Şekil 2’de sunulmuştur. Albit ve kuvars kumuna ait kimyasal analizler ve bilyalı değirmen girişi elek analizleri sırasıyla Tablo 1, 2, 3 ve 4’de verilmiştir.



Şekil 2. Malvern Mastersizer S2000 cihazı.

Tablo 1. Albitin kimyasal analizi.

İçerik	%
SiO ₂	70,64
Al ₂ O ₃	17,87
Na ₂ O	9,79
TiO ₂	0,19
CaO	0,73
MgO	0,05
K ₂ O	0,20
Fe ₂ O ₃	0,13
Kızdırma Kaybı	0,27

Tablo 2. Albitin bilyalı değirmen girişi elek analizi.

Tane Boyutu (µm)	Miktar (%)	EA Σ%↑	EÜ Σ% ↓
-3350+2360	19,00	100,00	19,00
-2360+1700	12,95	81,00	31,95
-1700+1180	6,90	68,05	38,85
-1180+850	5,45	61,15	44,30
-850+600	2,75	55,70	47,05
-600+425	2,80	52,95	49,85
-425+300	5,25	50,15	55,10
-300+180	7,70	44,90	62,80
-180+106	19,00	37,20	81,80
-106	18,20	18,20	100,00

Tablo 1’e göre %70,64 SiO₂ içeren albitin Al₂O₃ miktarı %17,87 ve Na₂O miktarı %9,79 olduğu görülmektedir. Tablo 2’ye göre tüm malzeme 3350 µm altında kalırken, %18,20 lik kısmı 106 µm altında kalmıştır.

Tablo 3. Kuvars kumu kimyasal analizi.

İçerik	%
SiO ₂	91,56
Al ₂ O ₃	5,10
Na ₂ O	-
TiO ₂	0,15
CaO	0,05
MgO	0,18
K ₂ O	0,29
SO ₃	-
Kızdırma Kaybı	2,15

Tablo 3'e göre kuvars kumu %91,57 SiO₂ ve %5,11'i Al₂O₃'den oluşmaktadır. Geleneksel seramik üretiminde kullanılan çamur içeriğinde kuvars kumunun SiO₂ içeriğinin en az %90, Al₂O₃ içeriğinin %6 ve Fe₂O₃'in ise en fazla %0,5 olması beklenen bir durumdur.

Tablo 4. Kuvars kumunun bilyalı değirmen giriş elek analizi.

Tane Boyutu (µm)	Miktar (%)	EA Σ%↑	EÜ Σ%↓
-425+300	7,90	100,00	7,90
-300+180	9,10	92,10	17,00
-180+106	72,00	83,00	89,00
-106	11,00	11,00	100,00

Tablo 4 incelendiğinde malzemenin tamamının 425 µm'nin altında olduğu görülmektedir. Öğütme çalışmalarında albit ve kuvars kumu hem ayrı ayrı öğütülmüş hem de sektörde geleneksel olarak karışım halinde yapılan öğütme işlemini temsilen karışım halinde aynı öğütme şartları altında öğütülerek öğütme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Öğütme deneylerinden elde edilen ürünler ile döküm çamurları hazırlanmıştır. Plastik hammaddeler literatürde yer alan standart oranlara göre %50 sert (albit ve kuvars kumu) ve %50 plastik (kil ve kaolen) olacak şekilde karıştırılarak döküm çamurları elde edilmiştir (Fortuna, 2000). Çamur reçetesini oluşturan hammadde oranları Tablo 5'de verilmiştir

Tablo 5. Reçete oranları.

Hammadde Türü	Hamadde	Miktarı (%)
Sert	Kuvars kumu	20
	Albit	30
Plastik	Kaolen	20
	Kil	30
Toplam		100

Döküm çamuru hazırlama işleminde reçetede belirtilen oranlarda kil ve kaolen öğütme işlemi yapılmış albit ve kuvars kumu karışımına ilave edilerek laboratuvar tipi karıştırıcıda 2 saat karıştırılmış, standart döküm çamuruyla benzer reolojik özelliklerin elde edilmesi için yaklaşık %0,2-0,3 oranında cam suyu (Na₂SiO₃) ilave edilmiştir. %63-65 aralığında su kullanılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında karışım, 150 µm'luk elekten geçirilerek bir gün süre ile dinlendirme işlemi yapılmıştır. Bu şekilde reolojik özelliklerin daha stabil hale gelmesi hedeflenmiştir. Viskozite ölçümü 100 ml kapasiteli Ford Cup viskozimetresi kullanılarak yapılmıştır. Sıvının viskozitesi akış süresi ile doğru orantılı olarak artan bir değerdir. Hazırlanan çamurlara ait fiziksel değerler Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Çamurlara ait fiziksel değerler.

Fiziksel Özellik	Değer
Viskozite (sn)	40-43
Litre ağırlığı (gr/lt)	1750-1850
Tiksotropi (sn)	50-55

Albit (A) ve kuvars kumunun (KK) ayrı ayrı öğütme süreleri sonunda elde edilen öğütme ürün kodları ile albit ve kuvars kumunun reçete oranlarına göre geleneksel olarak birlikte öğütülmesi sonucu hazırlanan numuneler (A3, A4, KK3, KK4, KK5) şeklinde kodlanmış, geleneksel olarak reçete dahilinde karışım halinde öğütme numunelerine (K), öğütme süreleri (saat) rakamsal ifadeyle eklenmiştir (K3,K4,K5). Öğütme sürelerine göre tanımlanan kodlar, Tablo 7’de, öğütme sürelerine hazırlanan çamur kodları ve ortalama tane boyutu (d_{50}) değerleri Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 7. Öğütme sürelerine göre tanımlayıcı kodlar.

Malzeme	Öğütme Süresi (saat)	Kodu
Albit	3	A3
Albit	4	A4
Kuvars kumu	3	KK3
Kuvars kumu	4	KK4
Kuvars kumu	5	KK5
Karışım	3	K3
Karışım	4	K4
Karışım	5	K5

Tablo 8. Öğütme numunelerinden elde edilen çamur kodları ve (d_{50}) değerleri.

Numune Kodu	Çamur Kodu	Ortalama Tane Boyutu, d_{50} (μm)
K3	Ç3	11,58
K4	Ç4	9,23
K5	Ç5	7,73
A3+KK3	Ç6	10,28
A3+KK4	Ç7	9,01
A4+KK4	Ç8	8,40
A3+KK5	Ç9	8,48

Tablo 8 incelendiğinde, K3, K4 ve K5 kodlu karışımlarda elde edilen kuru küçülme değerlerinin, öğütme süresiyle doğru orantılı, ortalama tane boyutuyla ise ters orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin, K3 numunesinin d_{50} değeri 11,58 μm iken, K5 numunesinde bu değer 7,73 μm ’ye düşmüştür.

3. Bulgular

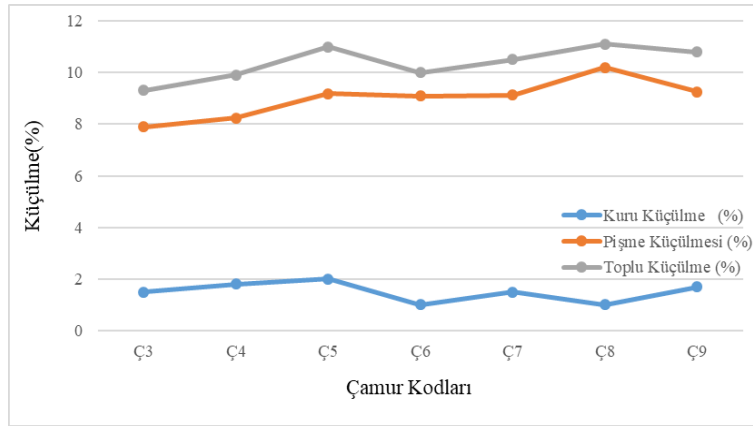
Elde edilen döküm çamurları kullanılarak, standart kuru mukavemet çubukları ve küçülme test plakaları dökülmüştür. Bu numuneler, ilgili işletmenin seramik fırınında 1150 °C ile 1250 °C sıcaklık aralığında, yaklaşık 15 saat süreyle sinterlenmiş test ve deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.1 Kuru Küçülme, Pişme Küçülmesi ve Toplu Küçülme Testleri

Kuru, pişme ve toplu küçülme testi sonuçları Tablo 9’da ve ilgili sonuçların grafiksel gösterimi ise Şekil 3’de verilmiştir.

Tablo 9. Kuru, pişme ve toplu küçülme testi sonuçları.

Uygulanan Testler	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8	Ç9
Kuru Küçülme (%)	1,5	1,8	2,0	1,0	1,5	1,0	1,7
Pişme Küçülmesi (%)	7,9	8,24	9,18	9,09	9,13	10,2	9,25
Toplu Küçülme (%)	9,3	9,9	11	10	10,5	11,1	10,8



Şekil 3. Küçülme testleri sonuçları.

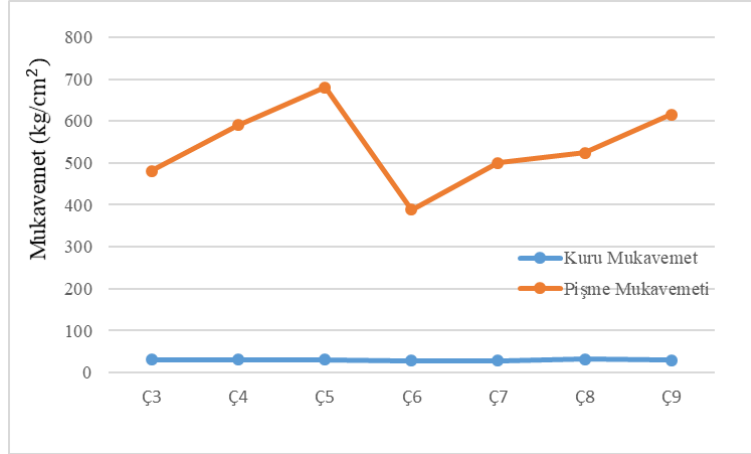
Albit ve kuvars kumu ayrı ayrı öğütülerek elde edilen ürünlerle hazırlanan çamurların (Ç6, Ç7 ve Ç9) kuru küçülme değerleri de benzer şekilde, öğütme süresiyle doğru orantılı ve tane boyutuyla ters orantılı olarak artış göstermiştir. Küçülme testleri incelendiğinde, Ç3, Ç4 ve Ç5 numunelerinde bu değerlerin de öğütme süresine bağlı olarak arttığı, ortalama tane boyutunun (d_{50}) küçülmesiyle birlikte bu eğilimin daha belirgin hâle geldiği tespit edilmiştir. Aynı durum, ayrı ayrı öğütülmüş albit ve kuvars karışımlarından hazırlanan Ç6, Ç7 ve Ç9 numunelerinde de gözlemlenmiştir. Bu numunelerde albitin tane boyutu sabit tutulurken, kuvars kumunun daha uzun süre öğütülmesi, pişme ve toplam küçülme üzerinde olumlu etki yaratmıştır. Diğer yandan, Ç7 ve Ç8 numunelerinde kuvars kumu sabit tutulmuş, albitin öğütme süresi artırılmıştır. Bu durumda da artan öğütme süresiyle birlikte toplam küçülmenin ve pişme küçülmesinin yükseldiği görülmüştür. Bu artış; öğütmeye bağlı olarak yüzey alanının artması, tane boyutunun küçülmesi ve tanecikler arasındaki boşlukların azalmasıyla açıklanabilir. Ayrıca spesifik yüzey alanının artışı, suyun daha kolay buharlaşmasına olanak tanıyarak kuru küçülmeyi desteklemektedir. Genel olarak, kuru küçülme değerinin %2’nin altında olması arzu edilmektedir (Tari vd. , 1998).

3.2 Mukavemet Testleri

Kuru mukavemet değeri, genel olarak 28 kg/cm² olarak kabul edilmekte olup, bu eşik değerin altına düşülmemesi hedeflenmektedir (Özdemir, 2005). Pişirilmiş ürünün mukavemeti ise, pişmiş ürünün kırılmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Bu bağlamda, numunelerin üç nokta eğilme dayanımı testi ile ölçülen mukavemet değerleri Tablo 10’da verilmiş, ilgili sonuçların grafiksel gösterimi ise Şekil 4’de sunulmuştur.

Tablo 10. Kuru mukavemet ve pişme mukavemeti sonuçları.

Mukavemet (kg/cm ²)	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8	Ç9
Kuru Mukavemet	30,97	31,01	31,21	28,4	28,95	31,73	29,19
Pişme Mukavemeti	480,48	590,18	680,44	388,7	500,74	524,43	615,18

**Şekil 4.** Kuru ve pişme mukavemeti değerleri.

Karışım numuneleri kullanarak üretilen çamlara ait kuru mukavemet değerlerinin, öğütme süresiyle doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek kuru mukavemet, albit ve kuvars kumunun ayrı ayrı ancak eşit sürede öğütülmesiyle hazırlanan Ç8 numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, kuru mukavemeti belirleyen temel değişkenin ortalama tane boyutu olduğunu göstermektedir. Daha küçük taneler, şekillendirme sırasında daha sıkı bir şekilde paketlenerek yoğun bir yapı oluşmasına olanak sağlamıştır. Tane boyutundaki küçülme, toplam yüzey alanını artırmış ve bu artış, mukavemetin yükselmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca, çamurun plastiklik özelliklerini etkileyen parametrelerin de kuru mukavemet üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Tane boyutunun azalmasıyla birlikte, taneciklerin çevresinin su tabakası ile kaplanması, bağlayıcılığı artırmış ve bu da mukavemeti olumlu yönde etkilemiştir. Geniş bir tane boyutu dağılımı, kurutma sürecinde oluşabilecek çatlaklara karşı direnci artırarak yapının bütünlüğünü desteklemiştir. Öte yandan, en düşük kuru mukavemet değeri, hem albitin hem de kuvars kumunun daha iri taneli olduğu Ç6 numunesinde ölçülmüştür.

3.3 Su Emme Testi

Su emme testi işletmede TS 800 EN 997 standardına göre yapılarak sonuçlar Tablo 11'de sunulmuştur. Elde edilen bulgular, ortalama tane boyutunun artması (yani öğütme süresinin azalması) ile birlikte su emme değerlerinin yükseldiğini göstermektedir. Öğütme süresine bağlı olarak d_{50} değerlerinin küçülmesi, pişme sırasında oluşan sıvı faz miktarını artırmış, bu durum ise vitrifikasyonu destekleyerek gözenekliliğin azalmasına katkı sağlamıştır. Bu bağlamda, daha iri tane boyutlarına sahip olan Ç3 ve Ç6 numunelerinde su emme oranlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, tane boyutunun küçülmesiyle birlikte su emme oranının azalması, literatürle uyumlu olarak beklenen bir sonuçtur (Bernasconi vd. , 2011).

Tablo 11. Su emme testi sonuçları.

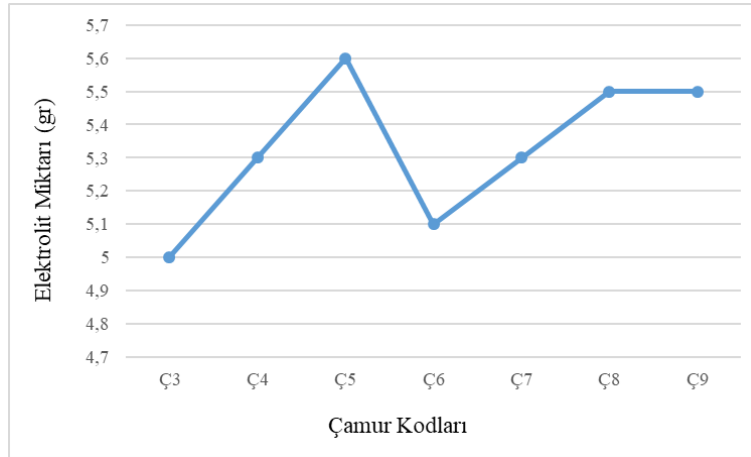
Test	Ç3	Ç4	Ç5	Ç6	Ç7	Ç8	Ç9
Su Emme (%)	0,05	0,01	0,01	0,2	0,01	0,01	0,01

3.4 Tane Boyut Dağılımının Viskoziteye Etkisi

Tane boyut dağılımları farklı ancak aynı hammadde ve deney koşullarında elektrolit olarak cam suyu (Na_2SiO_3) kullanımı ile hazırlanan döküm çamurlarının viskozite değerleri ölçülmüştür. Hazırlanan çamurlarda viskozite değer aralıkları işletme çamuruna ait değerler referans alınarak belirlenmiştir. İşletme değerlerine yaklaşım için kullanılan elektrolit miktarları ve viskozite değerleri Tablo 12, reçetelere göre elektrolit miktarlarına ait grafik Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 12. Döküm çamurlarında kullanılan elektrolit oranları.

Çamur Kodu	Ortalama Tane Boyutu, d_{50} (μm)	Elektrolit Miktarı (gr)	Akış Süresi (sn)
Ç3	11,58	5,0	40
Ç4	9,23	5,3	41
Ç5	7,73	5,6	41
Ç6	10,28	5,1	41
Ç7	9,01	5,3	42
Ç8	8,40	5,5	42
Ç9	8,48	5,5	43



Şekil 5. Eklenen elektrolit miktarları.

Çamurlarda ortalama tane boyutunun azalmasıyla birlikte, aynı akışkanlık seviyesini sağlamak için gereken elektrolit miktarının arttığı; buna karşılık tane boyutu büyüdükçe ihtiyaç duyulan elektrolit miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Referans olarak kullanılan Ç5 çamurunda 5,6 gram elektrolit gerekirken, Ç8 ve Ç9 çamurları için bu miktar 5,5 grama düşmüştür. Elektrolitin etkinliği sonucunda deflokülasyon gerçekleşerek viskozite azalmaya başlar. Tanelerin şekli, yüzey özellikleri ve dağılımı bu durumu etkilemektedir. Farklı tane boyutlarında farklı viskozite ve akma davranışları ortaya çıkmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe, daha yoğun ve sıkı bir yapı oluşmakta; bu da kayma gerilimini artırarak viskoziteyi yükseltmektedir. Bu nedenle, artan viskoziteye karşılık daha fazla elektrolit kullanımının gerekli olduğu düşünülmektedir (Stockley, 2007).

4. Tartışma ve Sonuç

Seramik sektöründe hammaddelerin birlikte öğütülmesi geleneksel olarak uygulanan bir yöntemdir. Hammaddelerin ayrı ayrı öğütülmesi yapılan test ve deney sonuçları altında incelendiğinde, öğütme sürecinin her bir bileşen için ayrı ayrı kontrol edilebilirliğin olduğu, farklı öğütme özelliklerinden ötürü öğütme enerjisi gereğinden fazla harcanmadan istenilen tane boyutuna ulaşılabilirdiği ve bunun sonucunda reolojik özelliklerinin değişmediği, fiziksel test sonuçlarının etkilenmediği tespitleri yapılmıştır. Örneğin karışım halinde 5 saatlik öğütme sonunda elde edilen öğütme ürünlerinden hazırlanan Ç5 çamuruna ait sonuçlar ile albitin 3, kuvars kumunun 5 saatlik öğütülmesi sonunda elde edilen öğütme ürünlerinden hazırlanan Ç9 çamuruna ait sonuçlar

karşılaştırıldığında birbirine yakın değerler elde edildiği, ancak harcanan öğütme süreleri açısından incelendiğinde enerji tüketim değerleri düşeceğinden hammaddelerin ayrı ayrı öğütülmesinin daha avantajlı olduğu tespiti yapılmıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Yazarların Katkı Oranı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan etmişlerdir.

Finansal Destek

Bu araştırma herhangi bir fon sağlayan kurumdan / sektörden hibe almadı

Açıklama

Bu çalışmada sunulan veriler yazarın doktora tezinden elde edilen verilere dayanmaktadır.

Kaynakça

Köseoğlu, K., Cengizler, H., & İsrail, L. (2018). Kuebrako'nun seramik çamuru reolojik özellikleri üzerindeki etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(60), 1–10.

İpek, H. (2006). The effects of grinding media shapes on breakage rate: Technical note. Minerals Engineering, 19, 91–93.

Qian, H. Y., Kong, Q. G., & Zhang, B. L. (2013). The effects of grinding media shapes on the grinding kinetics of cement clinker in ball mill. Powder Technology, 235, 422–425.

Cuhadaroğlu, D., Samanlı, S., & Kızgut, S. (2008). The effect of grinding media shape on the specific rate of breakage. Particulate and Particle Systems Characterization, 25, 465–473.

Cuhadaroğlu, A. D., & Kara, E. (2015). The investigation of breakage kinetics of vitrified sanitary ware wastes in laboratory-scale ball and stirred mills. Particulate Science and Technology, 34(1), 9–16.

Kızgut, S., Cuhadaroğlu, D., & Samanlı, S. (2010). Stirred grinding of coal bottom ash to be evaluated as a cement additive. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 32(16), 1529–1539

Samanlı, S., Cuhadaroğlu, D., İpek, H., & Uçbaş, Y. (2010). The investigation of grinding kinetics of power plant solid fossil fuel in ball mill. Fuel, 89(3), 703–707.

Pilevneli, C. C., Kızgut, S., Toroğlu, İ., Cuhadaroğlu, D., & Yiğit, E. (2004). Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill. Powder Technology, 139(2), 165–174.

Cuhadaroğlu, A. D., & Kara, E. (2015). The investigation of grindability of refractory wastes in their recycling. Refractories and Industrial Ceramics, 56(3), 278–284.

Cuhadaroğlu, A. D., Kızgut, S., Yılmaz, S., & Zorer, Y. (2013). Characterization of the grinding behavior of binary mixtures of clinker and colemanite. Particulate Science and Technology, 31(6), 596–602.

Kara, E. (2011). Refrakter atıklarının ve vitrifiye ıskartalarının öğütülebilirlik özelliklerinin incelenmesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.

Golder, T. (2007). The development of high-performance sanitaryware bodies to improve manufacturing productivity and yield. Ceramic Forum International, cfi/Ber. DKG, 84(1–2), 60–63.

Stefano Vitali, L. G. (2019). Overview of the Rheological Behaviour. FME Transactions(47), 42-47. doi:10.5937/fmet1901042V

Aydın, E. D. (2011). Kaplama malzemesi olarak seramik üretiminin bölgesel dağılımına etki eden parametrelerin araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

Reed, J. S. (1995). Principles of ceramic processing (pp. 200–203). John Wiley & Sons.

Dağ, P. (2009). Sağlık gereçlerinde kompozisyon değişimlerinin sinterleme üzerine etkileri, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

Kartal, A., & Kurt, Z. (2004). Tane boyutunun masseye ve ürünün fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 4(1–2), 7–15.,

Umucu, Y., & Deniz, V. (2014, January). The evaluation of grinding behaviors of quartz and feldspar. The Online Journal of Science and Technology, 4(1).

Vari, A. (2004). Raw materials preparation and forming of ceramic tiles. Sala.

Günbay, A. A., Kunduracı, N., & Aydın, T. (2023). Seramik sıhhi tesisat malzemelerinin termal özellikleri üzerinde feldspat tipi ve tane boyutunun etkisinin araştırılması. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148, 11549–11567.

Fortuna, D. (2000). Sanitaryware. Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.P.A., 55–61.

Tari, G., Ferreira, J. M. F., Fonseca, A. T., & Lyckfeldt, O. (1998). Influence of particle size distribution on colloidal processing of alumina. Journal of the European Ceramic Society, 18, 249–253.

Özdemir, B. (2005). Döküm Çamuru Optimizasyonu, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Eskişehir.

Bernasconi, A., Diella, V., Pagani, A., Pavese, A., Francescon, F., Young, K., Stuart, J., & Tunnicliffe, L. (2011). The role of firing temperature, firing time and quartz grain size on phase-formation, thermal dilatation and water absorption in sanitary-ware vitreous bodies. Journal of the European Ceramic Society, 31(8), 1353–1360.

Stockley, D. (2007). Fine fireclay: An overview of raw materials and body formulations. Ceramic Forum International, cfi/Ber. DKG, 85(3), 19–22.