



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER BAZLI GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİN SENTEZİ VE
ÇİMENTO ÖĞÜTME PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SONNUR GÖKÇE

HAZİRAN

SONNUR GÖKÇE	KİMYA ANABİLİM DALI	HAZİRAN 2025
---------------------	----------------------------	---------------------

**POLİMER BAZLI GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİN SENTEZİ VE
ÇİMENTO ÖĞÜTME PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Sonnur GÖKÇE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA ANABİLİM DALI**

**Danışman
Prof. Dr. Ferda ESER**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Sonnur GÖKÇE tarafından hazırlanan “Polimer Bazlı Gümüş Nanopartiküllerin Sentezi ve Çimento Öğütme Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ferda ESER

Kimya Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Adem ÖNAL

Anorganik Kimya Anabilim Dalı, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr.Üyesi Nilay AKKUŞ TAŞ

Kimya Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 17/06/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durum da aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sonnur GÖKÇE

17/07/2025

**POLİMER BAZLI GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİN SENTEZİ VE ÇİMENTO
ÖĞÜTME PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Sonnur GÖKÇE

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2025

ÖZET

Enerji verimliliği, günümüzün en önemli konuları arasındadır. Çimento üretimi, enerji kullanımının yoğun olduğu bir proses olup, bir ton çimentoyu üretmek için gerekli olan enerjinin yaklaşık üçte biri klinker ve katkı maddelerinin öğütülmesinde kullanılır. Çimento üretiminde hammadde-ürün süreçlerinin tamamında kullanılan enerji miktarı bir ton çimento üretimi için ortalama 110 kWh'dır. Bu enerjinin büyük bir kısmı (yaklaşık %60-70) öğütme için ayrılmaktadır. Bu nedenle çimento üretiminde enerji verimliliğini arttırmak için çimentonun nano malzemelerle zenginleştirilerek uygulanmasıyla ilgili yapılan çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. Nanoteknoloji, disiplinler arası bir bilim olup, yapı malzemesi üretiminde maliyetlerin düşürülmesini ve daha çevreci ürün elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, yapılan çalışma kapsamında polimer esaslı öğütme yardımcısı kullanarak gümüş nanopartiküllerin (AgNPs) sentezinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen öğütme yardımcısının çimento klinkerinin öğütülmesindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Polimer bazlı gümüş nanopartiküllerin (PCA-AgNPs) sentezi gerçekleştirilerek UV-Vis (Ultraviyole-Görünür bölge), ile karakterizasyonu gerçekleştirildi. Sentezlenen PCA-AgNPs'lerin sıvı çimento öğütme yardımcısına entegrasyonu tamamlanarak, yapılan deneylerle bu nanopartiküllerin çimento performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Klinkerin, bilyalı öğütme sonrasında Blain cihazı ve Lazerli Tane Dağılımı Cihazı ile tanecik boyutu analizleri yapılarak nihai ürün çimento yayılma, eğilme ve basınç deneyleriyle de desteklenmiştir. Sonuç olarak, elde edilen öğütme yardımcısının çimento öğütme sürecinde etkili olduğu, sadece öğütme süresini azaltarak enerji tasarrufu sağlamakla kalmayıp aynı zamanda parçacık boyutu dağılımını optimize ettiği ve parçacık boyutunu minimize ettiği belirlenmiştir.

Sayfa Adedi	: 71
Anahtar Kelimeler	: Gümüş Nanopartikül, Çimento, Öğütme Yardımcısı
Danışman	: Prof. Dr. Ferda ESER

SYNTHESIS OF POLYMER-BASED SILVER NANOPARTICLES AND
INVESTIGATION OF THEIR EFFECT ON CEMENT GRINDING PERFORMANCE
(M. Sc. Thesis)

Sonnur GÖKÇE

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
June 2025

ABSTRACT

Cement production is a process in which energy use is intensive, and approximately one-third of the energy required to produce one ton of cement is used in the grinding of clinker and additives. The amount of energy used in all raw material-product processes in cement production is an average of 110 kWh for the production of one ton of cement. A large portion of this energy (approximately 60-70%) is allocated for grinding. For this reason, the number of studies on the application of cement by enriching it with nanomaterials in order to increase energy efficiency in cement production is increasing. Nanotechnology is an interdisciplinary science, and it enables the reduction of costs and the production of more environmentally friendly products by designing the properties of the material. In this context, it was aimed to synthesize silver nanoparticles (AgNPs) using polymer-based grinding aid and to investigate the effect of the obtained grinding aid on the grinding of cement clinker. The synthesis of polymer-based silver nanoparticles (PCA-AgNPs) was carried out and the nanoparticles were characterized by UV-Vis (Ultraviolet-Visible region), analyses. The integration of the synthesized PCA-AgNPs into the liquid cement grinding aid was completed and the effects of these nanoparticles on cement performance were investigated by experiments. After ball grinding, the clinker was subjected to particle size analysis using the Blain device and the Laser Grain Distribution Device, and the final product was supported by cement dispersion, bending and pressure tests. As a result, it was determined that the obtained grinding aid was effective in the cement grinding process, not only saving energy by reducing grinding time but also optimizing particle size distribution and minimizing particle size.

Number of Pages : 71
Keywords : Silver nanoparticle, Cement, Grinding aid
Advisor : Prof. Dr. Ferda ESER

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda öncelikle tez konusu seçiminde isteğimi göz ardı etmeyip, yapılan çalışmanın her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, çalışmamın bilimsel temeller ışığında şekillenmesini sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Ferda ESER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca Amasya Üniversitesi Suluova Meslek Yüksekokulu Laboratuvarlarının tüm imkanlarını kullanmama olanak sağlayan Yüksekokul Müdürü Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat KARAVİN'e, bilgisini benimle paylaşmaktan çekinmeyen, ihtiyacım olan kimyasalların temininde yardımlarını esirgemeyen dostum Mesut KARA'ya, tezimin her aşamasında maddi ve manevi her türlü yanımda olan aileme, küçücük yüreğiyle beni bu süreçte sürekli motive eden oğlum Kenan Aras GÖKÇE'ye teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma, Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından [Proje No: FMB-BAP 23-0607] numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Sağlanan destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
RESİMLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çimento Üretimi.....	1
1.1.1. Çimento öğütme prosesi	6
1.2. Öğütme Yardımcıları	7
1.2.1. Organik öğütme yardımcıları	8
1.2.2. İnorganik öğütme yardımcıları.....	11
1.3. Klinker ve Öğütme İşlemi	12
1.4. Çimento Üretiminde Kullanılan Öğütme Yardımcıları.....	15
1.5. Nanopartiküller ve Sentez Yöntemleri.....	17
2. LİTERATÜR.....	22
3. YÖNTEM.....	23
3.1. Materyal	24
3.2. Kullanılan Cihaz ve Aletler.....	24
3.2.1. Santrifüj cihazı ve etüv	24
3.2.2. Laboratuvar tipi bıçaklı değirmen	25
3.2.3. Dikey karıştırırmalı bilyalı değirmen.....	25
3.2.4. Blaine cihazı	26

3.2.5. Otomatik basınç pres cihazı.....	26
3.2.6. Çimento yayılma tablası	27
3.2.7. Lazerli tane dağılımı tespit cihazı.....	27
3.2.8. UV-Vis Spektrofotometre	29
3.3. Deneysel Prosedür.....	29
3.3.1. Çimento harcının eğilme ve basınç dayanımı tayini	29
3.3.2. Eğilme dayanımı deneyi	30
3.3.3. Basınç dayanımı deneyi.....	30
3.3.4. Klinkerin temin edilmesi ve öğütme işlemi için hazırlanması	30
3.3.5. Polikarboksilat bazlı gümüş nanopartiküllerin sentezi.....	31
3.3.6. PCE-AgNP mekanizması	32
3.3.7. Numunelerin öğütme performansı analizleri ve nihai ürün testleri.....	34
4. BULGULAR	36
4.1. Klinkerin Öğütme İşlemi İçin Hazırlanması	36
4.2. Polikarboksilat Bazlı Gümüş Nanopartiküllerin Sentezlenmesi	37
4.3. Sentezlenen PCE-AgNPs'in Karakterizasyonu.....	39
4.4. Numunelerin Öğütme Performansı Analizleri	41
4.5. Numunelerin Tanecik Boyutu Analizi	47
4.6. Lazerli Tane Dağılımı Deneyi.....	49
4.7. Çimentoda Yayılma Tablası Deneyi	50
4.8. Referans Çimento.....	51
4.9. Sade Klinker (Referans).....	52
4.10. Nano PCE Katkısı ile Öğütülen Klinker	53
5. TARTIŞMA	57
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	63
ÖZ GEÇMİŞ	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Literatürde kullanılan organik öğütme yardımcıları.....	8
Çizelge 1.2. Literatürde kullanılan inorganik öğütme yardımcıları.....	11
Çizelge 1.3. Çimento üretiminde harcanan enerji (Pagliaro ve Rossi, 2008).....	14
Çizelge 4.1. Numunelerin Blain değerleri	48
Çizelge 4.2. Lazerli tane dağılımı analiz sonuçları.....	50
Çizelge 4.3. Yayılma tablası deney sonuçları	54
Çizelge 4.4. Basınç ve eğilme dayanımları sonuçları	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Endüstriyel sektörlerin enerji tüketimi (Pan ve Lee, 2018).....	1
Şekil 1.2. Çimento üretiminin şematik gösterimi (Kalkan, 2023).	2
Şekil 1.3. Çimento üretim aşamaları (Cement Plant Supplier, b.t.).....	3
Şekil 1.4. Öğütme kolaylaştırıcı katkıların tanecik yüzeyleri üzerindeki etkisi	6
Şekil 1.5. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar (Wolfgong, 2007).	19
Şekil 3.1. PCE moleküler yapı (Zingg 2008).....	33
Şekil 3.2. Ag nanoagregatlarının PCE molekülü ile kapatılma mekanizmasının şematik gösterimi	35
Şekil 4.1. 0,01M PCE+AgNP UV Spektrumu.....	40
Şekil 4.2. 0,05M PCE+AgNP UV Spektrumu.....	40
Şekil 4.3. 0,1M PCE+AgNP UV Spektrumu.....	41

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Çimento üretiminde öğütmede kullanılan bazı maddeler (Cement Plant Supplier, b.t.).....	4
Resim 1.2. Klinker	13
Resim 1.3. a) Öğütme yardımcısının kullanılmadığı durum (çimento taneleri ile kaplanmış bilyalar) b) Öğütme yardımcısının kullanıldığı durum (yüzeyi temiz bilyalar) (Choi, Lee ve Kim,2009)	17
Resim 3.1. a) Etüv b) Santrifüj cihazı.....	26
Resim 3.2. Bıçaklı değirmen.....	26
Resim 3.3. a) Cihaz karıştırma mili b) Cihaz paneli.....	27
Resim 3.4. Otomatik Blaine cihazı	27
Resim 3.5. Çimento yayılma tablası	28
Resim 3.6. Parçacık boyutu ölçüm cihazı	29
Resim 3.7. UV-Vis Spektrofotometre.....	29
Resim 3.8. Temin edilen klinker (Ham hal)	32
Resim 3.9. a) PCE-AgNPs'in santrifüjlenmesi b) PCE-AgNPs'in kurutulması.....	33
Resim 4.1. Klinkerin el ile kırılıp tanecik boyutunun küçültülmesi	36
Resim 4.2. a) Bıçaklı değirmen b) Tanecik boyutu 300 mikrona getirilen klinker ...	37
Resim 4.3. 0,01 M AgNO ₃ kullanılarak hazırlanan numuneler a) Başlangıç b) 1 saat sonra.....	37
Resim 4.4. 0,05 M AgNO ₃ kullanılarak hazırlanan numuneler a) Başlangıç b) 1 saat sonra.....	38
Resim 4.5. 0,1 M AgNO ₃ kullanılarak hazırlanan numuneler a) Başlangıç b) 1 saat sonra	38
Resim 4.6. Bilyeler	41
Resim 4.7. a) Öğütme sonrası karıştırma mili b) Öğütme sonrası bilyeler.....	42
Resim 4.8. Öğütmeden önceki ve sonraki malzeme	43

Resim 4.9. a) Deney öncesi yıkanarak temizlenmiş bilyeler b) Öğütme sonrasında bilyelerin görüntüsü c) Öğütme sonrası karıştırma mili	43
Resim 4.10. a) Klinker öğütmesinden sonra bilyeler, b) PCE li klinker öğütme sonrası, c) PCE li klinker öğütmesinden sonra bilyeler, d) PCE li klinker öğütmesinden sonra karıştırma mili.....	45
Resim 4.11. a) Temizlenmiş bilyeler (öğütme öncesi) b) PCE katkı (öğütme sonrası) Öğütme sonrası karıştırma mili.....	46
Resim 4.12. a) Temizlenmiş bilyeler (öğütme öncesi) b ve c) PCE-AgNPs katkılı öğütme sonrası, d) Öğütme sonrası karıştırma mili	47
Resim 4.13. Blain cihazı	48
Resim 4.14. a) Deneyde kullanılan standart kum b) Yayılma tablası.....	50
Resim 4.15. a) Deneyde kullanılan standart kum b) Huniye konulduktan sonra sarsma anı.....	51
Resim 4.16. a) Elektronik kumpas ile ölçüm b) Elektronik kumpas ile dik 2.ölçüm.....	51
Resim 4.17. a) Harç halindeki sade klinker b) kalıptan çekilmiş vuruşa hazır klinker c)15 vuruş yapılmış klinker	52
Resim 4.18. Birbirine dik olarak yapılan iki ölçüm.....	53
Resim 4.19. a) Harç halindeki PCE-AgNPs ile öğütülmüş klinker b) kalıptan çekilmiş vuruşa hazır klinker c) 15 vuruş yapılmış klinker.....	53
Resim 4.20. Birbirine dik olarak yapılan iki ölçüm.....	54
Resim 4.21. Harçların kalıplara yerleştirilmesi	55
Resim 4.22. Kalıptan çıkartılmış 2 günlük numuneler	55
Resim 4.23. a) Eğilme dayanımı testi b) Basınç dayanımı testi	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrat derece
%	Yüzde
g	Gram
mg	Miligram
ml	Mililitre
µl	Mikrolitre
nm	Nanometre
kWh/t	Kilowatt-saat/ton

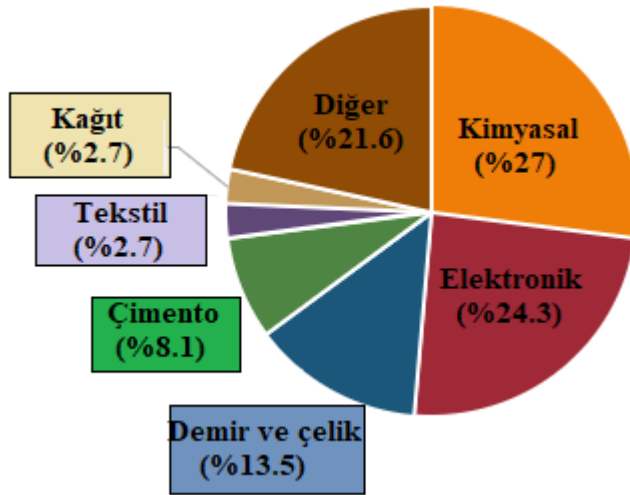
Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
<i>TEA</i>	Trietonolamin
<i>TIPA</i>	Triizopropanolamin
<i>DEG</i>	Dietilenglikol
<i>PCE</i>	Polikarboksilateter
<i>MDIPA</i>	n-Metil-diizopropanolamin
<i>PAM</i>	Poliakrilamid
<i>PAA</i>	Poliakrilikasit
<i>RDA</i>	Aril-alkil sülfonik asit
<i>HepAC</i>	Heptanoik asit
<i>HexOH</i>	1-Hexanol

$-NH_2$	Amino
$-OH$	Karboksil
$3CaCO_3.SiO_2$	Alit
C_3S	Alit
$2CaO.SiO_2$	Belit
C_2S	Belit
$3CaCO_3.Al_2O_3$	Selit
C_3A	Selit
$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	Kahverengi millerit
C_4Af	Kahverengi millerit
$MgCO_3$	Magnezyum karbonat
$MgCO_3.CaCO_3$	Dolomit
CaO_3	Kalsiyum karbonat
CCl_4	Karbon tetraklorür
$NaOH$	Sodyum hidroksit
$AgNO_3$	Gümüş nitrat

1. GİRİŞ

Günümüzün öncelikli konularından biri olan çevresel etkilerin en aza indirilerek enerji verimliliğin artırılması, buna bağlı olarak üretim maliyetlerinin düşürülmesi tüm sektörlerin olduğu gibi çimento sanayinin de öncelikleri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda maksimum verim minimum enerji ile çalışan ekipmanların kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Özellikle ince ve mikronize öğütmelerde bu enerji tüketimi çok yüksek boyutlara ulaşmaktadır. Yıllık 30 milyar tonluk tüketimi olan beton, sudan sonra küresel olarak en yaygın kullanılan malzemedir (Monteiro, Miller ve Horvath, 2017). Betonun temel bileşeni çimento, bağlayıcıdır. Çimento endüstrisi küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumludur. Bu emisyon, enerji tedariki için fosil yakıt yakılmasından ve üretim sırasında kullanılan hammaddelerin kalsinasyonundan kaynaklanır. Ayrıca, endüstriyel sektörde dördüncü en büyük enerji tüketicisidir (Pan ve Lee, 2018). Sanayi sektörlerinin enerji tüketimindeki payları Şekil 1.1.'de verilmiştir:



Şekil 1.1. Endüstriyel sektörlerin enerji tüketimi (Pan ve Lee, 2018)

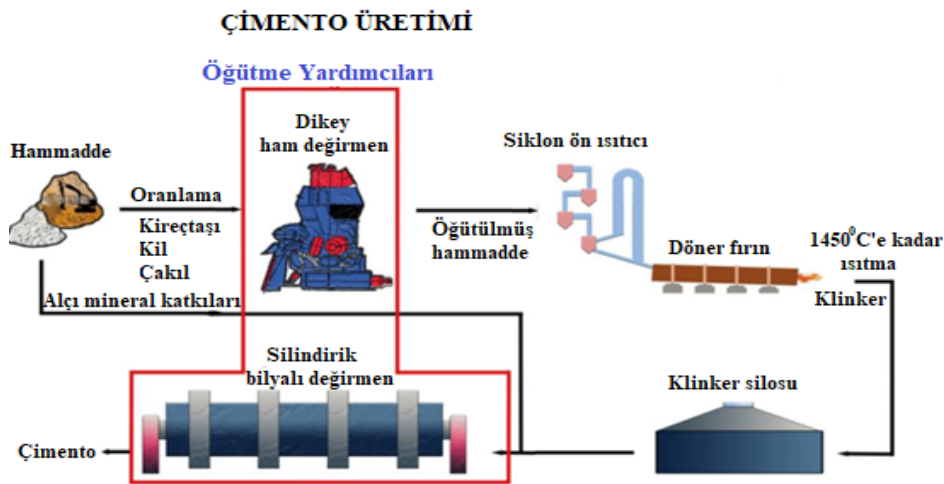
1.1. Çimento Üretimi

Çimento, modern toplumda en temel ve yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olan bir tür toz halindeki hidrolik inorganik bağlayıcı malzemedir. Çimento havada veya suda sertleşebilir ve kum taş gibi malzemeleri birbirine bağlayabilir. En sık görülen ve

kullanılan çimento, portland çimentosu veya sıradan portland çimentosudur. Bu çimento türü, 19. yüzyılın başlarında Joseph Aspdin tarafından icat edilmiştir. 'Portland çimentosu' olarak adlandırılmıştır çünkü özelliği, İngiltere'nin Portland Isle'sinde çıkarılan taş benzemektedir. Modern endüstride portland çimentosunun yapım süreci ıslak işlem, kuru işlem ve yarı kuru işlem olarak ayrılabilir. Günümüzde kuru işlem, enerji tasarrufu ve çevre korumadaki büyük avantajları nedeniyle tüm dünyadaki çimento fabrikaları tarafından yaygın olarak benimsenen en popüler çimento yapım sürecidir (KUB, b.t.).

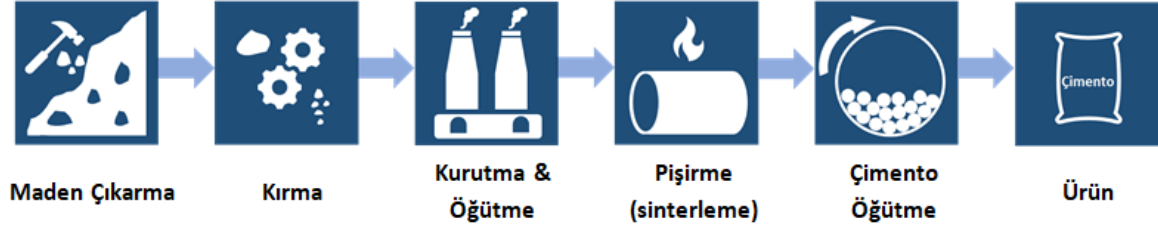
Sıradan Portland çimentosu temel olarak iki bileşen içerir: klinker ve alçı. Portland çimentosunun temel bileşeni olan klinker, esas olarak dört oksitten oluşur: silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitler, bunlar hammaddeler tarafından tedarik edilir. Kireç taşı, şist, marn, kum, kil, demir cevheri vb. klinker üretiminde hammadde olarak kullanılır (Carpio, Francisco, Leandro Dos ve Da Silva, 2008).

Ham maddeler öğütülür, öngörülen oranlarda karıştırılır, homojenleştirilir ve döner fırınlarda yaklaşık 1450 °C'de yakılır. Fırında, toz halindeki ham madde kısmen erir ve oksitler reaksiyona girerek alit (C_3S), belit (C_2S), trikalsiyum alüminat (C_3A) ve ferrit (C_4AF) oluşturur, bunlar klinkerin ana bileşenleridir (Bullard, 2015; Carpio ve diğerleri, 2008; Kang, Lee, Lee ve Moon, 2023). Klinker hızla soğutulur ve istenen fazların hassas oranlarda oluşması kolaylaştırılır (Bullard, 2015; Dolenc ve diğerleri, 2020; Ono, 1981). Klinker öğütülene kadar depolanmak üzere silolara aktarılır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Çimento üretiminin şematik gösterimi (Kalkan, 2023).

Çimento üretim aşamaları sırası ile Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Çimento üretim aşamaları (Cement Plant Supplier, b.t.)

Çimento üretim aşamaları;

- Taş ocağı,
- Ham madde hazırlama,
- Klinker üretimi,
- Mineral ekleme,
- Çimento öğütme,
- Paketleme ve sevkiyat,
- Yakıt hazırlama, başlıkları altında gruplandırılabilir.

Çimento üretim aşamalarından klinker üretimi en temel proses olup dört ayrı şekilde yapılabilmektedir. Aşağıda verilen bu yöntemler aynı zamanda çimento üretim yöntemi olarak da isimlendirilmektedir. Ülkemizdeki tesislerin tamamına yakını kuru işlem üretim prosesine sahiptir.

Kuru-işlem üretim prosesi: Ham maddeler öğütülerek akışkan bir toz haline getirilip kurutulur. Kurutulan bu malzeme ön ısıtıcıya veya ön kalsinasyon fırınına veya doğrudan döner fırına beslenir.

Yarı kuru-işlem üretim prosesi: Toz halindeki ham maddeler, suyla pelet haline getirilerek ızgaralı ön ısıtıcıya veya istavroz ile donatılmış döner fırına beslenir.

Yarı yaş-işlem üretim prosesi: Çimento harcı filtre preste susuzlaştırıldıktan sonra filtre keki pelet haline getirilerek ızgaralı ön ısıtıcıya veya doğrudan bir kurutucuya beslenir.

Çimento öğütme işlemi, çimento kalitesini belirleyen standartların ayarlanmasında önemli bir süreçtir. Mekanik öğütme işlemi, kimyasal ve fiziksel hammadde özellikleri ve çimento formülasyonu gibi farklı alanlardan gelen etkileri birleştirir.



Resim 1.1. Çimento üretiminde öğütmede kullanılan bazı maddeler (Cement Plant Supplier, b.t.)

Çimento üretimi için toplam enerji tüketimi genel olarak 90-113 kWh/t aralığındadır. Çimento üretiminde harcanan toplam enerjinin yaklaşık %71-85'i hammaddelerin boyutlarının küçültülmesi ve kömürün öğütülmesi için kullanılır. Çimentoyu öğütme işlemi tek başına yaklaşık 30-40 kWh/t enerji tüketir (Karakaş, 2006). Üretim prosesinde harcanan enerjinin yarısından fazlası klinkerin ve ham maddenin öğütülmesi için kullanılmaktadır. Sera gazı salımını düşürmek için, öğütmeye harcanan bu enerji miktarının düşürülmesi son derece önemlidir. Bu nedenle öğütme prosesinin verimliliğinin arttırılması dikkate alınması gereken bir konudur.

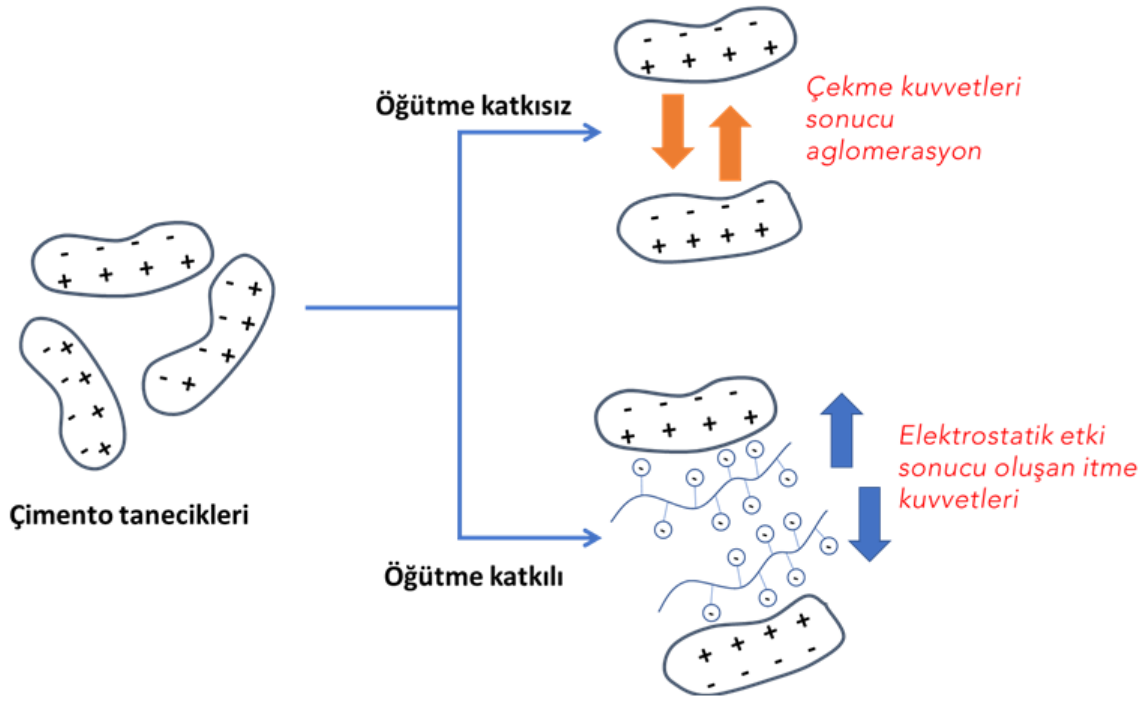
Klinkerin öğütülebilirliğini iyileştirmeden sorumlu olan mekanizmalar fizikokimyasal bakış açısı ile açıklanabilir. Genel olarak; klinker parçacıklarının yüzeyleri, serbest yüzey yüküne yol açan tamamlanmamış yüzey bağları nedeni ile termodinamik olarak dengede

değildir. Tüm sistemlerde olduğu gibi parçacıklar, agregasyon ve yüzeylere tutunma yoluyla oluşan serbest enerjiyi azaltarak dengeye yaklaştırmaya çalışmaktadır.

Öğütme sırasında klinker boyutu küçüldükçe yüzeyin serbest enerjisi artar ve oluşan dengesizlik önemli hale gelir. Bu durum agregasyon ve aglomerasyona yol açar ve değirmenin verimliliğini düşürür. Öğütme kolaylaştırıcı kimyasallar kullanıldığında, organik katkı maddeleri çimento taneciklerinin yüzeyine adsorbe edilir. Bu durum, yüzey yükünü ve enerjiyi azaltırken taneciklerin birbirinden ayrılması için gerekli ortamı sağlar. Ayrıca, çimento parçacıklarının kohezyonu önlenir. Organik katkı maddeleri, çekme kuvvetlerini (Van der Waals) azaltıp, itme kuvvetlerini artırarak çimento tanecikleri arasındaki elektrostatik kuvvetleri değiştirir. Böylece, katkı maddeleri yüzey aktif madde gibi davranır.

Çimento katkı maddeleri; öğütme yardımcıları, dayanım arttırıcılar ve performans arttırıcılar şeklinde farklı ürün gruplarına ayrılmaktadır. Bu etkilerin türü ve büyüklüğü; katkı türü, dozajı, uygulaması, değirmen sistem tasarımı, çimentodan istenen performans özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır.

Öğütme kolaylaştırıcı katkıları: Çimento değirmeninde, verimliliği arttırmak, elektrik enerjisinden tasarruf etmek, maliyeti düşürmek, inceliği iyileştirmek, toz akışkanlığını arttırmak amacıyla öğütme kolaylaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Klinkerin öğütülmesi, kristal yapıda yeni mikro çatlakların oluşmasına yol açar. Kusurlar oluştuğunda, kristallerdeki iyonik bağlar kırılır ve taneler yüksek yüzey enerjisi kazanır. Bunun sonucu olarak, çimento tanelerinin yüzeyinde, birbirleriyle etkileşime girmelerine neden olan ve aglomerasyona yol açan pozitif ve negatif yükler ortaya çıkar (Şekil 1.4). Bu durum, özgül yüzey alanındaki artışı sınırlar ve değirmenin iç kısımlarının çimento tanecikleri ile kaplanarak değirmen performansında düşümlere neden olur. Öğütme kolaylaştırıcı katkıları, çimento partiküllerinin yüzeyine adsorbe olan, yüzey yüklerini nötralize eden ve partiküller arası çekim kuvvetlerine karşı kalkan olarak davranan kimyasallar içerir. Çimento partiküllerinin arasındaki çekim kuvvetlerinin etkilerini azaltarak, partiküllerin biraraya gelmesini (aglomerasyonu) önlemeye yardımcı olurlar. Bu sayede öğütme verimi artar ve separatörden dönüş oranı azalır.



Şekil 1.4. Öğütme kolaylaştırıcı katkıların tanecik yüzeyleri üzerindeki etkisi (Cement Plant Supplier, b.t.)

Dayanım arttırıcı katkıları: Çimentonun her yaştaki mekanik dayanımını, çimentonun özgül yüzey alanını ve partikül boyutu dağılımını değiştirmeden kimyasal aktivasyonla arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu sayede dolaylı yoldan klinker/çimento oranının azaltılması, mineral katkı kullanım oranının artırılması, maliyet optimizasyonu yapılması ve karbon ayak izinin düşürülmesi gibi faydalar sağlamaktadır.

Performans arttırıcı katkıları: CO₂ emisyonlarını ve maliyeti azaltmak, aynı zamanda da bazı performans özelliklerini (hidratasyon ısısı düşürme, nihai dayanım artışı sağlama vb.) geliştirmek için klinker genellikle granüle yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar ve uçucu kül gibi çimento esaslı malzemeler (mineral katkıları) ile ikame edilebilmektedir.

1.1.1. Çimento öğütme prosesi

Öğütme, çimento üretiminin en önemli proseslerinden biridir. Çimento, suyla reaksiyona girebilecek kadar ince olmalıdır. Klinker, alçıtaşı ile karıştırılır ve öğütme değirmeni içinde birlikte öğütülür. Çimento endüstrisinde çeşitli değirmen türleri kullanılır: öğütme ortamı

değirmenleri, silindirli değirmenler, yüksek basınçlı değirmenler, vb. (Kalkan, 2023). Silindirik bilyalı değirmenler, en yaygın kullanılan değirmen tipidir (Singh, 2023).

1.2. Öğütme Yardımcıları

Geçmişte öğütmenin sadece fiziksel bir mekanizma olduğu düşünülüyor ve malzemeler öğütülürken sadece sertlikleri göz önünde bulunduruluyordu. Gelişen teknoloji ile birlikte ihtiyaç haline gelen daha ince malzeme arayışı, öğütme sırasında artan enerji kullanımı, enerjiden kaynaklanan maliyetlerin en aza indirilmek istenmesi, öğütme devrelerinin daha detaylı incelenmesini sağlamıştır. Yapılan çalışmalarda öğütme mekanizmasının sadece fiziksel olmadığı ve bu mekanizmanın doğru birtakım kimyasallarla desteklenmesi gerektiği gerçeğiyle yüzleşilmiştir. Önce sadece su ve su buharı kullanılarak başlanan öğütmelerde istenilen verime ulaşamayınca başka etken madde arayışına gidilmiştir. Geçmişten günümüze kadar yapılan öğütme mekanizmalarını anlama çalışmaları kapsamlı bir şekilde günümüzde de devam etmektedir.

Öğütme yardımcılarının öğütme mekanizmalarına eklenmesi (beslemenin yaklaşık %0,25'ini aşmayacak şekilde), güç tüketiminin azalması ve öğütme verimliliğinin artması anlamına gelir (Klimpel ve Manfroy, 1978; Fuerstenau, 1995). Öğütme proses verimini arttırmak için öğütme yardımcılarının kullanımı, çimento endüstrisinde oldukça yaygındır (Weibel ve Mishra, 2014; Hao, Liu ve Yan, 2017; Altun, Benzer, Toprak ve Enderle, 2015). Birçok alanda kullanılan öğütme yardımcıları, farklı öğütme mekanizmaları için de kullanılabilirler. Öğütme hem ıslak hem de kuru olarak yapılabilir. Mineral zenginleştirmede, ıslak öğütme kuru öğütmeye göre çok daha fazla tercih edilir. Islak öğütme, artan su kıtlığı nedeni ile madencilik faaliyetleri için özellikle kurak bölgelerde bir tehdit oluşturmaktadır. Öğütme yardımcılarının kullanımı, kuru öğütme için çok iyi bir alternatif olmakla beraber, öğütme prosesi içerisindeki akışkanlığı iyileştirmeye yarar. Bu, öğütme işlemi sırasında tüketilen enerjinin fazla olması nedeniyle salınan CO₂ emisyonları gibi çevresel etkileri azaltır (Jeswiet ve Szekeres, 2016).

Öğütme yardımcıları organik (örn. polioller, alkoller, esterler, aminler) ile inorganik (örn. kalsiyum oksit, sodyum silikat, sodyum karbonat, sodyum klorür) kimyasallar olarak ikiye ayrılır (El-Shall ve Somasundaran, 1984; Bhima, Rao, Narasimhan ve Rao, 1991). Öğütme

yardımcılarının çimento endüstrisindeki faydalarına dair deneysel kanıtlara rağmen, etkileri konusunda mutabakata varılmış bir mekanizma yoktur (Weibel ve Mishra, 2014; Hao ve diğerleri, 2017; El-Shall ve Somasundaran, 1984). Ancak, önerilen mekanizmalar esas olarak iki ilkeye dayanır:

- Yüzey enerjisi azalması gibi bireysel parçacık üzerindeki kimyasal-fiziksel etki
- Parçacık düzenlemesi ve malzeme akış özellikleri üzerindeki etki

1.2.1. Organik öğütme yardımcıları

Öğütme prosesi endüstrisinde kullanılan en yaygın organik öğütme yardımcıları, trietanolamin (TEA), triizopropanol amin (TIPA), n-metil-diizopropanolamin (MDIPA), gliserin, polikarboksilat eter (PCE), dietil glikol (DEG) ve propilen glikol bazlıdır (Çizelge 1.1) (Mishra, Weibel, Müller, Heinz ve Flatt, 2017). Bu malzemeler bir dizi farklı işlevsel gruba sahiptir. Ancak, bu işlevsel gruplar ile bunların gözlemlenen etkileri arasındaki ilişki hakkında net bir anlayış yoktur (Mishra ve diğerleri, 2017).

Çizelge 1.1. Literatürde kullanılan organik öğütme yardımcıları

Öğütme Yardımcısı	Islak veya Kuru	Materyal	Literatür
Metanol	-	Kuvarz	(Hasegawa, Kimata, Shimane, Shoji ve Tsuruta, 2000)
Trietanol amin (TEA)	Kuru	Kuvarsit	(Csoke, Racz ve Mucsi, 2010)
	Kuru	Kireçtaşı	(Altun ve diğerleri, 2015)
	Islak	Kasiterit	(Ma ve diğerleri, 2010)
	Kuru	Uçucu kül	(Zhao, Wang, Wang, Liao ve Lin, 2015)
Poliakrilamid (PAM)	Islak	Kasiterit	(Ma ve diğerleri, 2010)

Çizelge 1.1. (devamı)

Triizopropanol amin (TIPA)	Kuru	Uçucu kül	(Zhao ve diğerleri, 2015)
Oleik asit	-	Kireçtaşı-çinko karışımı	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	Islak	Kireçtaşı	(Zheng, Harris ve Somasundaran, 1997)
Stearik asit	-	Kireçtaşı	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Sodyum oleat	-	Kuvars	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	Islak	Kireçtaşı	(Zheng ve diğerleri, 1997)
Kaprilik asit	Kuru	Krom cevheri	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Deniz yağı	Kuru	Krom cevheri	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Poliakrilik asit (PAA)	Islak	Kalsit	(Choi ve diğerleri, 2010)
	Islak	Kireçtaşı	(Zheng ve diğerleri, 1997)
	Kuru	Aşçıtışı	(Öksüzoğlu ve Uçurum, 2016)
Sitrik asit	Islak	Hematit cevheri	(Liang ve diğerleri, 2014)
Sodyum sülfonaftenat	Islak	Kuvars	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Heptanoik asit (HepAc)	Kuru	Kireçtaşı	(Prziwara, Hamilton, Breitung-Faes ve Kwade, 2018)
Amil asetat	-	Kuvars	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Aseton	Kuru	Çimento klinkeri	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)

Çizelge 1.1. (devamı)

Aril-alkil-sülfonik asit (RDA)	-	Grafit	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
--------------------------------	---	--------	----------------------------------

Öğütme yardımcılarının fonksiyonel grupları (-OH, -NH₂) nedeniyle oluşan polaritenin, kırılmış parçacıklar üzerindeki kovalent bağlarla elektrostatik bağlanmaya yol açtığı öne sürülmüştür (Jeknavorian, Barry ve Serafi, 1998). Bu, öğütülmüş parçacıkların kümeleşmesini azaltır ve dolayısıyla öğütme verimliliğini artırır (Dombrowe, Hoffman ve Scheibe, 1982).

Yapılan çalışmalarda asimetrik düzenlemelere sahip polar moleküllerin simetrik düzenlemelere sahip olanlardan daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bu, alkolün (asimetrik) glikollere (simetrik) göre daha iyi öğütme performansı olmasından kaynaklanmaktadır; ancak bu hipotez, aminler ve alkol durumu için geçerliliğini yitirmiştir. Alkol kullanımı kuvarsın öğütülmesinde, özgül yüzey alanının iki katına çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu olay, suda öğütmeye kıyasla daha fazla enerji harcamaktadır (Fuerstenau, 1995). Bu çalışmalar ve sonuçları göz önüne alındığında polar öğütme yardımcılarının, polar olmayanlara kıyasla öğütülebilirliğin iyileştirilmesinde daha etkili olduğu belirlenmiştir (Fuerstenau, 1995). Öğütme yardımcılarının -O- ve -OH fonksiyonel grupları içeren iyonik olmayan bileşiklerle uygulanmasında, çalışma ortamı pH'ı çok önemlidir; bu bileşikler endüstriyel uygulama için pH'a karşı daha az duyarlıdır (Klimpel, 1999).

Tipik olarak, öğütme verimliliği öğütme yardımcılarının moleküler ağırlığındaki artışla birlikte maksimum değere kadar artar ve verimlilik düşer (Ma ve diğerleri, 2010; Lartiges ve Somasundaran, 1992). Ma ve arkadaşları (2010), kasiteritin laboratuvar öğütülmesinde poliakrilamidler (PAM) kullanmışlardır. Yüksek moleküler ağırlıklı PAM'ın, kasiteritin öğütülebilirliğini düşük moleküler ağırlıklı muadillerinden daha fazla iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Zheng ve arkadaşları, kireç taşı öğütme için poliakrilik asit (PAA) kullandıklarında benzer sonuçlara ulaşmışlardır (Zheng ve diğerleri, 1997). Prziwara ve arkadaşları (2018), kireç taşının kuru öğütülmesi için sırasıyla 130,18; 149,19; 102,18 ve 106,12 g/mol mol kütlelerine sahip farklı organik öğütme yardımcıları (heptanoik asit (HepAc), trietanolamin (TEA), 1-Heksanol (HexOH) ve dietilen glikol (DEG))

kullanmışlar ve ürün inceliğinin Karboksilik asit > Aminler > Alkoller > Glikoller sıralamasında azaldığını belirlemişlerdir.

1.2.2. İnorganik öğütme yardımcıları

En yaygın inorganik öğütme yardımcıları Çizelge 1.2'de verilmiştir. Genel olarak, çok değerlikli inorganik tuzların öğütme verimliliğini tek değerlikli olanlardan daha fazla arttırdığı bulunmuştur. Bunun, çok değerlikli iyonların parçacıklar arasındaki elektriksel itmeyi artırma ve dağılmayı destekleme yeteneğinden kaynaklandığı tespit edilmiştir (El-Shall ve Somasundaran, 1984; Somasundaran, 1978).

Çizelge 1.2. Literatürde kullanılan inorganik öğütme yardımcıları

Öğütme Yardımcısı	Islak veya Kuru	Materyal	Literatür
Sodyum hidroksit	Islak	Magnezit	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	Islak	Kireçtaşı	(Zheng, Harris ve Somasundaran, 1996)
	Islak	Demir cevheri	(Vieira ve Peres, 2013)
	-	Krom cevheri	(Routray ve Swain, 2019)
Sodyum silikat	-	Kil	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	Islak	Krom cevheri	(Routray ve Swain, 2019)
Sodyum karbonat	-	Kireçtaşı	(Zheng ve diğerleri, 1997)
Karbondioksit	-	Magnezit	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	-	Dolomit	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	-	Kuvars	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Sodyum klorür	-	Kuvars	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)

Çizelge 1.2.(devamı)

	Islak	Krom cevheri	(Anoshin, Yusupov, Razvorotneva, Tsimbalist ve Solotchina, 1994)
Kalsiyum oksit	Islak	Magnetit cevheri	(Rao, Narasimhan ve Rao, 1991)
	Islak	Demir cevheri	(Melorie ve Raj Kaushal, 2018)
Kalsiyum klorür	Islak	Magnetit cevheri	(Rao ve diğerleri, 1991)
	Islak	Krom cevheri	(Routray ve Swain, 2019)
Aluminyum klorür	-	Karbon siyahı	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	-	Grafit	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	-	Talk	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	Islak	Kalay cevheri	(Ma ve diğerleri, 2010)
	Islak	Krom cevheri	(Anoshin ve diğerleri, 1994)
	Islak	Kömür	(Enustun, Liu, Markuszewski ve Lin, 1987)
Demir sülfat	Islak	Kalay cevheri	(Ma ve diğerleri, 2010)
Bakır sülfat	-	Kalay cevheri	(Yang, 1994)
Amonyum karbonat	-	Vermikulit	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
Sodyum polimetafosfat	-	Kurşun-çinko cevheri	(El-Shall ve Somasundaran, 1984)
	Kuru	Talk	(Diler, 2018)
	-	Kalay cevheri	(Yang, 1994)
	Islak	Demir cevheri	(Melorie ve Raj Kaushal, 2018)

Çizelge 1.2.(devamı)

Islak	Krom cevheri	(Routray ve Swain, 2019)
-------	--------------	--------------------------

1.3.Klinker ve Öğütme İşlemi

Klinker, çimento üretimi sırasında pişmiş kil ve kalkerlerin birleşiminden oluşan iri taneli malzemedir (Resim 1.2). Çimentonun bir önceki safhası olarak adlandırılabilir. Yapısında pişirilmiş biçimde %30 kil ve %70 oranında kalker içerir. Çimento haline getirilmeden önce ağırlıkça %2-6 oranında alçıtaşı ile karıştırılır ve iyice öğütülür. Klinker, çok değişebilen bir malzemedir. Bu nedenle asfalt yapımında kullanılması durumunda uygun şartnameler kullanılır.



Resim 1.2. Klinker

Klinker kendi başına da bağlayıcı özellik gösterir ve su ile reaksiyon vererek hızla donar. Alçı ile öğütülen klinker (çimento) ise daha yavaş donarak betona şekil verilmesine ve kalıplara düzgün yerleştirilmesine fırsat sağlar. Klinkerlin temel yapısını oluşturan bileşikler:

- Trikalsiyum Silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ veya C_3S - Alit) (%50-%70)
- Dikalsiyum Silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ veya C_2S - Belit) (%15-%30)
- Trikalsiyum Aluminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ veya C_3A - Selit) (%5-%10)

- Tetrakalsiyum Alüminoferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ veya C_4AF -Kahverengi Millerit) (%5-%15)

Alit fazı miktarı ve öğü tülebilirlik: Klinkerdeki alit % miktarının artmasıyla iş endeks değeri (kwh/ton) düşmektedir. Bu da bize, öğütme için gerekli enerji miktarının azaldığını gösterir.

Belit fazı miktarı ve öğütülebilirlik: Klinkerdeki belit miktarı %20'nin altında iken öğütülebilirlik için gerekli enerji ihtiyacı belit yüzdesinin artışıyla azalmaktadır. Ancak belit miktarının belli bir oranda bulunması durumunda (%22 civarında) öğütme enerjisi ihtiyacı tekrar yükselmektedir.

Çimento tipleri arasında Portland çimento en önemli yere sahiptir. Portland tipi çimento, klinkerin belirli bir oranda alçıtaşı ile karıştırılarak genellikle bilyalı değirmenlerde öğütülmesiyle üretilmektedir. Bu öğütme işlemi çimentonun üretilmesi için gerekli olan toplam enerji maliyetinin %40'ını oluşturmaktadır. Kalsinasyon için gerekli olan enerji genellikle petrol kuru ile sağlanmaktadır. Soğutucu için gerekli olan mekanik ve termal enerji elektrik ile sağlanmakta ve bu da toplam enerji tüketiminin %20'sini oluşturmaktadır (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3. Çimento üretiminde harcanan enerji (Pagliaro ve Rossi, 2008)

İşlem	KWh/ton
Kırma	1-3
Hammaddenin Öğütülmesi	8-30
Hammaddenin Homojenleştirilmesi	1-2
Pişirme	16-18
Çimentonun Öğütülmesi	30-80

Çizelge 1.3'te görüldüğü gibi çimento üretiminde öğütme, en çok enerjinin harcandığı işlem olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, bu alanda yapılabilecek en ufak bir iyileştirme tüm üretimin maliyetini doğrudan etkilemektedir. Özellikle ülkemizde, pazarda artan yüksek dayanımlı çimento talebini karşılamak amacıyla, daha ince boyutlarda

çimento üretimi yapılması, öğütmenin önemini giderek arttırmaktadır. Öğütme işleminde en büyük sorun, tanelerin birbiriyle olan topaklanma eğilimleri ve buna bağlı olarak öğütme veriminin düşmesidir. Tanelerin topaklanma eğilimini azaltmak için öğütme yardımcılarının kullanılması sıklıkla başvurulmuş bir yöntemdir (Pagliaro ve Rossi, 2008).

Öğütme işlemi, kırılacak malzemenin sistem içerisindeki akışı ve malzemenin kırılması olarak iki ana alt süreçten meydana gelmektedir. Bu süreçler; malzemenin kırılma bölgesine taşınması ve malzeme yüzeyinde çatlak oluşmasıdır.

Çimento öğütme devrelerinde, öğütme yardımcılarının kullanımına 1930'ların ortalarında başlanmıştır. İlk aşamada, değirmene, öğütme yardımcısı olarak kömür eklenmiş; fakat kömürün eklenmesiyle, betonda oluşması istenen hava kabarcıklarının azalması sonucu, betonun donmaya ve çözölmeye karşı gösterdiği direncin düştüğü fark edilmiştir. Daha sonra değirmene, çimentonun kızdırma kaybını arttırmayacak kadar düşük miktarlarda su eklenmiştir. Daha sonraki tecrübeler su gibi polar yapıya sahip öğütme yardımcılarının daha etkili olduğunu göstermiştir. Suyun bu etkilerine rağmen, diğer kimyasallara nazaran düşük polariteye ve moleküler ağırlığa sahip olması, öğütme yardımcısı olarak kullanımını kısıtlamıştır (Sottili ve Padovani, 2001).

Çimento; beton üretimi, yapı malzemeleri imalatı ve çeşitli inşaat projelerinde kullanılır. Klinker, çimentonun temel yapı taşıdır ve çimento üretiminde vazgeçilmez bir bileşendir. Sürdürülebilirlik çabalarıyla, çimento sektörü klinker üretimini daha verimli ve çevre dostu hale getirmek için çalışmaktadır. Çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin benimsenmesi, çimento üretiminde büyük önem taşır. Yenilikçi teknolojiler ve süreç iyileştirmeleri, klinker üretiminin çevresel etkisini azaltmada önemli rol oynar. Bu çabalar, çimento sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkıda bulunur.

Çimento endüstrisinde klinker öğütmek için yaygın olarak havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalıştırılan iki kamaralı bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Son yıllarda, öğütme verimliliğini arttıran yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, dik değirmenler ve horromilller çimento endüstrisinde öğütme işleminde yer almaya başlamıştır.

1.4. Çimento Üretiminde Kullanılan Öğütme Yardımcıları

Dünyada farklı endüstrilerde öğütme birim işleminden yararlanılmaktadır ve günümüzde tüm dünyada üretilen toplam elektrik enerjisinin %5 kadarı öğütmede harcanmaktadır. Yalnızca çimento endüstrisi göz önüne alındığında bu rakam %2'dir (Norholm, 1995). Öğütme, çimento endüstrisinin en fazla enerji tüketen birim işlemidir ve tipik bir çimento fabrikasında harcanan toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %60'lık bir kısmını oluşturmaktadır (Fujimoto, 1993). Öğütme etkinliğindeki küçük bir artışın sağlayacağı ekonomik değer oldukça fazla olmaktadır.

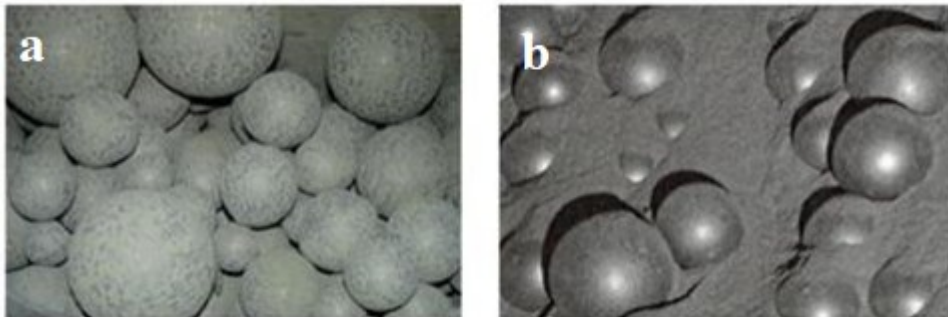
Çimento üretiminde kullanılan öğütme yardımcıları, öğütme hızını arttırarak topaklanmayı engellemektedir. Bunun sonucu olarak kuru maddelerin kullanıldığı kapalı sistemlerde performans artışı sağlamaktadır (Austin, Klimpel ve Luckie, 1984; Toprak, Altun, Aydoğan ve Benzer, 2014). Çimento üretiminde öğütme yardımcısı kullanılmasının avantajları aşağıda verilmiştir:

- Topaklanmanın engellenmesi
- Sistem verimliliğinin arttırılması
- Enerjiden tasarruf sağlanması
- Ürün kalitesinin iyileştirilmesi
- Ürün veriminin arttırılması

Nüfus artışına bağlı olarak artan hammadde ihtiyacının karşılanmasında ve nihai ürüne dönüşüm sürecinde çimento, kağıt, seramik gibi birçok endüstriyel alanda öğütme işlemine harcanan enerji oldukça fazladır. Enerji kaynaklarından maksimum şekilde yararlanabilmek, enerji verimliliğini arttırarak ürün performansını iyileştirmek amacıyla kullanılan öğütme yardımcıları, daha ince ürün elde edilmesine dolayısıyla da ürün verimine bağlı olarak birim ürün için harcanan enerji miktarının azalmasına katkı sağlamaktadır (Rao, 2004). Daha ince öğütülmüş çimento daha büyük bir spesifik yüzeye sahip olur ve dolayısıyla suyla reaktif alan daha büyük olur. Hem ince katkılarla hem de

çakıl ve kum yüzeyleriyle temas iyileştirilir, klinker minerallerinin ilk hidratasyonu kolaylaşır ve hidratasyon ürünlerinin dağılımı hızlandırılır. Optimum çimento özelliklerine ulaşmak istiyorsak spesifik yüzeyin ifade ettiği partikül inceliğinin 2150–2400 cm^2/g aralığında tutulması tavsiye edilir (Svarak, Baker ve Kozdas, 2013) Öğütme yardımcılarının kullanılması, belirli bir kalitede birim ürün başına harcanan enerji miktarını azaltmaktadır. Ürün kalitesi, öğütmenin hedefine bağlı olarak, ürünün inceliğine, yüzey alanına veya serbestleşme derecesine bağlıdır. Bu bakımdan, öğütme yardımcısı, öğütme işleminin veriminin artırılmasına, aynı miktarda daha ince ürün elde edilmesine ya da aynı ürün inceliğinde üretim miktarının artmasına katkıda bulunmaktadır. Öğütme yardımcısı, serbestleşmenin daha düşük enerji tüketimi ile gerçekleşmesini sağlayarak öğütme verimliliğini arttırmaktadır. Başka bir ifade ile, öğütme yardımcıları kullanıldığında, aynı ürün kalitesinde ürün elde edebilmek için harcanan enerji miktarı azalmaktadır (Pilevneli, Kızgut, Toroğlu, Cuhadaroğlu ve Yiğit, 2004). Öğütme proseslerinde kullanılan en yaygın organik öğütme yardımcıları trietanolamin (TEA), triizopropanolamin (TIPA), n-metil-diizopropanolamin (MDIPA), gliserin, poli karboksilat eter (PCE), dietil glikol (DEG) ve propilen glikol esaslı ürünlerdir (Mishra ve diğerleri, 2017).

Yüzeyi öğütülmüş malzeme ile kaplanmış bilyalar, öğütme yardımcısı kullanılması durumunda sistemin minimum enerjili halini göstermektedir Öğütme yardımcısı varlığında bilya yüzeyleri temiz kalarak öğütme verimi artmaktadır (Resim 1.3).



Resim 1.3. a) Öğütme yardımcısının kullanılmadığı durum (çimento taneleri ile kaplanmış bilyalar) b) Öğütme yardımcısının kullanıldığı durum (yüzeyi temiz bilyalar) (Choi, Lee ve Kim, 2009)

1.5. Nanopartiküller ve Sentez Yöntemleri

Nanoboyutlu malzemeler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar son yıllarda tek başına önemli bir alan olma doğrultusunda büyük bir gelişme göstermektedir. Nanoboyutlu malzeme olarak tanımlanan yapılar; nanokristaller, nanopartiküller, nanotüpler, nanoteller, nanoçubuklar veya nano ince filmler gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır. Bu konu üzerine ilginin yoğunlaşmasının temel sebebi maddelerin belli boyut aralığında hacimsel yapılarından farklı olarak olağandışı özellikler ve işlevsellik sergilemeleridir (Goldstain, 1997; Rao, Müller ve Cheetham, 2005).

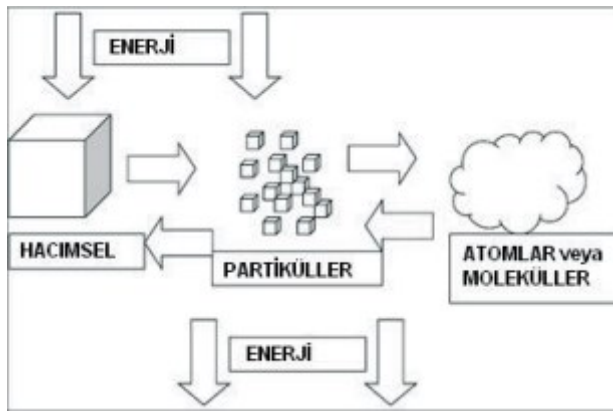
Nanoteknoloji, farklı malzemelerden oluşan nano boyutlu parçacıkların mühendisliği ile ilgili gelişen bir bilim alanıdır (Svendsen, Walker ve Surgeon, 2020; Saleem ve Zaidi, 2020). Nanoteknolojide, yeni büyük ölçekli malzemeler oluşturmak için çok küçük malzeme parçacıkları kendi başlarına veya bir araya getirilerek kullanılır. Nanoteknoloji yeni bir bilim ve yeni bir teknoloji değildir, daha çok yıllardır geliştirilmekte olan bilim ve teknolojilerin bir uzantısıdır. Maddeyi atomik düzeyde kontrol ettiği için nanoteknolojinin anahtarı parçacıkların boyutudur, çünkü malzemelerin özellikleri nanometre ölçeğinde önemli ölçüde etkilenir (Dutta ve Lawson, 2006). Nanomalzemeler, boyutları yaygın olarak 1-100 nm (nanometre) arasında kullanılmasına rağmen, 1-1000 nm arasında oluşan boyuttaki malzemelerdir (Cao, 2004). Nanoyapılı malzemeler, istenen bir özelliği elde etmek için eklenen nanomalzemelerle birlikte geleneksel malzemelerin birleştirilmesidir (Yadav ve diğerleri, 2021).

Günümüzde nanoteknoloji, yapısal sistemlerde ahşap, seramik ve betonda kullanılmaktadır. Nanoteknolojinin sağladığı avantajlar ile mekanik ve fiziksel özellikleri oldukça gelişmiş beton üretmek mümkündür. Nanoteknoloji, aslında sığ bir alan gibi görülen beton içerisine eklendiğinde betonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesini sağlar. Bu malzemeler üzerinde yapılan çok küçük ölçekteki müdahaleler bile bu teknoloji sayesinde beton özelliklerini makro boyutlarda etkileyerek oldukça gelişmiş yapı sistemlerinin inşa edilmesine olanak sağlamaktadır.

Nanopartikül sentezi bu yapıların sergiledikleri olağandışı özellikler sebebiyle yüksek aktiviteli katalizörler, optik uygulamalar için özel teknolojik malzemeler ile birlikte

süperiletkenler, aşınmaya karşı katkılar, yüzey aktif maddeler, ilaç taşıyıcılar ve özel teşhis aletleri gibi birçok teknolojik ve farmakolojik ürünlerin hazırlanmasının yolunu açmıştır. Bunların yanı sıra, malzemelerin nanoboyut seviyesinde kontrolü nanotaşıyıcılar, sensörler, nanomakinalar ve yüksek yoğunluklu veri depolama hücreleri gibi kendine özgü işlevselliğe sahip minyatürleştirilmiş aygıtların gerçekleştirilmesine izin vermektedir (Goldstain, 1997; Liveri, 2006). Açıkça görülmektedir ki, nanoyapılı malzemelerin ve cihazların tasarlanmasını, üretimini ve işlevsel olarak kullanımını kapsayan nanoteknoloji alanındaki yeni gelişmeler için vazgeçilemez ilk adım nanopartiküllerin üretimidir.

Nanoteknolojik malzemelerin çıkış noktasını oluşturan nanopartiküller geniş bir kimyasal aralık ve morfolojide üretilebilirler. Günümüzde çekirdek-kabuk, katkılı, sandviç, boşluklu, küresel, çubuk benzeri ve çok yüzlü gibi farklı morfolojilere sahip metal, metal alaşımı, seramik ve polimer esaslı veya bunların karışımından istenilen özelliklere sahip nanopartiküller hazırlanabilir (Liveri, 2006).



Şekil 1.5. Nanopartikül üretiminde kullanılan yaklaşımlar (Wolfgong, 2007).

Nanopartiküllerin üretiminde kullanılan yöntemler; Şekil 1.5'ten de görülebileceği gibi aşağıdan yukarı "Bottom Up" ve yukarıdan aşağı "Top Down" olarak adlandırılan iki ana yaklaşım altında incelenmektedir.

Yukarıdan aşağıya yaklaşımına dahil olan yöntemlerde hacimsel malzemeye dışarıdan mekaniksel ve/veya kimyasal işlemler ile enerji verilmesi sonucunda malzemenin nano boyuta kadar inebilecek küçük parçalara ayrılması esas alınmaktadır. Yukarıdan aşağıya

yaklaşımı ile çalışan yöntemlere verilebilecek en genel örnekler; mekanik öğütme ve aşındırma olabilir. Bu tekniklerde klasik öğütme işlemlerinden çok daha fazla enerji tüketimi gerçekleştiğinden yüksek enerjili öğütme veya yüksek hız değirmenleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Aşağıdan yukarıya yaklaşımına dahil yöntemler ise; atomik veya moleküler boyuttaki yapıları kimyasal reaksiyonlar ile büyüterek partikül oluşumunun gerçekleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Nanokristalin metal ve alaşımlarının üretiminde kullanılan ilk yöntem olan gaz yoğunlaştırma tekniği aşağıdan yukarıya yaklaşımıyla çalışmaktadır. Kimyasal buhar kaplama, kimyasal buhar yoğunlaştırma, sol jel ve sprey piroliz yöntemleri de bu yaklaşımın en çok bilinen diğer üyeleridir (Wolfgong, 2007; Zaki, 2025). Partikül üretiminde kullanılan yöntemlerin yukarıda açıklanan ayırım dışında fiziksel veya kimyasal temelli olarak da iki ayrı sınıflandırılması mümkündür.

Çimento üretiminde klinker öğütülürken yardımcı kimyasalların kullanılması günümüzün enerji tasarrufu ve üretim verimliliğinde önemli rol oynamaktadır. İnce dağılmış tanecikler içeren giderek artan miktarda klinkeri öğütme zorunluluğunun yanı sıra, sınırlı enerji kaynaklarımız ve artan enerji maliyetleri, bu proses için bir zorluk oluşturmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında çok uzun zamandır öğütme beslemesine öğütme verimliliğini önemli ölçüde arttıracak kimyasal katkı maddeleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Endüstriyel olarak üretilen çimentoların tanecik boyutu genellikle 20-30 µm arasındadır. Çimento tanelerinin ince öğütülmesi yüzey alanını arttıracığından aktifliği; dolayısı ile de hidratasyonu arttırmaktadır. Hidratasyonun artması çimentonun daha yüksek dayanıma ulaşması anlamına gelmektedir. Öğütme yardımcıları çimento sanayinin bu ihtiyaçlarını karşılamak, enerji verimliliği ve alınan ürün inceliğini arttırmak için geliştirilen kimyasallardır. Literatürde katı olarak kullanılan öğütme yardımcılarında bahsedilse de mevcut durumda kullanılan öğütme yardımcıları sıvıdır. Öğütme yardımcısı olarak genellikle Trietanolamin (TEA), Triizopropanolamin (TIPA), Dietilenglikol (DEG), Polikarboksilateter (PCE) esaslı ürünler kullanılmaktadır.

Son yılların en çok çalışılan konularından biri olan nanopartiküller gıda, biyoteknoloji, tekstil, tıp gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Malzemelerin nano ölçekte makro boyuttan çok daha farklı özellik ve davranış göstermesi, nano malzemelerin daha kuvvetli ve daha hafif olması, daha yüksek biyolojik aktivite sergilemesi gibi özelliklerinden dolayı nanoteknolojinin kullanımı da artmıştır. Parça boyutunun incelenmesi birim kütle için yüzey

alanını arttıracğından, malzemenin kimyasal reaktivitesini arttırır (Özdoğan, Demir ve Seventekin, 2006). Geniş yüzey alanına ve yüksek fonksiyonel yoğunluğa sahip olması, malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını arttırması vb. özelliklerinden dolayı nanopartiküller, malzeme özelliklerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, çimentonun performansını ve fonksiyonelliğini arttıracak nanopartiküllerin öğütme yardımcısı olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çimento üretiminde nanomalzemelerin kullanımı ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmaların sayısı oldukça fazladır. Nanoteknoloji, malzemenin özelliklerinin tasarlanmasında, üretim maliyetlerinin düşürülmesinde ve çevre dostu ürünler elde edilmesinde birçok avantaj sağlayan bir bilim dalıdır (Kawashima, Hou, Corr ve Shah, 2013).

2. LİTERATÜR

Öğütme yardımcısı olarak 1960'lara kadar, fosfat, glikoller, amino asetatlar, lignosülfonat, aminler ve asetik asit kullanılmıştır. 1970'lerden sonra ise glikol ve amin bazlı öğütme yardımcılarının kullanılmasının verimi arttırdığı gözlenmiştir. Hidratasyonu ve öğütülebilirliği iyileştirmek ve klinkerdeki topaklanmayı engellemek amacıyla ürün miktarının yaklaşık %0.01-0.02'si kadar öğütme yardımcısı ilave edilmektedir (Lai, Karim, Jamil ve Zain, 2013). Öğütme yardımcısı olarak kullanılan maddelerde genellikle -OH, -NH₂, -COOR, -SO₃ gibi polaritesi yüksek fonksiyonel gruplar bulunmaktadır. Bu gruplar sayesinde topaklanmanın azaldığı, öğütülmüş çimento tanelerinin daha iyi dağıldığı, öğütme veriminin arttığı ve enerji tüketiminin azaldığı belirlenmiştir (Pagliaro ve Rossi, 2008; Jolicoeur ve diğerleri, 2007; Jeknavorian ve diğerleri, 1998).

Öğütme yardımcısı olarak sodyum hidroksit kullanıldığında magnezitin (MgCO₃) öğütme verimliliğinde iyileşme olmuştur. Ancak, aynı şartlar altında dolomit (MgCO₃.CaCO₃) üzerinde hiçbir etki göstermediği görülmüştür. Somasundaran ve Lin, kireç taşının (CaCO₃) sodyum hidroksit ile öğütülmesi üzerine yaptıkları bağımsız araştırmada öğütme verimliliğinin arttığını gözlemlemiştir (Somasundaran ve Lin, 1972).

Kuvarsın öğütme verimliliği üzerinde alüminyum klorürün etkisi farklı pH koşullarında incelenmiş, iyileştirmenin yalnızca asidik ve nötr koşullarda gerçekleştiği tespit edilmiştir (Fuerstenau, 1995). Islak öğütmede kuru öğütme sistemlerine kıyasla gözlemlenen daha iyi öğütme verimliliğini açıklamak için su da bir öğütme yardımcısı olarak değerlendirilmiştir (Fuerstenau, 1995; Somasundaran, 1978). Fuerstenau (1995), ıslak öğütmenin daha iyi öğütme verimliliğine sahip olmasının yüzey enerjisindeki azalmayla bağlantılı olduğunu ileri sürmüştür. Su, öğütme sırasında yastıklama etkisini azaltarak öğütme ortamıyla nemlendirilmemiş çarpışmalara izin verir ve bu da öğütme verimliliğinin artmasına yol açar (Fuerstenau, 1995; Somasundaran, 1978). Bir başka çalışmada, karbon tetraklorür (CCl₄) ve metil-sikloheksan (organik bir öğütme yardımcısı olarak) gibi polar olmayan sıvıların kullanımının, suya kıyasla daha düşük bir incelik verimiyle sonuçlandığı gözlenmiştir. Gözlemlenen çelişkili etkiler, parçacıkların dağılma/flokülasyon etkisi ve sıfır yük noktası ile açıklanabilir; etki ne kadar uzaksa o kadar iyidir (Mallikarjunan, Pai ve Halasyamani, 1965).

Çimento üretiminde kullanılan nanopartiküller, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığını artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak amacıyla son yıllarda önemli bir araştırma konusu olmuştur. Nanoteknolojinin inşaat sektöründeki uygulamaları, özellikle beton ve harçlarda performans artışı sağlamaktadır.

Durgun (2017), nanosilika kullanımının beton özellikleri üzerine etkisini incelemiş, nanosilika kullanımı ile toplam ince malzeme miktarının düştüğünü, betonun mekanik ve elastik özelliklerinde iyileşme olduğunu gözlemlemiştir.

Çimentolu kompozitlerde mikro ve nano mineral katkılarının performanslarının araştırıldığı bir başka çalışmada, karıştırma süresine bağlı olarak çimento performansında iyileştirme sağladığı belirlenmiştir (Faisal, 2019).

Öğütme yardımcılarının çimento öğütme devresi performansı üzerine etkilerinin modellendiği ve simüle edildiği bir çalışmada, öğütme yardımcısı olarak kullanılan maddelerin öğütme karakteristiğini değiştirmediği, oluşan ince taneciklerin bilya ve astar yüzeyindeki topaklanmayı önlediği, buna bağlı olarak da öğütme verimini arttırdığı tespit edilmiştir (Toprak, 2015).

Literatürde bütün öğütme yardımcılarının çalışma mekanizmasının çimento tenecikleri yüzeyine adsorplanmasına dayandırılmaktadır. Ayrıca yapılan araştırmalar incelendiğinde bu adsorbsiyonun yüzey enerjisi ile ilişkilendirildiği görülmektedir.

Öğütme etkisinin, soğrulma gücüne bağlı olup olmadığını açıklığa kavuşturmak için klinker yüzeyindeki çeşitli öğütme yardımcısı bileşiklerin soğrulma enerjileri belirlenmiştir. Bütün Öğütme yardımcıları klinkeri oluşturan C3S yüzeyi tarafından soğurulmaktadır. Yapılan çalışmalarda C3S yüzeyine soğrulma enerjilerinin sıralaması TEA<TIPA<MDIPA<Gliserin şeklindeyken, klinkerin öğütme verimliliklerinin sırası gliserin<TEA<TIPA<MDIPA şeklindedir. Klinker ile yapılan öğütme testlerinde farklı Blain ve bakiye (32 µm) değerleri 27 elde edilmiştir. Öğütme üzerinde en zayıf etkiyi gliserin gösterirken, en etkili metil diaisopropanolamin (MDIPA) olmuştur. Soğrulma enerjileri ile öğütme verimlilikleri arasında bir ilişki yoktur. Öğütme verimliliği diğer parametrelere bağlıdır (Mishra, Fernandez-Carrasco, Flatt ve Heinz, 2014).

Literatür çalışmalarına bakıldığında nanopartiküller ile yapılan çalışmalarda nano boyutta temin edilen minerallerin (TiO_2 , ZnO , AgNO_3 , CuO vb.)'in çimento üretiminde öğütme yardımcısı olarak kullanıldığı durumların beton veya çimento performansı üzerine etkilerinin incelendiği çalışmaların olduğu görülmektedir (Pekmezci ve Atahan, 2014). Öğütme yardımcısı olarak kullanılabilir polimer bazlı maddelerin nano boyuta getirilerek çimentonun öğütülmesinde kullanılması ile ilgili literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bağlamda, yapılan çalışma, yapı malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesi noktasında nanopolimerlerin kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, hiç öğütme yardımcısı kullanılmadan, endüstriyel olarak kullanılan bir öğütme yardımcısı ve nanoteknolojik gelişmelerden yararlanılarak hazırlanan öğütme yardımcısının performans değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde laboratuvar koşullarında farklı kombinasyonlar hazırlanarak, karşılaştırmalı olarak karıştırmalı bilyalı değirmen kullanarak öğütme yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda hata payını en aza indirmek için tüm koşullar sabit tutulmuştur. Yapılan öğütmeler sadece tek seferle sınırlandırılmamış, uygun öğütme koşullarının belirlenmesi için birçok öğütme denemesi yapılarak eklenecek kimyasalın miktarı bu süreçte belirlenmiştir. Yapılan öğütmelerde öğütme mekanizmasının etkileri ve performansa etki eden etkenlerin ayrıntılı değerlendirmesi yapılmıştır. Öğütme mekanizmasının tam olarak anlaşılabilmesi için her deney birçok kez tekrar edilmiştir. Öğütme sonrasında numunelerin tanecik boyutları ölçülerek en iyi tanecik boyutuna sahip kombinasyon belirlenmiştir.

3. YÖNTEM

Çimento öğütme devrelerinde yapılan en küçük değişiklik birçok parametrenin birden değişmesine yol açmaktadır. Endüstriyel ortamlarda bu değişkenleri kontrol etmek oldukça zordur. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde endüstriyel ortamlar göz önüne alınarak tek değişken üzerinde durulmuştur. Laboratuvar ortamında sentezlenen nano partiküllerin testleri yapıldıktan sonra, formülize edilen öğütme yardımcısına eklenmiştir. Öğütme yardımcıları eklendiğinde öğütme performansındaki artış ve öğütülen klinkerin inceliği karşılaştırmalı olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonunda nihai ürünün performans değerlendirmesi için TSE standartlarına uygun deneyler yapılmış ve sonuçları kaydedilmiştir.

3.1. Materyal

Deneylerde kullanılan klinker, uygun tane boyutuna getirilerek laboratuvar ortamında öğütülmüştür. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak yüksek molekül ağırlıklı kullanılan polikarboksilat eter (PCE), %50 derişimde AYDOS Kimya San. Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. pH ayarlamada kullanılan NaOH ve nanopartikül sentezinde kullanılan AgNO_3 analitik saflıktadır.

3.2. Kullanılan Cihaz ve Aletler

Bu bölümde, gümüş nanopartiküllerinin sentezi ve çimento öğütme sürecinde kullanılan temel cihaz ve ekipmanlar tanıtılmıştır. Her bir cihazın deneydeki işlevi ve kullanım amacı kısaca açıklanmıştır.

3.2.1. Santrifüj cihazı ve etüv

Numunelerin sabit sıcaklıkta inkübasyonu için Nüve N 500 model etüv (Resim 3.1a), çöktürülmesi ve faz ayırım işlemleri için Hermle ZZ06A model (Resim 3.1b) santrifüj cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.1. a) Etüv b) Santrifüj cihazı

3.2.2. Laboratuvar tipi bıçaklı değirmen

LB 160 Değirmen (Resim 3.2), klinker numunelerinin ön öğütme işlemi için kullanılmıştır. Hızlı ve kontrollü kırma işlemi sayesinde istenilen tane boyutuna uygun öğütme sağlanmıştır.



Resim 3.2. Bıçaklı değirmen

3.2.3. Dikey karıştırma bilyalı değirmen

Numunelerin daha ince boyuta getirilmesi amacıyla uzun süreli ve düşük hızda öğütme işlemleri için tercih edilmiştir. Özel yapım olması nedeniyle öğütme koşulları deney ihtiyacına göre ayarlanabilmiştir (Resim 3.3).



Resim 3.3. a) Cihaz karıştırma mili b) Cihaz paneli

3.2.4. Blaine cihazı

Öğütülmüş numunelerin özgül yüzey alanlarının belirlenmesinde CM BL 101 model Blaine cihazı (Resim 3.4) kullanılmıştır. TS EN 196-6 standardına uygun ölçümler yapılmıştır.



Resim 3.4. Otomatik Blaine cihazı

3.2.5. Otomatik basınç pres cihazı

XRD analizleri için numune peletlerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. Sabit kuvvet altında yüksek yoğunlukta ve düzgün yüzeyli tabletler hazırlanmıştır. Beton test presi ile; basma mukavemeti testleri, eğilme ve yarıma testleri, çimento basınç testleri ve karot testi yapılmaktadır.

3.2.6. Çimento yayılma tablası

Çimento yayılma tablası (Resim 3.5), harç, kireç, çimento numunelerinin yayılma çapının belirlenmesinde kullanılmıştır (TS EN 1015-3). Numune hazırlığı için; çimento harcı, 450 g çimento ve 225 g su kullanılarak karıştırılmıştır. Standart kum eklenmeden yalnızca çimento-su karışımı kullanılmıştır. Karışım, laboratuvar tipi çimento karıştırıcısı ile belirli süre ve hızda karıştırılmıştır. Elde edilen harç, 70 mm üst çap, 100 mm alt çap ve 60 mm yükseklik ölçülerine sahip konik kalıba yerleştirilmiştir. Kalıp üzerine yerleştirilen çimento harcı, belirli bir süre sarsılmadan bekletilmiştir. Kalıp, dikkatlice kaldırılarak çimento harcının yayılma çapı ölçülmüştür. Çimento harcının akışkanlık seviyesini temsil eden yayılma çapı, 5 nokta ölçümü ile belirlenmiştir.



Resim 3.5. Çimento yayılma tablası

3.2.7. Lazerli tane dağılımı tespit cihazı

Zetasizer Nano serisi lazerli tane dağılımı tespit cihazı (Resim 3.6), öğütülmüş numunelerin partikül boyutu dağılımının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Analiz,

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Beton Laboratuvarı'nda bulunan Malvern Pananalytical marka MAL 1123620 Model cihaz ile yapılmıştır. Cihaz, sıvı ortamdaki parçacıkların veya moleküllerin partikül boyutu, zeta potansiyeli ve molekül ağırlığını ölçmede kullanılmaktadır. İzoelektrik nokta belirleme analizi ile farklı pH'larda ölçülen zeta potansiyeli değerleri göz önünde bulundurularak kolloidal sistemin en az kararlı olduğu nokta belirlenir.



Resim 3.6. Parçacık boyutu ölçüm cihazı

3.2.8. UV-Vis Spektrofotometre

Sentezlenen gümüş nanaopartikülün 200–800 nm dalga boyu aralığındaki maksimum absorbans yaptığı dalga boyunun belirlenmesinde kullanılmıştır. Spektroskopik analizler için Amasya Üniversitesi Suluova Meslek Yüksekokulu Enstrümantal Analiz Laboratuvarı'nda bulunan Thermo scientific Genesys 10 s UV-Vis Spektrofotometre (Resim 3.7) kullanılmıştır.



Resim 3.7. UV-Vis Spektrofotometr

3.3. Deneysel Prosedür

Bu bölümde, çalışmada kullanılan yöntemler, deneyin aşamaları ve uygulanan işlemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Tüm deneyler, sabit laboratuvar koşullarında ve belirlenen protokole uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Çimento harcının eğilme ve basınç dayanımı tayini

Bu çalışmada çimento harçlarının mekanik dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla TS EN 196-1 standardına uygun olarak eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlığı için; 450 g çimento, 1350 g standart kum ve 225 g su kullanılarak standart karışım oranlarına göre hazırlanmıştır (TS EN 196-1, 2016). Karışım, otomatik harç karıştırıcısı ile ilgili standartta tanımlanan süre ve hızda karıştırılmıştır. Elde edilen harç, 40×40×160 mm ebatlarındaki TSE standart prizma kalıplarına yerleştirilmiş ve sarsma tablası üzerinde kompakte edilmiştir. Kalıplar, 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve %95 bağıl nemde 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve kür tankına (20 ± 1 °C, kireçli su) alınarak 2, 7 ve 28 gün boyunca kürlenmiştir (TS EN 196-1, 2016).

3.3.2. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyleri, TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmış prizma şeklindeki çimento harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, katkı malzemelerinin çimentonun mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir.

- Kür süresi tamamlanan numuneler, çift destekli eğilme düzeneği yardımıyla üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur.
- Deney, 50 ± 10 N/s'lik yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-1, 2016).
- Her prizma numunesi iki eşit parçaya kırılarak basınç dayanımı deneyi için kullanılmıştır.
- Elde edilen eğilme dayanımı (R_f) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$R_f = 1.5 \cdot F \cdot l_b \cdot d^2 \quad R_f = \frac{1.5 \cdot F \cdot l_b}{d^2} \quad (1)$$

Burada:

- FF: Kırılma yükü (N),
- ll: Destekler arası mesafe (mm),
- bb, dd: Numune kesit boyutları (mm)

3.3.3. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme testinden elde edilen her prizmanın iki parçası, 40×40 mm yüzeyleri üzerine yerleştirilerek basınç testine tabi tutulmuştur.

Deney, otomatik basınç dayanımı cihazı ile gerçekleştirilmiş ve yükleme hızı 2400 ± 200 N/s olacak şekilde ayarlanmıştır (TS EN 196-1, 2016).

Deney sonucunda elde edilen maksimum yük (N), aşağıdaki formül ile basınç dayanımı (R_c) olarak hesaplanmıştır:

$$R_c = F/A \quad (2)$$

Burada:

- FF: Kırılma yükü (N),
- AA: Yüzey alanı (1600 mm²)
- Her kür süresi için üç ayrı prizma numunesi test edilmiş ve ortalama dayanım değerleri elde edilmiştir.

3.3.4. Klinkerin temin edilmesi ve öğütme işlemi için hazırlanması

Tez çalışması kapsamında kullanılan klinker (150 kg) Adoçim Çimento Beton San. ve Tic. A.Ş.'nin Tokat Artova'da Entegre Çimento Fabrikasından temin edildi (Resim 3.8).

Klinkerin öğütme işlemi için hazırlanması ile ilgili yapılan çalışmalar Amasya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Malzeme ve Beton Laboratuvarında gerçekleştirildi.



Resim 3.8. Temin edilen klinker (Ham hal)

3.3.5. Polikarboksilat bazlı gümüş nanopartiküllerin sentezi

Polikarboksilat (PCE), çimento esaslı malzemelerde çok yüksek oranda karışım suyunu azaltan ve yüksek akışkanlık özelliği kazandıran, süper akışkanlaştırıcılara göre çok daha düşük oranlarda kullanılan, toz formunda, polikarboksilat esaslı bir hiper akışkanlaştırıcıdır (Gödek, Felekoğlu ve Felekoğlu, 2015). Bu çalışma için gerekli olan yardımcı kimyasallar ve PCE %50'lik çözelti halinde AYDOS Kimya San. Tic. A.Ş. den temin edilmiştir. AgNO_3 kullanarak PCE'nin nano boyuta getirilmesi çalışmaları Amasya Üniversitesi Suluova MYO Kimyasal Analiz Laboratuvarında gerçekleştirildi. Farklı konsantrasyonlarda (0,05; 0,1 ve 0,01 M) hazırlanan AgNO_3 çözeltileri 1:1 ve 1:2 (PCE: AgNO_3) oranında PCE (%50'lik) ile karıştırıldı (Bulut, 2007). Hazırlanan karışımlar 800 rpm'de, 40°C'de 1 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı.

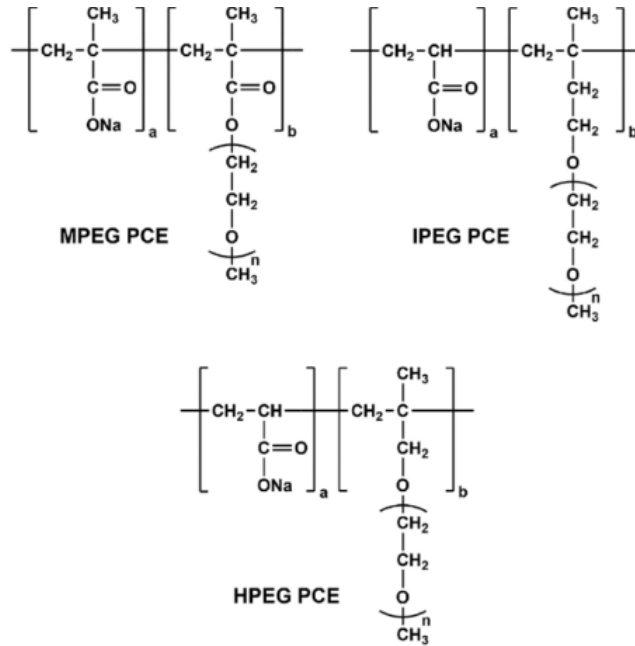
Gümüş nanopartiküllerin sentezinde reaksiyonun tamamen tamamlanması ve gümüş nanopartiküllerin tamamen oluşması amacıyla çözeltiler 1 hafta karanlıkta inkübasyona bırakıldı. Süre sonunda 0,1 M AgNO_3 kullanılarak 1:2 PCE: AgNO_3 ile hazırlanan PCE- AgNPs 'in miktarının daha fazla olduğu gözlemlendi. Karışım, 5000 rpm'de 1 saat santrifüj edildi (Resim 3.9a), elde edilen katı partiküller saf su ile yıkandıktan sonra 80°C'de etüvde kurumaya bırakıldı (Şekil 3.9b).



Resim 3.9. a) PCE-AgNPs'in santrifüjlenmesi b) PCE-AgNPs'in kurutulması

3.3.6. PCE-AgNp Mekanizması

PCE, iyonik karboksilat grupları ve non-iyonik PEG yan zincirlerinden oluşan tarak tipi bir kopolimerdir (Şekil 3.1).



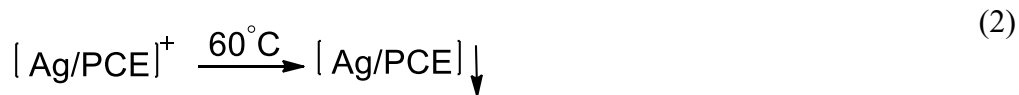
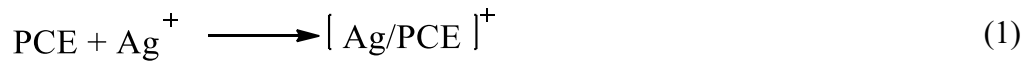
Şekil 3.1. PCE moleküler yapı (Zingg 2008).

PCE, çok dallı bir polimer olup, ana zincirinde karboksil grupları (-COOH) ve yan zincirlerde polietilen glikol (PEG) segmentleri bulundurulur. Çimento taneciklerinin yüzeyine karboksil grupları ile adsorbe olur. PEG zincirleri sayesinde sterik engelleme etkisi oluşturur; bu da taneciklerin birbirine yapışmasını önler dispersiyon artar, viskozite azalır.

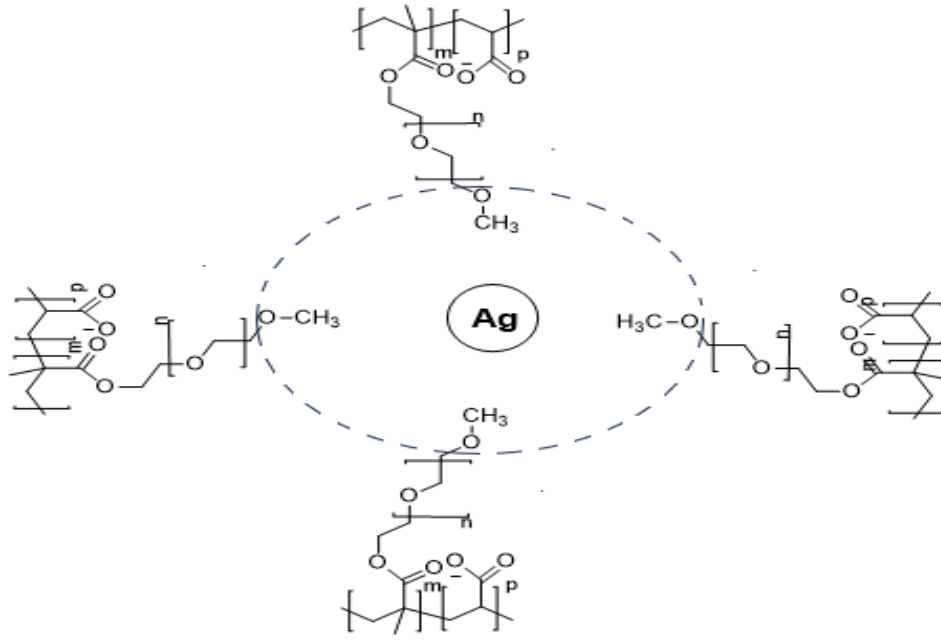
Gümüş Nanopartiküllerin (AgNPs) Özellikleri:

- Yüksek yüzey alanına sahip olan AgNP'ler, çimento parçacıkları arasına yerleşerek fiziksel bir ayırıcı bariyer görevi görür.
- Yüzey plazmon rezonansı nedeniyle elektron transferi süreçlerine etki ederek çimento hidrasyonunu etkileyebilir.
- Ag^+ , çimento sisteminde alkali ortamda stabil kalır ve belirli iyonlarla (özellikle OH^-) reaksiyonlara girebilir.

Çalışmada önce PCE ile Ag^+ iyonu reaksiyona sokularak metalkopolimer $[Ag/PCE]^+$ (Eşitlik 1) oluşturuldu. Bu metalkopolimer, Ag/PCE nanokompozitleri oluşturmak için $60^\circ C$ 'lik sıcaklıkta karıştırıldı (Eşitlik 2). Bu işlemde, Ag^+ iyonlarının PCE-AgNPs oluşturmak için Ag^0 'a indirgenmesi sağlandı (Ahmad, M. B., Tay, M. Y., Shameli, K., Hussein, M. Z. ve Lim, J. J., 2011).



PCE molekülleri ile gümüş nanopartiküllerin oluşumuna yönelik önerilen mekanizma Şekil 3.2'de verilmiştir (Bettini, S., Pagano, R., Valli, L. ve Giancane, G. 2014).



Şekil 3.2. Ag nanoagregatlarının PCE molekülü ile kapatılma mekanizmasının şematik gösterimi

3.3.7. Numunelerin öğütme performansı analizleri ve nihai ürün testleri

Gümüş nanopolikarboksilat ve gümüş nanopoliakrilat esaslı öğütme yardımcılarının öğütme performanslarının belirlenmesinde çimento özgül yüzey alanı testi (Blaine Testi) uygulandı. Özgül yüzey alanı testi Blaine cihazında TSEN 196-6'ya göre gerçekleştirildi. Öğütme performansı yüksek olan karışımla öğütülmüş klinkerin TSEN 197-1 standardında bulunan çimento testleri yapıldı.

4. BULGULAR

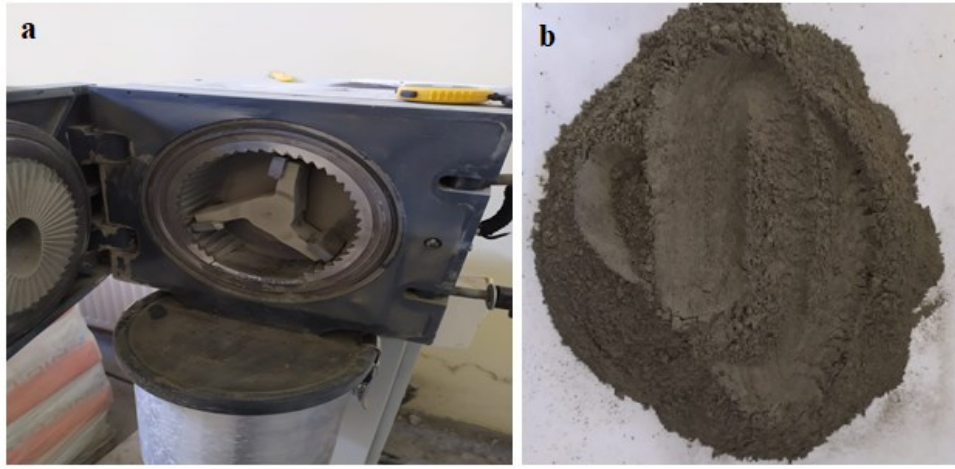
Bu bölümde, gümüş nanopartikülleri içeren polimer katkısının çimento öğütme performansına etkileri nicel verilerle sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, partikül boyutu dağılımı, özgül yüzey alanı ve öğütme verimliliği açısından değerlendirilmiş ve kontrol grubu ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Klinkerin Öğütme İşlemi İçin Hazırlanması

Ham klinker öncelikle elle kırılarak (Resim 4.1) daha sonra da bıçaklı değirmen yardımıyla 300 mikron tanecik boyutuna getirilip öğütme işlemi için hazırlanmıştır (Resim 4.2). Ön öğütme işlemine tabi tutulan klinkerin karıştırılmalı-bilyeli (atritör) değirmende şahit numune denemeleri yapılmıştır.



Resim 4.1. Klinkerin el ile kırılıp tanecik boyutunun küçültülmesi

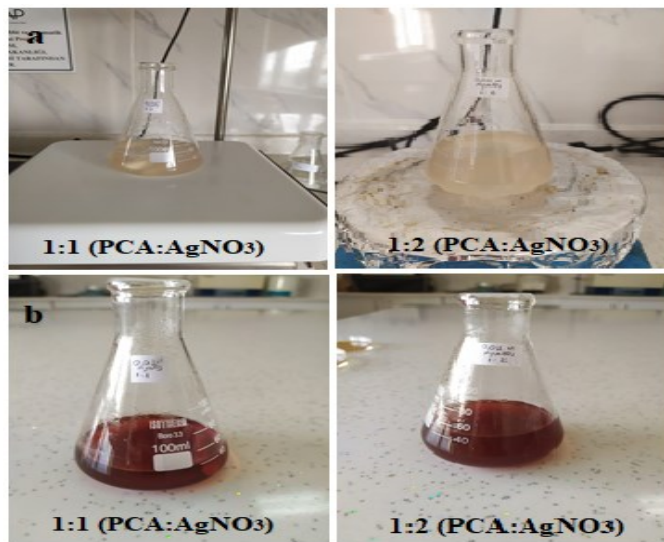


Resim 4.2. a) Bıçaklı değirmen b) Tanecik boyutu 300 mikrona getirilen klinker

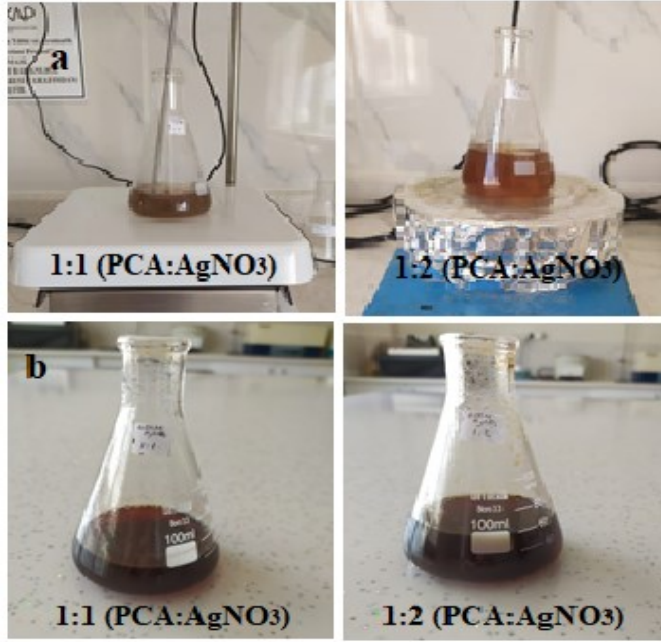
Yapılan işlemlerle, klinker, öğütme işlemi için hazır hale getirilmiştir.

4.2. Polikarboksilat Bazlı Gümüş Nanopartiküllerin Sentezlenmesi

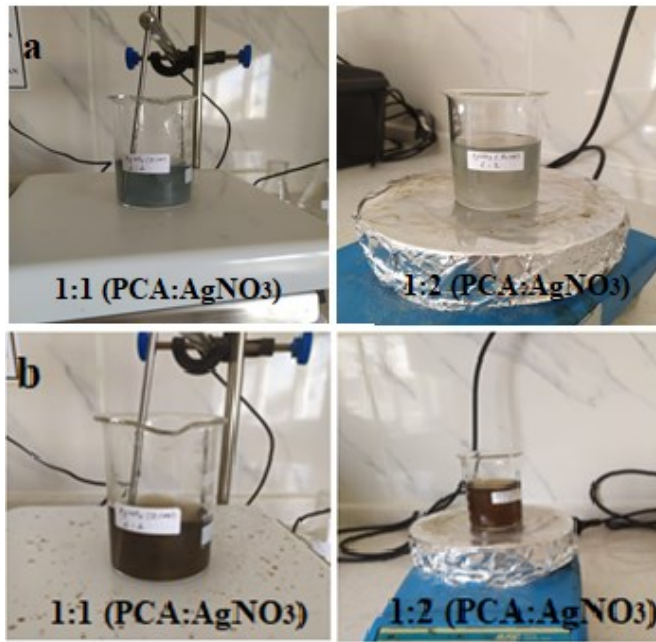
Nanopartikül oluşumunun bir belirtisi olan renk değişimi karıştırma işleminin ilk dakikalarında gerçekleşti. Süre sonunda ise rengin kahverengiye dönüştüğü gözlemlendi (Resim 4.3-4.5). Bu renk değişimi ile bir redoks reaksiyonunun oluşumu doğrulanmıştır. Redoks reaksiyonu sonucunda Ag^+ iyonları oksidasyona uğrayan PCA tarafından Ag^0 'a indirgenir.



Resim 4.3. 0,01 M AgNO_3 kullanılarak hazırlanan numuneler a) Başlangıç b) 1 saat sonra



Resim 4.4. 0,05 M AgNO_3 kullanılarak hazırlanan numuneler a) Başlangıç b) 1 saat sonra



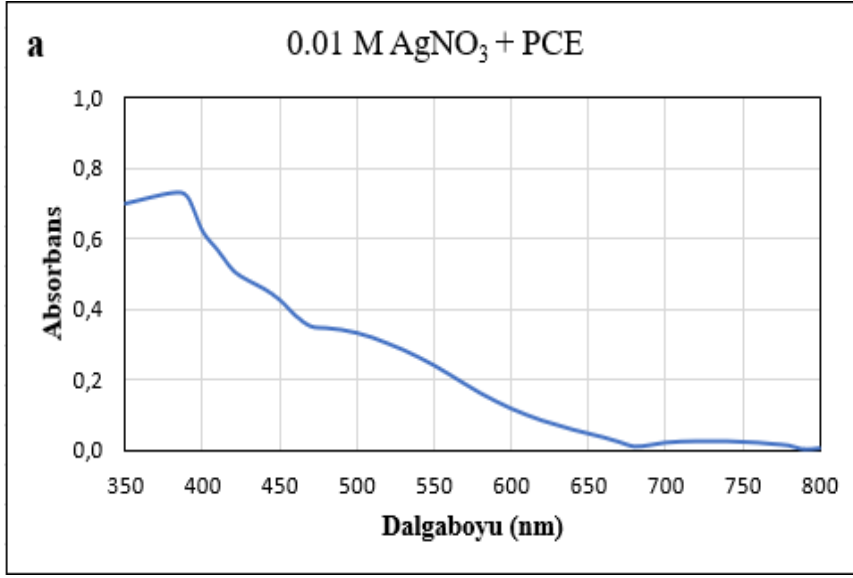
Resim 4.5. 0,1 M AgNO_3 kullanılarak hazırlanan numuneler a) Başlangıç b) 1 saat sonra

4.3. Sentezlenen PCE-AgNPs'in Karakterizasyonu

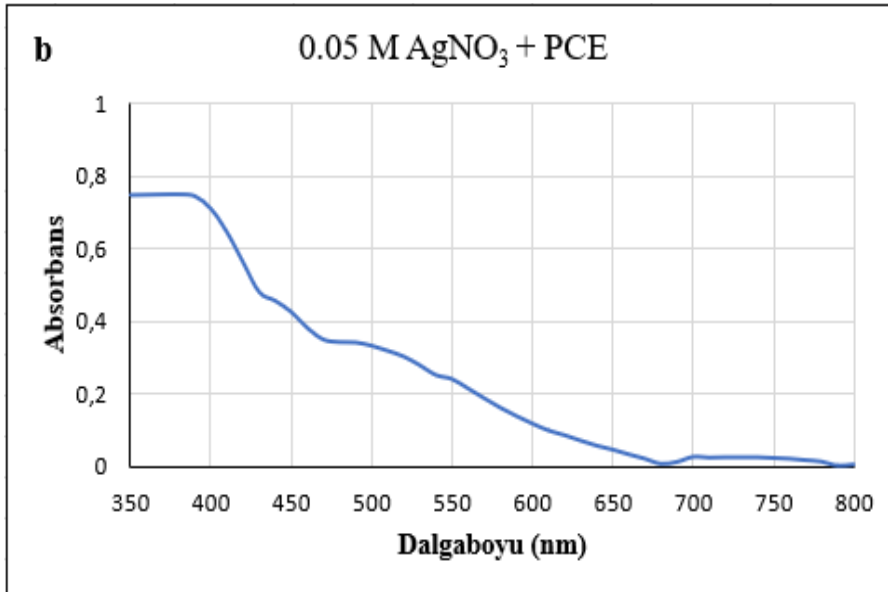
Gümüş nanopartikül sentezinin gerçekleştiği UV-VIS spektrumu ile de doğrulanmıştır. UV-VIS spektrumunda 450 nm'de meydana gelen tepe PCE ile oluşturulan gümüş nanopartiküllerin (PCE-AgNPs) varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 4.3).

Renk değişikliklerinin yüzey plazmon rezonansının (SPR) gümüş nanopartikülleri uyarmasından kaynaklandığı bilinmektedir. UV-spektrumundaki SPR bandının konumu parçacığın şekline, büyüklüğüne, ortam ile olan etkileşimine, lokal kırılma indisine ve ortam ile parçacıklar arasındaki yük aktarımının derecesine duyarlıdır (Vijay Kumar, Pammi, Kollui Satyanarayana ve Shameem, 2014). Gümüş nanopartiküllerin kahverengimsi tonu 450 nm dalga boyunda metal nanopartiküllerde bulunan SPR bandındaki titreşimler nedeniyle ortaya çıkmaktadır (Tripathi ve diğerleri, 2017).

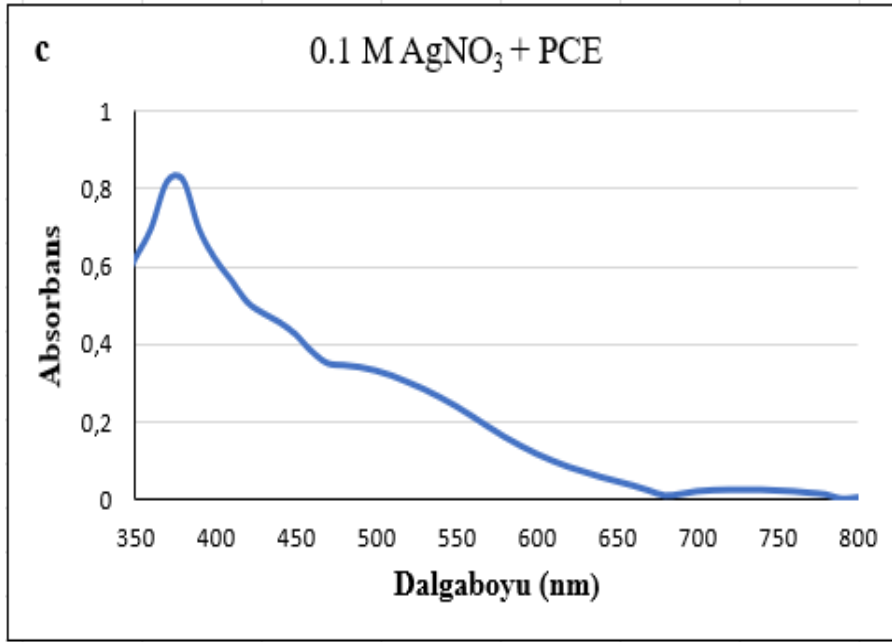
Aşağıdaki spektrumlar, farklı konsantrasyonlarda (0,01 M, 0,05 M ve 0,1 M) hazırlanan AgNP'lerin UV-Vis analiz sonuçlarını göstermektedir. 0,01 M (Şekil4.1) ve 0,05 M(Şekil4.2) konsantrasyonlarında, gümüş nanoparçacıkların karakteristik yüzey plazmon rezonans (SPR) piki olan 400–420 nm aralığında belirgin bir pik gözlemlenmemiştir. Bu durum, düşük konsantrasyonlarda yeterli miktarda AgNP oluşmadığını ya da oluşan partiküllerin optik özelliklerinin tespiti için yetersiz kaldığını düşündürmektedir. Buna karşın, 0,1 M (Şekil4.3) konsantrasyonunda yapılan sentezde, 420 nm civarında belirgin bir SPR piki görülmüş ve bu da başarılı bir nanoparçacık oluşumunu göstermiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında 0,1 M konsantrasyonu ile devam edilmiştir.



Şekil 4.1. 0,01M PCE+AgNP UV Spektrumu.



Şekil 4.2. 0,05M PCE+AgNP UV Spektrumu



Şekil 4.3. 0,1M PCE+AgNP UV Spektrumu

4.4. Numunelerin Öğütme Performansı Analizleri

Deney için cihaza 14 kg farklı çaplarda bilyeler yerleştirildi (Resim 4.6). Deney hassasiyeti için bilyeler her deneyde yıkanıp kurutuldu. Deneyde kullanılan klinker önceden bıçaklı değirmende 300 mikron boyutunda öğütüldü. Deney iki aşamada gerçekleştirildi. Öncelikle tek başına hiçbir müdahale de bulunulmayan klinker şahit olarak öğütüldü. İkinci aşamada ise cihaza nebülizatör yardımı ile soğuk buhar verilerek aynı miktarda klinker öğütüldü, bilyeler ve karıştırıcı mil üzerindeki malzeme birikimi gözlemlenerek kayıp malzeme tespiti yapıldı.



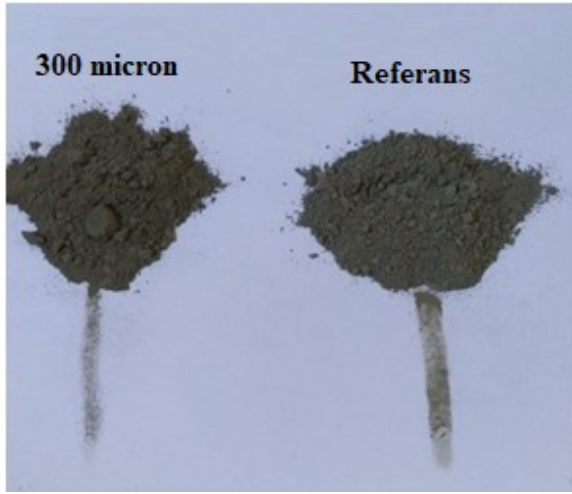
Resim 4.6. Bilyeler

300 mikrona öğütülen klinkerden 1,5 kg tartıldı. Cihaz 212 rpm devir ve 12 dakika süreye ayarlanarak besleme kanalından klinker sisteme beslendi. 12 dakika sonunda cihazın dış çepher sıcaklığı 23,5°C olarak ölçüldü. Cihaz içerisinden alınan malzemenin sıcaklığı 32°C olarak ölçülürken, cihazdan alınan malzeme 1483 gr olarak tartıldı. Karıştırma mili ve bilyeler üzerinde malzeme birikimi olduğu gözlemlendi (Resim 4.7a ve 4.7b). Mildeki malzeme tartıldığında 10 gr olarak kaydedildi. Geriye kalan malzeme bilyeler üzerinde kalan malzemeyi göstermektedir.



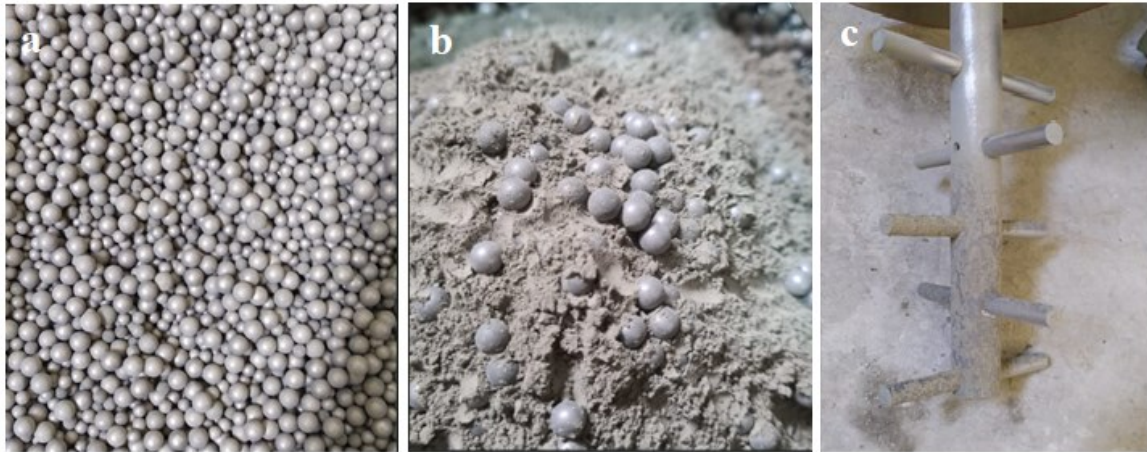
Resim 4.7. a) Öğütme sonrası karıştırma mili b) Öğütme sonrası bilyeler

Resim 4.8’de görüldüğü gibi 300 mikron ve 212 rpm de 12 dakika öğütülen referans klinker numunesinden beyaz bir kağıt üzerine alınmış parmak ucuyla bastırılarak her iki malzemede aşağıya doğru çekilmiştir. Fazlalıklar temizlendiğinde geriye kalan izin daha belirgin olması kağıt üzerinde gözle görülemeyen boşluklara daha fazla malzeme girdiğini dolayısı ile bu malzemenin tane boyutunun diğer az iz bırakan malzemeye göre daha küçük tanecik boyutuna sahip olduğu konusunda fikir vermektedir.



Resim 4.8. Öğütmeden önceki ve sonraki malzeme

Deneyin ikinci kısmında 300 mikrona öğütülen klinkerden 1,5 kg tartıldı. Cihaz 212 rpm devir ve 12 dakika süreye ayarlanarak besleme kanalından klinker sisteme beslendi. 12 dakika sonunda cihazın dış çepher sıcaklığı 25,9°C olarak ölçüldü. Cihaz içerisinden alınan malzeme sıcaklığı 33,4°C, cihazdan alınan malzeme 1488 gr olarak tartıldı. Karıştırma mili ve bilyeler üzerinde malzeme birikimi gözlemlendi (Resim 4.9b-c). Mildeki malzemenin 8 gr olduğu, geriye kalan malzemenin bilyeler üzerinde kaldığı belirlendi.



Resim 4.9. a) Deney öncesi yıkanarak temizlenmiş bilyeler b) Öğütme sonrasında bilyelerin görüntüsü c) Öğütme sonrası karıştırma mili

Su buharı verilerek yapılan öğütmede bilyelerin çepherlerin de az miktarda klinker kaldığı ve bilyelerin parlaklığının nispeten korunduğu gözlemlendi (Resim 4.9b).

Şimdiye kadar yapılan öğütme performansı analizleri şahit klinker ve su buharı verilen klinker ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, gümüş nanopartikülleri içeren Polikarboksilateter (PCE-AgNPs) bazlı katkının performans incelemesi değerlendirilmiştir.

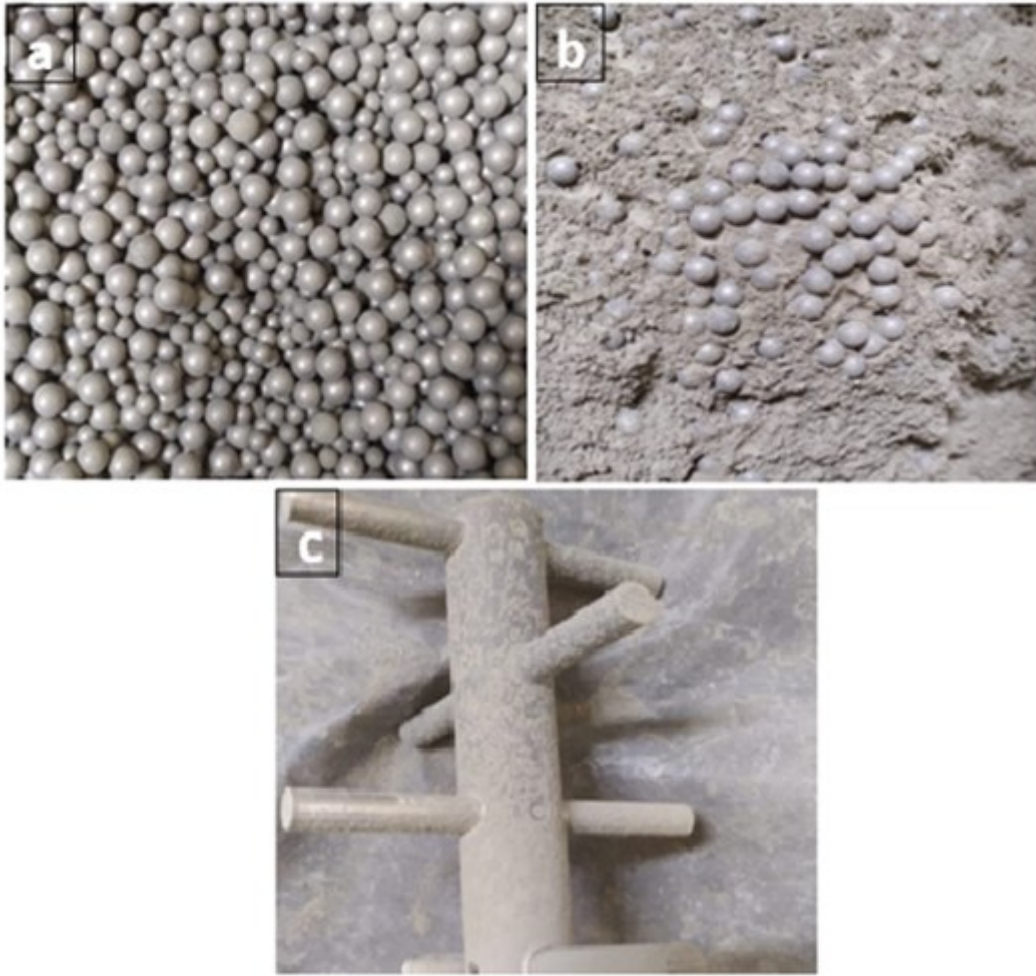
Kullanılan ve denemesi yapılan katkı maddelerinden çimentonun %0,05-0,1 arasında kullanılmıştır. Bütün denemelerde kullanılan katkı maddesi miktarları aynı tutulmuştur. Bu kapsamda öncelikle 300-800 microns öğütülen klinkerden 1,5 kg tartılarak cihaz 212 rpm devir ve 12 dakika süreye ayarlandı ve besleme kanalından klinker sisteme beslendi. Beslenen klinkere % 0,1 oranında %50'lik PCE katıldı. 12 dakika sonunda cihazın dış çepher sıcaklığı 16,5°C olarak ölçüldü. Cihaz içerisinden alınan malzeme sıcaklığı 25,4 °C olarak ölçülürken cihazdan alınan malzeme 1495 gr olarak tartıldı. Hiçbir katkı maddesi kullanılmadan öğütülen klinkerden sonra temizlenmiş bilyeler ve PCE verilerek öğütülen klinkerin bilyelerinin aynı şekilde temizlenmiş hali Resim 4.10a ve Resim 4.10c'de verilmiştir. Bu iki şekil kullanılan katkının etkisi hakkında net fikir vermesi açısından önemlidir.

PCE verilerek öğütülen klinkerin öğütme sonrası görüntüsü Resim 4.14b'de verilmiştir. Burada, kullanılan katkıdan dolayı bilyelerin üzerinde neredeyse hiç klinker bulaşı olmadığı görülmektedir. Resim 4.10d'de öğütme sonrası karıştırma milinin görüntüsü verilmiştir. Mil ve bilyeler üzerinde malzeme birikiminin minimum düzeyde olduğu gözlenmiştir. Mil deki malzeme tartıldığında 1-2 gr olarak kaydedilmiştir. Bunun yanında hiçbir katkı müdahalesi yapılmadan öğütülen klinkerin cihazdan alınma aşamasında en küçük bilyelerin ve öğütülmüş klinkerin cihaz içerisinden alınması yapışmanın olması nedeniyle daha zorken, PCE kullanılarak yapılan öğütmeden sonra cihazın içerisindeki malzemenin alınması kolaydır.



Resim 4.10. a) Klinker öğütmesinden sonra bilyeler, b) PCE li klinker öğütme sonrası, c) PCE li klinker öğütmesinden sonra bilyeler, d) PCE li klinker öğütmesinden sonra karıştırma mili

Yapılan diğer öğütme işleminde hazırlanan polikarboksilat bazlı katkı denenmiştir. Öğütme işlemi 1,5 kg 300-800 mikron arasında ön öğütme yapılan klinker 212 rpm ve 12 dakika boyunca öğütüldü. Dış çeper sıcaklığı başlangıçta 22,4°C iken işlem sonunda 31,4 °C olarak ölçüldü. İşlem sonrası alınan ürün sıcaklığı 40,7 °C 'dır. Öğütme sonrasında alınan malzeme 1481 gr olup mildeki malzeme tartıldığında 2-3 gr olarak kaydedildi. Öğütme sonrası bilyelerin üzerindeki malzeme birikiminin oldukça az olduğu görülmektedir (Resim 4.11a, 4.11b). Öğütme sonrası karıştırma mili üzerinde biriken malzeme Resim 4.11c'de görülmektedir.



Resim 4.11. a) Temizlenmiş bilyeler (öğütme öncesi) b) PCE katkısı (öğütme sonrası) c) Öğütme sonrası karıştırma mili

Son olarak yapılan öğütme işleminde hazırlanan PCE-AgNPs katkısı denendi. Öğütme işlemi 1,5 kg 300-800 mikron arasında ön öğütme yapılan klinker 212 rpm ve 12 dakika boyunca öğütüldü. Dış çeper sıcaklığı başlangıçta 16,3 °C iken işlem sonunda 25,1 °C olarak ölçüldü. İşlem sonrası alınan ürün sıcaklığı 32,3 °C 'dır. Öğütme sonrasında alınan malzeme 1495 gr olup mildeki malzeme tartıldığında 2 gr olarak kaydedildi. Öğütmeden önce temizlenmiş bilyeler, PCE-AgNPs bazlı hazırlanan katkı ile yapılan öğütme sonrası görünüm Resim 4.12a ve Resim 4.12b'de verilmiştir. Öğütme sonrası bilyelerin üzerindeki malzeme birikimi oldukça azdır ve bilyeler parlaklığını korumaktadır. Resim 4.12c'de ise öğütme sonrası cihaz haznesinin boşaltılmasından sonra bilyelerin parlaklığını hala muhafaza ettiği görülmektedir. Karıştırma mili üzerinde biriken malzemeye ait görüntü Resim 4.12d'de verilmiştir.



Resim 4.12. a) Temizlenmiş bilyeler (öğütme öncesi) b ve c) PCE-AgNPs katkılı öğütme sonrası, d) Öğütme sonrası karıştırma mili

4.5. Numunelerin Tanecik Boyutu Analizi

Blaine, çimento taneciklerinin birim hacimde kapladıkları alanı belirtir ve ortalama bir değer verir. Tek başına blain değeri bize kesin olarak çimentonun inceliği hakkında bilgi vermemekle beraber çimento içerisindeki tanecik dağılımının bir göstergesi olarak kabul edilir. Blain değeri yüksek olan bir çimentoya ince demek yerine bu çimentoda ince malzeme dağılımı daha fazladır demek daha doğru bir ifadedir. Çimentonun ideal inceliğinin göstergesi nihai ürünle yapılan performans testlerinde daha net olarak belirlenir.

Blaine değeri yüksek olan bir çimentoda daha ince tanecikler olabileceği gibi daha iri tanecikler de olabilir.

Çimento ve beton analizleri Amasya Üniversitesi Mimarlık Bölümü Beton ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tanecik boyutu analizi, bu laboratuvarda bulunan Blain cihazı (Resim 4.13) ile yapılmıştır.



Resim 4.13. Blain cihazı

Yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin Blain Değerleri

Numune	Öğütülen malzeme miktarı (g)	Öğütme sonrası elde edilen malzeme miktarı (g)	Tanecik Dağılımı Değeri (Blain)
Referens çimento	-	-	3452,3361
Klinker	1500	1449	4420,5366
PCE (%50)	1500	1495	4379,8574
PCE katkı	1500	1481	4836,5209
Nano+PCE	1500	1490	4632,8274

Bilye çeperlerine ve cihaza yapışmama dolayısıyla, partikül hareketliliğinin fazla görüldüğü PCE’de, %50’lik olmasına rağmen Blain değeri diğer iki PCE bazlı hazırlanmış katkıdan daha düşük çıkmıştır (Çizelge 4.1). Bu sonuç bize öğütme esnasında öğütme yardımcısının partikül hareketliliğine katkısı ve aglomerasyonun olmaması ile öğütmenin istenilen boyutta yapılmasıyla doğru orantılı olmayabileceğini göstermiştir. Bir başka deyişle, aglomerasyonu engelleyen bir öğütme yardımcısı, istenilen boyutta öğütmeye yardımcı olmaya yeterli olmayabilir. Blain incelik ten çok tanecik dağılımı hakkında bilgi verdiğinden PCE de daha homojen bir dağılım olup olmadığı sonraki deneylerle gözlemlendiğinde daha anlamlı olacaktır. Öğütme sırasında cihaz ve bilye çepherlerine yapışarak kaybedilen malzeme miktarının sadece PCE kullanıldığında minimum düzeyde olduğu gözlenmiştir.

Hazırlanan PCE-AgNPs katkısı şu ana kadar yapılan deneylerde olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Eklenen nano partiküllerin öğütme esnasında öğütme performansını artırıcı etki gösterdiği gözlenmiştir. PCE-AgNPs’in etkisi nihai ürün testlerinde total olarak değerlendirilecektir.

4.6. Lazerli Tane Dağılımı Deneyi

Çimentonun incelik ölçümünde ilk olarak Blaine hava geçirgenlik yöntemi kullanılarak numunelerin özgül yüzey alanları belirlenmiştir. Blaine yöntemi, taneciklerin şekil ve boyut dağılımını doğrudan göstermediği için, elde edilen incelik değerlerinin içerdikleri iri veya çok ince taneleri ne ölçüde yansıttığı kesin olarak belirlenememiştir. Bu nedenle, Blaine ölçümünün ardından lazerli tane dağılımı yöntemi de uygulanmıştır. Lazerli tane dağılımı, numune lazer ışığı ile aydınlatıldığında taneciklerin ışığı saçma açılarından yararlanarak çalışır ve hacim bazlı $D_v(10)$, $D_v(50)$ ve $D_v(90)$ gibi karakteristik tanecik boyutlarını belirler. Bu sayede numunelerin sadece ortalama incelikleri değil, aynı zamanda tanecik dağılımlarının genel yapısı da ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu deney Kayseri Erciyes Üniversitesinde yapılmıştır. Numunelerin analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Lazerli tane dağılımı analiz sonuçları

Numune	Blaine (cm ² /g)	Dv(10) (µm)	Dv(50) (µm)	Dv(90) (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)
Numune 1	4235	1,48	12,8	41,0	3,20
Numune 2 (PCE + AgNO ₃)	4456	1,76	14,8	50,3	3,14
Numune 3 (PCE)	5161	2,70	57,3	523	2,70

4.7. Çimentoda Yayılma Tablası Deneyi

Deney için hazırlanan harç numuneleri TS EN 197-1 standardında belirtilen karışım miktarları esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde standartta belirtilen CEN kumu (Resim 4.14a) ve yayılma tablası (Resim 4.14b) kullanılmıştır.



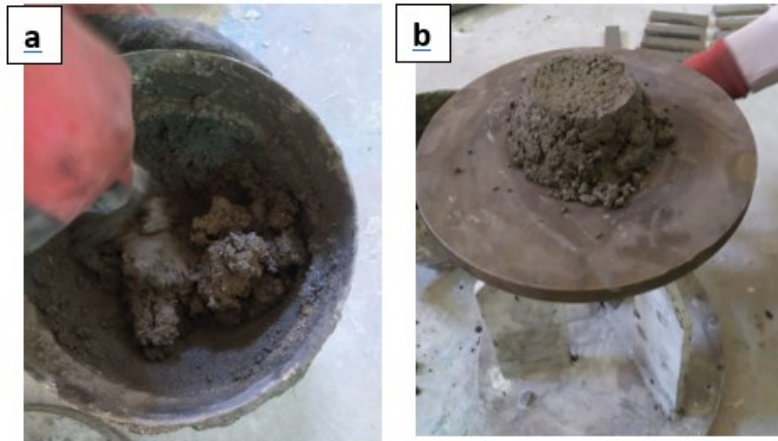
Resim 4.14. a) Deneyde kullanılan standart kum b) Yayılma tablası

Harç numuneleri taze haldeyken kalıplara yerleştirilmeden önce TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Bu amaçla, taze harç kesik koni içerisine yerleştirilerek yavaşça düşey olarak yukarı doğru çekildi. Harç kütlesi dairesel

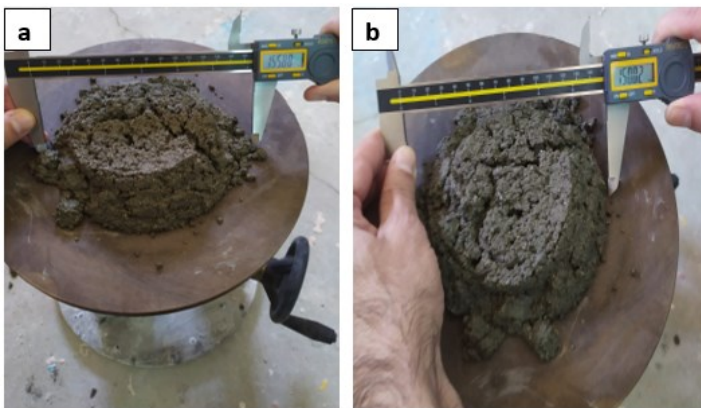
levha üzerinde yer alırken, yayılma tablası yaklaşık saniyede bir defa olmak üzere 15 defa serbest düşürülerek yayılma sağlandı. Yayılan harç kütlesinin çapı, birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek belirlendi.

4.8. Referans Çimento

Çimentodan 450 gr tartılıp 225 gr su ve bir torba standart kum ile karıştırılıp yayılma tablasının üzerindeki kesik koni şişlenerek konuldu, kesik koni dik bir şekilde çekildi, bu işlem sonrasında harç kesik koninin şeklini almış durumda olduğundan tabla çevirme kolu yardımıyla 15 kere sarsıldı (Resim 4.15). Sarsılma sonrası elektronik kumpas yardımı ile dik iki açıdan yayılma ölçülerek ortalama değer alındı (Resim 4.16).



Resim 4.15. a) Deneyde kullanılan standart kum b) Huniye konulduktan sonra sarsma anı

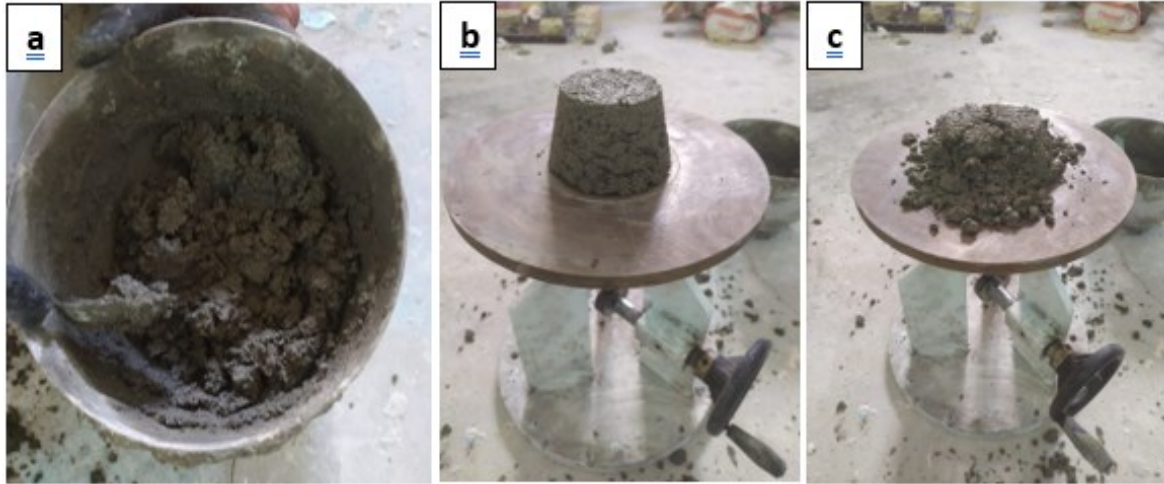


Resim 4.16. a) Elektronik kumpas ile ölçüm b) Elektronik kumpas ile dik 2.ölçüm

Resim 4.15a’da görüldüğü gibi harç kıvamı oldukça katıdır. Resim 4.15b’ de kesik koni çekildiğinde şekli tam olarak koruyamadığı, belirgin çatlak ve kopmaların olduğu gözlemlenmiştir. Sarsma anından sonra ise koparak yayılmalar olduğu tespit edilmiştir (Resim 4.16a).

4.9. Sade Klinker (Referans)

Hiçbir öğütme yardımcısı kullanılmadan öğütülen klinkerden 450 gr tartılıp 225 gr su ve bir torba standart kum ile karıştırılıp yayılma tablasının üzerindeki kesik koni şişlenerek konuldu, kesik koni dik bir şekilde çekildi. Bu işlem sonrasında harç kesik koninin şeklini almış durumdayken tabla çevirme kolu yardımıyla 15 kere sarsıldı (Resim 4.17). Sarsılma sonrası elektronik kumpas yardımı ile dik iki açıdan yayılma ölçülerek ortalaması alındı (Resim 4.18).



Resim 4.17. a) Harç halindeki sade klinker b) kalıptan çekilmiş vuruşa hazır klinker c) 15 vuruş yapılmış klinker

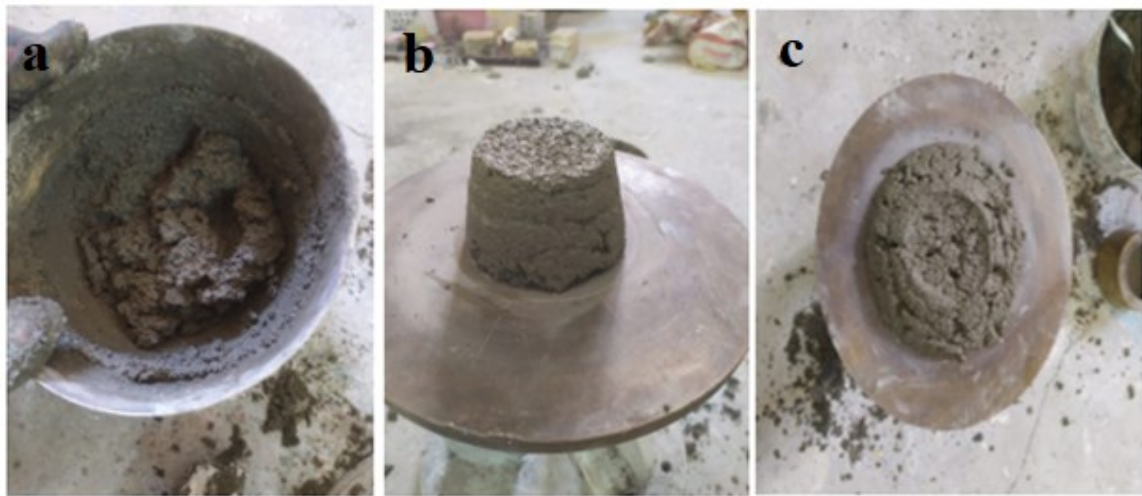
Harç kıvamının referans çimentoya göre daha iyi olduğu (Resim 4.17a), kesik koni çekildiğinde şekli koruduğu gözlemlenmiştir (Resim 4.17b). Sarsma gerçekleştirildikten sonra yayılmanın referans çimentoya göre daha iyi olduğu, fakat yine de kopma ve saçılmaların olduğu gözlemlenmiştir (Resim 4.17c).



Resim 4.18. Birbirine dik olarak yapılan iki ölçüm

4.10. Nano PCE Katkısı ile Öğütülen Klinker

Öğütme yardımcısı olarak PCE-AgNPs katkısı ile öğütülen klinkerden 450 gr tartılarak 225 gr su ve bir torba standart kum ile karıştırılıp yayılma tablasının üzerindeki kesik koni şişlenerek konuldu. Kesik koni dik bir şekilde çekildi ve tabla çevirme kolu yardımıyla 15 kere sarsıldı (Resim 4.19). Sarsılma sonrası elektronik kumpas yardımı ile dik iki açıdan yayılma ölçülerek ortalaması alındı (Resim 4.19).



Resim 4.19. a) Harç halindeki PCE-AgNPs ile öğütülmüş klinker b) kalıptan çekilmiş vuruşa hazır klinker c) 15 vuruş yapılmış klinker



Resim 4.20. Birbirine dik olarak yapılan iki ölçüm

PCE-AgNPs katkısı ile öğütülen klinkerin, malzemeyi daha iyi sardığı, kıvamının ise diğer numunelere göre daha yapışkan ve işlenebilir halde olduğu gözlenmiştir (Resim 4.19a). Kesik koni çekildiğinde ise şekli oldukça iyi bir şekilde koruduğu görülmektedir (Resim 4.19b). Yayılmanın tam bir yayılma gibi davrandığı, kopup dökülmelerin olmadığı, yayılmanın bütün halinde gerçekleştiği gözlenmiştir (Resim 4.19c).

Numunelerin yayılma tablası deney sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yayılma tablası deney sonuçları

Numune	Yayılma değerleri (mm)
Referans çimento	15285,5
Sade Klinker	16002,5
PCE-AgNPs katkı	15785

Numunelerin yayılma deneyleri bittikten sonra harçlar iki kademeli olarak kalıplara alınmıştır. Öncelikle yarıya kadar doldurulan kalıplar sarsma tablasında standartlara uygun bir şekilde sarsılmış daha sonra kalıp tam olarak sarsılıp harcın yerleşmesi sağlanmıştır (Resim 4.21).



Resim 4.21. Harçların kalıplara yerleştirilmesi

Deney için hazırlanan harç numuneleri TS EN 197-1 standardında belirtilen şekilde hazırlandı. Kalıptan çıkarılmış numuneler (Resim 4.22) uygun şartlarda muhafaza edilerek eğilme (Resim 4.22a) ve basınç (Resim 4.22b) dayanımı testleri yapıldı. 2 Günlük eğilme ve basınç deney sonuçları kaydedilerek standartlara uygun şekilde hesaplamaları yapıldı. Sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Resim 4.22. Kalıptan çıkartılmış 2 günlük numuneler



Resim 4.23. a) Eğilme dayanımı testi b) Basınç dayanımı testi

Çizelge 4.4. Basınç ve eğilme dayanımları sonuçları

Numune Tipi	Ölçüm değerleri (MPa)	Ortalama (MPa)	Standart sapma (MPa)	Varyasyon katsayısı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
Referans Çimento	20,68 - 20,93 - 20,57	20.73	0.18	0.87	3,94
Sade Klinker	15,68 - 16,78 - 15,73	16.06	0.61	3.8	3,96
PCE+AgNP	18,93 - 19,58 - 19,62	19.38	0.37	1.9	3,97

5. TARTIŞMA

Çimento endüstrisinde klinker öğütme işlemine harcanan enerji, üretim esnasında harcanan enerjinin büyük bir kısmını kapsamaktadır. Çimento üretiminde klinkerin inceliği, nihai ürünün kalitesini belirlediğinden oldukça önemlidir. Bilyeli değirmenlerde yapılan öğütme işleminde, taneciklerin elektrostatik kuvvetle aglomerasyonu verimin düşmesine neden olur. Yapılan bu tez çalışmasında öncelikle iyi bir öğütme yardımcısının ne gibi özellikleri olması gerektiği konusunda derinlemesine bir literatür araştırması yapılmıştır. Araştırmalar yapılırken karşılaştığımız öğütme sorununun, sanki sadece küçüldükçe yüzey alanları dolayısıyla da çekim kuvvetleri artan ve aglomerasyona eğilimleri artan çimento taneciklerinin arasındaki bu çekim kuvveti olduğu yanılgısıydı. Halbuki genel anlamda aslında bu çekim kuvveti, öğütme sırasında önemli bir engeldir; fakat tek başına belirleyici olduğu söylenemez. Öğütme verimi, çimento taneciklerinin arasındaki çekim kuvvetinin (özellikle Van der Waals ve elektrostatik kuvvetler) yanı sıra, öğütme verimliliğini etkileyen pek çok başka faktör vardır ve sadece bu kuvvetleri engellemek iyi bir öğütme için yeterli olmayabilir. Verimli ve etkili bir öğütme için hem fiziksel–mekanik faktörler (klinker özellikleri, değirmen tipi, nem) hem de kimyasal faktörler (yüzey etkileşimi, aglomerasyon eğilimi, katkının yapısı) birlikte ele alınması gerekliliği tespit edilmiştir.

Bir diğer konu ise, çok düşük dozajlarda kullanılan (%0,01–0,1) öğütme yardımcılarının nihai ürünün mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin hangi düzeyde olduğu konusudur. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, düşük dozajlı öğütme yardımcıları çimentonun mekanik özelliklerine dolaylı ve bazen doğrudan etki edebilir. Ancak çoğu zaman bu etki, çimento taneciklerinin daha ince olması ve dolayısıyla daha fazla reaktif yüzey alanına sahip olması nedeniyle ortaya çıkar. Bazı öğütme yardımcıları (DEA ve TEA gibi), çimentonun C_3A (Trikalsiyum alüminat) fazının hidrasyonunu hızlandırır (Tavakol, Ghasemi ve Azari, 2020). Polikarboksilat eter türevleri gibi katkıları, partiküller arasında dispersiyonu artırarak daha düzgün bir hidrasyon ortamı oluşturur. Ancak bu etkiler genellikle düşük dozajlarda (0,01–0,1%) sınırlı düzeydedir ve fiziksel inceleme kadar büyük rol oynamaz. Öğütme yardımcıları, özellikle mikron altı partikül oluşumunu artırdığından dolayı hidrasyon yüzeyi artar ve erken dayanım sağlarlar. Bunun yanında bazı öğütme yardımcıları sadece partikül boyutuna etki etmekle kalmaz (fiziksel etki), kimyasal olarak da hidrasyona katkı sağlayabilir.

Tavakol ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2020), DEA ve TEA'nın C₃A (Trikalsiyum alüminat) fazının hidrasyonunu artırdığı, buna bağlı olarak priz süresinin azaldığı ve dolayısıyla erken dayanımın arttığı kaydedilmiştir.

PCE katkılı öğütme yardımcıları ise tanecikler arasında dispersiyonu artırdığından, hidrasyon için daha homojen bir yapı sağlarlar. Bu etkiler, yukarıda da belirtildiği gibi düşük dozajlarda ve sınırlı düzeydedir ve tanecik boyutunun küçülmesi kadar büyük bir rol oynamaz.

Bu tez çalışmasında öğütme mekanizmasında kimyasal faktörleri üzerinde durulmuştur. Bu sebeple çimento tanecikleri arasındaki çekim kuvvetine (özellikle Van der Waals ve elektrostatik kuvvetler) odaklanılmış ve çalışmalar bu doğrultuda ilerletilmiştir. Yapılan araştırmalarda bu çekim kuvvetlerini engellemek için yüksek polariteye sahip bir öğütme yardımcısının olması gerektiğini göstermiştir.

Çimento taneciklerinin yüzeyi yüklüdür. Yüksek polariteli moleküller, bu yüklerle daha güçlü elektrostatik ve dipol-dipol etkileşimler kurar. Bu sayede kimyasal katkı, çimento yüzeyine daha iyi adsorbe olur. Çimento partiküllerine adsorbe olan katkı, tanecikler arasına girerek yapışmayı engeller. Bunun için molekülün, çimento yüzeyine bağlanacak fonksiyonel gruplara ve yeterli hidrofilik–hidrofobik dengelere sahip olması gerekir. Bu da ancak yüksek polariteyle mümkündür.

Saf gümüş aslında polaritesi düşük olan fakat nanopartikül halinde polaritesinin saf gümüşe göre daha da yükseldiği yapılan literatür araştırmalarında tespit edilmiştir. Saf gümüş (Ag) elementi, polaritesi düşük olan metalik bağlarla karakterizedir ve elektronlar bağlar boyunca serbestçe hareket eder; bu da onu daha az reaktif ve düşük polariteye sahip kılar (Pal, Tak ve Song, 2007). Ancak gümüş nanopartikülleri (AgNP), nanoboyuta inildiğinde yüzey alanları büyür ve yüzey enerjileri artar. Bu, nanopartiküllerin çevreleriyle daha güçlü etkileşimler kurmalarını sağlar ve onları daha "polar benzeri" özellikler gösteren maddelere dönüştürür (Rai, Yadav ve Gade, 2009). Ayrıca nanopartiküllerin yüzey yükleri, onları daha polar hale getirir ve bu özellik, gümüş nanopartiküllerinin çözücülerle etkileşimlerini güçlendirir (Pivetta, Custodio, Silva, Souza ve Marciano, 2016). Yapılan tez çalışmasında, aslında gümüş nanopartiküllerinin çevrelerinin PCE ile

kaplanacağından düşük polariteden kaynaklı aglomerasyonun olmayacağı ve hatta PCE polaritesine pozitif bir etki yaratacağı düşünülmüştür.

Gümüş nanopartiküllerinin tercih edilmesinin nedeni, yüksek yüzey enerjilerine sahip olmaları ve bu sayede çimento partikülleriyle güçlü fiziksel ve kimyasal etkileşimler kurabilmeleridir. Yapılan literatür çalışmalarında (Pal ve diğerleri, 2007; Rai, Deshmukh, Ingle ve Gade, 2012), AgNP'lerin yüzeylerinin yüksek reaktivite gösterdiği, metal oksitlerle etkileşime girdiği ve su ortamlarında yüzey yüküne bağlı olarak iyi bir dağılma sağladığı ifade edilmektedir. Bu özellik, PCE'nin çimento partiküllerine daha etkili adsorpsiyonuna katkıda bulunarak dağılma kabiliyetini artırabilir. Bunun yanında, bazı çalışmalarda AgNP'lerin çimento matrisine eklendiğinde pH'yı yükselttiği, çözünürlüğü azalttığı ve mekanik dayanımda artış sağladığı da rapor edilmiştir (Pivetta ve diğerleri, 2016). Tüm bu nedenlerle, gümüş nanopartikülleri PCE bazlı çimento katkı sistemlerinde hem fiziksel dağılımı iyileştirme hem de fonksiyonel dayanıklılığı artırma potansiyeli taşıdığı düşünülmüş ve bu konudaki literatür çalışmaları eksik görülmüştür.

Tez çalışmasında, nano partiküllerle desteklenmiş polimer esaslı öğütme yardımcılarının kullanımı incelenmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında, düşük polariteye sahip olan gümüş nanoparçacıklar (AgNPs), yüzeylerine yüksek polariteli polimerler (örneğin polikarboksilat eter, PVP veya PEG) bağlandığında, toplam sistemin polaritesini artırmakla beraber, bu yüzey modifikasyonunun nanoparçacıkların su gibi polar çözücülerde daha iyi dağılmasını ve kolloidal stabilitesini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür (Zhang, Yu, Hu, Xue ve Ding, 2013). Aynı zamanda, yüzeydeki polar gruplar sayesinde AgNP'ler, çimento gibi iyonik ve yüzey yüklü katılarla daha güçlü elektrostatik etkileşimlere girebilir (Liu ve diğerleri, 2012). Bu tür etkileşimler, çimento dispersiyon sistemlerinde nanoparçacıkların daha homojen dağılmasına ve katkı maddesi olarak daha etkin davranmasına olanak tanır (Yu, Tang, Spiesz ve Brouwers, 2014).

Tez çalışması boyunca elde edilen veriler karşılaştırıldığında, PCE-AgNP ile çimento tanecikleri arasındaki yüzey alanı büyüdükçe artan aglomerasyon isteğinin kısmen engellendiği ve dolayısıyla daha küçük tanecikli ürün elde edildiği görülmüştür. Blaine sonuçlarında, PCE-AgNP içeren numunenin özgül yüzey alanı 4632 cm²/g olarak tespit edilmiştir. Bu değer, PCE katkısına göre daha düşük olsa da klasik PCE katkılı numuneden

daha yüksektir. Gümüş nanoparçacıkların katkının yapısına dahil edilmesinin, muhtemelen parçacıklar arası elektrostatik etkileşimleri değiştirerek ve adsorpsiyon davranışını etkileyerek yüzey alanını artırıcı yönde katkı sunduğu değerlendirilmektedir.

Numunelere yapılan lazerli tane dağılımı testinde ise PCE katkısının inceliğinin daha yüksek ($5161 \text{ cm}^2/\text{g}$) olduğu görülmektedir. Ancak aynı numune için $D_v(10)$, $D_v(50)$ ve $D_v(90)$ değerlerinin yüksek olması, bu numunede daha büyük taneciklerin varlığını ve dolayısıyla homojen bir öğütmenin gerçekleşmediğinin göstergesidir. Gümüş nanoparçacıklı PCE içeren numunede (Numune 2), ortalama parçacık boyutu $D_v(50)$ değeri $14.8 \mu\text{m}$ 'ye yükselmiş ve $D_v(90)$ değeri $50.3 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler, sistemde daha geniş bir tane boyutu dağılımı olduğunu ve büyük partikül oranının arttığını göstermektedir.

Ancak Blaine yüzey alanının $4456 \text{ cm}^2/\text{g}$ gibi yüksek bir değerde kalması, özellikle ince kısımlarda hâlâ etkin bir öğütme olduğunu ve bu katkının mikroyapıda daha etkili sonuç verebileceğini düşündürmektedir. Gümüş nanoparçacıkların aglomerasyon davranışını etkileyerek ince kısımlarda yüzey alanına katkı sağladığı tahmin edilmektedir.

İncelik değerleri değerlendirildikten sonra yapılan mekanik testlere bakıldığında, yayılma deneyinde PCE-AgNP katkı ile hazırlanan numunenin yayılma değeri 15.785 mm olarak ölçülmüş ve bu değer hem referans çimentoya hem de sade klinkere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu artış, katkının çimento partikülleri üzerinde etkili bir dispersiyon sağladığını ve parçacıklar arası sürtünmeyi azaltarak sistemin akıcılığını artırdığını göstermektedir. Gümüş nanoparçacıkların yüzey yükü dengesi ve partikül stabilitesine katkı sunarak, PCE'nin akışkanlaştırıcı etkisini desteklediği düşünülmektedir.

Yayılma deneyinin ardından yapılan 2 günlük basınç ve eğilme testleri sonuçlarına bakıldığında, PCE-AgNP katkısının belirgin yüksek değerler (Basınç: $19,38 \text{ MPa}$, Eğilme: $3,97 \text{ MPa}$) verdiği görülmektedir. Referans çimento ortalama $20,73 \text{ MPa}$ basınç dayanımı gösterirken, katkısız klinker örnekleri $16,06 \text{ MPa}$ seviyesinde kalmıştır. Buna karşın, katkılı klinker örneklerinde $19,38 \text{ MPa}$ gibi belirgin olarak daha yüksek bir dayanım elde edilmiştir. Aynı zamanda, PCE-AgNP katkısının $3,97 \text{ MPa}$ ile en yüksek eğilme

dayanımını sağlaması, katkının mikroçatlak oluşumunu engelleyici bir yapı oluşturduğunu ve partiküller arası bağların daha etkin geliştiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, kullanılan öğütme yardımcısı katkının klinkerin hidratasyon sürecinde etkili olduğunu göstermektedir. Katkının, C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) bağlarının oluşumunu ve jelleşme hızını artırdığı, böylece erken yaş dayanımını anlamlı biçimde yükselttiği söylenebilir. Alçı gibi geleneksel katkı maddeleri kullanılmamasına rağmen elde edilen bu artış, katkının özgün yapısının hidratasyon mekanizmasına pozitif katkı sağladığını işaret etmektedir.

Sonuç olarak, deneylerde kullanılan öğütme katkısı, klinkerin erken dayanım gelişimini destekleyerek çimento kalitesinin artırılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, çimento öğütme yardımcısı olarak polikarboksilat eter (PCE) yapısına gümüş nanopartikülleri (AgNP) eklenmiştir. Yapılan araştırmalarda AgNP lerin doğrudan çimento öğütme yardımcılarının içerisinde kullanıldığı çalışmaların sınırlı olması, bu alandaki potansiyelin henüz tam olarak keşfedilmediğini göstermektedir. Bu nedenle, AgNP'lerin çimento öğütme yardımcısı olarak kullanımını araştıran daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmada elde edilen veriler birlikte değerlendirildiğinde, PCE içerisine sentezlenen gümüş nanoparçacıkların, çimento öğütme yardımcısı olarak kullanıldığında hem fiziksel hem de mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmektedir. Bu katkı, yalnızca öğütme sürecine katkı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda hidrasyon davranışları ve reolojik özellikler üzerinde de olumlu etkiler yaratmaktadır. Ayrıca çalışma boyunca denemesi yapılan diğer katkı varyasyonlarına bakıldığında blain değerinin yüksek çıkmasının tek başına mekanik değerlerin yükseleceği anlamına gelmediği görülmektedir. Özellikle lazerli tane dağılım test sonuçlarında homojen dağılımın olması gerektiği bilinmekle beraber blain değeri yüksek çıkan fakat homojen bir dağılım göstermeyen numunelerin mekanik anlamda daha zayıf kalabileceği sonucuna da ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular, PCE-AgNP katkısının yüksek performanslı çimento katkı sistemlerine potansiyel bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda gümüş nanopartiküller, antibakteriyal etkilerinden dolayı dış çimentolarında kullanılmıştır. Bu çalışma ile ilk kez çimento öğütmesinde kullanılmıştır. Geleneksel çimento öğütme yardımcılarının ötesine geçerek nanoteknoloji ve polimer kimyasını bir araya getiren yenilikçi bir yaklaşım sunan bu çalışma, metal nanoparçacıklarla modifiye edilen PCE'in hem dispersiyon hem de hidrasyon süreçlerine çift yönlü katkı sağladığı gözlenmiştir.

Çalışmanın daha kapsamlı hale getirilmesi ve endüstriyel uygulanabilirliğinin incelenmesi açısından dayanım ve mikro analizlerin yapılması, gümüş dışında farklı metaller kullanarak nanopartikül sentezlenmesi ve beton testlerinin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, M. B., Tay, M. Y., Shameli, K., Hussein, M. Z. and Lim, J. J. (2011). Green synthesis and characterization of silver/chitosan/polyethylene glycol nanocomposites without any reducing agent. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(8), 4872-4884.
- Altun, O., Benzer, H., Toprak, A. and Enderle, U. (2015). Utilization of grinding aids in dry horizontal stirred milling. *Powder Technology*, 286, 610–615.
- Anoshin, G., Yusupov, T., Razvorotneva, L., Tsimbalist, V. and Solotchina, E. (1994). Effect of additives of inorganic salts during superfine grinding on physicochemical and structural properties of chromite. *Physical and Chemical Bases of Concentration*, 29, 84–87.
- Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T. (1984). Process Engineering of Size Reduction Ball Milling. *New York: Society of Mining Engineers, AIME*.
- Bettini, S., Pagano, R., Valli, L. and Giancane, G. (2014). Drastic nickel ion removal from aqueous solution by curcumin-capped Ag nanoparticles. *Nanoscale*, 6(17), 10113-10117.
- Bhima Rao, R., Narasimhan, K. S. and Rao, T. C. (1991). Effect of additives on grinding of magnetite ore. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 8(3), 144–151.
- Bullard, R. A. (2015). *Effect of Cooling Rates on Mineralization in Portland Cement Clinker* [M.Sc. Thesis]. University of Missouri-Kansas City.
- Bulut, E. (2007). *Gümüş nanopartiküllerin polifenollerle sentezi ve karakterizasyonu* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Cao, G. (2004). *Nanostructures and nanomaterials: Synthesis, properties and applications*. Imperial College Press.
- Carpio, R. C., Francisco de Sousa Júnior, Leandro dos S. C. and Da Silva, R. J. (2008). Alternative fuels mixture in cement industry kilns employing particle swarm optimization algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 30(4), 335–340.
- Choi, H., Lee, W. and Kim, S. (2009). Effect of grinding aids on the kinetics of fine grinding energy consumed of calcite powders by a stirred ball mill. *Advanced Powder Technology*, 20(4), 350–354.
- Choi, H., Lee, W., Kim, D.U., Kumar, S., Kim, S.S., Chung, H.S., Kim, J.H. and 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.
- Csoke, B., Racz, A. and Mucsi, G. (2010). Grinding and flowing investigation on dry stirred ball milling in order to determine the influence of grinding aids. In

Proceedings of the XXV International Mineral Processing Congress (IMPC 2010) (Vol. 1, pp. 629–636).

- Dolence, S., Šter, K., Borštnar, M., Nagode, K., Ipavec, A. and Žibret, L. (2020). Effect of the cooling regime on the mineralogy and reactivity of belite-sulfoaluminate clinkers. *Minerals*, 10(10), 910.
- Dombrowe, H., Hoffmann, B. and Scheibe, W. (1982). Über Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten von Mahlhilfsmitteln. *Zement-Kalk-Gips*, 11, 571–580.
- Durgun, M. Y. (2017). *Nano silika kullanımının kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik ve içyapısal özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dutta, S. K., and Lawson, R. (2006). How the nanotechnology revolution will affect cost management. *Journal of Corporate Accounting and Finance*, 17(3), 37–46.
- El-Shall, H. and Somasundaran, P. (1984). Physico-chemical aspects of grinding: a review of use of additives. *Powder Technology*, 38, 275–293.
- Enustun, B. V., Liu, D. C., Markuszewski, R. and Lin, K. L. (1987). Use of a surfactant as a coal grinding additive. *Coal Preparation*, 4, 193–207.
- Faisal, N. R. F. (2019). *Çimentolu kompozitlerde mikro ve nano mineral katkıların performanslarının karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Fuerstenau, D. W. (1995). Grinding aids. *Kona Powder and Particle Journal*, 13, 5–18.
- Fujimoto, S. (1993). Reducing specific power usage in cement plants. *World Cement*, 24(7), 25–35.
- Goldstein, A. (1997). *Handbook of nanophase materials*. Marcel Dekker Inc., New York.
- Gödek, E., Felekoğlu, B. ve Felekoğlu, K. T. (2015). Hazır beton sektörüne uygun polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı seçimi ve kendiliğinden yerleşen beton üretimindeki performansı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 8-18.
- Hao, S. H., Liu, B. H. and Yan, X. Y. (2017). Review on research of cement grinding aids and certain problems. *Key Engineering Materials*, 753, 295–299.
- Hasegawa, M., Kimata, M., Shimane, M., Shoji, T. and Tsuruta, M. (2000). The effect of liquid additives on dry ultrafine grinding of quartz. *Powder Technology*, 114, 145–151.
- İnternet: Cement Plant Supplier. (n.d.). *Cement making process*. Retrieved May 13, 2025, from URL-1: <https://cementplantsupplier.com/cement-manufacturing/cement-making-process/> . Son Erişim Tarihi: 13.04.2025

İnternet: KUB. (b.t.) URL: <https://kub.org.tr/cimento-katkilarinin-turleri-ve-ozellikleri/>.
Son Erişim Tarihi: 14.04.2025

Jeknavorian, A., Barry, E. and Serafi, F. (1998). Portland çimentosunda öğütme yardımcılarının piroliz gaz kromatografisi-kütle spektrometresi ile belirlenmesi. *Cement and Concrete Research*, 28, 1335–1345.

Jeswiet, J. and Szekeres, A. (2016). Energy consumption in mining comminution. *Procedia CIRP*, 48, 140–145.

Jolicoeur, J., Morasse, S., Sharman, J., Tangit-Hamau, A., Slim, F. and Page, M. (2007). Polyol-type compounds as clinker grinding aids: Influence of powder fluidity and on cement hydration. In *12th International Congress on the Chemistry of Cement*.

Kalkan, Ö.F. *Effect of grinding chemicals and aids on the grinding efficiency and the performance of portland cement*, Master Thesis, 2023.

Kang, H., Lee, Y., Lee, J. and Moon, J. (2023). Importance of amorphous content, surface energy, and preferred orientation on the accurate quantification of cement minerals in clinkers. *Journal of Building Engineering*, 66, 105887.

Karakaş, F. (2006). *Çimento hammaddelerinin öğütülmesinde enerji optimizasyonu*. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi

Katırcıoğlu-Bayel, D. (2018). The Effect of Grinding Additives on Stirred Media Milling of Talc. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 5(7), 36-39.

Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., and Shah, S. P. (2013). Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, 36, 8-15.

Klimpel, R. R., and Manfroy, W. (1978). Chemical grinding aids for increasing throughput in the wet grinding of ores. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 17, 518–523.

Klimpel, R. R. (1999). Islak öğütme kimyasalının seçimi: Bulamaç reolojisi kontrolüne dayalı katkı maddeleri. *Powder Technology*, 105, 430–435.

Lai, F. C., Karim, M. R., Jamil, M. and Zain, M. F. M. (2013). Production yield, fineness and strength of cement as influenced by strength enhancing additives. *Australian Journal of Basic and Applied Science*, 4(7), 253–259.

Lartiges, B. and Somasundaran, P. (1992). Poliakrilik Asit Çözeltilerinde İttriya İle Stabilize Edilmiş Zirkonyanın Ultra İnce Öğütülmesi. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, 43, 585–598.

Liang, B., Zhao, L. B., Han, M. M., Zhang, H., Zhang, Q. F., Zheng, W. M., et al. (2014). The influences and the mechanism of action of sodium hexametaphosphate during

- micro fine particle of lean hematite ore of grinding operation. *Applied Mechanics and Materials*, 641–642, 469–473.
- Liu, J., Chai, P., Tang, J., Wen, H., Shi, Y. and Xue, C. (2012). Electrochemical aging of silver nanoparticles and its effects on bio-chemical sensing properties. *Analytical Methods*, 4(8), 2381–2387.
- Liveri, V.T. (2006). *Controlled Synthesis of Nanoparticles in Microheterogeneous Systems*. Springer Science+Business Media, Inc., New York.
- Ma, S., Yang, J., Mo, W., Wang, G., Su, X. and Yuan, C. (2010). The effect of grinding aids on laboratory grinding of a cassiterite-polymetallic sulfide ore. In *XXV International Mineral Processing Congress 2010 (IMPC)*, Vol. 2 (pp. 1001–1008).
- Mallikarjunan, R., Pai, K. ve Halasyamani, P. (1965). Bazı yüzey aktif reaktiflerin kuvars ve kalsitin ufalanması üzerindeki etkisi. *İşlemler*, 79–82.
- Melorie, A. K. and Kaushal, D. R. (2018). Experimental investigations of the effect of chemical additives on the rheological properties of highly concentrated iron ore slurries. *KONA Powder and Particle Journal*, 35(1), 186–199.
- Mishra, R.K., Weibel, M., Müller, T., Heinz, H. ve Flatt, R.J. (2017). Organik katkı maddeleri kullanılarak inorganik katıların enerji verimli şekilde öğütülmesi. *Chimia*, 71, 451–460.
- Mishra, R. K., Fernandez-Carrasco, L., Flatt, R. J. and Heinz, H. (2014). A force field for tricalcium aluminate to characterize surface properties, initial hydration, and organolayered interfaces in atomic resolution. *Dalton Transactions*, 43(29), 10602–10616.
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., and Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials* 2017, 16(7), 698–699.
- Norholm, A. (1995). Notes on energy conservation. *FL Smidth and Co. Seminar*, İstanbul, Türkiye.
- Ono, Y. (1981). Microscopical observation of clinker for the estimation of burning condition, grindability and hydraulic activity. *Proceedings of the Third International Conference on Cement Microscopy*, 198, 210.
- Öksüzöğlü, B. ve Uçurum, M. (2016). An experimental study on the ultra-fine grinding of gypsum ore in a dry ball mill. *Powder Technology*, 291, 186–192.
- Özdoğan, E., Demir, A. ve Seventekin, N. (2006). Nanoteknoloji ve tekstil uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16(3), 160–168.
- Pagliaro, M. and Rossi, M. (2008). Polyols as additives for cement. In *The Future of Glycerol: New Uses of a Versatile Raw Material*. Royal Society of Chemistry.

- Pal, S., Tak, Y. K. and Song, J. M. (2007). Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? *Applied and Environmental Microbiology*, 73(6), 1712–1720.
- Pan, T.-C. and Lee, C.-M. (2018). Energy efficiency regulations for cement and paper industries based on maximum allowed specific energy consumption. In *ECEEE 2018 Industrial Summer Study Proceedings* (abstract 1-088-18).
- Pekmezci, B. Y. ve Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkıları: Betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, 69, 69–82.
- Pilevneli, C. C., Kızgut, S., Toroğlu, G., Cuhadaroğlu, D. and Yiğit, E. (2004). Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical mill. *Powder Technology*, 139, 165–174.
- Pivetta, T. P., Custodio, W., Silva, R. A. B., Souza, J. B. and Marciano, F. R. (2016). The effect of silver nanoparticles on the physicochemical and antimicrobial properties of calcium silicate cements. *Journal of Applied Oral Science*, 24(6), 588–595.
- Prziwara, P., Hamilton, L. D., Breitung-Faes, S. and Kwade, A. (2018). Impact of grinding aids and process parameters on dry stirred media milling. *Powder Technology*, 335, 114–123.
- Rai, M. K., Deshmukh, S. D., Ingle, A. P. and Gade, A. K. (2012). Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 112(5), 841–852.
- Rai, M., Yadav, A. and Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76–83.
- Rao, C. N. R., Müller, A. and Cheetham, A. K. (2005). *The chemistry of nanomaterials* (Vol. 1). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Rao, R. B. (2004). Advancement in comminution circuits: Theory and practice. In *Mineral characterisation and processing* (pp. 93–103). Indian Institute of Mineral Engineers.
- Rao, R. B., Narasimhan, K. S. and Rao, T. C. (1991). Effect of additives on grinding of magnetite ore. *Minerals & Metallurgical Processing*, 8, 144–151.
- Routray, S. and Swain, R. (2019). Effect of chemical additives on reduction in mill power during continuous grinding of chromite overburden materials in a tumbling mill: A case study. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 100, 123–128.
- Saleem, H. and Zaidi, S. J. (2020). Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact. *Materials*, 13(22), 5134.
- Singh, V. K. (2023). Overview of cement clinker grinding. In *The Science and Technology of Cement and Other Hydraulic Binders* (pp. 325–370).

- Somasundaran, P. and Lin, I. J. (1972). Effect of environmental nature on comminution processes. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 11, 321–331.
- Somasundaran, P. (1978). Grinding theories. In G. Y. Onoda & L. L. Hench (Eds.), *Ceramic processing before firing* (pp. 105–123). Wiley.
- Sottili, L. and Padovani, D. (2001). Effect of grinding aids in the cement industry. *ZKG International*, 54(3), 146–151.
- Svendsen, C., Walker, L. A. and Spurgeon, D. J. (2020). Key principles and operational practices for improved nanotechnology environmental exposure assessment. *Nature Nanotechnology*, 15(9), 731–742.
- Sverak, T. S., Baker, C. G. J. and Kozdas, O. (2013). Efficiency of grinding stabilizers in cement clinker processing. *Minerals Engineering*, 43, 52–57.
- Tavakol, M., Ghasemi, M. and Azari, A. (2020). Review of chemical additives used in grinding of cement. *Chemical Engineering Journal*, 396, 125703.
- Toprak, N. A. (2015). *Öğütme yardımcılarının çimento öğütme devresi performansı üzerine etkilerinin modellenmesi ve simülasyonu* (Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Toprak, N. A., Altun, O., Aydoğan, N. A. and Benzer, A. H. (2014). The influences and selection of grinding chemicals in cement grinding circuits. *Construction and Building Materials*, 68, 199–205.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Srivastava, P. K., Singh, V. P., Singh, S. and Chauhan, D. K. (2017). Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNps)-induced phytotoxicity in *Pisum sativum* seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 167–177.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). *TS EN 1015-3: 2000 – Kâgir harcı – Deney metotları – Bölüm 3: Taze harcın kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2012). *TS EN 197-1: 2012 - Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2016). *TS EN 196-1: 2016 Cimento - Bölüm 1: Test Yöntemleri - Dayanımın Belirlenmesi*. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN 196-6: 2019 - Cimento test yöntemleri - Bölüm 6: İnce taneliliğin belirlenmesi*. Türk Standardları Enstitüsü.

- Vieira, M. G. and Peres, A. E. C. (2013). Effect of rheology and dispersion degree on the regrinding of an iron ore concentrate. *Journal of Materials Research and Technology*, 2, 332–339.
- Vijay Kumar, P. P. N., Pammi, S. V. N., Kollu, P., Satyanarayana, K. V. V. and Shameem, U. (2014). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Boerhaavia diffusa* plant extract and their antibacterial activity. *Industrial Crops and Products*, 52, 562–566.
- Weibel, M. and Mishra, R. K. (2014). Comprehensive understanding of grinding aids. *Zement-Kalk-Gips*, 67(6), 28–39.
- Wolfgang, L. (2007). *Bottom-up methods for making nanotechnology products*. AZoNano.
- Yadav, V. K., Malik, P., Khan, A. H., Pandit, P. R., Hasan, M. A., Cabral-Pinto, M. M. S., Islam, S., Suriyaprabha, R., Yadav, K. K., Dinis, P. A., Khan, S. H. and Diniz, L. (2021). Recent advances on properties and utility of nanomaterials generated from industrial and biological activities. *Crystals*, 11(6), 634.
- Yang, A. (1994). The influence of grinding aids on the floatability of the fine cassiterite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 28, 37–46.
- Yu, R., Tang, P. P., Spiesz, P. R. P. and Brouwers, H. J. (2014). A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA). *Construction and Building Materials*, 60, 98–110.
- Zaki, A. (2007). *Processing and synthesis techniques for the preparation of nanomaterials*. AZoNano. <https://www.azonano.com/details.asp?ArticleID=1710>
- Zingg, A., Winnefeld, F., Holzer, L., Pakusch, J., Becker, S. and Gauckler, L. (2008). Adsorption of polyelectrolyte superplasticizers on clinker surfaces. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 863–873.
- Zhang, N., Yu, X., Hu, J., Xue, F. and Ding, E. (2013). Synthesis of silver nanoparticle-coated poly(styrene-co-sulfonic acid) hybrid materials and their application in surface-enhanced Raman scattering (SERS) tags. *RSC Advances*, 3(43), 13740–13747.
- Zhao, J., Wang, D., Wang, X., Liao, S. and Lin, H. (2015). Ultrafine grinding of fly ash with grinding aids: Impact on particle characteristics of ultrafine fly ash and properties of blended cement containing ultrafine fly ash. *Construction and Building Materials*, 78, 250–259.
- Zheng, J., Harris, C. C. and Somasundaran, P. (1996). Role of chemical additives in stirred media mill grinding. In *5th World Congress of Chemical Engineering*. American Institute of Chemical Engineers.

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

ÖZ GEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Sonnur GÖKÇE

Eğitim Derecesi	Okul-Program	Mezuniyet yılı
Lisans	Hitit Üniversitesi-Kimya Mühendisliği	2013

Bilimsel Çalışmalar

- 1) Polimer Bazlı Gümüş Nanopartiküllerin Sentezi ve Çimento Öğütme Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi (FMB-BAP 23-0607), Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Araştırmacı, 2023-2025.
- 2) Gökçe, S. ve Eser, F. (2024). Nanopartiküllerin çimento performansına etkileri, Bölüm V. “Innovative Approaches in Chemistry, Safety and Material Science” Bidge Publications (Kitap Bölümü).
- 3) Sonnur Gökçe, Ferda Eser, "Polimer-Nano Kompozitlerinin Çimento Öğütme Yardımcısı Olarak Kullanılması", Uluslararası Malzeme Bilimi ve İmalatı Konferansı (ICMSM 2025), 29–30 Mayıs 2025, Türkiye (sözlü bildiri).