



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÖĞÜTME YARDIMCILARI İLE BOR
CEVHERİNİN ÖĞÜTME PERFORMANSININ
VE ENERJİ TÜKETİMİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ

AISHA NAWFAL AHMED AHMED

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

AISHA NAWFAL AHMED AHMED tarafından hazırlanan “ÖĞÜTME YARDIMCILARI İLE BOR CEVHERİNİN ÖĞÜTME PERFORMANSININ VE ENERJİ TÜKETİMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması 23/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Seda ŞAHİN

Danışman

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

Üye

Doç. Dr. Fatih AYDIN

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../2025 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

AISHA NAWFAL AHMED AHMED

Tarih: 14/08/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖĞÜTME YARDIMCILARI İLE BOR CEVHERİNİN ÖĞÜTME PERFORMANSININ VE ENERJİ TÜKETİMİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

AISHA NAWFAL AHMED AHMED

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

2025, 47 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

Doç. Dr. Fatih AYDIN

Doç. Dr. Seda ŞAHİN

Çalışmada, farklı üç adet saf öğütme yardımcısının (Trietanolamin, Diethylene ve 1-Hexanol) bor cevherinin öğütme performansı ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin gezegen tip değirmende araştırılması yapılmıştır. Belirlenen kimyasalların bor'un öğütülmesi üzerindeki etkileri tane boyutu, öğütme süresindeki değişimler, tüketilen enerji miktarları ve öğütülen ürünlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (tane topaklanması olup olmadığını gözlemlemek için) ile tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarından, daha az enerji ile daha ince boyutlu ürünler elde edilebileceği belirlenmiştir. Bor cevherinin 240 saniyelik öğütme süresinde ve 0,5 wt% oranında TEA ilave edilerek gezegen tip değirmende öğütülmesi sonucu d_{50} 35,15 μm boyutunda ürün elde edilmiştir. Bu ürünlerin elde edilebilmesi için ihtiyaç duyulan enerji miktarı ise 170 kwh/t'tir. Böylece, az miktarda ilave edilen öğütme yardımcılarının öğütme yardımcısız yapılan deneylere kıyasla öğütülen ürünlerin d_{50} boyutlarında yaklaşık %50 oranında ve bununla orantılı olarak enerji tüketiminde de yaklaşık %50 oranında bir iyileştirme sağlanabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Boyut küçültme, Enerji, Gezegen tip değirmenler, Öğütme yardımcıları.

ABSTRACT

MS THESIS

**IMPROVING THE GRINDING PERFORMANCE AND ENERGY
CONSUMPTION OF BORON ORE WITH GRINDING AIDS**

AISHA NAWFAL AHMED AHMED

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENERGY SYSTEMS
ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

2025, 47 Pages

Jury

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

Doç. Dr. Fatih AYDIN

Doç. Dr. Seda ŞAHİN

In the study, the effects of three different pure grinding aids (Triethanolamine, Diethylene and 1-Hexanol) on the grinding performance and energy consumption of boron ore were investigated in planetary type mills. The effects of the determined chemicals on the grinding of boron ore were determined by grain size, changes in grinding time, energy amounts and scanning electron microscope (SEM) images of the milled products (to observe whether there was grain agglomeration). From the experimental results, it was determined that finer sized products could be obtained with less energy. Boron ore was ground in a planetary type of mill with a grinding time of 240 seconds and TEA added at a rate of 0,5 wt%, resulting in a product with a d_{50} of 35,15 μm . The amount of energy required to obtain these products is 170 kWh/t in a planetary mill. Thus, it was concluded that small amounts of added grinding aids could provide an improvement of approximately 50% in the d_{50} dimensions of the ground products and, accordingly, an improvement of approximately 50% in energy consumption compared to experiments conducted without grinding aids.

Keywords: Energy, Grinding aids, Planetary type mills, Size reduction.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans programında hazırlanmıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bana yol gösteren ve destek veren Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY danışmanıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm deneysel çalışmalarımızın yapılmasında desteklerini esirgemeyen NEÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne, NEÜ BİTAM Yönetimi'ne ve ekibine teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunuyorum.

Tüm hayatım boyunca her zaman bana destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

AISHA NAWFAL AHMED AHMED
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. Bor Cevheri.....	6
2.1.1. Borun endüstriyel kullanım alanları	6
2.1.2. Türkiye'nin bor potansiyeli	7
2.2. Bor Cevherinin Öğütülebilirlik Özellikleri.....	7
2.2.1. Mineralojik yapı ve sertlik	7
2.2.2. Tane boyutu dağılımı ve serbestleşme	7
2.2.3. Öğütme teknolojisi ve ekipmanlar	7
2.2.4. Enerji tüketimi ve proses kontrolü.....	8
2.3. Öğütme Yardımcılarının Özellikleri	8
2.3.1. Öğütme yardımcılarının etki mekanizmaları	13
2.3.2. Öğütme yardımcılarının yayılma mekanizması	19
2.4. Bor Cevherinin Öğütülmesinde Gezegen Tip Değirmenlerin Kullanımı	21
3. MATERYAL ve YÖNTEM	23
3.1. Materyal	23
3.2. Yöntem.....	24
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	29
4.1. Gezegen Tip Değirmende Öğütme Yardımcısı Miktarının Bor Cevherinin Tane Boyutu Üzerine Etkisi.....	29
4.2. Gezegen Tip Değirmende Öğütme Süresinin Bor'un Tane Boyutu Üzerine Etkisi	31
4.3. Bor Cevherinin Öğütülmesinde Öğütücü Yardımcılarının Enerji Tüketimine Etkisi	32
4.4. SEM Analizleri	38
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	40
5.1. Sonuçlar	40
5.2. Öneriler	41



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Deneyselde kullanılan bor cevher numunesi.....	23
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin tane boyut dağılımı.....	24
Şekil 3.3. Gezegen tipi değirmen.....	25
Şekil 3.4. Enerji tüketimini ölçen analizör.....	26
Şekil 3.5. Deneysel akım şeması.....	28
Şekil 4.1. Trietanolamin (TEA) miktarının bor cevherinin tane boyutuna etkisi.....	30
Şekil 4.2. Dietilen glikol (DEG) miktarının bor cevherinin tane boyutuna etkisi.....	30
Şekil 4.3. 1-Hexanol (HexOH) miktarının bor cevherinin tane boyutuna etkisi.....	31
Şekil 4.4. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresinin tane boyutuna etkisi.....	32
Şekil 4.5. Bor cevherinin öğütülmesinde TEA miktarının enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.....	33
Şekil 4.6. Bor cevherinin öğütülmesinde DEG miktarının enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.....	34
Şekil 4.7. Bor cevherinin öğütülmesinde HexOH miktarının enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.....	35
Şekil 4.8. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresine bağlı olarak TEA ilavesinin enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.....	36
Şekil 4.9. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresine bağlı olarak DEG ilavesinin enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.....	37
Şekil 4.10. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresine bağlı olarak HexOH ilavesinin enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.....	38
Şekil 4.11. Öğütme yardımcısız ve 0,5 wt% TEA ilave edilerek öğütülen bor cevherinin SEM görüntüleri.....	39
Şekil 4.12. Öğütme yardımcısız ve 0,5 wt% DEG ilave edilerek öğütülen bor cevherinin SEM görüntüleri.....	39
Şekil 4.13. Öğütme yardımcısız ve 0,5 wt% HexOH ilave edilerek öğütülen bor cevherinin SEM görüntüleri.....	39

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. PCE-GPA 62 Analizörün Teknik Özellikleri (PCE Instruments, 2023). 26



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Amper
B	: Bor
¹⁰ B	: Boron-10 İzotopu
B ₄ C	: Bor Karbür
BNNTs	: Bor Nitrür Nanotüpleri
°C	: Santigrat Derece
C ₄ H ₁₀ O ₃	: Dietilenglikol
C ₆ H ₁₄ O	: 1-Hexanol
C ₆ H ₁₅ NO ₃	: Trietanolamin
C ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	: Kolemanit
d ₁₀	: %10 Kumulatif Geçişli Tane Boyutu (µm)
d ₅₀	: %50 Kumulatif Geçişli Tane Boyutu (µm)
d ₉₀	: %90 Kumulatif Geçişli Tane Boyutu (µm)
dev	: Devir
dak	: Dakika
E	: Enerji
E ₀	: Yüksüz Enerji Miktarını
E _m	: Enerji Tüketimi
gr	: Gram
h	: Saat
Hz	: Hertz
kVA	: Kilovolt-Amper
kVAh	: Kilovolt-Amper saat
kVA _r	: Kilovolt-Amper Reaktif
kVA _r h	: Kilovolt-Amper Reaktif Saat
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt-Saat
mA	: Miliamper
mm	: Milimetre
M _p	: Öğütülecek Malzeme Miktarını
NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	: Üleksit
NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	: Tinkal
µm	: Mikrometre
pH	: Potansiyel Hidrojen
ppm	: Milyonda Bir Birim
rpm	: Dakikadaki Devir Sayısı
t	: Zaman
V	: Volt

VA : Volt-Amper
W : Watt
wt% : Ağırlıkça yüzde
% : Yüzde



Kısaltmalar

AA	: Standart Kalem Pil Boyutu
AC	: Alternatif Akım
AEEA	: Aminoetiletanolamin
BWI	: Bond Work Index
DEA	: Dietanolamin
DEG	: Dietilenglikol
E	: Enerji
E0	: Yüksüz Enerji Miktarını
EG	: Etilenglikol
Em	: Enerji Tüketimi
HEDETA	: Hidroksietil Dietilentriamin
HexOH	: 1-Hexanol
HGI	: Hardgrove Grindability Index
maks	: Maksimum
Mohs	: Mohs Sertlik Değeri
n.o	: Nominal Çıkış
PCE	: Polikarboksilat Eterler
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
TEA	: Trietanolamin
TEAT	: Trietilentetramin
TEPA	: Tetraetilenpentamin
TIPA	: Triizopropanolamin

1. GİRİŞ

Cevher yataklarında kıymetli minerallerin bulunabilirlikleri yıllar içerisinde giderek azalmaktadır. Bu durum, düşük tenörlü cevherlerin değerlendirilmesini daha da önemli hale getirmiştir. Çünkü ekonomik anlamda sürdürülebilir madencilik için artık daha ince dağılımlı minerallerin zenginleştirilmesi gerekmektedir. Söz konusu kıymetli minerallerin, içinde buldukları ana kayaçlardan ayrıştırılabilmesi için öncelikle serbestleştirme adı verilen bir işlem uygulanmaktadır. Bu işlem, cevherin önce kırılması, ardından uygun boyutlara kadar öğütülmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu bağlamda öğütme işlemleri, zenginleştirme sürecinin en yüksek enerji tüketen aşamasını oluşturmaktadır. Geleneksel olarak kullanılan çubuklu ve bilyeli değirmenler, özellikle mikron boyutuna kadar yapılan öğütme işlemlerinde hem enerji verimliliği açısından yetersiz kalmakta hem de ekonomik anlamda sürdürülebilirliğini yitirmektedir. Bu tür değirmenlerde tüketilen enerjinin yalnızca sınırlı bir kısmı doğrudan parçacık boyutunun küçültülmesinde kullanılırken, geri kalan büyük bölümü ısıya, sese ve sistem kayıplarına dönüşmektedir. Dolayısıyla, bu sistemlerin önemli eksiklikler içerdiği görülmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2009).

Teknolojik ilerlemelerin etkisiyle birlikte, madencilik sektöründe özellikle ince öğütmeye yönelik tekniklerin önemi giderek daha fazla fark edilmeye başlanmıştır. Ancak öğütme işleminin daha küçük boyutlara ulaşması, beraberinde ciddi enerji maliyetlerini getirmektedir. Bu nedenle, ince öğütme teknolojileri geliştirilirken enerji tüketimi kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Bakker, 2014). Bununla birlikte, 10 mikron ve altındaki boyutlarda yapılan öğütme işlemlerinde karşılaşılan temel sorunlardan biri, öğütme ortamında gerçekleşen partikül-parikül etkileşimlerinden kaynaklanan topaklanma eğilimidir. Bu durum, yüzey alanının artmasına paralel olarak yüzey enerjisinin de yükselmesi ve yüzeylerin reaktif hale gelmesiyle daha da karmaşık bir hâl almaktadır (Guzzo vd., 2020). Özellikle yüksek enerjili öğütme sistemlerinde bu tür etkileşimlerin sonucu olarak parçacıklar arasında güçlü bağlar oluşabilir ve istenmeyen topaklanmalar meydana gelebilir (Weibel ve Mishra, 2014; Prziwara vd., 2018). Öğütme sırasında uygulanan mekanik güç ve buna bağlı olarak tüketilen enerji, öğütmenin verimliliğini ve sonuç ürünün özelliklerini doğrudan belirleyen iki önemli değişkendir. Bu nedenle, özellikle enerji tüketiminin yüksek olduğu sistemlerde yapılacak teknik iyileştirmeler ve optimizasyon çalışmaları hem enerji tasarrufu sağlamak hem de ekonomik açıdan büyük avantajlar sunmaktadır.

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte mikronize öğütme işlemlerinin önemi giderek artmaktadır. Ancak, bu süreçle birlikte enerji tüketimi de büyük bir artış göstermekte ve bunun sonucunda öğütme maliyetleri de yükselmektedir. Enerji tüketiminin oldukça yüksek olduğu öğütme işlemlerinde, yapılacak en küçük iyileştirmeler bile büyük ekonomik kazançlar sağlama potansiyeline sahiptir. Öğütme işleminin verimliliği, çevresel ve operasyonel faktörlerden, özellikle öğütme ortamının kimyasal ve fiziksel koşullarından doğrudan etkilenmektedir (Katırcıoğlu-Bayel, 2016; Katırcıoğlu-Bayel, 2019).

Günümüzde endüstriyel ölçekte mikron altı boyutlarda parçacık üretimi büyük oranda mekanik öğütme teknikleri ile gerçekleştirilmekte; ancak bu işlemler ciddi enerji tüketimiyle birlikte yürütülmektedir. Bu nedenle, enerji tasarrufu sağlamak ve aynı zamanda ürün kalitesini iyileştirmek adına, öğütme sistemlerine çeşitli katkı maddeleri eklenmesi yöntemi giderek yaygınlık kazanmaktadır (Prziwara ve Kwade, 2020). Öğütme yardımcıları olarak adlandırılan bu kimyasal bileşikler, genellikle besleme malzemesinin ağırlığının %0,25'ini geçmeyecek şekilde sisteme dâhil edilir. Bu katkıların en önemli etkilerinden biri, ince boyutlu taneler arasında meydana gelen topaklanması önlemeleridir. Bu sayede hem öğütme verimi artmakta hem de daha az enerji harcayarak daha ince ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Aynı zamanda bu durum, üretim süreçlerinde enerji tasarrufu sağladığı gibi çevresel açıdan da emisyonların azaltılmasına katkı sunmaktadır (Chipakwe vd., 2020; Zhao, 2021). Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri arasında trietanolamin (TEA) ve mono etilen glikol (MEG) öne çıkmakla birlikte, günümüzde polimer bazlı yeni nesil öğütme yardımcılarının geliştirilmesiyle sistem performansının daha da artırılması hedeflenmektedir (Ersoy vd., 2022; Özcan vd., 2022).

Öğütme yardımcılarının etki mekanizmalarına ilişkin olarak literatürde çeşitli teoriler bulunmaktadır. Rehbinder ve Kalinkovaskaya (1932), yüzey aktif maddelerin katı yüzeylere adsorbe olması sonucu, bu maddelerin yüzey enerjisini düşürerek malzemenin mekanik direncini zayıflattığını ve bu şekilde kırılmayı kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir. Bu teori, öğütme sırasında katkı maddelerinin nasıl daha az enerji ile daha fazla kırılma sağladığını anlamada önemli bir temel oluşturmaktadır. Diğer yandan, Westwood ve Goldheim (1968), katkı moleküllerinin katı yüzeylerdeki plastisiteyi azaltarak malzemeyi daha kırılğan hâle getirdiğini ve bu özelliğin de öğütme verimliliğini doğrudan artırdığını belirtmişlerdir. Daha güncel çalışmalarda, Weibel ve Mishra (2014) ile Mishra vd. (2017), moleküler dinamik simülasyonları aracılığıyla, öğütme yardımcılarının partikül

yüzeilerine adsorbe olarak taneler arasındaki bağlanma enerjisini düşürdüğünü ve böylece topaklaşma eğilimini azalttığını göstermişlerdir. Bu bulgular, katkı maddelerinin yüzey enerjisini düşürme işlevi yoluyla mekanik özellikler üzerinde dolaylı fakat belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Gezegen tip öğütücüler, oldukça yüksek ivmelerin etkisiyle ortaya çıkan yoğun gerilim alanları sayesinde hem ıslak hem de kuru koşullarda, mikron altı hatta nanometre boyutlarına kadar parçacıkların inceltilmesine olanak sağlayan sistemlerdir (Karagedov ve Lyakhov, 2003). Bu değirmenlerin diğer klasik bilyeli değirmen sistemlerine göre belirgin avantajları arasında; kullanım sistematığının basit olması, temizlik işlemlerinin kolay gerçekleştirilebilmesi ve yatırım maliyetlerinin görece düşük olması yer alır (Bruckmann vd., 2008). Literatürde, mekanik tipteki değirmenlerin, özellikle ince taneli malzeme üretiminde klasik bilyeli değirmenlere göre daha az enerji harcayarak daha verimli çalıştığı belirtilmiştir (Partyka ve Yan, 2007). Bu bağlamda bazı çalışmalar, bu değirmenlerde kullanılan kimyasal katkı maddelerinin öğütme davranışları ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini incelemiştir (Choi vd., 2010; Gökçen vd., 2015; Prziwara vd., 2018). Örneğin, laboratuvar ölçekli öğütme deneylerinde kalsit minerali üzerine yapılan araştırmalarda, zeytin yağı gibi doğal katkıların değirmen performansına etkisi test edilmiştir (Çayırılı vd., 2021). Benzer şekilde, mermer atıklarının kuru öğütülmesi sürecinde katkı malzemesi olarak rafine edilmemiş gliserinin uygunluğu üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Bayel, 2023). Tüm bu araştırmalar göstermektedir ki, kullanılan yardımcı maddeler öğütülen minerallerin fizikokimyasal davranışlarını değiştirmekte, bu da doğrudan öğütme mekanizmasının verimini etkileyebilmektedir.

Bor elementi, yerkabuğunda farklı mineral türleri içerisinde doğal olarak bulunan ve günümüzde geniş bir endüstriyel kullanım yelpazesıyla öne çıkan stratejik bir hammaddedir. Özellikle yakıt hücreleri ve hidrojen temelli enerji uygulamalarında artan önemiyle dikkat çekmektedir. Yüksek yanma potansiyeline sahip olması nedeniyle, bor bileşikleri motor yakıtı katkı maddesi olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Bununla birlikte borun kullanım alanları; cam ve seramikten kozmetiğe, savunma sanayiinden elektronik sistemlere, tekstil ve tarımsal üretimden uzay-havacılık teknolojilerine kadar birçok sektörü kapsamaktadır. Spor ekipmanları, ilaç üretimi, kâğıt endüstrisi, optik sistemler, bilgisayar donanımları, inşaat malzemeleri ve iletişim teknolojileri gibi çok sayıda farklı alanda bor ve bileşikleri önemli katkı maddeleri olarak yer almaktadır. Bor bileşikleri, sahip oldukları güçlü antibakteriyel etkiler nedeniyle yalnızca temizlik ürünlerinde değil, aynı zamanda tıbbi uygulamalarda da tercih edilen kimyasal

maddelerdir. Özellikle sodyum borohidrat, ağır metal iyonlarını içeren endüstriyel atık suların arıtılmasında aktif bir bileşen olarak kullanılmaktadır; bu kapsamda gümüş, kurşun ve cıva gibi toksik elementlerin ortamdan uzaklaştırılmasında etkin bir rol üstlenmektedir (Sithole vd., 2018). Savunma sanayii açısından değerlendirildiğinde, bor bazlı malzemelerin zırh sistemlerinde koruyucu tabaka olarak kullanılmasının yanı sıra roket yakıtı formülasyonlarında da yer aldığı görülmektedir. Bununla birlikte, borun deterjan ve temizlik maddelerinden tarım sektöründeki gübrelemede mikro besin olarak kullanımına, kozmetikten seramik üretimine kadar pek çok alanda farklı formlarda uygulamaları mevcuttur. Enerji sektöründe ise bor içeren kimyasal bileşiklerin kullanımı oldukça yaygındır; bu bileşikler nükleer enerji sistemleri, fotovoltaik paneller, elektrikli motorlar, içten yanmalı motorlar ve uzay araştırmalarında kullanılan roket yakıtları gibi ileri teknoloji gerektiren pek çok sistemde temel malzeme olarak yer almaktadır (Bal vd., 2023).

Bor mineralleri; cam ve seramik üretiminden kimya ve ilaç sanayiine, deterjan katkı maddelerinden yangın geciktirici formülasyonlara, tarımsal üretimden metalurjik süreçlere kadar geniş bir sanayi portföyünde kullanılmakta olup, hava yastıkları ve hidrolik fren sistemleri gibi otomotiv bileşenlerinden su arıtma teknolojilerine, pigment üretiminden kurutucu ajanlara, hatta nükleer reaktör sistemlerine kadar farklı alanlarda stratejik öneme sahiptir. Bu denli yaygın kullanım alanına sahip bor minerallerinin endüstriyel olarak değerlendirilebilmesi için cevherlerin içerisinde bulunan minerallerin birbirinden ayrılması gerekmektedir. Bu serbestleşme işlemi genellikle kırma ve öğütme işlemleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Öğütme yardımcıları öğütme esnasında değirmen içerisine katılarak partiküllerin yüzeylerine tutunmak suretiyle öğütme kinetiğini hızlandıran katkı kimyasallarıdır. Bu maddeler, istenilen incelik düzeyine daha kısa sürede ulaşılmasını sağlamakta; aynı zamanda öğütme kapasitesinin artmasına ya da aynı kapasiteyle daha ince ürün elde edilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca partiküllerin değirmen içerisinde birbirine yapışarak topaklanmasını önlemeleri sayesinde, öğütme işleminin enerji verimliliğini artırmada da önemli rol oynayabilmektedirler (Nayak ve Nayak, 2016).

Bu çalışmanın temel amacı, farklı kimyasal yapıya sahip Trietanolamin, Diethylene ve 1-Hexanol adlı üç özgün öğütme yardımcısının bor cevherinin öğütülme sürecine olan katkılarını çok yönlü biçimde değerlendirmektir. Çalışmada, kimyasal katkıların bor cevherinin öğütme performansına etkileri, oluşan ürünlerin tane boyutu dağılımları, farklı sürelerdeki öğütme etkinlikleri, tüketilen enerji miktarları ve

nihayetinde SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri aracılığıyla tanelerin topaklanma eğilimleri incelenerek değerlendirilecektir. Literatürde daha önce kalsit ve çimento gibi farklı mineral türlerinin öğütülmesinde öğütme kimyasallarının etkisiyle ilgili çok sayıda çalışma yer almasına rağmen, bor cevheri özelinde ve özellikle gezegen tipi mekanik değirmenler kullanılarak yapılan benzer çalışmaların sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda söz konusu araştırma, bor cevherinin enerji verimliliği perspektifinden değerlendirilen mekanokimyasal öğütülmesine katkı sunmayı hedeflemektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Bor Cevheri

Bor, periyodik tabloda B sembolüyle gösterilen, yarı metal özellikleri taşıyan bir elementtir. Doğada serbest halde bulunmaz; çeşitli minerallerle bileşikler halinde yer alır. Bu bileşiklere genel olarak bor mineralleri veya bor cevherleri denir. En yaygın bor mineralleri arasında kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$), üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$), tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve boraks yer almaktadır (Helvacı, 2015). Bor cevherleri çoğunlukla sedimenter ortamlarda oluşmuş evaporit yataklarında bulunur. Türkiye, dünya bor rezervlerinin yaklaşık %73'üne sahip olup, bu alandaki en zengin ve stratejik ülkelerden biridir (MTA, 2020).

2.1.1. Borun endüstriyel kullanım alanları

Bor mineralleri ve türevleri, çok çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları şunlardır:

a) Cam ve Seramik Sanayi: Bor bileşikleri, camın ısıl genişleme katsayısını azaltır ve mekanik dayanımını artırır. Özellikle borosilikat camlar, laboratuvar camları ve ısıya dayanıklı mutfak gereçlerinde tercih edilir (Üçgül ve Şener, 2009).

b) Tarım: Bor, bitki gelişiminde hayati öneme sahiptir. Toprakta eksikliği durumunda verim kaybı yaşanır. Bu nedenle borlu gübreler, özellikle sebze ve meyve tarımında kullanılır. Tarımsal üretimde bor gübrelenmesi, özellikle bor ihtiyacı yüksek olan ayçiçeği, pancar, marul, domates gibi ürünlerde verim ve kaliteyi doğrudan artırıcı etki göstermektedir (Bilir, 2022).

c) Deterjan ve Temizlik Ürünleri: Boraks ve sodyum perborat gibi bileşikler, deterjanlarda ağartıcı ve yumuşatıcı katkı maddesi olarak kullanılır. Bu kullanım, özellikle Avrupa'da çevresel düzenlemelerle sınırlanmış olsa da halen bazı ülkelerde yaygındır (ETİMADEN, 2022).

d) Metalurji: Bor bileşikleri, yüksek sıcaklıklara dayanıklı alaşımlarda ve lehimleme işlemlerinde flux maddesi olarak kullanılır. Ayrıca çelik üretiminde sertlik ve dayanım artırıcı katkı sağlar (Kıransoy ve Yıldız, 2014).

e) Nükleer Sanayi: Bor, özellikle izotopu olan Boron-10 (^{10}B) sayesinde nötron soğurucu olarak kullanılır. Bu özellik, nükleer reaktör kontrol çubuklarında bor karbür (B_4C) kullanımına olanak tanır (Kasada vd., 2016).

f) Enerji ve Nanoteknoloji: Son yıllarda borun yüksek enerji yoğunluklu yakıtlarda, bor nitrür nanotüpleri (BNNTs) ve bor-karbon bazlı süperkapasitör uygulamalarında kullanımı araştırılmaktadır (Zhao vd., 2018).

2.1.2. Türkiye'nin bor potansiyeli

Türkiye, dünya bor rezervlerinin büyük kısmına sahiptir. En önemli yataklar Kırka (Eskişehir), Bigadiç (Balıkesir), Emet (Kütahya) ve Kestelek (Bursa) bölgelerinde yer alır. Bu sahalardan elde edilen cevherler ETİMADEN tarafından işlenerek dünya pazarına sunulmaktadır (MTA, 2020; ETİMADEN, 2022).

2.2. Bor Cevherinin Öğütülebilirlik Özellikleri

2.2.1. Mineralojik yapı ve sertlik

Bor mineralleri (örneğin kolemanit, uleksit, boraks, tinkal) genellikle orta sertlikte minerallerdir (Mohs sertliği 2,5–4 civarında). Özellikle kolemanit, 3 Mohs sertliğinde olduğundan öğütülmesi nispeten kolaydır (Çuhadaroğlu vd., 2013). Ancak cevherin yapısında bulunan kuvars, feldspat gibi sert gang mineralleri, öğütme işlemini zorlaştırabilir. Bu durum, toplam öğütme enerjisinin artmasına ve tane serbestleşmesinin zorlaşmasına neden olabilir (Kaya ve Canbazoğlu, 2007).

2.2.2. Tane boyutu dağılımı ve serbestleşme

Bor minerallerinin zenginleştirme öncesi serbestleşme boyutuna kadar öğütülmesi gerekir. Kolemanit gibi minerallerin serbestleşmesi genellikle 300–500 µm aralığında mümkün olur. Ancak, aşırı ince öğütme durumunda partiküller çamurlaşabilir ve bu da flotasyon gibi işancakrde geri kazanımı azaltabilir. Bu nedenle kontrollü öğütme, bor mineralleri için kritik öneme sahiptir (Çuhadaroğlu vd., 2013).

2.2.3. Öğütme teknolojisi ve ekipmanlar

Öğütme işlemi için genellikle çubuklu değirmen, bilyalı değirmen, çekiçli kırıcı gibi konvansiyonel ekipmanlar kullanılır. Kolemanit cevherinin öğütülebilirliği üzerine yapılan çalışmalarda, çubuklu değirmenlerin daha dengeli bir tane dağılımı sağladığı ve enerji tüketiminin optimize edilebildiği gösterilmiştir (Kaya ve Canbazoğlu, 2007). Ayrıca yapılan deneylerde kolemanit için ölçülen Bond Work Index (BWI) değeri 12,33 kWh/ton, Hardgrove Grindability Index (HGI) ise 99,62 olarak raporlanmıştır. Bu

değerler, kolemanitin öğütülmesinin enerji açısından avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır (Çuhadaroğlu vd., 2013).

2.2.4. Enerji tüketimi ve proses kontrolü

Bor cevherinin öğütülmesinde enerji tüketimi orta düzeydedir (yaklaşık 5–15 kWh/ton). Ancak bu değer; cevherin sertliği, tane boyutu, nem oranı ve öğütme tipi gibi faktörlere göre değişiklik gösterir. Yeni nesil araştırmalarda, mikrodalga ön-işlem uygulamalarının kolemanitin öğütme davranışına olumlu etkileri olduğu ve kırılma hızını artırdığı da belirlenmiştir (Yılmaz ve Bilen, 2025).

2.3. Öğütme Yardımcılarının Özellikleri

Öğütme işlemlerinde kimyasalların kullanılmasının malzemenin fiziksel kırılma süreci üzerinde olumlu etkiler yarattığı anlaşılmaya başlanınca, araştırmacılar bu kimyasalları öğütme sırasında kullanmayı düşünmeye başlamışlardır. Bu kimyasallar genellikle organik bileşiklerden oluşmakta ve öğütme yardımcıları olarak adlandırılmaktadır. Bu yardımcı maddeler, yarım yüzyıldan fazla bir süredir, özellikle belirli boyutlarda malzeme üretiminde enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Yapılan araştırmalara göre, öğütme yardımcılarının tanelerle etkileşime girdiği ve bu etkileşimin, tanelerin yüzey enerjisini azaltarak topaklanmayı engellediği gözlemlenmiştir. Bu etkileşim, öğütme sürecinin hızlanmasını ve daha verimli hale gelmesini sağlayan temel faktörlerden biridir (Choi vd., 2007; Choi vd., 2010).

Öğütme yardımcıları, kuru sistemlerde, sabit enerji tüketimi ile öğütme hızını artırmakta ve küçük tanelerde oluşan topaklanmayı engellemektedir. Aynı zamanda, bu yardımcılar tanelerin bilyalara ve astarlara yapışmasını önleyerek, öğütülen ürünün akışkanlık özelliklerini iyileştirmektedir. Bu da kapalı devre sistemlerinde havalı sınıflandırıcıların verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanır. Yaş sistemlerde ise, öğütme sırasında pülp yoğunluğunu düşürerek, tanelerin daha etkili bir şekilde ayrılmasını sağlar. Bu durum, kırılma işlemlerinin mineral sınırlarında gerçekleşmesini sağlayarak, zenginleştirme verimini artırır ve böylece daha yüksek tenörlü ürün elde edilmesine yardımcı olur (Çayırılı ve Gökçen, 2018).

Öğütme yardımcıları, özellikle kuru sistemlerde çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılırken, yaş sistemlerde ise sülfür mineralleri ve kömür gibi materyallerin öğütülmesinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, endüstriyel hammaddeler üzerinde öğütme yardımcılarının daha az kullanıldığı gözlemlenmiştir. Farklı araştırmalar, öğütme

yardımcılarının endüstriyel hammaddeler üzerindeki etkileri konusunda çeşitli sonuçlar ortaya koymuştur. Bu farklılıkların nedeni, kullanılan değirmen türleri, dönüş hızları, bilya doluluk oranları ve besleme boyutları gibi değişkenlerin, öğütme performansı üzerindeki etkileridir. Ayrıca, yapılan araştırmaların kullandığı test yöntemleri ve malzeme çeşitliliği de sonuçların farklılık göstermesine yol açan bir diğer önemli etkendir (Toprak, 2015; Katırcıoğlu-Bayel, 2016).

Öğütme yardımcılarının faydaları hem teknik hem de maddi açıdan geniş bir perspektiften değerlendirilmelidir. Teknik açıdan bakıldığında, öğütme yardımcılarının sağladığı avantajlar genellikle laboratuvar testleri ve endüstriyel ölçekte yapılan uygulama testlerinin sonuçlarıyla doğrulanmaktadır. Bu testler, öğütme yardımcılarının uygulandığı süreçlerde ne gibi iyileşmeler sağladığını ve üretim hızındaki artışları gözler önüne serer. Maddi açıdan ise, bu yardımcı maddelerin sağladığı yararları ölçmek daha karmaşık bir hal alır çünkü ekonomiyi etkileyen birçok faktör vardır. Ancak genel olarak, öğütme yardımcılarının sağladığı maliyet faydalarının belirlenmesi, üretim süreçlerindeki enerji tasarrufları ve verimlilik artışları gibi somut avantajlarla desteklenmiştir. Sonuçta, öğütme yardımcılarının kullanımını neticesinde elde edilen enerji tasarrufu ve üretim artışı, ekonomik açıdan doğrudan değerlendirilebilir ve finansal kazanç olarak ortaya çıkmaktadır (Özkan ve Yekeler, 2001).

Öğütme yardımcılarının en belirgin yararları, uygulandığı üretim süreçlerinde gözle görülür bir üretim artışı sağlamasıdır. Bu artış, sadece üretim miktarını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda üretim hızını da önemli ölçüde hızlandırır. Teknik olarak, öğütme yardımcıları, tesislerin üretim hızını %30 oranında artırabilir. Bu durum, tesisteki üretim kapasitesinin daha hızlı bir şekilde kullanılmasını sağlar ve üretim süreçlerinin daha verimli hale gelmesine olanak tanır. Bu hızlanma, her ne kadar görünür bir fiziksel değişim yaratmasa da tesisin işleyişi üzerinde önemli bir fark yaratır. Üretim hızındaki bu artış, aynı zamanda bakım eksikliklerinden kaynaklanabilecek olası malzeme problemlerini de engeller, çünkü daha hızlı üretim süreçleri, makinelerin daha verimli çalışmasını sağlar ve bakım gereksinimlerini minimize eder (Toprak, 2010).

Maddi anlamda, öğütme yardımcılarının etkisi daha karmaşıktır ancak net bir şekilde gözlemlenebilir. Üretim kapasitesindeki artış, ekonomik olarak büyük avantajlar sağlar, çünkü bu sayede ürün taleplerindeki artışlar çok daha hızlı karşılanabilir. Aynı zamanda, birim malzeme başına düşen aşınma ve değirmen ortamı maliyetleri de önemli ölçüde azalır. Bu, maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olur ve üretim sürecinde ortaya çıkabilecek fazladan harcamaları engeller. Ayrıca, özgül yüzey alanı daha yüksek ürünler

elde edilmesi, ürün kalitesinde önemli iyileşmeler sağlar. Yüksek özgül yüzey alanı, öğütülen ürünün daha verimli kullanılmasını sağlar ve bu da genel verimliliği artırır. Öğütme yardımcılarının bu etkisi, özellikle malzemenin daha iyi bir şekilde işlenmesi ve kalitesinin arttırılması açısından büyük önem taşır (Özkan ve Yekeler, 2001).

Öğütme yardımcılarının etkilerinin bir diğer faydalı yönü ise, ürün tane boyut dağılımının kontrol edilmesidir. İstenilen tane boyutu dağılımının elde edilmesi, endüstriyel üretimde önemli bir gerekliliktir, çünkü bu durum, üretilen ürünün işlenebilirliğini ve kullanılabilirliğini artırır. Bu, özellikle malzemenin daha homojen bir yapıya sahip olmasını sağlar ve daha kaliteli bir ürün elde edilmesine olanak tanır. Ürün kalitesindeki bu iyileşmeler, aynı zamanda taşıma ve nakliye süreçlerini de kolaylaştırır. Öğütülen ürünlerin akışkanlığının artması, silolarda ve havalı bantlarda taşınmalarını ve nakliyelerini çok daha verimli hale getirir. Bu da lojistik maliyetlerin düşmesine ve taşıma işlemlerinin hızlanmasına katkı sağlar (Toprak vd., 2018).

Ek olarak, öğütme yardımcıları, değirmen içindeki sıcaklık seviyelerinin düşmesine de yardımcı olur. Değirmen içindeki sıcaklık, öğütme işlemi sırasında önemli bir parametre olup, yüksek sıcaklıklar işlem verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Öğütme yardımcıları, bu sıcaklık artışlarını engelleyerek, öğütme işleminin daha verimli ve daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır. Tüm bu avantajlar hem üretim süreçlerinde hem de maliyetlerde gözle görülür iyileşmeler sağlayarak, endüstriyel üretimin daha sürdürülebilir ve verimli hale gelmesine katkıda bulunur. Öğütme yardımcıları, yalnızca üretim hızını artırmakla kalmaz, aynı zamanda maliyetleri düşürerek verimliliği artırır ve daha kaliteli ürünlerin elde edilmesini sağlar. Bu faktörler, endüstriyel üretim süreçlerinin daha ekonomik, verimli ve sürdürülebilir hale gelmesini sağlar (Sottili ve Padovani, 2001).

Öğütme işlemleri sırasında kullanılan yardımcı maddeler, süreçlerin etkinliğini arttırmak ve verimliliği optimize etmek amacıyla çeşitli kimyasal bileşiklerden türetilmiştir. Bu bileşikler, genel olarak çeşitli kimyasal gruplar içerir ve farklı öğütme koşullarına göre seçilmektedir. Bu yardımcı maddeler, trietilentetramin (TEAT), tetraetilenpentamin (TEPA) gibi alifatik aminler ile dietanolamin (DEA), trietanolamin (TEA) ve triizopropanolamin (TIPA) gibi amin alkollerini kapsar. Ayrıca, glikol bazlı bileşikler de yaygın olarak kullanılmaktadır; örneğin etilenglikol (EG) ve dietilenglikol (DEG) gibi glikoller, öğütme yardımcıları olarak işlev görmektedir. Bunun dışında, aminoetiletanolamin (AEEA) ve hidroksietil dietilentriamin (HEDETA) gibi daha karmaşık yapıya sahip bileşikler de öğütme işlemlerinde kullanılabilir. Fenol türevleri ve

amin asetat gibi diğerk bileşikler de bu grupta yer almaktadır. Öğütme yardımcıları genellikle 50 ile 500 ppm arasında bir konsantrasyona sahip olacak şekilde kullanılır. İlginç bir şekilde, bazı araştırmalar, bu yardımcı maddelerin yalnızca saf kimyasal bileşiklerden değil, aynı zamanda birden fazla bileşiğin karışımından oluşan formülasyonlardan da elde edilebileceğini ortaya koymuştur (Altun vd., 2015; Toprak, 2015; Gökçen vd., 2015; Toprak vd., 2018; Toraman vd., 2016).

Öğütme yardımcılarının nasıl çalıştığını anlamak için birkaç hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezlerin temelinde, öğütme işlemi sırasında oluşan yeni yüzeylerin, işlem için gerekli olan enerjiyi etkileyebileceği fikri bulunmaktadır. Özellikle, boyut küçültme işlemiyle birlikte malzemenin yüzey enerjisinin arttığı bilinen bir gerçektir. Bu artışı dengeleyebilmek ve öğütme işlemi için gerekli olan enerjiyi azaltabilmek amacıyla, yüzey enerjisinin düşürülmesi gereklidir. Bu bağlamda, öğütme yardımcılarının yüzey enerjisini azaltarak işlem sırasında gereken enerjiyi düşürmesi gerektiği öne sürülmüştür. Bu teori, yüzeylere soğurulmuş maddelerin, taneciklerin yüzey enerjisini düşürerek öğütme işleminin daha verimli hale gelmesini sağladığını iddia etmektedir. Rose ve Sullivan (1958), bu görüşü genişleterek, öğütme yardımcılarının tüp değirmenlerdeki çalışma mekanizmalarını da açıklamışlardır. Özellikle, bu mekanizmanın nasıl işlediği konusunda kapsamlı bir açıklama sunmuşlardır. Bu teoriye göre, yüzey aktif maddelerin malzeme yüzeyine soğrulması, taneciğin yüzey enerjisini azaltarak, öğütme işleminin etkinliğini artırabilir.

Bununla birlikte, bu mekanizmanın her tür öğütme koşulunda geçerli olmadığına dair bazı eleştiriler de bulunmaktadır. Özellikle, kırılma işleminde sadece plastik deformasyonun önemli olduğu durumlarda, yüzeye soğurulmuş yüzey aktif maddelerin malzemenin mukavemetini zayıflatabileceği ileri sürülmüştür. Ancak, tüp değirmenlerinde, gevrek kırılma türü gerçekleştiği için öğütme yardımcılarının etkisinin tam olarak burada açıklanamayacağı savunulmuştur. Bu noktada, plastik deformasyonun gerçekleşebileceği durumlarda bile, öğütme yardımcılarının malzemenin dayanıklılığını etkileyebilmesi için gerilimin uygulandığı süre boyunca, yüzey aktif maddelerin malzeme yüzeyine yeterince soğrulabilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çünkü darbe yoluyla ani kırılmaların gerçekleştiği değirmenlerde, bu etkileşim çok kısa bir süre içinde gerçekleşir. Yani, çatlağın ilerleme hızı, öğütme yardımcısının çatlak yüzeylerine yayılması ve burada soğrulma süresinden çok daha hızlıdır. Bu tür değirmenlerde, öğütme yardımcılarının etkinliği sınırlı olabilir, çünkü bu tür işlemler çok hızlı bir şekilde gerçekleşir ve yüzeylerin etkileşime girmesi için yeterli zaman sağlanamaz (Toprak, 2015).

Öğütme yardımcılarının etkinliği, kullanılan değirmen tipi ve kırılma mekanizmasıyla doğrudan ilişkilidir. Tüp değirmenlerdeki gevrek kırılma özellikleri ve darbe yoluyla gerçekleşen kırılmalar, öğütme yardımcılarının etkinliğini sınırlayabilir. Ancak, plastik deformasyonların önemli olduğu sistemlerde, yüzey aktif maddelerin etkisi daha belirgin hale gelebilir ve bu, öğütme işlemlerinin daha verimli olmasına olanak sağlayabilir. Bu nedenle, öğütme yardımcılarının etkileri, kullanılan sistemin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir (Toraman vd., 2016).

Westwood ve Goldheim (1968), öğütme yardımcılarının katı maddelerin yüzeylerine soğurulmasının, özellikle gerilim altında malzemedeki düzensizliklerin hareketini engelleyerek, bu düzensizliklerin ilerlemesini zorlaştırdığı fikrini ortaya atmışlardır. Bu mekanizmaya göre, malzemenin içinde bulunan dislokasyonlar, hareket edemedikleri için büyük ölçüde plastisite kaybeder. Sonuç olarak, malzemenin dayanıklılığı azalır ve katı madde daha kırılğan hale gelir. Bu düşünce, öğütme yardımcılarının tüp değirmenlerdeki işleyişini açıklamak için kullanıldığında ise eleştirilmiştir. İlk olarak, Westwood'un önerdiği mekanizmanın plastik akışın ön planda olduğu durumlarla ilgili olduğunu belirtmek gerekir. Ancak tüp değirmenlerinde, genellikle gevrek kırılma gerçekleştiği için, plastik akışın önemli olduğu bu tür durumlar geçerli değildir. Ayrıca, darbe ile kırılma sırasında dislokasyon hareketlerinin, çatlak ilerleme hızına kıyasla çok daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, tek bir tanenin darbe altında kırılmasında öğütme yardımcılarının etkisinin oldukça sınırlı olduğu, yapılan deneylerle doğrulanmıştır.

Bununla birlikte, malzemenin aşındırılması ile ilgili yapılan araştırmalar, aşınan yüzeylerin elektron mikroskobu altında incelendiğinde ilginç bulgular ortaya koymuştur. Aşındırma ve topaklanma süreçlerinin eş zamanlı olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, organik buharın malzeme yüzeyine soğurulmasıyla, topaklanmanın engellendiğini ve bu sebeple aşınma oranlarının arttığını ortaya koymaktadır. Özellikle tüp değirmenlerinde ufalanmanın büyük ölçüde aşınma ile gerçekleşmesi, bu bulguların anlamlı olduğunu göstermektedir (Toprak, 2015).

Öğütme yardımcılarının kırılma sürecine nasıl yardımcı olduğuna dair başka bir hipotez, bu maddelerin çatlak uçlarının diplerine nüfuz ederek, burada birikerek kırılma işlemini destekleyebileceğini öne sürmektedir. Ancak bu mekanizmanın darbe ile kırılma süreçlerinde geçerli olup olmadığı konusunda bazı kuşklar bulunmaktadır. Bunun nedeni, uzun zincirli organik yüzey aktif maddelerin, büyük boyutları nedeniyle sınırlı bir difüzyon kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu da öğütme yardımcılarının etkinliğinin bu

mekanizma üzerinden açıklanamayacağını gösterir. Öğütme yardımcılarının etkisini açıklamak için bu tür teorilerin yetersiz olduğu ve bu maddelerin kırılma üzerinde doğrudan bir pozitif etki sağladığına dair çoğu araştırmacının şüpheleri olduğu belirtilmiştir (Katırcıoğlu-Bayel, 2016; Westwood ve Goldheim, 1968; Rose ve Sullivan, 1958).

Çoğu araştırmacı, öğütme yardımcılarının asıl faydasının, değirmen içindeki malzemenin akış özelliklerini ve topaklanma davranışını değiştirmesi olduğunu savunmuştur. Öğütme yardımcılarının kuru malzemelerde dağıtıcı bir etki yapma fikri, ilk kez, öğütme yardımcılarının çimento endüstrisinde kullanılmaya başlandığı yıllarda ortaya çıkmıştır. Bu dönemde, öğütme yardımcılarının kullanılması ile, malzemenin daha fazla tozlanma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Çimento üretiminde yapılan bu gözlemler, öğütme yardımcılarının çimento tanelerinin yüzeylerine soğurularak, bu tanelerin birleşmelerini engellediği ve topaklanma gibi kuvvetlere karşı etki gösterdiği fikrini doğurmuştur. Öğütme yardımcılarının, tanelerin birbirine iç içe geçmesini engelleyerek, onların daha serbest ve homojen bir şekilde dağılmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir (Toprak, 2015; Katırcıoğlu-Bayel, 2016). Bu fikirler, öğütme yardımcılarının etkisini daha doğru bir şekilde açıklayabilmek için önemli bir temele dayanmaktadır.

Öğütme yardımcılarının etkisi üzerine yapılan teorik çalışmalar (Çayırılı ve Gökçen, 2018; Chipakwe vd., 2020; Weibel ve Mishra, 2014), bu maddelerin çeşitli mekanizmalarla öğütme süreçlerine katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak bu katkılar, yalnızca değirmen içindeki malzeme davranışını iyileştirerek, topaklanmayı önleyip akışkanlığı artırarak daha verimli bir üretim süreci sağlamakla sınırlı değildir. Öğütme yardımcılarının, malzeme yüzeyine soğurularak, taneler arası birleşmeleri engelleyip dağıtıcı etki yaparak, öğütme sürecinin verimliliğini artırdığı gözlemlerle desteklenmiştir. Bu katkılar, öğütme işlemlerinin optimizasyonu ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

2.3.1. Öğütme yardımcılarının etki mekanizmaları

Öğütme işleminin verimliliğini artırmak için kullanılan öğütme yardımcılarının doğru şekilde seçilmesi ve uygulanması, belirli öğütme şartlarına bağlı olarak önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, öğütme yardımcılarının etkilerinden tam olarak yararlanabilmek ve bu katkıların potansiyelinden faydalanmak için, bu yardımcılarının etki mekanizmalarının derinlemesine anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda,

öğütme yardımcılarının etkilerini açıklamak amacıyla geliştirilmiş farklı teoriler ve yaklaşımlar, çoğu zaman deneysel çalışmalarda karşılaşılan bazı eksiklikler ve zorluklar nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Bu tür eksiklikler, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini sınırlayabilir, dolayısıyla bu eksikliklerin göz önünde bulundurulması gerekir (Chipakwe vd., 2020).

Birçok çalışmada, pH ve iyonik kuvvet gibi önemli deneysel değişkenlerin dikkate alınmadığı veya yeterince kontrol edilmediği gözlemlenmiştir. Örneğin, malzemenin yüzey aktif katkılarla teması sonrasında, topaklanmaların yeterince dağıtılmadan tane boyu analizlerinin yapılması, sonuçların yanıltıcı olmasına neden olmuştur. Bu gibi hatalar, öğütme sürecinin verimliliği hakkında yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Ayrıca, bazı yüzey aktif maddelerin köpük oluşturma eğiliminde olması, öğütme verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu tür etkilerin dikkate alınmadığı deneyler, öğütme yardımcılarının etkinliğini yanlış değerlendirmeye neden olabilir. Sonuçların doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için, deneysel süreçlerin doğru bir şekilde tasarlanması, değişkenlerin dikkatlice izlenmesi ve her aşamada gözlem eksikliklerinin engellenmesi gerektiği savunulmuştur (Toprak, 2010; Weibel ve Mishra, 2014).

Öğütme yardımcılarının öğütme süreçleri üzerindeki olumlu etkileri, pek çok deneysel çalışmada kanıtlanmış olsa da bu yardımcılardan genel davranışlarıyla ilgili bilimsel bir açıklama veya öngöründe birleşilen bir teori henüz oluşturulamamıştır. Birçok çalışmada, basit geometrik şekillerdeki maddeler üzerinde yapılan öğütebilirlik testleri ve tek tek tane kırılma testleri, öğütme yardımcılarının etkisini araştırmış olsa da bu testler genellikle laboratuvar ölçeğinde yapılmış ve endüstriyel ölçekteki değirmenlerdeki gerçek şartları tam olarak yansıtmamaktadır. Endüstriyel ölçekteki öğütme işlemleri ise, daha karmaşık ve çeşitli değişkenlerin etkisi altındadır. Bu nedenle, bu tür deneysel çalışmalarda öğütme şartlarının ve kullanılan yardımcılardan etkisinin dikkatlice kontrol edilmesinin zorluğu, araştırmacıların bu etkileri net bir şekilde gözlemlenmelerini engellemektedir. Bu eksiklikler, endüstriyel uygulamalarda öğütme yardımcılarının daha doğru bir şekilde kullanılabilmesi için daha kapsamlı ve kontrollü deneysel çalışmalar yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır (Toprak, 2010).

Öğütme işlemi sırasında, öğütme yardımcılarını çeşitli şekillerde etkili bir rol oynamaktadır. Bu yardımcılar, değirmendeki pülp akışını düzenleyerek ve öğütme ortamındaki fiziksel özellikleri iyileştirerek, işlem verimliliğini artırabilir. Özellikle, öğütülen ince malzemelerin topaklanmasını engelleyerek ve pülp sırasındaki köpürme davranışını kontrol altına alarak, mineral taneciklerinin kendi aralarındaki, öğütme

ortamıyla ve değirmen astarlarıyla olan etkileşimini düzenler. Bu düzenlemeler, tanecikler arasındaki sürtünme karakteristiklerini değiştirerek daha etkili bir öğütme süreci sağlar (He vd., 2006). Öğütme işlemi esnasında, tanelerde çatlaklar meydana gelir ve bu çatlakların ilerlemesi için gerekli olan enerji sağlanarak yeni çatlakların oluşumu kolaylaştırılır. Ancak, öğütme işlemi sadece tek başına kırılma, aşınma ve sınıflandırma gibi aşamalardan ibaret değildir. Bunun yanı sıra, malzemenin değirmende taşınması da önemli bir süreçtir ve tüm bu aşamalar bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle, öğütme yardımcılarının çalışma mekanizmalarını doğru bir şekilde anlamak ve bu süreçlerin birbirleriyle nasıl etkileşime girdiğini çözümlmek büyük önem taşımaktadır (Çayırılı, 2014).

Öğütme yardımcılarının etkilerinin genel olarak olumlu olduğu deneysel olarak kanıtlanmış olsa da bu yardımcıların etkileri tam olarak anlaşılabilmiş değildir (Zhao, 2021). Ancak, birkaç farklı etki mekanizmasının varlığı üzerinde görüş birliği sağlanmıştır. Bu mekanizmalardan ilki, yüzey aktif maddelerin malzeme yüzeyine soğrulmasıyla, taneciklerin yüzey enerjisinin azalmasına dayanır. Yüzey enerjisindeki bu azalma, malzemenin daha kolay işlenmesini sağlar ve öğütme sürecinde verimliliği artırır. İkinci olarak, bu yüzey aktif maddelerin, malzeme yüzeyindeki düzensizliklere soğurularak yüzey sertliğini değiştirmesi sağlanır. Bu değişiklik, malzemenin daha homojen bir şekilde öğütülmesine katkıda bulunur. Üçüncü etki mekanizması ise, bu maddelerin öğütme sırasında dağıtıcı rolü üstlenmesiyle ilgilidir; yani, öğütme süreci sırasında tanelerin akış özelliklerinin düzenlenmesine yardımcı olur (Weibel ve Mishra, 2014; Ersoy vd., 2022).

Kuru öğütme işleminde, ince tanelerin öğütme hızını yavaşlatması, sıklıkla karşılaşılan bir sorundur. Bu yavaşlamanın nedeni, öğütülen tanelerin yüzey alanının artmasıyla birlikte moleküller arası Van der Waals kuvvetlerinin ve diğer bölgesel kuvvetlerin etkisinin daha belirgin hale gelmesidir. Bu kuvvetlerin artması, taneler arasındaki etkileşimleri güçlendirir ve bu da topaklanmalara yol açar. Topaklanma, öğütme işleminin verimliliğini azaltarak malzemenin akış özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, topaklanmalar, tanelerin homojen bir şekilde karışmasını engelleyerek öğütme ortamı ile yeterli teması sağlamaz. Bu durum, öğütme verimliliğini daha da düşürür ve işlemde istenilen sonucun alınmasını zorlaştırır. Malzemenin değirmen içindeki taşınması da topaklanma nedeniyle olumsuz etkilenebilir ve öğütme sürecinde daha fazla sorun yaratabilir. Bu tür olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için, ultra ince boyuttaki tanelerin sistemden çıkarılması veya uygun öğütme

yardımcılarının kullanılması gibi çözümler önerilmiştir (Guzzo vd., 2020). Orumwense (1992) tarafından yapılan çalışmalar, bu tür çözümlerin uygulandığında öğütme sürecinin daha verimli ve etkili hale geleceğini göstermektedir.

Kuru öğütme işlemlerinde, öğütme yardımcılarının büyük bir kısmı, kimyasal etkileşimlerle tane yüzeylerine tutunarak, taneler arasında meydana gelebilecek adhezyon kuvvetlerinin engellenmesini sağlar. Bu etki, öğütme verimliliğinin artmasında önemli bir rol oynar. Yapılan çalışmalar, özellikle kuvars, çimento, kireçtaşı ve seramik hammaddelerinin öğütülmesinde organik sıvıların, örneğin etilen, propilen glikol, oleik asit, trietanolamin, glikol, aminoasitler gibi maddelerin kullanıldığında, öğütme verimliliği üzerinde belirgin bir olumlu etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Organik sıvılar, yüzey aktif özellikleri sayesinde taneler arasındaki sürtünmeyi azaltarak, öğütme sırasında tanelerin birbirine yapışmasını engeller ve böylece öğütme işleminin verimliliğini artırır (Çayırılı, 2014).

Yaş öğütmenin kuru öğütmeye göre daha etkili olduğu düşünülmektedir. Bu fikir, birçok malzemenin yaş öğütme ile daha ince tanelere indirgenebildiği gözlemlerle desteklenmektedir. Özellikle, pigmentler ve ince kimyasallar gibi malzemeler 10 mikrometre altındaki boyutlara öğütüldüğünde, öğütme etkinliği, pülp akıcılığı gibi parametrelerle daha net bir şekilde ölçülebilir hale gelmektedir. Ultra ince öğütme çalışmalarında, yaş öğütme yardımcı maddelerinin kullanımı kritik bir öneme sahiptir. Pülp akıcılığı, taneler inceldikçe genellikle negatif yönde etkilenir. Ancak sıcaklık ve pülpün katılığı gibi faktörlerdeki değişimler, pülp akıcılığını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, ince öğütme işlemleri sırasında pülp akışının kontrolü için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin temel amacı, kayma gerilmesinin minimum seviyeye indirilmesi veya ortadan kaldırılmasıdır (Bernhardt vd., 1999; Çayırılı, 2014).

Bu amaçla önerilen yöntemlerden birisi, malzemelerin yüksek sıcaklıkta bir akışkan ortamda öğütülmesidir. Diğer bir yöntem ise, pülpteki yüksek katı oranı korunurken, pülp akıcılığını kontrol etmek için uygun yüzey aktif maddeler, yani dağıtıcı maddelerin kullanılmasıdır. Çeşitli araştırmacılar, bu dağıtıcı maddelerin kullanımının, pülpün akış sınır gerilme değerini artırmadan, pülp yoğunluğunun yükseltilmesine olanak sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, pülp reolojisini kontrol etmek amacıyla kullanılan bazı kimyasal maddeler arasında sodyum heksametafosfat, sodyum silikat, akrilik kopolimer, tetrasodyum pyrofosfat, sodyum hidroksit, polikarboksi asit, sodyum karboksimetilselüloz ve sodyum oleat gibi bileşikler öne çıkmaktadır (Çayırılı, 2014). Bu

maddeler, pülpün akış özelliklerini düzenleyerek, öğütme işleminin verimliliğini artırmak için önemli bir araçtır.

Son yıllarda, geleneksel bilyeli değirmenlerde öğütme yardımcılarının kullanımı üzerine yapılan araştırmalar, bu yardımcılarda öğütme verimliliği üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Karıştırmalı bilyalı değirmenler, yüksek enerji verimliliği, ultra ve süper ultra boyutlara kadar öğütme yapabilme kapasiteleri ve ürünü en temiz şekilde bırakmaları ile günümüzde yoğun ilgi görmektedir. Bu değirmenlerin bu özellikleri, araştırmacıların öğütme yardımcılarının bu sistemlerde nasıl işlediğini araştırmalarına neden olmuştur. Bu tür çalışmalarda, üç farklı organik polimer (akrilik kopolimer sodyum tuzu, polikarboksilik asit sodyum tuzu ve polimer sodyum tuzu) ve iki farklı inorganik kimyasal (sodyum heksametafosfat ve tetrasodyum pyrofosfat) kullanılarak, dolomitin yaş öğütülmesi üzerine yapılan etkiler incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, polimerik kimyasalların, inorganik kimyasallara kıyasla enerji tüketimi ve ürün inceliği açısından daha etkili olduğunu ortaya koymuştur (Çayırılı, 2014). Bu bulgu, organik maddelerin, özellikle yüksek verimlilikli öğütme işlemleri için tercih edilmesini teşvik etmektedir. Polimerik maddeler, öğütme sürecinin daha verimli ve enerji açısından daha düşük maliyetli olmasını sağlayabilir.

He ve arkadaşları (2006), tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, polimerik bir kimyasal olan S40'ın öğütme sürecine belli periyotlarla eklenmesinin, öğütme hızını ve enerji verimliliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, polimerik yardımcılarda öğütme işlemleri sırasında nasıl verimli bir şekilde kullanılabileceğine dair önemli bulgular sunmaktadır. Özellikle polimerlerin, öğütme hızını artırarak enerji tüketimini optimize etme potansiyeline sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Öğütme süreçlerinin daha verimli hale gelmesi, endüstriyel üretimde enerji tasarrufu sağlarken aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasına da katkıda bulunabilir.

Zheng ve arkadaşları (1997), tarafından yapılan başka bir araştırma ise, inorganik elektrolitlerin (sodyum hidroksit ve sodyum karbonat), yüzey aktif maddelerin (sodyum oleat/oleik asit) ve polimerlerin (poliakrilik asit) kireçtaşının yaş öğütülmesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu araştırma, farklı kimyasal maddelerin, özellikle de yüzey aktif maddelerin ve polimerlerin, öğütme sürecine dahil edilmesinin nasıl farklı sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Araştırma sonuçları, sodyum karbonat ve sodyum oleatın yüksek konsantrasyonlarda kullanılması durumunda enerji verimliliğinin azaldığını, buna karşın sodyum hidroksit kullanımının düşük konsantrasyonlarda enerji verimliliğini artırdığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, farklı kimyasal maddelerin doğru

konsantrasyonlarda kullanımının öğütme verimliliği üzerinde ne kadar belirleyici bir etkisi olduğunu vurgulamaktadır.

Bernhardt ve arkadaşları (1999), tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, sodyum poliakrilatın kireçtaşının yaş öğütülmesindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, sodyum poliakrilatın miktarının arttıkça zeta potansiyelinin yükseldiğini, bunun yanında görünür viskozitenin düştüğünü ortaya koymuştur. Bu değişim, öğütme işleminin daha verimli hale gelmesine ve daha ince ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle sodyum poliakrilatın yüksek katı konsantrasyonlarda kullanıldığında, enerji verimliliği ve ürünün inceliği açısından daha iyi sonuçlar alındığı ifade edilmiştir. Bu sonuç, yüksek katı konsantrasyonlarının öğütme sürecine katkı sağlayarak daha kaliteli ve verimli ürünler elde edilmesine yardımcı olduğunu göstermektedir.

Laapas ve arkadaşları (1984), tarafından yapılan bir diğer araştırmada, sodyum oleat, trietanolamin, polikarboksilat ve sodyum heksametafosfatın kuvars, kalsit, talk ve vollastonit gibi farklı minerallerin öğütülmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, bu kimyasalların her birinin, mineral öğütme işlemi sırasında öğütme performansını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Her bir kimyasalın, farklı mineraller üzerinde ayrı ayrı olumlu etkiler gösterdiği ve öğütme süreçlerinde verimliliği artırdığı belirlenmiştir. Bu tür kimyasal yardımcıların, farklı minerallerin öğütülmesi sırasında sağladığı performans artışı, endüstriyel uygulamalarda daha etkili ve verimli öğütme yöntemlerinin geliştirilmesine yardımcı olabilir.

Paramasivam ve Vedaraman (1992), tarafından yapılan bir çalışmada, 14 farklı sıvı öğütme yardımcı maddesinin (inorganik sıvılar, alkoller, organik solventler) kalsit minerali üzerinde yapılan kuru öğütme işlemine etkileri incelenmiştir. Bu araştırma, sıvı yardımcıların kalsitin kuru öğütülmesi sırasında ürünün inceliğini artırma, değirmendeki akışkanlığı iyileştirme ve topaklanmayı azaltma gibi olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur. Bu tür sıvı yardımcıların, kuru öğütme işlemlerinde verimlilik artışı sağlayarak, endüstriyel ölçekte üretimin daha verimli hale gelmesine olanak tanıyabileceği anlaşılmaktadır.

Başka bir deneyde ise (Choi vd., 2009), dolomitin kuru öğütülmesinde %0,1 oranında berolamin (trietanolamin, dietanolamin ve monoetanolamin karışımı) eklenmesiyle enerji tüketiminin azaltıldığı ve ürünün inceliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, berolaminin özellikle dolomit gibi mineral öğütme işlemlerinde enerji tüketimini düşürürken, aynı zamanda daha ince ve homojen ürünler elde edilmesine olanak sağladığını göstermektedir. Bu tür kimyasal yardımcıların, öğütme sürecinde

önemli bir rol oynadığı ve endüstriyel üretim verimliliğini artırmada kritik bir öneme sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Bu araştırmalar, çeşitli kimyasal yardımcıların öğütme süreçlerine nasıl etki ettiğini ve bu yardımcıların kullanımının öğütme verimliliği üzerindeki olumlu etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Farklı kimyasal maddelerin doğru konsantrasyonlarda kullanılması, enerji tüketimini optimize ederken, ürünün kalitesini ve inceliğini artırarak endüstriyel üretim süreçlerinde daha verimli ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

2.3.2. Öğütme yardımcılarının yayılma mekanizması

Öğütme sırasında kullanılan yardımcı maddelerin yayılma mekanizmaları, genellikle iki ana yolu takip eder: gaz fazı yayılma ve yüzey teması. Bu mekanizmaların nasıl işlediğini anlamak için yapılan deneyler, bu maddelerin öğütme sırasında nasıl etkileşimde bulunduğunu gözler önüne seriyor. Özellikle, kesikli öğütme denemeleri, öğütme yardımcılarının yayılma şekillerinin önemli bir kanıtıdır. Birçok çalışma, alkollerin öğütme sürecindeki etkilerini incelemiş ve alkollerin, kaynama noktalarının öğütme sıcaklığından daha düşük olması nedeniyle, öğütme verimliliğini belirgin şekilde artırdığını gözlemlemiştir. Örneğin, alkoller gaz fazında yayılma göstererek öğütme verimliliğini artırırken, alkollerin uçucu özellikleri nedeniyle bu etkilerin daha belirgin olduğu anlaşılmıştır. Alkollerin, özellikle kaynama noktaları düşük olduğu için uçucu olmaları, onların öğütme sürecinde ne şekilde etki gösterdiğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Bununla birlikte, alkoller genellikle düşük etkileşim göstererek, yalnızca kısmi bir şekilde yüzeylere adsorbe olurlar, yani bir kısmı gaz fazında yayılırken, diğer kısmı yüzeylerde temas sağlar. Bu durum, alkollerin öğütme sırasında etkinliğini artırırken, aynı zamanda etkinliğin farklı fazlarda nasıl değiştiğine dair bir anlayış da sağlar (Choi vd., 2009).

Alkoller, uçucu özellikleri sayesinde soğuk çimento karışımlarında bile belirgin bir şekilde koku bırakabilirler. Bu da onların yalnızca yüzeylerle sınırlı olmayan, gaz fazı aracılığıyla daha geniş bir alanda yayılmalarına olanak tanır. Bu özelliklerinden dolayı alkollerin öğütme sırasında yüzeylere sıkıca bağlı kalmadan daha serbest bir şekilde yayıldığı kabul edilmektedir. Alkollerin uçuculuğu, öğütme işleminin verimliliği üzerindeki etkilerini artıran bir faktör olmasına rağmen, maddelerin tam olarak ne şekilde hareket ettiğini belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Gaz fazı yayılma, alkollerin yayılmasında başat bir mekanizma olarak öne çıkarken, alkollerin özelliklerine

göre bu süreç farklılık gösterebilir. Örneğin, bazı alkoller tamamen gaz fazında dağılabilirken, bazıları yalnızca sınırlı bir yüzey etkileşimiyle yayılabilir (Weibel ve Mishra, 2014).

Diğer taraftan, polikarboksilat eterler (PCE), öğütme verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Polikarboksilatlar, moleküler yapıları nedeniyle yüksek verimli bir şekilde öğütme süreçlerine etki ederken, bu maddelerin başka bir özelliği de, buharlaşmalarının tersinir olmamalarıdır. Polikarboksilatlar, ayrışmadan kalabilen maddelerdir, bu da onların öğütme sırasında moleküler düzeyde büyük değişimlere uğramadıkları anlamına gelir. Bu özellik, onları özellikle beton endüstrisinde akışkanlaştırıcı olarak kullanılabilir hale getirir. Polikarboksilatların buharlaşma olasılıkları son derece düşüktür, bu da onların öğütme sırasında yayılmalarını farklı bir mekanizma, yani yüzey teması yoluyla gerçekleştirmelerine olanak tanır. Polikarboksilat eterler, öğütme sırasında yayılma işlemlerini genellikle gaz fazı yerine doğrudan yüzey etkileşimi yoluyla gerçekleştirirler. Bu maddelerin moleküler yapısı, yüzey temasıyla etkileşerek öğütme işleminin verimliliğini artırmalarına yardımcı olur. Böylece, polikarboksilatlar gibi moleküller, öğütme işlemlerinde daha düşük buharlaşma oranlarıyla etkin bir şekilde yayılabilirler ve bu da onların etkinliğini artırır (Heller vd., 2011; Assaad vd., 2011).

Toprak (2015), polikarboksilatların yüzey teması yoluyla yayılmalarının öğütme performansını iyileştirdiğini vurgulamaktadır. Bu moleküller, yüzeye doğrudan temas kurarak etkilerini gösterirken, gaz fazında yayılma oranlarının düşük olması nedeniyle, özellikle yüksek sıcaklıklarda bile stabil kalabilmektedirler. Bu özellikleri sayesinde, polikarboksilat eterler, yüzey teması ve etkileşimi vasıtasıyla öğütme sürecine dahil olduklarında, daha verimli sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu durum, polikarboksilatların öğretici bir örnek teşkil ettiğini ve onların, diğer yardımcı kimyasallara kıyasla daha kontrollü bir yayılma biçimi sunduğunu göstermektedir. Bu da öğütme performansını iyileştiren bir diğer önemli faktördür.

Ekonomik açıdan bakıldığında, öğütme işlemleri sırasında kullanılan yardımcı kimyasalların kaynama noktalarının ve öğütme sıcaklıklarının, bu maddelerin ayrışma sıcaklıklarının çok daha altında olduğu tespit edilmiştir. Bu özellik, bu kimyasalların buhar basınçlarının da oldukça düşük olduğunu göstermektedir (Weibel ve Mishra, 2014). Ancak bu düşük buhar basınçlarına rağmen, bu maddelerin, özellikle yüzey temasıyla etkileşime girdiklerinde, gaz fazında yayılmalarına olanak sağlayacak düzeyde bir buhar basıncı geliştirebilecekleri öne sürülmektedir. Bu durum, yüzeylerde adsorbe olmuş olan

sıvıların, gaz fazındaki yayılımı ile benzer bir davranış sergileyebileceğini gösteriyor. Yani, öğütme sırasında sıvı maddeler, yüzeye etkileşime girdiklerinde, belirli bir seviyede gaz fazında da dağılma potansiyeli gösterebilmektedirler. Bu, öğütme yardımcı maddelerinin, farklı fazlar arasında geçiş yaparak yayılmalarıyla ilgili daha karmaşık bir anlayışa yol açmaktadır.

Buhar basıncı, bir molekülün kaynama noktası, sıcaklık ve yüzeye adsorbe olduğu katı madde gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Öğütme işlemi sırasında bu faktörlerin nasıl bir araya geldiğini anlamak, bu maddelerin nasıl hareket ettiğini ve öğütme performansını nasıl etkilediğini anlamada büyük önem taşır. Örneğin, gaz fazında en yüksek yayılma eğilimi gösteren moleküllerden biri propilen glikoldür, kaynama noktası 188°C civarındadır. Ardından, kaynama noktası 254°C olan dietilen glikol gelir ve en düşük yayılma eğilimine sahip olan molekül ise 335°C kaynama noktasına sahip trietanolamindir. Bu moleküllerin kaynama noktalarındaki farklılıklar, onların gaz fazında yayılma yeteneklerini doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu da demektir ki, kaynama noktası daha düşük olan maddeler, gaz fazında daha kolay yayılabilirken, kaynama noktası daha yüksek olan maddeler buhar fazında daha zor yayılırlar.

Gaz fazında dağılan moleküller ile yüzey teması yoluyla yayılan moleküller arasındaki oranı hesaplamak oldukça zordur. Bu oran, sadece kullanılan öğütme yardımcı maddesinin özelliklerine bağlı değil, aynı zamanda değirmenin yapısı ve öğütme ekipmanlarının tasarımına da bağlıdır. Yani, bu sürecin dinamiklerini tam olarak anlamak, kullanılan materyallere ek olarak, fiziksel ekipmanların özelliklerine de dikkat etmeyi gerektirir. Bununla birlikte, yapılan araştırmalar, moleküllerin yüzeylerle temasa geçerek yayılma olasılıklarının, gaz fazında yayılma olasılıklarından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, yüzey teması yoluyla gerçekleşen yayılmanın, öğütme işlemi sırasında daha baskın bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, yüzeylerin öğütme sırasında önemli bir rol oynadığını ve bu maddelerin daha fazla etkinlik göstermelerini sağladığını göstermektedir (Toprak, 2015).

2.4. Bor Cevherinin Öğütülmesinde Gezegen Tipi Değirmenlerin Kullanımı

Bor cevheri öğütme süreçlerinde gezegen tipi değirmenlerin tercih edilmesinin temel nedeni, bu sistemlerin yüksek enerjiyle çalışan ve kısa sürede çok ince taneli ürün elde etmeye olanak tanıyan özel yapılarıdır. Gezegen tipi değirmenler, klasik bilyalı değirmenlere göre daha yoğun darbe ve kesme kuvveti uygulayarak öğütme işlemini gerçekleştirir. Bu durum, özellikle sert yapılı bor minerallerinin verimli bir şekilde

parçalanmasını mümkün kılmaktadır. Öğütme sırasında oluşan bu yüksek enerjili etki, cevherin mikron altı ve hatta nanometre ölçeğinde parçalanmasını sağlayarak yüzey alanını ciddi şekilde artırır. Bu da sonraki işlemlerde, özellikle reaktif yüzey gerektiren kimyasal süreçlerde veya sinterleme gibi termal işlemlerde önemli bir avantaj sunmaktadır (Kwade, 1999).

Gezegen tipi değirmenler, homojen parçacık boyutu dağılımı sağlaması bakımından da öne çıkar. Elde edilen öğütülmüş ürün, daha düzenli ve tekdüze boyutlara sahip olur. Bu homojenlik, özellikle flotasyon ve liç gibi cevher zenginleştirme işlemlerinde sürecin etkinliğini artırır. Aynı zamanda bu tür değirmenler, küçük ölçekli çalışmalarda yani laboratuvar düzeyinde de oldukça etkilidir. Özellikle bor cevheri gibi değerli ve sınırlı miktarda bulunan numuneler üzerinde çalışıldığında, az miktarda numuneye yüksek verim elde etme imkânı sunar. Zaman, hız ve sıcaklık gibi öğütme parametrelerinin kontrol edilebilir olması, deneysel çalışmalarda önemli bir esneklik sağlamaktadır (Hacıfazlıoğlu, 2009).

Gezegen tipi değirmenlerin bir diğer önemli avantajı da öğütme kabı ve bilye materyali açısından geniş seçenek sunmasıdır. Aşındırıcı veya kimyasal olarak aktif bor minerallerinin öğütülmesinde, seramik, tungsten karbür veya zirkonya gibi özel kaplar tercih edilerek kontaminasyon riski en aza indirilebilir. Bu sayede öğütülen malzemenin kimyasal saflığı korunur ve analiz ya da üretim süreçlerinde güvenilirlik sağlanır. Tüm bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda, gezegen tipi değirmenler bor cevheri öğütme işlemlerinde yüksek verim, hassasiyet ve kontrol imkânı sunduğu için tercih edilen bir sistem olarak öne çıkmaktadır (Çayırılı, 2014).

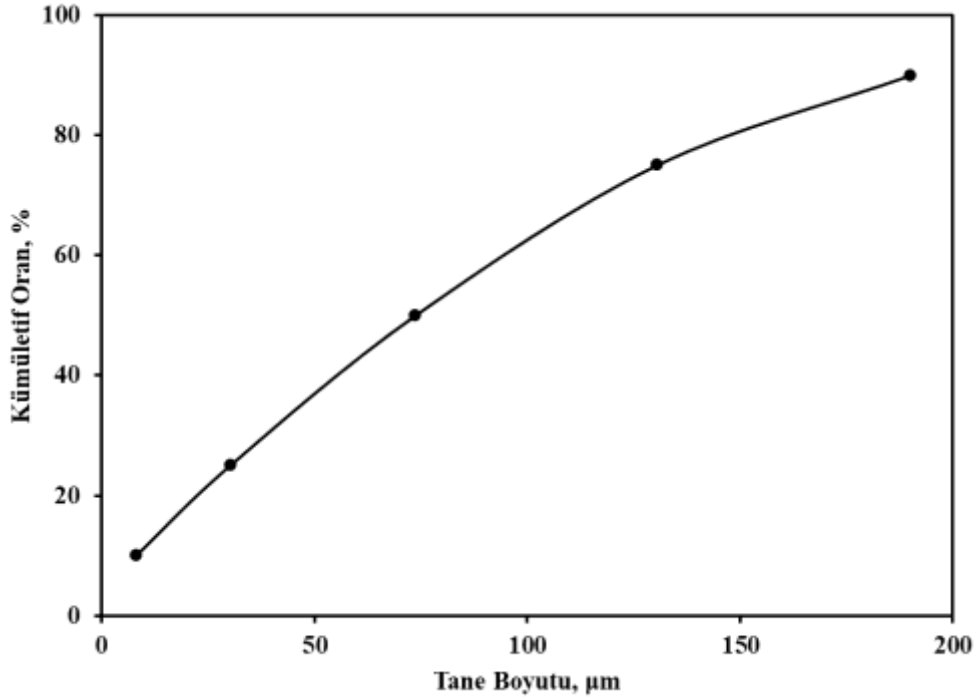
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, ETİ Maden bünyesindeki Balıkesir-Bigadiç bölgesindeki bor cevheri kullanılmıştır (Şekil 3.1). Temin edilmiş numunelerin tane boyut dağılımı Cilas 1190 marka analiz cihazı kullanılarak belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Numune öğütülmeden önce 50 °C’de 72 saat kurutulmuştur. Bor’un öğütülmesi için Fritsch markalı laboratuvar ölçekli gezegen tip değirmen kullanılmıştır. Temin edilmiş değirmen 1/8" ile 3/8" aralığındaki bilyeler için tasarlanmıştır ve 100 rpm ile 250 rpm arasında çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmalar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda öğütme yardımcısı olarak Merck tarafından üretilen Trietanolamin (TEA) ($C_6H_{15}NO_3$), Diethylene glycol (DEG) ($C_4H_{10}O_3$) ve 1-Hexanol (HexOH) ($C_6H_{14}O$) kullanılmıştır. Belirlenen kimyasalların bor cevherinin öğütülmesi üzerindeki etkileri tane boyutu, öğütme süresindeki değişimler, tüketilen enerji miktarları ve öğütülen ürünlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (tane topaklanması olup olmadığını gözlemek için) ile tespit edilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan bor cevheri numunesi.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin tane boyut dağılımı.

Şekil 3.2'den görüldüğü gibi, öğütülen malzemenin d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerleri sırasıyla 8,15 µm, 73,78 µm ve 190,09 µm'dir. Buna göre, ortalama tane boyutunun yaklaşık 90 µm olduğu belirlenmiştir.

3.2. Yöntem

Deneylerde 10 gr bor numunesi kullanılmıştır. Bor'un öğütülmesi için Fritsch markalı laboratuvar ölçekli gezegen tip (Şekil 3.3) değirmen kullanılmıştır. Temin edilen değirmen 1/8" ile 3/8" aralığındaki bilyeler için tasarlanmıştır ve deneyler 250 dev/dak değirmen hızında gerçekleştirilmiştir. Belirlenen kimyasalların bor cevherinin öğütülmesi üzerindeki etkileri tane boyutu, öğütme süresindeki değişimler, tüketilen enerji miktarları ve öğütülen ürünlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri (tane topaklanması olup olmadığını gözlemlemek için) ile tespit edilmiştir. Öğütme yardımcılarını değirmene beslenecek bor cevherinin miktarına göre farklı konsantrasyonlarda incelenmiştir. Ayrıca tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Gezegen tipi değirmen.



Şekil 3.4. Enerji tüketimini ölçen analizör.

Öğütme verimliliğini değerlendirmek amacıyla öğütme sırasındaki enerji tüketimi Şekil 3.4’te gösterilen bir analizör ile ölçülmüştür. Enerji tüketiminde kullanılan analizörün teknik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. PCE-GPA 62 Analizörün Teknik Özellikleri (PCE Instruments, 2023).

Özellikler	Değerler
Voltaj Ölçüm Aralığı	4 ... 600 V AC
Akım Ölçüm Aralığı	4 ... 1500 A AC
Aktif Güç P	5 ölçüm aralığında 10 W ... 9999 kW
Görünür Güç S	5 ölçüm aralığında 10 VA ... 9999 kVA
Reaktif Güç Q	5 ölçüm aralığında 10 VAr ... 9999 kVAr
Güç Faktörü PF Ölçüm Aralığı	0,00 ... 1,00
Frekans Ölçüm Aralığı	46 ... 65 Hz
Aktif Enerji	0 ... 999.999 kWh
Görünür Enerji	0 ... 999.999 kVAh
Reaktif Enerji	0 ... 999.999 kVarh
Akım Pensi Açıklığı	Maks. 55 mm
Güç Kaynağı	2 x 1.5 V AA pil
Enerji Tüketimi	Yaklaşık 10 mA
Çalışma Koşulları	-10°C... +50°C, maks. %85 n.o
Güvenlik Standardı	CAT III 600 V

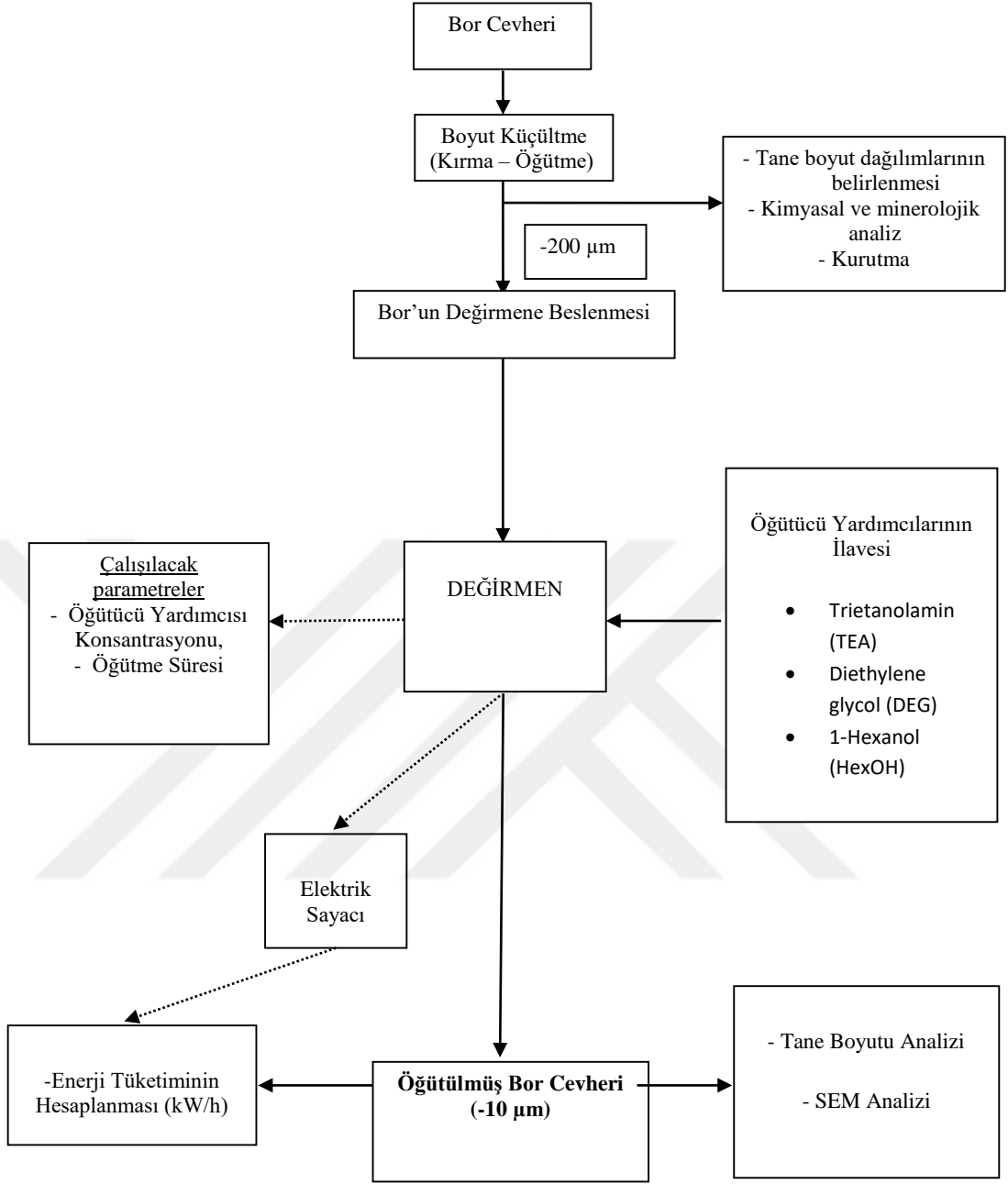
Öğütme sırasındaki enerji tüketiminin (E_m) hesaplanması için ise aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$E_m \text{ (kW/h)} = (E - E_0) / M_p$$

Burada, M_p borun ürün miktarını, E t zamanında kullanılan enerji miktarını ve E_0 ise yüksüz enerji miktarını ifade etmektedir.

Öğütme yardımcılarının bor cevherinin öğütme performansına ve enerji tüketimine etkisinin araştırmak için Şekil 3.5'te gösterilen akım şeması izlenmiştir.





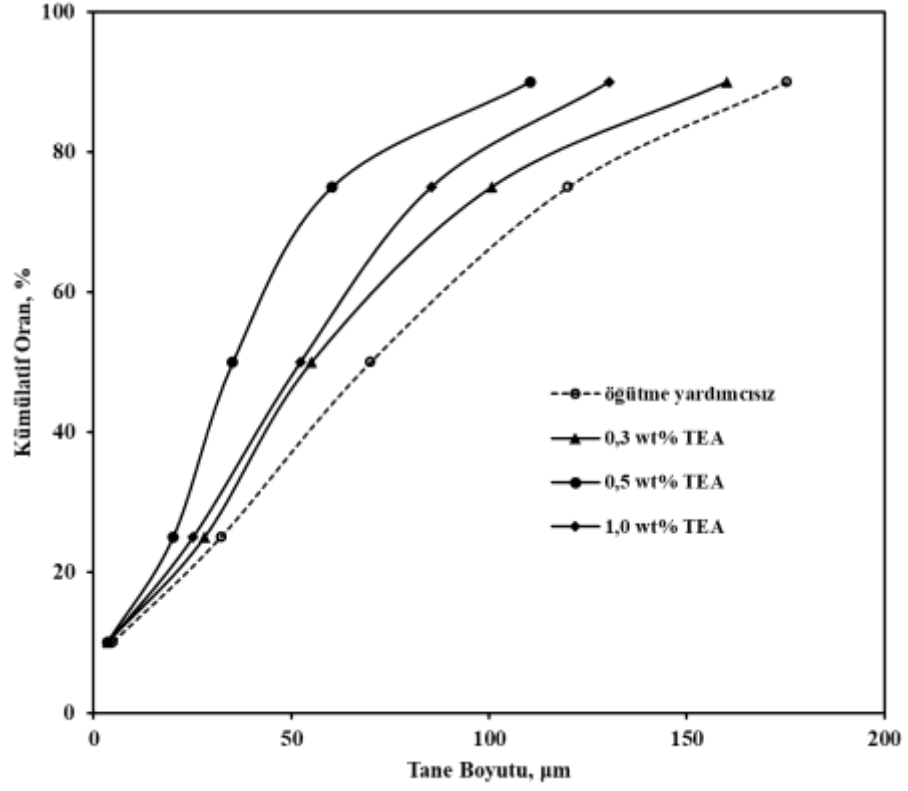
Şekil 3.5. Deneysel akım şeması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

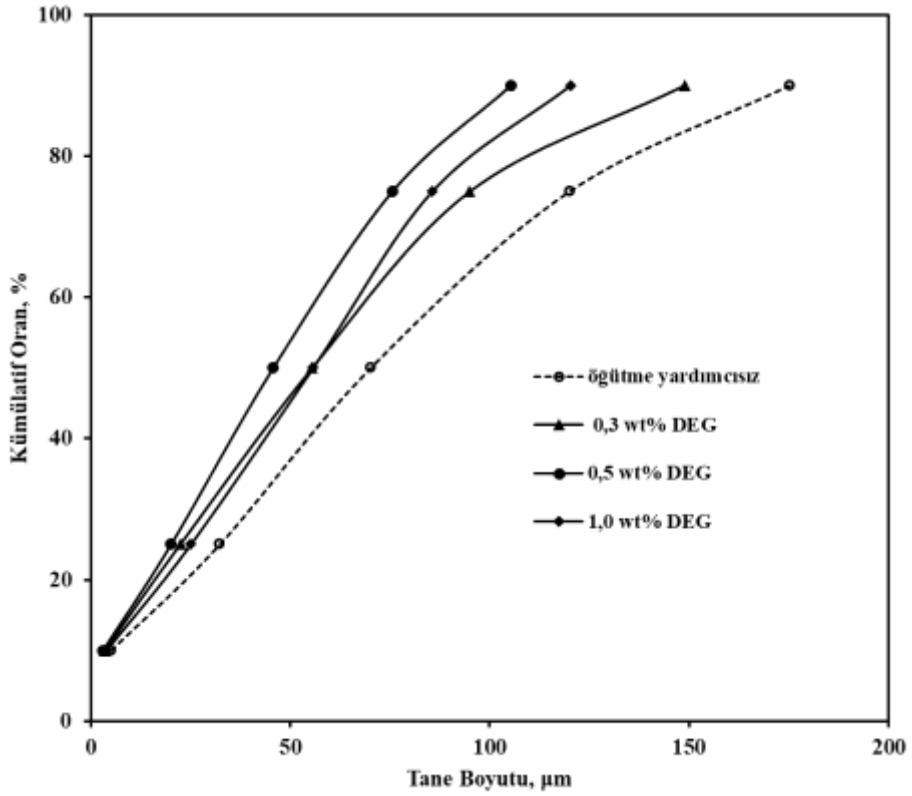
4.1. Gezegen Tip Değirmende Öğütme Yardımcısı Miktarının Bor Cevherinin Tane Boyutu Üzerine Etkisi

Öğütme yardımcılarının miktarının bor cevherinin tane boyutu üzerindeki etkisini belirlemek için yapılan deneylerde 0,3-1 wt% (malzeme ağırlığının %0,3-1'i) oranlarında TEA, DEG ve HexOH kullanılmıştır. Kullanılan öğütme yardımcılarının borun tane boyutu üzerine etkisi Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı gibi, öğütme yardımcıları bor cevherinin öğütülmesinde doğrudan etkili olmuştur. 240 saniyelik öğütme süresinde öğütülen cevherin d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerleri öğütme yardımcıları kullanmadan sırasıyla 5 μm , 70,12 μm ve 175,24 μm iken; 0,5 wt% TEA ilavesiyle aynı sürede 3,45 μm , 35,15 μm ve 110,32 μm olmuştur. Bununla birlikte, 0,5 wt% DEG ve HexOH kullanılarak öğütülen bor'un d_{50} değerleri sırasıyla 45,75 μm ve 38,48 μm 'dir.

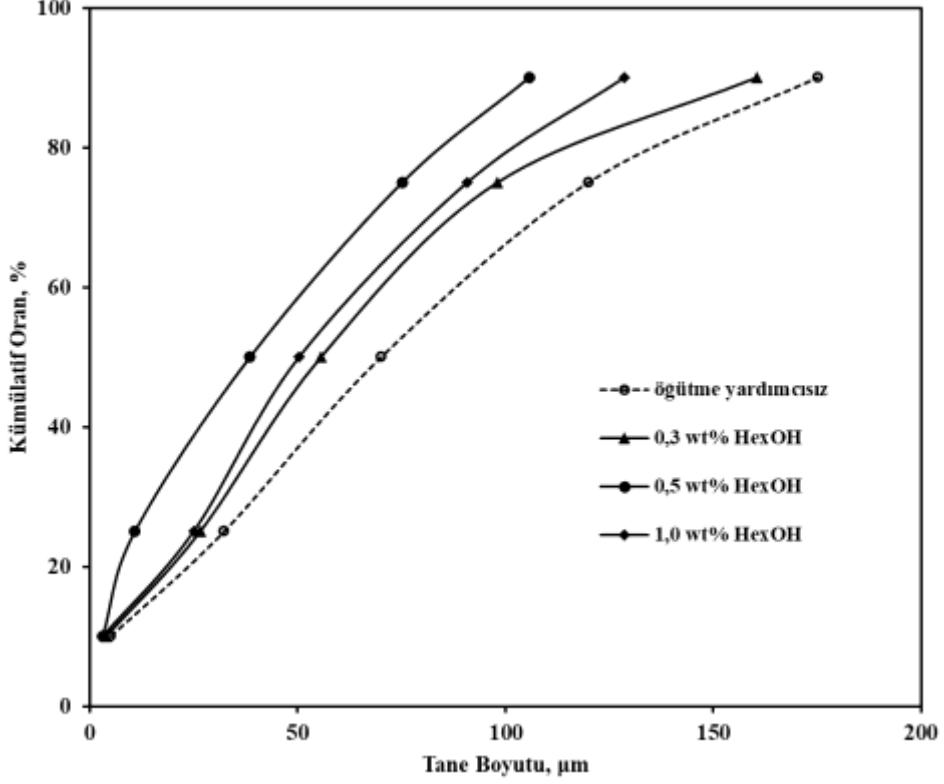
Öğütme yardımcılarının çimentoların performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve az miktarda kullanılan öğütme yardımcıının çimento parçacık boyutunu etkili bir şekilde azalttığı ve aynı zamanda çimentonun özgül yüzey alanını artırdığı, bunun da çimento kalitesinin bir ölçüsü olarak kullanılan önemli bir özellik olduğu ifade edilmiştir (Katsioti vd., 2009; Kim, 2018; Njiru vd., 2023). Öğütme yardımcılarının yeterli miktarda kullanılması, malzemelerin daha homojen bir şekilde dağılmasına ve böylece daha ince ve eşit boyutlu parçacıkların elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Öğütme yardımcı miktarının yeterinden az veya fazla olması malzemelerin topaklanmasına neden olabileceği için tane boyutu dağılımında da farklılıklar gözlenebilmektedir. Öğütme yardımcı miktarının doğru bir şekilde ayarlanması, istenilen tane boyutlarına ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Yeterli miktarda öğütme yardımcı kullanımı, öğütme işleminin verimliliğini artırırken, malzemenin kalitesini ve homojenliğini de iyileştirmektedir.



Şekil 4.1. Trietanolamin (TEA) miktarının bor cevherinin tane boyutuna etkisi.



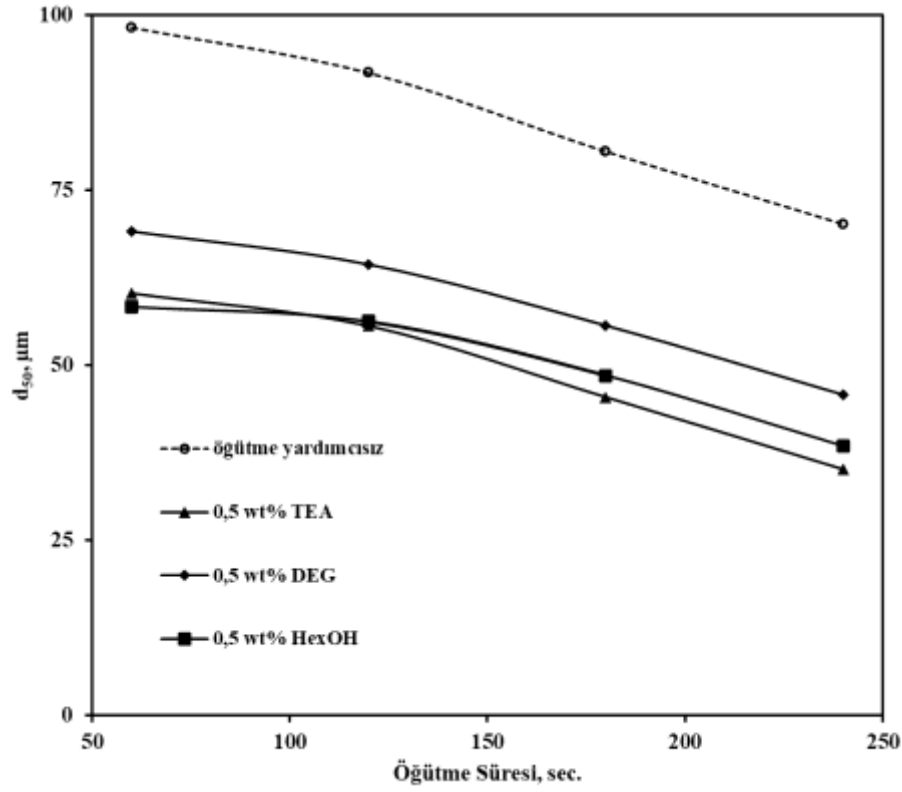
Şekil 4.2. Dietilen glikol (DEG) miktarının bor cevherinin tane boyutuna etkisi.



Şekil 4.3. 1-Hexanol (HexOH) miktarının bor cevherinin tane boyutuna etkisi.

4.2. Gezegen Tip Değirmende Öğütme Süresinin Bor'un Tane Boyutu Üzerine Etkisi

Öğütme süresinin bor cevherinin tane boyut dağılımının %50'lik kümülatif frekansa karşılık gelen tane boyutu (d_{50}) üzerindeki etkisini belirlemek için yapılan deneylerde 0,5 wt% TEA, DEG ve HexOH kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, öğütme yardımcıları içeren numunenin tane boyutu öğütme yardımcısız numuneden daha küçüktür. 240 saniyelik öğütme süresinde öğütme yardımcıları içermeyen bor'un d_{50} değeri 70,12 μm iken 0,5 wt% öğütme yardımcıları içeren bor'un d_{50} değerlerinin 35-45 μm arasında olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, bor cevherinin öğütme işleminde eklenen öğütme yardımcılarının öğütme süresini ve öğütme için harcanan güç tüketimini azaltabildiğini ve öğütme verimliliğini artırabildiğini göstermektedir. Ayrıca, öğütme yardımcısı TEA'nın; DEG ve HexOH'dan daha iyi öğütme verimliliği gösterdiği görülmektedir. Ji vd. (2024), çimento üretim sürecini iyileştirmek ve çimento endüstrisinin sürdürülebilir gelişimine katkıda bulunmak için trietanolamin (TEA) ilavesinin çimento klinkerin öğütme verimliliği üzerine etkilerini araştırmışlar ve öğütme yardımcıları olarak trietanolamin (TEA) eklemenin, çimento klinker öğütme verimliliğini artırdığını ve öğütme enerji tüketimini azaltmanın en etkili yollarından biri olduğunu ifade etmişlerdir.



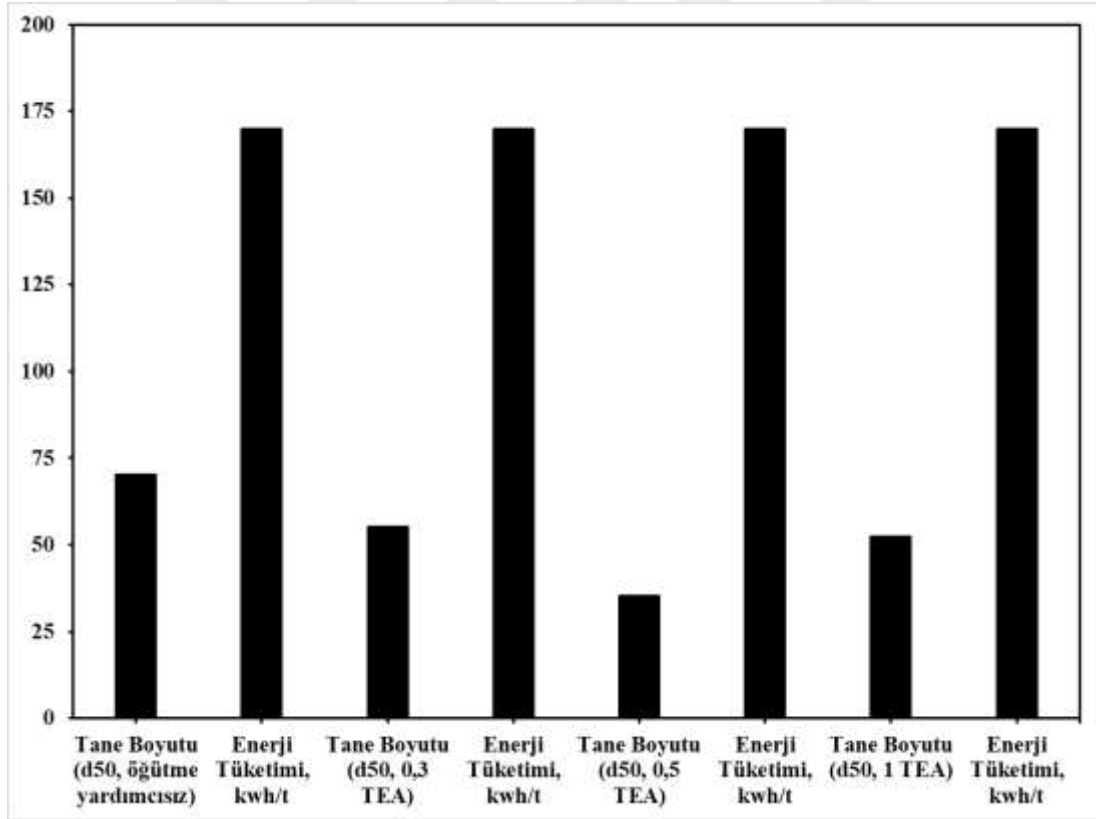
Şekil 4.4. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresinin tane boyutuna etkisi.

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, öğütme süresinin bor cevherinin d_{50} değeri (kümülatif %50 tane boyutu) üzerindeki etkisi gösterilmektedir. 0,5 wt% TEA, DEG ve HexOH öğütme yardımcılarıyla gerçekleştirilen deneyleri, öğütme yardımcısız öğütme ile karşılaştırmıştır. Öğütme yardımcısız duruma kıyasla, tüm öğütme yardımcıları öğütme süresi boyunca daha düşük d_{50} değerleri sağlamıştır. Bu, öğütme yardımcılarının verimliliği artırdığını ve tane incelmesini hızlandığını göstermektedir. TEA öğütme yardımcısı ile en düşük d_{50} değerine ve en yüksek öğütme etkinliğini göstermiştir.

4.3. Bor Cevherinin Öğütülmesinde Öğütücü Yardımcılarının Enerji Tüketimine Etkisi

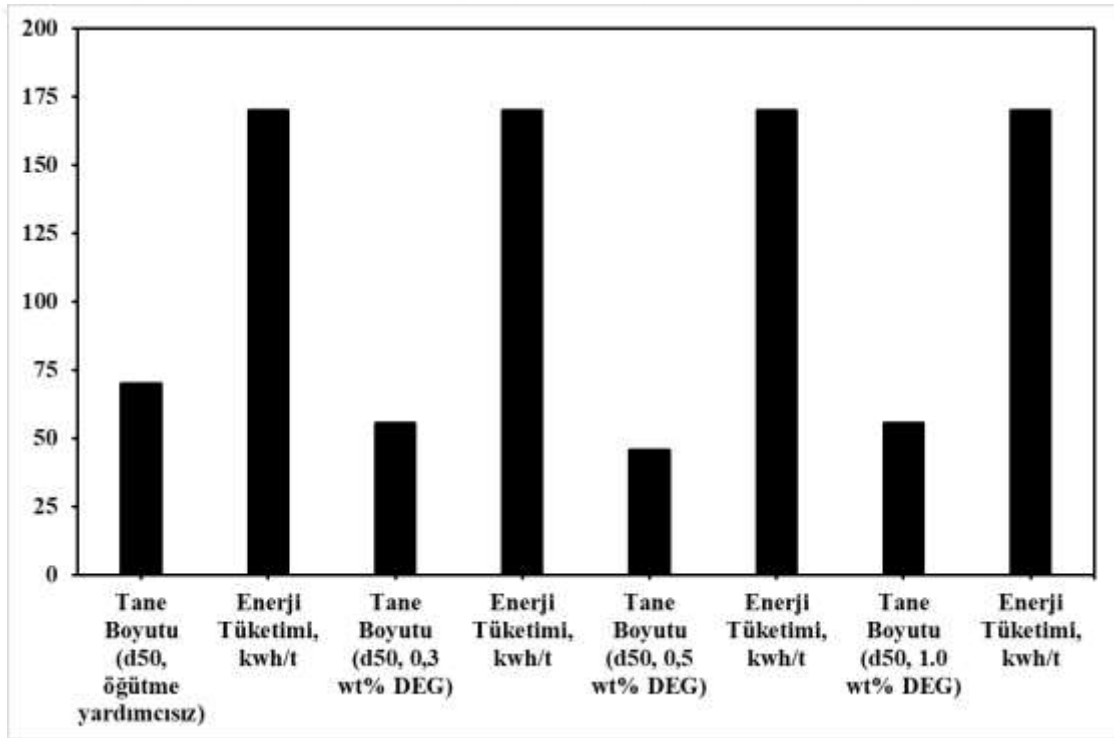
Öğütme sırasındaki enerji tüketimi ve öğütme verimliliğini değerlendirme amacıyla değirmenin tükettiği enerji ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca, 0,5 ağırlık oranında öğütme yardımcısı ilave edilerek öğütme süresine bağlı olarak d_{50} ve tüketilen enerji miktarı arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı üzere, 170 kWh/t'lik enerji tüketildiğinde öğütme yardımcısı

kullanmadan 70,12 μm tane boyutunda bor cevheri elde edilirken, 0,5 wt% ağırlık oranında TEA ile yapılan öğütme deneyinde elde edilen bor cevherinin tane boyutu 35,15 μm olmuştur. Benzer şekilde, 0,5 wt% ağırlık oranında DEG ve HexOH ilave edildiğinde sırasıyla 45,75 μm ve 38,48 μm tane boyutuna sahip bor cevheri elde edilmiştir. Öğütme yardımcılarının enerji tüketimi üzerindeki bu olumlu etkisinin toz akışının kolaylığına atfedilmiştir. Kuru öğütmede, ince parçacıkların miktarı arttıkça moleküller arası Van der Waals yapışma kuvvetlerinin etkisi de artmakta, bunun sonucunda topaklanma ve akış özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Öğütme yardımcılarının etkisi, ince taneler arasındaki Van der Waals yapışma kuvvetlerini azaltmak ve gelişmiş toz akışkanlığı sağlamaktır (Austin vd., 1984). Ayrıca, literatürde öğütme yardımcılarının özellikle kuru öğütmede enerji tüketiminde ve parçacık boyutunda önemli bir azalmaya ve enerji verimliliğinde artışa neden olduğu, öğütülmüş parçacıkların kümelenmesini veya toplanmasını önlediği, öğütme ortamı kaplamasını engellediği ve toz akışkanlığını artırdığı ifade edilmiştir (Jolicoeur vd., 2007; Choi vd., 2009; Toprak vd., 2014; Çayırılı ve Gökçen, 2018).



Şekil 4.5. Bor cevherinin öğütülmesinde TEA miktarının enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.

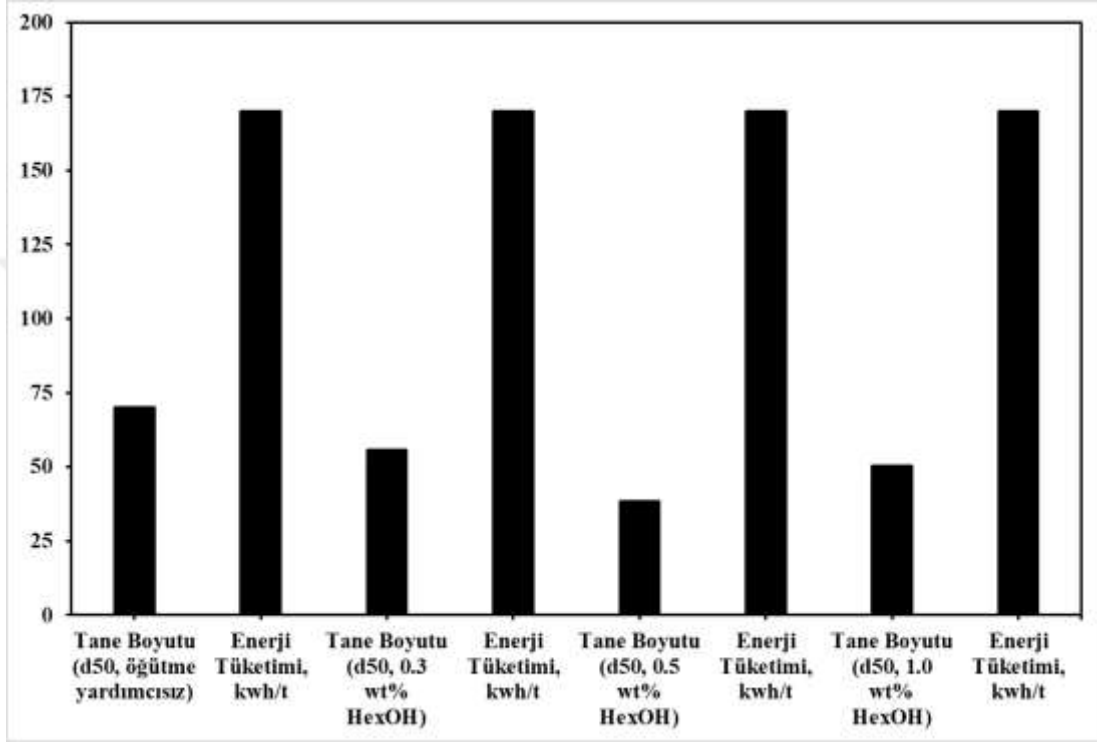
Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, TEA öğütme yardımcısı, tüm oranlarda öğütme yardımcısız duruma göre daha düşük d_{50} değerleri sağlar. 0,3 wt% TEA ile d_{50} değeri yaklaşık 55 μm ve öğütme yardımcısız duruma göre daha küçüktür. Öğütme yardımcısız durumda enerji tüketimi yaklaşık 170 kWh/t. Bu oran, tane boyutunu küçültse de optimum etkili değildir. 0,5 wt% TEA ile en düşük d_{50} değeri yaklaşık 35,15 μm oldu ve yine de yaklaşık 170 kWh/t enerji tüketildi. Bu seviyede optimum öğütme yardımcısı miktarının olduğunu göstermektedir. 1,0 wt% TEA kullanıldığında d_{50} değeri 0,5 wt%'ye göre yaklaşık 51 μm artmıştır. Tane topaklanması, öğütme yardımcı oranının fazla olmasının bir sonucu olabilir. Yine de yaklaşık 170 kWh/t enerji tüketiyor. Sonuç olarak, TEA'nın optimum oranı 0,5 wt%.



Şekil 4.6. Bor cevherinin öğütülmesinde DEG miktarının enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, DEG öğütme yardımcısı, tüm oranlarda öğütme yardımcısız duruma göre daha düşük d_{50} değerleri sağlar. 0,3 wt% TEA kullanıldığında, d_{50} değeri yaklaşık 55 μm ve öğütme yardımcısız duruma göre belirgin bir incelmeye sağlanmıştır. Bununla birlikte, bu seviyede öğütme verimliliği 0,5 wt%'den daha düşüktür ve yaklaşık 170 kWh/t enerji tüketir. 0,5 wt% TEA ile en düşük d_{50} değeri yaklaşık 35,15 μm ve yine de enerji tüketimi yaklaşık 170 kWh/t. Bu oran, optimum öğütme yardımcısı

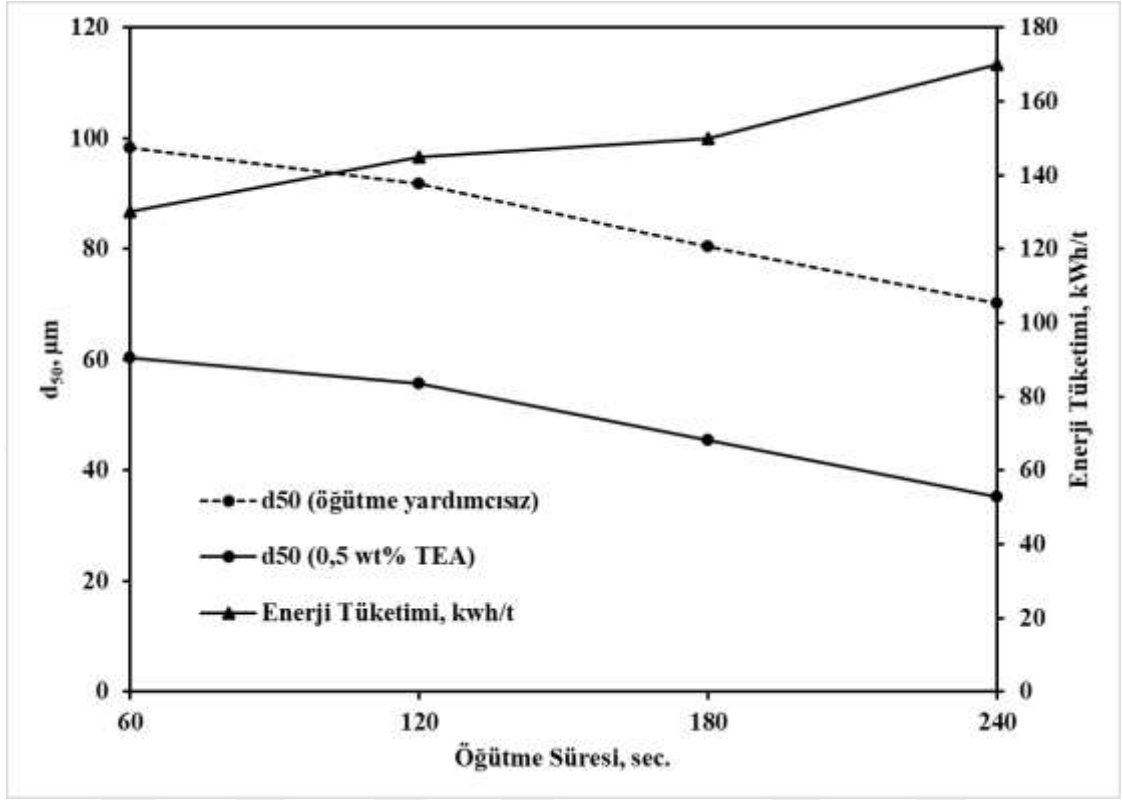
miktardır. 1,0 wt% TEA'da d_{50} değeri yaklaşık 51 μm ve 0,5 wt% TEA'da incelleme performansı daha düşüktür. Bu durum, öğütme yardımcısı kullanımının topaklanması nedeniyle öğütme etkinliğini bir şekilde göstermektedir. Yine de enerji tüketimi yaklaşık 170 kWh/t. TEA öğütme yardımcısı oranı 0,5 wt% oranı, tane incelmelerini ve enerji verimliliğini en iyi sonucu veren.



Şekil 4.7. Bor cevherinin öğütülmesinde HexOH miktarının enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.

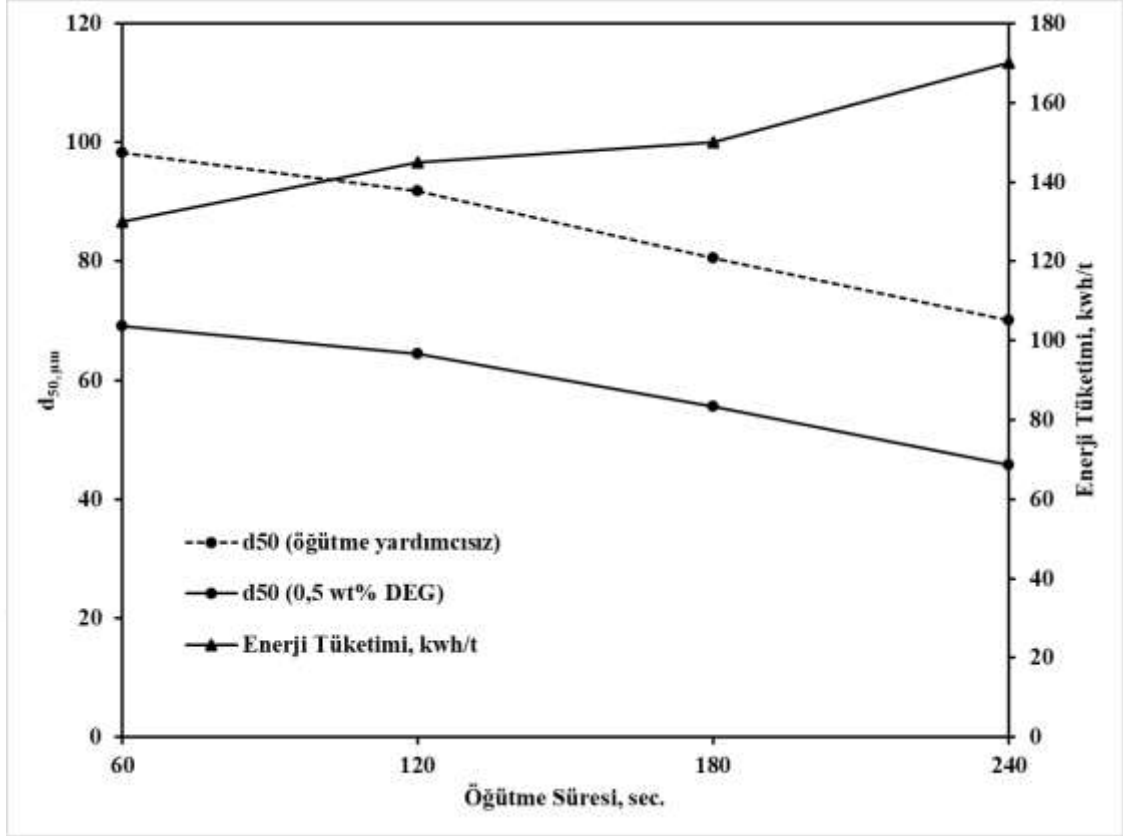
Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, HexOH öğütme yardımcısı tüm oranlarda öğütme yardımcısız duruma kıyasla daha düşük d_{50} değerleri sağlamaktadır. 0,3 wt% HexOH kullanıldığında d_{50} değeri yaklaşık 55 μm olup öğütme yardımcısız duruma göre belirgin bir incelleme sağlanmıştır. Enerji tüketimi yaklaşık 170 kWh/t seviyesinde kalmıştır. 0,5 wt% HexOH oranında en düşük d_{50} değeri yaklaşık 38,48 μm bu oranda elde edilmiştir. Enerji tüketimi yine yaklaşık 170 kWh/t. Bu oran, HexOH için optimum öğütme yardımcısı miktarı olarak değerlendirilebilir. 1,0 wt% HexOH kullanıldığında ise d_{50} değeri yaklaşık 50 μm olup, 0,5 wt% oranına kıyasla incelleme performansı azalmıştır. Bu durum, yüksek öğütme yardımcısı oranlarının tane topaklanması gibi nedeniyle öğütme etkinliğini düşürebileceğini düşündürmektedir. Enerji tüketimi yine yaklaşık 170 kWh/t. Genel olarak, HexOH öğütme yardımcısında optimum oran 0,5 wt% olup, bu seviyede

hem daha ince ürün elde edilmiş hem de enerji tüketimi değişmemiştir. Etkinlik açısından HexOH, TEA'dan düşük, ancak DEG'den daha iyi performans göstermektedir.



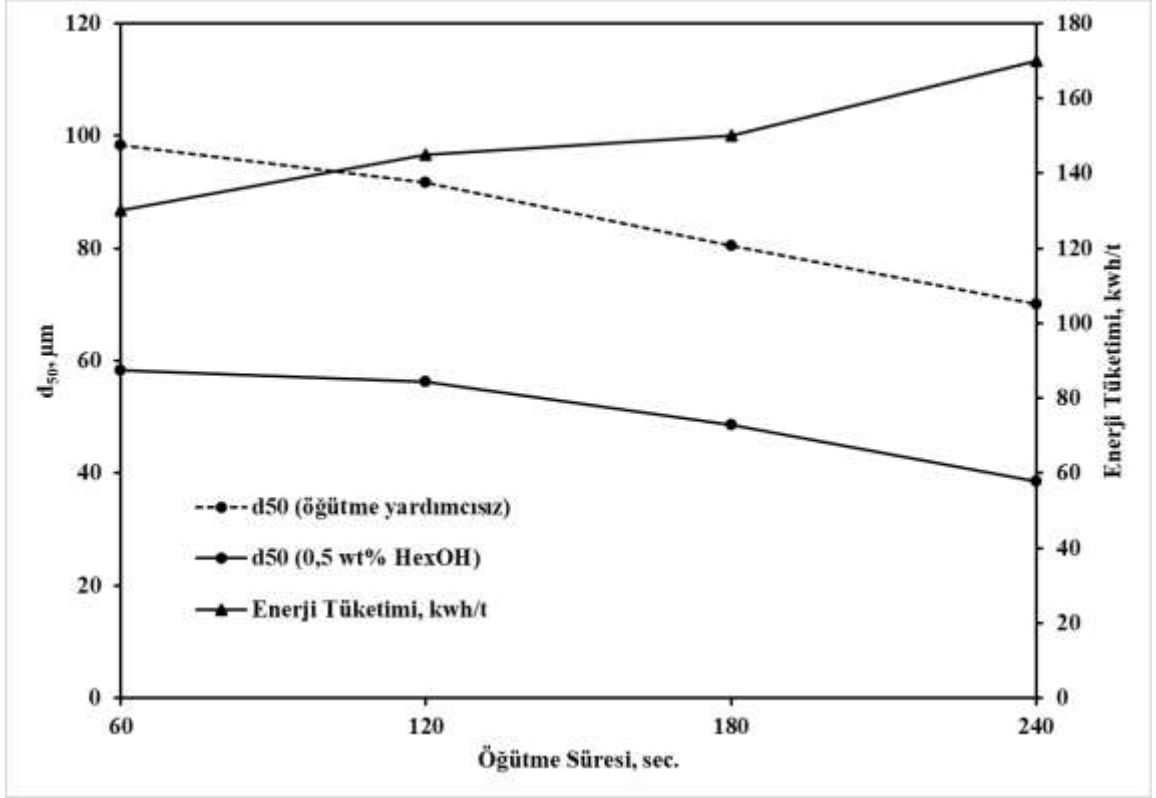
Şekil 4.8. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresine bağlı olarak TEA ilavesinin enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere, 0,5 wt% TEA öğütme yardımcısı yapılan öğütme deneylerinde kullanılarak, öğütme süresine d₅₀ değeri sürekli düşüyor, ancak enerji tüketimi belirgin bir şekilde artar. d₅₀ değeri 240 saniyelik öğütme süresi sonunda 35,15 µm ve aynı sürede enerji tüketimi yaklaşık 170 kWh/t oldu. Bu sonuçlar, TEA öğütme yardımcısının daha ince ürün elde etmesi için belirli bir miktarda enerji tüketimini artış gösterir. Bununla birlikte, öğütme yardımcısız durumunda, aynı enerjiyle daha küçük bir tane boyutu elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresine bağlı olarak DEG ilavesinin enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.

Şekil 4.9'da görüldüğü üzere, 0,5 wt% DEG öğütme yardımcısı ile yapılan deneylerde, öğütme süresi ile d_{50} değeri azalır ve enerji tüketimi artış göstermiş. d_{50} değeri 240 saniyelik öğütme süresi sonunda yaklaşık $45,75 \mu\text{m}$ ve enerji tüketimi 170 kWh/t elde edildi. DEG'in öğütme verimliliğinin TEA'ya göre daha düşük olduğunu gösteren d_{50} değeri. Ek olarak, 0,5 wt% DEG öğütme yardımcısız ile karşılaştırıldığında belirgin bir şekilde iyileşme gösterdi.

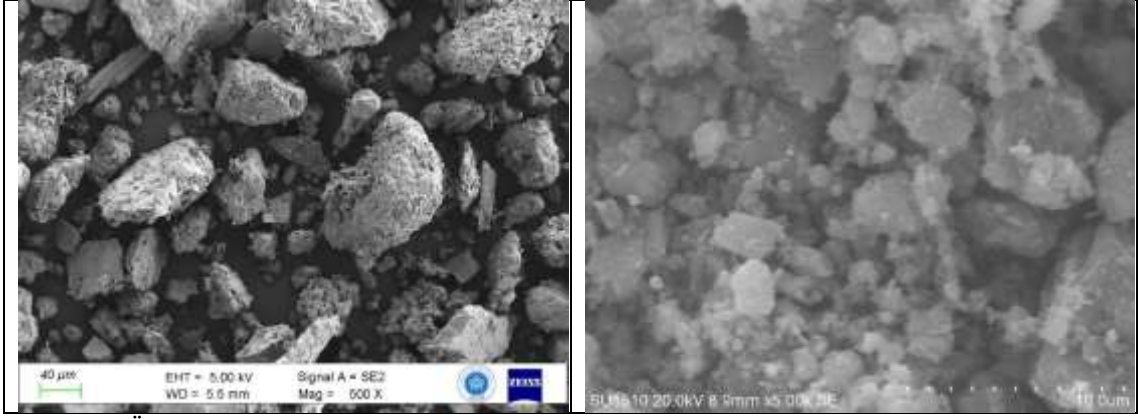


Şekil 4.10. Bor cevherinin öğütülmesinde öğütme süresine bağlı olarak HexOH ilavesinin enerji tüketimi ve tane boyutu üzerine etkisi.

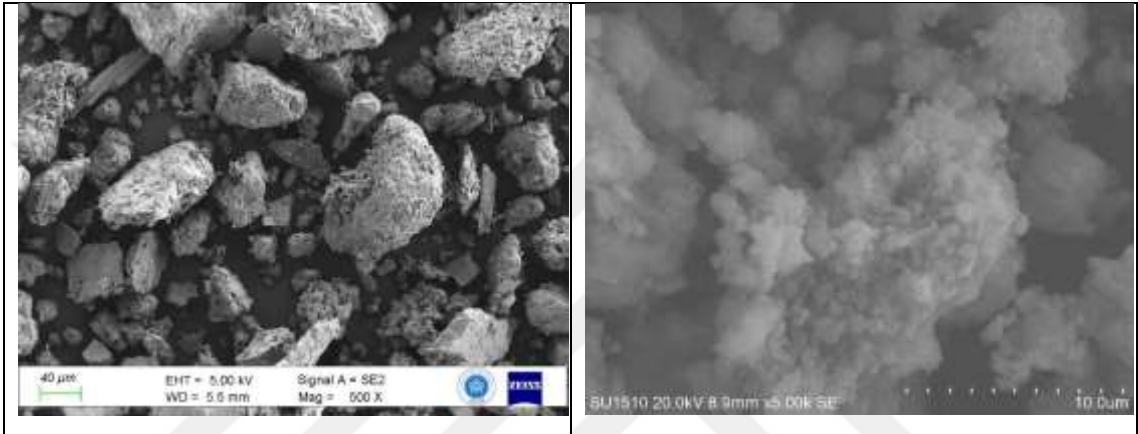
Şekil 4.10 görüldüğü üzere, 0,5 wt% HexOH öğütme yardımcısı kullanılarak öğütme sürecine ait d_{50} ve enerji tüketimi eğilimlerini göstermektedir. Tane boyutu sürece bağlı olarak 240 saniyede 38,48 μm elde edildi ve enerji tüketimi 170 kWh/t'ye arttı. HexOH öğütme yardımcısı, TEA kadar olmasa da öğütme verimliliğini artırıyor ve öğütme yardımcısız duruma göre daha küçük tane boyutları elde edilmiştir.

4.4. SEM Analizleri

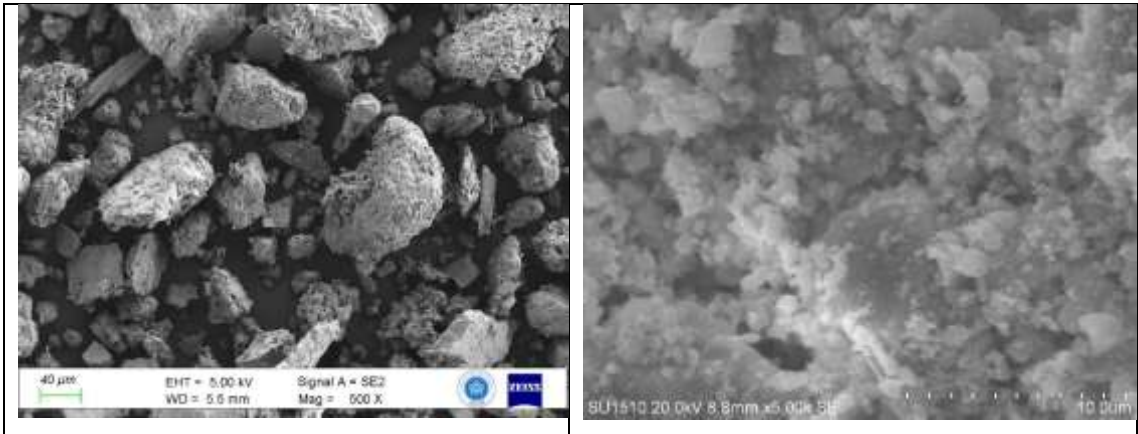
Öğütme yardımcısının etkisinin incelendiği deneylerin sonunda, öğütme yardımcılı (0,5 wt% TEA) ve öğütme yardımcısı kullanılmadan yapılan deneylerden elde edilen ürünlerin SEM görüntüleri çekilerek topaklanma durumları tespit edilmiştir (Şekil 4.11, 4.12 ve Şekil 4.13). Şekiller incelendiğinde öğütme yardımcısının kullanıldığı (0,5 wt% TEA) deneylerden elde edilen ürünlerdeki taneler arası topaklanmanın daha az olduğu gözlenmiştir. Kireçtaşının çok ince boyutlara öğütülmesinde öğütme yardımcısının taneler arası topaklanmaları azalttığı SEM görüntüleri ile belirlenmiştir (Hasegawa vd., 2005). Yapılan bu çalışmada da benzer bulgulara ulaşıldığı söylenebilir.



Şekil 4.11. Öğütme yardımcısız ve 0,5 wt% TEA ilave edilerek öğütülen bor cevherinin SEM görüntüleri.



Şekil 4.12. Öğütme yardımcısız ve 0,5 wt% DEG ilave edilerek öğütülen bor cevherinin SEM görüntüleri.



Şekil 4.13. Öğütme yardımcısız ve 0,5 wt% HexOH ilave edilerek öğütülen bor cevherinin SEM görüntüleri.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, bor cevherinin gezegen tip değirmende (laboratuvar ölçekli) mikronize öğütülmesinde öğütme yardımcısının etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, her kimyasalın farklı oranlarının etkisi, tane boyutu, öğütme süresi ve enerji tüketimindeki değişiklikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında ve sonunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Az miktarda öğütme yardımcılarının, öğütme yardımcısı olmadan öğütmeye kıyasla öğütülmüş ürünlerin d_{50} 'sini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Uygulanan deneysel şartlarda TEA öğütme yardımcısı en iyi sonucu vermiştir. Bununla birlikte, 240 saniye öğütme süresinde d_{50} boyutları öğütme yardımcısız yapılan deneylerle karşılaştırıldığında ve 0,5 wt% oranında TEA ilavesiyle d_{50} boyutunda yaklaşık %50,13 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır.
- En iyi enerji tasarrufu TEA ile elde edilmiştir. 170 kWh/t'lık bir enerji ile 240 saniyede öğütme yardımcısız $d_{50} = 70,12 \mu\text{m}$ iken, 0,5 wt% TEA ile $d_{50} = 35,15 \mu\text{m}$ boyutuna kadar inmiştir. Böylelikle aynı enerji ile daha ince tane boyutlu ürün sağlanmıştır. Öğütme yardımcılarının enerji tüketimi üzerindeki bu olumlu etkisi toz akışının kolaylığına bağlanabilir. Sonuçlar, daha etkili bir öğütme ortamı yaratan yardımcı kimyasalların özelliklerinin, tozun akış ve taşınma özelliklerini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgulara göre, kullanılan öğütme yardımcıları bor tanelerinin öğütme ortamını kaplamasını engelleyerek öğütme süresinin verimliliğini artırmaktadır. Kimyasal bileşikler, tozun dağılımını düzenleyip homojenleştirerek öğütme işlemi sırasında enerji kaybını en aza indirmekte ve daha düşük enerji ile daha yüksek verim sağlanmasını mümkün kılmaktadır.
- Öğütme yardımcısının etkisinin incelendiği deneylerin sonunda, öğütme yardımcılı (0,5 wt%) ve öğütme yardımcısı kullanılmadan yapılan deneylerden elde edilen ürünlerin SEM görüntüleri çekilerek topaklanma durumları tespit edilmiştir. Buna göre, öğütme yardımcısının kullanıldığı deneylerden elde edilen tanelerin daha az topaklanma eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

5.2. Öneriler

Cevher yataklarının tenörünün gittikçe azalmasıyla birlikte, düşük tenörlü cevherlerin değerlendirilip ekonomiye kazandırılması büyük önem taşımaktadır. Kıymetli mineraller çoğunlukla kayalar içerisinde ince dağılımlı olarak bulunduğu için zenginleştirme öncesi kıymetli minerallerin serbestleştirilmesi gerekir ve bu kırma-öğütme işlemleri ile sağlanır. Cevherlerin zenginleştirilmesi aşamasında gerekli olan enerjinin büyük bir kısmı öğütmeye harcanmaktadır. Mikronize öğütmelerde ise konvansiyonel (çubuklu ve bilyeli gibi) değirmenler verimini kaybetmekte ve ekonomik olmaktan çıkmaktadırlar. Bu çalışmada kullanılan bor cevheri gibi birçok cevherin en uygun maliyetle öğütülmesi zorlukların ortadan kalkmasına yardımcı olabilir ve teknolojik bir endüstriyel proses geliştirmek için bir referans kabul edilebilir. Klasik öğütme tesislerinde pilot ölçekli tesisler kurulup elde edilecek sonucun ekonomik etkilerinin belirlenmesi önerilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Altun, O., Benzer, H., Toprak, A. ve Enderle, U., 2015, Utilization of grinding aids in dry horizontal stirred milling, *Powder Technology*, 286, 610-615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.001>.
- Assaad, J. J., Asseily, S. E., 2011, Use of water reducers to improve grindability and performance of Portland cement clinker, *ACI Materials Journal*, 108(VI), 619-627.
- Austin, L.G., Klimpel, R.R., Luckie, P.T., 1984, Process engineering of size reduction: ball milling, *Soc. Min. Eng. AIME*, 561.
- Bakker, J. D., 2014, Energy use of fine grinding in mineral processing, *Metallurgical and Materials Transactions E*, 1, 8-19.
- Bal, J., Celebi, Ö., Başer, S., Aydın, E., Rakıcı, E., Uğraş, S., Kılıç-Baygutaalp, N., 2023, Antibacterial activity of boron compounds against biofilm-forming pathogens, *Biological Trace Element Research*, *Advance online publication*, <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03768-z>.
- Bayel, D. K., 2023, Using glycerin, a by-product of biodiesel, as a grinding aid in the dry grinding of marble dust waste, *Scientific Mining Journal*, 62(2), 61-66. <https://doi.org/10.30797/madencilik.1196039>.
- Bernhardt, C., Reinsch, E., Husemann, K., 1999, The influence of suspension properties on ultra-fine grinding in stirred ball mills, *Powder Technology*, 105, 357-361.
- Bilir, B., 2022, Tarımsal Üretimde Bor (B) Kaynakları ve Borun Bitki Metabolizmasındaki Önemi, *Şırnak Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1): 19-32.
- Bruckmann, A., Krebs, A., Bolm, C., 2008, Organocatalytic reactions: Effects of ball milling, microwave and ultrasound irradiation. *Green Chemistry*, 10, 1131.
- Chipakwe, V., Semsari, P., Karlkvist, T., Rosenkranz, J., Chehreh Chelgani, S., 2020, A critical review on the mechanisms of chemical additives used in grinding and their effects on the downstream processes, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8148-8162.
- Choi, H. K., Wang, L., 2007, A quantitative study of grinding characteristics on particle size and grinding consumption energy by stirred ball mill, *Korean Journal of Materials Research*, 17(10), 532–537.
- Choi, H., Lee, W., Kim, D. U., Kumar, S., Kim, S. S., Chung, H. S., Kim, J. H., Ahn, Y. C., 2010, Effect of grinding aids on the grinding energy consumed during grinding of calcite in a stirred ball mill, *Minerals Engineering*, 23(1), 54-57.

- Choi, H., Lee, W., Kim, S., 2009, Effect of grinding aids on the grinding energy consumed during grinding of calcite in a stirred ball mill, *Advanced Powder Technology*, 20(4), 350–354. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2009.01.002>.
- Çayırılı, S., 2014, Mikanın karıştırılmalı bilyalı değirmende öğütülmesinde öğütme parametrelerinin etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 11-35.
- Çayırılı, S., Gökçen, H. S., 2018, Kalsitin dik ve yatay karıştırılmalı değirmende öğütülmesinde öğütme yardımcısının etkisinin incelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 838–847.
- Çayırılı, S., Gökçen, H. S., Yüce, N., Elchi, O., 2021, Pirina yağının öğütme yardımcı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 189-201. <https://doi.org/10.31796/ogummf.882606>.
- Çuhadaroğlu, M., Atalay, Ü., Çinku, M., 2013, Characterization of the Grinding Behavior of Binary Mixtures of Clinker and Colemanite, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 10(5), 940-947.
- Ersoy, O., Güler, D., Rençberoğlu, M., 2022, Effects of grinding aids used in grinding calcium carbonate (CaCO₃) filler on the properties of water-based interior paints, *Coatings*, 12, 44. <https://doi.org/10.3390/coatings12010044>.
- ETİMADEN, 2022, Borun Kullanım Alanları, <https://www.etimaden.gov.tr/>.
- Gökçen, H. S., Çayırılı, S., Uçbaş, Y., Kayacı, K., 2015, The effect of grinding aids on dry micro fine grinding of feldspar, *International Journal of Mineral Processing*, 136, 42-44.
- Guzzo, P. L., Marinho de Barros, F. B., Soares, B. R., Santos, J. B., 2020, Evaluation of particle size reduction and agglomeration in dry grinding of natural quartz in a planetary ball mill, *Powder Technology*, 368, 149-159.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2009, İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 01, 17-30.
- He, M., Wang, Y., Forssberg, E., 2006, Parameter effects on wet ultrafine grinding of limestone through slurry rheology in a stirred media mill, *Powder Technology*, 161, 10-21.
- Heller, T., Müller, T., Honert, D., 2011, Cement additives based on PCE, *ZKG International*, 40-48.
- Helvacı, C., 2015, Boratlar ve Endüstriyel Hammaddeler, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, (150), 1–20.

- Hasegawa, M., Kimata, M., Yaguchi, M., 2005, Effect and Behavior of Liquid Additive Molecules in Dry Ultrafine Grinding of Limestone, (translated by KONA no: 24, 2006) Japan, *J. Soc. Powder Technology*, 178-184.
- Ji, X., Zhao, W., Pan, T., Han, F., Du, L., Sha, J., Liu, J., 2024, Effect of ester modified triethanolamine on the grinding quality of cement: Insight from fractal and multifractal analysis, *Construction and Building Materials*, 443, 137752.
- Jolicoeur, J., Morasse, S., Sharman, J., Tagnit-Hamou, A., Slim, F., Page, M., 2007, Polyoltype compounds as clinker grinding aids: influence on powder fluidity and on cement hydration, in: 12th Int. Congr. Chem. Cem., pp. 3-4.
- Karagedov, G. R., Lyakhov, N. Z., 2003, Mechanochemical grinding of inorganic oxides, *KONA Powder and Particle Journal*, 21, 76-87.
- Katircioğlu-Bayel, D., 2016, Mineral dolgu malzemesi üretiminde öğütme parametreleri ve ürün kalitesinin kontrolü, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-6.
- Katircioğlu-Bayel, D., 2019, The effect of grinding media performance on wet milling of calcite, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 379-386.
- Katsioti, M., Tsakiridis, P. E., Giannatos, P., Tsibouki, Z., Marinos, J., 2009, Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance, *Construction and Building Materials*, 23, no. 5, 1954-1959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.003>, 2-s2.0-59649112557.
- Kaya, M., Canbazoglu, M., 2007, Dry grinding kinetics of colemanite, *Powder Technology*, 172(2), 145-153.
- Kıransoy, A., Yıldız, R., 2014, Türkiye Bor Cevherlerinin Endüstriyel Uygulamaları, *Madencilik Dergisi*, 53(3), 1-10.
- Kim, D., 2018, Effect of adjusting for particle-size distribution of cement on strength development of concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 6, 1763524. <https://doi.org/10.1155/2018/1763524>, 2-s2.0-85048586935.
- Kasada, R., Ha, Y., Higuchi, T., Sakamoto, K., 2016, Chemical State Mapping of Degraded B₄C Control Rod Investigated with Soft X-ray Emission Spectrometer in Electron Probe Micro-analysis, *Scientific Reports*, 6, 25700.
- Kwade, A., 1999, Wet comminution in stirred media mills-research and its practical application, *Powder Technology*, 105, 14-20.
- Laapas, H. R., Lahtinen, U. R., Lukkarinen, T., 1984, Effect of surfactants in fine grinding, *Powder Technology*, 38(1), 27-35.

- Mishra, R. K., Weibel, M., Müller, T., Heinz, H., Flatt, R. J., 2017, Energy-effective grinding of inorganic solids using organic additives, *CHIMIA International Journal of Chemistry*, 71(7–8), 451–460.
- MTA, 2020, *Türkiye'nin Bor Rezervleri Raporu*, Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Nayak, N. B., Nayak, B. B., 2016, Aqueous sodium borohydride induced thermally stable porous zirconium oxide for quick removal of lead ions, *Scientific Reports*, 6, Article 23175. <https://doi.org/10.1038/srep23175>.
- Njiru, E. N., Muthengia, J. W., Munyao, O. M., Mutitu, D. K., Musyoki, D. M., 2023, Review of the Effect of Grinding Aids and Admixtures on the Performance of Cements, *Hindawi Advances in Civil Engineering*, volume 2023, Article ID 6697842, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2023/6697842>.
- Orumwense, O. A., 1992, The kinetics of fine grinding in an annular ball mill, *Powder Technology*, 71(2), 187–195. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)80009-R](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)80009-R)
- Özcan, E. D., Çinku, K., Özdamar, Ş., Ergin, H., Özkan, Ş. G., 2022, Investigation of the effect of polymer-based novel grinding aids on cement grinding efficiency, *Journal of Applied Polymer Science*, 139(13), e51870. <https://doi.org/10.1002/app.51870>.
- Özkan, A., Yekeler, M., 2001, Pülp reolojisinin öğütme işlemine etkisi ve kontrolü, *Madencilik Dergisi*, 40–47.
- Paramasivam, R., Vedaraman, R., 1992, Effects of the physical properties of liquid additives on dry grinding, *Powder Technology*, 70(1), 43–50. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)80009-V](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)80009-V).
- Partyka, T., Yan, D., 2007, Fine grinding in a horizontal ball mill, *Minerals Engineering*, 20, 320–326.
- PCE Instruments, 2023, *PCE-GPA 62 power analyzer - Technical datasheet*, Retrieved August 5, 2025, from https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/power-meter-pce-instruments-power-analyzer-pce-gpa-62-det_4227764.htm.
- Prziwara, P., Breitung-Faes, S., Kwade, A., 2018, Impact of grinding aids on dry grinding performance, bulk properties, and surface energy, *Advanced Powder Technology*, 29, 416–425.
- Prziwara, P., Kwade, A., 2020, Grinding aids for dry fine grinding processes – Part I: Mechanism of action and lab-scale grinding, *Powder Technology*, 375, 146–160.
- Rehbinder, P. A., Kalinkovaskaya, N. A., 1932, Decrease in the surface energy of solid bodies and the work of dispersion during formation of an adsorption layer, *J. Technol. Phys. (USSR)*, 2, 726–755.

- Rose, J., Sullivan, R., 1958, *The chemistry of cement and concrete (3rd ed.)*, London: Edward Arnold Publishers.
- Sithole, N. T., Ntuli, F., Mashifana, T., 2018, The removal of Cu (II) from aqueous solution using sodium borohydride as a reducing agent, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 120, 012022.
- Sottili, L., Padovani, D., 2001, Effect of grinding aids in the cement industry, *ZKG International*, 54(3), 146-151.
- Toprak, N. A., 2010, Öğütme yardımcılarının ve dayanım arttırıcılarının devre performansı ve çimento kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Ankara, 3-5.
- Toprak, N. A., 2015, Öğütme yardımcılarının çimento öğütme devresi performansı üzerine etkilerinin modellenmesi ve simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Ankara, 3-19.
- Toprak, N. A., Altun, O., Benzer, A. H., 2018, The effects of grinding aids on modelling of air classification of cement, *Construction and Building Materials*, 160, 564-573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.088>.
- Toraman, O., Çayirli, S., Uçurum, M., 2016, The grinding-aids effect of moisture, triethanolamine (tea) and ethylene glycol (eg) on grinding performance and product quality of calcite, *International Journal of Engineering Research ve Science (IJOER)*, 2(12), 121-128.
- Üçgül, İ., Şener, F., 2009, Bor ve Bor Bileşiklerinin Cam Teknolojisindeki Rolü, *Seramik Teknolojisi Dergisi*, 25 (2), 34-40.
- Weibel, M., Mishra, R. K., 2014, Comprehensive understanding of grinding aids, *ZKG International*, 28-39.
- Westwood, A. R. C., Goldheim, D. L., 1968, Occurrence and mechanism of rehbinder effects in CaF₂, *J. Appl. Phys.* 39, 3401-3405.
- Yılmaz, S., Bilen, M., 2025, Evaluation Of Grinding Parameters And Microwave Pre-Treatment On The Breakage Behavior And Energy Efficiency Of Colemanite Ore, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14 (2), 1287-1305.
- Zhao, Y., Wu, H., Wang, L., 2018, Boron-Based Nanomaterials for Energy Applications, *Advanced Materials*, 30(10), 1707281.
- Zhao, H., 2021, Analysis on influencing factors of grinding aid effect of cement grinding aids, *Journal of Physics: Conference Series*, 1798. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1798/1/012037>

Zheng, J., Harris, C. C. and Somasundaran, P., 1997, The effect of additives on stirred media milling of limestone, *Powder Technology*, 91, 173-179.

