

Farklı Öğütme Koşullarının Kurşun-Çinko Flotasyonu Üzerindeki Etkisi

Işıl Tokcan

**DOKTORA TEZİ**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2017

Effect of Different Grinding Conditions on Lead-Zinc Flotation Performance

Işıl Tokcan

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Mining Engineering

May 2017

FARKLI ÖĞÜTME KOŞULLARININ KURŞUN-ÇİNKO  
FLOTASYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Işıl Tokcan

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

Danışman: Prof. Dr. Volkan Bozkurt

Bu Tez ESOGÜ BAP tarafından “2015-697 ve 2017-1625” kodlu projeler çerçevesinde desteklenmiştir.

Mayıs 2017

## ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Işıl Tokcan'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Farklı Öğütme Koşullarının Kurşun-Çinko Flotasyonu Üzerindeki Etkisi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Volkan Bozkurt

**İkinci Danışman** : -

**Doktora Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Volkan Bozkurt

**Üye** : Prof. Dr. Yaşar Uçbaş

**Üye** : Prof. Dr. Hakan Benzer

**Üye** : Prof. Dr. Ender Sönmez

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Okay Altun

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü



## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Volkan BOZKURT danışmanlığında hazırlamış olduğum “Farklı Öğütme Koşullarının Kurşun-Çinko Flotasyonu Üzerindeki Etkisi" başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 26/5/2017

Işıl TOKCAN

İmza

## ÖZET

Cevherin yüzey özellikleri göz önüne alındığında öğütme sürecinde kullanılan suyun galvanik etkileşim üzerinde büyük etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu sebeple öğütme ortamı ve öğütme araçları sülfürlü minerallerin flotasyon verimi ve seçimliliği üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu kapsamda, literatürde yer alan kısıtlı sayıdaki çalışmada flotasyon öncesi kuru öğütmenin cevher tipine ve mineral yapısına bağlı olarak yaş öğütmeye kıyasla avantajlarının olabildiği gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında dik değirmende kuru ve çubuklu değirmende yaş öğütülerek hazırlanan numunelerin flotasyon performansı üzerinde yarattığı etkiler incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Kuru ve yaş öğütülen numuneler ile yapılan flotasyon testleri sonucunda, kuru öğütmenin yaş öğütmeye kıyasla galenit-sfalerit cevherinin flotasyon performansını olumlu yönde etkilediği saptanmıştır. Yaş ve kuru öğütme arasında bulunan bu farkın öğütme mekanizmalarının farklılığından kaynaklandığı düşünülerek nedenleri tane şekli, tane boyu dağılımı, serbestleşme ve pülp potansiyeli parametreleri incelenerek araştırılmıştır. Tane şekil analizi ile yapılan incelemeler sonucunda ise yuvarlaklık ve pürüzlülük parametrelerinde küçük çaplı farklılıklar bulunmuştur. SEM analizi ile tane yüzey özelliklerinin fraksiyonel olarak karşılaştırılması sonucunda farklılık gözlemlenmiştir. Numunelerin farklı koşullar altında flotasyon davranımları incelendiğinde, dik değirmenin tane kırılımını faz sınırından gerçekleştirmesi sebebiyle daha yüksek ve seçimli serbestleşme sağladığı düşünülmektedir. Pülpün elektrokimyasal ölçümleri ışığında, çelik değirmende öğütme sürecinde oluşan indirgen ortamın flotasyon performansını düşürdüğü belirlenmiştir. Dik değirmende öğütme sırasında oluşan yükseltgen ortamın ise cevherin flotasyon performansını arttırdığı ancak sfaleritin istenmeyen canlanmasını hızlandırarak seçimliliği azalttığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan reaktifler ile sfaleritin verimli bastırılmasında yeterli performans sağlanamamıştır. Bulgular aynı cevherin farklı mekanizmalarla öğütülmesi sonucunda sistemin pülp kimyası ve seçimli serbestleşmesi üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** flotasyon, kuru öğütme, yaş öğütme, dik değirmen

## SUMMARY

It is well known that the water used in the milling process has an effect on the galvanic interaction when considering the surface properties of ore. Therefore, the milling conditions and the milling equipment play a significant role on the efficiency of the sulphide mineral flotation. In the limited amount of work presented in the literature it is stated that the dry grinding prior to flotation is advantageous depending on the ore type and mineral structure. In this current work, the flotation performance of the samples prepared either by dry grinding in vertical mill or by wet grinding in a rod mill are compared and the effects of dry and wet grinding are evaluated.

As a result of the flotation tests carried out followed by dry and wet grinding, it is observed that the flotation performance of the galenite-sphalerite ore is better for dry grinding relative to the wet grinding. Considering the difference between the grinding mechanisms, parameters such as grain morphology, particle size distribution and pulp potential are investigated.

It is observed that there has been a slight change in the roundness and roughness of the samples. No difference was observed as a result of the fractional comparison of the particle surface properties through scanning electron microscopy analysis. When investigating the flotation behavior of the samples under various conditions, the vertical mill probably provides higher and selective liberation due to the fracture mostly along the grain boundaries. Electrochemical analysis of the pulp showed that the reducing media during steel grinding hinders the flotation performance. The oxidizing conditions in the vertical mill increases the flotation performance however; by accelerating the undesired reactivity of the sphalerite the selectivity decreases. The flotation agents used in this particular study didn't result in an adequate performance of the selective sphalerite depression. In conclusion, the change in the grinding mechanism of identical samples has a significant effect on the pulp chemistry and selective liberation.

**Keywords:** flotation, dry grinding, wet grinding, vertical mill

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın başlangıcından sonuna kadar her aşamada yanımda olup bana yol gösteren ve destekleyen değerli hocam Prof. Dr. Volkan BOZKURT'a, her zaman güler yüzü ile yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Yaşar UÇBAŞ'a verdikleri destek ve ilgiden ötürü çok teşekkür ederim.

Lisans hayatımdan beri hiçbir zaman desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Hakan BENZER'e, bu tez çalışmasına ayırdığı zaman, gösterdiği ilgi ve yaptığı değerli katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Deneyleerin yapımı esnasında yardım ve desteğini esirgemeyen Dr. Serkan Gökçen ve ihtiyacım olan her anımda yanımda olan sevgili oda arkadaşım Dr. Ece Kundak'a çok teşekkür ederim. Bu çalışma için hazırladığımız Bilimsel Araştırma Projesi'ne (Proje kodu:2015-697, 2017-1625) destek vererek sağladığı maddi destek sebebiyle, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi'ne ve sağladığı ekipman ve olanaklardan dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Mesleğimi sevmem ve seçmemde etkili olan, her zaman bana yol gösteren, bu çalışmada ve nicelerinde katkıda bulunan canım babama, bu süreçte en çok yorulan ama her koşulda arkamda duran, destekleyen ve moral veren canım anneme, ne kadar uzakta olursak olalım her zaman yanı başımda olduğunu hissettiren canım kardeşime teşekkürü borç bilirim.

Doktora çalışmamın başından beri desteğini esirgemeyen, bana inanan, gerektiğinde yol gösterip moral veren, her zaman arkamda duran, bu süreçte her türlü zorluğa benimle birlikte katlanan canım eşim, meslektaşım Sertaç TOKCAN'a sonsuz teşekkür ederim. Ve son olarak ilerde bir gün bu sayfayı okuyabildiğinde tez çalışmamı kendisine ithaf ettiğimi ve sayesinde hem zorlandığım hem de zorluklar karşısında dimdik durabildiğimi bilmesini istediğim canım kızım Nil TOKCAN'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	VI
<b>SUMMARY</b> .....	VII
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	VIII
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	IX
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	XI
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	XIV
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	XV
<b>1 GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	4
2.1 Galenit Flotasyonu .....	4
2.1.1 Toplayıcı etkisi .....	4
2.1.2 Pülp potansiyel etkisi .....	7
2.1.3 Galvanik etkileşim .....	10
2.1.4 pH etkisi .....	15
2.2 Sfalerit Flotasyonu .....	18
2.2.1 Toplayıcı etkisi .....	18
2.2.2 Sfaleritin canlandırılması .....	20
2.2.3 Pülp potansiyel etkisi .....	22
2.2.4 Galvanik etkileşim .....	23
2.2.5 pH etkisi .....	25
2.3 Galenit-Sfalerit Flotasyonu .....	26
2.4 Galenit-Sfalerit Flotasyon Performansına Etki Eden Parametreler .....	34
2.4.1 Öğütme mekanizmalarının etkisi .....	34
2.4.2 Kuru ve yaş öğütme etkisi .....	38
2.4.3 Tane boyut etkisi .....	43
2.4.4 Tane morfoloji etkisi .....	45
<b>3 MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	48
3.1 Malzeme .....	48
3.2 Yöntem .....	50
3.2.1 Öğütme deneyleri .....	51

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2 Flotasyon deneyleri .....	52
3.2.3 Pülp potansiyel ölçümleri.....	54
3.2.4 Tane boyutu analizi .....	55
3.2.5 Taramalı elektron mikroskobu- SEM (Scanning Electron Microscopy) Analizi .....	55
3.2.6 Görüntü analizi.....	56
<b>4 BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>58</b>
4.1 Galenit-Sfalerit Flotasyon Deneyleri .....	59
4.1.1 Galenit flotasyon devresi .....	59
4.1.1.1 <u>pH etkisi</u> .....	<u>59</u>
4.1.1.2 <u>Bastırıcı ve toplayıcı dozajının etkisi</u> .....	66
4.1.1.3 <u>Galenit devresi kinetik flotasyon testleri</u> .....	73
4.1.1.4 <u>Öğütme koşullarının tane şekil ve morfoloji üzerindeki etkisi</u> .....	81
4.1.1.5 <u>Öğütme koşullarının galenit flotasyon performansı üzerindeki etkisi</u> .....	84
4.1.1.6 <u>Öğütme koşullarının galenit mineralinin elektrokimyası üzerindeki etkisi</u> .....	92
4.1.2 Çinko flotasyon devresi.....	96
4.1.2.1 <u>pH ve toplayıcı dozajı etkisi</u> .....	97
4.1.2.2 <u>Sfalerit devresi kinetik flotasyon testleri</u> .....	99
4.1.2.3 <u>Öğütme koşullarının sfalerit flotasyon performansı üzerindeki etkisi</u> ....	105
4.1.2.4 <u>Öğütme koşullarının sfalerit mineralinin elektrokimyası üzerindeki etkisi</u> .....	108
<b>5 SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>111</b>
5.1 Sonuçlar .....	111
5.2 Öneriler .....	114
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>116</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR .....</b>	<b>129</b>
Ek açıklama-A: MLA analiz verileri .....	130
Ek açıklamalar-B: SEM mikroskobu görüntüleri .....	134
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>158</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ksantatın galenit yüzeyine kimyasal tutunmasının şematik gösterimi.....	6
2.2. Saf galenit mineralinin farklı toplayıcılar kullanımı ile değişen verim değerleri.....	7
2.3. Galenit verimi ve pülp potansiyel ilişkisi.....	9
2.4. Öğütme sırasında öğütme ortamı ve mineraller arasındaki galvanik etkileşimin şematik gösterimi.....	11
2.5. Galenit-pirit etkileşimin galenit flotasyonu üzerindeki etkisi .....	12
2.6. Zamana karşı etil-ksantat kaplı galenit taneciklerinin flotasyon verimi.....	13
2.7. Galenit mineralinin farklı öğütme ortamlarında verim-pülp potansiyeli ilişkisi.....	14
2.8. Sodyum dietil ditiyofosfat konsantrasyonu ve kritik pH değerleri arasındaki ilişki ....	16
2.9. Galenit flotasyon veriminin pH değerlerine bağlı değişimi .....	16
2.10. Pirit flotasyon veriminin değişen potasyum etil ksantat dozajlarında pH'a bağlı değişimi .....	16
2.11. Pirit kullanımının değişen pH değerlerinde verim üzerindeki etkisi .....	18
2.12. Sfalerit flotasyon veriminin farklı ksantat kullanımında pH'a bağlı değişimi .....	19
2.13. Sfalerit verimi ve pülp potansiyel ilişkisi .....	22
2.14. Öğütme ortamının sfalerit mineralinin pülp potansiyeli üzerindeki etkisi .....	24
2.15. Öğütme ortamının sfalerit mineralinin flotasyon verimi üzerindeki etkisi .....	24
2.16. Sfalerit flotasyon veriminin pH'a bağlı değişimi .....	26
2.17. Sodyum siyanürün pirit ve galenit flotasyonu üzerindeki etkisi .....	28
2.18. Century Mine kurşun -çinko akım şeması .....	32
2.19. Red Dog Mine kurşun-çinko flotasyon devresi akım şeması .....	33
2.20. Dik değirmen ve geleneksel tamburlu değirmende öğütülen nikel sülfid mineralinin tane boyu dağılımları.....	36
2.21. Farklı numunelere ait sıkıştırma ile kırılma sonucu oluşan tane görünümleri .....	37
2.22. Çelik değirmende kuru ve yaş olarak öğütülen Rosh Pinah madenine ait kurşun- çinko sülfürlü cevherinin pülp potansiyeli .....	40
2.23. Rosh Pinah cevherinin farklı öğütme şartlarında galenit ve sfalerit verimleri .....	41
2.24. SIBX toplayıcısının sülfürlü mineral taneleri üzerine soğurum kinetiği.....	42
2.25. Flotasyon zamanına bağlı olarak birikimli sülfür verimi değişimi.....	42
2.26. Farklı mineral sistemlerinin tane boyutuna bağımlı flotasyon verimleri .....	44
2.27. Pülpün katı konsantrasyon değişiminin verim ve tenör üzerindeki etkisi.....	45
3.1. Deneylerde kullanılan numuneler.....	48
3.2. RM-50, LM-1 ve LM-2 numunelerinin tane boyut analizi .....	50
3.3. RM-20 ve LM-3 numunelerinin tane boyut analizi.....	50
3.4. Tez çalışması akım şeması .....	51
3.5. a) Deneylerde kullanılan çubuklu değirmen b) Pilot ölçekli Loesche değirmeni .....	52
3.6. Deneylerde kullanılan flotasyon makinesi .....	53
3.7. Tane boyutu ölçüm cihazı.....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.8. Tane analiz cihazı .....	56
3.9. Eşdeğer elips alan uzunluğu (L) ve genişliği (W) .....	57
4.1. Kurşun verim ve pH ilişkisi.....	61
4.2. Kurşun tenör ve pH ilişkisi.....	61
4.3. Kurşun tenör ve verim ilişkisi .....	62
4.4. Kurşun konsantresindeki çinko verimi ve pH ilişkisi.....	63
4.5. Kurşun konsantresindeki demir verimi ve pH ilişkisi .....	64
4.6. Kurşun konsantresindeki sülfür verimi ve pH ilişkisi .....	64
4.7 Kurşun konsantresindeki gümüş verimi ve pH ilişkisi.....	65
4.8. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi.....	68
4.9. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun tenörü ve toplayıcı dozajı ilişkisi.....	69
4.10. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantresindeki çinko verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1500 g/t, NaCN: 250 g/t ....	69
4.11. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantresindeki demir verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1500 g/t, NaCN: 250 g/t ....	71
4.12. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantresindeki sülfür verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1500 g/t, NaCN: 250 g/t ....	71
4.13. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantresindeki gümüş verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> :1500 g/t, NaCN: 250 g/t ....	72
4.14. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı davranımı b) Kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi .....	74
4.15. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kurşun konsantresinin çinko ve kurşun seçimliliği b) Kurşun konsantresinin demir ve kurşun seçimliliği.....	74
4.16. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kurşun konsantresindeki sülfür ve kurşun seçimliliği b) Kurşun konsantresindeki gümüş ve kurşun seçimliliği.....	75
4.17. Kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı değişimi a) RM-20 b) LM-3 numunesi ..	77
4.18. Kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi a) RM-20 b)LM-3 numunesi .....	77
4.19. Kurşun konsantresindeki çinko veriminin zamana bağlı değişimi a) RM-20 ve LM-3 numunesi .....	78
4.20. Kurşun ve çinko mineralleri arasındaki seçimlilik a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	78
4.21. Kurşun ve demir mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	79
4.22. Kurşun ve sülfür mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	79
4.23. Kurşun ve gümüş mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	80
4.24. Numunelerin yuvarlaklık analizi .....	82
4.25. Numunelerin pürüzsüzlük analizi .....	82



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.26. Numunelerin uzunluk oranı .....	83
4.27. a) 20 µm boyutlu b) 50 µm boyutlu numunelerin kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı değişimi .....	85
4.28. Farklı tane boyutundaki numunelere ait kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı değişimi .....	86
4.29. a) 20 µm boyutlu b) 50 µm boyutlu numunelerin kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi .....	87
4.30. Farklı tane boyutundaki numunelere ait kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi.....	87
4.31. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kurşun konsantresindeki çinko ve kurşun seçimliliği b) kurşun konsantresindeki demir ve çinko seçimliliği.....	89
4.32. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kurşun konsantresindeki sülfür ve kurşun seçimliliği b) kurşun konsantresindeki gümüş ve kurşun seçimliliği .....	90
4.33. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kurşun konsantresindeki sülfür ve demir seçimliliği b) kurşun konsantresindeki sülfür ve çinko seçimliliği.....	92
4.34. Pülp potansiyelinin zamana bağlı değişimi .....	94
4.35. Farklı pH değerlerinde çinko verim ve tenör ilişkisi a) SIPX:60 g/t, b) SIPX:90 g/t kullanımında.....	98
4.36. Farklı pH değerlerinde çinko ve demir seçimliliği a) SIPX:60 g/t, b) SIPX:90 g/t ...	98
4.37. Farklı pH değerlerinde çinko ve gümüş seçimliliği a) SIPX:60 g/t, B) SIPX:90 g/t .	99
4.38. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kümülatif çinko veriminin zamana bağlı davranımı b) Kümülatif çinko verim ve tenör ilişkisi .....	100
4.39. Çinko konsantresindeki sülfür ve çinko seçimliliği .....	101
4.40. Çinko konsantresindeki a) demir ve çinko seçimliliği b) gümüş ve çinko seçimliliği .....	101
4.41. Kümülatif çinko veriminin zamana bağlı değişimi a) RM-20 b) LM-3 numunesi ..	103
4.42. Kümülatif çinko verim ve tenör ilişkisi a) RM-20 b)LM-3 numunesi.....	103
4.43. Çinko ve demir mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	104
4.44. Çinko ve sülfür mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	104
4.45. Çinko ve gümüş mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi .....	105
4.46. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kümülatif çinko veriminin zamana bağlı değişimi b) kümülatif çinko verim-tenör ilişkisi.....	106
4.47. 20 µm ve 50 µm boyutlu numunelerin a) çinko konsantresindeki demir ve çinko seçimliliği b) çinko konsantresindeki sülfür ve çinko seçimliliği.....	108

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1. Sülfür minerallerinin durum potansiyelleri .....	10
2.2. Balıkesir Balya kurşun-çinko flotasyon tesisinde kullanılan reaktifler.....	31
2.3. Kuzeybatı Queensland'da yer alan madenlerin ön flotasyon ve kurşun flotasyonunda kullanılan reaktifler ve çinko verimleri.....	33
3.1. Çalışmada kullanılan cevherlerin kimyasal analizi .....	49
3.2 RM numunesine ait fraksiyonel serbestleşme verileri.....	49
3.3. Flotasyon testlerinde kullanılan reaktifler ve eklenme noktaları.....	54
4.1. pH etkisinin incelendiği galenit flotasyonu deney koşulları .....	59
4.2. Farklı bastırıcı ve toplayıcı miktarlarında gerçekleştirilen galenit flotasyonu deney koşulları.....	67
4.3. Kinetik galenit flotasyon deney koşulları .....	73
4.4. Farklı pülp yoğunluğunda kinetik galenit-sfalerit flotasyon deney koşulları.....	76
4.5. Tane şekil analiz sonuçları .....	82
4.6. pH etkisinin incelendiği sfalerit flotasyonu deney koşulları .....	97
4.7. Kinetik sfalerit flotasyonu deney koşulları.....	100

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

Zn	çinko
dk.	dakika
Fe	demir
dev	devir
kWsa	kilovat saat
Pb	kurşun
O	oksijen
t	ton

### Açıklama

### Kısaltmalar

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
VRM	Dik valsli değirmen
EDX	Enerji yayıcı X-ışını analizörü
LM-3	Kuru öğütme numunesi (1)- 20 $\mu$ m
LM-2	Kuru öğütme numunesi (1)- 50 $\mu$ m
LM-1	Kuru öğütme numunesi (1)-50 $\mu$ m
MTA	Maden Tetkik Arama
MIBC	Metil Izobütil Karbinol
MLA	Mineral serbestleşme analizi
AG	Otojen öğütme
KAX	Potasyum amil ksantat
KEX	Potasyum etil ksantat
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UK	United Kingdom
Et al., vd	ve diğerleri
SAG	Yarı otojen öğütme
RM	Yaş öğütme numunesi
HPGR	Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler

### Açıklama

## 1 GİRİŞ VE AMAÇ

Öğütme kendisinden sonra gelen flotasyon ve liç gibi proseslerin gerçekleşebilmesi için gerekli tane boyutunun sağlandığı ve en yüksek enerjinin tüketildiği aşamadır. Endüstride artan enerji tüketimine karşı stratejiler ikiye ayrılmıştır: ilki ufalanma işleminden kaçınmak, ikincisi ise verimli ufalama teknolojileri kullanmaktır. Bu yüzden son yıllarda öğütme maliyetini düşürmek ve öğütme verimliliğini arttırmak için değişik prensiplerle çalışan çok sayıda değirmen tasarlanmıştır. Bu değirmenler arasında bulunan dik değirmen çimento ve maden endüstrisinde önemli bir yere sahiptir.

Literatürde konvansiyonel ve dik değirmenlerin enerji tüketim kıyaslanması birçok çalışmada yer almaktadır. Çimento öğütmesi sırasında kullanılan dik değirmenin %30 enerji tasarrufu sağladığı belirlenmiştir (Schaefer, 2002). Çimento endüstrisinin yanı sıra dik değirmenin avantajları mineral endüstrisinde de görülmektedir. Çinko AG/SAG-bilyalı değirmen devresi yerine cevherinin dik değirmende öğütülmesi sonucunda öğütme için harcanan toplam enerjinin 20,11'den 11,40 kWsa/t'a indiği saptanmıştır (Drunick vd., 2010).

Öğütme yalnızca boyut küçültme için kullanılan fiziksel bir yöntem olarak düşünülmemelidir aynı zamanda minerallerin yüzeyinde karmaşık kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği aşamadır. Farklı öğütme teknikleri farklı öğütme koşulları ve dolayısıyla farklı pülp kimyaları yaratmaktadır. Dolayısıyla değerli mineralin serbestleşme derecesine, tane boyut dağılımına veya yüzey özelliklerine olan etkileri sonucu flotasyon verimlerinde önemli değişiklikler görülmektedir. Flotasyon işleminin sulu ortamda uygulanmasından dolayı öncesinde öğütme işleminin yaş gerçekleştirilmesi endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat su sıkıntısı çekilen bölgelerde veya öğütme sonrası süreçlerin kuru olarak gerçekleştiği durumlarda kuru öğütme daha çok kullanılmaktadır. Kompleks sülfürlü cevherlerde, kuru ve yaş öğütmenin flotasyon üzerine etkilerinin karşılaştırıldığı kısıtlı sayıda çalışma literatürde yer almaktadır (Feng ve Aldrich, 2000; Seke, 2005; Palm vd., 2010; Chapman vd., 2013).

Feng ve Aldrich (2000) platin içeren sülfürlü bir cevher ile gerçekleştirdiği çalışmada, kuru ve yaş öğütme şartlarına bağlı olarak flotasyon sonucu elde edilen ürünlerin yüzey özellik farklılıklarını Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Scanning Electron Microscopy) ve Atomik Güç Mikroskobu (AFM, Atomic Force Microscopy) ile karakterize etmiştir. Çalışma sonucunda, yaş öğütülen örneklerin daha düzgün ve temiz yüzeylere sahipken, kuru öğütülenlerin daha pürüzlü tane yüzeylerine ve çok miktarda mikro yapısal bozukluğa sahip olduklarını ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, kuru öğütme sonrasında aktive edilmiş yüzeylere flotasyon reaktiflerinin daha hızlı soğurulduğunu vurgulamışlardır (Feng ve Aldrich, 2000).

Seke (2005) kurşun-çinko sülfürlü cevheriyle gerçekleştirdiği çalışmada, flotasyon öncesi kuru ve yaş öğütme sonucunda pülp potansiyelinin ve minerallerin yüzey özelliklerinin değişmesine bağlı olarak minerallerin flotasyon verimlerinin değişiklik gösterdiğini ve buna bağlı olarak kuru öğütme şartlarında sfalerit veriminin artarken, galenit veriminin azaldığını gözlemlemiştir. Palm vd. (2010) kurşun-çinko cevheriyle gerçekleştirdikleri çalışmada, flotasyon öncesi kuru ve yaş öğütmenin flotasyon üzerine etkilerini incelemişler ve Seke'nin (2005) çalışmasında elde edilen veriler paralelinde, flotasyon öncesi kuru öğütme koşulunda, yaş öğütmeye nazaran daha yüksek sfalerit verimi ve tenörü elde etmişlerdir.

Chapman vd. (2013), flotasyon öncesi kuru ve yaş öğütmenin, sfalerit cevheri ve platin grubu mineralleri içeren cevherlerin flotasyonu üzerine etkilerini inceledikleri çalışma sonucunda, kuru öğütülen sfalerit cevherinin flotasyonunda sfaleritin verim ve tenörünün arttığını ancak platin grubu mineralleri içeren cevherin flotasyonunda platin grubu minerallerin verim ve tenörlerinin ise azaldığını bulmuşlardır.

Taneler arası kırılım öğütme devresindeki enerji sarfiyatı ve duraylılık açısından yarar sağlamaktadır. Taneler arası kırılım, seçimli kırılmaya neden olmakta ve mineralojik analiz sonuçlarına göre de değerli mineralin serbestleşmesini arttırmaktadır. Seçimli kırılmaya ek olarak taneler arası öğütme makinelerinde göreceli olarak daha kısa sürelerde kalarak daha dik dağılıma sahip ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Flotasyonda beslemenin tane boyu dağılımının önemi literatürde detaylı olarak açıklanmıştır. Kısaca flotasyon için uygun olan tane boyunun altında veya üstünde flotasyon veriminin olumsuz yönde

etkilendiği söylenebilir. Taneler arası kırılım yapan dik değirmenlerle yapılan öğütme sonucunda tane boyu dağılımında geleneksel öğütmeye kıyasla daha az ince ve iri malzeme olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla geleneksel öğütmeye kıyasla daha az viskoz ürün elde edilmekte ve daha yüksek pülp yoğunluklarında çalışılabilmektedir (Crosbie vd, 2005).

Değirmende sülfürlü mineraller ve öğütme ortamı arasında gerçeklesen galvanik etkileşimler ortamdaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunu düşürerek demir hidroksitlerin oluşmasına dolayısıyla da flotasyon veriminin düşmesine neden olmaktadır. Dik değirmenlerde yapılan öğütmenin kuru gerçekleştirilmesi nedeniyle değirmenlerde gerçekleşen kimyasal tepkimeler ve elektrokimyasal etkiler ortadan kalkmakta ve malzeme güçlü indirgen bir ortama maruz kalmamaktadır. Bu sayede değirmende gerçekleşen aşınma geleneksel değirmenlere kıyasla çok daha az olmaktadır.

Bu çalışmada, farklı öğütme mekanizmalarının ve flotasyon öncesi kuru ve yaş öğütmenin kompleks sülfürlü galenit–sfalerit cevheri flotasyonuna olabilecek etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve olası farklılıkların tane boyu dağılımı, serbestleşme, tane şekli ve pülp potansiyeli üzerindeki etkileri değerlendirilip, nedenleri ile açıklanmaya çalışılmıştır.

## 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Flotasyon, minerallerin fiziko-kimyasal yüzey özellikleri farklarından yararlanarak ayırım yapma temeline dayanan bir zenginleştirme yöntemidir. 20. yüzyılın başından itibaren, minerallerin ayırımında çok önemli bir role sahiptir. Zamanla azalan yüksek tenörlü ve problemsiz metal sülfür yatakları nedeniyle daha önce işlenmesi uygun görülmeyen pek çok düşük tenörlü ve kompleks maden yatağının işletilmesi, flotasyonun uygulanmaya başlanmasından günümüze kadar geçen süre içinde kaydedilen gelişmeler sayesinde sağlanmıştır.

Sülfürlü minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntem flotasyondur. Flotasyonun uygulanmaya başlanmasından günümüze kadar geçen süre içinde farklı minerallerin flotasyon davranışlarının incelenmesi ve toplayıcı-mineral etkileşim mekanizmasının anlaşılması adına birçok araştırma yapılmıştır. Kimyasal ve fiziksel birçok faktörün etkilediği bakır, çinko ve kurşun gibi kompleks sülfürlü cevherlerin flotasyonu birçok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Sülfürlü minerallerin yüzebilirliği, yüzdürülen veya bastırılan minerallerin özellikleri, sülfürlü minerallerin flotasyon sisteminde kullanılan reaktifler ve çeşitli iyonların flotasyon üzerindeki etkileri gibi birçok konu literatürde tartışılmıştır.

### 2.1 Galenit Flotasyonu

#### 2.1.1 Toplayıcı etkisi

Galenit (PbS) en sık rastlanan kurşun mineralidir. Oksitlenme derecesine bağlı olarak kurşun cevheri büyük miktarda seruzit ve anglezit barındırabilir. Galenit genellikle gümüş gibi değerli veya kolaylıkla yüzebilen pirit ve pirotit gibi değersiz demir sülfidlerle bağlı durumdadır. Özellikle büyük miktarlarda bulunan pirit minerali geri kazanım ve seçimliliği büyük ölçüde azaltmaktadır.

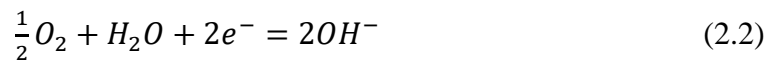
Galenitin tiol toplayıcı kullanımıyla geniş bir pH aralığında iyi verimle yüzdüğü bilinmektedir. Sülfürlü mineral flotasyonunda ksantat, ditiyofosfat ve tionokarbonatlar

sıklıkla kullanılan tiol toplayıcılarıdır. Ksantatın, sülfürlü mineralin yüzeyine bağlanmasının elektrokimyasal bir süreç olduğu ve redoks potansiyelleri tarafından kontrol edildiği genel olarak kabul görmüş bir bilgidir (Richardson ve Walker, 1985; Buckley ve Woods, 1997). Bu elektrokimyasal süreçte toplayıcının mineral yüzeyine soğurumu, mineral yüzeyinde eş zamanlı gerçekleşen iki yarı tepkime sayesinde olmaktadır. Katodik yarı tepkime genellikle çözeltilerde bulunan çözülmüş oksijenin indirgenmesi şeklinde gerçekleşirken, anodik tepkime ise toplayıcı ve mineral yüzeyi arasında meydana gelmektedir (Eşitlik 2.1 ve 2.2) (Woods, 1976).

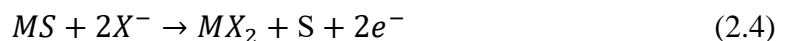
Asidik ortamda,



Alkali ve nötr ortamda



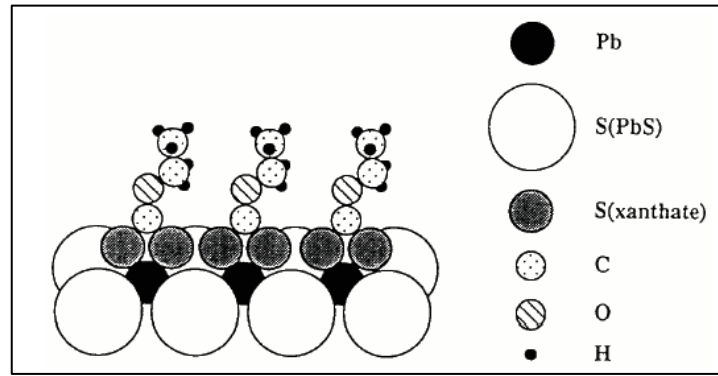
Anodik tepkimelerin bir kısmı kimyasal soğurum (chemisorption) şeklinde gerçekleşebilir;



Eşitliklerde yer alan MS, MX<sub>2</sub>, X, X<sub>ads</sub>, X<sub>2</sub> ve "S" sırasıyla sülfürlü mineral, metal ksantat, ksantat iyonu, soğurulmuş ksantat, diksantojen/ditiolat ve elementel sülfürü simgelemektedir. İlk eşitlikte ksantat iyonunun kimyasal olarak soğurulması gerçekleşirken (2.3), ikinci eşitlikte metal ksantat oluşmaktadır (2.4). Metal ksantatlar toplayıcının oksitlenmesi sonucu oluşabilir. Üçüncü eşitlikte (2.5) yüzeyde ya da çözeltilerde oluşan diksantojenin mineral yüzeyini hidrofobik hale getirmek için anahtar adım olduğu düşünülmektedir. Diksantojen aracılığıyla artan mineral hidrofobikliği flotasyon

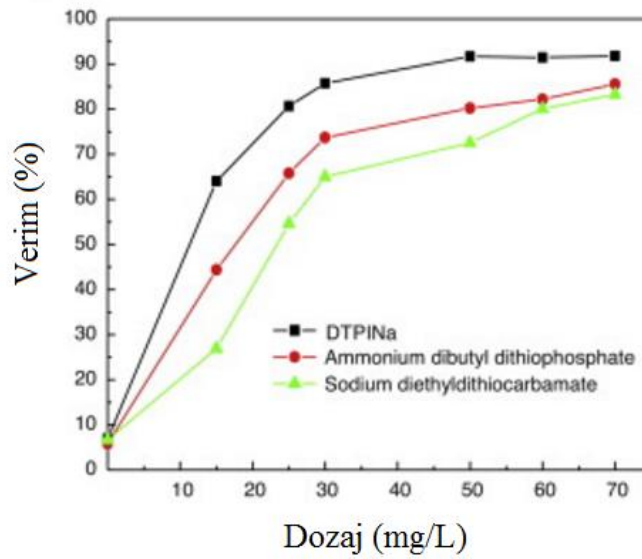


performansının iyileşmesini sağlamaktadır (Buswell vd. 2002; Ekmekçi vd. 2005). Gerçekleşen bu yarı tepkimelerin engellenmesi ve mineral yüzeyinde oluşan oksitlenme sebebiyle mineral yüzeyinde demir hidroksit veya bazik sülfat gibi hidrofilik bileşiklerin oluşması sonucu sülfürlü minerallerin flotasyonu olumsuz yönde etkilenebilir. Bu sebeple ksantat kullanılan koşullarda,  $X_{ads}$ ,  $MX_2$  veya  $X_2$  bileşiklerinden bir veya birden fazlasının sülfürlü minerallerin yüzeyinde bulunması durumunda flotasyonun gerçekleşmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 2.1. Ksantatın galenit yüzeyine kimyasal tutunmasının şematik gösterimi

Kimyasal soğurum mineral yüzeyindeki toplayıcı molekülleri ve metal atomlarının bağlanmasını kapsar. Etil ksantatın galenit yüzeyine tutunması Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Alt kısımdaki yuvarlak şekiller galenit yüzeyindeki sülfürü (beyaz) ve kurşunu (siyah) temsil etmektedir. Ksantatta bulunan sülfür atomları iyonik karakterde olmadığı için mineraldekine göre daha küçük boyuttadır. Ksantat sülfürleri mineral yüzeyindeki kurşun atomlarına eşit sayıda bağlanmışlardır. Bu bağlanma kurşun ksantat moleküllerinde de oluşmaktadır ancak kimyasal tutunma söz konusu olduğunda metal atomları mineralin kristal kafesinin bir parçası olmaya devam ederler. Çeşitli spektroskopik araştırmalarda da ksantatın mineral yüzeyine bu tip bağlanmasını destekler nitelikte bulgulara ulaşılmıştır (Buckley vd, 2003).



Şekil 2.2. Saf galenit mineralinin farklı toplayıcılar kullanımı ile değişen verim değerleri (Zhoung vd., 2015)

Sodyum-di-izobütil ditiyofosfinat (DTPiNa), ticari ismi ile Aerophine 3418A, dünyada kurşun-çinko seçimli ayırımı için kullanılan en başarılı toplayıcılardan birisidir (Trahar, 1997). Gerçekleştirdiği iyi ayırımı sebebiyle verimde de artış sağlayan 3418A'nin etkileşim mekanizması araştırılmıştır. Sonuçlara göre 3418A'nin galenit yüzeyine çekim kuvveti piritinkinden fazladır ve hidrofobik DTPiNa ve PbDTPiNa türlerinin varlığının flotasyondaki kilit öğeler olduğu bulunmuştur (Piantadosi ve Smart, 2002). Ayrıca 3418A'nin galenit ve pirit minerallerinin yüzeylerine kimyasal olarak soğrulduğu tespit edilmiştir.

### 2.1.2 Pülp potansiyel etkisi

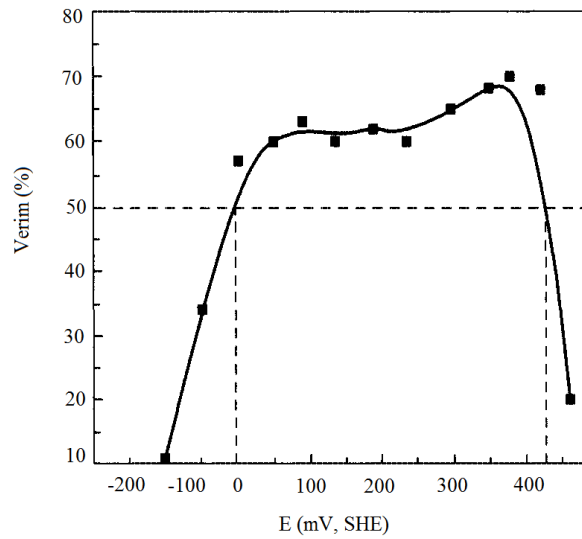
Pülp potansiyeli, flotasyon verimi ile ilişkilendirilebilen önemli elektrokimyasal parametrelerden biridir ve pülpteki minerallerin yükseltgenme/indirgenme kontrolü gibi birçok durumda kullanılabilir. Sülfürlü minerallerin yüzey koşullarının belirlenmesi ve optimum flotasyon bölgelerinin tahmini potansiyel aracılığı ile gerçekleştirilebilir.

Flotasyon sisteminde ölçülen potansiyel, karışım potansiyeli olup mineral ve çözelti potansiyel değerleri arasında bir yerdedir. Flotasyon aşamasında mineraller arasındaki ayırımı gerçekleştirmesi pülp potansiyeline bağlıdır (Trahar, 1984; Richardson ve Walker,

1985). Yüksek saflıkta sülfürlü mineral numuneleri ile mineral elektrotları kullanılarak yapılan elektrokimyasal çalışmalar, bir mineralin toplayıcı ile etkileşiminin mineral yüzeyinde ölçülen elektrokimyasal potansiyel ile kontrol edilebileceğini göstermiştir (Buckley ve Woods, 1982; Allison vd., 1972; Ruonala vd., 1997).

Flotasyon pülpünün potansiyel değeri, sistemde oluşan galvanik etkileşimler sebebiyle kolaylıkla tahmin edilememektedir (Rao vd., 1976; Martin vd., 1992). Sülfürlü mineral flotasyonun gerçekleştiği tesislerde yapılan uygulamalarda pülp potansiyel değerlerinin +50 ve +200 mV arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Grano, 2004). Bu değerler pülp pH değerine, sülfürlü mineral ve öğütme ortamının cinsi ve miktarına (Rao vd., 1976) ayrıca öğütmede ve sonrasındaki hava-pülp temasına bağlıdır (Teague vd., 1999).

Havalandırılan sistemlerdeki pülp potansiyelleri, flotasyonla maksimum mineral ayırımını sağlayabilmek için çok yükseltgendir. Her mineral için flotasyonun başladığı kendine özgü bir potansiyel değeri vardır. Galenit mineralinin değişen potansiyel değerlerine bağlı olarak verimindeki değişim Şekil 2.3'de görülmektedir. Galenitin 0 ve 0,41 mV arasındaki değerlerde yüzdüğü bu değerlerin altında ve üstünde ise flotasyon veriminin kötü olduğu söylenebilir. Minerallerin yüzdüğü pülp potansiyeli aralıklarının belirlenmesi ve kontrolü ile bu minerallerin seçimli olarak birbirlerinden ayrılması sağlanabilir. Ancak çok anodik potansiyel değerlerinde, özgün değer aralıkları çakışıp bazı minerallerin eşzamanlı yüzmelerine neden olarak seçimliliği azaltabilir (Ralston, 1991; Chander, 2003). Flotasyon hücresinde gerçekleşen potansiyel değişimleri gözlemlenerek reaktiflerin eklenme noktaları belirlenip, tenör ve verim değerleri arttırılabilir (Chander, 2003). Ayrıca Eh-pH verilerinin toplanması reaktif miktarlarının azaltılmasına ve flotasyon tesislerinde sorunların çözülmesine yardımcı olabilecek ilave bilgi elde edilmesine olanak sağlar (Johnson ve Munro, 1988).



Şekil 2.3. Galenit verimi ve pülp potansiyel ilişkisi (Hu vd.,2010 )

Redoks özelliklerinin gözlenebilmesi için genellikle aşınmaya karşı dayanıklılığı sebebiyle platinyum elektrotlar gösterge elektrotu olarak kullanılır. Aynı çözelti içinde bile olsa farklı malzemelerden yapılan elektrotlar farklı Eh değerleri verebilirler (Labonte ve Finch, 1988). Diğer taraftan aynı mineral için ölçülen potansiyel değerleri farklı pH ve toplayıcı konsantrasyonlarında da değişiklik gösterebilir.

Sülfürlü mineral sistemlerinin birçoğunda çözünen oksijenin sistemden uzaklaşmasıyla pülp potansiyel değerleri daha indirgeyici (katodik) değerlere ulaşır yani düşer. Sülfürlü minerallerin çoğunlukla çelik değirmenlerde öğütülmesi sebebiyle pülp potansiyellerinin çok düşük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (Woodcock ve Jones, 1970 a, b; Graham ve Heathcote, 1982; Grano vd., 1994). Tiol toplayıcıların soğurumu Eh değerlerine bağlı olduğundan eğer flotasyon öncesi yeterli havalandırma sağlanmazsa minerallerin yüzebilirlikleri büyük oranda azalabilir. Değirmenin içindeki oksijen tükenene kadar oksijenle reaksiyona giren ortamın yükseltgenmesi devam eder. Sonrasında ise pH değerlerinde ani düşüş görülürken mineral yüzeylerinde hidroksil iyonları oluşmaya başlar. Öğütme ortamı ve sülfürlü mineraller arasındaki etkileşimin flotasyon pülpü üzerindeki indirgeyici etkisine birçok çalışmada yer verilmiştir (Forssberg vd., 1993; Leppinen vd., 1998; Martin vd., 1991; Yuan vd., 1996 a,b).

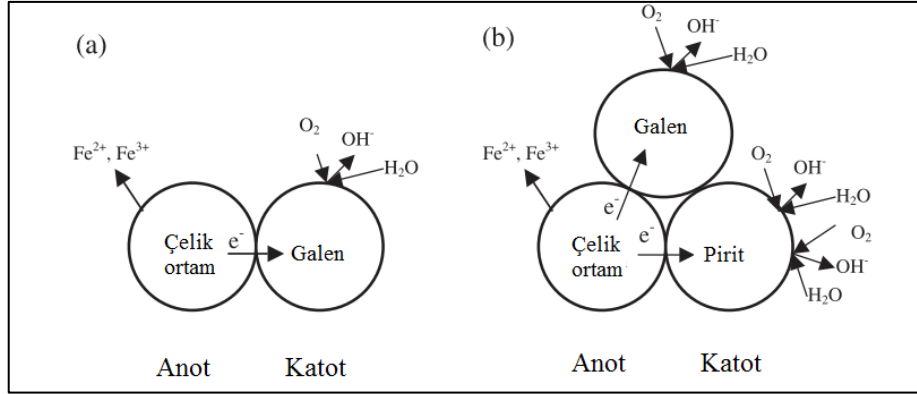
### 2.1.3 Galvanik etkileşim

Sülfürlü minerallerin birbirleriyle ve/veya öğütme ortamıyla galvanik etkileşiminin, flotasyon özelliklerini önemli oranda etkilediği birçok araştırmacı tarafından saptanmıştır (Iwasaki, 1983; Kocabağ ve Smith, 1985; Rao ve Finch, 1988; Yelloji Rao ve Natarajan, 1989 a; Yelloji Rao ve Natarajan, 1989 b; Cheng ve Iwasaki, 1992). Sistemde tek sülfürlü mineral olduğunda, katodik ve anodik tepkimeler aynı mineral üzerinde gerçekleşirken bu iki tepkimenin devresi mineral üzerinde tamamlanır. Ancak iki sülfürlü mineral birbiri ile temas halinde olduğu zaman, birinden diğerine elektron transferi, yani galvanik etkileşim, meydana gelir. Galvanik etkileşim minerallerin durum potansiyelleri ile belirtilen elektrokimyasal aktivitelerinin birbirlerinden farklı olması ile ortaya çıkar. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi en yüksek durum potansiyeline sahip mineral pirittir. Yüksek durum potansiyeline sahip mineraller katot, düşük durum potansiyeline sahip mineraller ise anot görevi görürler.

Çizelge 2.1. Sülfür minerallerinin durum potansiyelleri (Majima, 1969)

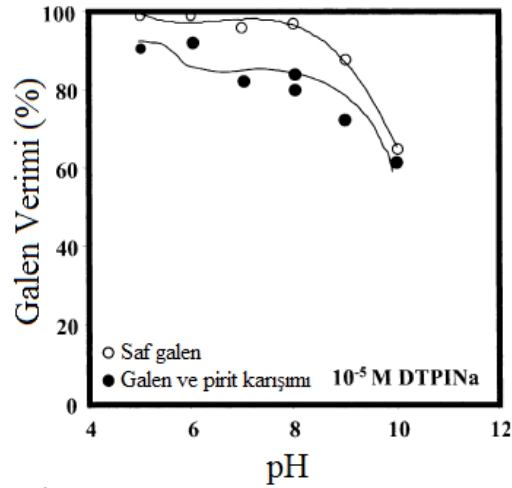
Mineral	Durum Potansiyeli, V
Pirit	0,66
Markasit	0,63
Kalkopirit	0,56
Sfalerit	0,46
Kovalit	0,45
Bornit	0,42
Galenit	0,40
Arjantit	0,28
Stibnit	0,12
Molibdenit	0,11

Öğütme boyunca mineraller ve sıklıkla kullanılan çelik öğütme ortamı arasında süreklilik taşıyan bir etkileşim bulunmaktadır. Mineral ve çelik öğütme ortamı arasındaki galvanik etkileşim iki mineral arasındakine kıyasla çok daha karmaşıktır. Çeliklerin durum potansiyelleri sülfür minerallerinden daha düşük olduğundan daha aktiftirler. Dolayısı ile çelik öğütme ortamında öğütülen sülfürlü mineraller katot davranımı gösterirken, pülpte demir iyonu açığa çıkmasına neden olan çelik öğütme ortamı anot gibi davranır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Öğütme sırasında öğütme ortamı ve mineraller arasındaki galvanik etkileşimin şematik gösterimi (Peng, 2003)

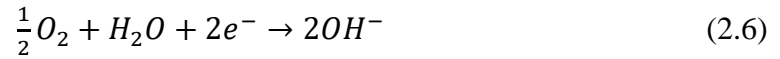
Oluşacak galvanik sistemde sülfürlü mineral ve öğütme ortamı 2.6 ve 2.7 eşitliklerinde gösterilen tepkimelere uygun olarak oksitlenecek ve öğütme ortamı sülfürlü mineraller açısından indirgen bir hal alacaktır. Durum potansiyeli daha yüksek olan (daha soy) mineraller ile etkileşim sonucu minerallerin oksidasyonu gerçekleşir. Kompleks bir cevherde bulunan pirit mineralinin birçok sülfürlü mineralden soy olması sebebiyle yanında bulunduğu minerallerin oksitlenmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Pirit minerali ile birlikte bulunan galenit ve sfaleritin oksitlenme hızının çok yüksek seviyelere çıktığı Gottschalk ve Buckler'in (1910, 1912) çalışmalarında gösterilmiştir. Pecina-Treviño vd. (2003) yaptıkları çalışmada galenitin pirit ile temas ettiği koşulda veriminin, galenitin tek başına olduğu çalışmalarla kıyaslandığında çalışılan tüm pH değerlerinde azaldığını vurgulamışlardır (Şekil 2.5).  $3410 \text{ A}$  ( $10^{-5} \text{ M}$ ) kullanılan bir sistemde galenit ve pirit etkileşiminin flotasyon verimi üzerindeki etkisi görülmektedir. Soy sülfürlü minerallerin (pirit vb.) bulunduğu sistemde galenit gibi aktif sülfürlü minerallerin yüzebilirliğinin azalması mineraller arasındaki galvanik etkileşime bağlanmaktadır. Pirit ve galenitin temas halinde olduğu sistemde ölçülen karışım potansiyel değerinin, galenitin durum potansiyeline göre daha anodik olması sebebiyle elektrokimyasal olarak daha aktiftir. Bu sebeple aktif minerallerin çözünmesi hızlanmakta ve hidroksit bileşikleri oluşarak minerallerin yüzeyini kaplayıp hidrofilik hale getirmektedirler (Senior ve Trahar, 1991; Zhang vd., 1997).



Şekil 2.5. Galenit-pirit etkileşiminin galenit flotasyonu üzerindeki etkisi (Pecina-Treviño vd., 2003)

Sülfürlü minerallerin durum potansiyel değerleri ve sistemdeki oksijen miktarındaki artış ile birlikte galvanik etkileşimin de arttığına literatürde de değinilmiştir (Rao ve Natarajan, 1990). Çözünmüş oksijen varlığında, hidroksil iyonları oluşması sebebiyle galvanik etkileşim iyice güçlenmektedir. Galvanik temasın etkileri aktif mineralin çözünmesindeki artışla ilişkilidir. Öğütme ortamının korozyonu ile ortaya çıkan  $Fe^{2+}$  iyonları, katodik sülfür minerali yüzeyinde Eşitlik 2.6' da oluşan  $OH^-$  iyonları ile girdiği tepkime sonucu demir hidroksit çökeleklerinin oluşumuna neden olurlar. Demirin oksitlenmesi oksijen varlığı sebebiyle artarken, oksijenin yokluğunda öğütme ortamından çözünen demir miktarında da azalma görülmektedir.

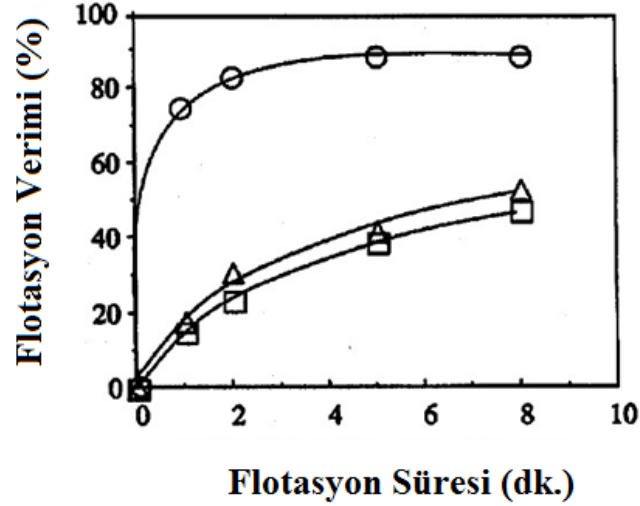
Katotta (yükseltgenme):



Anotta (indirgenme):



Oluşan hidroksit çökeleklerinin hidrofilik yapıda olduğu bilinmektedir ve mineral yüzeyinde çökelmelerinin toplayıcı soğurumuna engel olduğu tahmin edilmektedir (Vaughan ve Patrick, 1995). Çelik öğütme ortamından çözünen demir iyonlarının galenit mineralinin verimi üzerindeki negatif etkisi Şekil 2.6' de görülmektedir.



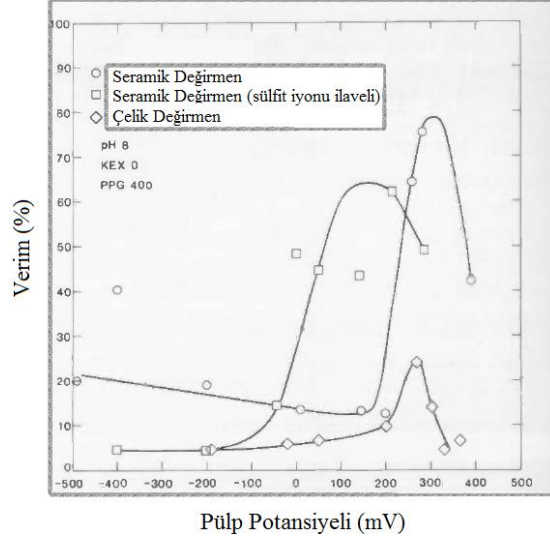
Şekil 2.6. Zamana karşı etil-ksantat kaplı galenit taneciklerinin flotasyon verimi (25-38 µm, pH:4): demir oksit şlamsız ortamda (○), demir oksit şlamlı ortamda etil-ksantat ekleme öncesinde (□) ve sonrasında (△) (Bandini vd., 2001).

Öğütme ortamının flotasyon üzerindeki etkileri ilk olarak Rey ve Formanek (1960) tarafından incelenmiştir. Sonrasında yapılan çalışmalarda da öğütme ortamının sülfürlü minerallerin yüzey özelliklerini ve dolayısıyla yüzebilirliğini etkilediği vurgulanmıştır (Wang ve Xie, 1990).

Wei ve Sandenberg'in (2007) yaptığı çalışmada düşük karbonlu çelik değirmen kullanılması galenitin flotasyonunu ciddi anlamda engellemiştir. Bunun nedeni olarak ise düşük Eh değeri ve mineral yüzeyine demir oksit kaplanması olduğu düşünülmektedir, flotasyon veriminin artırılması için Aerophine 3418 A ve Aero 242 gibi güçlü toplayıcı kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Öğütme ortamının etkileri pH değerlerini değiştirerek veya reaktif miktarlarını artırarak azaltılabilir. Ancak flotasyon seçiciliği üzerindeki etkisi tatmin edici boyutta olmayacaktır. Öğütme sırasında galvanik etkileşimin en az seviyede tutulması sorunun kaynağına inerek daha kalıcı bir çözüm sağlayacaktır. Bu sebeple seramik, çelik değirmen veya otojen değirmenler gibi daha eylemsiz (inert) bir ortam seçilmesi gerekmektedir. Aynı çalışmada seramik değirmende gerçekleşen öğütme galenitin



yüzebilirliğini etkilemezken, yükseltgen ortam sebebiyle daha zayıf bir toplayıcı ile bile seçimli bir flotasyon yapılmıştır (Wei ve Sandenbergh, 2007).



Şekil 2.7. Galenit mineralinin farklı öğütme ortamlarında verim-pülp potansiyeli ilişkisi (Trahar, 1984)

Galenit mineralinin farklı öğütme koşulları altında yüzebilirliğindeki değişim Şekil 2.7' de görülmektedir. Seramik veya çelik değirmende öğütülen galenit minerali +0,2- 0,35 V arasında dar bir potansiyel aralığında yüzmektedir. Flotasyon hızı seramik değirmende öğütüldükten sonra çelik değirmendekine kıyasla daha yüksektir. Seramik değirmene eklenen sülfid iyonlarının etkisine bakıldığında ise çelik değirmendeki gibi indirgen bir ortam oluştuğu, galenitin yüzdüğü potansiyel aralığının indirgen koşullarda daha genişlediği görülmüştür (Trahar, 1984).

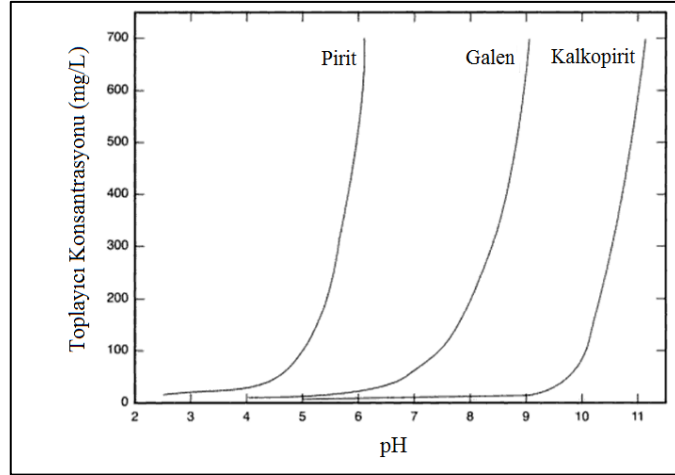
Guy ve Trahar (1986) çalışmasında otojen veya paslanmaz çelik değirmende öğütülüp tiol toplayıcı ile yüzdürülen galenitin flotasyon hızının çelik değirmende öğütülene kıyasla daha hızlı olduğunu göstermişlerdir. Bu bulgu literatürde yer alan diğer birçok çalışma ile paraleldir (Learmont ve Iwasaki (1984), Rey ve Formanek (1960), Thornton (1973) ve Cases vd. (1989). Wei ve Sandenbergh (2007) çalışmalarında farklı öğütme ortamlarının galenit minerali üzerindeki etkisinin tane boyu büyüdükçe ( $53\mu\text{m}$ >) arttığını göstermişlerdir. Çelik ve otojen değirmenlerin galenit flotasyonunu iki farklı mekanizma yoluyla arttırdığı belirtilmiştir (Guy ve Trahar, 1984). İlk olarak çelik ve otojen değirmen ortamlarında sağlanan yüksek pülp potansiyel değerleri akla gelmektedir. Galenit

flotasyonunun pülp potansiyeline bağlı olduğu birçok çalışmada gözlemlenmiştir (Tolun, 1964; Toperi ve Tolun, 1969; Woods, 1971; Woods, 1972). Özellikle paslanmaz çelik veya seramik değirmende öğütüldükten sonra galenitin toplayıcısız flotasyonunda görülen artışın galenit yüzeyinin oksitlenmesine ve elementel sülfür oluşmasına bağlı olduğu düşünülmektedir (Guy ve Trahar, 1984).

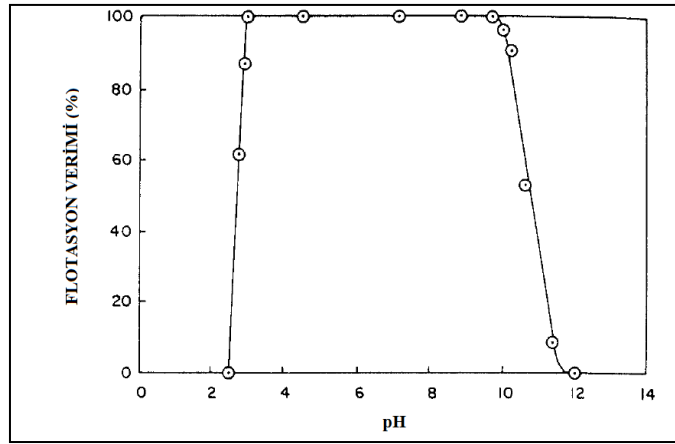
#### 2.1.4 pH etkisi

Pülp alkaliliği flotasyonda önemli ve karmaşık bir role sahiptir. Kompleks sistemlerdeki seçimlilik, reaktif konsantrasyonu ve pH arasındaki hassas dengeye bağlıdır. Alkali ortamda gerçekleşen flotasyonda ksantatlar dahil birçok toplayıcı durağan koşullar altındadır ve hücrelerin, boruların vb., aşınması en az seviyeye inmektedir. Kireç, sodyum karbonat (soda külü) ve daha az miktarda kullanılan sodyum hidroksit veya amonyak ilavesi ile alkalilik kontrol edilebilmektedir. pH değerinin düşürülmesi gerektiği koşullarda ise sülfürik ( $H_2SO_4$ ) veya sülfüroz asit ( $H_2SO_3$ ) kullanılmaktadır. Bu kimyasallar flotasyon deneylerinin neredeyse tümünde büyük miktarlarda tüketilmektedir. pH düzenleyici kimyasalların birim fiyatları diğer kimyasallarla kıyaslandığında daha ucuz olmasına rağmen ton başına uygulanan toplam miktara bakıldığında çok daha pahalıya mal olmaktadır. Örnek olarak sülfürlü bir mineral flotasyonu incelendiğinde, kullanılan kireç miktarı kabaca toplayıcı miktarının iki katı oranında denilebilir. Bu nedenle uygun pH düzenleyici seçimi ve kullanımı sayesinde işletim maliyeti önemli miktarda azaltılabilmektedir (Fee ve Klimpel, 1986).

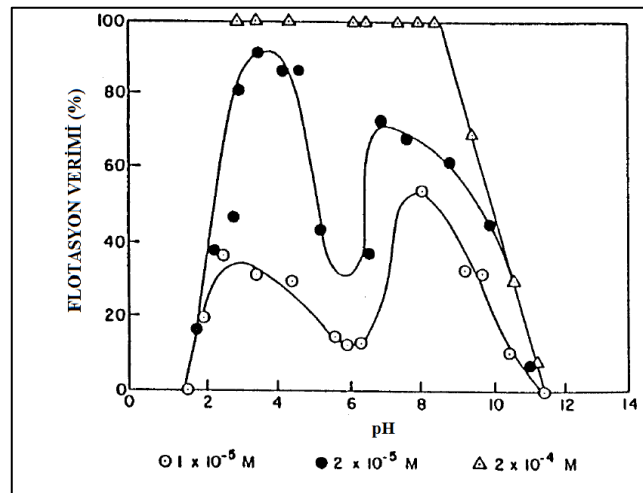
Belirtilen ksantat konsantrasyonlarında her mineralin altında yüzdüğü, üstünde iken bastırıldığı bir pH değeri bulunmaktadır. Bu kritik pH değeri mineralin doğasına, kullanılan toplayıcıya, konsantrasyonuna ve ayrıca sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Sutherland ve Wark, 1955). Şekil 2.8'de pirit, galenit ve kalkopiritin farklı sodyum aerofloat toplayıcı konsantrasyonlarındaki kritik pH değerleri görülmektedir. Şekil 2.9'da ise sabit toplayıcı konsantrasyonunda ( $10^{-4}M$  etil-ksantat) pH değişimine karşılık galenitin flotasyon verimi görülmektedir.



Şekil 2.8. Sodyum dietil ditiyofosfat konsantrasyonu ve kritik pH değerleri arasındaki ilişki (Sutherland ve Wark, 1955).

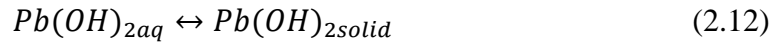
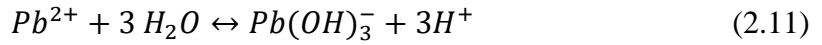
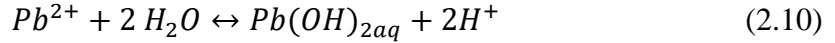
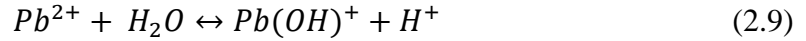


Şekil 2.9. Galenit flotasyon veriminin pH değerlerine bağlı değişimi (Fuerstenau, 1982)

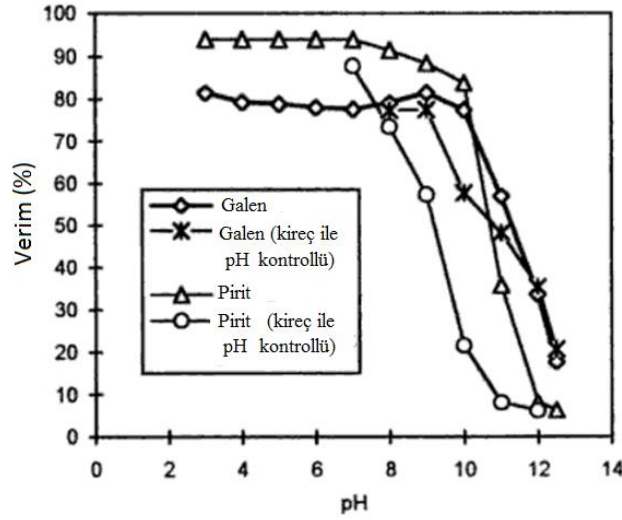


Şekil 2.10. Pirit flotasyon veriminin değişen potasyum etil ksantat dozajlarında pH'a bağlı değişimi (Fuerstenau vd., 1968)

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi düşük pH değerlerinde piritin yüzebilirliği galenitinkine çok benzerdir, bu sebeple galenitin diğer sülfür minerallerinden ayrılması zorlaşmaktadır. Çözelti pH değerinin kontrolü özellikle pirit flotasyonunda sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Alkali çözeltilerde piritin yüzebilirliği toplayıcı formunun bozulmasına ve diksantojen oluşumunun engellenmesine bağlı olarak azalmaktadır. Yüzeyinde kalan kurşun hidroksit türleri,  $Pb(OH)^3-$ , nedeni ile galenit pH 11 değeri üzerinde bastırılmaktadır (Fuerstenau vd.,1985; Fornasiero, 1993). pH 12 değerinin altında katı formulu kurşun hidroksit taneleri oluşması koşulunda (Eşitlik 2.12) farklı yüklü kurşun yüzeyiyle hetero-koagulasyon (birbirine yapışma) gerçekleşebilir. Oluşan kurşun hidroliz ürünleri hidrofiliktir ve yüksek pH değerlerinde flotasyonun bastırılmasına neden olmaktadır (Fornasiero ve Ralston, 1993).



Kireç ucuz olması sebebiyle pülp alkalitesini düzenlemek için sıklıkla kullanılır. Süt formundaki kalsiyum hidroksit tanelerinin doymuş sıvı çözeltideki süspansiyonu, ağır metal iyonlarının çökmesi için genellikle flotasyon öncesinde çözeltiye eklenir. Bu bağlamda alkali ortam bir nevi bastırıcı işlevi görerek canlanan sfalerit ve piritin, kurşun ve bakır minerallerinin seçimli flotasyonunu engellemesinin önüne geçmektedir. Kireç kullanımının pirit üzerindeki bastırıcı etkisi Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.11. Pirit kullanımının değişen pH değerlerinde verim üzerindeki etkisi (Toka ve Atalay, 1996)

Yapılan çalışmalarda pülp alkalitesinin flotasyon üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Belirli toplayıcı konsantrasyonlarında, pH değerleri ile oynanarak istenilen mineral bastırılırken diğerlerinin yüzmesi sağlanabilmektedir. Özellikle seçimli flotasyon yapılması gereken durumlarda daha da önemli hale gelen pH, mineral hidrofobikliğini ve sonucunda verimi etkilemektedir.

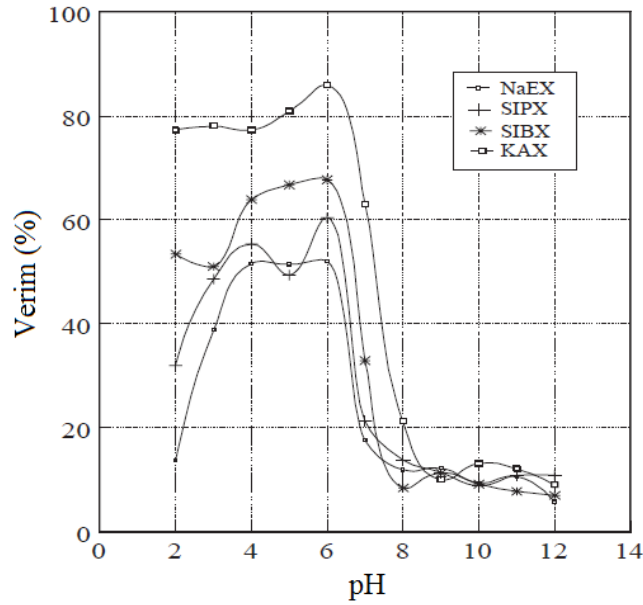
## 2.2 Sfalerit Flotasyonu

### 2.2.1 Toplayıcı etkisi

Sfalerit (ZnS) çinko metalinin temel kaynağıdır, genellikle kalkopirit, galenit ve pirit gibi diğer sülfürlü minerallerle birlikte bulunmaktadır. Kurşun-çinko cevherlerinin birçoğu seçimli flotasyon ile öncelikle galenit sonrasında sfalerit minerali yüzdürülerek ayrılabilir. Sfalerit flotasyonunda en yüksek ve ekonomik tenör değerine ulaşmak için seçimli toplayıcı kullanımı, uygun bakır sülfat ve toplayıcı dozajı seçimi, uygun pH aralığı gibi birçok dikkat edilmesi gereken nokta bulunmaktadır.

Sfalerit flotasyonu ksantat gibi kısa zincirli tiol toplayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak sfalerit diğer sülfürlü minerallerden farklı olarak kısa zincirli ksantatlar ve diğer çözünebilir tiol toplayıcılarla çok az miktarda yüzmektedir. Bunun en

önemli nedeni olarak ise çinko-tiol bileşiklerinin suda yüksek çözünürlüğe sahip olması gösterilmektedir. Sfalerit yüzeyinin canlandırılması elementel sülfür oluşumuna neden olarak yüzeyi hidrofobik hale getirebilir ve dolayısıyla verimde artışı sağlar. Toplayıcının sfalerit yüzeyine soğurumu galenit mineralinkine benzer şekilde gerçekleşmektedir. İlk aşamada ksantat tabakasının kimyasal soğurumu gerçekleşirken sonraki aşamada çinko ksantatın oluşumu ve sfalerit yüzeyine çökmesi sayesinde soğurum gerçekleşmektedir. Farklı ksantat türlerinin kullanımında sfalerit verimindeki değişiklikler Şekil 2.12’de görülmektedir. Artan karbon zinciri uzunluğu ile birlikte verimin arttığı ancak pH aralığında değişim olmadığı gözlemlenmiştir (Goktepe, 2002).

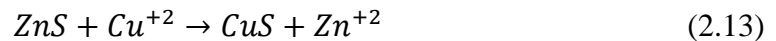


Şekil 2.12. Sfalerit flotasyon veriminin farklı ksantat kullanımında pH'ya bağlı değişimi (Goktepe, 2002)

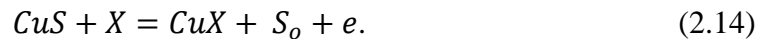
Sfalerit minerali özgün yapısal karakteristiği sebebiyle flotasyon öncesi canlandırmaya ihtiyaç duyar, bu sayede tiol toplayıcılarla girdiği tepkimelere daha duyarlı hale gelmektedir. Sfaleritin flotasyon karakteristiği canlandırıcı iyonların varlığında ve yokluğunda incelenmiştir. Bazı araştırmacılar canlandırıcı kullanılmadan etil ve amil ksantat ile sfaleritin yüzdüğünü gözlemlerken (Girczys ve Laskowski 1972; Fuerstenau vd., 1974), diğer kısmı gözlemleyememiştir. Yapılan çalışmalar arasında oluşan bu fark kullanılan sfaleritin oksitlenme karakteristiğine dayandırılabilir. Sfalerit flotasyonunun canlandırıcı kullanılmadan gerçekleşmesi için çinko ksantat çöktürmelerinin oluşumu ve soğurumunun gerçekleşmesi gerekmektedir (Fuerstenau vd., 1974).

### 2.2.2 Sfaleritin canlandırılması

Sfalerit mineralinin alkali ortamda, ortalama seviyede ksantat kullanımında yüzmemesi seçimli mineral ayırımında avantaja dönüştürülebilir. Örneğin galenitin sfalerit mineralinden seçimli ayırımında uygun reaktif eklemesi ile sfaleritin canlanması engellenip ayırım yapılabilir. Sfalerit flotasyonun gerçekleşmesi için ise metal iyonlarının sisteme eklenmesi gerekir. Sfalerit flotasyonunda en çok kullanılan canlandırıcı bakır sülfattır (Bradford, 1913). Sfalerit yüzeyinin metal iyonları ile asidik ortamda canlandırılması iki şekilde gerçekleşmektedir (Ralston ve Healy, 1980, Von Reeken vd., 1989; Clarke 1998). İlki sfaleritin yüzeyindeki çinko iyonunun, Cu (II) gibi bir metal iyonu ile yer değiştirmesi sayesinde olmaktadır. Diğeri ise Pb (II) gibi bir iyonun mineral yüzeyine soğurularak minerali kendi başına canlandırması ile gerçekleşmektedir. Sfalerit yüzeyinde Cu (II) iyonları aracılığıyla gerçekleştirilen canlandırma aşağıdaki tepkimede görülmektedir (Eşitlik 2.13).



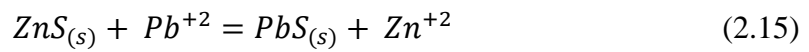
Verilen tepkimede  $Cu^{+2}$  ve  $Zn^{+2}$  iyonları yer değiştirerek sonucunda mineral yüzeyinde bakır sülfid (CuS) oluşmakta, sonrasında ksantat canlandırma ürünü ile tepkimeye girerek çözünmez bakır ksantat açığa çıkmaktadır (Eşitlik 2.14). Bu sayede mineral yüzeyi hidrofobik hale gelmektedir.



Yapılan çalışmalarda flotasyon sistemine eklenen yapay  $Pb^{+2}$  iyonlarının da sfalerit verimini arttırdığı ortaya konulmuştur (Popov vd., 1989, Ralston ve Healy ,1980 a,b, Houot ve Ravenau, 1992). Trahar vd. (1997) çalışmasında sfaleritin kurşun iyonları ilavesi ile pH 9'a kadar yüzdüğünü göstermiştir. Diğeri taraftan yapılan kesikli flotasyon testlerinde sfaleritin veriminin galenit ve oksitli kurşun minerallerinin eklenmesiyle arttığını göstermişlerdir (Houot ve Ravenau, 1992; Rey ve Formanek, 1960). Bu çalışmalarla paralel olarak, yüzey analizi sonuçlarında Cu/Pb konsantrisinde yüzeyinde kurşun bulunan sfalerit minerali tespit etmişlerdir (Kim vd., 1995) ayrıca Pb-Zn cevher pülpünde sfalerit örnekleri bulunmuştur (Basilio et al., 1996). Bu nedenle sfalerit mineralinin galenit ayrıca seruzit ve

anglezit gibi oksitli kurşun minerallerinden ayrılan kurşun iyonları tarafından canlandırılabilirliği söylenebilir.

Sfaleritin kurşun iyonları tarafından canlandırılma mekanizması tam olarak bilinmemektedir. Ancak birçok araştırmacı sfalerit yüzeyinde  $Pb^{+2}$  ve  $Zn^{+2}$  iyonlarının yer değiştirdiğini düşünmektedir (Eşitlik 2.15). Sonrasında oluşan duraylı kurşun ksantat ve/veya diksantojen oluşumu sayesinde mineral yüzeyi hidrofobik hale gelmektedir (Basilio vd., 1996).



Kurşunla canlandırma mekanizmasının büyük oranda pH'a bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Trahar vd., 1997; Rashchi vd., 2002; Houot ve Raveneau, 1992). Trahar vd.nin (1997) çalışmasında 4 ve 9 arasındaki pH değerlerinde 200 ppm kurşun iyonu ilavesi ile sfalerit veriminin %95'in üzerinde olduğunu gözlemlemiştir. Ancak pH 10'a çıktığında verimde kayda değer bir azalma görülürken, pH 12'de ise sfaleritin hiç yüzmediği tespit edilmiştir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken nokta kurşun devresinde çinkoyu bastırmak için pH değerlerini ayarlarken pH 10 değerinin üzerine çıkılmamasıdır. Bu pH değerinin üstünde iken galenit yüzeyi hidroksil tabakası tarafından etkisiz hale gelerek flotasyonu engellenebilir (Von Reeken vd., 1989).

Alkali ortamda canlandırma mekanizması asidik ortamdan farklı şekilde gerçekleşmektedir. Kurşun hidroksil kompleksleri ve hidroksitler oluşmaktadır, bu sebeple canlandırmanın Eşitlik 2.15'deki gibi gerçekleştiği söylenemez. Yapılan çalışmalar alkali pH değerlerinde sfaleritin canlandırılmasının, kurşun hidroksitlerin sfaleritin yüzeyinde birikmesi ile olduğunu göstermiştir (Trahar vd., 1997). Houot ve Raveneau (1992) muhtemel canlandırmayı kurşun hidroksil komplekslerine dayandırırken, Popov vd. (1989) çalışmasında alkali ortamda denge koşulunu sağlamak için asidik ortama kıyasla daha uzun koşullama süreleri gerektiğini belirtmiştir. Bu fark asidik ve alkali pH değerlerinde gerçekleşen farklı canlandırma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır.

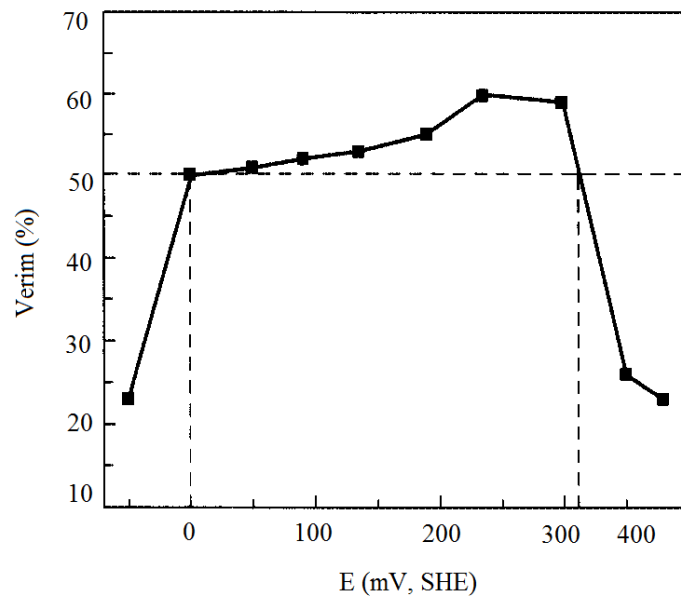


Laskowski vd.nin (1997) çalışmasında yüksek duraylılığa sahip kurşun hidroksit kaplaması sebebiyle, kurşun iyonları tarafından canlandırılmış sfaleritin flotasyon hızının bakır ile canlandırılmış olana göre daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir.

Bunların haricinde flotasyon sistemine eklenen  $Fe^{+2}$  iyonları da oksijen varlığında sfalerit yüzeyini canlandırılmasını sağlayabilir. Flotasyondaki demir iyonlarının kaynağı sistemde çözünen mineraller, eklenen reaktifler veya sistemde kullanılan sudan kaynaklı olabilmektedir (Popov vd., 1989). Diğer taraftan bazı çalışmalar flotasyon verimi ve demir miktarı arasında hiçbir ilişki olmadığını savunmaktadırlar (Mukherjee ve Sen, 1976; Fuerstenau vd., 1974).

### 2.2.3 Pülp potansiyel etkisi

Sfaleritin yüksek elektriksel dirençliliği sebebiyle elektrokimyasal davranımını inceleyen çok az sayıda araştırma bulunmaktadır. Sfalerit verimi ve pülp potansiyeli arasındaki ilişki Şekil 2.13'de görülmektedir. Sfalerit flotasyonu 0- 0,31 V değerleri arasında gerçekleşmektedir. Öğütme koşullarındaki farkın pülp potansiyeli ve dolayısıyla sfalerit flotasyon verimi üzerinde yarattığı farka bir sonraki bölümde değinilmiştir.



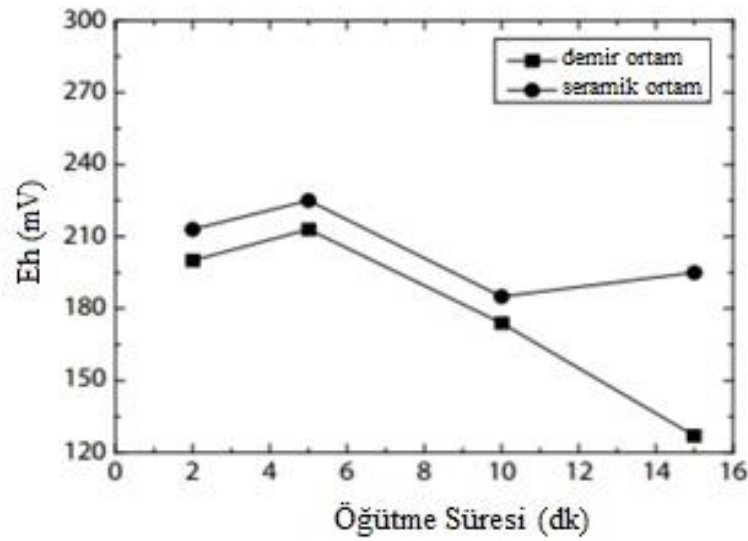
Şekil 2.13. Sfalerit verimi ve pülp potansiyel ilişkisi (Hu vd., 2010)

#### 2.2.4 Galvanik etkileşim

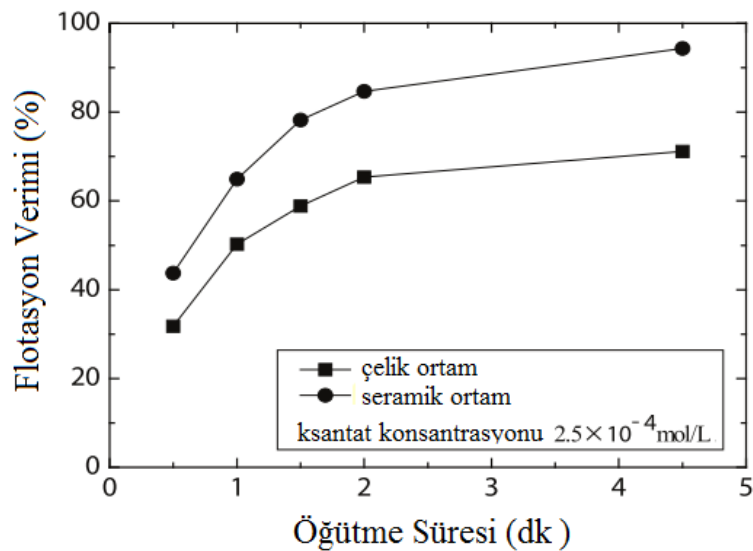
Rey ve Formanek (1960) yaptıkları çalışmada özellikle çelik öğütme ortamının sfaleritin aktifliğini azaltarak galenit ve sfaleritin seçimli ayrımını sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca seramik değirmende öğütülen sfaleritin doğal yüzebilirlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Sülfürlü minerallerin toplayıcısız flotasyonu, yükselen Eh değerleri ile birlikte artmaktadır (Trahar,1984; Ralston, 1994)

Tipik bir kompleks sülfür devresinde çinko öncesinde bakır veya kurşun flotasyonu gerçekleştirilir, bu nedenle seçimlilik açısından Cu/Pb konsantrasyonuna giden çinko miktarı en aza indirilmelidir. Kavramsal olarak çelik değirmen kullanıldığında azalan sfaleritin yüzebilirliği sebebiyle seçimliliğin artması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda çelik ortamda öğütülen cevherin Cu-Pb-Zn veya Cu-Zn cevherlerinde seçimliliği arttırdığı ortaya konulmuştur (Bushvell ve Veitch, 1975; Fahlstrom, 1974). Thornton'un (1973) yaptığı çalışmada çelik ortamda öğütme yapılmadığı zaman bakır ve kurşun flotasyon devresinde çinko flotasyonunun çok daha hızlı olduğunu ortaya koymuştur. Seramik değirmende yapılan öğütmede oluşan yükseltgen ortam sebebiyle sfalerit doğal yüzebilirlik yani yüzeydeki bir oksidasyon ürününe bağlı olarak toplayıcısız flotasyon özelliği göstermeye başlar. Fakat sfalerit çelik değirmende öğütüldüğü zaman bu özelliğinin kaybolduğu gözlenmiştir. Çelik değirmende yapılan öğütme sonrasında azalan oksijen miktarı indirgen bir ortam oluşturarak ksantatın oksitlenmesini ve sülfürlü mineral yüzeyine soğurumunu engeller. Aynı zamanda sülfürlü mineral taneleri oksitli yüzeyle kaplanırlar. Bu koşullar altında öğütülen sülfürlü minerallerin kendiliğinden oluşan yüzebilirlikleri ortadan kaybolur ve ksantat varlığında verimleri düşük olur (Heyes ve Trahar, 1979).

Seramik ve demir ortamlı değirmende öğütülen sfalerit mineralinin öğütme boyunca Eh değerlerindeki ve flotasyon verimi üzerindeki etkisi Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'de görülmektedir. Öğütme ortamının pülp potansiyelini değiştirdiği ve sülfürlü minerallerin flotasyon davranımını etkilediği şekillerde açıkça görülmektedir.



Şekil 2.14. Öğütme ortamının sfalerit mineralinin pülp potansiyeli üzerindeki etkisi (He vd., 2010)



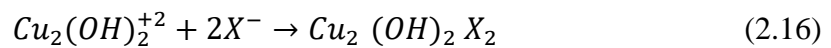
Şekil 2.15. Öğütme ortamının sfalerit mineralinin flotasyon verimi üzerindeki etkisi (He vd., 2010)

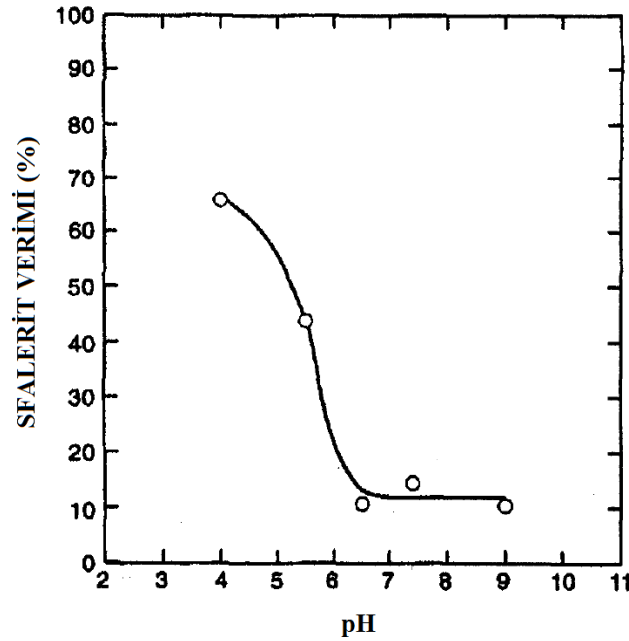
Sülfürlü minerallerin seramik ve çelik değirmende öğütülmesi sonucunda ortaya çıkan belirgin farklılığın nedenleri özetle şöyle açıklanabilir. İlk olarak hidroksil demir komplekslerinin sülfür minerallerinin yüzeylerine birikimi ve soğurumu yüzey hidrofiliğini arttırmaktadır. Diğer taraftan öğütmenin yapıldığı demir içerikli ortamların yarattığı güçlü indirgen ortam sebebiyle sülfürlü minerallerin flotasyonu için gerekli olan yeterli yüzey yükseltgenmesi gerçekleşmemektedir. Seramik ortamda yüksek potansiyelli yükseltgen ortam, flotasyon için gerekli olan ksantatın diksantojene yükseltgenmesini teşvik

etmektedir. Ancak demir içerikli ortamda bu durum tersine dönmektedir. Seramik veya çelik değirmende öğütülen sfaleritin canlanmasının bahsi geçen değirmenlerde bulunan daha yükseltgen ortam sebebiyle bakır türlerinin artan hareketliliğine bağlı olduğu söylenebilir (Wei ve Sandenbergh 2006).

### 2.2.5 pH etkisi

Çinko konsantre veriminin asidik pH değerlerinde iyi olmasına rağmen seçimliliğin az olduğu gözlemlenmiştir, bu sebeple sfalerit flotasyonu genellikle alkali pH'larda (8,5-12) gerçekleşmektedir. Diğer taraftan nötr pH'larda gerçekleşen ZnS flotasyonunda çözelti koşullarına bağlı olarak düşük verimler elde edilmektedir. Zayıf flotasyon tepkisinin nedeni olarak ise canlandırıcı ya da bastırıcı veya her ikisinin de yetersizliği gösterilebilmektedir. Sutherland ve Wark (1939, 1955) çalışmalarında nötr pH değerlerinde canlandırılmış sfalerit taneleri ve kabarcıklar arasındaki tutunmanın çok zayıf olduğunu göstermişlerdir. Bu durum fazla miktarda bulunan bakır iyonlarının bakır ksantatın çökmesine neden olmasına ve dolayısıyla ksantat iyonlarının tükenmesine bağlanmaktadır. Nötr pH'da oluşan bakır ksantatın asidik veya alkali çözeltilerde oluşana kıyasla daha çözünmez formda olduğu düşünülmektedir (Sutherland ve Wark, 1939). Yapılan başka bir çalışmada, sfalerit-ksantat sisteminde yapılan flotasyon testlerinde canlandırılmış sfaleritin pH 6 ve 9 değerleri arasında eklenen  $\text{CuSO}_4$  miktarına bağlı olarak bastırıldığı gözlemlenmiştir (Steininger, 1968). Eklenen miktar arttıkça bastırılmanın gerçekleştiği pH aralığı da artmıştır. Nötr pH'da yüksek miktarda bakır iyonunun varlığına bağlı olarak bakır ksantat oluşumunun gerçekleştiği ve yine bu sebeple ksantatın tükendiğine işaret edilmiştir (Eşitlik 2.16).





Şekil 2.16. Sfalerit flotasyon veriminin pH'a bağlı değişimi (Trahar vd., 1997)

### 2.3 Galenit-Sfalerit Flotasyonu

- Galenit flotasyon devresi

Kurşun-çinko cevherlerinin birçoğu kompleks cevher olarak sınıflandırılır ve bu cevherlerde minerallerin saçınım yüzdesine bağlı olarak geri kazanım problemleri artış gösterebilir. Pirit mineralinin büyük miktarlarda bulunması seçimlilik ve flotasyon verimi açısından sorun teşkil etmektedir. Kurşun-çinko cevherleri sıklıkla az miktarda bakır, gümüş ve altın içerir. Siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) sıklıkla galenitle bağlı olarak görülse de az miktarda bulunmaktadır. Demirce zengin sfalerit minerali marmatitin ( $(\text{Zn}, \text{Fe})\text{S}$ ) varlığı ise çinko konsantre tenörünün düşmesine sebebiyet vermektedir. Marmatit mineralindeki düşük çinko miktarı demir mineraliyle seyreltilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu minerallerin ayrımı galenitin doğasından gelen hidrofobikliği ve sfalerit mineralinin flotasyon reaktifleri tarafından kolaylıkla toplanamaması sayesinde mümkün olmaktadır.

Galenit-sfalerit mineralleri genellikle iki aşamalı seçimli flotasyon kullanılarak başarıyla ayrılmaktadır. İlk olarak sfalerit mineralinin bastırılması sağlanarak, kurşun minerali yüzdürülür. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ise sfalerit yüzeyinin çözülmüş metal iyonları tarafından canlandırılmasını engellemektir.

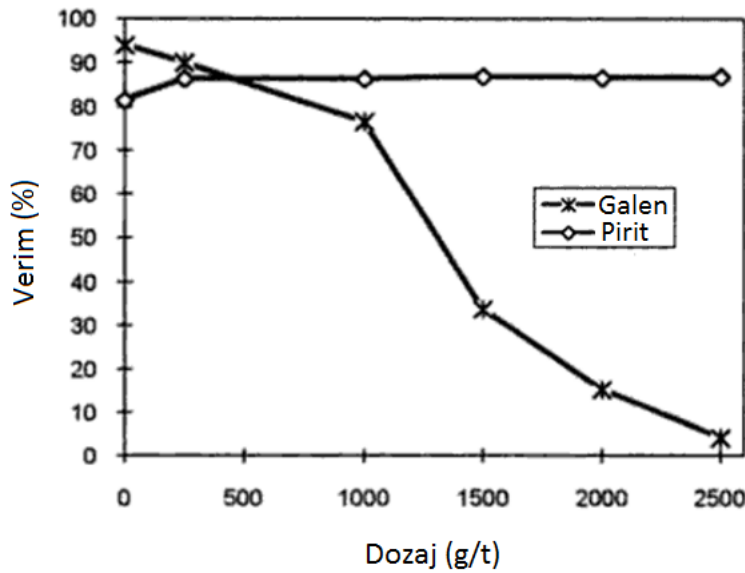
Sodyum sülfid veya metabisülfidin siyanür ve çinko sülfatla birlikte demir sülfid çinko minerallerinin bastırıcısı olarak kullanımı gittikçe artmaktadır. Hangi formda olursa olsun pülpe eklenen sülfid (sodyum sülfid, sodyum metabisülfid veya SO<sub>2</sub> gazı) sfalerit, pirit ve pirotit üzerinde bastırıcı etki göstermektedir (Jones ve Woodcock, 1984). Dávila-Pulido vd. (2011) sodyum metabisülfidin (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), sodyum sülfite oranla Cu (II) iyonları tarafından canlandırılmış sfaleriti bastırmakta daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Sfaleritin bastırılması, mineral yüzeyindeki elementel sülfürün oksitlenmesine bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Bakır ve kurşunla canlandırılmış sfaleritin, canlandırılmadan önceki haline kıyasla ksantata daha iyi cevap verdiği görülmüştür. Bu nedenle istenmeyen şekilde canlandırılmış sfalerit galenit ile birlikte yüzerek galenit ile arasındaki seçimliliği azaltabilmektedir. Kompleks sülfürlü cevherde galenitin seçimli olarak ayrılabilmesi için sfaleritin istenmeyen canlanmasının önüne geçmek gereklidir. Galenit flotasyonu sırasında sfaleriti etkisiz hale getirmek için canlandırıcı metal iyonlarının sfalerit yüzeyinden temizlenmesi gerekmektedir. Sfalerit mineralini canlandırmak için en çok kullanılan bakır iyonudur ve etkisiz hale getirilmesi de en başarılı siyanür kullanımı ile olmaktadır. Sfaleritin siyanürle bastırılması siyanürün bakır iyonlarıyla oluşturduğu komplekslere dayandırılmaktadır (Finkelstein vd., 1976).

Siyanürün demir sülfitlerin bastırılması (Elgillani ve Fuerstenau, 1968; Janetski vd., 1977; Allison, 1982; Bulatovic ve Wyslouzil, 1982), sfaleritin canlanmasının engellenmesi (Gaudin vd., 1959; Draskic vd., 1981; Bulatovic ve Wyslouzil, 1984; Buckley vd., 1988) ve alternatif olarak galenit mineralini canlandırıcı etkisine (Owens vd., 1952; Rey, 1958; Carlson ve Muir, 1976; Popov vd., 1988; Hall vd., 1990) literatürde değinilmiştir. Siyanürün bastırıcı etkisi konsantrasyonuna, pülpün iyonik bileşimine ve toplayıcının hidrokarbon zinciri uzunluğuna bağlıdır. Siyanürün galenit flotasyonu üzerindeki etkisi daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir (Prestidge vd., 1993; Grano vd., 1990). Siyanürün galenit yüzeyindeki sülfürü azalttığını ve geriye etil ksantat etkileşimi için hazır, kurşun bakımından zengin bir yüzey bıraktığı belirtilmiştir (Prestidge vd., 1993; Ralston, 1994). Siyanürün bileşik oluşturmadığı metalik iyonlu minerallerin üzerinde bastırıcı etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Kurşun hidroksit ve kurşun ksantat türleri kurşun siyanürden daha az

çözünebilir ve daha durağan olduğundan, sisteme sodyum siyanür (NaCN) ilavesi galenit flotasyonu üzerinde bastırıcı etki yaratmamaktadır.

Şekil 2.17’de pirit mineralinin flotasyon veriminin siyanür ilavesiyle birlikte azalırken, galenit flotasyonunun ise arttığı görülmektedir. Bu artış siyanürün galenit yüzeyindeki temizleyici etkisine bağlı olabilir. (Toka ve Atalay, 1996). Siyanür anyonlarının  $Fe^{2+}$  kanyonlarıyla girdiği tepkime iki aşamalı gerçekleşir, ilk aşamasında çözünmeyen tuzlar oluşur ve sonrasında oluşan bu tuzlar ve fazla siyanür arasında tepkime gerçekleşerek çözünebilir siyanür kompleksleri oluştururlar. Siyanürün tamamıyla çözünmesi sonucunda ise sülfürlü mineral yüzeyinde hidrofobik ksantat oluşumu engellenir ve mineralin bastırılmasına sebep olur.



Şekil 2.17. Sodyum siyanürün pirit ve galenit flotasyonu üzerindeki etkisi (Toka ve Atalay, 1996)

Kurşun flotasyonunda çinko mineralleri ve piritin bastırılması siyanürün yanı sıra çinko sülfat ( $ZnSO_4$ ) ilave ile de sağlanabilir. Genellikle öğütme aşamasında eklenen çinko sülfat, metal iyon aktivasyonunu kontrol ederek sfaleritin bastırılmasını sağlar. Ancak kullanılan çinko sülfat miktarı, siyanür miktarından üç veya beş kat daha fazladır.

Çinko sülfat kullanımında ortamda bakır iyonları bulunduğu takdirde Eşitlik 2.9’da görülen tepkime tersine işlenir hale getirilerek bu iyonların sfalerit yüzeyine depolanması engellenir. Ancak cevherde sfalerit mineralinin yanı sıra piritin bulunması halinde bakır

iyonları aynı zamanda piriti de canlandırabilir. Çinko bakır sülfatın yanı sıra alkali pH değerleri sağlanması için kireç kullanımı gereklidir.

Sülfürlü minerallerin flotasyonunda toplayıcı olarak çoğunlukla tiol toplayıcılar olan ditiyokarbonatlar (ksantatlar) ve ditiyofosfatlar kullanılır. Genellikle katı formda bulunan ksantatların kullanımı daha yaygın olup, tamamen suda çözünebilir özelliktedirler ve sülfürlü baltı cevherlerinin kazanımında çok başarılıdırlar. Apolar grubun karbon zincir uzunluğunun daha fazla olması ksantatının verim gücünü artırırken seçiciliğini azaltmaktadır. Etil ksantatlar genellikle kabul edilebilir verim değerlerine ulaşırken, örneğin yüzeyi oksitlenmiş bakır cevherlerinin flotasyonunda daha uzun (bütil, amil gibi) ksantatlarda kullanılabilir. Ditiyofosfatlar ise kompleks sülfürlü cevherlerin flotasyonunda ksantatlar ile birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca ditiyofosfatlar özellikle piritik bakır cevherlerin flotasyonunda daha seçimli oldukları için tercih edilmektedir (Glembotskii vd., 1972). Bu tip cevherlerin flotasyonunda toplayıcı dozajı aşıldığında piritin de yüzmesi söz konusu olabileceğinden toplayıcıların dozajlarının uygun miktarda kullanılması çok büyük önem arz etmektedir. Sülfürlü mineral flotasyonunda geleneksel olmayan toplayıcı (ksantatlar harici toplayıcılar) kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır. Örneğin sodyum-di-izobütil ditiyofosfin kullanımı, ticari ismiyle Aerophine 3418A, kurşun, bakır ve yüksek miktarda pirit içerikli değerli metaller için özellikle önerilmektedir. Kuvvetli toplama gücüne rağmen demir sülfid minerallerine karşı yüksek seçiciliği, birçok cevherde ksantata kıyasla düşük tüketim miktarı ve hızlı kinetiği sebebiyle tercih edilmektedir.

Köpürtücü olarak ise galenitin kolay yüzebilirliği ve yüksek flotasyon kinetiği sebebiyle MIBC gibi zayıf tipli köpürtücüler kullanılmaktadır. Diğer taraftan yüksek yüzme kinetiği ve mineral yoğunluğu sebebiyle köpük taşıma kapasitesi optimum metalürjik sonuçlara ulaşabilmek için biraz daha güçlü bir köpürtücü kullanımını gerektirebilir.

Kurşun flotasyonu için kullanılan toplayıcılar ve köpürtücü flotasyon öncesi genellikle nötr veya az miktarda artırılmış pH değerlerinde koşullandırılır. Bilindiği üzere yüksek alkali pH değerlerinde piritin fazla miktarda oksitlenmesi  $Fe(OH)_3$  oluşumuna neden olduğundan bastırılmasına sebep olur. Bu nedenle pH değerleri demir sülfid minerallerinden tamamen kurtulmak için temizleme aşamasında yüksek alkali değerlere çıkarılabilir.



- Sfalerit flotasyon devresi

Kurşun flotasyonu sonrasında, kurşun devresi atığı çinko devresine beslendikten sonra çinkonun yanı sıra flotasyon devresine gelen demir sülfidlerin bastırılması amacıyla pH değeri arttırılır. Sfaleritin seçimli ayrımı, tiol toplayıcıların galenit yüzeyine elektrokimyasal mekanizma aracılığıyla doğrudan soğurulması sonrasında sfaleritin canlandırılması ile mümkün olmaktadır. Sfalerit, ksantat ile etkileşimi sonucu oluşan çinko ksantat bileşiğinin göreceli olarak suda çözünmesi ve mineral etrafında hidrofobik bir film oluşturamaması sebebiyle yeterli miktarda yüzmektedir. Sfaleritin yüzebilirliği uzun zincirli ksantatlarla arttırılabilir ancak canlandırıcı olarak kolaylıkla çözünebilen ve çözeltiye bakır iyonları veren  $CuSO_4$  kullanımı daha verimlidir. Çinko minerali, yüzeyinde bakır iyon soğurumu gerçekleşmesi sonucunda bakır minerali gibi davranım göstermeye baslar. Bu sebeple bakır iyonları tarafından aktive edilen sfalerit, ksantat türleriyle kolaylıkla etkileşime girer ve hidrofobik yüzey tabakası oluşur (Fuerstenau, 1982a, b; Finkelstein ve Allison, 1976; Laskowski vd., 1997). Bakır çinkoya oranla daha yüksek olan elektronegativitesi sebebiyle kolaylıkla iyonize olmaktadır ve mineral yüzeyinde oluşan bakır sülfid molekülleri sayesinde sfalerit minerali canlanmaktadır.

Çinko flotasyonunda sfalerit harici minerallerin yüzme ihtimalinin yüksek olması sebebiyle daha az kuvvetli bir toplayıcı kullanımı tercih edilmektedir. SIPX gibi düşük moleküler ağırlıklı toplayıcılar bazen tek başına bazen ise daha az kuvvetli ditiyofosfat tipi toplayıcılarla birlikte kullanılmaktadır. Çözeltideki bakır iyonlarının varlığı galenit ve pirit minerallerini belirli bir ölçüde canlandırabilir. Sfaleritin pirit ve pirotit ile birlikte olduğu durumlarda, seçimlilik kireç ilavesi ile pülp pH değerinin yüksek alkali değerlerde (10-12) tutulması ile sağlanabilir. Genellikle alkol tipi köpürtücüler kullanılarak sfalerit flotasyon seçimliliği maksimize edilmektedir.

- Örnek tesisler

Balıkesir Balya ilçesinde bulunan kurşun-çinko madeni ortalama olarak %2,90 Pb ve %1,80 Zn içermektedir. Cevherin tamamı çeneli ve konik kırıcılar ile 15 mm altına indirilerek öğütme devresine gönderilmektedir. Sınıflandırıcı ile kapalı devre çalışan çubuklu-bilyalı değirmenler kullanılarak cevher 100  $\mu m$ 'nin altına indirilerek flotasyona

beslenmektedir. Sınıflandırıcıdan koşullanma tankına gönderilen pülp sodyum karbonat kullanılarak pH değerleri 8,5-9,0 aralığında ayarlanmakta sonrasında  $ZnSO_4$ ,  $Na_2S_2O_5$ , bastırıcı ve potasyum etil ksantat (KEX) toplayıcı ve köpürtücü olarak MIBC devreye eklenmektedir. Ortalama olarak 15 dakika koşullanan flotasyon pülpü flotasyon hücrelerine gönderilmektedir. İlk olarak kurşun flotasyon devresinde üç kademeli temizleme yapılarak devrenin artığına iki kademeli süpürme devresi uygulanmaktadır.

Beslemedeki pirit miktarındaki değişimlere bağlı olarak pH alkali değerlere (11-12) çıkartılmaktadır. Sfaleritin canlandırılması için  $CuSO_4$ , toplayıcı olarak ise KAX ve 3418A, toplayıcı olarak ise MIBC kullanılarak 15 dakika koşullanma sonucunda flotasyon devresine gönderilmektedir. Çinko flotasyonu üç kademeli temizleme ve devre artığına uygulanan üç kademeli süpürme devresinden oluşmaktadır.

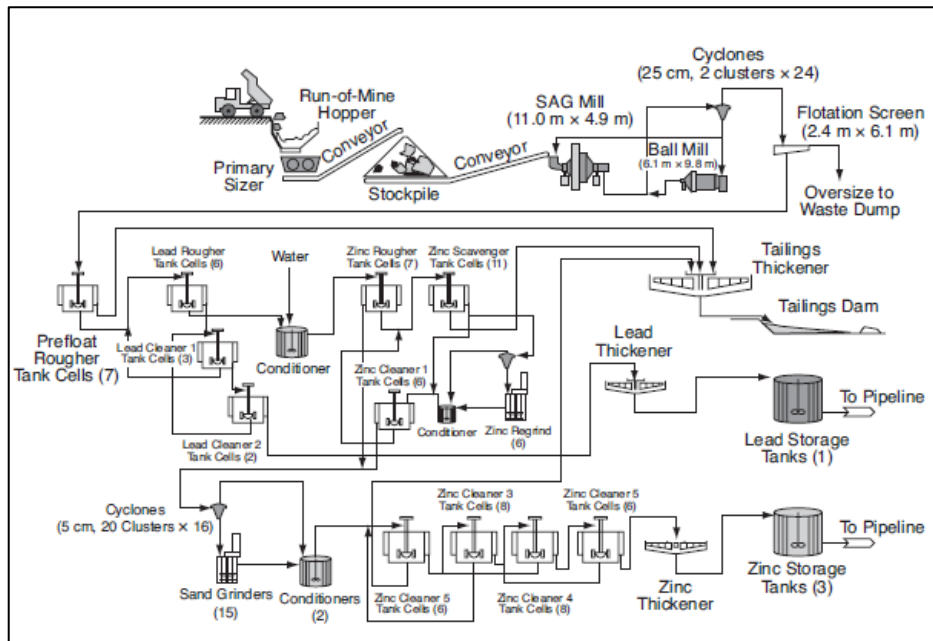
Çizelge 2.2. Balıkesir Balya kurşun-çinko flotasyon tesisinde kullanılan reaktifler

Pb devresi pH=8,5-9	$ZnSO_4$ (g/t)	1000
	$Na_2S_2O_5$ (g/t)	500
	Z3 (g/t)	100
	MIBC (g/t)	25
Pb temizleme Devresi	$ZnSO_4$ (g/t)	500
	$Na_2S_2O_5$ (g/t)	150
	MIBC (g/t)	25
Zn devresi pH=11.8	$CuSO_4$ (g/t)	750
	KAX (g/t)	100
	MIBC (g/t)	25
	$Na_2S_2O_5$ (g/t)	150
Zn Temizleme Devresi	MIBC (g/t)	25
	Kireç ( g/t)	1000
	$Na_2S_2O_5$ (g/t)	150

Minerallerinin seçimli ayrımını flotasyon ile gerçekleştiren dünyanın en büyük kurşun-çinko madenleri Century, Broken Hill, Mount Isa, Red Dog, Polaris, Sullivan ve Kuzey Amerika'da bulunan Brunswick'dir.

Century Mine kurşun-çinko madeni kuzeybatı Queensland, Avustralya'da yer almaktadır. Cevher sfalerit, pirit, galenit ve gümüş minerallerinden oluşmakta, içeriğinde kuvars, siderit gibi sülfürlü olmayan mineraller de içermektedir. Cevher ortalama olarak

%10,2 çinko, %1,5 kurşun ve 36 g/t gümüşten oluşmaktadır. Kapalı devre SAG (yâri otojen öğütme) ve bilyalı değirmende öğütülen cevher flotasyon devresine beslenmektedir. Yüksek miktarda karbon ve talk içeren kurşun-çinko cevherlerinin zenginleştirilmesinde genellikle doğal hidrofobik minerallerin çoğunu kurşun flotasyonundan önce yüzdürmek için ön flotasyon işlemi uygulanmaktadır. Ön flotasyon devresi sonrasında altı hücreli kaba-süpürme devresi devamında da iki aşamalı temizleme devresi yer almaktadır. Devreye eklenen reaktifler SIPX (270-300g/t), MIBC (50 g/t) ve pülp pH değerini 8,5'a getirmek için yeterli miktarda kireç kullanılmıştır. Ayrıca kaba flotasyon devresinde karbonlu mineralleri bastırmak amacıyla dekstrin (200 g/t), galenit haricindeki sülfürlü mineralleri bastırmak için de siyanür (300 g/t) kullanılmıştır.



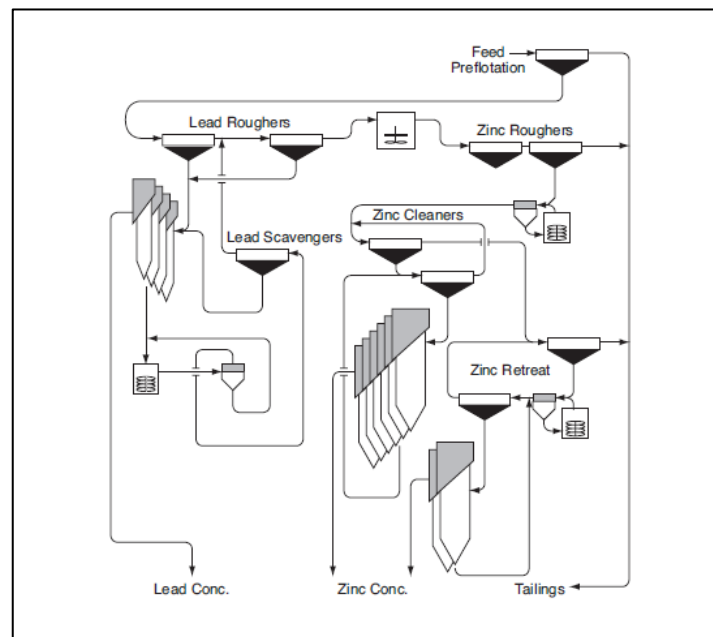
Şekil 2.18. Century Mine kurşun -çinko akım şeması

Çizelge 2.3'de Kuzeybatı Queensland'da Century madenine yakın diğer tesislere ait flotasyon verileri görülmektedir. Çizelgeden de görüleceği Century'de genellikle on flotasyon ve kurşun flotasyon devreleri pH 7,5-8,5 arasında gerçekleşmekte ve devrede çinko sülfat kullanılmamaktadır. Sfalerit verimi üzerindeki etkisinin neredeyse hiç bulunamaması sebebiyle kullanımına son verilmiştir.

Çizelge 2.3. Kuzeybatı Quensland'da yer alan madenlerin ön flotasyon ve kurşun flotasyonunda kullanılan reaktifler ve çinko verimleri (Seke, 2005)

Tesisler	pH	NaCN (g/t)	ZnSO <sub>4</sub> (g/t)	SMBS (g/t)	Zn Verimi (%)
Century Mine	7.5–8.5	300	—	—	5–6
Mount Isa Mines	8.0	160	250–300	—	6
Cannington Mine	6.5–7.0	—	1000	700	8–9

Red Dog kurşun -çinko -gümüş madeni Alaska'da yer alan dünyanın en büyük çinko üreticisidir. Cevher silika, barit ve çoğunlukla sülfürlü minerallerden oluşmaktadır. Ana sülfürlü cevherler sfalerit, galenit ve pirittir. Cevher ortalama %5,4 kurşun ve %17,8 çinko içermektedir. Red Dog madeni kule değirmen, kolon hücreler ve basınç filtreleri gibi çeşitli yeni teknikleri bünyesinde barındırmaktadır.



Şekil 2.19. Red Dog Mine kurşun-çinko flotasyon devresi akım şeması

Döner ve çeneli kırıcıda kırılan malzeme 150 mm'nin altına indirilerek öğütme devresine yollar. Öğütme devresi SAG ve bilyalı değirmenden oluşmakta ve cevherin P80 boyutunu  $-65 \mu\text{m}$ 'ye düşürerek flotasyona hazırlamaktadır. Kule değirmenler ise çinko mineralinin P80 boyutunu  $22 \mu\text{m}$ , kurşun mineralini de  $-19 \mu\text{m}$ 'ye incek şekilde tekrar öğütmektedir. Flotasyonda kolon hücreler kullanılmaktadır, kurşun devresinde bastırıcı olarak 300 g/t ZnSO<sub>4</sub> ve 50 g/t NaCN, toplayıcı olarak 40 g/t PAX ve 20 g/t

R208(ditiyofosfat) ve 300 g/t kireç kullanılarak pH 7,5 da flotasyon gerçekleştirilmektedir. Çinko devresinde ise canlandırıcı olarak 2000–4000 g/t CuSO<sub>4</sub>, silikat bastırıcı olarak 300 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 150 g/t PAX, 450 g/t kireç kullanılarak pH 7’de gerçekleştirilmektedir.

## 2.4 Galenit-Sfalerit Flotasyon Performansına Etki Eden Parametreler

### 2.4.1 Öğütme mekanizmalarının etkisi

Azalan cevher tenörleri maden şirketlerini daha fazla miktarda hammadde işlemeye yöneltmiştir. Son yıllarda cevher yapıları daha kompleks, değerli mineraller daha ince taneli yapıdadır ve yeterli mineral serbestleşmesi ancak ilave öğütme ile sağlanabilmektedir. Bu eğilimler sebebiyle 2030 yılında metal cevherlerinin ufalama işlemleri için gerekli enerji tüketiminin günümüze kıyasla dört kat daha fazla olacağı öngörülmektedir (Norgate ve Jahanshahi, 2011). Endüstriyel tesislerde öğütme, enerjinin en yaygın ve verimsiz olarak kullanıldığı işlemidir. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe kırılmaya karşı dirençleri artan tanelerin yanı sıra tüketilen enerji miktarları da aşırı şekilde artmaktadır. Bu sebeple enerji verimli öğütme teknolojileri endüstrinin ilgi odağı haline gelmiştir.

Konvansiyonel değirmenler (çubuklu ve bilyalı) mekanik anlamda yüksek verimlerle çalışır hale gelmiş olmalarına rağmen hala yüksek derecede enerji sarfiyatı yapmaktadırlar. Bilindiği gibi, konvansiyonel değirmenlerde harcanan enerjinin bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmakta, önemli bir bölümü ise ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Ayrıca, 100 mikronun altındaki öğütmelerde konvansiyonel değirmenlerin enerji tüketimi aşırı artmakta ve bu noktadan sonra öğütme ekonomik olmaktan çıkmaktadır (Bond, 1951; Zheng vd.,1986; Fidan ve Arol, 1990; Gao ve Forssberg, 1993; Jankovic, 2003).

Konvansiyonel değirmenlerde öğütme boyut, miktar, hareketin türü ve öğütme ortamının parçaları arasında bulunan boşluklardan etkilenmektedir. Sabit yüzeylerde yapılan kırma sürecinin aksine öğütme daha rastgele bir süreçtir ve olasılıklar üzerine kuruludur. Öğütme derecesi cevher parçalarının, öğütme ortamının arasına girme olasılığına bağlıdır. Cevher tekrarlı rastgele darbelerle serbestleşmemiş taneyi kırarken aynı zamanda serbestleşmiş taneyi de kırmaktadır. Bugünkü teknolojiyle darbeleri mineral tanelerinin ara

yüzeyine yönlendirerek optimum serbestleşmeyi sağlayabilecek bir yol bulunmamaktadır (Wills ve Atkinson, 1993).

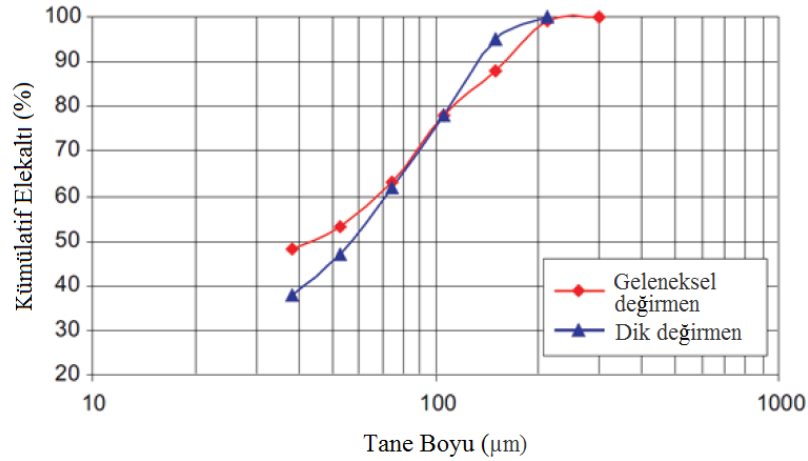
Farklı değirmen tipleri mineral taneleri üzerinde uyguladıkları gerilim türleri açısından sınıflandırılabilir: sıkıştırma, makaslama, sürtünme, darbe ve iç kuvvetler. Her değirmen tipinde bu gerilimlerden en az ikisinin uygulandığı göz önüne alınırsa bu gerilimlerin taneler üzerinde ayırımı yapmak çok güçtür. Uygulanan aşındırma, ufalama ve darbeye bağlı kırılma genellikle tüm değirmen tipleri için geçerlidir (Redner, 1990). Aşındırma mekanizması dar tane boyut dağılımı sağlarken, darbe ve basınçlı kırılım sonucunda ise daha dar tane boyut dağılımları elde edilebilmektedir (Kelly and Spottiswood 1982). Farklı tane kırılma mekanizmaları tane boyu dağılımlarını, tane şeklini, serbestleşmeyi ve tanenin yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla sonrasında gelen flotasyon aşamasında önemli rol oynamaktadırlar.

Öğütme sürecinde oluşan ince taneli malzemenin miktarının en aza indirilmesi sonucunda dik tane boyu dağılımına sahip ürün oluşur. Bu durum ancak iri tane boyundaki parçaların kırılma olasılığının incelere göre daha yüksek olduğu koşullarda gerçekleşir. Çubuklu değirmenlerde, iri taneler çubuklar arasında köprü görevi görür bu yüzden basınç yükünü ince taneler yerine kendi üzerlerine alırlar ve seçimli kırılma gerçekleşir (Hawkins, 2007). Bu sebeple iri tane boyundaki malzemenin kırılma hızı incelere göre oldukça yüksektir. Çubuklu değirmenlerde elde edilen tane boyu dağılımının bilyalı değirmene göre daha dik olmasının nedeni de budur.

Sıkıştırmalı kırma mekanizmasına sahip öğütme ekipmanları (yüksek basınçlı merdaneli değirmenler-HPGR ve dik valsli değirmenler-VRM), konvansiyonel tamburlu değirmenlere kıyasla daha dik tane boyu dağılımı sağlamaktadır. Çubuklu değirmenlerde olduğu gibi iri taneler yükü ince tanelerin üzerinden almakta ancak bu sefer kırılma basınçlı bir yatak üzerinde gerçekleşmektedir. Crosbie vd.in (2005) hem laboratuvar hem de pilot tesiste aynı cevheri kullanarak yaptığı çalışmalarda dik valsli değirmenin konvansiyonel tamburlu değirmene kıyasla daha dik tane boyu dağılımı verdiğini göstermiştir (Şekil 2.20).

Hammaddeler hala çoğunluklu olarak geleneksel tamburlu değirmenlerde kuru veya yaş olarak öğütülmektedir. Enerji tasarrufu anlamında zayıf olsalar da kolay erişebilirliği ve

işletim güvenliği sebebiyle tercih edilmektedirler. Dik değirmenlerin çimento ve kömür endüstrisinde kullanımı son on yılda gittikçe artmıştır. Geliştirilmiş teknolojisi sayesinde kuru öğütme ile hem enerji tüketimi en düşük seviyede tutularak istenilen tane boyutuna ulaşılabilen hem de karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı azaltılmaktadır



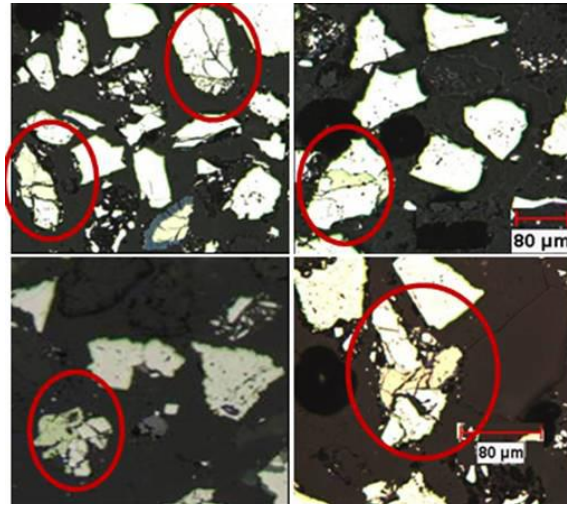
Şekil 2.20. Dik değirmen ve geleneksel tamburlu değirmende öğütülen nikel sülfat mineralinin tane boyu dağılımları (Crosbie vd., 2005)

Dik değirmenlerin, öğütme sonrasında yer alan liç, flotasyon gibi süreçler üzerindeki pozitif etkileri kanıtlanmıştır. Tüm bunların yanı sıra tek birimde kırma, öğütme, sınıflandırma ve kurutma işlemlerini yapabilmekte ve düşük aşınma oranları, az yer kaplama gibi avantajları da bulunmaktadır. Dik valsli değirmenler konvansiyonel değirmenlere kıyasla pek çok avantaja sahiptir. İlk olarak dik değirmenlerde tanelerden oluşmuş bir yatağın üzerinde basınç altında kırılma meydana gelmektedir. Kırılma işlemleri tane-tane teması veya faz-faz teması şeklinde gerçekleşmektedir. Bu temaslar taneler arası kırılmı arttırmakta ve eğer bir faz diğerinden daha kırılğan ise seçimli kırılmı da teşvik etmektedir (Fandrich vd., 1997). Bu yöntem enerji tasarruflu olmasının yanı sıra daha dar tane boyu dağılımı da sağlamaktadır (Fuerstenau, 1992; Viljoen vd., 2001). Dik değirmenlerde öğütme sonucunda elde edilen tane boyu dağılımının geleneksel tamburlu değirmenlerdekinden farklı olması sebebiyle, öğütme sonrası daha düşük viskozite değerleri görülebilmektedir. Bu genellikle flotasyonun daha yüksek pülp konsantrasyonlarında gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Dik valsli değirmenlerin farklı birçok çeşidi olsa da çalışma prensibi hepsinde aynıdır. Değirmende bulunan devasa öğütme valsleri kırma ve öğütme işlemini aynı

ekipmanda bir araya getirmektedir. Değirmene beslenen malzeme dönen tabla ve konik öğütme valsleri arasında belirli bir basınç uygulanarak öğütülür. Malzeme dönen tablanın tam ortasına beslenir ve dönme hareketi ile oluşan merkezkaç ve sürtünme kuvveti aracılığıyla tabla üzerinde hareket eder. Malzeme tablanın kenarlarında bulunan merdaneler aracılığıyla öğütülerek tablayı terk eder. Diğer öğütme sistemlerine kıyasla dik valsli değirmenlerde malzemenin gereğinden fazla öğütülmesi büyük bir oranda engellenmektedir. Ürünün serbestleşme aşamasındaki iyileştirme, sonrasında gelen sürecin performansı üzerinde de etkili olmaktadır.

Değerli mineralleri yan kayaçlarından ayırarak serbestleşmesini sağlamak öğütme prosesinin en önemli amacıdır. Mineraller çok iyi şekilde serbestleşmediği sürece değerli minerallerin seçimli olarak kazanılması imkansızdır. Öğütmede karşılaşılan en büyük zorluk, en iyi serbestleşmenin sağlandığı tane boyu dağılımını ince tane üretimini en düşük seviyede tutarak yapabilmektir. Serbestleşme derecesi cevherin tipine ve öğütme boyutuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ancak öğütme sonrasında serbestleşme oranı sadece tane boyuna bağlı değil ayrıca farklı öğütme değirmenleri ile sağlanan farklı kırılma mekanizmalarına da bağlıdır.



Şekil 2.21. Farklı numunelere ait sıkıştırma ile kırılma sonucu oluşan tane görünümleri (Özcan ve Benzer, 2013)

Darbe ve basınçlı kırılma mekanizmaları aracılığıyla kırılan malzemeler arasında önemli farklar bulunmaktadır. Basınçlı kırılma sonrası malzemede meydana gelen iç stres sonrasında çatlaklar oluşurken, darbe anlık kırılmaya neden olur ve geriye artık stres kalmaz.



Literatürde yüksek basınçlı öğütme ile bileşik minerallerin tane sınırından kırılımı sayesinde minerallerin serbestleşmesini arttırdığına dair çalışmalar bulunmaktadır. Basınçlı yatakta yüksek stres altında kırılan tanelerin yüzeyindeki mikro çatlakların ağırlıklı olarak tane sınırında olduğu ve dolayısıyla serbestleşmeyi arttırdığı bulgusuna ulaşılmıştır (Fandrich vd., 1997; Clarke ve Wills, 1989; Morsky vd., 1995; Özcan ve Benzer, 2013). Hoşten ve Özbay (1998) çalışmalarında piston pres test ekipmanı ile gerçekleştirdiği yatak üzerindeki tane kırılımı aracılığıyla kromitin serbestleşmesinin çubuklu değirmende öğütmeye kıyasla büyük oranda iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise piston pres test ekipmanı ile yatak üzerinde kırılım, ağırlık düşürme deneyleri aracılığıyla da darbeli kırılım gerçekleştirilerek etkileri karşılaştırılmıştır. Tane kırılımlarının çoğunlukla en zayıf bölge olan faz sınırından gerçekleştiği serbestleşme analizlerinde alınan görüntüler ile desteklenmiştir (Şekil 2.21). Basınçlı yatak üzerinde gerçekleşen kırılma mekanizmasının, darbeli kırılım mekanizmasına kıyasla daha ince tane boyu dağılımı ve daha iyi mineral serbestleşmesi sağladığı gözlemlenmiştir (Özcan ve Benzer, 2013).

Son yapılan çalışmalarda bahsi geçen avantajlarının yanı sıra flotasyon verim ve tenör değerlerinde de kayda değer bir artış görülmüştür (Smit vd., 2000, Smit ve Viljoen, 2000). Dik değirmenlerde kuru öğütmeye bağlı olarak proses suyu kullanımı gerekmemektedir. Bu sebeple kuru öğütme sürecinde oluşan yeni serbestleşmiş mineral yüzeyleri, Eh ve pH gibi kimyasal reaksiyonları etkileyerek sonraki proseslerde mineral yüzey aktifliğini azaltacak faktörlerden etkilenmemekte dolayısıyla flotasyon performansını olumlu yönde etkilemektedir.

#### **2.4.2 Kuru ve yaş öğütme etkisi**

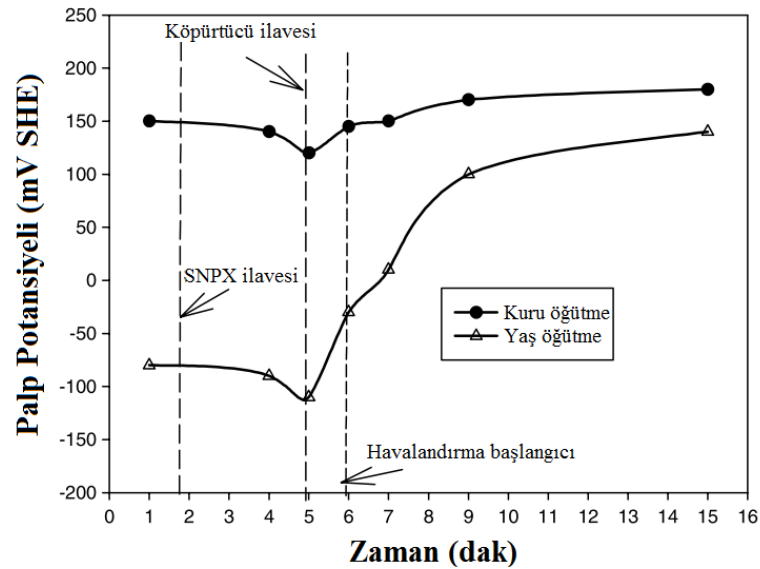
Sülfürlü minerallerin hazırlanmasında genellikle yaş öğütme tercih edilmektedir. Yaş öğütmenin kuru öğütmeye kıyasla daha az enerji tüketimi gerektirdiği bilinmektedir. Yaş öğütme sonucunda istenilen yüzey oluşumuna sahip ve tane yüzeyi az deformasyona uğramış ürünler elde edilmektedir (Feng ve Aldrich, 2000). Kuru öğütmenin tercih edilmemesinin birçok sebebi bulunmaktadır. Öğütme sonrası süreçlerin genellikle yaş olması, yüksek enerji verimli yaş öğütme koşulları, kuru öğütme beslemesi için gerekli düşük nem içeriği, ince sülfürlü minerallerin havanın varlığında kolaylıkla oksitlenmesi, kuru öğütme sonrasında genellikle güçlü kümelenmeler oluşması ve sonrasındaki ayırım

güçlüğü, kuru ve yaş öğütme yapılan mineraller arasındaki yüzey özelliklerindeki farklılaşmalar bunlardan bazılarıdır.

Kuru öğütme ile ilgili problemlerden bir diğeri ise öğütmeye bağlı ortam aşınmasıdır. Kuru öğütme boyunca gerçekleşen ortam aşınması yaş öğütmeye oranla defalarca kez fazladır ve bu etki öğütülen pülp asidik (özellikle pH 5,5 değerinin altında iken) oldukça artmaktadır (Bond, 1964). Kuru öğütme ile ilgili kısıtlamalardan biri öğütme suresince oluşan ısı, buna bağlı olarak mineral yüzeyindeki oluşan oksitlenme ve sonucunda belirli minerallerin flotasyon performansında görülen düşüştür. Literatürde yapılan bazı araştırmalar kuru öğütmede karşılaşılan zorlukların üstesinden gelinebildiğini ve kuru öğütmenin flotasyon üzerindeki etkisinin avantaja dönüştürülebileceğini göstermiştir.

Öğütme koşulları (kuru veya yaş) pülp potansiyelini ve sonrasında yüzen mineralin yüzey özelliklerini etkiler. Sfalerit minerali yapılan deneylerde yüksek basınçlı değirmen (HPGR) veya geleneksel yöntemlerle kırılıp sonrasında kuru veya yaş öğütüldüğünde kırma yönteminden bağımsız olarak, en yüksek verim ve tenör değerlerinin kuru öğütme sonrası elde edildiği görülmüştür (Palm vd., 2010). Bu sonuçlara paralel olarak Seke'nin (2005) çalışmasında kuru öğütme sonucunda daha pozitif pülp potansiyeli ve yüksek sfalerit verim değerleri elde edilmiştir (2005).

Kuru ve yaş öğütmenin, pülp potansiyeli üzerindeki etkileri Şekil 2.22'da görülmektedir. Benzer sonuçlar Koleini vd.nin (2012) çalışmasında gözlemlenmiştir. Pülp potansiyelinde havalandırmanın başlamasıyla birlikte görülen yükseliş açıkça pülpdeki oksijen miktarının artışından kaynaklanmaktadır. Kuru ve yaş öğütülmüş numunelerin potansiyel değerleri arasındaki fark flotasyon sonunda kapanmaktadır. Değirmen ortamı, bileşiklerin aktivasyonunu ve koşullandırma öncesinde pülp potansiyelini etkilemektedir. Ancak konsantre alımı sırasında çözünmüş oksijen ve pülp potansiyel değerleri ağırlıklı olarak havalandırmanın kontrolü altındadır (Seke ve Pistorius, 2006).



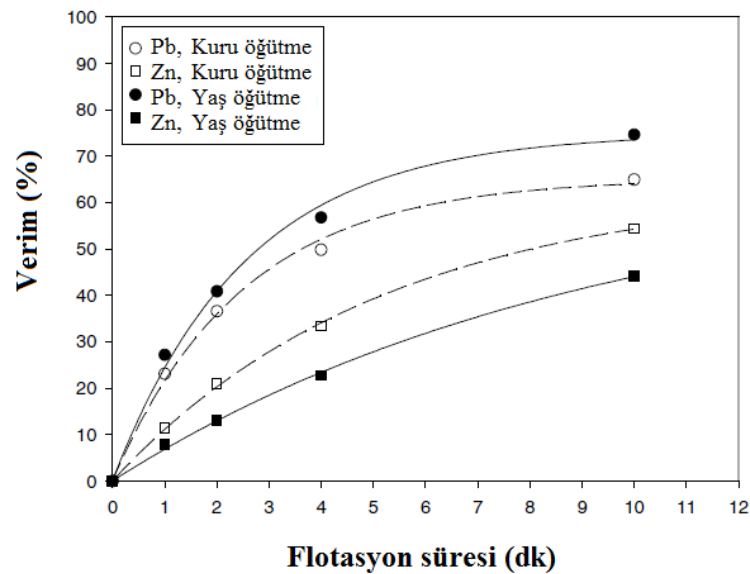
Şekil 2.22. Çelik değirmende kuru ve yaş olarak öğütülen Rosh Pinah madenine ait kurşun- çinko sülfürlü cevherinin pülp potansiyeli (Seke ve Pistorius, 2006)

Kuru öğütme sonrasında flotasyon hücresinde havalandırmaya bağlı olarak minerallerin daha fazla oksitlenmesi kaçınılmazdır. Yaş öğütmede ise tam tersine daha negatif pülp potansiyel değerleri ve düşük çözülmüş oksijen miktarı görülmektedir. Bu koşullar altında kondisyonlama sırasında minerallerin oksitlenmesi daha az seviyede gerçekleşmektedir. Kompleks kurşun-çinko mineralinde bulunan sfaleritin oksitli koşullar altında flotasyonunun arttığı bilinmektedir. Bu nedenle kuru öğütme sonrası sfaleritin flotasyon veriminin artması ve kurşun-çinko arasındaki seçiciliğin azalması öngörülmektedir. Ortamdaki çözülmüş oksijen varlığı, piriti bastırıp mineral yüzeyinde hidrofobik türlerin oluşmasını engelleyerek sfaleritin flotasyon verimini iyileştirmektedir (Ek, 1985; Bulatovic ve Wyslouzil, 1985; Dávila-Pulido vd., 2011). Houot ve Duhamet'in (1990) çalışmasında da sfaleritin tenör ve veriminin havalandırma sayesinde iyileştiği gözlemlenmiştir. Bakır sülfatın sfalerit flotasyonu üzerindeki canlandırıcı etkisi havalandırma sayesinde daha da artmaktadır.

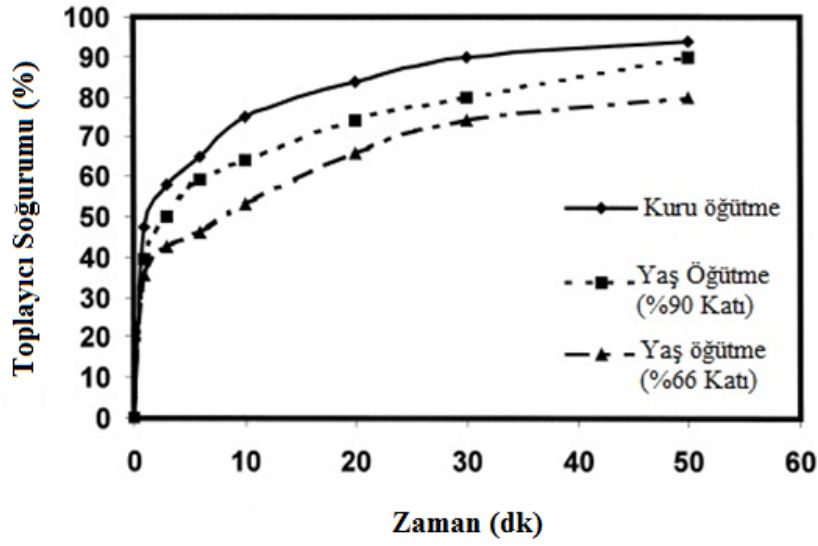
Şekil 2.23'de Rosh Pinah madeninden alınan cevherin farklı öğütme şartları altında galenit ve sfalerit verimlerinin zamana bağlı değişimleri görülmektedir (50 g/t SNPX). Kuru öğütme sonrası sfaleritin yaş öğütmeye kıyasla daha çok, galenitin ise daha az kazanıldığı açıkça görülmektedir. Kesikli çizgiler kuru öğütülen cevherin davranımını göstermektedir. Sfalerit veriminin yaş öğütme sonrası daha düşük olmasının nedenlerinden biri çeliğin sfalerite kıyasla anodik olmasından dolayı, çelikten sülfürlü minerale doğru elektron akışı

gerçekleşmesi olabileceği düşünülmektedir. Bu elektronlar sulu ortamda tepkimeye girerek hidroksil iyonları sonrasında da durağan metal hidroksitler oluşturarak mineral yüzeyini hidrofilik hale getirebilmekte veya toplayıcı soğurumu için uygunluğunu azaltabilmektedir (Palm vd., 2010).

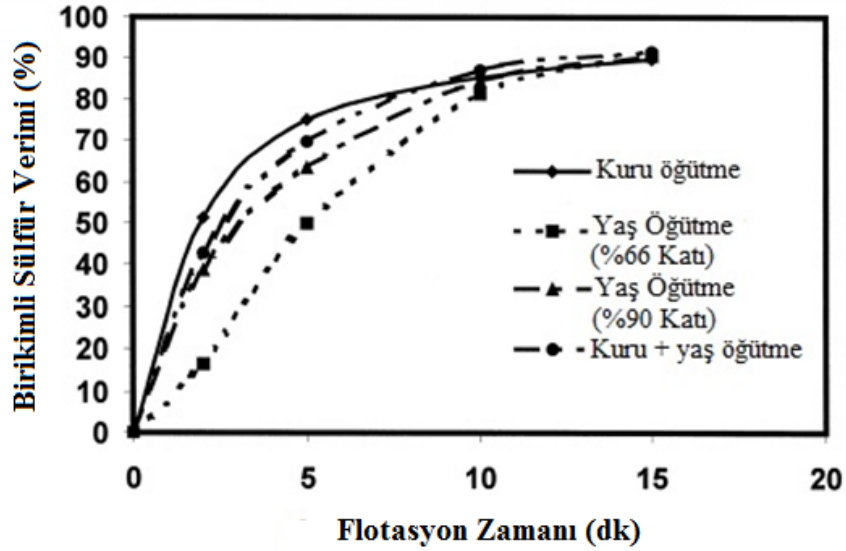
Kompleks sülfürlü cevherlerle yapılan bir diğer çalışmada kuru öğütmeden kaynaklı yüzey özellik farklılıkları vurgulanmıştır (Feng ve Aldrich, 2000). Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Atomik Güç Mikroskobu (AFM) ile yapılan çalışmalarda yaş öğütülen numunelerin yüzeyleri pürüzsüz ve daha temizken kuru öğütülen numunelerin daha pürüzlü ve mikro yapısal iki ve üç boyutlu bozukluklar içerdiği tespit edilmiştir. Kuru öğütme sürecinde daha yoğun (%90) pülpde bulunan tanelerin, daha yüksek strese maruz kalmaları sonucunda tane yüzeyinde bozuklukların meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca aynı yeni yüzey oluşumu sonucunda kuru öğütmenin yaş öğütmeye kıyasla daha yüksek enerji tükettiği gözlemlenmiştir. Bu da kuru öğütme sonucu oluşan bozukluklarda daha fazla enerji muhafaza edildiğine işaret etmektedir. Yüzeyde oluşan bu bozukluklar, sonrasında gerçekleşen tane çözünmelerinde ve reaktif soğurumunda önemli rol oynamaktadır (Feng ve Aldrich, 2000). Bu bağlamda kuru öğütülüp aktive edilmiş mineral yüzeylerinin soğurum kinetiklerinin SIBX (Sodyum Isobuthyl Xanthate) ile daha hızlı olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.24).



Şekil 2.23. Rosh Pinah cevherinin farklı öğütme şartlarında galenit ve sfalerit verimleri (Seke, 2005)



Şekil 2.24. SIBX toplayıcısının sülfürlü mineral taneleri üzerine soğurum kinetiği (Feng ve Aldrich, 2000)



Şekil 2.25. Flotasyon zamanına bağlı olarak birikimli sülfür verimi değişimi (Feng ve Aldrich, 2000)

Kuru öğütme numuneleri, yaş öğütmeye kıyasla daha yüksek yüzey enerjisi ve hızlı flotasyon kinetiğine sahipken yaş öğütme numuneleri daha yüksek tenör ve az oranda yüksek verim değerleri sağlamaktadır. Kuru öğütme tanelerde yüksek strese neden olarak tane yüzeyinde etkinleştirilmiş tabakalar oluşturmaktadır. Diğer taraftan öğütmenin sulu ortamda gerçekleştirilmesi numunenin yüzey alanını arttırmaktadır. Feng ve Aldrich (2000) yaş ve kuru öğütmenin kombinasyonlu kullanımı sayesinde flotasyon kinetiği ve tenörde iyileşme görüldüğüne dikkat çekmiştir (Şekil 2.25).

### 2.4.3 Tane boyut etkisi

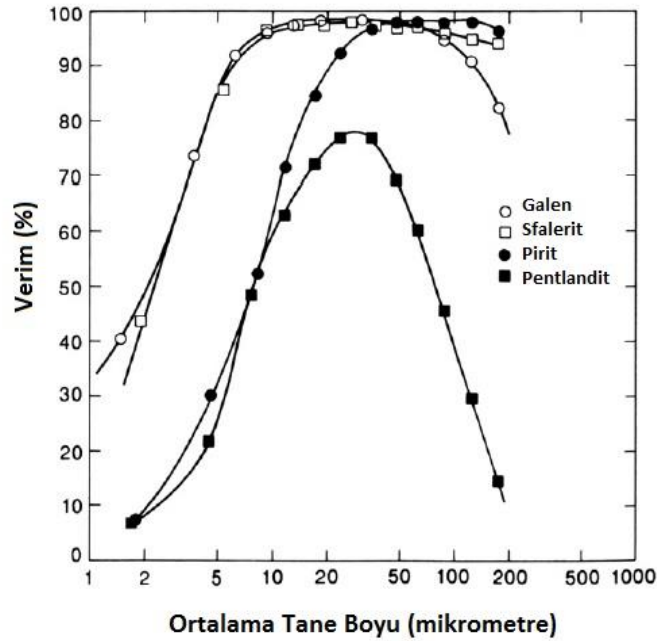
Birçok cevher hazırlama işleminde, pülp reolojisi değerli minerallerin seçimli ayırımında önemli rol oynamaktadır. Katı taneler sıvı içerisinde dağıldığında oluşan fiziksel tane etkileşimleri nedeniyle süspansiyonun viskozitesi katı konsantrasyonu ile birlikte artmaktadır. Özellikle düşük ve orta seviyeli katı konsantrasyonunda hidrodinamik etkiler ağır basmakta ve viskozitede lineer bir artış görülmektedir. Ancak Rutger (1962) çalışmasında belirli bir katı konsantrasyonunda, katı miktarındaki ufak artışların pülp viskozitesini önemli miktarda arttırdığını gözlemlemiştir. Sabit katı konsantrasyonunda, tane boyundaki azalma pülp viskozitesini attırmaktadır. Sistemde bulunan fazla miktardaki ince tane sebebiyle pülp viskozitesi optimum değerini aşarak çok yüksek olabilir ve öğütme verimini azaltabilir (Austin vd., 1984). Bu nedenle öğütme sonucunda oluşan tane boyu dağılımlarının dikkatli incelenmesi, öğütmenin verimliliği açısından çok önemlidir.

Mineral tane boyunun flotasyon sürecindeki önemi uzun zamandır bilinmektedir (Gaudin vd., 1942; Morris, 1952; Spedden ve Hannan, 1948; Trahar, 1981). Yüksek verim alınan tane boyu aralığının genellikle 10-100 µm arasında olduğu ve bu aralık dışına çıktığında verimin düştüğü birçok çalışmada vurgulanmıştır (Anthony vd., 1975; Trahar, 1976; Trahar ve Warren, 1976, Lynch vd., 1981, King, 1982; Shannon ve Trahar, 1986; Klimpel, 1997; Markovic ve Milosavljevic, 2002).

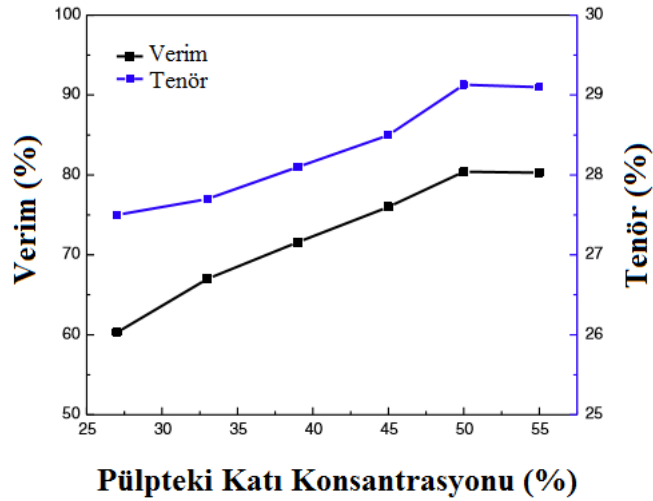
Flotasyon hızı hücre içi hidrodinamik koşullar, kimyasal ortam ve köpük bölgesindeki davranımlara bağlıdır. Farklı tane boyu aralıkları bu değişkenlere farklı tepkiler vermektedirler. İnce tanelerin hava kabarcıkları tarafından yakalanmalarının güçlüğü sebebiyle verim hızları daha yavaştır ve sürüklenmeye eğilimlidirler. Buna ilaveten, çok küçük taneler çok geniş yüzey alanına sahip olmalarından dolayı yüksek miktarda reaktif soğururlar. Belirtilen bu faktörler tenör ve verim üzerinde oldukça büyük etkiye sahiptirler. Ayrıca, bazı durumlarda ince tanelerin flotasyon verimindeki düşüşün, tane yüzeyine soğurulmuş zararlı hidrofil türlerden kaynaklanabileceğini ve bu türlerin kaynağının; proses suyu, sülfürlü minerallerin oksitlenmesi ya da öğütme esnasında tane üzerine soğurulmuş metal hidroksitler olabileceği belirtilmiştir (Johnson, 2005). Diğer taraftan belli bir boydan iri tanelerin zor yüzmesi, hava kabarcığı ile mineral tanesi arasındaki tutunma kuvvetinin tanenin ağırlığını taşıyamayacak kadar az olması sebebiyle hava kabarcığının taneyi

düşürmesi olarak açıklanabilmektedir. Flotasyonda iri tane tanımını 75 mikrondan başlayabilir ancak Trahar (1981) piritik cevherler için bu boyutun 150 mikrona kadar çıkabileceğini göstermiştir. Farklı mineral sistemlerin boyutsal olarak flotasyon verimleri Şekil 2.26'da görülmektedir.

Minerallerin değişen toplayıcı miktarlarına karşı tepkisi tane boyuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Gaudin vd. (1931) sfalerit flotasyonunda farklı tane boyutları için toplayıcı soğurumunun etkisini inceleyen ilk çalışmayı yapmıştır. Bulgulara göre farklı tane boyları aynı kimyasal ortamda farklı flotasyon kinetikleri göstermektedir. İri tane boyundaki tanelerin ince tanelere kıyasla kimyasal ortama daha duyarlı oldukları belirlenmiştir (Trahar, 1981). Shannon ve Trahar (1986) ve Klimpel'in (1997) yaptıkları çalışmalarda ince ve orta boylu tanelerin yüzebilmesi için az miktarda toplayıcı yeterli iken iri tanelerin yüzebilmesi için yüzeylerinin büyük miktarda toplayıcı ile kaplanması gerekmektedir.



Şekil 2.26. Farklı mineral sistemlerinin tane boyutuna bağlı flotasyon verimleri (Jowet, 1979)



Şekil 2.27. Pülpün katı konsantrasyon değişiminin verim ve tenör üzerindeki etkisi (Luo vd., 2016)

Farklı öğütme şekillerinin de pülp reolojisi üzerinde etkisi bulunmaktadır. Taneler arası kırılım sonucunda daha az ince tane öğütülmesine bağlı olarak daha az viskoz pülp oluşmaktadır. Önceki çalışmalarda farklı cevherlerin taneler arası kırılım mekanizmasıyla öğütülmesi sonrasında elde edilen sonuçlara göre en yüksek verimin alınabilmesi için genellikle sonrasından gelen flotasyon koşullarının da ayarlanması gerektiği belirtilmiştir (Crosbie vd., 2005). Bu nedenle taneler arası kırılım sonrasında flotasyonda yeterli katı süspansiyonunu sağlamak için daha yüksek pülp konsantrasyonunda çalışılabilmektedir. Şekil 2.27’de pülp yoğunluğunun flotasyon performansı üzerindeki etkisi görülmektedir. Artan katı konsantrasyonu ile birlikte hem tenörde hem de verimde büyük miktarda artış gözlemlenmiştir. Diğer taraftan yaş öğütme ve hidrosiklon kullanılan geleneksel devrelerde, değirmen ürün konsantrasyonu siklon gereksinimlerine göre ayarlanmak zorundadır. Siklonların genellikle %30 katı konsantrasyonlarının üzerinde çalışmaması sebebiyle sonrasından gelen flotasyon devresi de belirli pülp yoğunluklarının üzerine çıkamamaktadır.

#### 2.4.4 Tane morfoloji etkisi

Farklı değirmenlerde öğütülme sonrası tanelerin şekil ve morfolojik özelliklerinde önemli değişiklikler gerçekleşmektedir. Son dönemde yapılan çalışmalarda minerallerin farklı değirmenlerde öğütülmesi sonucunda yüzey özelliklerinde ortaya çıkan farklılıkların sonrasından gelen flotasyon prosesi üzerinde etkisinin olabileceğini gösterilmiştir (Fahlstrom, 1974, Forssberg vd., 1988, Ulusoy, 1996, Hicyilmaz vd., 1997 Ye vd., 2010a, Ye vd., 2010b).



Tanelerin kimyasal, fiziksel ve yüzey özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden biri tane şeklidir, bu bağlamda flotasyon üzerindeki etkisi kaçınılmazdır. Tane şekil parametreleriyle ilgili ilk çalışmalar tane ve kabarcık arasındaki yapışma (adhesion) kuvvetinin tane şekline bağlı olduğunu göstermiştir (Huh vd., 1974) Yüksek yüzey pürüzlülüğü tane ve kabarcığın ayrılmasına neden olan kuvvetleri arttırmaktadır (Ahmed vd.,1999).

Öğütme sonucu oluşan tanelerin şekilleri, kristal dilinim gibi malzemenin karakteristik özelliklerine ve öğütme sürecinin doğasına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Tane şeklinin öğütme sonucunda değiştiği kabul edilse de tane şekillerinin ölçülmesinin zorluğu sebebiyle araştırmacıların fikir ayrılıkları da bulunmaktadır. Örneğin Bond (1954) çalışmasında kırılan tanenin karakteristik özelliklerinin öğütme mekanizmasına oranla tane şekli üzerinde daha çok etkisinin olduğunu iddia etmektedir. Buna paralel olarak Heywood (1961) tane şekillerinin malzemenin karakteristiğine bağlı olduğunu savunmuştur. Ancak Rose (1961) ve Oja ve Tuunila (2000) malzeme özelliklerinin tane şeklini etkilediğini fakat esas etkili faktörün kullanılan değirmen tipi olduğunu belirtmişlerdir. Tanelerin kırılma sonrası karakteristik şekillerinin öğütme ekipmanlarına bağlı olduğu ise genel kabul görmüş bir bulgudur.

Farklı öğütme tekniklerinin mineraller üzerindeki etkisi literatürde geniş yer bulmaktadır. Tane şekilleri üzerine yapılan araştırmalarda çubuklu değirmenle yapılan öğütme sonucunda daha keskin (açılı), bilyalı değirmende ise daha yuvarlak taneler elde edildiği gözlemlenmiştir (Yekeler vd., 2004). Sonuçlar yapılan işlem detaylarına göre değişebilmektedir (Gaudin, 1926). Vizcarra vd.nin (2011) kalkopirit minerali kullanarak yaptıkları çalışmada, açılı tanelerin flotasyon kinetiği üzerindeki etkisinin sadece düşük yüzebilirliğe sahip taneler için toplayıcı yokluğunda önemli olduğu bulunmuştur. Tane yüzebilirliğinin çok daha fazla olduğu toplayıcı (PAX) kullanılan sistemlerde tane şekli ile yüzey kimyası ve konsantreye giden tane hızları arasında bir ilişki kurulamamıştır. Çalışma sonucunda tane şekil özelliklerinin yavaş yüzen mineraller için önemli olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple gang mineralleri gibi zayıf hidrofobik minerallerin flotasyon performanslarının tane şekliyle ilişkili olduğu söylenmektedir.

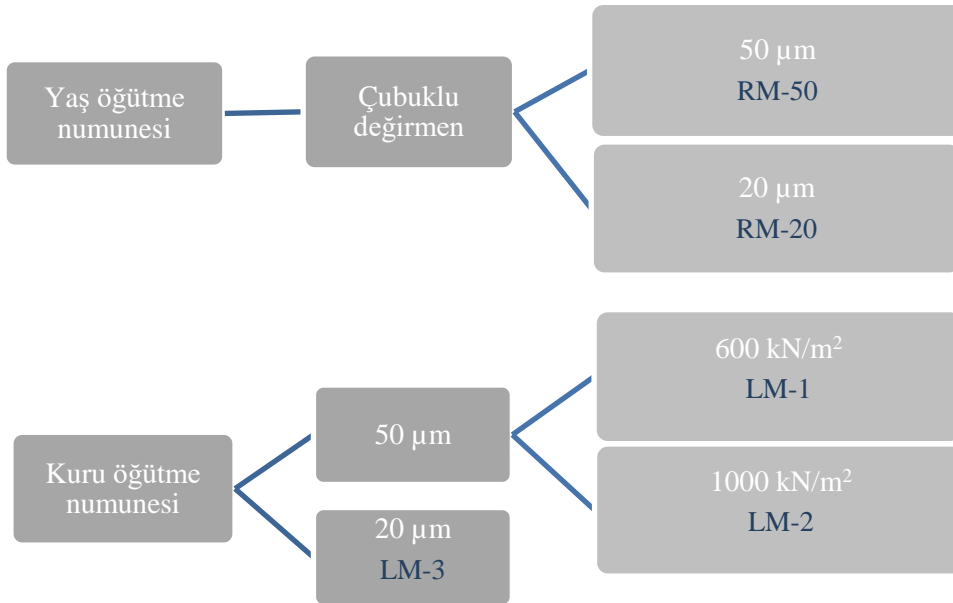
Yekeler vd.nin (2004) yaptıkları çalışmada bulunan diğer bir sonuç ise çubuklu değirmende öğütülen tanelerin bilyalı değirmende öğütülene kıyasla daha pürüzsüz yüzeye sahip olmalarıdır. Ayrıca otojen değirmenle yapılan öğütme sonucunda her parametre için ortalama değerler bulunmuştur Ancak Forssberg ve Zhai'nin (1985) çalışmasında bilyalı ve çubuklu değirmene kıyasla otojen öğütme sonucunda daha az uzunluğa sahip daha yuvarlak taneler, daha pürüzsüz yüzey ve daha yüksek serbestleşme sağlanmaktadır. Bu sebeple otojen öğütme ile daha yüksek tenörlü konsantre ve daha iyi verim değerleri elde edilebilmektedir. Forssberg vd.nin (1993) başka bir çalışmasında galenit, sfalerit, pirit ve az miktarda altın ve gümüş içeren numune ile yaptıkları deneylerde otojen ve geleneksel tamburlu değirmen ile öğütmenin tane şekli üzerinde bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Feng ve Aldrich (2000) kompleks sülfürlü mineral kullanarak kuru ve yaş öğütme üzerinde yaptıkları çalışmada kuru öğütme sonucunda tanelerin daha pürüzlü ve yüzeylerinde mikro yapısal bozukluklara sahipken, yaş öğütme sonucunda daha pürüzsüz ve temiz yüzeyler elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca kuru öğütme sonrası canlandırılmış mineral yüzeylerinin tane çözünmesini ve böylelikle reaktiflerin mineral yüzeyine soğurumunu da hızlandırdığını saptamışlardır. Kuru öğütülmüş numunelerin daha durağan, daha yüklü köpüğe ve flotasyon hızına sahip olduğu da bulgular arasındadır. Rahimi vd. (2012a, b) tarafından yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğünün tane şekline oranla flotasyon kinetiği üzerinde daha fazla etkisi olduğu saptanmıştır.

Sonuç olarak öğütme süresince etkili olan farklı kırılma mekanizmaları tane şekil özelliklerinde farklılıklar yaratmaktadır. Oluşan bu farklılıklar mineral tipine ve flotasyon koşullarına bağlı olarak flotasyon performansını az ya da çok oranda etkilemektedir.

### 3 MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Malzeme

Bu tez çalışmasında Güney Amerika menşeli kompleks sülfürlü galenit-sfalerit cevheri ile çalışılmıştır. Pilot tesisten Loesche değirmeninde kuru öğütülen iki farklı tane boyunda (P80: 20 ve 50  $\mu\text{m}$ ) ve 50  $\mu\text{m}$  tane boyutu için tane boyut dağılımları birbirinden farklı olan iki adet numune alınmıştır. Kuru öğütme numunelerinin tane boyu dağılımlarındaki fark öğütüldükleri basınç değerlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. LM-1 ve LM-3 numuneleri 600  $\text{kN/m}^2$ , LM-2 numunesi ise 1000  $\text{kN/m}^2$  basınç altında öğütülmüştür. Tesisten kırıcı sonrası 2 mm boyutunda alınan numune ise yaş öğütme deneylerinde kullanılmıştır. Kuru ve yaş öğütülmüş galenit-sfalerit cevherinin flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Flotasyon testleri sonrasında kimyasal analizler ACME Lab. tarafından yapılmıştır (Çizelge 3.1).



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan numuneler

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan cevherlerin kimyasal analizi (RM: Yaş öğütme numunesi, LM1, LM2: Kuru öğütme numunesi (50 $\mu$ m); LM3: Kuru öğütme numunesi (20 $\mu$ m))

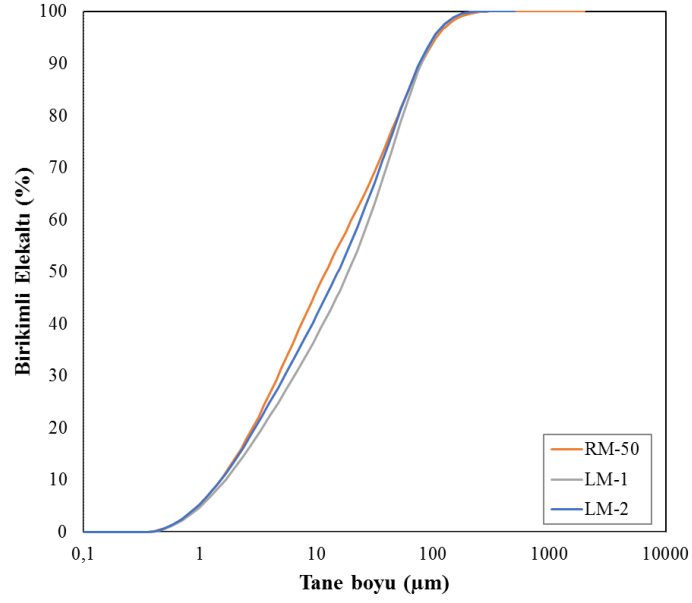
Numune	Pb %	Zn %	Fe %	Ag g/t	Cu %	S %
RM	1,07	2,74	23,22	24	0,08	2,65
LM1	1,22	2,85	22,22	28	0,07	2,69
LM2	1,27	2,97	22,36	31	0,06	2,75
LM3	1,35	3,12	19,30	38	0,05	2,86

Cevher, sülfür mineralleri olarak başlıca götit ( $Fe_3O(OH)$ ) ve sfalerit ( $ZnS$ ), pirit ( $FeS_2$ ), galenit ( $PbS$ ), kalkopirit ( $CuFeS_2$ ) içermektedir. Cevherdeki kurşun minerali %99 oranında galenitten oluşurken, çinko minerali %98,78 oranında sfaleritten oluşmaktadır. Demir minerali ise başta götit (%81,64) olmak üzere geri kalanı hematit ve piritten oluşmaktadır. Cevherin mineralojik birleşimi Çizelge A1’de görülmektedir.

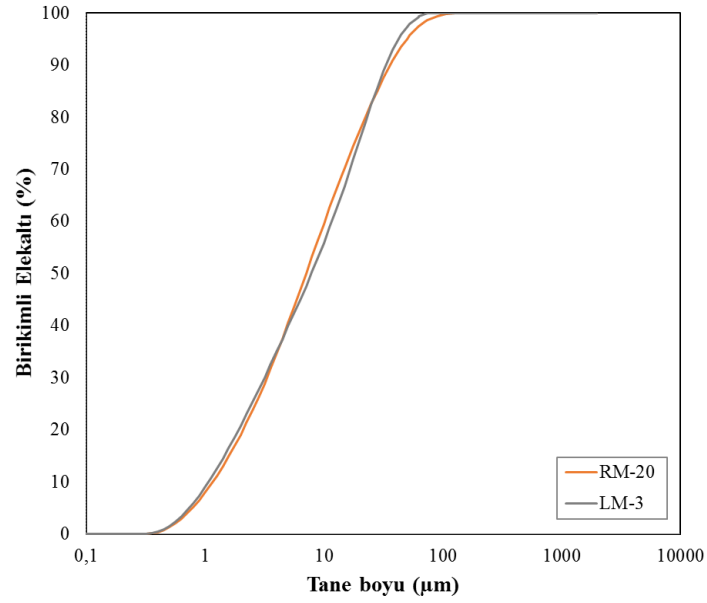
Çizelge 3.2. RM numunesine ait fraksiyonel serbestleşme verileri

	Galenit ( $PbS$ ) %	Sfalerit ( $ZnS$ ) %
+75 $\mu$ m	8,00	22,78
- 75 + 53 $\mu$ m	27,36	46,28
- 53 + 38 $\mu$ m	36,17	55,17
- 38 + 25 $\mu$ m	82,20	84,83

Zenginleştirme süreçlerinden önce mineralin serbestleşme boyutunun belirlenmesi, zenginleştirmenin verimli olabilmesi ve zenginleştirme işlem tayinine yardımcı olması sebebiyle çok önemlidir. Özellikle flotasyon deneylerinde elde edilen düşük verim değerleri minerallerin yetersiz serbestleşmesine veya tane boyu etkisine atfedilmektedir. Maden Tetkik Arama (MTA) tarafından yapılan serbestleşme analizi verileri (MLA- Mineral Liberation Analysis), çalışılan galenit-sfalerit cevheri için en yüksek serbestleşmenin -38  $\mu$ m fraksiyonunda görülmektedir (Çizelge 3.2).



Şekil 3.2. RM-50, LM-1 ve LM-2 numunelerinin tane boyut analizi



Şekil 3.3. RM-20 ve LM-3 numunelerinin tane boyut analizi

20 ve 50  $\mu\text{m}$  boyutundaki numunelerin tane boyut analizleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de görülmektedir.

### 3.2 Yöntem

Literatür araştırmalarında görüldüğü üzere kuru ve yaş öğütmenin flotasyon performansı üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Ancak dik değirmen ve

geleneksel tamburlu değirmenlerin karşılaştırılması üzerinde yoğunlaşmamıştır. Bu çalışmada dik değirmende kuru olarak öğütülen ve çubuklu değirmende yas olarak öğütülen galenit-sfalerit cevherinin flotasyon performansları incelenmiştir. Görülen farklılıkların öğütme mekanizmalarından kaynaklandığı hipotezinden yola çıkılarak flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının akım şeması Şekil 3.4’de görülmektedir. Numuneler öncelikle aynı koşullarda iken flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu aşamada pH’ın flotasyon performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonrasında reaktif dozajları ve koşullandırma sureleri değiştirilerek deneyler yapılmış ve her öğütme numunesi için farklı reaktif rejimlerinde optimum şartların sağlandığı saptanmıştır. Numuneler hem aynı hem de farklı koşullar altında iken flotasyon performansları arasında fark bulunduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu farklılıkların nedenleri tane boyu dağılımı, serbestleşme, tane şekli ve yüzey özellikleri ve pülp potansiyelleri incelenerek araştırılmıştır.



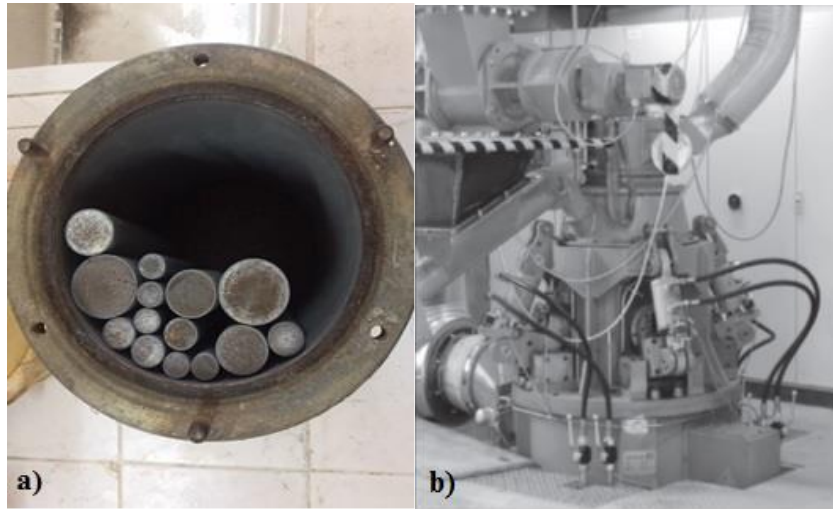
Şekil 3.4. Tez çalışması akım şeması

### 3.2.1 Öğütme deneyleri

Değirmen besleme boyutundaki cevher, çubuklu değirmen (200 x 250 mm) kullanılarak, cevher ile ilgili gerçekleştirilen ön çalışmalar ışığında belirlenmiş öğütme şartlarında %60 pülp yoğunluğunda, P80 20 veya 50  $\mu\text{m}$  olacak şekilde yas olarak öğütülmüştür (Şekil 3.5a). Değirmen hacminin %42’si çubuk, çubuklar arası boşluğun %62,2’si ise malzeme ile doludur. Çubuk ağırlığı ise 12,9 kg’dır. Öğütme boyunca yeni mineral yüzeyleri oluşmaktadır ve pH değerinin yüzey türlerinin oluşumu üzerinde büyük etkisi vardır. Ayrıca çelik öğütme ortamının yükseltgenmesi pH’a bağlıdır. Bu yüzden

öğütme pH'ı, sonrasında gelen flotasyon prosesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bastırıcılar ve kireç yaş öğütme deneylerinde yeni oluşan mineral yüzeylerine etki etmesi ve pH kontrolü için numune ile birlikte değirmene eklenmiştir.

Pilot tesisten temin edilen cevher, Loesche LM 3,6 model değirmen ile öğütülmüştür. LM 3,6 modeli 2 adet 707 kg/s kapasiteli valse sahiptir (Şekil 3.5b). Loesche değirmenleri öğütme tablasının üzerindeki sınıflandırıcı sayesinde öğütmeyi ve sınıflandırmayı tek üniteye birleştirmektedir. Malzeme dik değirmen haznesine valslerin altından beslenir, vals sonrasında öğütülen malzeme yüksek verimli dinamik sınıflandırıcılara aktarılır ve ince malzeme irilerden ayrılır. İri malzeme tekrar öğütme tablasına yönlendirilir ve yeni besleme ile birleştirilir.



Şekil 3.5. a) Deneylerde kullanılan çubuklu değirmen b) Pilot ölçekli Loesche değirmeni

### 3.2.2 Flotasyon deneyleri

Flotasyon deneyleri Ünal Makine A.Ş. tarafından üretilmiş flotasyon makinesinde 2,5 litre hacimli flotasyon hücresinde çeşme suyu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6.) Flotasyon deneyleri aynı koşullarda hem kuru hem de yaş öğütme numuneleri için tekrar edilmiştir. Numuneler yaş öğütmeyi takiben flotasyon hücresine doğrudan beslenerek sülfürlü cevherin oksitlenmesine imkan vermeden yapılmıştır. 50  $\mu\text{m}$  boyutundaki numuneler kullanılarak yapılan deneyler %35 pülp yoğunluğunda, 20  $\mu\text{m}$  boyutundaki

numuneler ile gerçekleştirilenler ise %25, 35 ve 45 pülp yoğunluklarında, 1300 dev/dk. karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan flotasyon makinesi

Kurşun flotasyonu devresinde çinko minerallerinin etkin bir biçimde bastırılması ve kurşun devresi artığından çinko minerallerinin kazanılması amaçlanmıştır. Flotasyon testleri, kaba flotasyon devresi ile başlamaktadır. Kuru ve yaş olarak öğütülmüş örnekler ile gerçekleştirilen flotasyon deneylerinde pülp potansiyelleri ORP metre ile sürekli kayıt altına alınmıştır. pH ve reaktif dozajı etkileri Pb flotasyonu ve devamında Zn flotasyonu aşamasında incelenmiş ve en yüksek Pb ve Zn verimlerinin ve tenörlerinin elde edildiği optimum şartlar belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan reaktiflerin flotasyon devresi içindeki eklenme noktaları Çizelge 3.3' de detaylı bir şekilde görülmektedir. Flotasyon deneylerinde kullanılan reaktifler şu şekildedir:

- Toplayıcı: Aerophine 3418-A (Cytec Industries) ticari adıyla bilinen sodyum-diizobütil ditiyofosfin temelli, sülfürlü mineral toplayıcısıdır. Galenit ve değerli mineraller için etkili bir toplayıcı olması ve hızlı kinetik özellikleri sebebiyle kaba kurşun flotasyon devresinde tercih edilmiştir. Çinko ve demir sülfid varlığında ksantata göre daha seçimlidir. SIPX (Sodium IsoPropyl Xanthate) orta seviyeli ksantat toplayıcısı ise sülfürlü minerallerin flotasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır.



Çinko kaba flotasyon devresinde sfalerit toplayıcısı olarak kullanılmıştır. Ksantat çözeltileri günlük hazırlanmıştır.

- Köpürtücü: Aerofroth-70 (Cytex Industries), düşük moleküler ağırlıklı alkol tipi köpürtücüdür. Flotasyonda seçimliliğin gerektiği koşullarda alkol tipi köpürtücü kullanımı esastır.
- Bastırıcı: Sodyum Metabisülfid ( $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ ) ve Sodyum Siyanür ( $\text{NaCN}$ ) sfalerit ve demir sülfidleri bastırmak amaçlı kullanılmıştır.  $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}$  toplayici soğurumunu ve hidrofobik türlerin mineral yüzeyindeki oluşumunu engellemektedir (Pattison, 1981; Shuhua, 2006).
- Canlandırıcı: Bakır sülfat ( $\text{CuSO}_4$ ) ise bastırılan sfaleritin çinko devresinde canlandırılması için kullanılmıştır.

Flotasyon deneylerinde kullanılan 3418A ve köpürtücü çözeltileri %1'lik (v/v) hazırlanırken kireç pülpe katı olarak eklenmiştir.

Çizelge 3.3. Flotasyon testlerinde kullanılan reaktifler ve eklenme noktaları

Numune	Ekleme Noktası	Reaktifler						
		$\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$	$\text{NaCN}$	3418-A	$\text{CuSO}_4$	SIPX	AF-70	Kireç
Kuru	Değirmen							
	Pb Flotasyonu	✓	✓	✓			✓	✓
	Zn Flotasyonu				✓	✓	✓	✓
Yaş	Değirmen	✓	✓					✓
	Pb Flotasyonu			✓			✓	✓
	Zn Flotasyonu				✓	✓	✓	✓

### 3.2.3 Pülp potansiyel ölçümleri

Farklı öğütme koşullarında öğütülen numuneler flotasyon hücresine beslendikten itibaren Eh değerleri platin ORP elektrodu kullanarak belirli aralıklarla ölçülmüştür. Ölçümlerde Hach HQD Portable Meter modeli kullanılmıştır. Bu cihaz kullanımında pH ve redoks potansiyel değerleri flotasyon öncesi ve her reaktif ekleme sonrası kaydedilmiştir. Ölçümler öncesinde elektrotlar temizlenmiş ve kalibrasyonları kontrol edilmiştir. ORP elektrotunun kalibrasyonu standart çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. Ölçülen potansiyel

değerleri Ag/AgCl ölçeğinden SHE (Standart Hidrojen Elektrodu) ölçeğine Eşitlik 3.1 kullanılarak dönüştürülmüştür.

$$E_{SHE} = E_{Ag/AgCl(volt)} + 0,207 \quad (3.1)$$

### 3.2.4 Tane boyutu analizi

Farklı öğütme şartları kullanarak hazırlanan numunelerin tane boyut analizi, Lazer Difraktometre yöntemiyle çalışan tane boyutu ölçüm cihazı (Malvern Mastersizer Hydro 2000 MU-Malvern Co., Ltd., UK) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Her yaş öğütme deneyi sonunda, numuneler flotasyon hücresinde koşullanan pülpten şırınga yardımı ile alınmıştır. Cihaz, örneklerin boyut ölçümünü belli aralıklarda tekrarlayarak üç kere ölçmekte ve bu üç ölçümün ortalamasını vermektedir. Ölçümler sonunda elde edilen ortalamalar sonuçların değerlendirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Tane boyutu ölçüm cihazı

### 3.2.5 Taramalı elektron mikroskopu- SEM (Scanning Electron Microscopy) Analizi

Kuru ve yaş öğütme numunelerinin fraksiyonel (75, 63, 53, 45, 38, 25  $\mu\text{m}$ ) bazda SEM analizleri Anadolu Üniversitesi Seramik Araştırma Merkezi'nden hizmet alımı ile yapılmıştır. Ölçümlerde Zeiss Supra VP50 model SEM kullanılmıştır. Tüm numunelerin fraksiyonel ölçümleri Ek açıklamalar-B kısmında görülmektedir.

### 3.2.6 Görüntü analizi

Tanelerin şekil karakterizasyonunu yapmak amacı ile birçok yöntem geliştirilmiştir. Tanelerin şekil parametrelerini analiz eden bilimsel metotlardan biri görüntü analiz yöntemidir ve sıklıkla kullanılmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan galenit-sfalerit cevherinin şekil karakterizasyonu Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarında Particle Insight Dynamic Image Analyzer, One Micromeritics Drive, Norcross, GA30093-1877 ile yapılmıştır (Şekil 3.8).

Particle Insight Analyzer iki önemli özelliği kullanarak analiz yapmaktadır: rastgele yönlendirme ve numunelerin yeniden dolaşımı. Bu özellikler numuneye ait kesin veriler elde etmek ve gerçek betimlemesini yapabilmeye yardımcı olmaktadır.

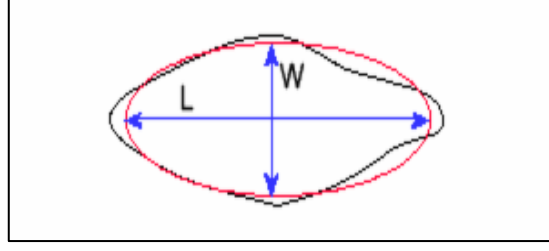


Şekil 3.8. Tane şekil analiz cihazı

Yuvarlaklık, alan (A) ve sınırlayıcı çember yarı çapı (DBC) kullanılarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.1). Bu ölçüm fraksiyonel olup, mükemmel yuvarlaklık 1 ile ifade edilmektedir. Değer ne kadar 1'e yakınsa o kadar yuvarlak olmaktadır. Yuvarlaklık değeri tane çevresindeki ufak düzensizliklerden ve çevre ölçümündeki hatalardan etkilenmemektedir.

$$\text{Yuvarlaklık} = \frac{4A}{\pi DBC^2} \quad (3.1)$$

Elips Uzunluk Oranı (EEAL) eşdeğer elips alan uzunluk ve genişlik değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Eşdeğer elips alan uzunluğu (L) ve genişliği (W)

Pürüzsüzlük tane kesitinin çevresindeki bölgesel dalgalanmaların ölçümünü ifade etmektedir. 1 değeri yüzeyde hiçbir pürüzlülüğün olmadığını, daha düşük değerler ise yüzeydeki pürüzlülüğün arttığını göstermektedir.

#### 4 BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı öğütme koşullarının ve mekanizmalarının galenit-sfalerit cevherinin flotasyonu üzerindeki etkisinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan deneylerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

Yaş öğütme numunesi için MLA sonucunda elde edilen değerler mineral serbestleşmesinin çok ince boyutta ( $-38 \mu\text{m}$ ) gerçekleştiğini göstermektedir. RM numunesinin serbestleşme verilerinden hareketle serbestleşmenin tam olarak gerçekleşmediği, çoğunlukla ikili ve üçlü bağlı tanelerin bulunduğu düşünülen P80  $50 \mu\text{m}$  tane boyutunda farklı öğütme mekanizmalarının flotasyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak tesisten gelen boyutları P80  $50 \mu\text{m}$  olup farklı boyut dağılımına sahip iki kuru öğütme numunesi ve kırıcı sonrası alınan iri boyutlu yaş öğütme numunesi, numune bölme yöntemlerine göre ayrılarak deneyler için hazırlanmıştır. Deney düzeneği oluşturulduktan sonra tesisten gelen iri boyutlu numunenin boyutunu P80  $50 \mu\text{m}$ 'ye indirmek için öğütme deneyleri gerçekleştirilmiştir.  $50 \mu\text{m}$  boyutundaki numune ele alınarak kuru ve yaş öğütme şartları için optimum Pb ve Zn flotasyon koşulları belirlenmiştir. Farklı kırılma mekanizmaları sonucu oluşan numuneler arasında ortaya çıkan kimyasal ve fiziksel farklılıkların flotasyon davranımlarına da yansıdığı saptanmıştır. Reaktif miktarları, koşullandırma süreleri ve pH değerlerinde yapılan değişiklikler sonucu her öğütme mekanizması için farklı bir optimum şart belirlenmiştir. İkinci aşamada, belirlenen optimum flotasyon koşullarında kuru ve yaş öğütmenin flotasyon verim ve tenörü üzerine etkileri incelenip, hangi öğütme mekanizmasının daha etkin olduğu saptanmış ve bunun nedenleri araştırılmıştır. Üçüncü aşamada serbestleşmenin yüksek oranda sağlandığı düşünülen P80  $20 \mu\text{m}$  tane boyutunda, farklı yüzde katı miktarlarının ve öğütme şartlarının flotasyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 4.1 Galenit-Sfalerit Flotasyon Deneyleleri

### 4.1.1 Galenit flotasyon devresi

Kuru ve yaş numunelerin tane boyut dağılımları P80 boyutları yaklaşık olarak aynı olacak şekilde olabildiğince birbirine eş değeri lenmiştir. Yapılan boyut analizleri sonucu numunenin çubuklu değirmende 50 µm'ye 52 dakikada indiği belirlenmiş ve daha sonraki öğütme deneyleri bu süre temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Öğütme sonrası flotasyon aşamasında ilk olarak galenit minerali 12 dakika boyunca yüzdürülmüştür. Yapılan flotasyon deneylerinde sırasıyla pH ve reaktif dozaj değişiminin galenit mineralinin flotasyon performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

#### 4.1.1.1 pH etkisi

pH değişiminin flotasyon performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla yapılan deneylerin şartları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Yaş ve kuru öğütme numuneleri kullanılarak 35% katı konsantrasyonunda ve değişen pH değerlerinde flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. pH etkisinin incelendiği galenit flotasyonu deney koşulları

		Koşullandırma Süresi (dk.)
Bastırıcı	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> (1000 g/t), NaCN (200 g/t)	55
Toplayıcı	3418-A (30 g/t)	5
Köpürtücü	AF-70 (40 g/t)	1
pH	nötr, 8 ve 8,6	

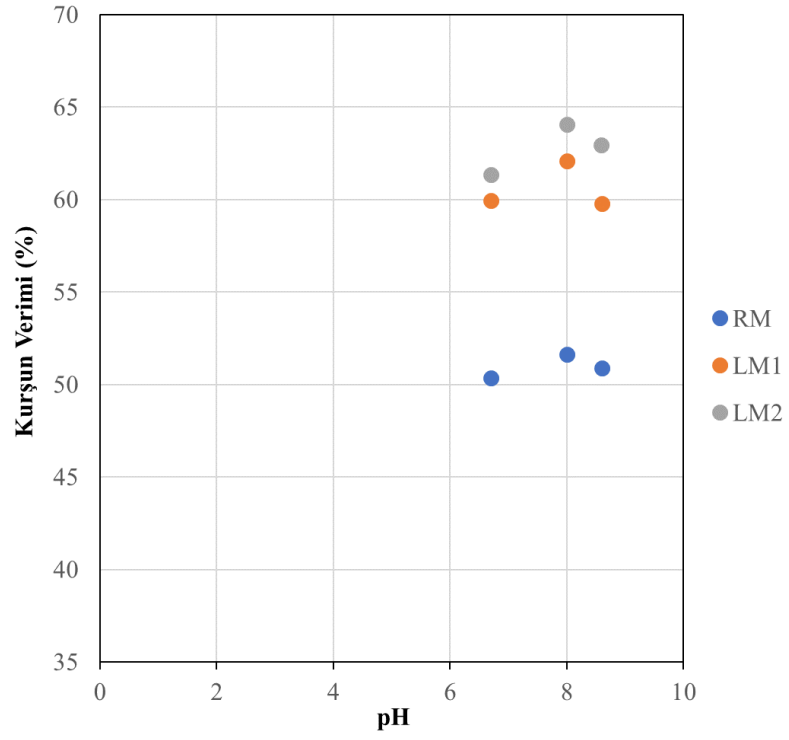
- pH değişiminin flotasyon performansı üzerindeki etkisi

Genel olarak minerallerin yüzebilirliği pH bağımlıdır. Farklı pH değerlerinde oluşan yüzey türleri sadece yüzey hidrofobikliğini değil ayrıca toplayıcı soğurumunu da etkilemektedir (Cases vd. 1993). Farklı öğütme koşullarına sahip numunelerin flotasyonu,

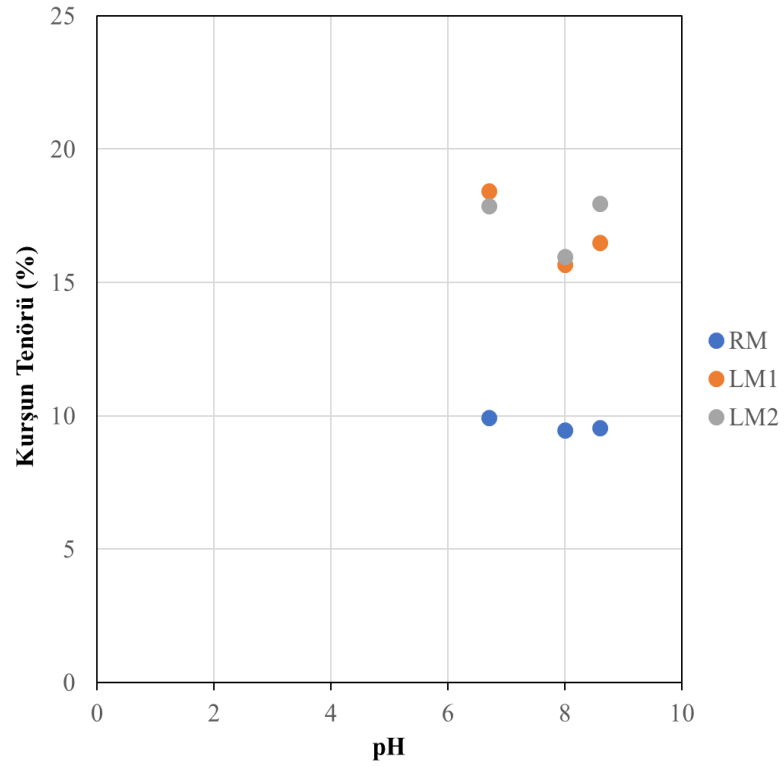
pH değerleri literatür ve ön çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda nötr, 8 ve 8,6 olarak ayarlanarak gerçekteştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar öncelikle numunelere göre incelendiğinde, RM'nin farklı pH'larda kurşun verim değerleri birbirine yakinken, pH 8'de elde edilen değerin diğerlerine göre bir miktar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (şekil 4.1). LM-1 ile yapılan deneylerin sonuçlarında pH 8 değerinde verimde artış görülürken, pH 8,6'ya çıkıldığında azalma gözlemlenmiştir. RM ve LM-1 numuneleri ile yapılan deney sonuçlarına paralel olarak LM-2 numunesinde de pH miktarıyla birlikte verimin arttığı, pH 8,6 da tekrar azaldığı ve en fazla artışın pH 8'de olduğu görölmektedir. Aynı pH değerlerinde farklı numuneler için yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında kuru öğütme ve yaş öğütme numunelerinin verim değerleri arasındaki farkın büyüklüğü dikkat çekmektedir. En düşük kurşun verimi RM numunesi için elde edilirken, en yüksek kurşun verimi LM-2 numunesinde gözlemlenmiştir.

Tenör ve pH arasındaki ilişkiye bakıldığında tenör değerlerinin farklı pH değerlerinde birbirine yakın olduğu ancak pH 8'de nispeten düşük tenör değerleri elde edildiği görölmektedir (şekil 4.2). pH 8'de gözlemlenen düşük tenör değerlerinin yine aynı koşulda elde edilen yüksek verim değerlerindeki artış sebebiyle olduğu söylenebilir. Kuru öğütme numunelerinin tenör değerleri birbirine yakın seyretmektedir. Yaş öğütme ve kuru öğütme numuneleri kıyaslandığında verim değerlerinde görölen farkın tenör değerlerine de yansıdağı görölmektedir. Deney setinde elde edilen kurşun verim ve tenör değerleri arasındaki ilişki şekil 4.3' de görölmektedir. Yaş öğütme sonucunda hem verim hem de tenör değerlerinin kuru öğütmeye oranla çok düşük seviyede olduğu açıkça görölmektedir.

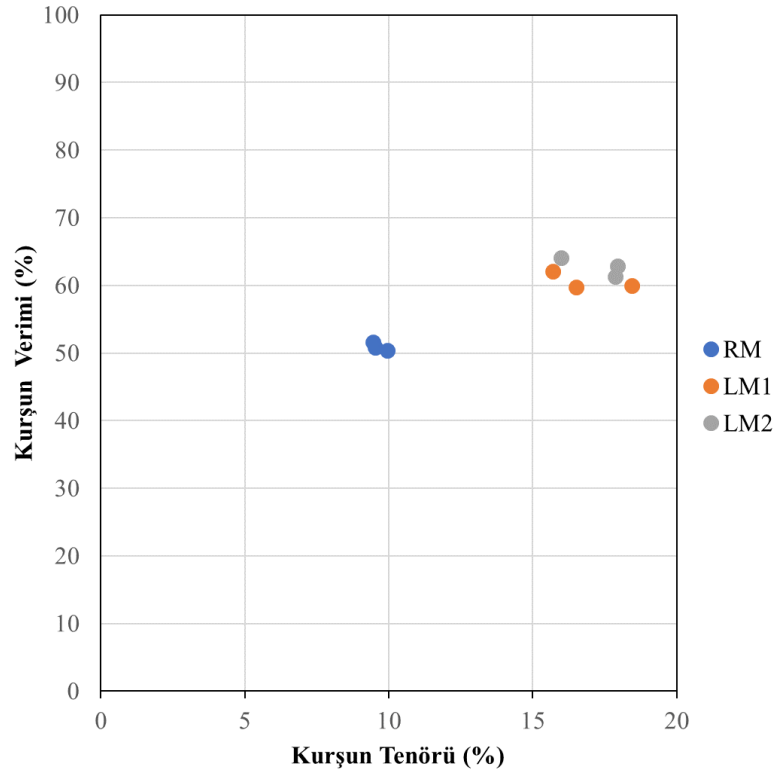


Şekil 4.1. Kurşun verim ve pH ilişkisi



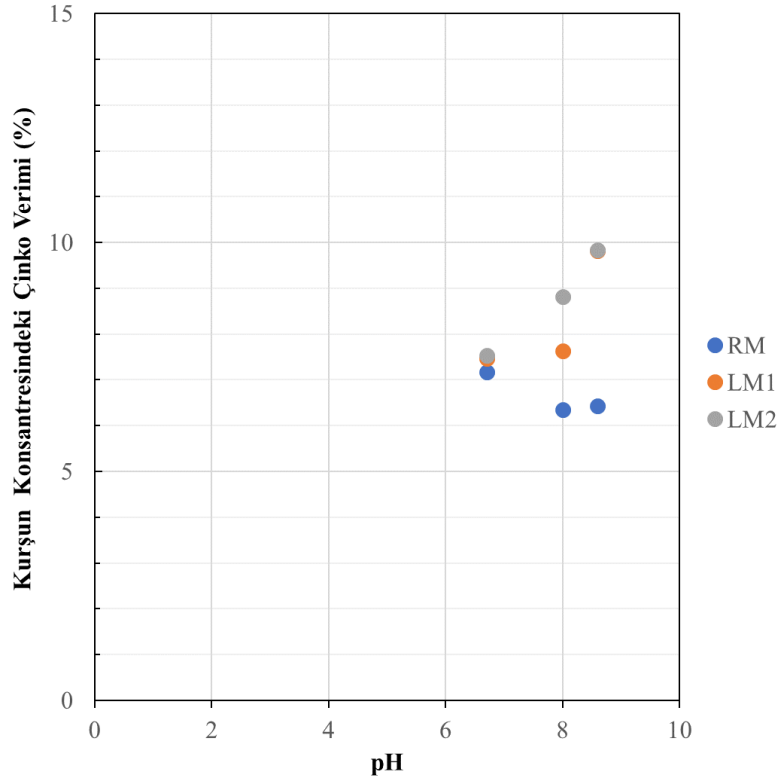
Şekil 4.2. Kurşun tenör ve pH ilişkisi





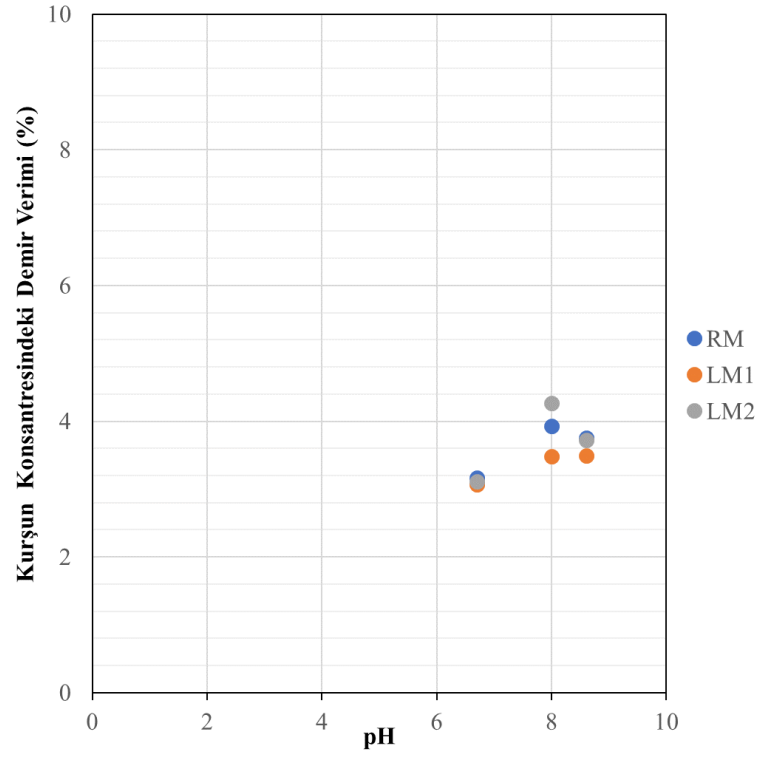
Şekil 4.3. Kurşun tenör ve verim ilişkisi

Flotasyonun doğası gereği değerli mineral kazanımı %100 sağlanamamaktadır. Değerli mineral konsantrisine kazanılması planlanan mineral haricinde başka mineraller de alınmaktadır. Özellikle galenit-sfalerit minerallerinin seçimli ayırımında literatürde detaylı olarak anlatılan sfaleritin istenmeyen canlanması sonucu büyük miktarda çinko kaçağı olmaktadır. Konsantreye kurşun minerali ile birlikte gelen diğer minerallerin miktarının tespit edilebilmesi ve flotasyon seçimliliğinin görülebilmesi adına öncelikle kurşun konsantrisindeki çinko mineralinin verimi farklı pH değerlerinde incelenmiştir. Şekil 4.4'de görüldüğü üzere RM numunesinde çinko verim değerleri birbirine yakın seyretmektedir. Artan pH değerleriyle birlikte kurşun konsantrisindeki çinko kaçağı miktarında az miktarda düşüş görülmektedir. Sonuçlar kuru öğütme deneyleri için incelendiğinde artan pH değerleri ile birlikte kurşun konsantrisindeki çinko kazanımının da arttığı görülmektedir. Nötr pH koşulunda çinko veriminin tüm numuneler için aynı seviyede olduğu görülmektedir. Ancak pH 8,6'da LM-1 ve LM-2 için elde edilen çinko verimi miktarında büyük bir artış görüldüğü ve her iki numune için değerlerin neredeyse aynı olduğu saptanmıştır. Özellikle kuru öğütme numuneleri göz önüne alındığında yüksek katı kazanımı dolayısıyla fazla miktarda çinko kaçağı içeren pH 8,6 deneyi en az seçimlilik gösterirken pH 8'de seçimliliğin daha iyi olduğu görülmektedir.

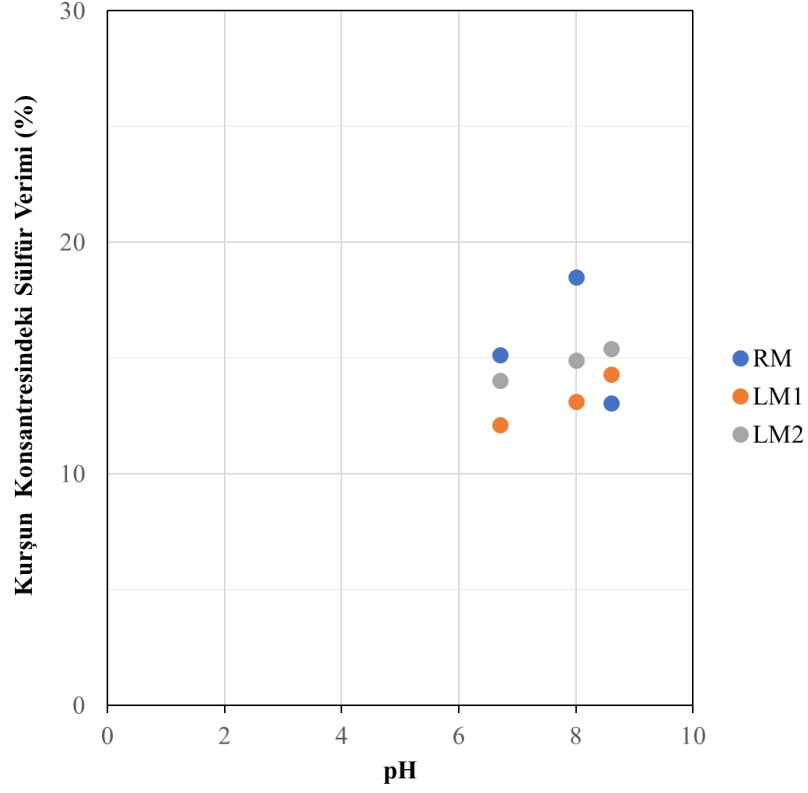


Şekil 4.4. Kurşun konsantresindeki çinko verimi ve pH ilişkisi

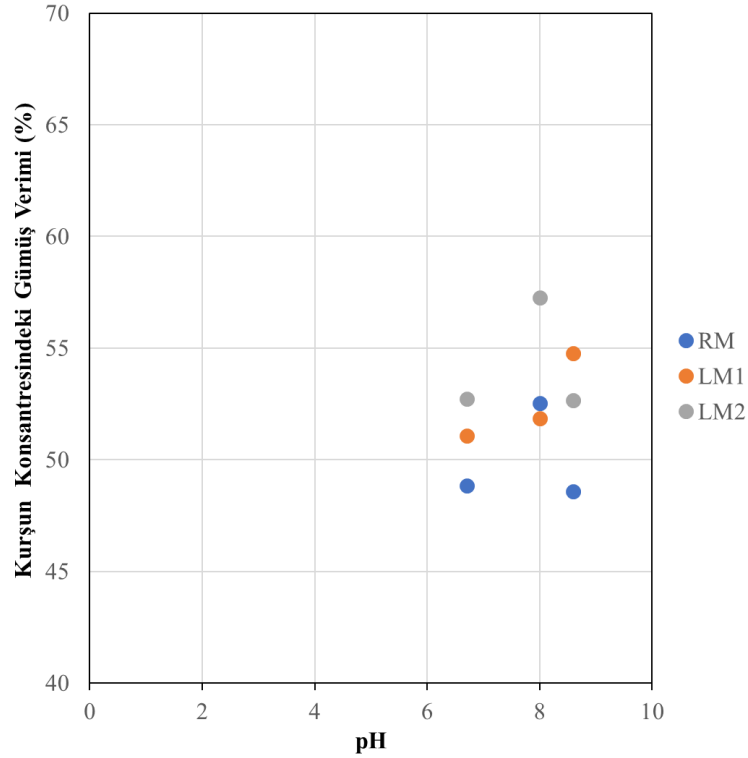
Kurşun mineralinin diğer minerallerle olan seçiciliğinin de görülmesi adına kurşun konsantresindeki demir ve gümüş miktarları da incelenmiştir. Kurşun konsantresi ile alınan demir mineralinin verim ve pH ilişkisi Şekil 4.5’de görülmektedir. Demir verimi en az nötr pH’da elde edilirken, özellikle RM ve LM-2 numunesi için en yüksek değerler pH 8’de görülmüştür. Kurşun konsantresindeki sülfür verimi kuru öğütme numuneleri için pH değeri ile birlikte artmaktadır. RM numunesinin sülfür kazanımı en yüksek değerine pH 8’de ulaşırken, pH değerinin artması ile sülfür kazanımı hızlı bir şekilde azalmaktadır. Kurşun konsantresindeki gümüş veriminin pH ile ilişkisi Şekil 4.7’de görülmektedir. Tüm pH değerleri göz önüne alındığında genellikle kuru öğütme numunelerinin gümüş kazanımının daha yüksek olduğu söylenebilir. Özellikle pH 8’de neredeyse tüm numuneler için en yüksek gümüş kazanımının elde edildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Kurşun konsantresindeki demir verimi ve pH ilişkisi



Şekil 4.6. Kurşun konsantresindeki sülfür verimi ve pH ilişkisi



Şekil 4.7 Kurşun konsantresindeki gümüş verimi ve pH ilişkisi

RM numunesi için en uygun pH değerini bulmak için yapılan deney sonuçlarında pH değerleri arasında çok büyük farklar bulunmadığı görülmüştür. Yapılan deneylerin kaba flotasyon devresi olması sebebiyle az miktarda da olsa daha yüksek verim değeri elde edilen pH değerinin seçilmesi daha uygun bulunmuştur. pH 8’de yapılan deneyde yüksek verimin yanı sıra konsantreye daha az çinko kaçağı olduğu belirlenmiştir, bu sebeple pH 8 deneyler için en uygun koşul olarak belirlenmiştir.

LM-1 numunesi ile yapılan deneyler sonucunda artan pH değeri ile birlikte katı kazanımı yüzdesinde artış olduğu görülmüştür. Artan katı kazanımı ile birlikte kurşun konsantresine kaçan çinko ve demir miktarı artmakta bu sebeple kurşun tenörü düşmektedir. Daha yüksek kurşun verim değerleri elde edilmesi ve çinko ile seçimliliğin daha yüksek olması sebebiyle flotasyon deneylerinin pH 8’de yapılması uygun bulunmuştur.

LM-2 numunesi ile yapılan deney sonucunda pH 8’de en yüksek verim ve aynı zamanda en düşük tenör değerleri gözlemlenmiştir. Deneylerin kaba flotasyon devresinde gerçekleştirilmesi sebebiyle, en yüksek verim değerlerine sahip pH değerinin en uygun koşul olarak seçilmesine karar verilmiştir.

Sonuçlara genel olarak bakıldığında gerçekleştirilen deney koşullarında, tüm pH değerleri için kuru öğütme numuneleri, özellikle LM-2, ile yapılan deneylerde kurşun verim ve tenör değerlerinin yaş öğütmeye kıyasla çok daha yüksek değerlerde seyrettiği gözlemlenmiştir. Ancak bunun yanı sıra kuru öğütme sonrası katı kazanımıyla doğru orantılı olarak kurşun konsantrisindeki çinko kaçağının da artma eğiliminde olduğu saptanmıştır. Yaş öğütme numunesinin verim ve tenör bazında çok düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Numunelerin verim ve tenör değerlerinde ortaya çıkan bu farkın, öğütme mekanizmalarındaki farklılığın flotasyon performansına yansımaları olduğu düşünülmektedir.

Farklı öğütme mekanizmalarının etkisinin daha iyi incelenebilmesi için farklı koşullarda öğütülen numunelerin optimum flotasyon şartlarının sağlanması gerekmektedir. Farklı koşullarda öğütülen minerallerin optimum flotasyon koşullarında değişiklikler görülebilir. Crosbie vd. (2005) çalışmasında geleneksel değirmenlerde öğütülen minerallerin, taneler arası kırılım prensibi ile öğütülene kıyasla daha farklı ürün vermesinden kaynaklı olarak öğütme ve koşullandırma süresi hatta flotasyon devrelerinde bile değişikliklere ihtiyaç duyulabileceğini belirtmiştir. Düşük bastırıcı ve toplayıcı miktarının kuru öğütme numunelerinde iyi sonuç verdiği ancak yaş öğütme için uygun olmadığı düşünülerek, reaktif miktarları artırılarak bir dizi deney yapılmıştır.

#### **4.1.1.2 Bastırıcı ve toplayıcı dozajının etkisi**

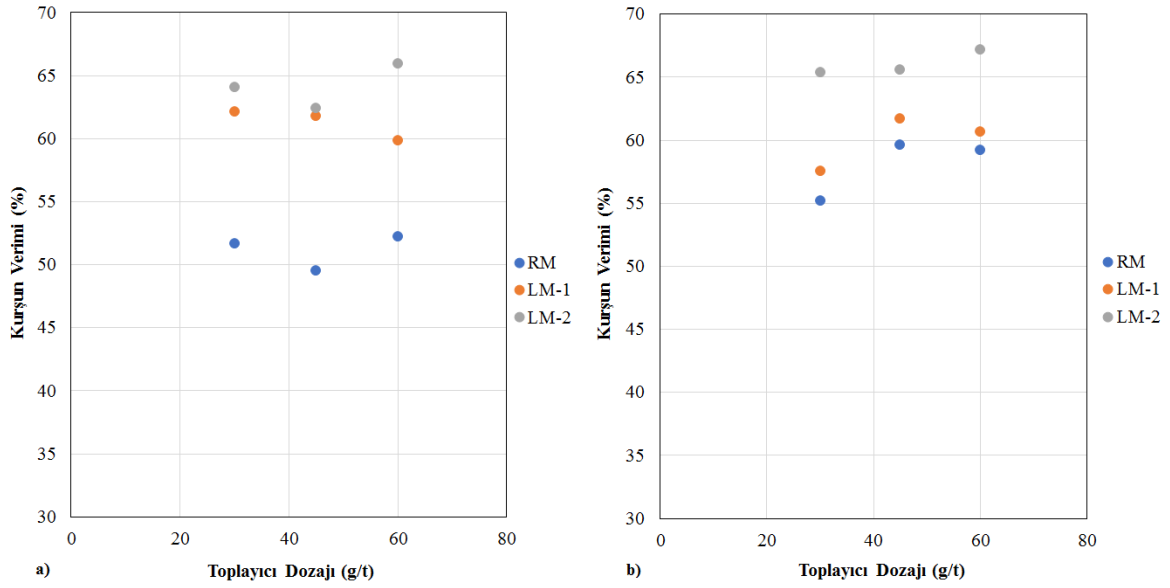
Düşük reaktif dozajları kullanılarak yapılan deneyler sonucunda bu miktarların yaş öğütme numunesinin performansını arttırmak için yeterli olmadığı sonucuna varılmış ve reaktif miktarları arttırılmıştır. Kademeli olarak arttırılan reaktif miktarlarının her iki öğütme tipi üzerindeki etkisinin görülebilmesi için deneyler her numune için aynı şartlarda tekrarlanmıştır (Çizelge 4.2). Öncelikle düşük bastırıcı dozajları ( $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ :1000 g/t, NaCN: 200 g/t) sabit tutularak, farklı toplayıcı dozajlarında (30, 45, 60 g/t) tüm numuneler için kurşun kaba flotasyon deneyleri yapılmıştır. Sonrasında ise bastırıcı miktarları arttırılarak ( $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ :1500 g/t, NaCN: 250 g/t), yeniden farklı toplayıcı dozajlarında (30, 45, 60 g/t) flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 35% katı konsantrasyonunda yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Farklı bastırıcı ve toplayıcı miktarlarında gerçekleştirilen galenit flotasyonu deney koşulları

		Koşullandırma Süresi (dk.)
Bastırıcı	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> (1000, 1500 g/t), NaCN (200, 250 g/t)	55
Toplayıcı	3418-A (30, 45, 60 g/t)	15
Köpürtücü	AF-70 (40 g/t)	1
pH	8	

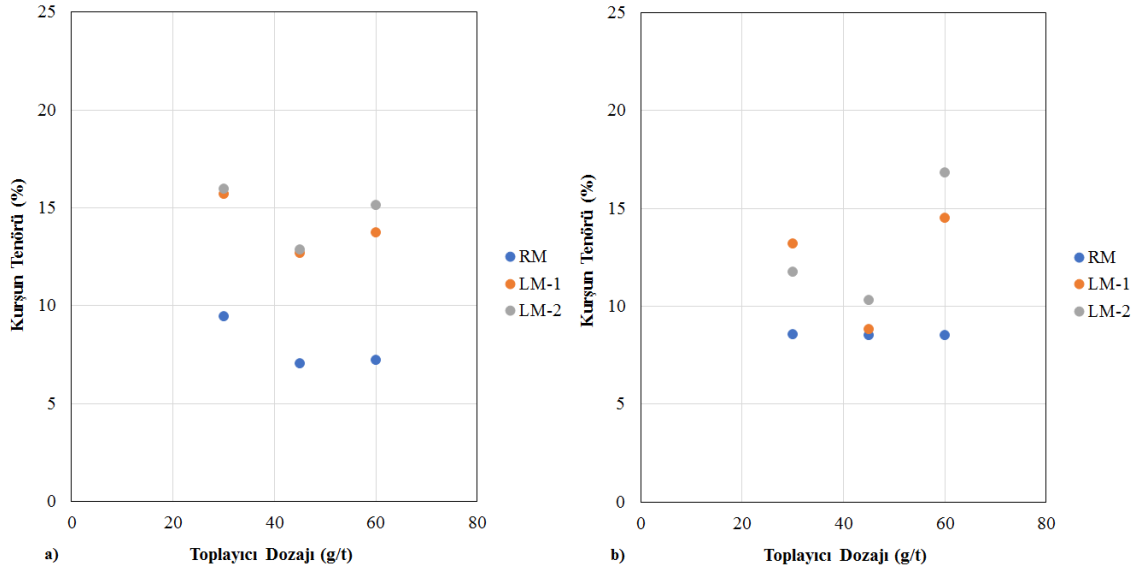
- Farklı bastırıcı dozajlarında toplayıcı etkisi

Düşük seviyede tutulan bastırıcı dozajlarında (Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1000 g/t, NaCN: 200 g/t) toplayıcı miktarı artırılarak numunelerin flotasyon performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan toplayıcı dozajının kurşun flotasyon verimi üzerindeki etkisi Şekil 4.8a'da görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, 3418-A dozajının 45 g/t'a çıkarılması ile birlikte tüm numunelerin kurşun verim değerlerinde azalma görülmektedir. Ancak toplayıcı dozajının 60 g/t'a çıkarılması ile birlikte bu etki tersine dönmüş ve LM-1 numunesi haricinde kurşun verim değerlerinde artış görülmüştür. Bastırıcı dozajının arttırılmasının numuneler üzerindeki etkisi Şekil 4.8b'de görülmektedir. Yüksek bastırıcı dozajında artan toplayıcı miktarı ile birlikte tüm numunelerin kurşun veriminde kısmi bir artış olduğu görülmektedir. Bastırıcı miktarının arttırılması kuru LM-1 ve LM-2 kurşun verimleri üzerinde çarpıcı bir etki yaratmamıştır. Ancak RM numunesine bakıldığında düşük bastırıcı dozajına kıyasla verimin % 10 civarında arttığı görülmektedir.

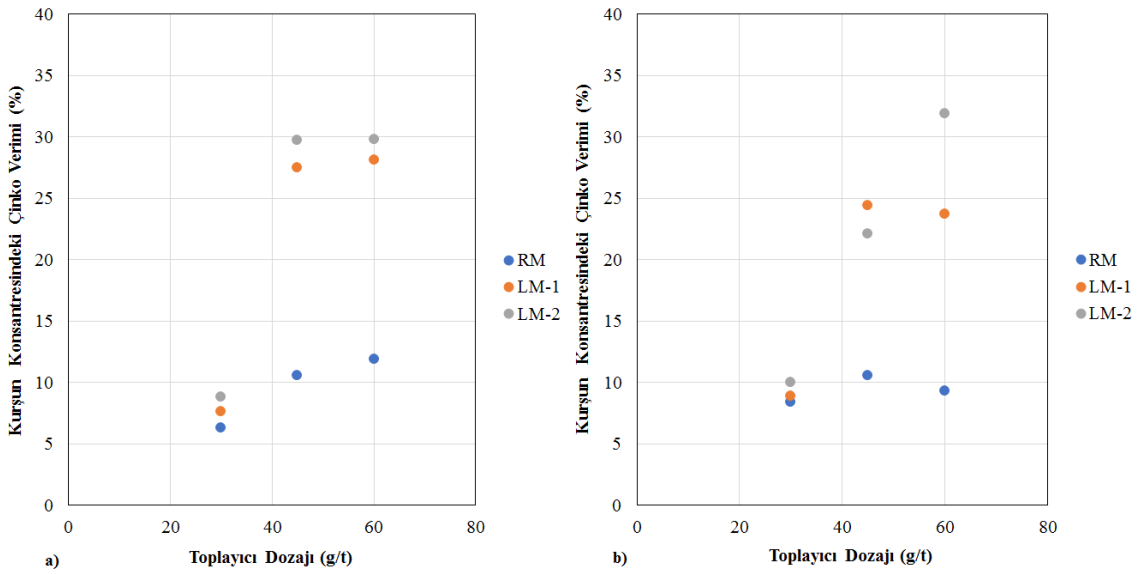


Şekil 4.8. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi  
a) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1500 g/t, NaCN: 250 g/t

Diğer taraftan toplayıcı dozaj değişimine karşılık çizilen kurşun tenör değerleri incelendiğinde, düşük bastırıcı dozajında numunelerin tenör değerlerinin davranımının aynı ancak kuru ve yaş öğütme arasındaki farkın çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bastırıcı dozajının artırılması sonrasında ise RM numunesinin tenör değerlerinde özellikle yüksek toplayıcı dozajlarında iyileşme olduğu, LM-1 ve LM-2 numunelerinin ise tenörlerinin düştüğü görülmektedir (Şekil 4.9b). RM numunesinin tenör değerlerinin yüksek bastırıcı dozajında toplayıcı miktarındaki değişiminden etkilenmediği saptanmıştır. Özellikle kuru öğütme numunelerinde toplayıcı dozajı ile yükselen verim değerleri katı kazanım miktarındaki artışı da göstermektedir (Şekil 4.8). Artan katı kazanımı ile kurşun konsantrisine gelen kurşun harici minerallerin miktarında artış beklendiğinden kurşun ile çinko, demir ve gümüş minerallerin arasındaki seçimlilik grafikleri (Şekil 4.10-Şekil 4.13) çizilerek verim değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.9. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun tenörü ve toplayıcı dozajı ilişkisi  
a)  $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ :1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b)  $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ :1500 g/t, NaCN: 250 g/t



Şekil 4.10. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantrisindeki çinko verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a)  $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ :1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b)  $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ :1500 g/t, NaCN: 250 g/t

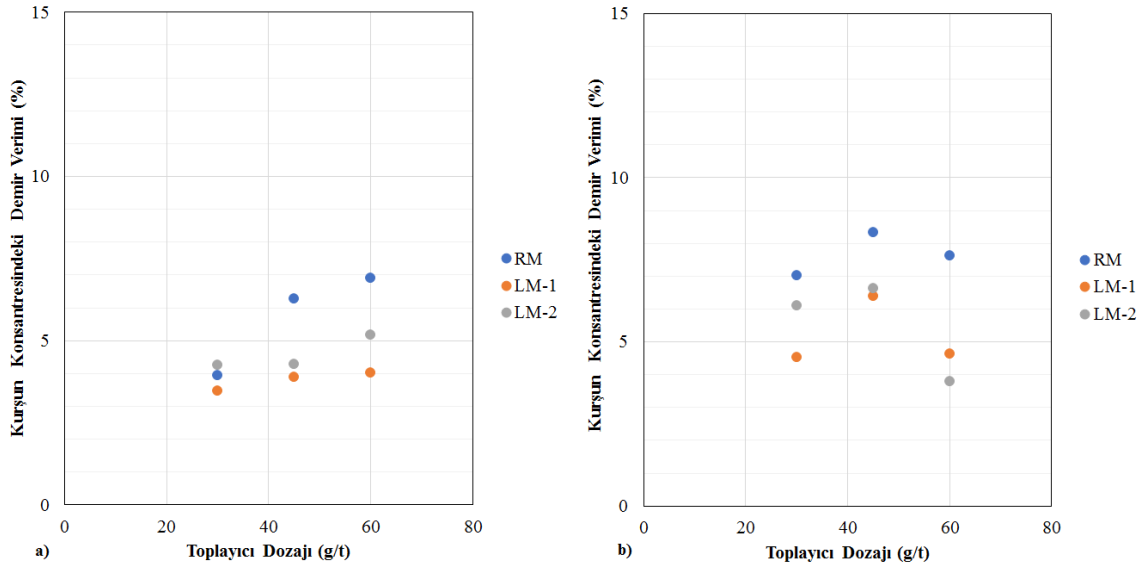
Toplayıcı dozajı en düşük seviyedeysen kurşun konsantrisindeki çinko verim miktarının tüm numuneler için yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 4.10a). Toplayıcı dozajının artması ile birlikte tüm numuneler için çinko veriminin de doğru orantılı olarak arttığı söylenebilir. LM-1 ve LM-2’de görülen artış ise çarpıcı boyuttadır. Özellikle kuru öğütme sonrası kurşun flotasyonu sırasında konsantreye alınan sfalerit miktarının



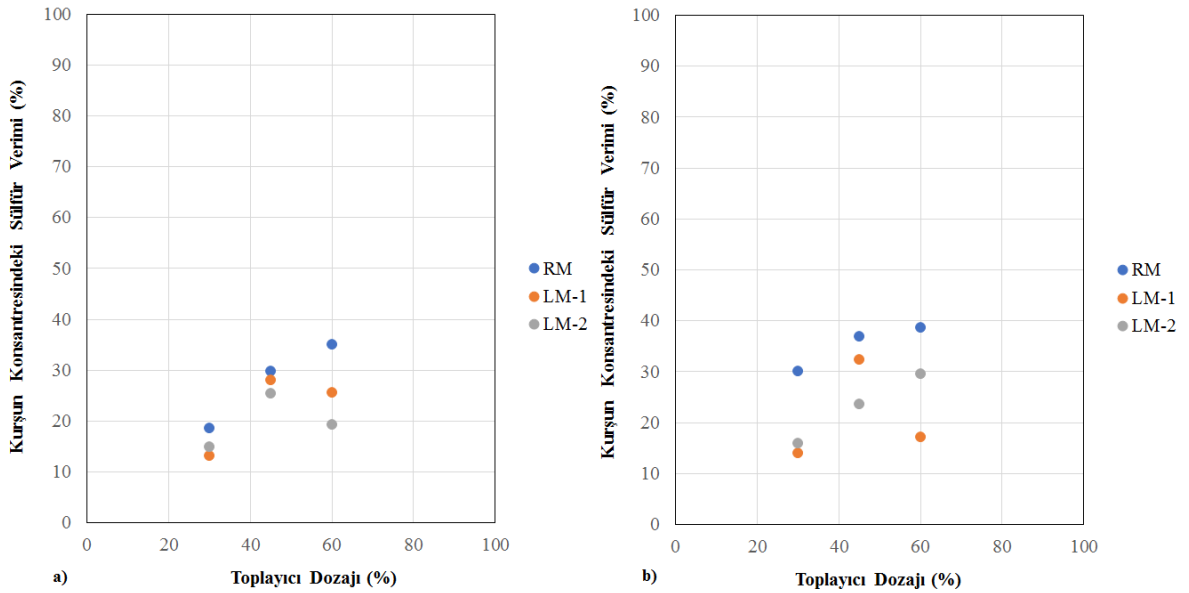
artması, kuru öğütme koşullarının sfaleriti canlandırarak yüzebilirliğini arttırdığını göstermektedir.

Bastırıcı dozajının arttırılması ile birlikte konsantreye kaçan çinko miktarındaki değişim Şekil 4.10b'de görülmektedir. Bastırıcı artışının toplayıcı miktarı 30 g/t'da iken numuneler üzerinde etkisi ufak çaplı artış şeklinde görülmektedir. Bastırıcı miktarı 45g/t'a arttırıldığında, LM-1 ve LM-2 numunelerinde konsantredeki çinko kaçağı miktarında azalma saptanmıştır. RM için ise miktar değişmemiştir. Ancak 60 g/t'a arttırıldığında RM ve LM-1 numunelerinde çinko verimi azalma eğilimindeyken, LM-2 numunesinde ise aksine bir artış görülmüştür.

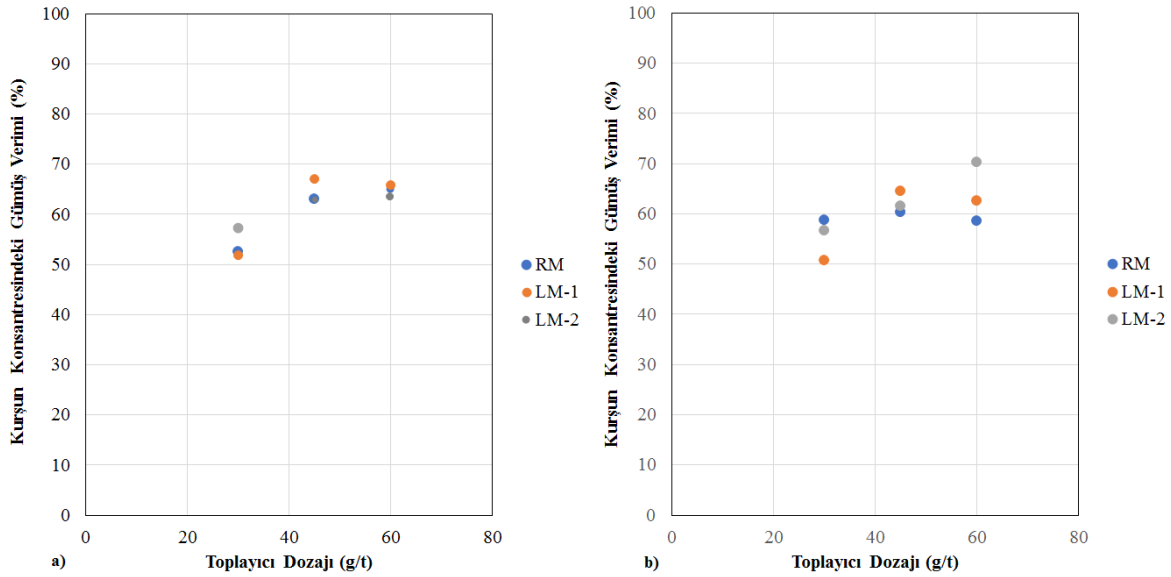
Şekil 4.11'de ise konsantreye kurşun ile birlikte alınan demir ve toplayıcı dozajı ilişkisi görülmektedir. Bu şekilden her iki bastırıcı miktarında da konsantredeki demir minerali miktarının yaş öğütme koşulunda daha fazla olduğu ve toplayıcı dozajı ile birlikte arttığı görülmektedir. Şekil 4.12'de kurşun konsantresindeki sülfür mineralinin farklı bastırıcı miktarlarındaki davranımları görülmektedir. Demir minerali kazanımına paralel olarak RM numunesinde diğer numunelere kıyasla sülfür kazanımı daha yüksektir. Bastırıcı dozajının artması ile az da olsa RM numunesi verimlerinde artış görülmektedir. RM numunesinde demir minerali ile sülfür minerali kazanımlarının birlikte artması ve diğer numunelere kıyasla yüksek olması, aynı zamanda galenit verim değerlerinin düşük olması yaş öğütme sonucunda galenit ile birlikte pirit kazanıldığını işaret etmektedir.



Şekil 4.11. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantrisindeki demir verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1500 g/t, NaCN: 250 g/t



Şekil 4.12. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantrisindeki sülfür verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1500 g/t, NaCN: 250 g/t



Şekil 4.13. Farklı bastırıcı miktarlarında kurşun konsantrindeki gümüş verimi ve toplayıcı dozajı ilişkisi a) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1000 g/t, NaCN: 200 g/t, b) Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>:1500 g/t, NaCN: 250 g/t

Farklı bastırıcı miktarlarında yapılan deneylerde, toplayıcı miktarındaki artışın gümüş verimi üzerindeki etkisi Şekil 4.13’de görülmektedir. Yüksek bastırıcı miktarlarının gümüş verimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Sonuç olarak bastırıcı dozaj artışı RM numunesinin kurşun verim ve tenör değerlerini arttırmakta, toplayıcı dozaj miktarı 60g/t’a çıkarıldığında kurşun konsantrindeki çinko veriminde azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle RM numunesi için yüksek bastırıcı dozajı ve 60 g/t toplayıcı dozajı kullanımının deneyler için optimum koşulları sağladığı belirlenmiştir. LM-1 ve LM-2 numunelerinde ise bastırıcı dozajındaki artış kurşun verim değerlerinde fazla bir değişiklik yaratmazken tenör değerlerini genellikle düşürdüğü gözlemlenmiştir. Kurşun konsantrindeki çinko kazanımındaki azalmanın ise arttırılan bastırıcı dozajına rağmen çok verimli olmadığı, kaba flotasyon devresi deneyleri gerçekleştirilmesi sebebiyle de yüksek kurşun verimi elde edilen düşük bastırıcı dozajlarının optimum koşulu sağladığı belirlenmiştir.

Kuru ve yaş öğütme sonucu numunelere aynı reaktif dozaj koşullarını uygulamak kuru öğütme sonrası seçimliliği azaltmaktadır. Arttırılan bastırıcı dozajının kuru öğütme sonrası artan çinko kazanımını azaltmadığı ve kullanılan reaktif rejiminin çinkoyu bastırmak için yeterli olmadığı görülmektedir.

#### 4.1.1.3 Galenit devresi kinetik flotasyon testleri

Deney numuneleri için belirlenen optimum şartlarda kinetik flotasyon testleri yapılarak farklı öğütme şartlarının flotasyon performansı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Kurşun kaba flotasyon konsantreleri 1, 3, 5, 7, 10 ve 12. dakikalarda toplanmıştır. Kimyasal analiz sonuçları doğrultusunda veriler incelenmiştir.

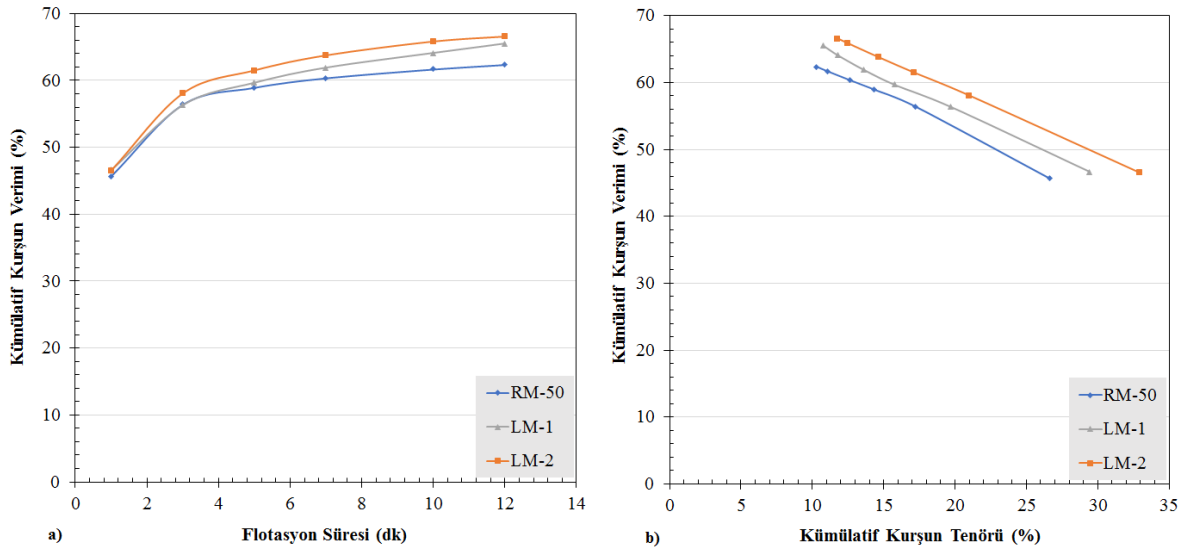
Çizelge 4.3. Kinetik galenit flotasyon deney koşulları

		Kuru Öğütme Numunesi	Koşull Süresi (dk.)	Yaş Öğütme Numunesi	Koşull. Süresi (dk.)
pH		8		8	
Bastırıcı	Na <sub>2</sub> O <sub>5</sub> S <sub>2</sub> (g/t)	1000	55	1500	52
	NaCN (g/t)	200	55	250	52
Toplayıcı	3418-A (g/t)	30	5	60	15
Köpürtücü	AF-70 (g/t)	40	1	40	1

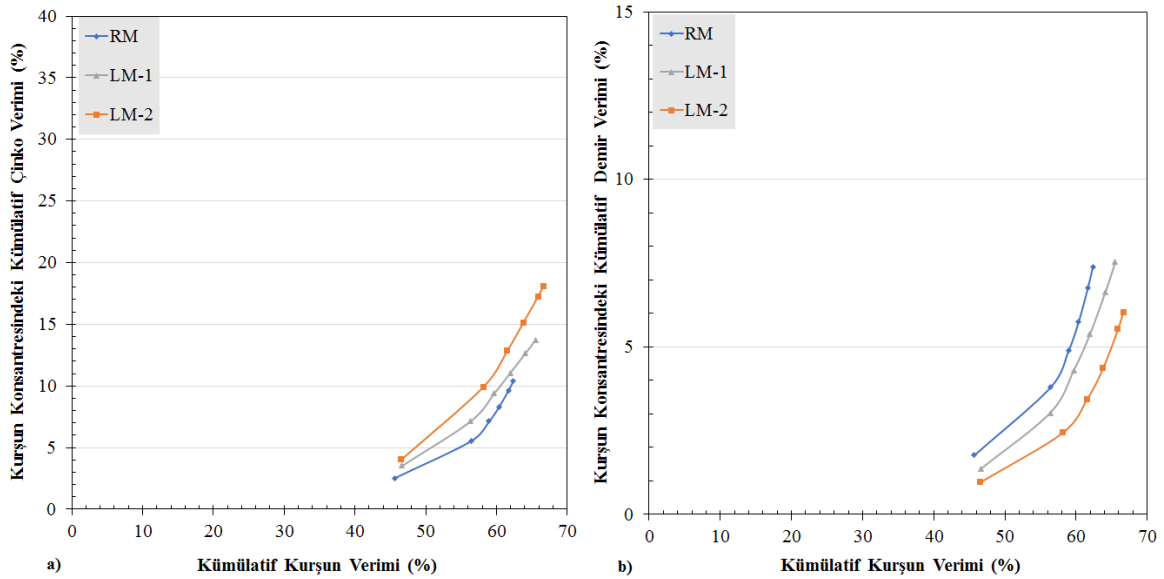
Şekil 4.14a'da kümülatif kurşun veriminin flotasyon zamanına bağlı değişimi görülmektedir. En düşük kurşun verimi RM numunesinde en yüksek ise LM-2 numunesinde elde edilmiştir. Şekil 4.14b'de kurşun tenörlerinin verimle ilişkisine bakıldığında Şekil 4.14a'dakine benzer bir eğilim görülmektedir. En yüksek verim ve tenör değerleri LM-2 numunesinde elde edilmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda kurşun kazanımı açısından en seçimli koşulun LM-2 numunesine ait iken, RM numunesinin ise flotasyon performansının ve seçimliliğin daha düşük olduğu söylenebilir. Daha düşük basınçla öğütülen LM-1 numunesinin flotasyon performansı ise RM ve LM-2 numuneleri arasında kalmaktadır.

Şekil 4.15a'da görülen kurşun-çinko seçimlilik grafiği kurşun verimi ile birlikte alınan çinko miktarlarını numune bazında göstermektedir. Flotasyon süresince çinko alımının her numune için arttığı ancak miktarın en az RM numunesinde, en fazla ise LM-2 numunesinde olduğu görülmektedir. Ayrıca kurşun konsantrisine alınan çinko miktarının flotasyon süresiyle birlikte kümülatif artışı görülmektedir. Kuru öğütme numunelerindeki çinko kazanımı yaş öğütmeye kıyasla yadsınamayacak derecede yüksektir. Kuru öğütme boyunca oluşan yükseltgen ortam sfaleritin yüzeybilirliğini, yüzeyinde oluşan oksidasyon ürününe bağlı olarak arttırmaktadır. Bu sebeple kuru öğütülen numunede aktif hale gelen

sfalerit, kurşun flotasyon aşamasında yüzmektedir. Ancak çelik değirmende yaş öğütme boyunca azalan oksijen miktarına bağlı olarak indirgen bir ortam oluşmakta ve sfaleritin yüzebilirliği azalmaktadır (Heyes ve Trahar, 1979). Dolayısıyla kuru öğütme sonrası yüzen sfalerit miktarı çok yüksekken, yaş öğütme sonrası yüzen miktarın çok daha az olması literatürle paralel bir bulgudur.

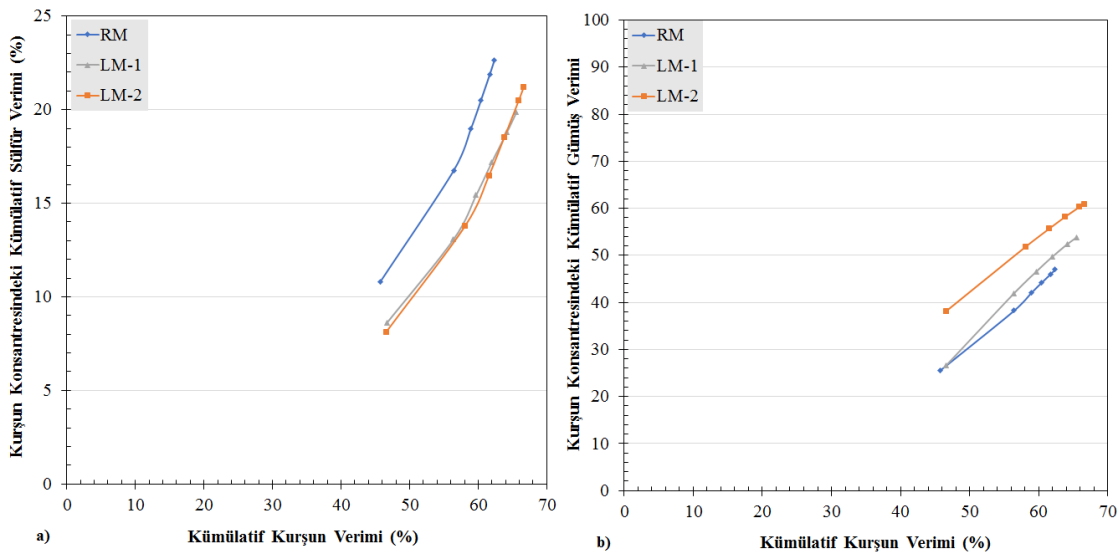


Şekil 4.14. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı davranımı b) Kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi



Şekil 4.15. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kurşun konsantresinin çinko ve kurşun seçimliliği b) Kurşun konsantresinin demir ve kurşun seçimliliği

Aynı şekilde demir ve kurşun arasındaki seçimliliğe bakıldığında bu kez demir veriminin en yüksek yaş öğütme sonrasında, en az ise LM-2 numunesinde elde edildiği görülebilmektedir (Şekil 4.15b). Kurşun ile birlikte kazanılan sülfür miktarına bakıldığında en yüksek değer RM numunesinde görülürken kuru öğütme numunelerindeki sülfür kazanımı neredeyse aynıdır (Şekil 4.16a). Şekil 4.16 b'de kurşun ve gümüş verimlerinin doğrusal olarak tüm numuneler için arttığı görülmektedir.



Şekil 4.16. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kurşun konsantresindeki sülfür ve kurşun seçimliliği b) Kurşun konsantresindeki gümüş ve kurşun seçimliliği

Farklı öğütme koşulları için optimum şartların sağlanmasına rağmen, kuru ve yaş öğütme numunelerinin galenit flotasyon performansındaki fark hala görülebilmektedir. Sonuç olarak reaktif rejiminde yapılan değişiklikler doğrultusunda yaş öğütmenin, kuru öğütme sonrası elde edilen flotasyon performansını yakalamaya yetmediği söylenebilir.

- Galenit devresi yüzde katı deneyleri

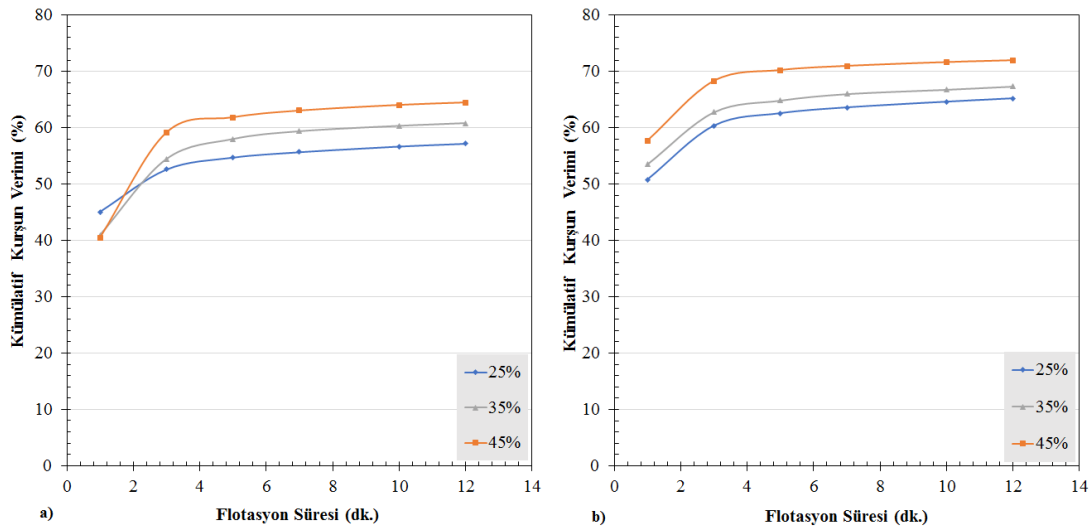
Galenit devresinin optimizasyonu sonrasında, 20  $\mu\text{m}$  tane boyutuna sahip kuru (LM-3) ve yaş öğütme (RM-20) numuneleri kullanılarak tane boyutu ve pülpün katı konsantrasyonunun flotasyon performansına etkisini incelemek adına flotasyon deneyleri yapılmıştır. Katı yoğunluğunun flotasyon üzerindeki etkisi bu bölümde, tane boyut etkisi ise mekanizma etkisi ile birlikte tartışılmıştır. Deneyler numuneler için belirlenen optimum şartlar altında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.4). İri boyutlu numunelerin, kuru öğütme

numuneleri ile aynı tane boyuta ulaşabilmesi için çubuklu değirmende bir dizi yaş öğütme deneyi yapılmış ve farklı pülp yoğunluklarındaki deneyler için farklı öğütme süreleri belirlenmiştir. Numunelerin 20 µm tane boyutuna inmesi için, %25 katı oranında yapılan deneylerde 60, %35 katıda 85, %45 katı için ise 110 dakika süreyle öğütülmesi yeterli bulunmuştur.

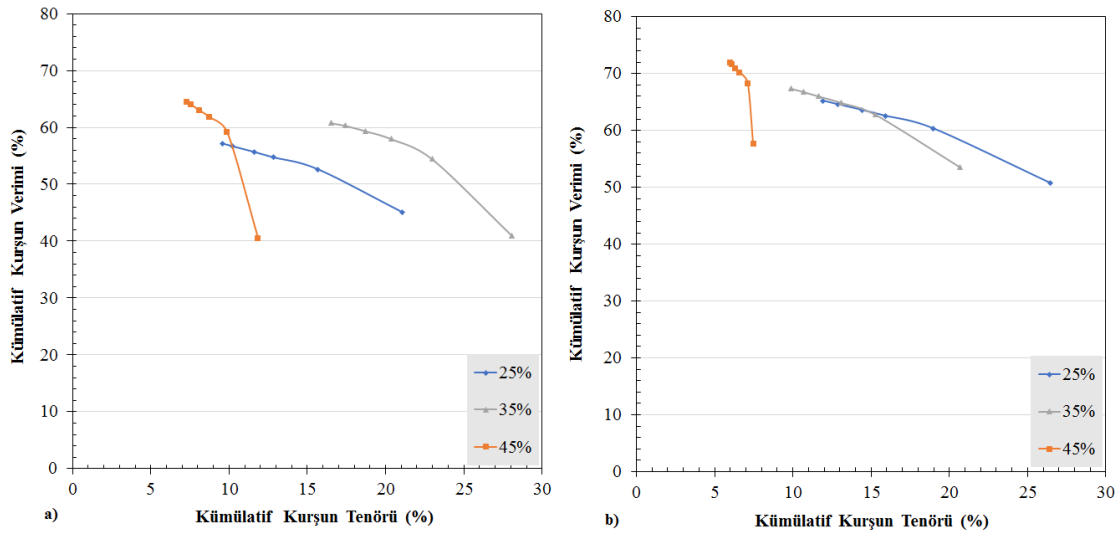
Çizelge 4.4. Farklı pülp yoğunluğunda kinetik galenit-sfalerit flotasyon deney koşulları

Numune	Ekleme Noktası	Reaktifler															
		Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S <sub>2</sub> g/t	Koşull. Süresi dk.	NaCN g/t	Koşull. Süresi dk.	3418-A g/t	Koşull. Süresi dk.	AF-70 g/t	Koşull. Süresi dk.	pH	CuSO <sub>4</sub> g/t	Koşull. Süresi dk.	SIPX g/t	Koşull. Süresi dk.	AF-70 g/t	Koşull. Süresi dk.	pH
Kuru	Değirmen Pb Flotasyonu Zn Flotasyonu	1000	55	200	55	30	5	40	1	8	1250	30	60	1	40	1	11
Yaş	Değirmen Pb Flotasyonu Zn Flotasyonu	1500	52	250	52	64	15	40	1	8	1250	30	60	1	40	1	11

Farklı pülp konsantrasyonlarında, ince boyutlu yaş öğütme ve kuru öğütme numunelerine ait kümülatif kurşun verim değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.17’de görülmektedir. RM-20 ve LM-3 numunesi için flotasyon veriminin yükselen katı miktarı ile birlikte arttığı görülmektedir. Sonuçlar numunelere göre incelendiğinde LM-3’e ait verim değerleri, RM-20 numunesine oranla tüm katı konsantrasyonlarında daha yüksektir. Şekil 4.18’deki kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi incelendiğinde, RM-20 numunesi için %45 katıda verim değerleri çok yüksek iken tenör değerlerinin çok düşük seviyede olduğu görülmektedir. Flotasyon süresi uzadıkça tenör değerleri gitgide azalmakta ve 12. dakikada keskin bir şekilde düşmektedir. %25 katı konsantrasyonunda diğerlerine göre daha düşük verim değerleri görülmektedir. %35 katı konsantrasyonunda ise en yüksek tenör değerleri ve %25 katıya kıyasla daha yüksek verim değerleri elde edilmektedir. LM-3 numunesinde %45 katı konsantrasyonunda RM-20’dekine benzer şekilde çok yüksek verim ve çok düşük tenör değerleri elde edilmiştir. Ancak RM-20’den farklı olarak %25 katı konsantrasyonunda %35’e yakın verim ve daha yüksek tenör değerleri sağlanmıştır. Katı konsantrasyon etkisi numunelere göre incelendiğinde, LM-3 numunesinin verim ve tenör değerleri RM-20 numunesine kıyasla daha yüksektir.



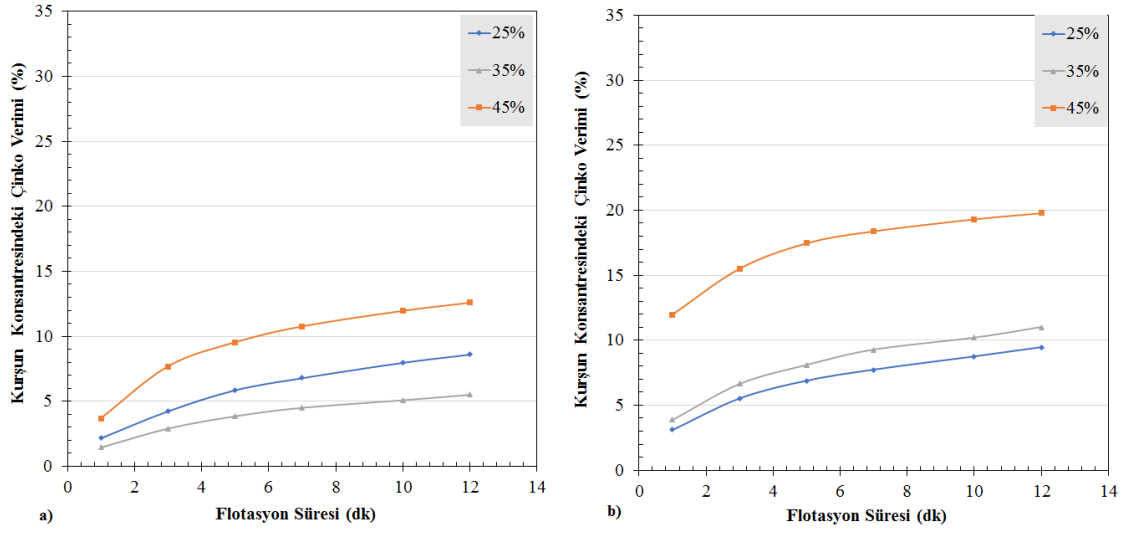
Şekil 4.17. Kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı değişimi a) RM-20 b) LM-3 numunesi



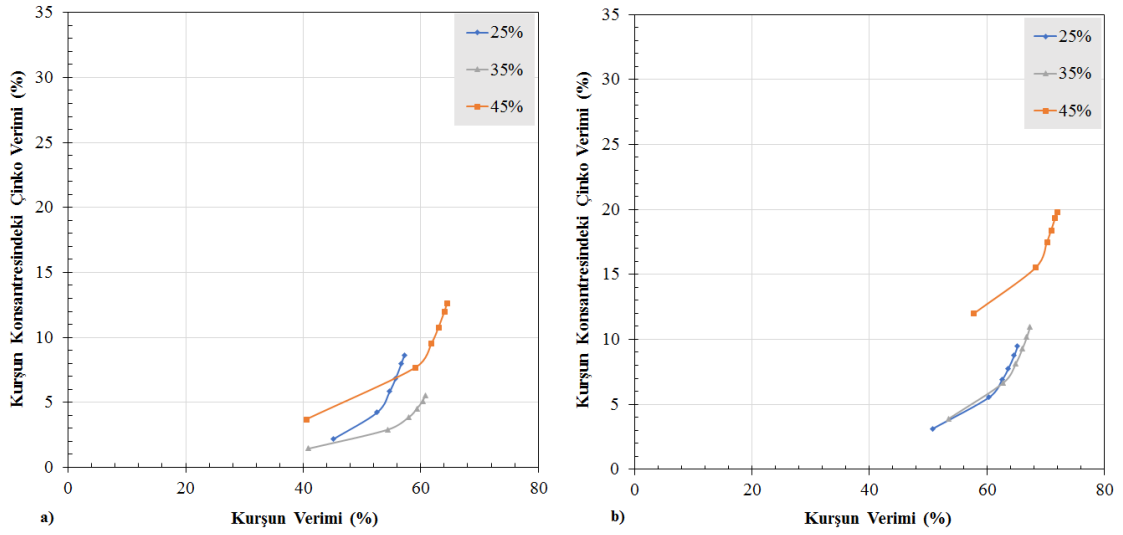
Şekil 4.18. Kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

Kurşun konsantresine alınan çinko veriminin zamana bağlı değişimi Şekil 4.19'da görülmektedir. RM-20 numunesinin kurşun veriminde görülen eğilimden farklı olarak en düşük çinko verimi %35 katıda iken en yüksek verim yine %45 katı yoğunluğunda görülmektedir. LM-3 numunesinde ise kurşun verim değerlerine paralel olarak en düşük çinko verimi %25 katıda, en yüksek ise %45 katıda görülmüştür. Kurşun ve çinko mineralleri arasındaki seçimlilik grafiklerine bakıldığında kuru öğütme sonrası çinko mineralinin kazanımındaki artışın özellikle %35 ve 45 katı yoğunluğunda olduğu daha net görülmektedir (Şekil 4.20).

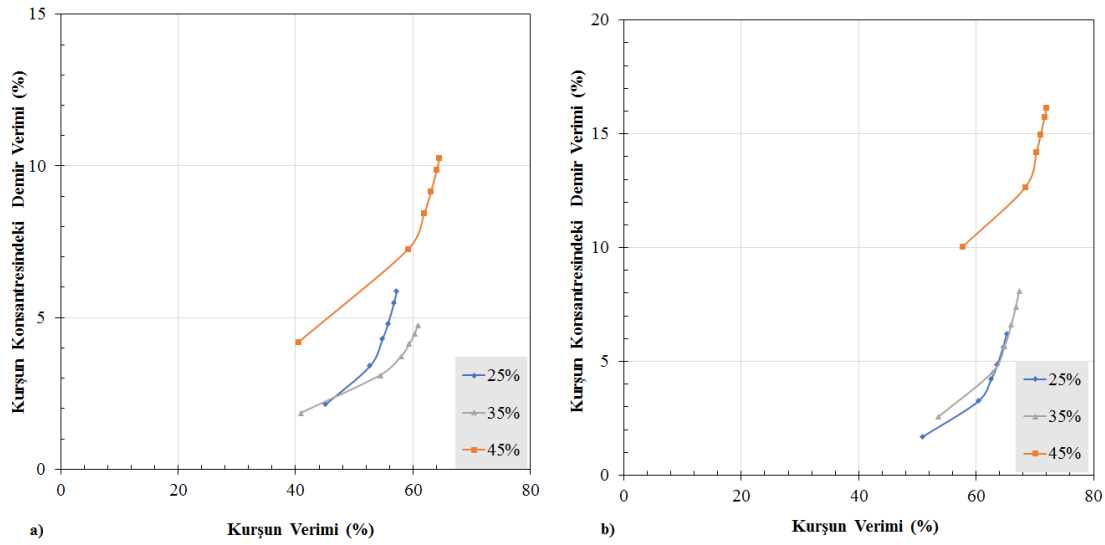




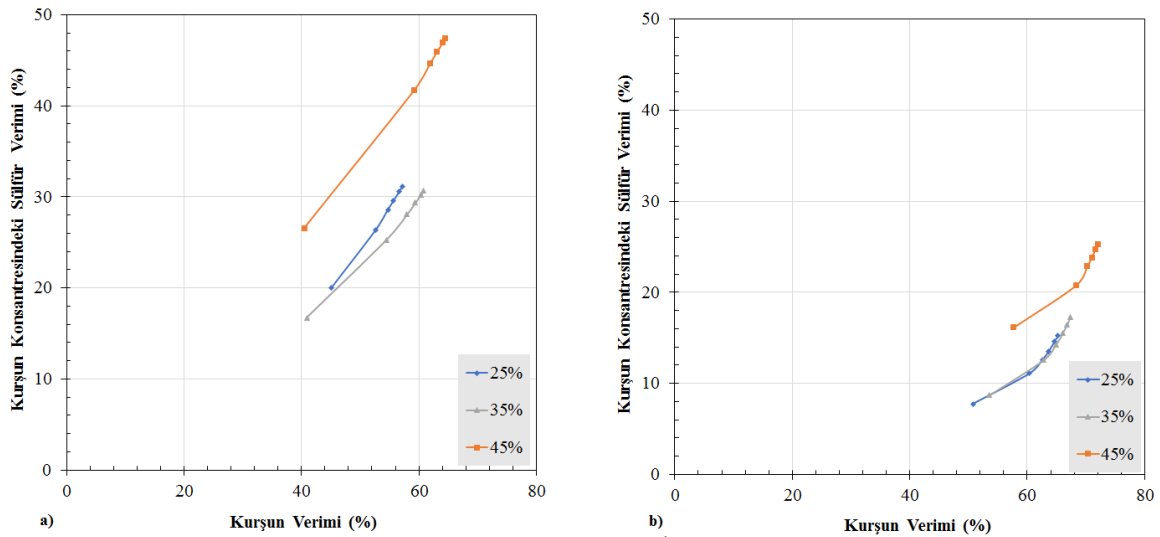
Şekil 4.19. Kurşun konsantrasyonundaki çinko veriminin zamana bağlı değişimi a) RM-20 ve b) LM-3 numunesi



Şekil 4.20. Kurşun ve çinko mineralleri arasındaki seçimlilik a) RM-20 b) LM-3 numunesi



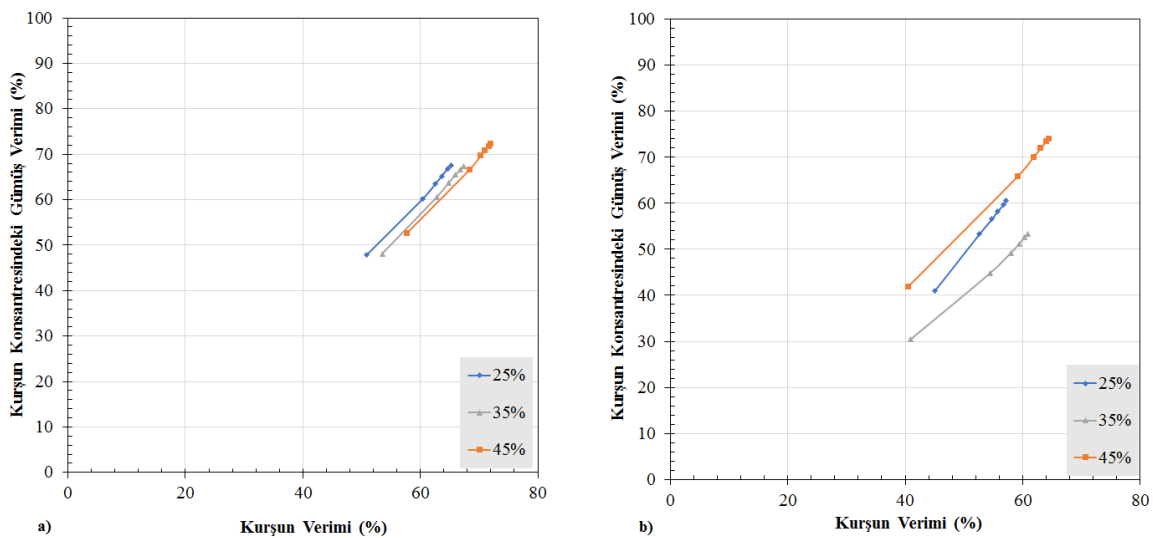
Şekil 4.21. Kurşun ve demir mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi



Şekil 4.22. Kurşun ve sülfür mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

Kurşun ve demir mineralleri arasındaki seçimlilik grafiğine göre her iki numune için de %45 katıda demir veriminde çok büyük bir artış görülmektedir (Şekil 4.21). Kurşun konsantresindeki sülfür kazanımına bakıldığında ise özellikle RM numunesinde %45 katı yoğunluğunda sülfür veriminin büyük oranda arttığı görülmüştür (Şekil 4.22). LM-3 numunesi için de katı konsantrasyonu ile birlikte sülfür verimi artmaktadır. Ancak RM-20 ile kıyaslandığında kurşun konsantresindeki sülfür kazanımı çok daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Numunelerin kurşun kazanımları kıyaslandığında daha düşük değerlere

sahip RM numunesindeki sülfür miktarının fazlalığı galenit hariç başka sülfürlü minerallerin kazanıldığını göstermektedir. Bu sonuçlar 50 µm boyutunda kuru ve yaş öğütme numuneleri ile yapılan deneyler bulguları ile paraleldir. Son olarak gümüş ve kurşun arasında verim ilişkisine bakıldığında gümüşün kurşunla birlikte alındığı ve katı konsantrasyonlarına göre farklılıklar gösterdiği saptanmıştır (Şekil 4.23). Yaş öğütmede en düşük verim %35 katı konsantrasyonunda görülürken kuru öğütmede verim değerleri birbirine yakın bulunmuştur.



Şekil 4.23. Kurşun ve gümüş mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

Farklı katı konsantrasyonlarında yapılan deneyler sonucunda yaş ve kuru öğütme sonrası %45 katıda benzer sonuçlar elde edilmiş, ancak %25 katı konsantrasyonunda değişiklikler görülmüştür. RM numunesi için ince tane boyutunda, %25 ve %45 katı konsantrasyonunda flotasyon performansı büyük oranda düşmektedir. RM numunesinde düşük katı konsantrasyonunda kurşun verim ve tenöründe düşüş gözlemlenirken ayrıca kurşun konsantrasyonuna alınan çinko ve demir miktarında artış görülmektedir. Yüksek katı konsantrasyonunda ise verim değerleri ile birlikte konsantreye alınan demir ve çinko miktarında çok büyük artış gözlemlenmiştir. Bu artış tenör değerine yansımakta ve flotasyonun sonuna doğru çarpıcı bir düşüş meydana gelmektedir. Bu nedenle en uygun koşulun %35 katı yoğunluğunda sağlandığı söylenebilir. LM-3 numunesi için ise %25 ve %35 pülp yoğunluğunda yakın sonuçlar gözlemlenmiştir. Kaba flotasyon devresi deneylerinin gerçekleştirilmesi sebebiyle daha yüksek verim elde edilen %35 katı konsantrasyonunun seçimi uygun bulunmuştur. Bu bilgiler ışığında temizleme aşamasında gerçekleştirilecek

deneyler için sağladığı yüksek tenör değerleri sebebiyle %25 katı konsantrasyonunun daha uygun olduğu söylenebilir.

#### **4.1.1.4 Öğütme koşullarının tane şekil ve morfoloji üzerindeki etkisi**

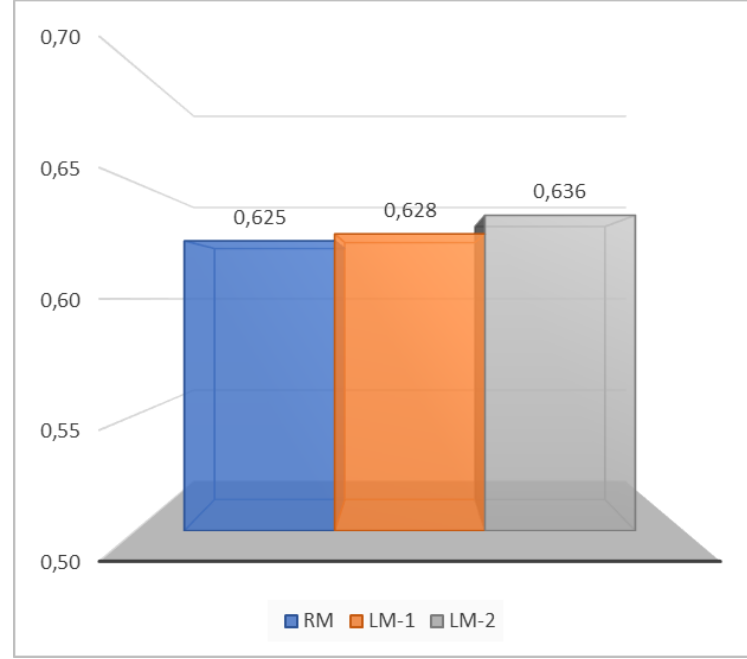
Flotasyon diğer ayırma proseslerinden farklı olarak minerallerin yüzey özelliklerinden ve dolayısıyla öğütme sürecinden doğrudan etkilenmektedir. Öğütmede gerçekleşen şekil bozulma mekanizmasının mineral yüzey özellikleri üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Mineralin yüzey şeklinin heterojenliği flotasyon reaktifleri ile tepkime mekanizmasına karar vermektedir (Ocepek vd., 1990).

Geleneksel tamburlu değirmenlerin sahip olduğu farklı kırılma mekanizmaları yüzeyin fiziksel, kimyasal ve pürüzlülük gibi yüzey özelliklerini farklı şekilde değiştirmektedir. Tanelerin yüzey pürüzlülüğü öğütme sonrasında gelen flotasyon performansını etkileyebilir. Gerçekleşen bu değişimlerin miktarı malzeme ve değirmen özelliklerine, öğütme metoduna, ortam sıcaklığına ve basıncına göre farklılıklar gösterebilmektedir (Orumwense ve Forssberg, 1991). Öğütme sürecinde elde edilen ürünün tane şekil ve morfolojisi, sonrasında gerçekleşen zenginleştirme prosesindeki etkilerini incelemek ve davranımlarını öngörebilmek adına görüntü analiz sistemleri kullanarak incelenmelidir (Petruk, 1986, 1988, 1989; Jones, 1987).

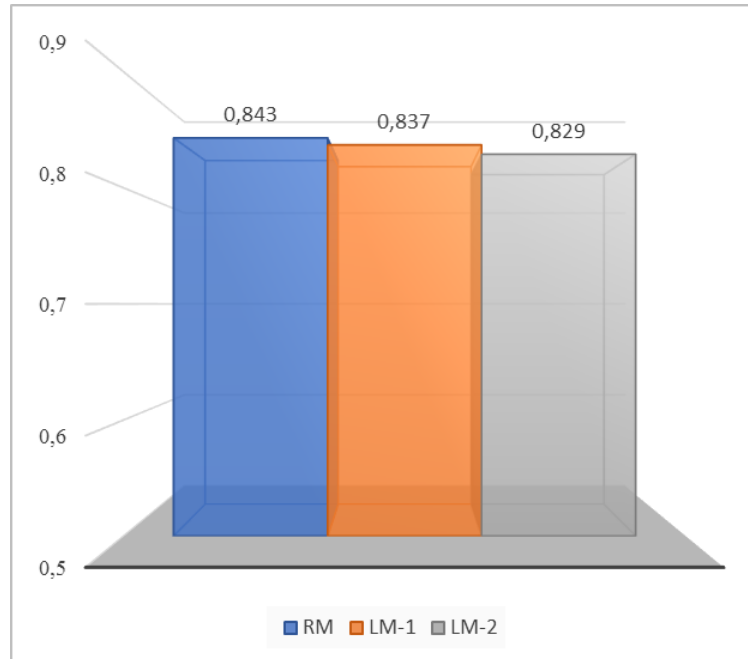
Bu tez çalışmasında galenit-sfalerit cevheri kullanılarak farklı öğütme mekanizmalarının tane şekli ve morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı öğütme mekanizmalarının tane şekli üzerindeki etkisi Particle In-sight Analyzer ile incelenerek yuvarlaklık, pürüzsüzlük ve uzunluk oranları (aspect ratio) belirlenmiştir. Bahsi geçen şekil parametrelerine ait veriler Çizelge 4.5’de görülmektedir. Öncelikle tane yuvarlaklığına ait verilere baktığımızda en yuvarlak numunenin yüksek basınçta (1000 kN/m<sup>2</sup>) öğütülmüş LM-2 olduğunu en az yuvarlaklığın ise yaş öğütme numunesine ait olduğu görülmektedir (Şekil 4.24). Pürüzlülük sonuçlarında ise en pürüzsüz numune RM iken, en az pürüzsüzlük LM-2 numunesinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.25). Son olarak tanelerin uzunluk oranları karşılaştırılmasında yuvarlaklık verileri ile doğru orantılı olarak RM numunesi daha yüksek uzunluk oranına sahipken, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait değerlerin daha düşük olduğu söylenebilir (Şekil 4.26).

Çizelge 4.5. Tane şekil analiz sonuçları

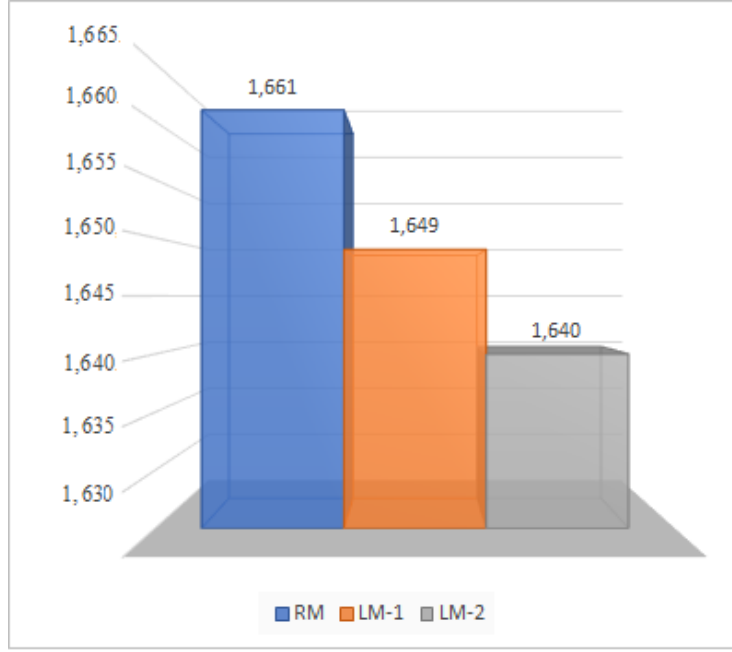
Numune	Sayılan tane	Yuvarlaklık	Std. Sapma	Pürüzsüzlük	Std. Sapma	Elipse Uzunluk Oranı	Std. Sapma
RM	6530	0,625	0,115	0,843	0,084	1,661	0,328
LM-1	6460	0,628	0,110	0,837	0,075	1,649	0,323
LM-2	6436	0,636	0,111	0,829	0,073	1,640	0,312



Şekil 4.24. Numunelerin yuvarlaklık analizi



Şekil 4.25. Numunelerin pürüzsüzlük analizi



Şekil 4.26. Numunelerin uzunluk oranı

Tane şekil ve morfoloji incelemeleri sonucunda dik değirmende kuru öğütme sonucunda daha yuvarlak ve pürüzlü taneler, çubuklu değirmende ise daha uzun oranlı ve pürüzsüz taneler ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular önceki literatür araştırmalarının bir kısmı ile uyumludur. Çubuklu değirmende öğütülen numunelerin bilyalı ve otojen değirmenlere kıyasla daha uzun oranlı tane şekline sahip olduğu gözlemlenmiştir (Yekeler vd., 2004). Otojen öğütmede elde edilen yüksek serbestleşme ve yuvarlak tane şeklinin yüksek konsantre tenör ve daha yüksek verim sağladığı da bulgular arasındadır (Forssberg ve Zhai, 1985). Ancak diğer taraftan mineral tanelerinin düşük yüzebilirlikleri, tanelerin yuvarlak şekilli olmalarına bağlanmıştır (Hoberg ve Scheneider, 1978). Yuvarlak tanelerin hava kabarcığından ayrılmasının uzunluk oranı yüksek tanelere kıyasla daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Wotruba vd., 1991). Anlaşıldığı üzere tane şeklinin flotasyon performansı üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar birbirleri ile çelişkilidir. Tane morfolojileri cevher tipine, öğütme mekanizmalarına ve öğütme sürelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Farklı fraksiyonlara ayrılmış cevherlerin tane morfolojisi SEM ile detaylı biçimde incelenmiştir. Her fraksiyondan temsili olarak numuneler alınmış ve iletkenlik sağlanabilmesi için altınla kaplanmıştır. SEM odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde etmektedir. Elde edilen bu görüntüler aracılığı ile tanelerin

morfoloji, topografi hatta boyut bilgileri bile elde edilebilmektedir. Farklı boyutlardaki (75, 63, 53, 45, 38 ve 25  $\mu\text{m}$ ) RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin morfolojisi incelemesi SEM aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Kuru ve yaş öğütme numunelerinin belirli fraksiyonlarda alınmış SEM görüntüleri EK B’de detaylı şekilde gösterilmektedir. Her tane boyutu için karşılaştırmalı SEM mikrografları kuru ve yaş öğütülmüş tanelerin yüzey özellikleri hakkında fikir vermektedir.

Kuru öğütme sonucunda, tane yüzeylerinin yaş öğütmeye kıyasla daha pürüzlü olduğu literatürde yer almaktadır (Feng ve Aldrich, 2000). Kuru öğütülmüş numuneler, yaş öğütmeye kıyasla daha hızlı flotasyon kinetiğine sahiptirler. Hem verim hem de tenör bazında kuru öğütmenin performansı yaş öğütmeye göre daha yüksektir. Kuru öğütme sonrası mineral yüzeylerinde oluşan bozuklukların, yüzeyi toplayıcı soğurumu için daha uygun hale getirdiği ve dolayısıyla flotasyon verimini arttırdığı düşünülmektedir. Buradan hareketle daha pürüzsüz yüzeye sahip olan yaş öğütme numunesi daha düşük yüzey enerjisine sahiptir dolayısıyla flotasyon kinetiğinin daha yavaş olması beklenmektedir (Feng ve Aldrich, 2000).

Tane şekil analizi yardımı ile numuneler arasında pürüzlülük farkı olduğu ancak sayısal olarak farklılığın çok küçük olduğu daha önce de belirtilmiştir. Sayısal olarak ufak da olsa aradaki farkın görsel olarak da bulunabilmesi için SEM görüntüleri her boyut için detaylı olarak incelenmiştir. Ancak üç farklı numune için elde edilen SEM görüntüleri kıyaslandığında numuneler arasında gözle görülür bir fark bulunamamıştır.

#### **4.1.1.5 Öğütme koşullarının galenit flotasyon performansı üzerindeki etkisi**

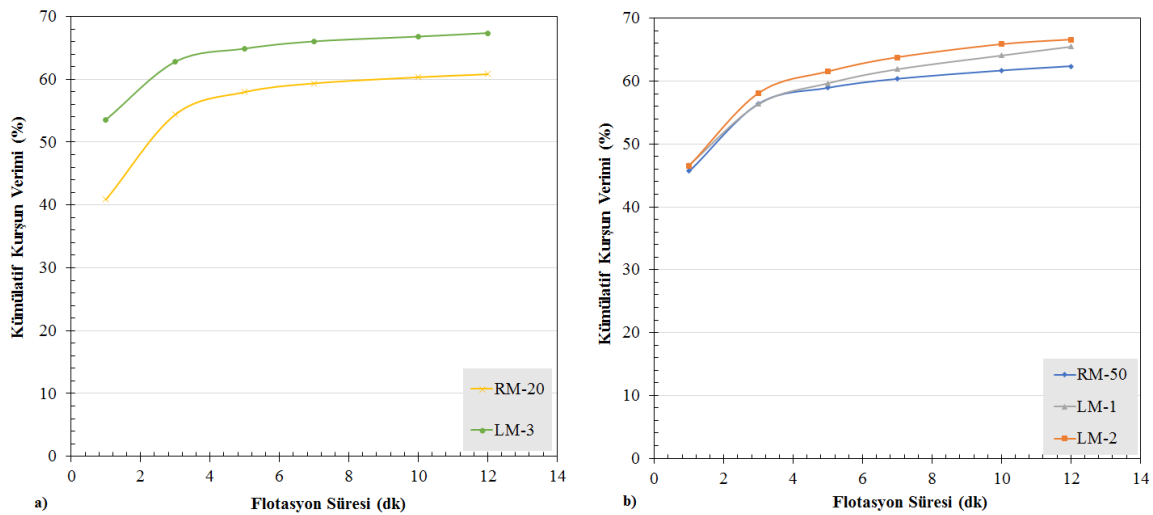
Farklı öğütme mekanizmaları kullanılarak hazırlanan numunelerin galenit flotasyon deneylerine ait verileri karşılaştırılmalı olarak bu bölümde sunulmuş ve mekanizmalar arasında görülen performans farklılıkları açıklanmaya çalışılmıştır.

Farklı tane boyutlarında kuru ve yaş öğütme numuneleri ile yapılan kinetik flotasyon deney sonuçları, farklı koşulların flotasyon performansı üzerinde yarattığı etkinin daha net bir şekilde görülebilmesi için toplu olarak değerlendirilmiştir. Kuru ve yaş olarak öğütülmüş galenit-sfalerit cevherine ait Malvern boyut analizi verileri Şekil 3.2’de sunulmuştur. 50 $\mu\text{m}$

boyutundaki cevherde yaş öğütme sonucu oluşan ince tane miktarının, kuru öğütmeye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kuru öğütme numunelerinde ise yüksek basınçla öğütme sonucu daha fazla ince tane açığa çıkmaktadır. 20 $\mu\text{m}$ 'ye inildiğinde ise farklı öğütme mekanizmalarının tane boyu dağılımı üzerinde fark yaratmadığı görülmektedir (Şekil 3.3).

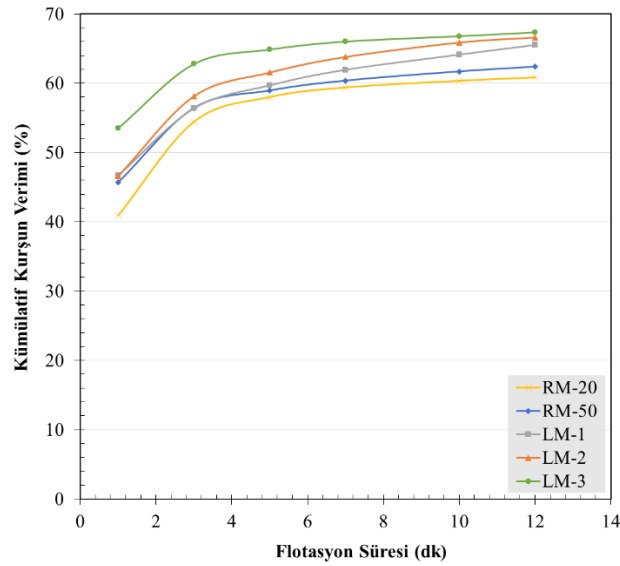
Geleneksel tamburlu değirmenlerde öğütme geniş kapsamlı enerji seviyelerinde gerçekleşmektedir. Taneler arası kırılma mekanizmasında ise kırılım daha kontrollü koşullar altında yapıldığından, tamburlu değirmenlere göre daha dik tane boyu dağılımı vermektedir (Fuerstenau, 1992; Viljoen vd., 2001; Crosbie, 2005). Ancak yapılan bu çalışmada dik değirmen ve çubuklu değirmende yapılan numunelerin boyut analizleri karşılaştırıldığında, özellikle 20 $\mu\text{m}$  boyutunda, literatürdeki bulguların aksine tane boyu dağılımları arasında fark görülmemiştir.

Numunelerin boyutlar bazında zamana bağlı kurşun verim değerleri Şekil 4.27'de verilmiştir. RM-20'nin kurşun verimi, LM-3'e göre flotasyon başlangıcından itibaren yaklaşık olarak %10 daha azdır. RM-50, LM-1 ve LM-2'nin verim değerleri flotasyon başlangıcında aynı iken, zaman ilerledikçe numuneler arasında fark oluşmuştur. Sırasıyla en yüksek kurşun verimleri LM-2, LM-1 ve RM'de görülmüştür.



Şekil 4.27. a) 20  $\mu\text{m}$  boyutlu b) 50  $\mu\text{m}$  boyutlu numunelerin kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı değişimi



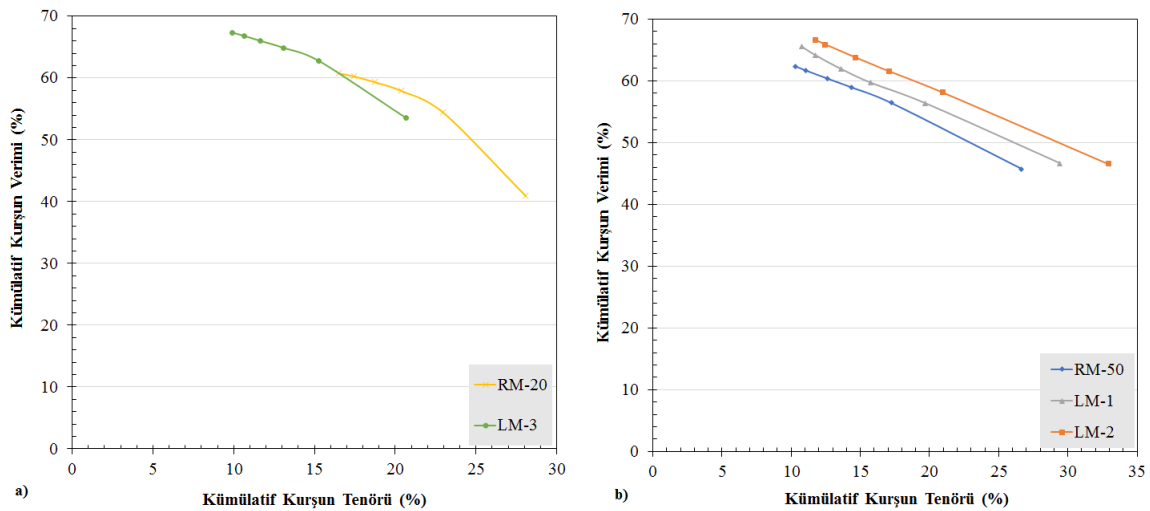


Şekil 4.28. Farklı tane boyutundaki numunelere ait kümülatif kurşun veriminin zamana bağlı değişimi

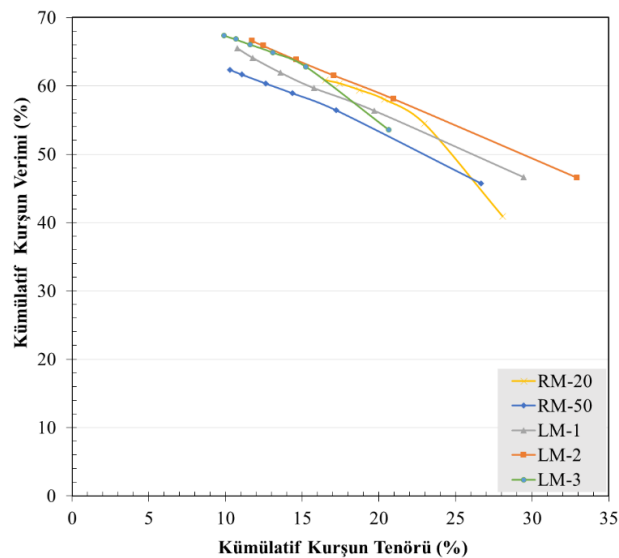
Şekil 4.28’de 20  $\mu\text{m}$  ve 50  $\mu\text{m}$  boyutlu galenit-sfalerit cevherinin zamana bağlı kurşun verim değerleri bir arada görülmektedir. 600  $\text{kN/m}^2$  basınçla kuru öğütülen 20  $\mu\text{m}$  boyutlu numune (LM-3), aynı şartlarda öğütülen 50  $\mu\text{m}$  boyutu (LM-1) ile kıyaslandığında flotasyonun başlangıcından itibaren verimde görülen artış dikkat çekicidir. LM-3’e ait kurşun verim değerlerinin diğer tüm numunelerden de daha yüksek olduğu görülmektedir. Yaş öğütme numuneleri incelendiğinde tane boyutunun 20  $\mu\text{m}$ ’a inmesi sonrasında, kurşun veriminin 50  $\mu\text{m}$ ’a kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Boyut küçüldükçe artan serbestleşme sonucu galenit veriminin artması beklenirken görülen azalmanın numunenin çelik öğütme ortamında uzun süreli kalmasının sonucu olduğu düşünülmektedir.

Tane boyutlarına göre kurşun verim-tenör ilişkisi incelendiğinde öğütme mekanizmasında gerçekleştirilen değişikliğin verim değerlerini aynı eğri üzerinde yukarıya doğru kaydıracağı görülmektedir. Yani LM-3’ün verim değerleri RM-20’ye göre büyük oranda artmaktadır (Şekil 4.29a). LM-1 ve LM-2’ye ait deneylerde hem verim hem de tenör anlamında RM-50’ye göre çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.29b). Ayrıca LM-2 numunesinin verim ve tenör değerlerinin LM-1’e kıyasla daha yüksek olduğu da görülmektedir. Literatürde yer alan bir çalışmada, dik değirmende yüksek basınçla öğütme sonucu sfalerit mineralinin serbestleşmesinde iyileşme gözlemlendiği belirtilmiştir (van Drunick vd., 2010). Bu bulgular ışığında LM-1 ve LM-2 numunelerinin performansları

arasında görülen farkın yüksek basınç altında öğütme sonucunda artan serbestleşme nedeni ile ortaya çıktığı varsayılmaktadır. Öğütme mekanizmaları açısından değerlendirildiğinde, kuru öğütme sonrası kurşun veriminin kullanılan her iki tane boyutunda da yaş öğütmeye kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.29. a) 20 µm boyutlu b) 50 µm boyutlu numunelerin kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi



Şekil 4.30. Farklı tane boyutundaki numunelere ait kümülatif kurşun verim ve tenör ilişkisi

Şekil 4.30'da numunelerin flotasyon performansları bir arada görülmektedir. LM-2 ve LM-3 numunelerinin flotasyon verimleri birbirine çok yakın değerlerdedir. Ancak tenör değerleri flotasyon zamanı ile birlikte keskin bir şekilde düşmektedir. RM-20 numunesinin

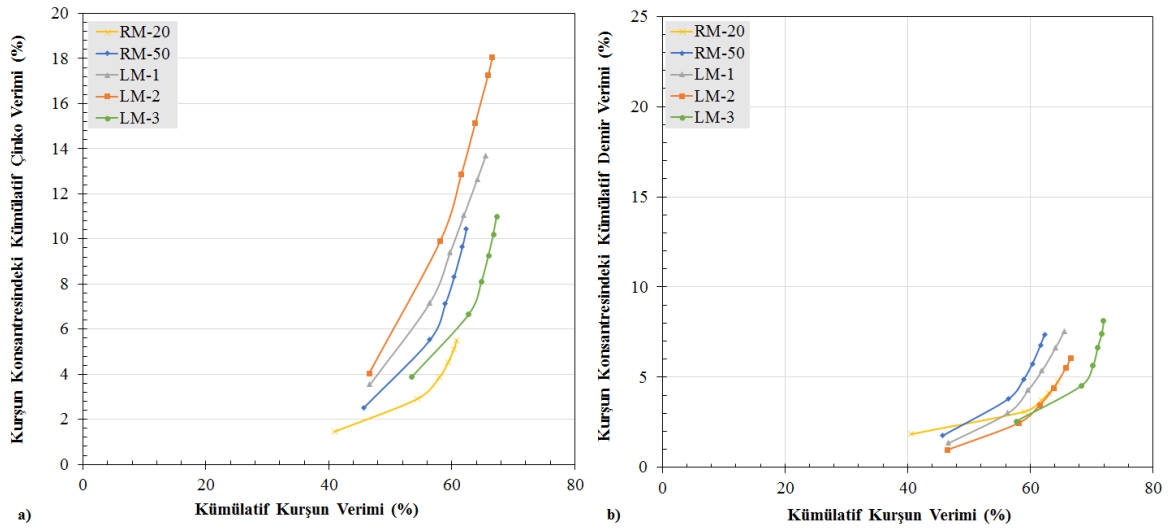
tenör değerlerinde de aynı şekilde düşüş gözlemlenmiştir. 20 µm boyutunda gerçekleştirilen deneylerde, sistemde bulunan ince tanelerin seçimliliği olumsuz etkilediği ve flotasyon süresi ilerledikçe tenör değerlerinde ani düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Flotasyon başlangıcında RM 20 numunesinin tenör ve verim değerleri RM-50'ye kıyasla çok daha yüksektir. MLA sonuçlarına göre RM-20 numunesinin büyük oranda serbestleştiği saptanmıştır. Minerallerin fraksiyonel olarak serbestleşmesi incelendiğinde sfalerit ve galenit minerallerinin birbirleriyle ve diğer minerallerle bağlılık oranlarının tane boyu küçüldükçe azaldığı görülmektedir (Çizelge A3, Çizelge A4). Çizelge 3.2'de yer alan RM numunesinin serbestleşme verileri incelendiğinde ise -38 µm boyutunda galenin %82, sfaleritin ise %84 oranında serbestleştiği görülmektedir. Dolayısıyla 20 µm boyutunda galenit ve sfaleritin büyük oranda serbestleştiğini söyleyebiliriz. 50 µm fraksiyonundaki cevherlerin serbestleşmediği düşünülürse, yapılan flotasyon sonucunda bağlı taneler sebebiyle daha fazla katı kazanımı beklenmektedir. RM-50, RM-20'ye göre çok daha yüksek katı kazanımına sahiptir. Kurşun tenör değerleri de göz önüne alındığında, küçülen boyutla birlikte azalan katı kazanımı yaş öğütme numunesi için daha seçimli bir koşul yaratmaktadır. Serbestleşen galenit-sfalerit minerallerine bağlı olarak flotasyon performansında artış görülmüştür. Galenit-sfalerit cevherinin serbestleşmesinin hem kuru hem de yaş öğütme numunelerinin performansında iyileşmeye neden olduğu düşünülmektedir. Ancak 20 µm'a öğütülmesine rağmen RM-20 numunesinin 50 µm boyutundaki LM-2'nin verim değerlerini yakalayamadığı görülmektedir.

Her iki tane boyutunda da kuru ve yaş öğütme numunelerinin flotasyon performansları arasında fark bulunduğu gözlemlenmiştir. Tane boyut dağılım grafiklerinde 20 µm boyutunda mekanizma farkı görülmemesine rağmen flotasyon performansı üzerinde yarattığı etkinin net bir şekilde görülmesi, bu çalışmada tane boyut dağılımının proses üzerinde çok etkili olmadığını göstermektedir.

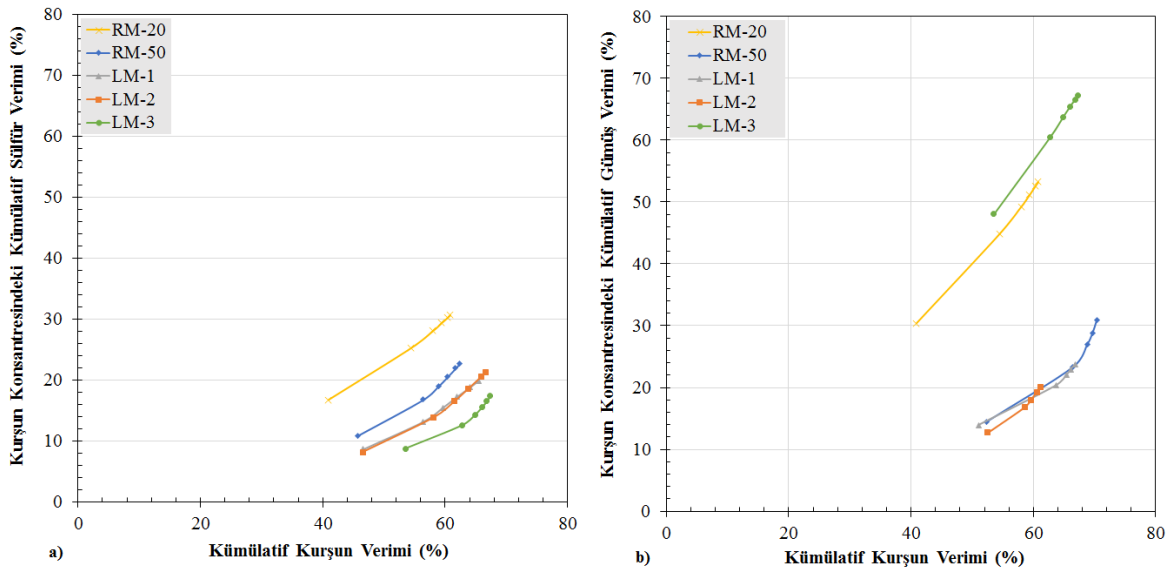
İstenmeyen minerallerin farklı mekanizmalar aracılığı ile değerli mineral konsantresine taşınması nedeni ile flotasyon verim değerlerinde artış görülürken, tenör değerleri düşmektedir. Kurşun konsantresine alınan çinko mineralinin seçimliliği nasıl etkilediği Şekil 4.31a'da görülmektedir. Kurşun konsantresi ile birlikte alınan çinko miktarı en fazla LM-2 numunesinde, en az ise RM-20'de bulunmaktadır. Sfalerit kuru öğütme sırasında sağlanan yükseltgen ortam sebebiyle yüzebilir hale gelip, kurşun konsantresi ile

birlikte alınmaktadır. Bu nedenle kuru öğütme sonucunda sfalerit kazanımı yaş öğütmeye göre çok yüksektir. 20  $\mu\text{m}$  boyutuna inildiğinde, serbestleşerek sfaleritten ayrılan galenitin daha seçimli yüzmesinden kaynaklı olarak kurşun konsantresindeki çinko kazanımlarında azalma olduğu düşünülmektedir. 50  $\mu\text{m}$  boyutunda ise bağlı galenit ve sfalerit minerallerinin miktarının fazla olma sebebiyle çinko kazanımı daha yüksektir.

Şekil 4.31b’de kurşun ve demir seçimliliğine bakıldığında demir kazanımının tüm numuneler için genelde aynı değerlerde iken, LM-3’ün verim değerinin bir miktar daha yüksek olduğu, RM-20’nin ise oldukça düşük olduğu görülmektedir. 50  $\mu\text{m}$  boyutunda ise demir kazanımları birbirine yakın seyretmektedir. Yaş öğütme için kurşun ve demir arasındaki seçimlilik, galenit ve sfalerit arasındaki seçimliliğe oranla daha düşüktür. Kurşun ve çinko arasında sağlanan seçimlilik sfaleritin galenite göre daha yavaş yüzmesi sebebiyle flotasyon aşamasının başlangıcında daha yüksekken flotasyon süresi uzadıkça azalmaktadır.



Şekil 4.31. 20 $\mu\text{m}$  ve 50 $\mu\text{m}$  boyutlu numunelerin a) kurşun konsantresindeki çinko ve kurşun seçimliliği b) kurşun konsantresindeki demir ve çinko seçimliliği



Şekil 4.32. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kurşun konsantresindeki sülfür ve kurşun seçimliliği b) kurşun konsantresindeki gümüş ve kurşun seçimliliği

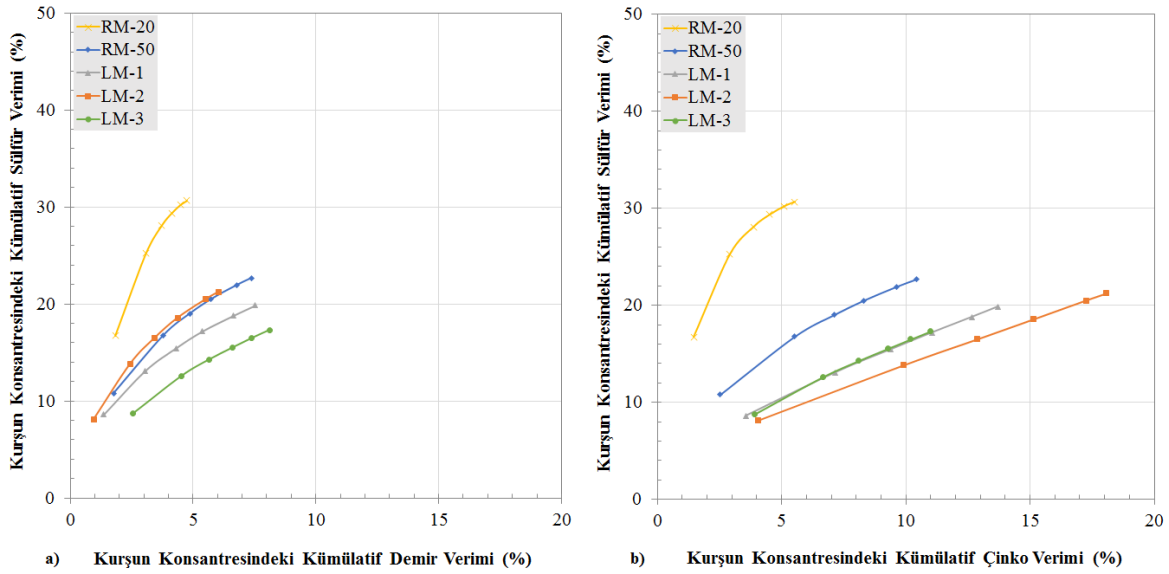
Kurşun konsantresindeki sülfür alımı numuneler bazında kıyaslandığında, en çok sülfür verimi RM-20, en az ise LM-3 numunesinde görülmüştür (Şekil 4.32a). 50 µm boyutundaki numunelerin sülfür kazanımları bu iki numune arasında yer alırken, LM-1 ve LM-2 için değerler neredeyse aynıdır. Gümüş ve kurşun verimleri arasındaki ilişki incelendiğinde ise tüm numuneler için gümüş kazanımının kurşun ile orantılı olduğu ancak numuneler 20 µm boyutuna indiğinde gümüş kazanımında büyük artış olduğu görülmektedir (Şekil 4.32b). Daha ince boyuta indirgenme sonucunda gümüşün serbestleşme derecesinin arttığı ve dolayısıyla kazanımının 50 µm'ye oranla çok daha yüksek olduğu söylenebilir.

Farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen deneyler arasındaki seçimlilik farkı da göze çarpmaktadır. En yüksek kurşun flotasyon verimi ve tenörü LM-2'de görülürken, LM-3 verileri de bu sonuçlara çok yakındır. Ancak LM-3'ün kurşun konsantresindeki çinko miktarı, LM-2'ye oranla çok daha düşüktür. Dolayısıyla LM-3'de yüksek kurşun verimlerinin yanı sıra artan serbestleşme dolayısıyla yüksek galenit-sfalerit seçimliliği de öne çıkmaktadır.

Mineraller arasındaki seçimliliğin daha net bir şekilde görülebilmesi, mineral kazanımlarının ve performansa etkilerinin anlaşılabilmesi için cevherdeki sülfür kazanımlarına daha detaylı bakılmıştır. Demir ve sülfür arasındaki ilişki tüm numuneler için kazanımın orantılı olarak arttığını göstermektedir (Şekil 4.33). RM-20 için demir kazanım

miktarı düşükken sülfür kazanımındaki yüksek değerler dikkat çekmektedir. Şekil 4.31a ve Şekil 4.33b'de RM-20 numunesinin çinko kazanımının diğer minerallere göre çok düşük olduğu açıkça görülmektedir, dolayısıyla sfalerit kazanımının da az olduğu söylenebilir. RM numunesinin serbestleşme verilerine bakıldığında tane boyu 20  $\mu\text{m}$ 'a düştüğünde galenin piritle ikili bağlı bulunan bütün tanelerinin serbestleştiği görülmektedir (Çizelge A4). Bu nedenle pirit kazanımında düşüş beklenmektedir. Diğer yandan serbestleşme sayesinde artan galenit verimi dolayısıyla sülfür kazanımında artış olmaktadır. RM-20 numunesinde konsantreye alınan demir miktarının düşüp, sülfür miktarının artması bu nedenlere bağlanabilir. RM-50 numunesinin LM-1'e kıyasla sülfür miktarı daha fazla iken LM-2 ile kıyaslandığında neredeyse benzer değerlerdedir. Demir kazanımı değerlerinin ise LM-1 ile yakın, LM-2'den ise daha yüksek olduğu görülmektedir. LM-2'deki yüksek sülfür kazanımının, sfalerit kazanımı ile ilişkili olduğu Şekil 4.33b'de görülebilmektedir.

RM-50 numunesinin galenit veriminin ve konsantredeki çinko kaçağı miktarının diğer numunelerden düşük olması sebebiyle sfalerit harici başka bir sülfürlü mineralin kazanıldığı aşikardır. Mineral bileşim yüzdelerine bakıldığında cevherdeki sülfür %53,13 oranında piritten, %41,31 oranında ise sfaleritten gelmektedir. Cevherdeki demirin %81,64'ü götit minerali, diğer kısmı ise çoğunlukla hematit ve pirit kaynaklıdır. Piritin demir ve sülfür içerikli başlıca mineral olması sebebiyle yaş öğütme numunesi ile yapılan deneylerde galenit ile kazanıldığı söylenebilir. RM-50 numunesinde demir minerali ile sülfür minerali kazanımlarının orantılı bir şekilde artması ve diğer 20  $\mu\text{m}$  boyutlu numunelere kıyasla yüksek olması, aynı zamanda galenit verim değerlerinin düşük olması yaş öğütme sonucunda galenit ile birlikte pirit kazanıldığını işaret etmektedir. Genellikle sülfürlü mineraller katot, çelik öğütme ortamı da anot gibi davranarak pülpe demir iyonları bırakırlar. Çelik öğütme ortamından kaynaklı artık demir varlığı, galenit mineralinin flotasyon performansı üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır (Peng vd., 2003). Matthews (2002) çalışmasında demir hidroksitlerin galenit flotasyonu üzerinde bastırıcı etkisini net bir şekilde gözlemlemiştir. Kuru öğütme ortamında sağlanan yükseltgen ortam ve fazla miktardaki oksijen varlığı pirit mineralinin yüzeyinin indirgenmesine neden olarak toplayıcı ile etkileşimini azaltır ve yüzebilirliği azalır (Shimoiizaka vd., 1976). Piritin kuru öğütmeden ziyade yaş öğütme numunelerinde bulunmasının nedeni bu şekilde açıklanabilir.



Şekil 4.33. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kürşun konsantrisindeki sülfür ve demir seçimliliği b) kürşun konsantrisindeki sülfür ve çinko seçimliliği

Kuru öğütme numuneleri için sonuçlar incelendiğinde demir veriminde artış olmasına rağmen sülfür veriminin aynı oranda kaldığı görülmektedir. Kuru öğütme numunelerinde ise kazanılan demir mineraline yaş öğütmeye kıyasla daha düşük sülfür kazanımı eşlik etmektedir. Kuru öğütme numunelerinde çinko kazanımının çok yüksek olması, kazanılan sülfürün büyük oranda sfalerit olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle kazanılan demirin, cevherdeki oranının yüksekliği sebebiyle götit minerali kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu veriler doğrultusunda yaş öğütme sonrasında pirit, kuru öğütme sonrasında ise götit kazanımının arttığı söylenebilir. Öğütme prosesinde bazı minerallerin diğerlerine göre çok daha kolaylıkla şlam haline geldiği gözlemlenmiştir. Bu minerallerden bazıları demir içerikli götit, limonit ve hematittir. Flotasyon pulpünde var olan bu minerallerin değerli minerallerin yüzebilirliğini azalttığı saptanmıştır (Fuerstenau, 1958; Iwasaki vd, 1962).

#### 4.1.1.6 Öğütme koşullarının galenit mineralinin elektrokimyası üzerindeki etkisi

Cevherin yüzey özellikleri göz önüne alındığında öğütme sürecinde kullanılan suyun galvanik etkileşim üzerinde büyük etkisinin olduğu bilinmektedir. Pülp içerisinde tane yüzeyleri ve ayrıca tane yüzeyi ile öğütme ortamı arasında gerçekleşen galvanik etkileşim galenit-sfalerit cevherinin flotasyon performansını etkilemektedir. Pülp kimyası mineraller ve mineraller-öğütme ortamı arasında gerçekleşen galvanik etkileşimlerde önemli rol

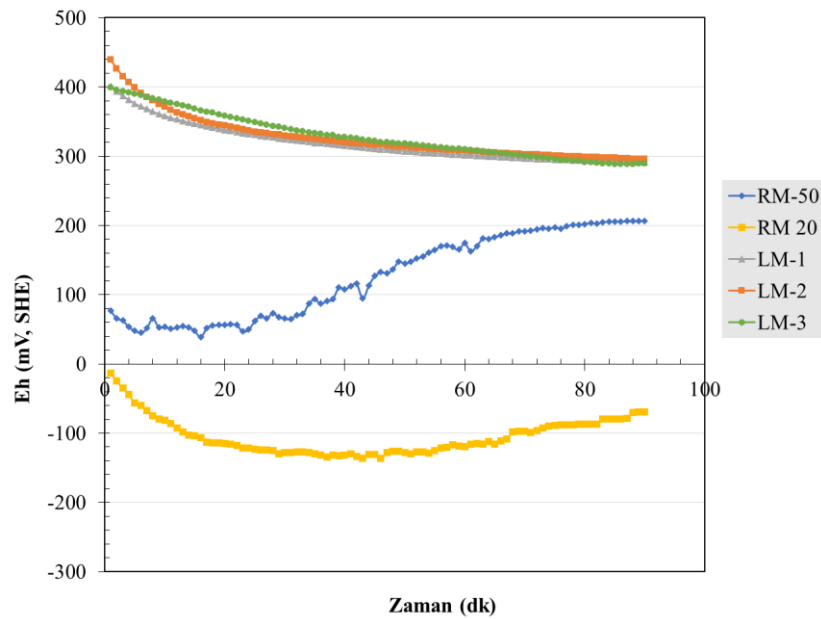
oynamaktadır. Eh flotasyon prosesinin kontrol ve denetiminde çok önemli bir parametredir. Eh yükseltgenme-indirgenme ortamlarında gösterge olarak kullanılmakta ve pülpün pH ve çözünmüş oksijen miktarlarından etkilenmektedir. Eh değerlerinin öğütme koşullarına doğrudan bağlı olduğu bilinmektedir. Bu sebeple öğütme ortamı ve öğütme araçları sülfürlü minerallerin flotasyon verimi ve seçimliliği üzerinde önemli rol oynamaktadır.

Bu kapsamda literatürde yer alan kısıtlı sayıdaki çalışmada, flotasyon öncesi kuru öğütmenin cevher tipine ve mineral yapısına bağlı olarak yaş öğütmeye kıyasla avantajlarının olabildiği gösterilmiştir. Dik değirmenlerdeki kuru öğütme prosesinde yeni serbestleşmiş mineral yüzeyleri su, pH veya Eh gibi kimyasal reaksiyonlardan etkilenmemekte hem de sağladığı seçimli kırılım sayesinde flotasyon verimini olumlu yönde etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan galenit-sfalerit cevherinin farklı mekanizmalar ve şartlar altında öğütülmesi sonucunda pülp potansiyellerindeki değişim zamana bağlı olarak incelenmiştir. Kuru öğütme numuneleri flotasyon pülpüne doğrudan beslenirken, RM-20 numunesi 85 dakika, RM-50 ise 55 dakika çubuklu değirmende öğütülmüştür. Öğütme sonrası flotasyon hücresine alınan pülp potansiyel değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.34'de görülmektedir. Kuru öğütme numunelerinin potansiyel değerlerinin birbirine çok yakın seyrettiği, yaş öğütme sonrası pülp potansiyellerinin ise büyük oranda düştüğü görülmektedir. Kuru öğütme numuneleri ve RM-50 arasında 350 mV civarında potansiyel farkı bulunmaktadır. Bu fark daha uzun süre değirmende öğütülen RM-20 numunesi ile çok daha fazla büyümektedir.

Öğütme ortamı ve sülfürlü mineraller arasındaki etkileşimin pülp potansiyelini azaltan etkisi önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Forssberg vd., 1993; Leppinen vd., 1998; Martin vd., 1991; Martin vd., 1991, Yuan vd., 1996a, b). Pülp potansiyelindeki düşüş ile ilgili problem genellikle tiol toplayıcıların sülfürlü minerallerin yüzeyine soğurumunu engelleyecek kadar düşmesi ve sonucunda flotasyonun engellenmesi ile ilgilidir.





Şekil 4.34. Pülp potansiyelinin zamana bağlı değişimi

Farklı ögütme ortamları farklı pülp potansiyelleri oluşturmaktadır. Şekil 4.34'de görüldüğü üzere pülp potansiyelleri kuru ögütme sonrası artış gösterirken, yaş ögütme sonrası düşmektedir. Çelik değirmende daha uzun süreli ögütme sonucunda pülp potansiyel değerlerinin daha negatif yöne kaydığı da görülmektedir. Artan pülp potansiyeli ile birlikte minerallerin yüzebilirliğinde artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.30). Dolayısıyla artan pülp potansiyelinin, flotasyon performansını arttırdığı söylenebilir. Yüksek pülp potansiyeline sahip kuru ögütme numuneleri, yaş ögütmeye kıyasla daha iyi flotasyon performansı göstermektedir. Bu bulgu çalışılan her iki tane boyutu için de geçerlidir. 20  $\mu\text{m}$  boyutunda kuru ögütme numunelerinin veriminde serbestleşme nedeni ile artış görülmüştür. Ancak yaş ögütme numunesinde verim aynı değerlerde kalmış ve serbestleşme nedeni ile seçimlilik artmıştır. MLA sonuçlarına göre büyük oranda serbestleştiği bilinen RM-20 numunesinin flotasyon performansında artış görülmemesi çelik değirmende daha uzun süre ögütülmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. İndirgen koşulda uzun süre ögütülen cevherin yüzebilirliği büyük oranda azalmakta ve serbestleşmiş galenit mineralinin verimi beklenen oranda artmamaktadır.

Genellikle elektrokimyasal olarak aktif ögütme ortamında, çelik değirmende, oksijenin hızla tüketilmesi sebebiyle düşük Eh ve çözünmüş oksijen değerleri dolayısıyla indirgen bir ortam görülmektedir. Diğer taraftan ögütme ortamından kaynaklı aşınma

ürünleri cevherde bulunan sülfürlü minerallerle etkileşime girmektedir. Yaş öğütme sonrası görülen düşük potansiyel değerleri, pülpte metalik demir gibi oksijen tüketicilerinin varlığını göstermektedir (Bruckard vd, 2011). Gözlemlenen düşük potansiyel ve çözülmüş oksijen oranları, koşullanma aşamasında minerallerin oksitlenmesinin azalmasına neden olmaktadır (Koleini vd., 2012). Çelik öğütme ortamının daha düşük durum potansiyeline sahip olması sebebiyle pülpte demir hidroksit ürünleri oluşmakta ve daha önce de tartışıldığı üzere oluşan bu türler galenit-sfalerit flotasyonunu olumsuz yönde etkilemektedir. Kuru ve yaş öğütme sonrası pülp potansiyellerinde görülen bu fark, yaş öğütme boyunca aşınma sonucu oluşan ürünlerin cevherin elektrokimyasını ve yüzebilirliğini nasıl etkilediğini göstermektedir.

Galenit minerali ile yapılan çalışmalarda otojen ve paslanmaz çelik değirmende yani daha yükseltgen ortamlarda flotasyon kinetiğinin çelik değirmen gibi indirgen ortamlara kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Learmont ve Iwasaki, 1984, Rey ve Formanek, 1960, Thornton, 1973, Cases vd., 1989). Yapılan çalışmada galenit flotasyon devresindeki deneylerden elde edilen sonuçlar, kurşun veriminin kuru öğütme sonrası arttığını açıkça ortaya koymaktadır, dolayısıyla bulguların literatürle paralel olduğu görülmektedir.

Yükseltgen ortamların galenit flotasyon performansı üzerindeki iyileştirici etkisi iki mekanizma ile açıklanabilmektedir: yüksek pülp potansiyel değerleri ve galenin toplayıcısız flotasyonu (Guy ve Trahar,1984). Literatürde yer alan birçok çalışma galenin flotasyon performansının Eh değerlerine büyük oranda bağlı olduğunu göstermektedir (Tolun, 1964; Toperi ve Tolun, 1969; Woods, 1971; Woods, 1972). Özellikle yükseltgen ortamlarda öğütüldükten sonra galenitin toplayıcısız flotasyonunda görülen artışın galenit yüzeyinin oksitlenmesine ve elementel sülfür oluşmasına bağlı olduğu düşünülmektedir (Guy ve Trahar, 1984). Learmont ve Iwasaki (1984) çelik öğütme ortamı kullanılmasına bağlı olarak galenit yüzeyinde oluşan oksitlenme ürünleri veya demirin, flotasyon performansındaki düşüşe neden olduğunu savunmaktadır. Petruk ve Hughson (1977) ise çelik öğütme ortamı kullanımında oluşan indirgenen koşullara benzer koşulların, galenit cevherinde bulunan pirit sebebiyle oluştuğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.31a ve Şekil 4.32'da verilen kurşun-demir ve kurşun-sülfür ilişkileri ayrıca serbestleşme verilerinden yapılan çıkarımla çelik ortamda öğütme sonrası pirit kazanımının arttığı söylenebilmektedir.

Tez çalışmasında kullanılan cevherdeki pirit mineralinin varlığı sfalerit ve galenitin anodik oksitlenmesi için uygun ortam yaratmaktadır. Bu nedenle piritin yüzebilirliği artarken, diğer minerallerin flotasyonu olumsuz etkilenmektedir. Yükseltgen öğütme ortamı ile öğütülen cevherin pirit üzerindeki bastırıcı etkisi olduğu, dolayısıyla seçimlilik de artış olduğu saptanmıştır (Bruce, 1976). Farklı öğütme ortamlarının pirit minerali üzerinde yarattığı etki tam olarak bilinmemektedir. Yapılan birçok çalışmada çelik öğütme ortamında toplayıcı varlığında piritin daha hızlı yüzme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (Thornton, 1973, Finkelstein, 1975, Rao vd., 1976), ancak bunun tam tersi bulgulara erişen birçok araştırmacı bulunmaktadır (Learmont ve Iwasaki, 1984, Martin, 1988, Bruce, 1976 ve Cases vd., 1989). Piritin yüksek pülp potansiyellerinde mineral yüzeyinde oluşan diksantojene istinaden daha hızlı yüzdüğüne inanılmaktadır (Woods, 1976). Thornton, Finkelstein ve Rao tarafından gözlemlenen sonuçların nedeni bu bulgu olabilir. Rao vd. (1976) çalışmasında piritin yüzebilirliğinin çeşitli faktörlerden etkilendiğini belirtmiştir. Piritin hidrofobikliğin, pirit ve aşınan demir ortam arasındaki galvanik etkileşim sonucunda mineral yüzeyinde oluşan elementel sülfürden kaynaklandığını öne sürmüştür. Diğer taraftan piritin galvanik etkileşim sonucunda indirgenmesinde ksantat ile reaksiyonunun yavaşladığı belirlenmiştir (Woods, 1976). Bunun yanı sıra, ortamdaki oksijen varlığı oksijenin pirit yüzeyinde indirgenmesi sonucunda ortaya çıkan hidrofilik iyonlar, pirit yüzeyinin toplayıcı ile etkileşimini azaltarak piritin bastırılmasına neden olmaktadır.

#### **4.1.2 Çinko flotasyon devresi**

Kurşun flotasyon devresinde optimum koşullar sağlandıktan sonra devamında çinko flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sfaleriti canlandırmak amacıyla  $CuSO_4$ , toplayıcı olarak ise SIPX kullanılmıştır. Canlandırıcı miktarı sabit tutulup, toplayıcı ve pH değerlerinde değişiklikler yapılarak flotasyon performansı üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Sfalerit flotasyon devresinde, pülp alkalitesi piritin istenmeyen şekilde canlanmasının engellenebilmesi için alkali pH değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

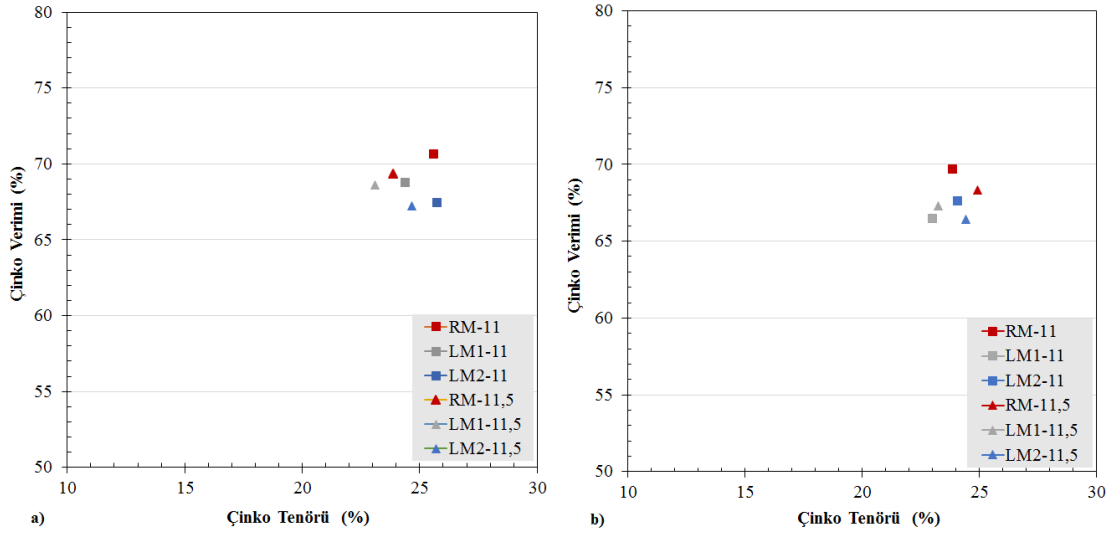
Çizelge 4.6. pH etkisinin incelendiği sfalerit flotasyonu deney koşulları (%35 katı konsantrasyonunda)

		Koşullandırma Süresi (dk.)
Canlandırıcı	CuSO <sub>4</sub> (1250 g/t)	30
Toplayıcı	SIPX (60, 90 g/t)	1
Köpürtücü	AF-70 (40 g/t)	1
pH	11 ve 11,5	

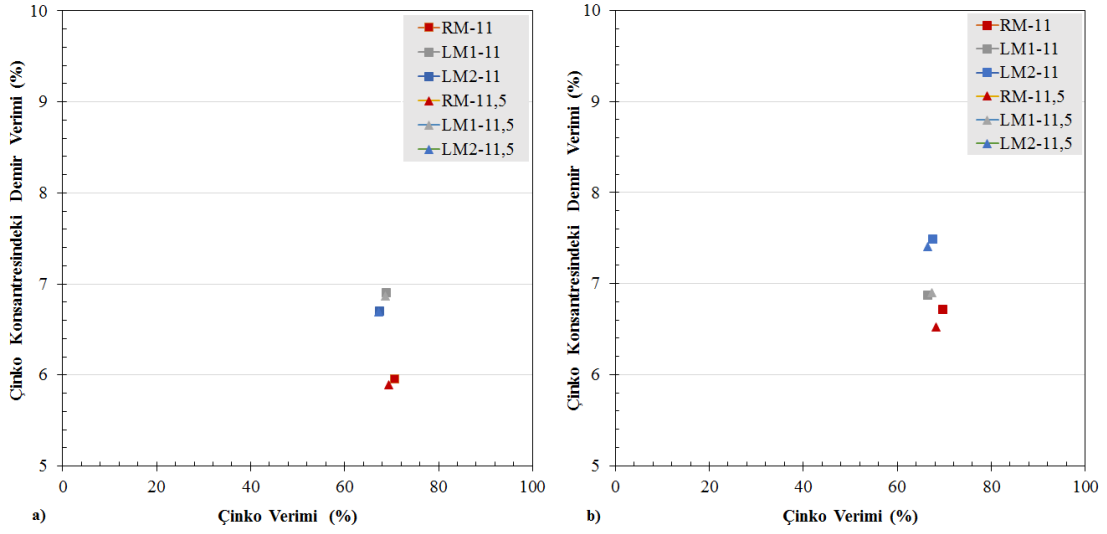
#### 4.1.2.1 pH ve toplayıcı dozajı etkisi

Sfalerit minerali ile yapılan ön flotasyon testleri sonucunda, cevherin CuSO<sub>4</sub> ilavesi ile kolaylıkla canlandığı ve yüzdüğü gözlemlenmiştir. Bu sebeple canlandırıcı miktarı sabit tutularak farklı pH değerlerinde ve toplayıcı dozajlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Her iki toplayıcı dozajında da pH değerleri değiştirilerek sonuçları incelenmiştir. pH 11’de gerçekleştirilen deneyler RM-11, LM 1-11 ve LM 2-11 ve pH 11,5’da gerçekleştirilen deneyler RM-11,5, LM 1-11,5, LM 2-11,5 olarak adlandırılmıştır.

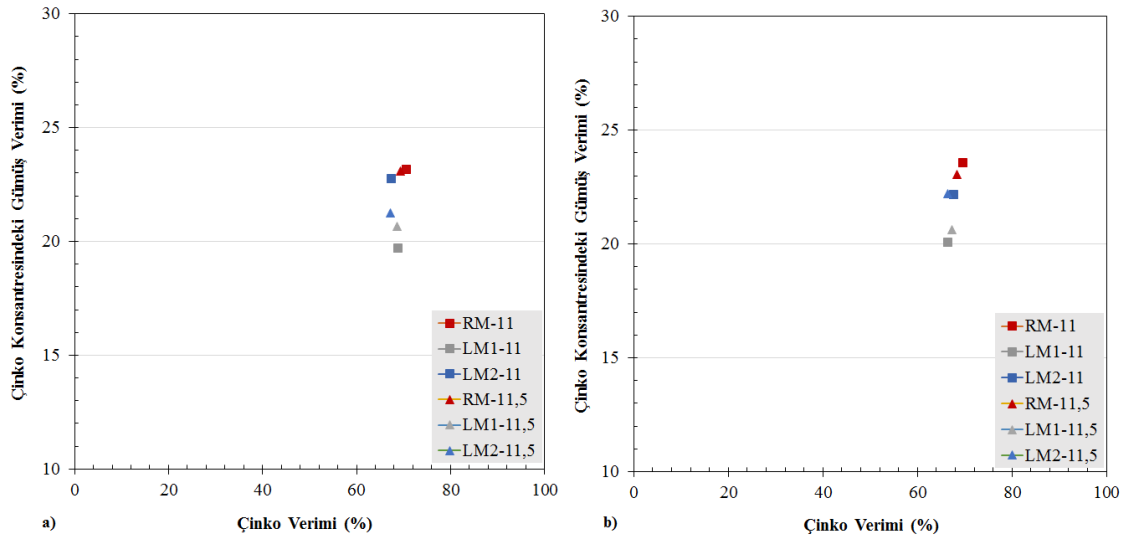
pH ve toplayıcı dozaj değişimlerinin sfalerit flotasyon performansı üzerindeki etkisi Şekil 4.35’da gösterilmektedir. Öncelikle Şekil 4.35a’da SIPX 60 g/t kullanımında pH etkisi incelendiğinde, farklı pH değerlerinin verim ve tenör üzerinde büyük bir etkisi olmadığı görülmektedir. Aynı şekilde SIPX 90 g/t kullanılan deneylerde de pH değerlerindeki değişiklik flotasyon performansında fark yaratmamıştır. Sonuçlar numuneler bazında incelendiğinde her iki toplayıcı dozajında da en yüksek çinko verim ve tenörleri RM numunesine, en düşük değerler ise LM-2 numunesine aittir. Toplayıcı dozaj miktarındaki değişikliğin flotasyon performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise Şekil 4.35a ve b arasında verim ve tenör değerleri açısından farklılık olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.35. Farklı pH değerlerinde çinko verim ve tenör ilişkisi a) SIPX:60 g/t, b) SIPX:90 g/t kullanımında



Şekil 4.36. Farklı pH değerlerinde çinko ve demir seçimliliği a) SIPX:60 g/t, b) SIPX:90 g/t



Şekil 4.37. Farklı pH değerlerinde çinko ve gümüş seçimliliği a) SIPX:60 g/t, B) SIPX:90 g/t

Çinko ve demir mineralleri arasındaki seçimlilik pH değerleri arasında değişiklik göstermezken, numuneler bazında farklılıklar göstermektedir (Şekil 4.36). En düşük demir verimi RM numunesine aitken LM-1 ve LM-2 numuneleri için verim değerleri birbirine yakındır. Bu bulguların her iki toplayıcı dozajında da geçerli olduğu görülmektedir. Ayrıca toplayıcı dozajının artırılması ile birlikte çinko konsantresindeki demir miktarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Gümüş mineralinin çinko ile birlikte alındığı ve verimin pH ve toplayıcı miktarındaki değişimden etkilenmediği görülmektedir (Şekil 4.37). Sonuç olarak seçilen pH ve toplayıcı dozaj değerlerinin sfaleritin flotasyon performansı üzerinde kayda değer bir değişiklik yaratmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle daha düşük pH ve toplayıcı dozajının seçilmesi gereksiz reaktif sarfiyatını engellemek açısından daha uygun bulunmuştur.

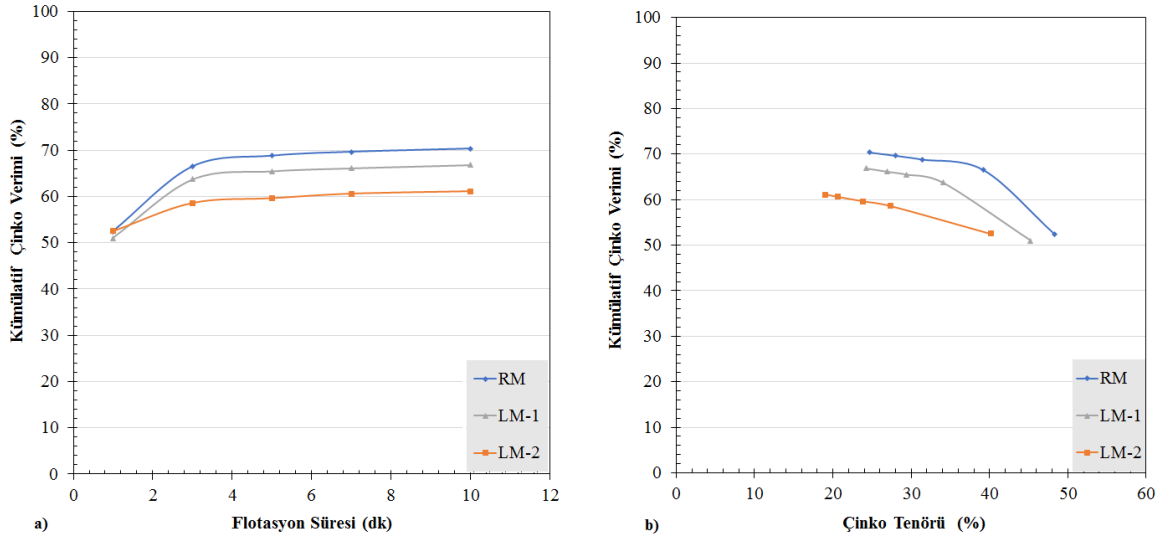
#### 4.1.2.2 Sfalerit devresi kinetik flotasyon testleri

Sfalerit flotasyon devresi, galenit flotasyonu ile yapılan kinetik testler sonrasında gerçekleştirilmiştir. Galenit-sfalerit kinetik flotasyon testleri her iki devre için numunelere göre belirlenen optimum şartlar altında yapılmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Kinetik sfalerit flotasyonu deney koşulları

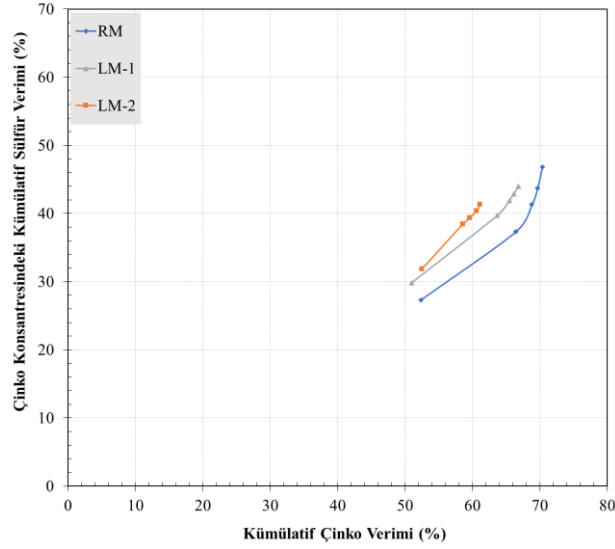
		Koşullandırma. Süresi (dk.)
Canlandırıcı	CuSO <sub>4</sub> (1250 g/t)	30
Toplayıcı	SIPX (60 g/t)	1
Köpürtücü	AF-70 (40 g/t)	1
pH	11	

Çinko flotasyonun zamana bağlı değişim grafiği (Şekil 4.38) incelendiğinde, en yüksek çinko kazanımının RM numunesinde, en düşük çinko kazanımının LM-2 numunesinde olduğu görülmektedir. Tenör-verim ilişkisi ile birlikte incelendiğinde en iyi çinko flotasyon performansının RM numunesinde elde edildiği söylenebilmektedir. Kuru öğütme numunelerinde, özellikle LM-2'nin, daha düşük çinko kazanımına sahip olduğu görülmüştür.



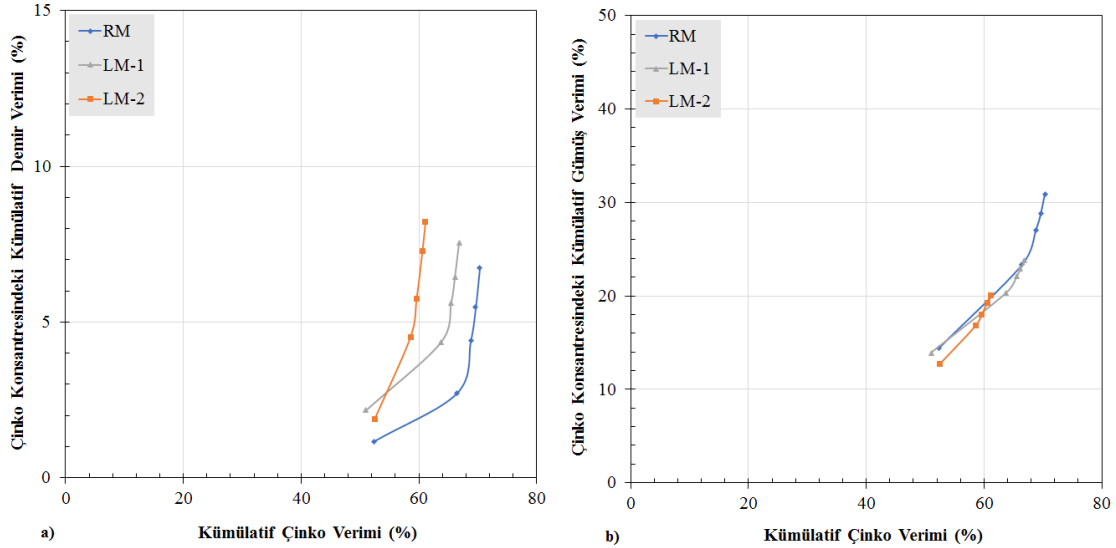
Şekil 4.38. RM, LM-1 ve LM-2 numunelerine ait a) Kümülatif çinko veriminin zamana bağlı davranımı b) Kümülatif çinko verim ve tenör ilişkisi

Çinko konsantresindeki sülfür verimi incelendiğinde; en yüksek sülfür kazanımının RM numunesinde, en düşük ise LM-2 numunesinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.39). Verim ve tenör değerleri ile paralel olan bu bulgular doğrultusunda konsantrede kazanılan sülfürün çoğunlukla ZnS'den kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 4.39. Çinko konsantresindeki sülfür ve çinko seçimliliği

Çinko konsantresindeki demir kazanımı yaş öğütme numunesine kıyasla kuru öğütme numunelerinde bir miktar daha fazladır (Şekil 4.40a). Numunelerin çinko kazanımı arasındaki fark burada da net bir şekilde görülmektedir. Çinko konsantresi ile alınan gümüş miktarının flotasyon süresi boyunca ve çinko kazanımı ile doğru orantılı olarak arttığı da görülmektedir (Şekil 4.40b).



Şekil 4.40. Çinko konsantresindeki a) demir ve çinko seçimliliği b) gümüş ve çinko seçimliliği

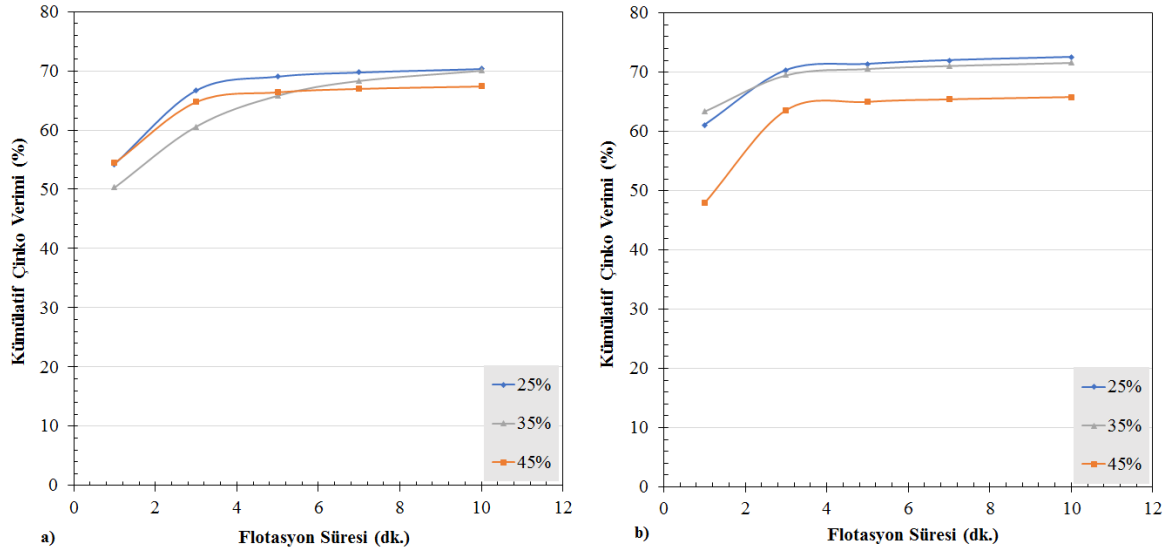
Çinko devresinde yapılan kinetik flotasyon testi sonuçlarına göre en iyi çinko flotasyon performansı yaş öğütme sonrasında elde edilmektedir. Hem verim hem de tenör



açısından yaş öğütme çok daha yüksek değerlere sahiptir. Yaş öğütme sonrası kazanılan sülfür miktarının fazla olması sfalerit kazanımını işaret ederken, demir minerali alımının da çok daha az olduğu görülmektedir. Bulguların kurşun flotasyon devresi sonrasında yapılan deneylerden elde edilmesi sebebiyle doğrudan mekanizma farkı üzerinden yorum yapılamamaktadır. Kuru öğütme numunelerinin, kurşun flotasyon devresinde yaş öğütmeye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak konsantreye kurşun ile alınan çinko miktarındaki fazlalık, sonrasında gelen çinko flotasyon devresindeki performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer taraftan yaş öğütme sonrası kurşun devresinde daha az miktarda yüzen ve öğütme ortam farkı sebebiyle kuru öğütmeye kıyasla daha az canlanan sfaleritin, canlandırıcı ilavesi sonucu yüzebilirliği artmıştır. Bunun sonucunda yaş öğütme numunesinin çinko flotasyon performansı, kuru öğütmeye kıyasla çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

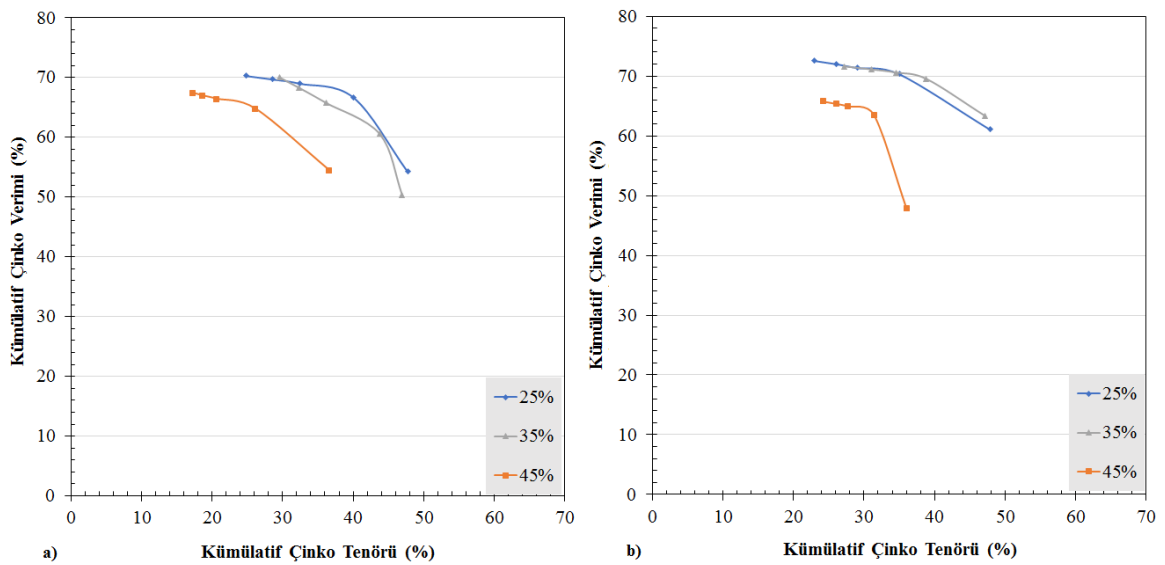
- Sfalerit devresi yüzde katı deneyleri

Sfalerit devresinin optimizasyonu sonrasında, 20 µm tane boyutundaki cevher ile farklı katı yoğunluklarında yapılan sfalerit flotasyon deney sonuçları bu bölümde verilmiştir. Şekil 4.41'de RM numunesi için çinko verimi en yüksek 25% katı konsantrasyonunda elde edilirken, %35 katı için çinko verim değerleri flotasyon başlangıcında en düşük değerlere sahiptir. Flotasyon süresi boyunca çinko verimi artarak 10. dakikada %25 katıdaki verim değerini yakalamaktadır. LM-3 numunesinde %25 ve 35 katıdaki çinko verimleri birbirine çok yakın seyretmektedir. %45 katı konsantrasyonunda ise diğerlerine göre çok daha düşük verim değerleri elde edilmiştir. %45 katıda kurşun konsantrasyonunda alınan yüksek miktardaki çinko sebebiyle, sfalerit devresinde çinko verim değerleri azalmıştır.

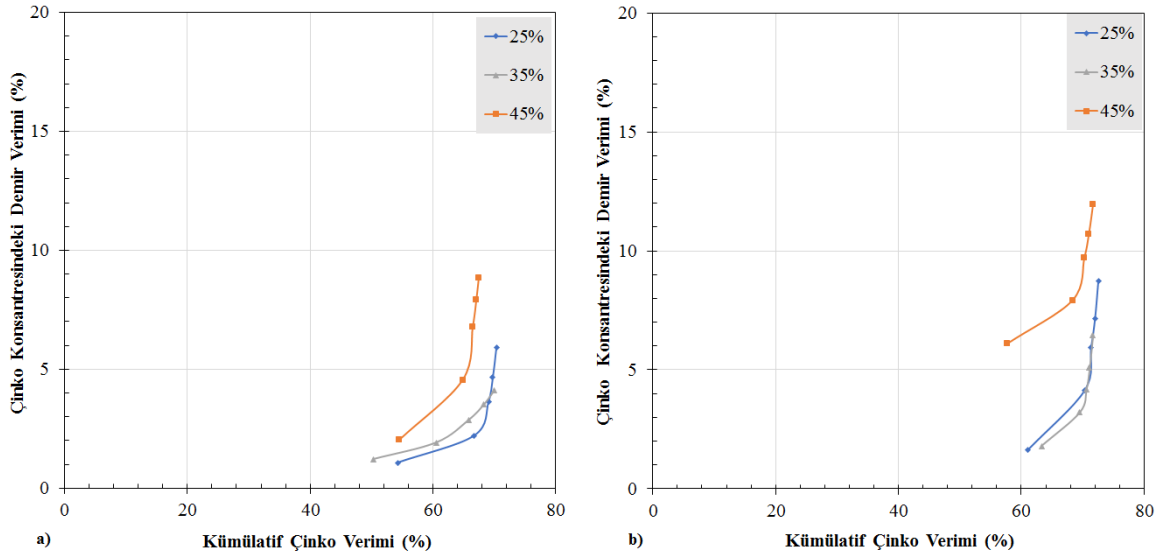


Şekil 4.41. Kümülatif çinko veriminin zamana bağlı değişimi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

Çinko verim değerlerine karşılık çizilen tenör değerleri RM numunesi için en yüksek verim ve tenörün %25 katı yoğunluğunda elde edildiğini göstermektedir. %45 katıda ise en düşük tenör ve verim değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.42a). RM-20 ve LM-3 numunelerinin tenör değerleri her konsantrasyon için birbirine yakın iken, LM-3 numunesinin verim değerleri %25 ve 35 katı yoğunluğunda RM-20'ye göre daha yüksektir (Şekil 4.42b).

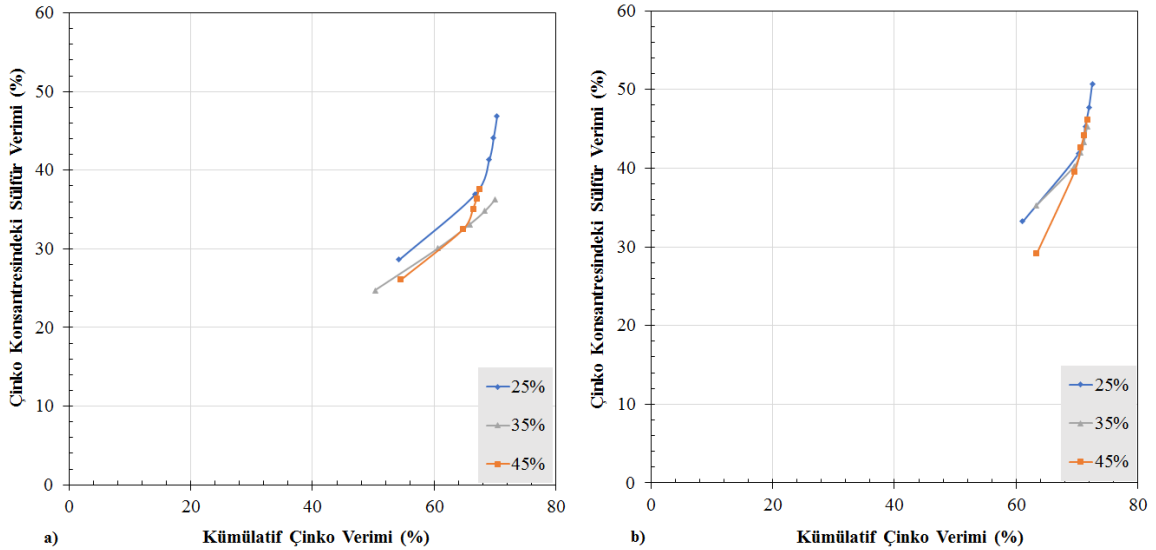


Şekil 4.42. Kümülatif çinko verim ve tenör ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

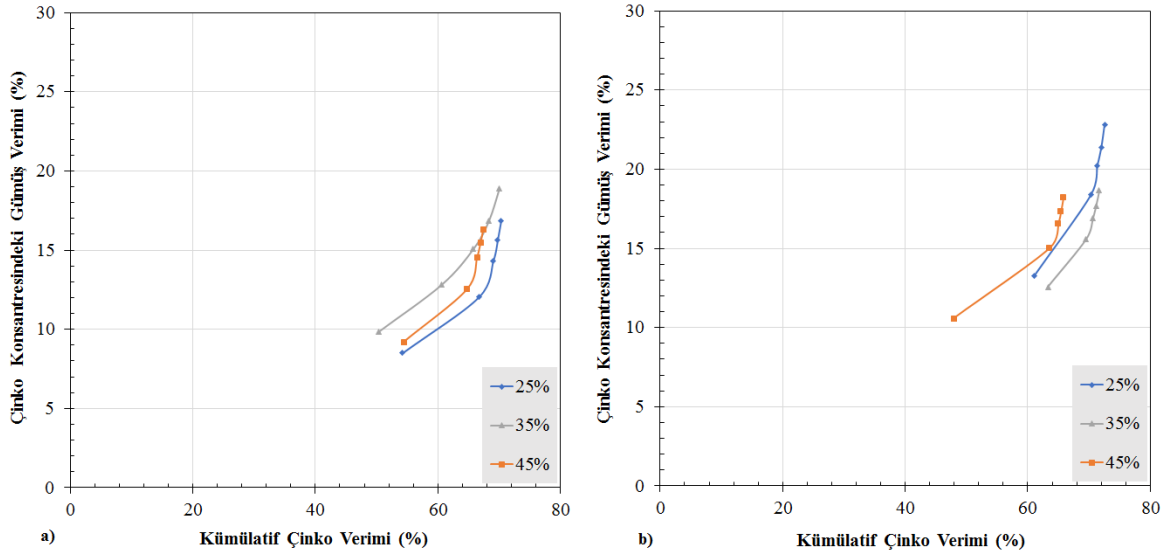


Şekil 4.43. Çinko ve demir mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

Çinko ve demir arasındaki seçimliliğe göre RM-20 numunesi için en yüksek demir verimi %45, en düşük ise %35 katıda görülmektedir (Şekil 4.43a) LM-3 numunesi için ise en yüksek %45, en düşük ise %35 katı yoğunluğunda elde edilmiştir (Şekil 4.43b).



Şekil 4.44. Çinko ve sülfür mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi



Şekil 4.45. Çinko ve gümüş mineralleri arasındaki seçimlilik ilişkisi a) RM-20 b) LM-3 numunesi

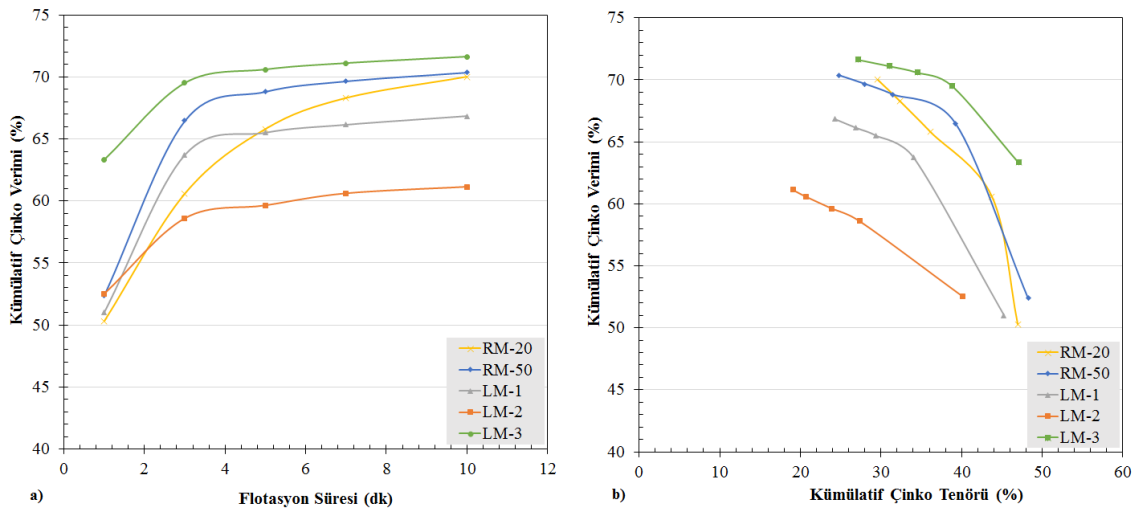
Çalışılan katı yoğunluklarında, RM-20 numunesi için çinko konsantrasyonundaki sülfür verimi çinko verimi ile doğru orantılı olarak artmaktadır (Şekil 4.44). Ancak flotasyon süresinin sonuna doğru seçimlilik özellikle %25 katı yoğunluğu için azalmaktadır. %35 katı yoğunluğunda ise sülfür verimi doğru orantılı olarak artmaktadır. LM-3 numunesinin sülfür kazanımı %25 ve %35 katı yoğunluğu için neredeyse flotasyon boyunca aynıdır. %45 katı için ise flotasyon başlangıcında düşük, süre ilerledikçe diğer yüzde katı yoğunluğundaki deneyler ile aynı değerlere ulaşmaktadır. LM-3 numunesinin sülfür kazanımları RM-20'ye göre daha yüksektir. RM numunesinde gümüş kazanımları her bir numune için orantılı olarak artmakta ancak flotasyon süresinin sonuna doğru gümüş kazanımı hızlanmaktadır. En yüksek gümüş kazanımı %35 katı yoğunluğunda gözlemlenmiştir. LM-3 numunesinde en yüksek gümüş kazanımı %25 numunesinde elde edilmiştir. Galenit devresinde gerçekleştirilen deneylerle paralel olarak RM-20 numunesi için %35 katı yoğunluğunun en uygun koşulları sağladığı belirlenmiştir. LM-3 numunesinde ise %25 ve 35 katı yoğunluklarındaki deneylerin sonuçları birbirine çok benzerdir.

#### 4.1.2.3 Öğütme koşullarının sfalerit flotasyon performansı üzerindeki etkisi

Kurşun-çinko cevherlerinin birçoğu ilk olarak galenit ve sonrasında sfalerit yüzdürülecek şekilde seçimli flotasyon ile kazanılmaktadır. Bu ayırım tiol toplayıcıların

elektrokimyasal mekanizma yolu ile galenit yüzeyine soğrulması ile gerçekleşirken, sfalerit minerali canlandırılmaya ihtiyaç duyar. Ancak sistemdeki cevherlerin oksitlenmesi veya oksitlenen mineral içermesi sonucunda sfalerit mineralinin önemli miktarı kurşun flotasyon devresinde yüzmekte dolayısıyla çinko veriminde kayıplar yaşanmaktadır (Gaudin, 1957; Bogdanov vd., 1965). Bu çalışmada karşılaşılan başlıca problemlerden birisi kuru öğütme sonrası sfaleritin kurşun devresinde istenmeyen canlanmasıdır. Sfaleritin bastırılması için kullanılan NaCN yeterli verimliliği gösterememiş ve çinko kaybını azaltamamıştır. Farklı öğütme mekanizmaları kullanılarak hazırlanan numunelerin sfalerit flotasyon deneylerine ait verileri karşılaştırılmalı olarak bu bölümde sunulmuş ve mekanizmalar arasında görülen performans farklılıkları açıklanmaya çalışılmıştır.

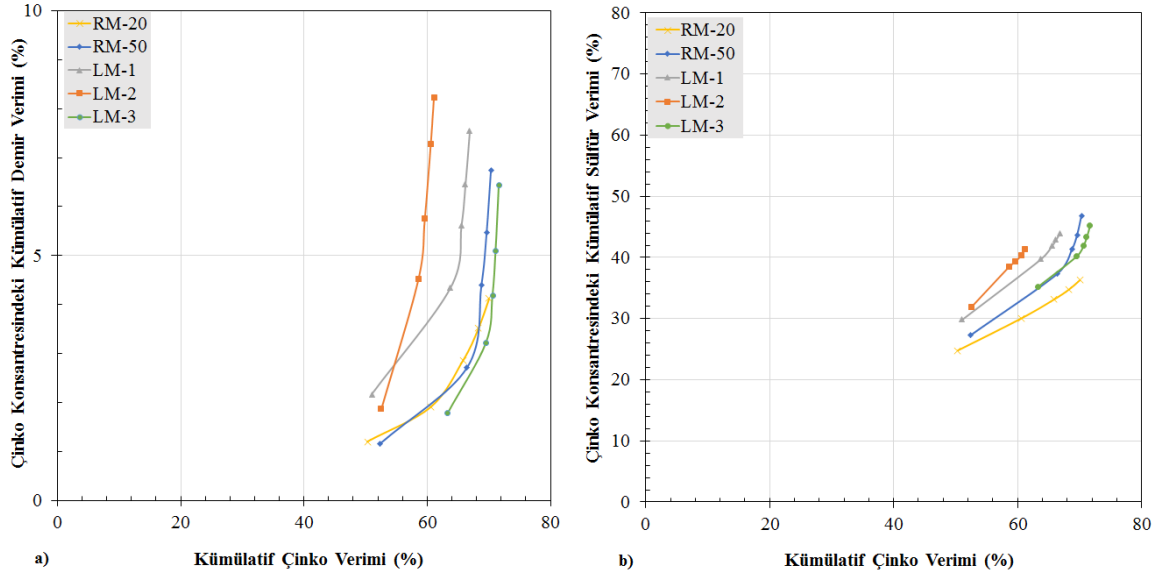
Sfalerit kaba flotasyon devresinde gerçekleştirilen kinetik test sonuçları Şekil 4.46'da görülmektedir. Sfalerit flotasyon hızı oldukça yüksek görünmektedir, sfaleritin büyük çoğunluğu ilk beş dakikada kazanılmıştır. Dolayısıyla tenör değerleri flotasyon başlangıcında çok yüksekken sonrasında azalmaktadır, bu durum ayrıca yavaş yüzen tanelerin flotasyonun sonraki süreçlerinde kazanıldığını da göstermektedir. Sfaleritin çinko devresinde yüzmesi ile ilgili herhangi bir sıkıntı yaşanmamaktadır. Yapılan deney sonuçlarına göre atıkta kaybedilen sfalerit miktarı %0,64-0,75 değerleri arasındadır. Ancak farklı koşullarda öğütülen numunelerin sfalerit verimlerinde büyük fark görülmektedir.



Şekil 4.46. 20µm ve 50µm boyutlu numunelerin a) kümülatif çinko veriminin zamana bağlı değişimi b) kümülatif çinko verim-tenör ilişkisi

Yaş öğütme numunelerine bakıldığında RM-20 ile yapılan deneyde çinko verimi flotasyon başlangıcında çok düşükken zamanla artıp, RM-50'nin çinko verim değerini yakalamaktadır. Aslında RM-20 numunesinde sfalerit serbestleşmesinin çok daha yüksek olduğu göz önüne alınırsa RM-50'ye göre daha yüksek sfalerit performansına sahip olması beklenilmektedir. Ancak RM-20 numunesinin, RM-50'ye göre daha uzun süre indirgen ortama maruz kalması sebebiyle sfaleritin bastırıldığı ve canlanmasının daha uzun zaman aldığı düşünülmektedir. Kuru öğütme numuneleri arasında, kurşun devresinde çinko kaybı en yüksek olan LM-2 ve en az olan LM-3 numunelerinin sfalerit verimleri arasındaki fark %10 civarındadır. Daha ince boyuta öğütülmesi sonucunda artan serbestleşmenin etkisi ile sfalerit verimi %70 değerlerine kadar çıkmaktadır. LM-1 ve LM-2 numunelerinin düşük çinko verimleri, sfaleritin büyük bir kısmının kurşun devresinde yüzmesinden kaynaklanmaktadır. Kümülatif çinko tenör değerleri kıyaslandığında RM-20'nin tenör değerinin flotasyon başlangıcında RM-50'ye kıyasla daha yüksek olduğu ancak sonra değerlerin yakınlaştığı görülmektedir. LM-3 numunesi ise tenör değerinde de diğer numunelere kıyasla en yüksek seviyededir. Serbestleşme sonucunda, kuru öğütme koşullarının sfaleritin flotasyon performansını arttırdığı açıkça görülmektedir. Kuru öğütme numunesi ince boyutlara ulaştığında, çinko devresindeki flotasyon performansı çok daha yüksek değerlere çıkmaktadır. Galenit-sfalerit mineralinin serbestleşmesi dolayısıyla daha seçimli gerçekleşen kurşun flotasyonu sayesinde, çinko flotasyon performansının da arttığı söylenebilmektedir.

Çinko konsantrindeki demir miktarının 50  $\mu\text{m}$  boyutundaki numunelerde daha yüksek miktarda kazanıldığı görülmektedir (Şekil 4.47a). 20  $\mu\text{m}$ 'ye inildiğinde LM-3 için bir miktar azalmakta, RM-20 numunesinin demir kazanımı ise büyük oranda azalmaktadır. Çinko ile birlikte kazanılan sülfürün flotasyon başlangıcında en fazla LM-2 de en az ise RM-20'de görülmektedir. LM-3 ve RM-50 numunelerinde flotasyon suresinin sonuna doğru sülfür kazanımında artış görülmektedir (Şekil 4.47b).



Şekil 4.47. 20  $\mu\text{m}$  ve 50  $\mu\text{m}$  boyutlu numunelerin a) çinko konsantresindeki demir ve çinko seçimliliği b) çinko konsantresindeki sülfür ve çinko seçimliliği

Kuru ve yaş öğütmenin sfalerit yüzebilirliği üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Kuru öğütmede oluşan yükseltgen ortam sebebiyle sfalerit doğal yüzebilirlik yani yüzeydeki bir oksidasyon ürününe bağlı olarak toplayıcısız flotasyon özelliği göstermeye başlar. Fakat sfalerit çelik değirmende öğütüldüğü zaman bu özelliğinin kaybolduğu gözlenmiştir. Çelik değirmende yapılan öğütme sonrasında azalan oksijen miktarı indirgen bir ortam oluşturarak ksantatın oksitlenmesini ve sfalerit mineralinin yüzeyine soğurumunu engeller. Aynı zamanda mineral taneleri oksitli yüzeyle kaplanırlar. Bu koşullar altında öğütülen sülfürlü minerallerin kendiliğinden oluşan yüzebilirlikleri ortadan kaybolur ve ksantat varlığında verimleri düşük olur (Heyes ve Trahar, 1979).

#### 4.1.2.4 Öğütme koşullarının sfalerit mineralinin elektrokimyası üzerindeki etkisi

Kompleks sülfürlü cevherlerde sfalerit flotasyonu genellikle Cu/Pb veya Pb flotasyonundan sonra gerçekleşmektedir. Bu sebeple göreceli olarak birincil öğütme devresinden uzaktır ve öğütme koşullarından daha az etkilenmesi beklenmektedir. Ancak yapılan araştırmalarda kullanılan öğütme ortamı ve mekanizmasının sfalerit flotasyonunu etkilediği belirlenmiştir (Bruce, 1976). Sfalerit flotasyonunun yükseltgen koşullar altında iyileştiği bilinmektedir, bu nedenle kuru öğütme sonrası sfaleritin flotasyon veriminin iyi olması beklenmektedir. Şekil 4.46'da LM-3 numunesi için kuru öğütmenin çinko flotasyonu üzerindeki olumlu etkisi görülmektedir, LM-1 ve LM-2'de görülen düşük çinko verimleri

serbestlemenin az olması sebebiyle kurşun konsantrasyonuna daha çok çinko kaçması ile ilişkilidir. Şekil 4.31a'da kuru öğütmenin kurşun flotasyonu devresinde sfaleriti canlandırıp yüzmesine neden olduğu görülebilir. Wei ve Sandenbergh (2007) çalışmalarında sfaleritin canlanmasını, değirmendeki yükseltgen ortam sebebiyle hareketliliği artan bakır iyonlarına bağlamışlardır. Rey ve Formanek (1960) sfaleritin daha yükseltgen ortamda yapılan öğütme sonucunda flotasyon performansının yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu etkinin ortama eklenen demir ilavesi ile azaldığı da diğer bir bulgudur.

Kavramsal olarak çelik öğütme ortamında kurşun-çinko arasındaki seçiciliğin artması beklenmektedir. Literatürde yapılan önceki çalışmalarla da bu etki gözlemlenmiştir (Bushell ve Veitch, 1975; Fahlstrom, 1974). Gerçekleştirilen flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen veriler de bu bulguyu doğrulamaktadır. Yaş öğütme sonrası kurşun-çinko arasındaki seçicilik kuru öğütmeye kıyasla çok yüksektir (Şekil 4.31a).

Bulgular aynı cevherin farklı mekanizmalarla öğütülmesi sonucunda pülp elektrokimyası üzerinde önemli etkiler yarattığını açıkça göstermektedir (Şekil 4.34). Sonuç olarak öğütme ortamı mineral yüzeylerinin oksitlenmesini ve toplayıcı soğurumunu etkilemektedir, dolayısıyla pülp potansiyeli üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Eh, pülpteki oksijen miktarı arttıkça ve pülp içerisindeki demir miktarı azaldıkça daha yükseltgen değerlere doğru gitmektedir. Çelik öğütme ortamında indirgen ortam, düşük Eh değerleri oluşması sebebiyle galenit ve sfaleritin verim değerleri düşmüştür, ancak galenit ve sfalerit arasındaki seçicilik önemli derecede düzelmiştir. Diğer taraftan kuru öğütmede sağlanan yüksek Eh değerleri galenit-sfalerit cevherinin flotasyonu için daha uygun koşullar yaratmış ancak seçiciliği olumsuz etkilemiştir. Öğütme ortamının daha soy bir ortam ile değiştirilmesi veya mineral-öğütme ortamı arasındaki etkileşimin en aza indirilmesi sonucunda sistemi kirleten hidroksil miktarında azalma görülmekte ve flotasyon performansı iyileşmektedir.

Öğütme türü ve ortamının hem flotasyon verimi hem de seçicilik üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Öğütme süresince cevherin öğütme ekipmanıyla, bilyalı veya çubuklu değirmen kullanıldığında ise öğütücü ortamla teması kaçınılmazdır. Bu sadece aşınmaya sebebiyet vermez aynı zamanda aşınan malzemenin cevher yüzeyinde birikimine de neden olur. Beklenildiği gibi cevher ve öğütme ortamı arasındaki etkileşim sülfürlü minerallerin



verim ve seçimliliğini büyük oranda etkilemektedir (Forssberg vd, 1988, 1993; Greet vd., 2005; Kocabağ ve Smith, 1982; Wang ve Xie, 1990). Cullinan (1999) ve Peng (2003) elik öğütme ortamında öğütülen minerallerin yüzeyinde demir kirlenmesi olduğuna dair güçlü bulgular elde etmişlerdir. Dahası öğütme ortamı ve mineraller arasındaki galvanik etkileşimler sistemin pülp kimyasını da doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle öğütme ortamının daha az etkin bir ortamla değiştirilmesi sonucu minerallerin pülp kimyası ve flotasyon davranımında olumlu etkiler görölmektedir.

## 5 SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Hazırlanan doktora çalışması kapsamında, deneylerde Güney Amerika menşeli galenit-sfalerit cevheri kullanılmıştır. Yapılan çalışmada cevherin farklı mekanizmalar ve koşullar altında öğütülmesinin flotasyon performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sfaleritin kuru ve yaş öğütme ortamında davranımlarının farklı olduğu bilinmektedir. Dik değirmende sağlanan kuru öğütme ortamının sfalerit mineralinin yüzebilirliği üzerindeki etkisi çok çarpıcıdır. Ancak literatürde bu konu ile ilgili kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Özellikle yataklı kırılım ve geleneksel öğütme yöntemlerinin karşılaştırıldığı araştırma sayısı yok denecek kadar azdır. Bu nedenle öğütme ortam etkisinin net bir şekilde görülebileceği sfalerit minerali ve genellikle bağlı bulunduğu galenit mineralini içeren kompleks cevher çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir. Daha sonra yataklı kırılım mekanizmasına sahip dik değirmende kuru ve çubuklu değirmende yaş olarak öğütülmüş numuneler kullanılarak flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiş, sonrasında flotasyon performansları üzerindeki etkileri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Deneyleerin ilk aşamasında mekanizma ve koşul etkilerinin kıyaslanabilmesi için kuru ve yaş öğütme numuneleri için optimum şartlar belirlenmiştir. Bu süreçte aynı ve farklı koşullar altında öğütme mekanizmaları karşılaştırılmış ve flotasyon performanslarının farklı optimum koşullarda iyileştiği saptanmıştır. İkinci aşamada belirlenen optimum şartlarda kinetik flotasyon testleri yapılarak her numune için flotasyon performansı incelenmiş ve aralarındaki farklar tartışılarak, nedenleri bulunmaya çalışılmıştır. Bu sayede mekanizma etkisi numuneler hem aynı hem de farklı koşullardayken kıyaslanabilmesi sağlanmış ve aradaki farklar daha detaylı olarak incelenebilmiştir. Son aşamada ise serbestleşmenin daha yüksek olduğu düşünülen ince tane boyutunda farklı pülp yoğunluklarında galenit-sfalerit cevherinin flotasyon performansında ortaya çıkan farklar incelenmiştir.

Farklı öğütme mekanizmalarının ve koşulların flotasyon performansı üzerindeki etkileri tane boyu dağılımı, serbestleşme, tane şekli ve pülp elektrokimyası açısından

incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Yapılan flotasyon deneylerinde, kuru ve yaş öğütme numunelerinin flotasyon performanslarının farklı şartlar altında iken iyileştiği görülmüştür. Her bir numune için optimum flotasyon şartları belirlenmiştir. Farklı öğütme ortamları ve kimyasal koşullar sebebiyle numunelerin flotasyon davranımları etkilenmekte ve performansları üzerinde farklılıklar gözlenmektedir. Yaş öğütme numunesi, yüksek bastırıcı ve toplayıcı miktarı kullanımında daha iyi flotasyon performansı göstermiştir. Kuru öğütme numuneleri ile yapılan deneylerde ise bastırıcı ve toplayıcı miktarındaki artışın flotasyon verimini arttırması beklenirken, aynı verim değerinde kurşun konsantresindeki çinko kazanımında artış görülmüştür. Reaktif dozajının artışı galenit ve sfaleritin seçimliliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle kuru ve yaş öğütme numunelerinin flotasyon deneyleri farklı reaktif dozajları kullanımında gerçekleştirilmiştir.
- Öğütme mekanizmaları tane şeklini belirlemede en önemli etkidir. Literatürde yer alan farklı çalışmalarda öğütme mekanizmalarından kaynaklı oluşan tane şekilleri ile ilgili çelişkili bulgular bulunmaktadır. Tane şeklinin mineralin yapısından, deneyin koşuluna kadar birçok faktörden etkilenmesi ve tane şekil ölçme yöntemleri arasında farklılıklar bulunması sebebiyle net sonuçlar elde edilememektedir. Galenit-sfalerit cevherinin tane şekil analizi aracılığıyla incelenmesi sonucunda yuvarlaklık ve pürüzlülük parametrelerinde küçük çaplı farklılıklar bulunmuştur. Ek olarak cevherin yüzeysel farklılıkları SEM mikroskobu ile fraksiyonel olarak incelenmiş ve her bir fraksiyon için elde edilen farklı büyütme sonuçlarında elde edilen görüntüler karşılaştırılmıştır. İncelenen kuru ve yaş öğütme numunelerinin, yüzey pürüzlülüğünde ve şekillerinde görsel olarak belirgin farklar bulunamamıştır.
- Farklı kırılma mekanizmalarının numunelerin tane boyut dağılımında fark yarattığına literatürde değinilmiştir. Yapılan Malvern analizi sonuçlarına göre 50µm boyutundaki cevherde yaş öğütme sonucu oluşan ince tane miktarının, kuru öğütmeye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kuru öğütme numunelerinde ise yüksek basınçla öğütme sonucu daha fazla ince tane açığa çıktığı görülmektedir. 20µm'ye inildiğinde ise farklı öğütme mekanizmalarının tane boyu dağılımı üzerinde fark yaratmadığı görülmektedir. Bu tez

çalışmasında, öğütme mekanizmalarının tane boyu dağılımı üzerinde etkisi bulunmamaktadır. Dolayısıyla numunelerin flotasyon performansında fark yarattığı düşünülmemektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda basınçlı kırılım mekanizmalarının flotasyon performansındaki iyileşme, geleneksel öğütme mekanizmalarına kıyasla sağladığı daha dik tane boyu dağılımına atfedilse de bu çalışmada yer alan cevher ve koşullar için seçimli serbestleşme ve pülp elektrokimyası gibi faktörlerin daha etkili olduğu düşünülmektedir.

- Yapılan flotasyon testleri sonucunda, kuru öğütmenin yaş öğütmeye kıyasla galenit-sfalerit cevherinin flotasyon performansını daha olumlu yönde etkilediği saptanmıştır. Öğütme ortamı sülfürlü minerallerin flotasyonu üzerinde büyük etkiye sahiptir. Pülp içerisinde minerallerin tane yüzeyleri ve ayrıca tane yüzeyleri ile öğütme ortamı arasında gerçekleşen galvanik etkileşim galenit-sfalerit cevherinin flotasyonunu etkilemektedir. Çelik değirmende yaş öğütme sonucunda minerallerin yüzebilirliklerinde azalma olmaktadır. Minerallerin çelik değirmende öğütülme sonrası bastırılması muhtemelen oluşan demir hidroksitin mineral yüzeylerini seçimsiz bir şekilde kaplamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle çinko ve kurşun arasındaki seçimlilik yüksektir. Diğer taraftan dik değirmende kuru öğütülen numuneler galvanik etkileşimin yarattığı kimyasal etkilerden uzaktır. Bu nedenle minerallerin flotasyon verimleri yüksektir ancak kurşun ve çinko arasındaki seçimlilik çok azdır.

- Bulgular aynı cevherin farklı mekanizmalarla öğütülmesi sonucunda sistemin pülp kimyası üzerinde önemli etkiler yarattığını açıkça göstermektedir. Eh, pülpdeki oksijen miktarı arttıkça ve pülp içerisindeki demir miktarı azaldıkça daha yükseltgen değerlere doğru gitmektedir. Eh değerlerindeki bu değişim galenit-sfalerit cevherinin flotasyon performansını olumlu yönde etkilemektedir. Kuru öğütmede oluşan yükseltgen ortam sebebiyle sfalerit mineralinin yüzebilirliği artmaktadır. Sfalerit çelik değirmende öğütüldüğü zaman ise kurşun konsantrisinde kazanılan sfalerit miktarında azalma gözlenmiştir. Çelik değirmende yapılan öğütme sonrasında azalan oksijen miktarı indirgen bir ortam oluşturarak ksantatın oksitlenmesini ve sfalerit mineralinin yüzeyine soğurumunu engeller. Aynı zamanda mineral taneleri oksitli yüzeyle kaplanırlar. Bu koşullar altında öğütülen sülfürlü minerallerin kendiliğinden oluşan yüzebilirlikleri ortadan kaybolur ve ksantat varlığında verimleri düşük olur.

- Farklı öğütme mekanizmaları ile öğütülen numunelerin serbestleşme oranlarının birbirinden farklı olduğu ve bu nedenle flotasyon performansları üzerinde fark yarattığı düşünülmektedir. Kuru öğütme numunelerine serbestleşme analizi yapılamadığı için sayısal olarak karşılaştırmalı serbestleşme sonuçları bulunmamaktadır. Ancak farklı tane boyutları ile yapılan deneyler sonuçları ve literatür bilgilerine dayanarak dik değirmen gibi basınçlı kırılım mekanizmalarının tane kırılımını faz sınırından gerçekleştirmesi sebebiyle daha yüksek ve seçimli serbestleşme sağladığı söylenebilmektedir. Kuru öğütme ortamının sağladığı yükseltgen ortam ve seçimli serbestleşme etkisinin bir arada flotasyon verimini arttırdığı düşünülmektedir.

- Dik değirmende kuru öğütülen galenit-sfalerit cevherinin, yaş öğütmeye kıyasla avantajlarının olduğu gösterilmiştir. Dik değirmenlerdeki kuru öğütme prosesinde yeni serbestleşmiş mineral yüzeyleri su, pH veya Eh gibi kimyasal reaksiyonlardan etkilenmemekte hem de sağladığı seçimli kırılım sayesinde flotasyon verimini olumlu yönde etkilemektedir. Öğütme esnasında oluşan yükseltgen ortam sebebiyle galenit-sfalerit minerallerinin yüzebilirliği artmaktadır.

## 5.2 Öneriler

- Bu tez çalışmasında kullanılan kuru öğütme numunelerinin QEMSCAM ve CLEMEX Görüntü Analiz Cihazı ile analizlerinin yapılması, öğütme mekanizma etkisinin serbestleşme üzerinde yarattığı etkiyi görsel ve sayısal olarak karşılaştırabilmek adına gereklidir.

- Numuneler çubuklu değirmen haricinde bilyalı ve karıştırmalı değirmen ile yaş öğütülerek dik değirmen ürünü ile flotasyon performansları kıyaslanabilir. Bu şekilde hipotez daha yoğun ve kapsamlı bir şekilde incelenebilir.

- Kapalı devre flotasyon testleri ile kurşun ve çinko temizleme devreleri yapılarak, flotasyon performansındaki olası artışın görülmesinin yarar sağlayabileceği düşünülmektedir.

- Kuru öğütme sonrası canlanan sfaleritin, flotasyon aşamasında başarılı bir şekilde bastırılmasını sağlayabilecek reaktif mevcut değildir. Özellikle galenit flotasyonu aşamasında sfaleriti bastırabilecek reaktif araştırılması ve geliştirilmesi, galenit-sfalerit minerallerinin seçimli ayırımının daha verimli şekilde gerçekleştirilmesini sağlayabilir.
- Kuru öğütülmüş cevherler, yaş öğütme flotasyon deney koşulları ile paralel gerçekleştirilebilmesi için tüm deneylerde reaktifler ile uzun süre koşullandırılmıştır. Öğütülmüş numunenin flotasyon hücresine alındıktan hemen sonra flotasyonunun gerçekleştirilmesi sonucunda flotasyon performansındaki değişimin görülmesi sonraki araştırmalar açısından yararlı olabilir.
- Kuru öğütme ve yaş öğütme sonrasında mineralin elektrokimyasal davranımında oluşan farklılıklardan dolayı, farklı koşullarda öğütülen numunelerin optimum flotasyon koşulları aynı değildir. Bu noktadan hareketle sadece flotasyon devresinde gerçekleştirilen değişikliklerle sınırlandırılmayıp, kuru öğütülen numuneler için farklı bir akım şeması geliştirilmesi flotasyon performansının artırılması açısından büyük yarar sağlayabilir.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Ahmed S.M., 1978. Electrochemical Studies of Sulphides I. The Electrocatalytic Activity of Galena, Pyrite and Cobalt Sulphide for Oxygen Reduction in Relation to Xanthate Adsorption and Flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 5, 163-174.
- Allison, S.A., Gold, L.A., Nicol, M.J., Granville, A., A., 1972. Determination of the products of reaction between various sulphide minerals and aqueous xanthate solution, and a correlation of the products with electrode rest potentials, *Metali. Trans.*, 3, 2613-2618.
- Allison, S.A., 1982. Interactions between sulphide minerals and metal ions in activation, Deactivation and Depression of Mixed Sulphide Ores, MINrEK, Rep No M29..
- Bandini, P., Prestidge, C.A., Ralston, J., 2001. Colloidal iron oxide slime coatings and galena particle flotation. *Minerals Engineering*, 14, 487-497.
- Basilio, C.I., Kartio, I.J., Yoon, R.H., 1996. Lead activation of sphalerite during galena flotation, *Miner. Eng.* 9, 869–879.
- Bogdanov, O.S., Podnek, A.K., Semenova, E.A., 1965. Issledovanie flotacii raznovidnostiei sfalerita (Flotation study of different sphalerite forms), *Trudy Inst. Mechanobr*, Vypusk, 135.
- Bond, F.C., 1964. Metal wear in crushing and grinding, *Chemical Engineering Progress*, 60 (2), 90-93.
- Bond, F.C., 1951. Third theory of comminution, *Trans. AIME*, 193, 484.
- Bradford, L. 1913. Australian Patent 8,123.
- Buckley, A., Woods, R., 1982. Investigation of the surface oxidation of sulfide minerals via ESCA and electrochemical techniques, In: Yasar, B., Spottiswood, D.J. (Ed.), *Interfacial Phenomena in Mineral Processing*, Proceedings of the Engineering Foundation Conference, 3-17.
- Buckley, A N, Woods, R, Wouterlood, H J, 1988. Surface characterisation of natural sphalerite underprocessing conditions by X-Ray photoelectronspectroscopy, *Electrochem in Mineral and Metal Processing I*, Richardson, P. E. And Woods, R, (Ed.), Proc 88-21, The Electrochem Soc, USA, 211-233.
- Buckley, A.N., Woods, R., 1997. Chemisorption the thermodynamically favoured process in the interaction of thiol collectors with sulphide minerals, *International Journal of Mineral Processing* 51, 15-26.
- Buckley, A. N., Hope, G A, Woods, R, 2003. Metals from sulfide minerals: The role of adsorption of organic reagents in processingtechnologies, in *Solid-Liquid Interfaces*

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Macroscopic Phenomena-Microscopic Understanding, K. Wandelt and S. Thurgate (Ed.), Topics in Applied Physics, 85, 61-96.
- Bulatovic, S., Wyslouzil, D. M., 1982. Process development for complex copper-lead-zinc ores, Laboratory and Pilot Plant Studies, Proc. XNth IMPC (4),3.1-3.28,
- Bulatovic, S., Wyslouzil, D. M., 1984. Selection of reagent scheme to treat massive sulphide ores, complex sulphides, 101-137, Eds, Zunkel, A. D. et al, The Met Soc. of AIME.
- Bulatovic, S., Wyslouzil, D.M., 1985. Selection of reagent scheme to treat massive sulphide ores, Complex Sulphides, Processing of Ores, Concentrates and By-Products (Ed. By A.D. Zunkel, R.S. Boorman, A.E. Morris and R.J. Wesely), Metallurgical Society, 101-141.
- Buswell, A.M., Nicol, M.J., 2002. Some aspects of the electrochemistry of the flotation of pyrrhotite. Journal of Applied Electrochemistry, (32) 1321–1329.
- Carlson, C., Muir, W., 1976. The role of oxygen demand in the plot of a complex sulphide ore, World Mining and Metal Tech, Ed, Weiss, A, AIME, 2: 464-477.
- Cases, J.M., de Donato, P., Kongolo, M., Michot, L., 1989. The influence of grinding media on the adsorption and abstraction of potassium amyl xanthate on finely ground galena and pyrite, SME Preprint, SME, Littleton Colorado, 89-62.
- Chander, S., 2003. A brief review of pulp potentials in sulfide flotation, International Journal of Mineral Processing, 72 (1-4): 141-150.
- Chapman, N. A., Shackleton, N. J., Malysiak, V., O'Connor, C. T., 2013. Comparative study of the use of HPGR and conventional wet and dry grinding methods on the flotation of base metal sulphides and PGMs, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 113, 407-413.
- Cheng, X., Iwasaki, I., 1992. Effect of chalcopyrite and pyrrhotite interaction on flotation separation, Miner. Metall. Process. 9 (2), 73-79.
- Clarke, A.J., Wills, B.A., 1989. Enhancement of cassiterite liberation by high pressure roller comminution. Minerals Engineering, 2(2), 259-262.
- Crosbie, R, Robertson, C, Smit, I, Ser, V, 2005. The benefits of inter-particle comminution on flotation, in Proceedings Centenary of Flotation Symposium, pp 823-828 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Dávila-Pulido, G.I., Uribe-Salas, A., Espinosa-Gómez, R., 2011. Comparison of the depressant action of sulfite and metabisulfite for Cu-activated sphalerite, *International Journal of Mineral Processing* 101,71-74.
- Draskic, D., Gifing, M., Pavlica, J., 1981. Cyanide depression of naturally floating sphalerite in the presence of ferrous ions, *Complex Sulphide Ores*, Jones, M. H. (Ed.), IMM. 113-117.
- Ek. CS. 1985. Selective flotation of different complex pyritic ores. In *Complex Sulfides*, Zunkel A.D. and others (Eds.), TMS-AIME, Warrendale, 83-101.
- Ekmekçi, Z., Buswell, M.A., Bradshaw, D.J., and Harris, P.J., 2005. The value and limitations of electrochemical measurements in flotation of precious metal ores. *Minerals Engineering*, (18),. 825–831.
- Elgillani, D. A., Fuerstenau, M. C., 1968. Mechanism involved in cyanide depression of pyrite, *Trans SME/AIME*, 241, 437-445.
- Fahlstrom, P.H., 1974. *CIM Bulletin*, 78, 127.
- Fandrich, R.G., Bearman, R.A., Boland, J., Lim, W., 1997. Mineral liberation by particle bed breakage, *Minerals Engineering*, 10, 175-187
- Fee, B.S., Klimpel, R.R., 1986. pH regulators, in *Chemical Reagents in the Minerals Industry*, D. Malhotra and W.F. Riggs (Eds), SME Inc., Littleton, 119.
- Feng, D., Aldrich, C., 2000. A comparison of the flotation of ore from the Merensky Reef after wet and dry grinding, *International Journal of Mineral Processing*, 60 (2), 115-129.
- Fidan, B., Arol, 1990.A.İ, Küre Cevherinin Ögütme Özellikleri, *Madencilik Dergisi*, XXX (3), 5-9,
- Finkelstein, N. P., Allison, S. A., 1976. The chemistry of activation, deactivation and depression in the flotation of zinc sulphide: a review, In *Flotation: A.M. Gaudin Memorial Volume*, Fuerstenau, M.C., AIME, 414 (1), 57.
- Fornasiero, D., L., F., Ralston, J., 1993. Oxidation of Galena: II Electrokinetic Study, *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Forssberg, E., Hongxin, Z. 1985 Shape and surface properties of the particles librated by autogenous grinding. *Scand. J. Metallurgy*, 14, 1, 25-32

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Forsberg, E., Subrahmanyam, T.V., 1993. Grinding, pulp chemistry and particle floatability. Proceedings of the XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Vol. 1. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, 1–6.
- Forsberg, E., Zhai, H., 1985. Shape and surface properties of particles liberated by autogenous grinding, *Scand. J. Metallurgy*, 1, 14, 25-32.
- Fuerstenau, D. W., Gaudin, A.M., Miaw, H.L., 1958. Iron oxide slime coatings in flotation. *Min.Eng.*, 211, 792-795.
- Fuerstenau, M.C, Kuhn, M.C., Elgillani, D.A., 1968. The role of dixanthogen in xanthate flotation of pyrite, *AIME Trans.*, 217: 119-123.
- Fuerstenau, M.C., Clifford, K.L., Kuhn, M.C., 1974. The role of zinc-xanthate precipitation in sphalerite flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 1 (4), 307-318.
- Fuerstenau, M.C., 1982. Sulphide mineral flotation, *Principles of Flotation*, R.P. King (Ed.). South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg (South Africa), 159-182.
- Fuerstenau, M.C., Miller, J.D., Kuhn, M.C., 1985. Chapter 5 in *Chemistry of Flotation*, American Institute of Mining, Metallurgical & Petroleum Engineers, New York.
- Gao, M. W., Forsberg, E., 1993. A study on the effect of parameters in stirred ball milling, *International Journal of Mineral Processing*, 37, 45-59.
- Gaudin, A. M. 1926. An investigation of crushing phenomena. *Trans. AIME*, 73, 253–317.
- Gaudin, A.M., 1957. *Flotation*. McGraw-Hill, London, 254.
- Gaudin, A. M., Groh, J. O., Henderson, H. B., 1931. Effect of particle size on flotation, *AIME Technical Publications*, 414, 3-23.
- Gaudin, A M, Fuerstenau, D W, Mao, G. W., 1959. Activation and deactivation studies with copper on sphalerite, *Mining Engineering*, 214, 431-436.
- Girczys, J., Laskowski, 1972. Mechanism of flotation of unactivated sphalerite with xanthates, *Trans. Inst. Min. Metall.*, 81, 118.
- Glembotskii, V. A., Klassen, V. I., Plaskin, I. N., 1972. *Flotation*, Rabinovich, H.S (Eds.), translated, Hammond, R.E., Primary sources, Newyork.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Göktepe, F., 2001, Effect of pH on Pulp Potential and Sulphide Mineral Flotation, Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, 26, 309-318.
- Gottschalk, Y.H., Buchler, H.A., 1910. Oxidation of sulphides, Econ. Geol., 5, 28.
- Gottschalk, Y.H., Buchler, H.A., 1912. Oxidation of sulphides, Econ. Geol., 7, 15.
- Graham, R., Heathcote, C.R., 1982. The effect of the oxidation state of the pulp on the selective flotation of chalcopyrite from Black Mountain ore, Proceedings 12th CMMI Congress By Glen, H.W.(Ed.), The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 867-877.
- Grano S.R., Wong, P., Skinner, W., Johnson, N.W., Ralston, J., 1994. The effect of autogenous and ball mill grinding on the chemical environment and flotation of the copper ore of Mount Isa Mines Limited, In III Latin American Congress on Froth Flotation (University of Concepcion Publ.), Concepcion, Chile, 351-388,
- Grano, S., 2004. Private Communication, Ian Wark Institute. Uni.S. Aus., Adelaide, Australia.
- Grano, S.R., Ralston, J., Smart, R. St. C., 1990. Influence of electrochemical environment on the flotation behaviour of Mt. Isa copper and lead-zinc ore, International Journal of Mineral Processing, 30,1-2, 69-97.
- Greet, C.J., 2008. The significance of grinding environment on the flotation of UG2 ores. Third International Platinum Conference 'Platinum in Transformation', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Guy, P.J., Trahar, W.J., 1985. The effects of oxidation and mineral interaction on sulphide flotation, Flotation of Sulphide Minerals, K.S.E. Forssberg (Ed), Elsevier, Amsterdam, 91.
- Hall, C. I., Johnson, N. W., Quast, K. B., 1990. The interaction of ethyl xanthate and cyanide in the lead roughing of Mt. Isa ore, Proc. AusIMM, 2:39-43.
- He, F., Song, L., Sun, C., 2010. Effect of grinding media on the flotation of sulfide minerals, XXV International Mineral Processing Congress (IMPC) Proceedings, Brisbane, Qld, Australia.
- Heyes, G.W., Trahar, W.J., 1977. The natural flotability of of chalcopyrite, International Journal of Mineral Processing, 4, 317-344.
- Heywood, H. 1961. Powders in industry, Soc. Chem. Ind., 25-26.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Hoberg, H., Loesche, T., Schneider, F.U., 1985. Investigations on the floatability of sulfides after dry grinding, *Aufbereitungs-Technik* 4, 171-182.
- Houot, R., Duhamet, D., 1990. Importance of oxygenation of pulps in the flotation of sulphide ores, *International Journal of Mineral Processing*, 29, 77-87.
- Houot, R., Ravenau, P., 1992. Activation of sphalerite flotation in the presence of lead ions. *Int. J. Miner. Process.*, 35, 253.
- Hu, Y., Sun, W., Wang, D., 2010. Electrochemistry of Flotation of Sulphide Minerals, 244-268.
- Huh, C, Mason S.G., 1974. *Journal of Colloids and Interface Science*, 47, 271.
- Iwasaki, I., Cooke, S.R.B., Harraway, D.H., Choi, H.S., 1962. Iron wash ore slimes - some mineralogical and flotation characteristics, *Trans. Soc. Min.Engrs. AIME*, 223, 97-108.
- Iwasaki, I., Reid, K.J., Lex, H.A., Smith, K.A., 1983. Effect of autogenous and ball mill grinding on sulfide flotation, *Mining Engineering* 35 (8), 1184-1190.
- Janetski, N. D., Woodbum, S. I., Woods, R., 1977. An electrochemical investigation of pyrite flotation and depression, *International Journal of Mineral Processing*, 227-239.
- Jankovic, A., 2003. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills, *Minerals Engineering*, 16, 337-345.
- Johnson N.W., Munro P.D., 1988. Eh-pH measurements for problem solving in a zinc reverse flotation process, *The Aus IMM Bulletin and Proceedings*, 293, 3, 53-58.
- Jones, M.H., Woodcock, J.T. (eds), 1984. *Principles of Mineral Flotation*, Australas. Inst. Min. Metall., Victoria.
- Jowett, A., 1979. Formation and disruption of particle-bubble aggregates in flotation, In: Somarsundaran, P. (Ed.), *Fine Particle Processing*, 722.
- King, R.P., 1982. *Principles of Flotation*, in: King, R.P(Ed.), *South African Institute of Mining and Metallurgy*, 215-225.
- Klimpel, R.R., 1997. Flotation kinetic studies going from laboratory to the plant, *Proceedings-29th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Ottawa, Ontario, Canada, 352-365.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Kocabağ, D., Smith, M., 1985. The effect of grinding media and galvanic interactions upon the flotation of sulphide minerals, *Complex Sulphides AD. Zunkel vd. (Edts.), The Metallurgical Society*, 55-82.
- Koleini, S.M.J., Abdollahy, M., Soltani, F., 2012. Wet and dry grinding methods effect on the flotation of Taknar Cu-Zn sulphide ore using a mixed collector, *XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC) 2012 Proceedings, New Delhi, India*, 5113-5119.
- Labonte, G., Finch, I. A., 1988. Measurement of electrochemical potential in flotation systems. *CIM Bulletin*, 81(920): 78 - 83
- Laskowski, J.S., Liu, Q., Zhan, Y., 1997. Sphalerite activation: flotation and electrokinetic studies, *Minerals Engineering* 10 (8), 787-802.
- Learmont, M.E., Iwasaki, I., 1984. Effect of grinding media on galena flotation, *Minerals and Metallurgical Processing*, 136.
- Leppinen, J.O., Hintikka, V.V., Kalapudas, R.P., 1998. Effect of electrochemical control on selective flotation of copper and zinc from complex ores, *Minerals Engineering*, 11(1), 39-51.
- Luo, X., Feng, B., Wong, C., Miao J., Ma, B., Zhou H., 2016. The critical importance of pulp concentration on the flotation of galena from a low grade lead-zinc ore *Journal of Materials Research and Technology*, 5,(2), 131-135
- Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V., Thorne, C.G., 1981. *Mineral and coal flotation circuits, Their Simulation and Control*. Elsevier, Amsterdam, 350.
- Markovic, Z.S., Milosavljevic, S., 2002. Effect of the particle size and mineralogy on flotation recovery at copper ore flotation, *Proceedings of the V International Conference, Metallurgy, Refractories and Environment, Cerovo*.
- Majima, H., 1969. How oxidation effects selective flotation of complex sulphide ores, *Can. Met. Quart.*, 8 (3), 269.
- Martin, C.J., McIvor, R.E., Finch, J.A., Rao, S.R., 1992. Review of the effect of grinding media on flotation of sulfide minerals, *Minerals Engineering* 4(2), 121-132.
- Matthews, E., 2002. Control of iron hydroxide slime coatings in galena and sphalerite mineral systems, *Master of Applied Science Thesis, University of South Australia*.
- Morris T.M., 1952. Measurement of equilibrium forces between an air bubble and an attached solid, *Water Trans. AIME*, 187, 91-95.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Morsky, P., Klemetti, M., Knuutinen, T., 1995. A comparison of high pressure roller mill and conventional grinding. Proceedings of XIX IMPC, Vol. 1, SME Inc., Littleton, 55-58.
- Mukherjee, A.D., Sen, P.K., 1976. Floatability of sphalerite in relation to its iron content. J. Mines Metals Fuels, 327.
- Norgate, T., Jahanshahi, S., 2011. Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be?, Minerals Engineering, 24, 1563-1570.
- Ocepek, D., Strazisar, J., Kanduti-Sumej, B., 1990. Comminution and surface properties of minerals. In: Schonert, K. (Ed.), 7th European Symposium Comminution: Clausthal, Zellerfeld. BRD, 273–282.
- Oja, M., Tunnilla, R. 2000. The influence of comminution method to particle shape. Proc. XXI Int. Mineral Processing Congress, Rome, Italy, C4, 63–70.
- Orumwense O A, Forssberg E., 1991. Surface and structural changes in wet ground minerals, Powder Technology, 68, 23-29.
- Owens, T. M., Reynolds, C., Nixon, J. C., 1952. Differential flotation of copper, lead, zinc and iron sulphides at Lake George Mines Pty Ltd, Captains Flat, New South Wales, Proc Australias Inst Min Met 166-167, 99-112.
- Palm, N. A., Shackleton, N. J., Malysiak, V., O'Connor, C. T., 2010. The effect of using different comminution procedures on the flotation of sphalerite, Minerals Engineering, 23, 1053-1057.
- Pattison I.G., 1981. The action of sodium sulphite as a depressant in sulfide mineral flotation systems containing chalcopyrite, galena, pyrite and sphalerite. University of Melbourne.
- Pease, J.D., Curry, D.C., Barns, K.E., Young, M.F., Rule, C., 2006. Transforming flowsheet design with inert grinding the IsaMill, 38th Annual Canadian Mineral Processors Conference, Ottawa, Canada.
- Pecina-Trevino, E.T., Uribe-Salas, A., Nava-Alonso, F., 2003. Effect of dissolved oxygen and galvanic contact on the floatability of galena and pyrite with Aerophine 3418A. Miner. Eng. 16, 359–367.
- Peng, Y., Grano, S., Ralston, J., Fornasiero, D., 2003. Control of grinding conditions in the flotation of galena and its separation from pyrite, International Journal of Mineral Processing, 70, 67-82.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Petruk, W., Hughson, M.R., 1977. Image analysis evaluation of the effect of grinding media on selective flotation of two zinc-lead-copper ores. *CIM Bulletin* 70 (782), 128-135.
- Petruk, W., 1986. The MP-SEM-IPS image analysis system. CANMET Report 87-IE (CANMET, Dept Energy, Mines and Resources, Canada), Ottawa.
- Petruk, W., 1988. Automatic image analysis for mineral beneficiation, *J. Metals*, 40,29-31.
- Petruk, W., 1989. Short course on image analysis applied to mineralogy and earth sciences, Mineralogical Ass. Canada: Ottawa.
- Piantadosi, C., Smart, R.S.C., 2002. Statistical comparison of hydrophobic and hydrophilic species on galena and pyrite particles in flotation concentrates and tails from TOF-SIMS evidence, *International Journal of Mineral Processing*, 64, 43-54.
- Popov, S. R., Vucinir, D. R., Calic, N. M., 1988. Effect of the depressing agents  $\text{FeSO}_4$  and  $\text{NaCN}$  on the surface properties of galena in the flotation system, *International Journal of Mineral Processing*, 24, 111-123.
- Popov, S.R., Vucinic, D.R., Kacanik, D.R., 1989, Floatability and adsorption of ethyl xanthate on sphalerite in an alkaline medium in the presence of dissolved lead ions, *International Journal of Mineral Processing*, 27, 205-219.
- Ralston, J., 1991. Eh and its consequences in sulphide mineral flotation, *Minerals Engineering*, 4 (7-11), 859-878.
- Ralston, J., 1994. The chemistry of galena flotation: Principles and practice, *Minerals Engineering*, 7 (5/6), 715-735.
- Ralston, J., Healy, T. W., 1980a, Activation of Zinc Sulfide with  $\text{Cu(II)}$ ,  $\text{Cd(II)}$  and  $\text{Pb(II)}$ : I. Activation in Weakly Acidic Media, *International Journal of Mineral Processing*, 7, 175-201.
- Rao, S.R., Finch, J.A., 1988. Galvanic interaction studies on sulphide minerals, *Can. Metall. Q.*, 27, 253-259.
- Rao, S.R., Moon, K.S., Leja, J., 1976. Effect of grinding media on the surface reactions and flotation of heavy metal sulphides in flotation, M.C. Fuerstenau (Ed.), *AIME New York*, 509-527.
- Rashchi, G.S., Reddy, K, 2002. Sphalerite activation and surface Pb ion concentration. *International Journal of Mineral Processing*, 67, 43-58.
- Rey, M., 1958. Differential flotation of lead-zinc ores, *Trans Int. Min. Dress. Cong*, Stockholm, 525-537.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Rey, M., Formanek, V., 1960. Some factors affecting selectivity in the differential rotation of lead-zinc ores, particularly in the presence of oxidised lead minerals, Proceed. I.M.P. Congr.1960, IMM, London, 343.
- Richardson, P.E., Walker, G.W., 1985. The flotation of chalcocite, bonnite, chalcopyrite and pyrite in an electrochemical cell, Proc. XV Int. Min. Process. Congr., Cannes France, 2, 198-210.
- Rose, H. E., 1961 Particle shape and surface area, Powders in Industry, Soc. Chem. Ind., 130-149.
- Rounala, M., Heimala, S., Jounela, S., 1997. Different aspects of using electrochemical potential measurements in mineral processing, International Journal of Mineral Processing, 51, 97-110.
- Seke, M. D., 2005. The optimization of the selective flotation of galena and sphalerite at Rosh Pinah Mine, Doktora tezi, University of Pretoria, Pretoria, South Africa.
- Seke, M. D., Pistorius, P.C., 2006. Effect of cuprous cyanide, dry and wet millington the selective flotation of galena and sphalerite, Minerals Engineering 19, 1-11.
- Senior, G.D., Trahar, W.J., 1991. The influence of metal hydroxides and collector on the flotation of chalcopyrite. Int. J. Miner. Process., 33: 321-341.
- Shannon, L.K., Trahar, W.J., 1986. The role of collector in sulfide ore flotation. In: Somasundaran, P. (Ed.), Advances in Mineral Processing. SME, Littleton, Colorado, 408-425.
- Shimoiizaka, J., Usui, S., Matsuoka, I., Sasaki, H., 1976. Depression of galena by sulphite and chromate ion, In: Flotation, A.M. Guudin Memorial Volume I, (M.C. Fuerstenau, Ed.) N.Y., AIME, 393-413.
- Shuhua H., 2006. Depression of pyrite in the flotation of copper ores. University of South Australia.
- Spedden H.R., Hannan W.S., Attachment of mineral particles to air bubbles in flotation, Min.Tech., 12, T.P. 2354, 1948.
- Sutherland, K.L., Wark, I.W., 1955. Principles of Flotation, Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Teague, A.J., Van Deventer, J.S.J., Swaminathan, C., 1999. The effect of galvanic interaction on the behavior of free and refractory gold during froth flotation, International Journal of Mineral Processing. 57, 243-263.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Thornton, E., 1973. The effect of grinding media on flotation selectivity, Canadian Mineral Processors Annual General Meeting, 223.
- Trahar, W.J., 1976. The selective flotation of galenite from sphalerite with special reference to the effects of particle size. *Int. J. Miner. Process.* 3 (2), 151–166.
- Trahar, W.J., 1981. A rational interpretation of the role of particle-size in flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 8 (4), 289-327.
- Trahar, W.J., 1984. The influence of pulp potential in sulphide flotation, *Principles of Mineral Flotation*, M.H. Jones and J.T. Woodcock(Eds.), Aus. IMM., 40, 117-135.
- Trahar, W.J., Senior, G.D., Heyes, G.W., Creed, M.D., 1997. The activation of sphalerite by lead: a flotation perspective, *International Journal of Mineral Processing*, 49, 121-148.
- Toka, B., Atalay, 1996., Flotation behavior of galena and pyrite, *Changing Scopes in Mineral Processing: Proceedings of the 6th International Symposium*, Kusadasi, Turkey, 229-234.
- Tolun, R., Kitchener, J.A., 1964. Electrochemical study of galena-xanthate-oxygen flotation system, *Trans. I.M.M.*, (73), 313.
- Toperi, R., Tolun, R., 1969. Electrochemical study and thermo-dynamic equilibria of the galena-xanthate-oxygen flotation system, *Trans I.M.M.*, (78), C191.
- van Drunick, W., Gerold, C., Palm, N., 2010. Implementation of an energy efficient dry grinding technology into an Anglo American zinc beneficiation process, *XXV International Mineral Processing Congress (IMPC) Proceedings*, Brisbane, QLD, Australia, 1333-1341,
- Vaughan, D.J., Patrick, R.A.D., 1995. *Mineral Surfaces*, Chapman & Hall, 335.
- Viljoen, R.M., Smit, J.T., Du Plessis, I., Ser, V., 2001. The development and application of in-bed compression breakage principles. *Minerals Engineering*, 14, 465-471.
- Vizcarra, T.G.; Wightman, E.M.; Johnson N.W.; Manlapig, E.V., 2011. The effect of breakage method on the shape properties of an iron-oxide hosted copper–gold ore. *Minerals Engineering*, 24, 1454-1458.
- Yekeler, M., Ulusoy, U., Hiçyılmaz, C., 2004. Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability, *Powder Technology*, 140 (1), 68-78.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Wang, X.H., Xie, Y., 1990. The effect of grinding media and environment on the surface properties and flotation behaviour of sulphide minerals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 7, 49–79.
- Warren, L.J., 1984. Ultrafine particles in flotation. In: Jones, M.J., Woodcock, J.T. (Eds.), *Principles of Mineral Flotation, The Wark Symposium, Australia. Aus/MM, Victoria, Australia*, 185– 212.
- Wei, Y., Sandenbergh, R. F., 2007. Effects of grinding environment on the flotation of Rosh Pinah complex Pb/Zn ore, *Minerals Engineering*, 20, 264-272.
- Wills, B.A., Atkinson, K., 1993. Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies, *Minerals Engineering.*, 6 (7), 697.
- Woodcock, J.T., Jones, M.H., 1970a. Oxygen concentrations, redox potentials, xanthate residuals, and other parameters in flotation plant pulps, In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Proceedings Ninth Commonwealth Mining and Metallurgical Congress* (Ed. M.J Jones), London, Vol. 3. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 439-468.
- Woodcock, J.T., Jones, M.H., 1970b. Chemical environment in Australian lead–zinc flotation plant pulps: I. pH, redox potentials, and oxygen concentrations. *Proceedings Australasian Institute Mining Metallurgy*, 235, 45-60.
- Woods, R., 1971. The oxidation of ethyl xanthate on platinum, gold, copper and galena electrodes. Relation to the mechanism of mineral Flotation. *J. Phys. Chem.* 75 (3), 354–362.
- Woods, R., 1972. The anodic oxidation of ethylxanthate on metal and galena electrodes. *Aust. J. Chem.*, 25: 2329--2335.
- Woods, R., 1976. Electrochemistry of sulphide flotation, *Flotation, A. M. Gaudin Memorial Volume, 1*, M.C. Fuerstenau (Ed.), 298-333.
- Yekeler, M, Ulusoy, U., Hiçyılmaz, C., 2004. Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability, *Powder Technology* 140 (1), 68-78.
- Yelloji Rao, M.K., Natarajan, K.A., Effect of electrochemical interactions among sulfide minerals and grinding medium on chalcopyrite flotation, *Minerals & Metallurgical Processing* 6 3, 146–151, 1989a.
- Yelloji Rao, M.K., Natarajan, K.A., 1989b. Electrochemical effects of mineral–mineral interactions on the flotation of chalcopyrite and sphalerite, *International Journal of Mineral Processing*, 27, 279-293.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Yelloji Rao, M.K., Natarajan, K.A., 1990. Studies on chalcopyrite ore grinding with respect to ball wear and effect on flotation. *Miner. Metall. Process.* 7, 35–37.
- Yuan, X.M., Pålsson, B.I., Forssberg, K.S.E., 1996a. Flotation of a complex sulfide ore, I. Cu/Zn selectivity control by adjusting pulp potential with different gases, *International Journal of Mineral Processing* 46, 155–179.
- Yuan, X.M., Pålsson, B.I., Forssberg, K.S.E., 1996b. Flotation of a complex sulfide ore, II. Influence of grinding environments on Cu/Zn sulfide selectivity and pulp chemistry. *International Journal of Mineral Processing* 46, 181–204.
- Zheng, J., Harris, C.C., Somasundaran, P., 1986. A study on grinding and energy input in stirred media mills, *Powder Technology*, 86, 171-178.
- Zhang, Q., Xu, Z., Bozkurt, V., Finch, J.A., 1997. Pyrite flotation in the presence of metal ions and sphalerite. *International Journal of Mineral Processing* 52, 187–201.
- Zhong, H., Huang, Z., Zhao, G., Wang, S., Liu, G., Cao, Z., 2015, The collecting performance and interaction mechanism of sodium diisobutyl dithiophosphate in sulfide minerals flotation, *Journal of Materials Research and Technology*(4) 2, 151-161.

## **EK AÇIKLAMALAR**

**Ek Açıklama-A: MLA analiz verileri**

**Ek Açıklama-B: SEM mikroskobu görüntüleri**

## Ek Açıklama-A: MLA analiz verileri

### A.1 Mineral bileşik dağılımları ve serbestleşme verileri

Çizelge A1. RM numunesine ait mineralojik bileşim tablosu

	+ 75 µm	-75+53 µm	-53+38 µm	-38 µm
Mineral	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
Goethite	38,37	39,52	38,03	49,38
Quartz	29,66	27,19	27,72	21,46
Sphalerite	2,46	3,33	3,02	3,46
Dolomite	1,25	1,32	1,63	1,34
Barite	0,19	0,26	0,23	0,38
Spodumene	1,96	2,17	2,44	1,99
Pyrite	2,36	2,64	3,28	3,40
Calcite	0,51	0,61	1,01	0,56
Galena	0,46	0,53	0,51	1,04
Enargite	0,06	0,08	0,09	0,08
Actinolite	1,72	1,53	1,58	1,01
Chalcopyrite	0,02	0,04	0,04	0,06
Psilomelane	0,12	0,08	0,03	0,01
Muscovite	0,35	0,38	0,30	0,61
Native Iron	0,00	0,02	0,01	0,00
Plagioclase	0,01	0,01	0,01	0,00
Diopside	1,27	1,67	2,24	2,48
Ferrosilite	2,35	2,26	2,57	1,37
Gypsum	0,00	0,00	0,00	0,00
Chromite	0,01	0,00	0,00	0,00
Biotite	0,39	0,35	0,32	0,06
Ankerite	0,24	0,13	0,09	0,22
Kaersutite	0,06	0,07	0,04	0,04
Albite	0,01	0,01	0,02	0,01
Chalcophanite	0,28	0,24	0,27	0,27
Fe_Mn_Oxide	0,01	0,04	0,03	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxi	2,28	2,61	2,11	1,55
Fe_Al_Silicate	9,86	9,33	7,91	5,51
Hematite	3,55	3,34	4,22	3,31
Pb_Al_Phosphate	0,14	0,17	0,15	0,28
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00	0,00	0,05
Mn_Silicate	0,02	0,03	0,01	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,01	0,03	0,02	0,06
Fluorite	0,02	0,02	0,03	0,01
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

Çizelge A2. RM numunesine ait mineral bileşik dağılımları tablosu

Mineral	Al (%)	As (%)	Ba (%)	Bi (%)	C (%)	Ca (%)	Cr (%)	Cu (%)	F (%)	Fe (%)	H (%)	K (%)	Li (%)	Mg (%)	Mn (%)	Na (%)	O (%)	P (%)	Pb (%)	S (%)	Si (%)	Ti (%)	Zn (%)
Goethite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	81,64	97,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Quartz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,93	0,00	0,00	0,00	78,30	0,00	0,00
Sphalerite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,31	0,00	0,00	98,78
Dolomite	0,00	0,00	0,00	0,00	65,86	26,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,77	0,00	0,00	1,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Barite	0,00	0,00	89,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	1,35	0,00	0,00	0,00
Spodumene	18,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	2,62	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00
Pyrite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	53,13	0,00	0,00	0,00
Calcite	0,00	0,00	0,00	0,00	28,18	22,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Galena	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,00	2,66	0,00	0,00	0,00
Enargite	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	0,00	0,00	0,00
Actinolite	1,23	0,00	0,00	0,00	0,00	12,30	0,00	0,00	0,00	0,43	0,77	0,00	0,00	14,31	0,63	73,40	1,27	0,00	0,00	0,00	3,33	30,53	0,00
Chalcopyrite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,57	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00	10,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	12,13	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Muscovite	4,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,57	0,00	0,37	53,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00
Native_Iron	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Plagioclase	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,58	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Diopside	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,04	0,00	0,00	1,73	0,00	0,00	0,00	2,67	0,00	0,00
Ferrosilite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,78	0,00	0,00	0,00	22,73	0,00	0,00	2,18	0,00	0,00	0,00	3,36	0,00	0,00
Gypsum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biotite	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,12	0,07	0,31	46,06	0,00	4,71	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00
Ankerite	0,00	0,00	0,00	0,00	5,95	2,43	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,45	1,22	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kaersutite	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,75	0,00	14,94	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	69,47	0,00
Albite	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,61	0,00	0,00	0,00	14,14	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	3,37	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,74	0,00	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00	0,00	22,24	67,45	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe_Al_Silicate	72,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,89	0,00	0,00	0,00	7,24	0,00	0,00
Hematite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pb_Al_Phosphate	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	100,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	2,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31
Fluorite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09	0,00	0,00	51,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Çizelge A3. RM numunesine ait mineral fraksiyonel bağlılık tablosu (-75 µm, -75 +53 µm)

+ 75 µm

Sphalerite Weight % locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	15,74	7,16
Quartz	7,97	6,07
Dolomite	0,00	0,01
Barite	0,00	0,00
Spodumene	1,93	1,83
Pyrite	10,47	3,15
Calcite	0,00	0,00
Galena	4,38	1,39
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,47	1,52
Chalcopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,16	0,07
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,05	0,05
Ferrosilite	0,71	1,01
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	1,10	0,24
Ankerite	0,00	0,00
Kaersulite	0,00	0,01
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,07
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	1,03	1,25
Fe_Al_Silicate	2,76	5,74
Hematite	0,21	0,54
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,12
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00
Fluorite	0,00	0,00

-75+53 µm

Galena Weight % locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	14,14	17,13
Quartz	2,69	2,88
Sphalerite	10,40	5,96
Dolomite	0,00	0,00
Barite	0,09	0,00
Spodumene	0,90	1,55
Pyrite	16,18	9,60
Calcite	0,00	0,00
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,06	0,02
Chalcopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,03	0,02
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,00	0,01
Ferrosilite	0,17	0,36
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,18	0,06
Ankerite	0,00	0,06
Kaersulite	0,00	0,01
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,01	0,00
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,09	0,23
Fe_Al_Silicate	2,58	6,25
Hematite	0,00	0,33
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,00
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00
Fluorite	0,00	0,00

Sphalerite Weight% locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	10,20	4,89
Quartz	4,04	3,96
Dolomite	0,13	0,00
Barite	0,00	0,00
Spodumene	1,51	1,31
Pyrite	7,29	3,28
Calcite	0,00	0,00
Galena	2,76	2,10
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,14	0,64
Chalcopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,41	0,06
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,05	0,00
Ferrosilite	0,39	0,57
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,73	0,51
Ankerite	0,02	0,01
Kaersulite	0,38	0,01
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,26
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,82	0,56
Fe_Al_Silicate	2,58	3,34
Hematite	0,45	0,25
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,05
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,01
Fluorite	0,00	0,01

Galena Weight% locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	9,55	10,11
Quartz	3,41	1,68
Sphalerite	8,04	11,89
Dolomite	0,42	0,01
Barite	0,00	0,00
Spodumene	2,26	0,68
Pyrite	9,20	11,63
Calcite	0,00	0,00
Enargite	0,39	0,00
Actinolite	0,01	0,10
Chalcopyrite	0,03	0,00
Psilomelane	0,00	0,01
Muscovite	0,00	0,00
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,00	0,04
Ferrosilite	0,02	0,20
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,23	0,19
Ankerite	0,00	0,00
Kaersulite	0,00	0,23
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,00
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,03	0,08
Fe_Al_Silicate	0,35	0,92
Hematite	0,00	0,88
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,02
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,02
Fluorite	0,00	0,00

Çizelge A4. RM numunesine ait mineral fraksiyonel bağlılık tablosu (-75 µm, -75 +53 µm)

-53+38 µm

Sphalerite Weight % locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	8,41	4,39
Quartz	5,92	3,37
Dolomite	0,18	0,09
Barite	0,00	0,00
Spodumene	1,89	0,60
Pyrite	5,38	1,85
Calcite	0,00	0,01
Galena	2,32	1,98
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,12	0,55
Chalcocopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,11	0,03
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,01	0,02
Ferrosilite	0,27	0,55
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,06	0,13
Ankerite	0,01	0,01
Kaersutite	0,00	0,00
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,09
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,37	0,23
Fe_Al_Silicate	1,63	2,43
Hematite	0,68	0,96
Pb_Al_Phosphate	0,14	0,04
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00
Fluorite	0,00	0,00

Galena Weight% locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	10,07	11,42
Quartz	3,42	1,59
Sphalerite	5,56	8,55
Dolomite	0,00	0,00
Barite	0,00	0,00
Spodumene	0,00	3,18
Pyrite	8,48	5,96
Calcite	0,00	0,00
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,00	0,04
Chalcocopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,00	0,01
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,00	0,00
Ferrosilite	0,00	0,21
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,00	0,09
Ankerite	0,00	0,00
Kaersutite	0,00	0,06
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,00
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,46	0,00
Fe_Al_Silicate	1,91	2,00
Hematite	0,00	0,58
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,24
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00
Fluorite	0,00	0,00

-38 µm

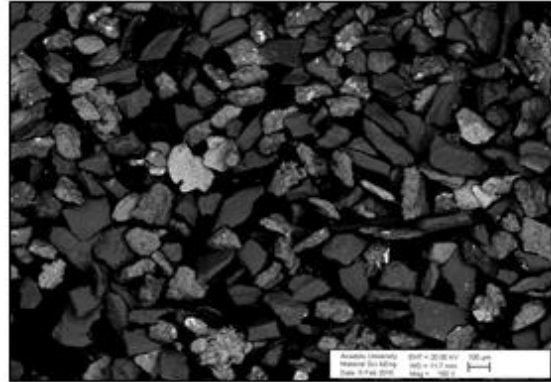
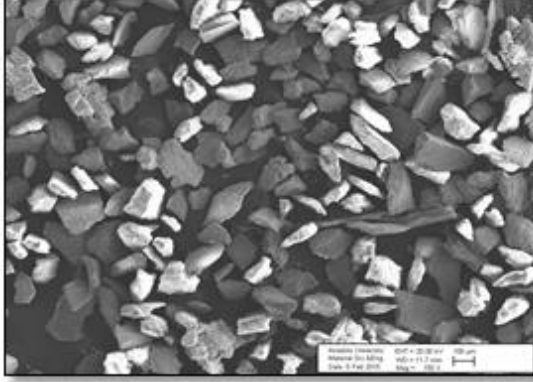
Sphalerite Weight% locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	5,99	1,22
Quartz	1,17	0,84
Dolomite	0,00	0,03
Barite	0,00	0,00
Spodumene	0,16	0,11
Pyrite	1,93	0,36
Calcite	0,00	0,00
Galena	0,09	0,06
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,04	0,06
Chalcocopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,01	0,05
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,24	0,01
Ferrosilite	0,03	0,27
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,00	0,03
Ankerite	0,02	0,00
Kaersutite	0,00	0,01
Albite	0,00	0,02
Chalcophanite	0,45	0,07
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,03	0,03
Fe_Al_Silicate	0,56	0,75
Hematite	0,23	0,30
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,00
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00
Fluorite	0,00	0,00

Galena Weight% locked in...	Binary Particle (%)	Ternary+ Particle (%)
Goethite	3,95	1,92
Quartz	0,55	3,92
Sphalerite	1,30	0,16
Dolomite	0,00	0,02
Barite	0,00	0,16
Spodumene	0,02	0,00
Pyrite	0,00	4,69
Calcite	0,00	0,00
Enargite	0,00	0,00
Actinolite	0,28	0,05
Chalcocopyrite	0,00	0,00
Psilomelane	0,00	0,00
Muscovite	0,00	0,00
Native_Iron	0,00	0,00
Plagioclase	0,00	0,00
Diopside	0,00	0,15
Ferrosilite	0,00	0,01
Gypsum	0,00	0,00
Chromite	0,00	0,00
Biotite	0,00	0,00
Ankerite	0,00	0,00
Kaersutite	0,00	0,00
Albite	0,00	0,00
Chalcophanite	0,00	0,00
Fe_Mn_Oxide	0,00	0,00
Fe_Mn_Mg_Ca_Oxide	0,00	0,00
Fe_Al_Silicate	0,00	0,25
Hematite	0,35	0,01
Pb_Al_Phosphate	0,00	0,00
Cu_Bi_Sulphur	0,00	0,00
Mn_Silicate	0,00	0,00
Fe_Zn_Oxide	0,00	0,00
Fluorite	0,00	0,00

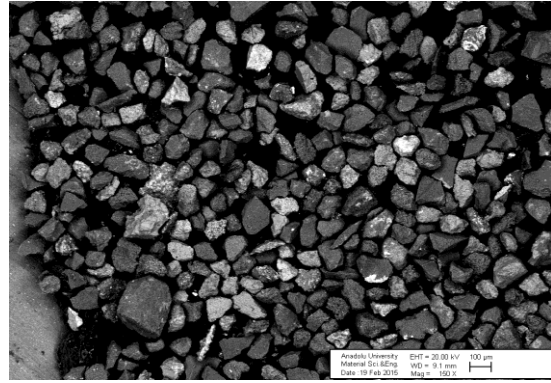
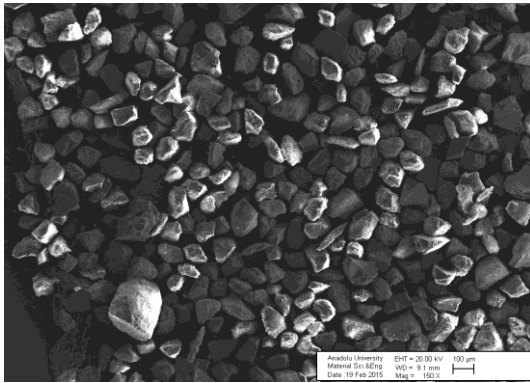


## Ek Açıklamalar-B: SEM mikroskobu görüntüleri

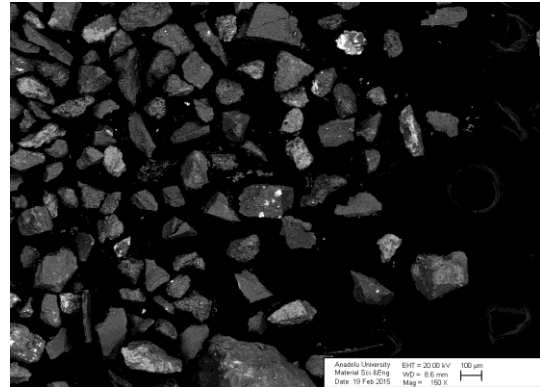
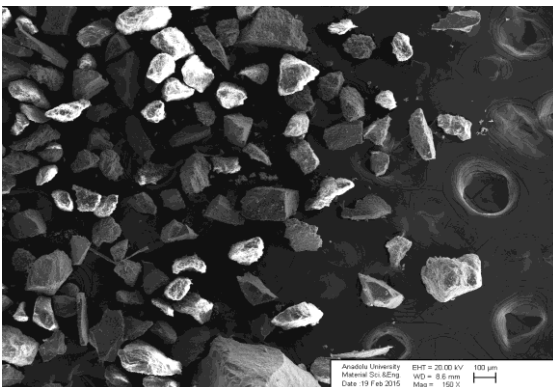
### RM 75 mikron (150x)



### LM-1 75 mikron (150x)

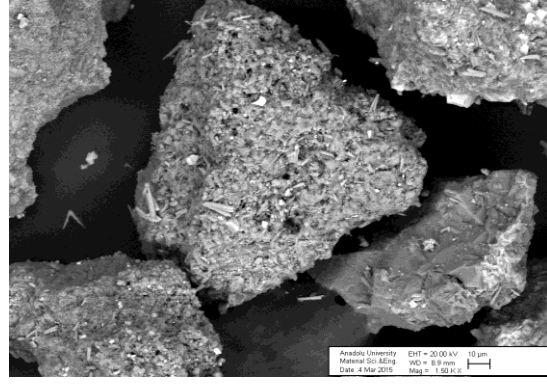
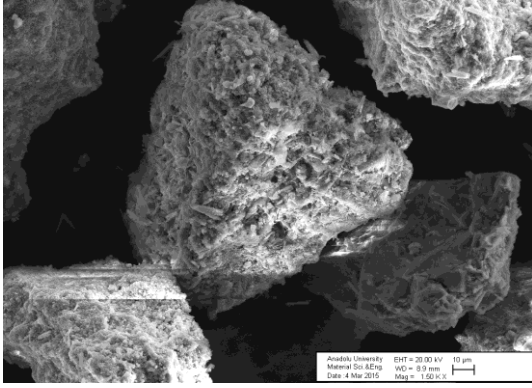


### LM-2 75 mikron (150x)

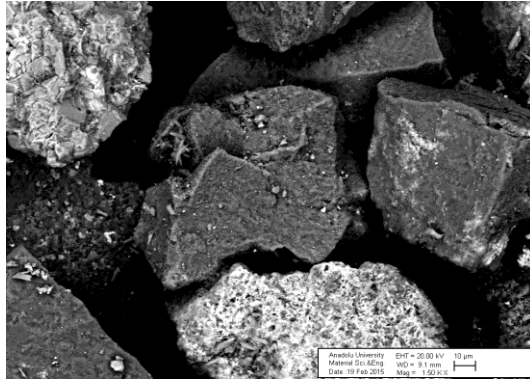
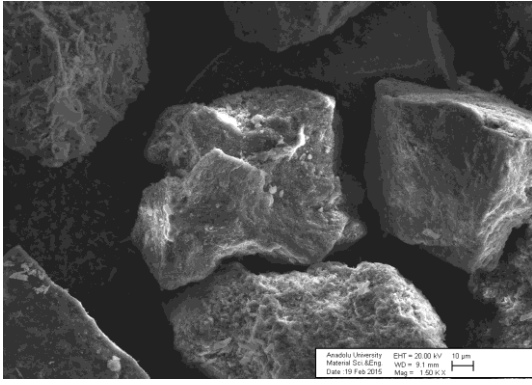


Şekil B1. 75 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 150x büyütmede SEM görüntüleri

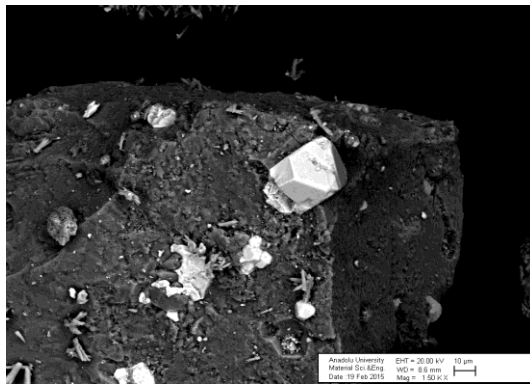
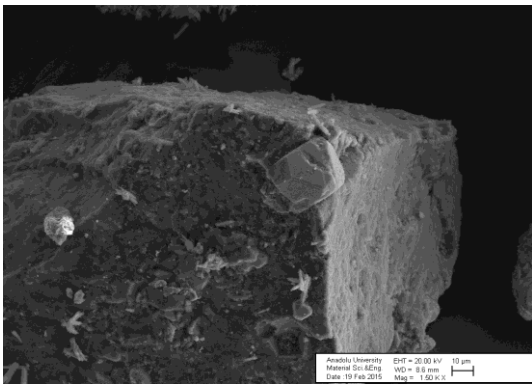
### RM 75 mikron (1,5Kx)



### LM-1 75 mikron (1,5 Kx)

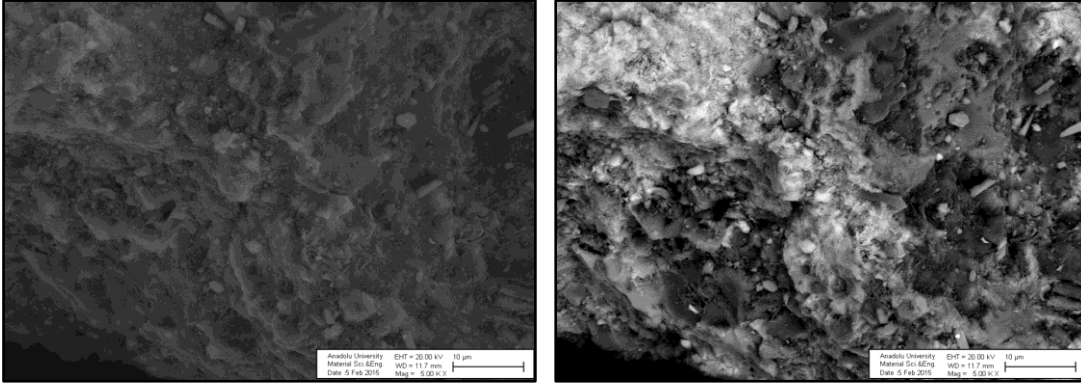


### LM-2 75 mikron (1,5 Kx)

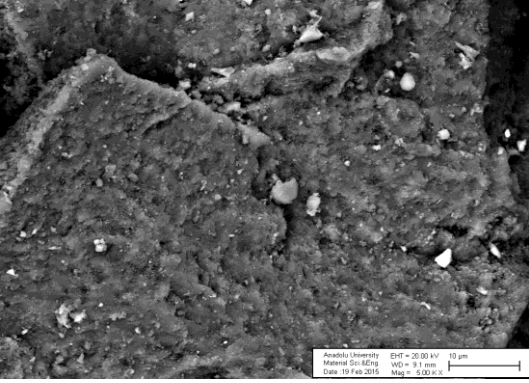


Şekil B2. 75 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 1,5Kx büyütmede SEM görüntüleri

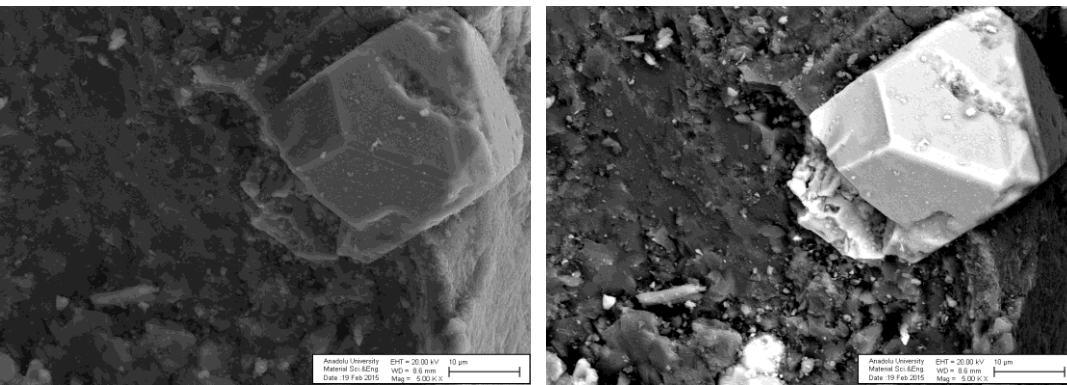
### RM 75 mikron (5Kx)



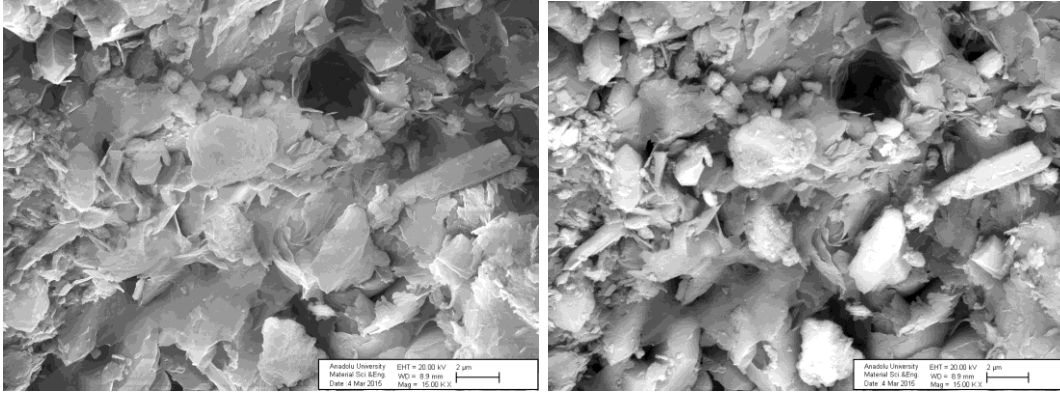
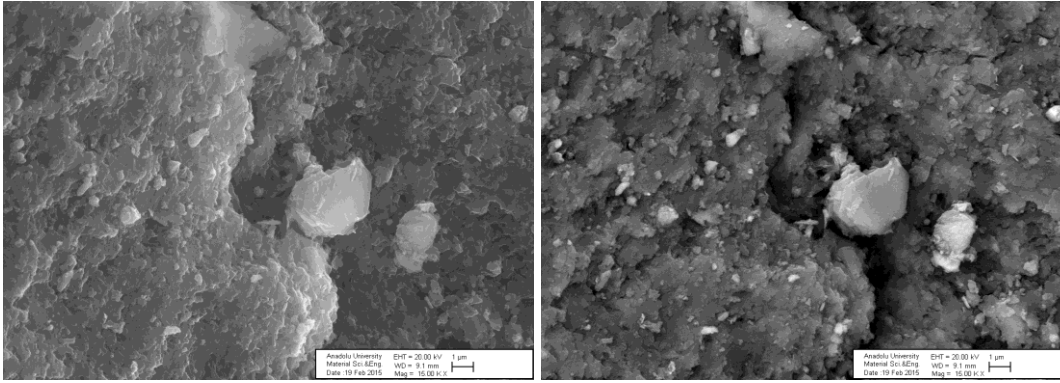
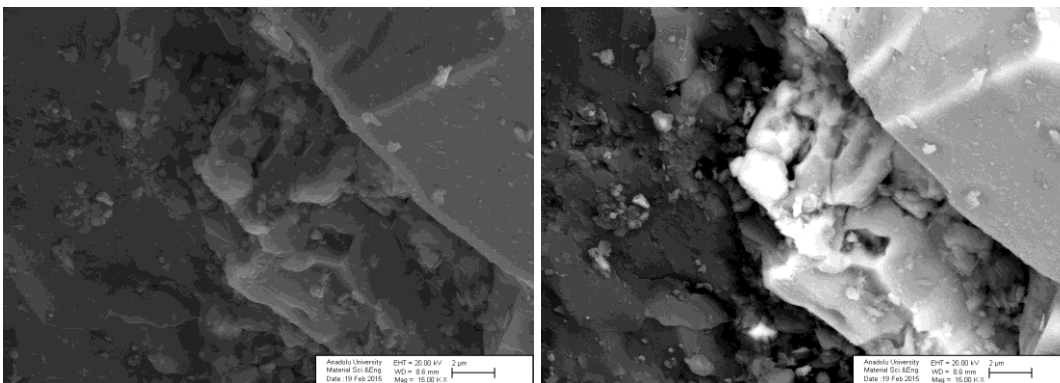
### LM-1 75 mikron (5Kx)



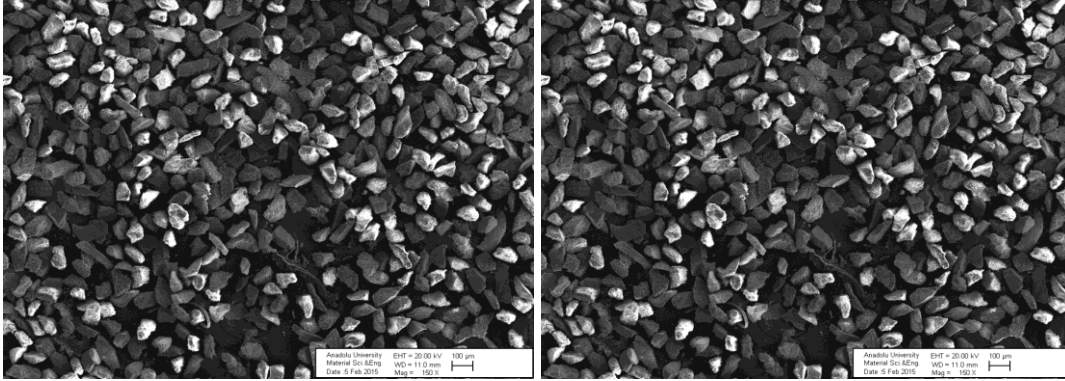
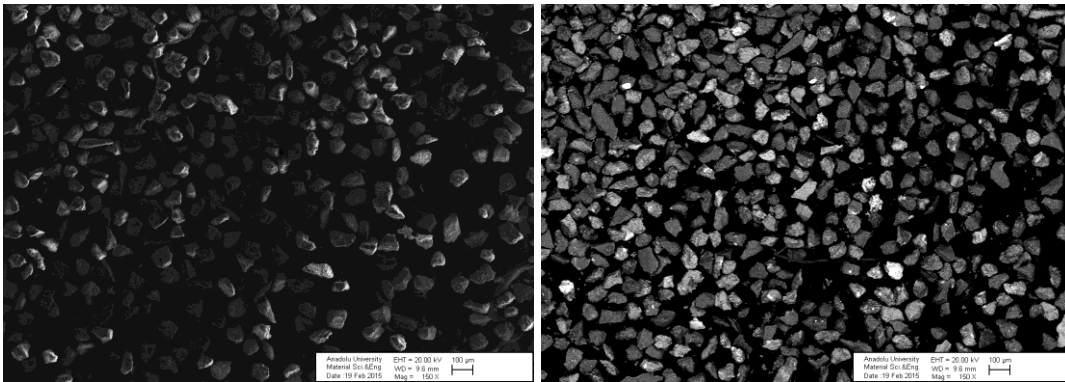
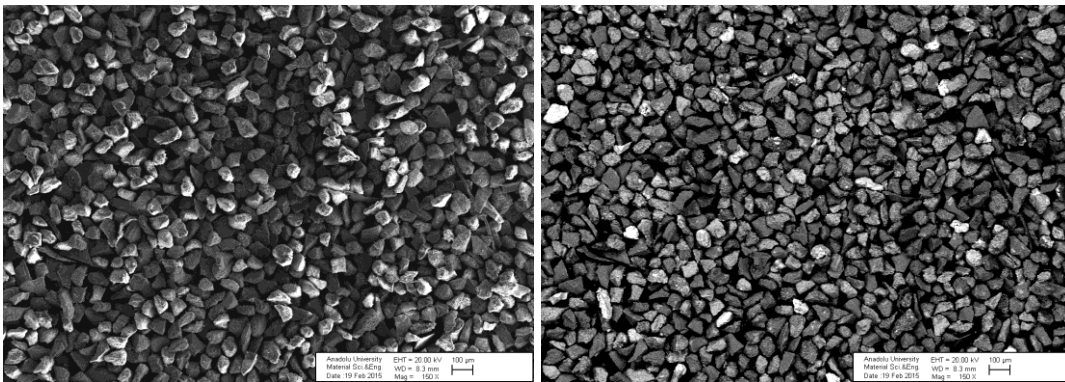
### LM-2 75 mikron (5Kx)



Şekil B3. 75 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 5Kx büyütmede SEM görüntüleri

**RM 75 mikron (15Kx)****LM-1 75 mikron (15Kx)****LM-2 75 mikron (15Kx)**

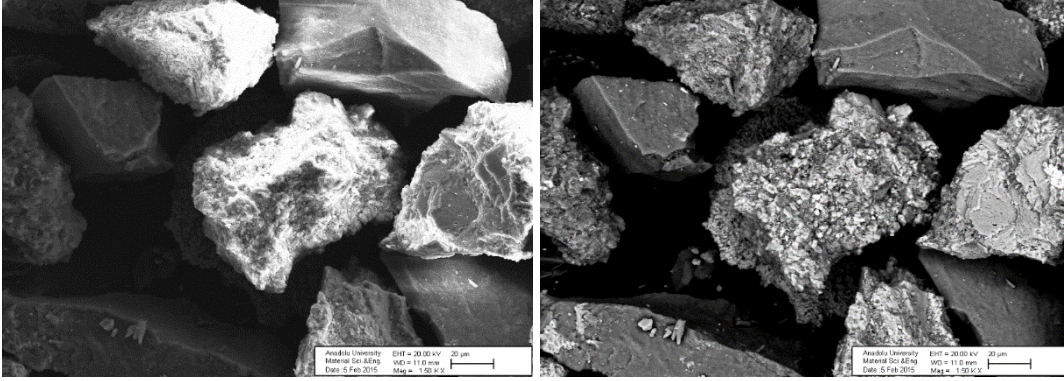
Şekil B4. 75 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 15Kx büyütmede SEM görüntüleri

**RM 63 mikron (150 x)****LM-1 63 mikron (150 x)****LM-2 63 mikron (150 x)**

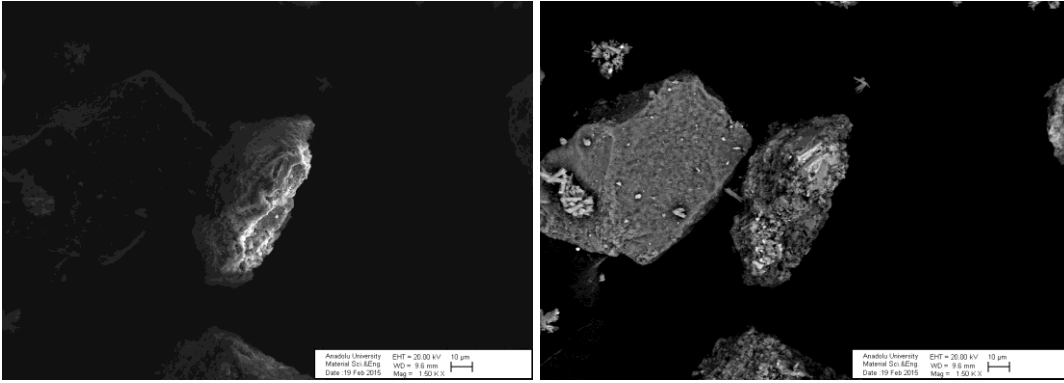
Şekil B5. 63 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 150x büyütmede SEM görüntüleri



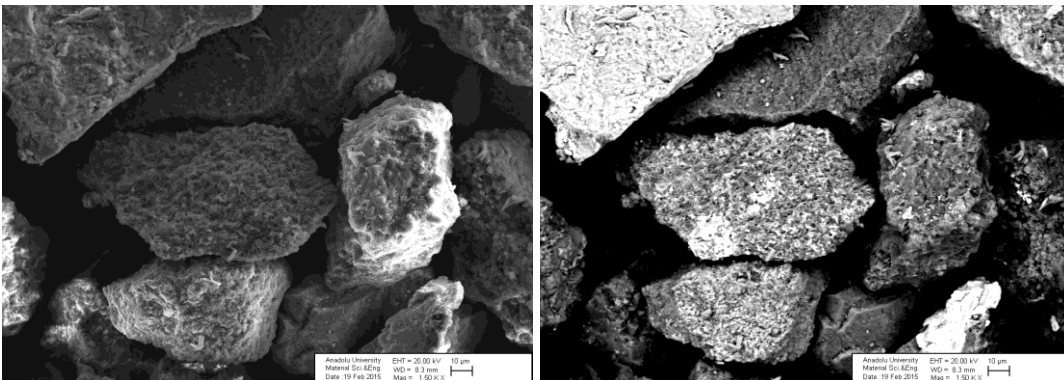
**RM 63 mikron (1,5Kx)**



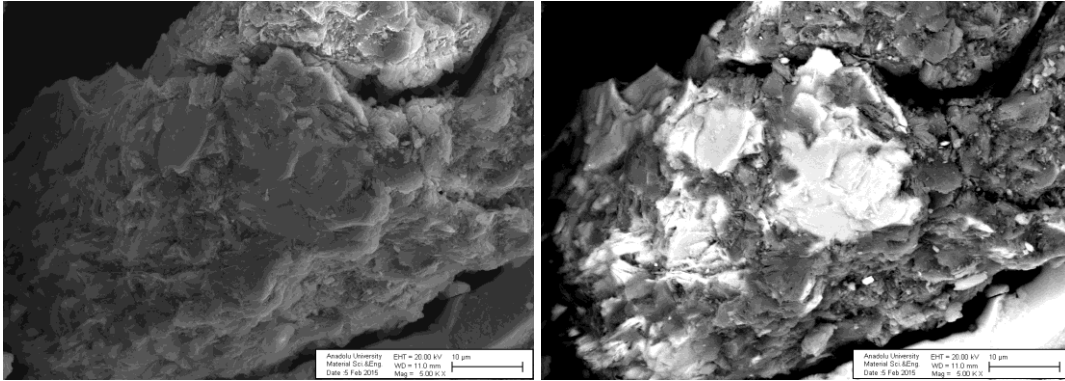
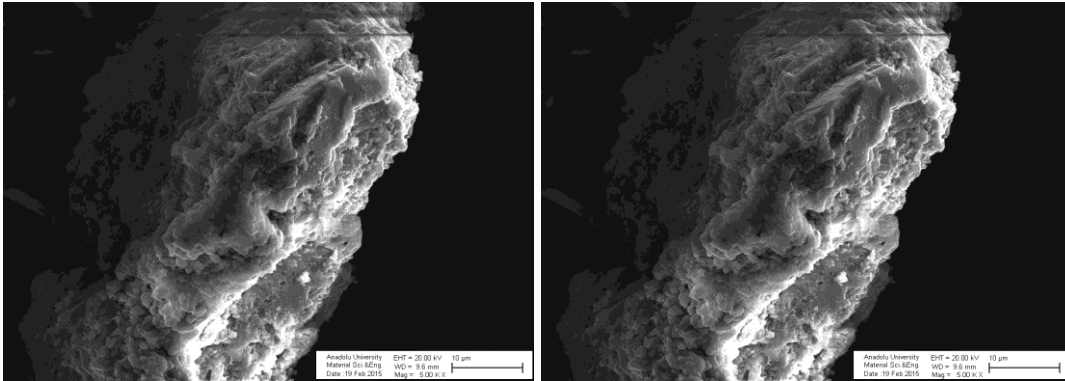
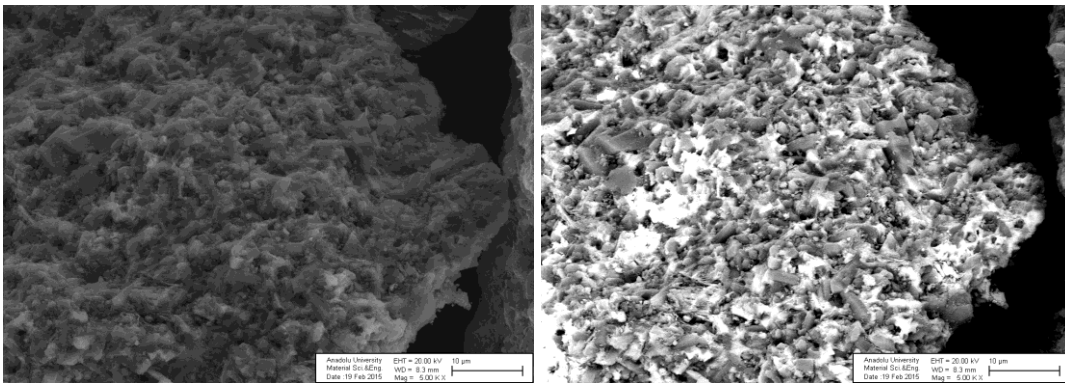
**LM-1 63 mikron (1,5Kx)**



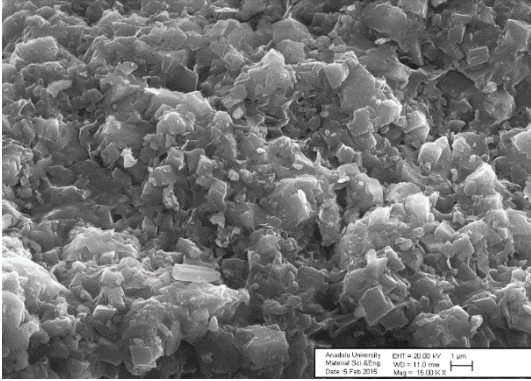
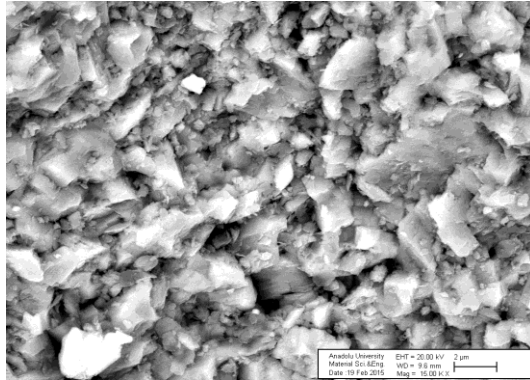
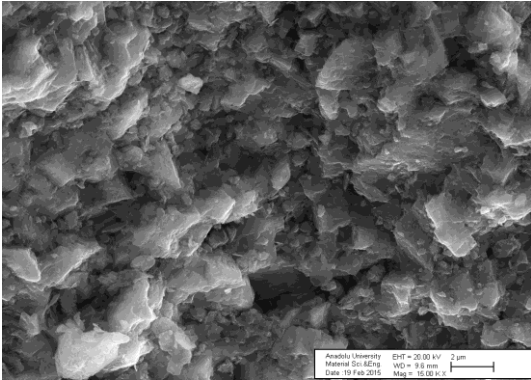
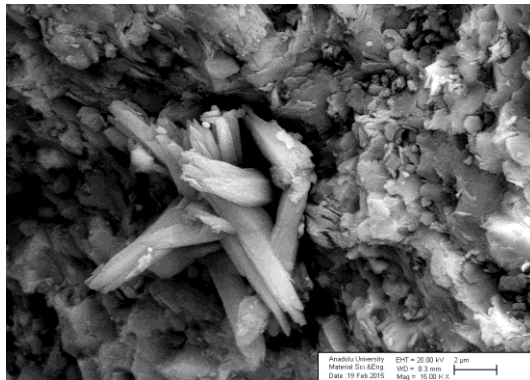
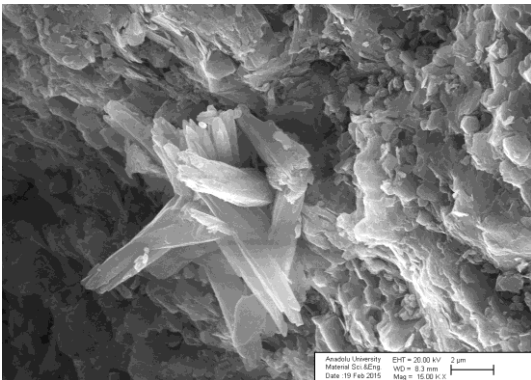
**LM-2 63 mikron (1,5Kx)**



Şekil B6 63 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 1,5Kx büyütmede SEM görüntüleri

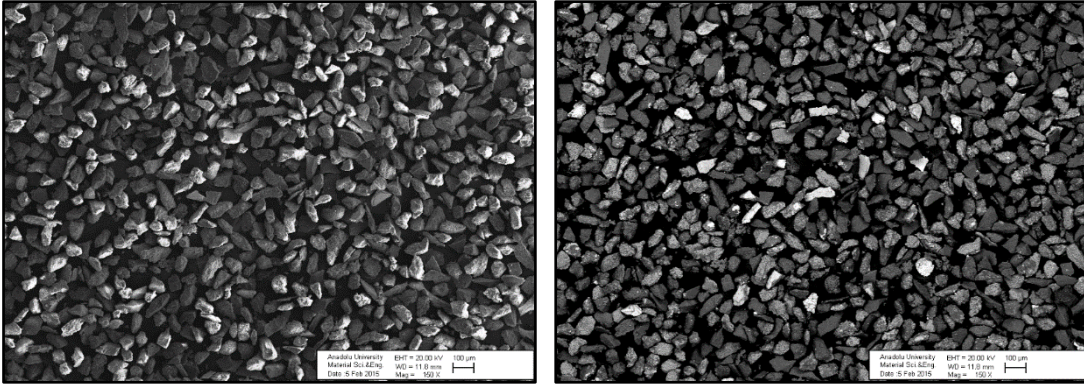
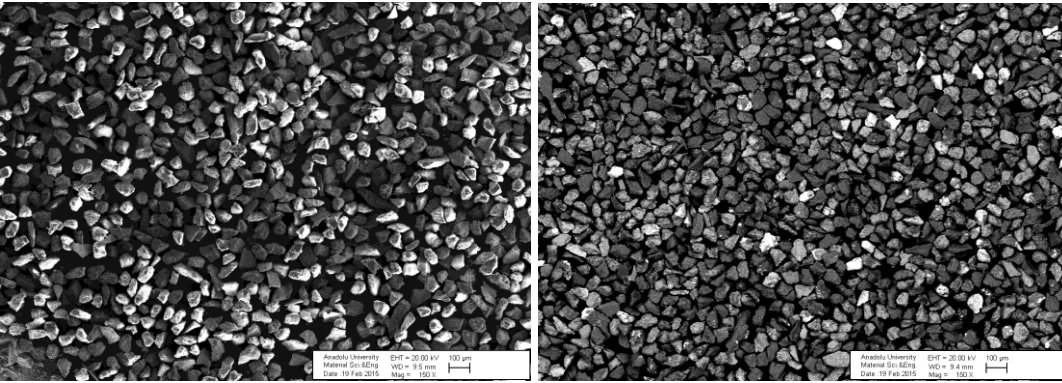
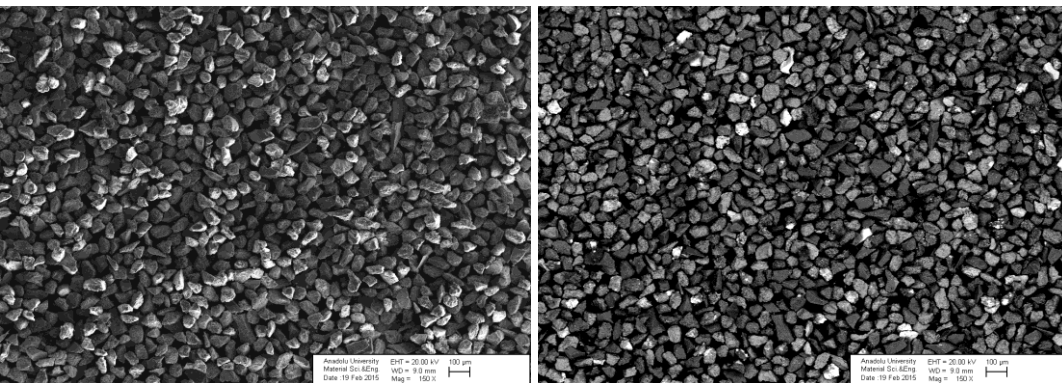
**RM 63 mikron (5Kx)****LM-1 63 mikron (5Kx)****LM-2 63 mikron (5Kx)**

Şekil B7 63 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 5Kx büyütmede SEM görüntüleri

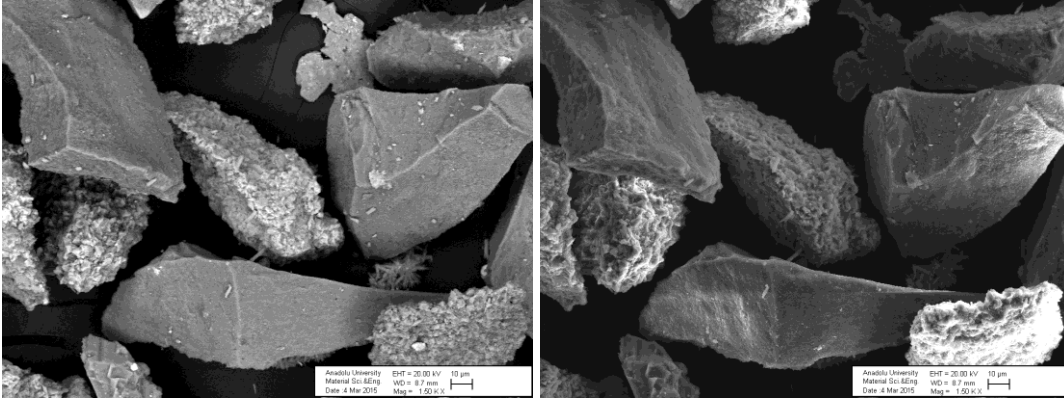
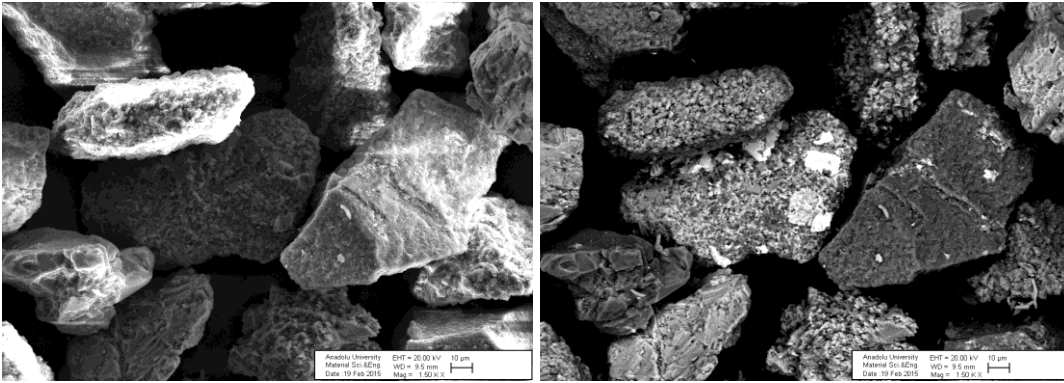
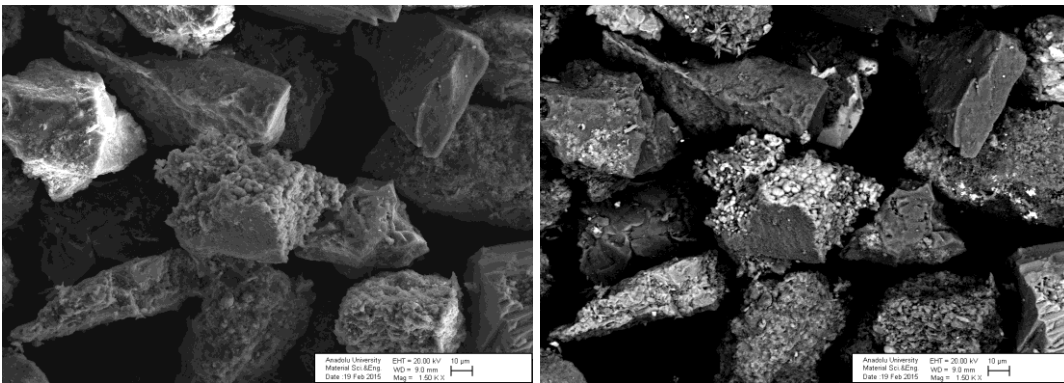
**RM 63 mikron (15Kx)****LM-1 63 mikron (15Kx)****LM-2 63 mikron (15Kx)**

Şekil B8 63 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 15Kx büyütmede SEM görüntüleri



**RM 53 mikron (150x)****LM-1 53 mikron (150x)****L-2 53 mikron (150x)**

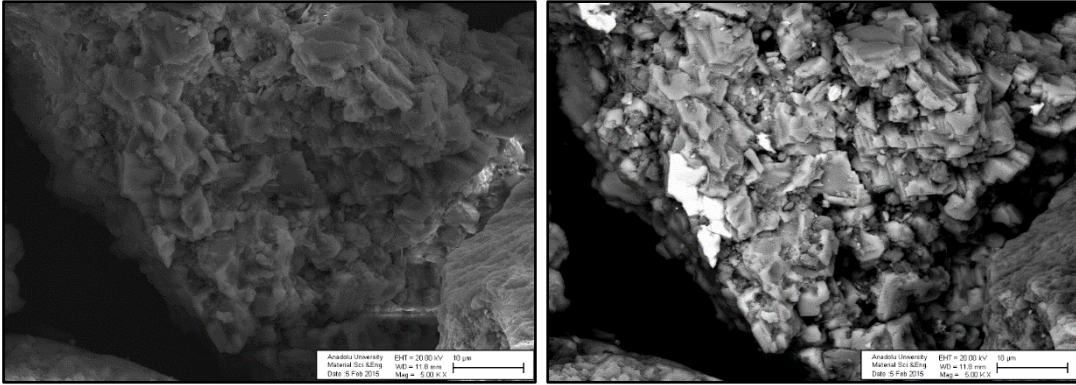
Şekil B9 53 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 150x büyütmede SEM görüntüleri

**RM 53 mikron (1,5 Kx)****LM-1 53 mikron (1,5 Kx)****L-2 53 mikron (1,5 Kx)**

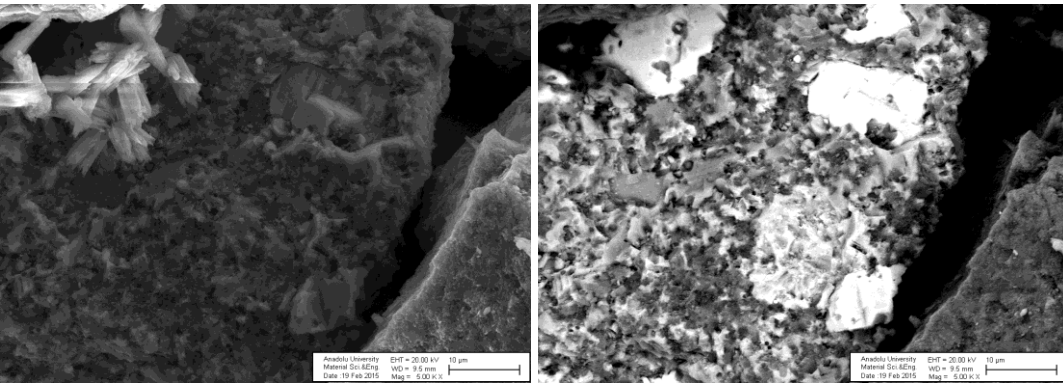
Şekil B10 53 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 1,5Kx büyütmede SEM görüntüleri



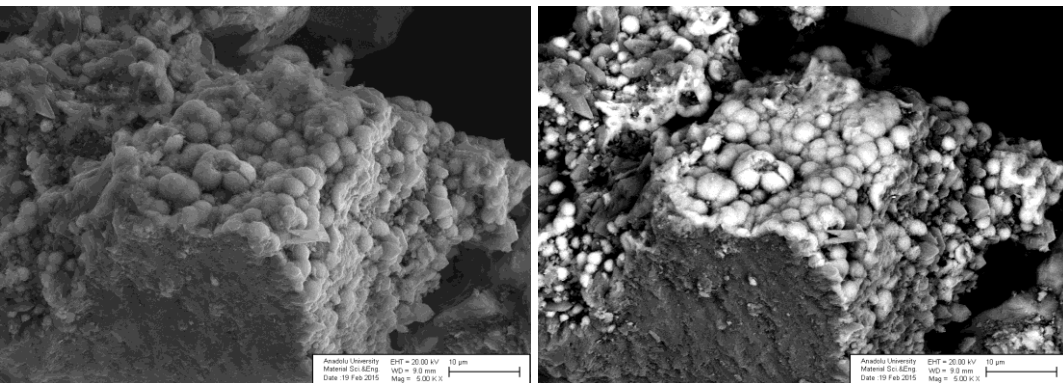
### RM 53 mikron (5 Kx)



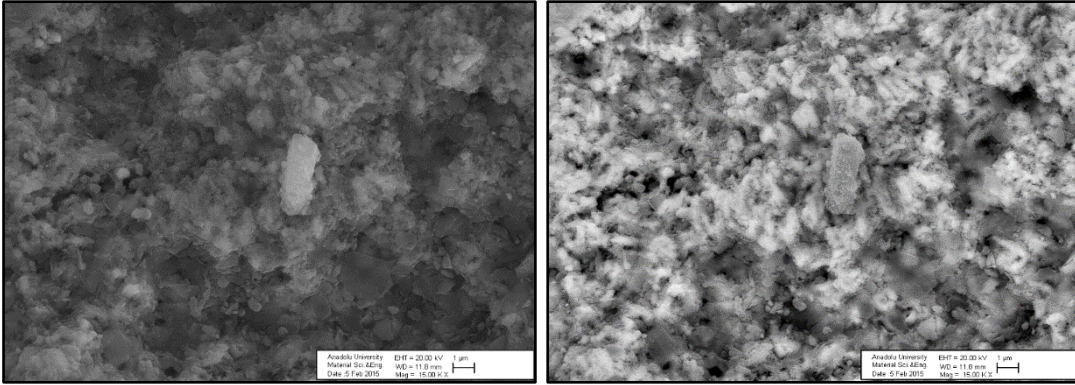
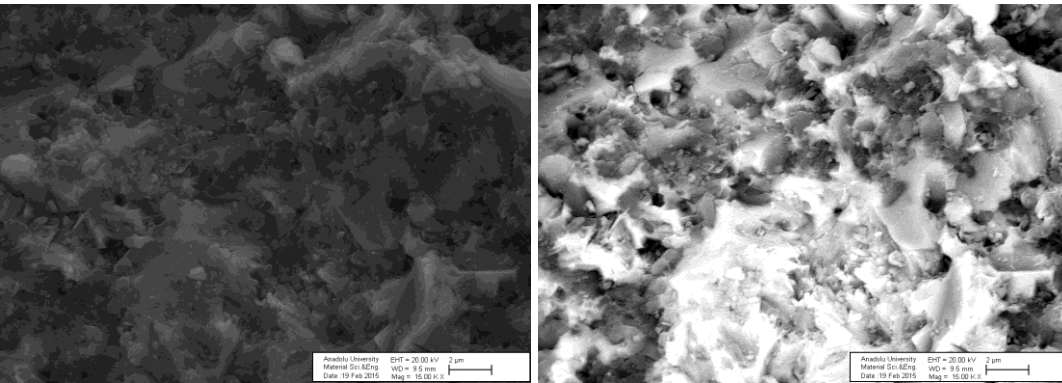
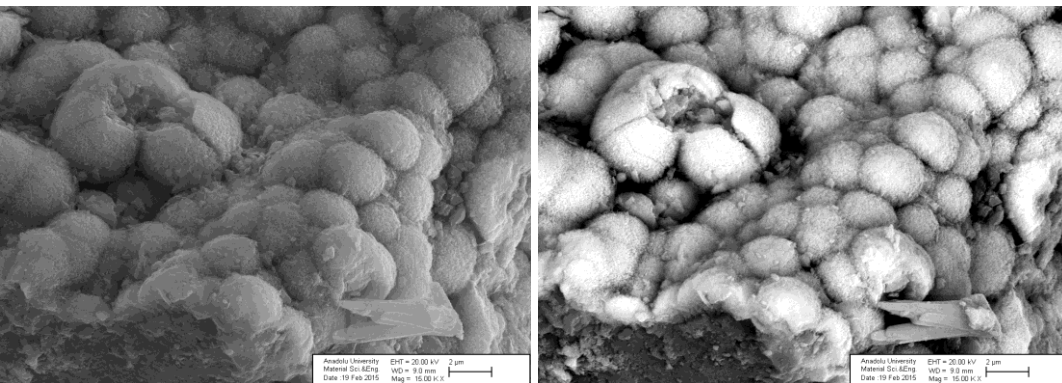
### LM-1 53 mikron (5 Kx)



### LM-2 53 mikron (5 Kx)

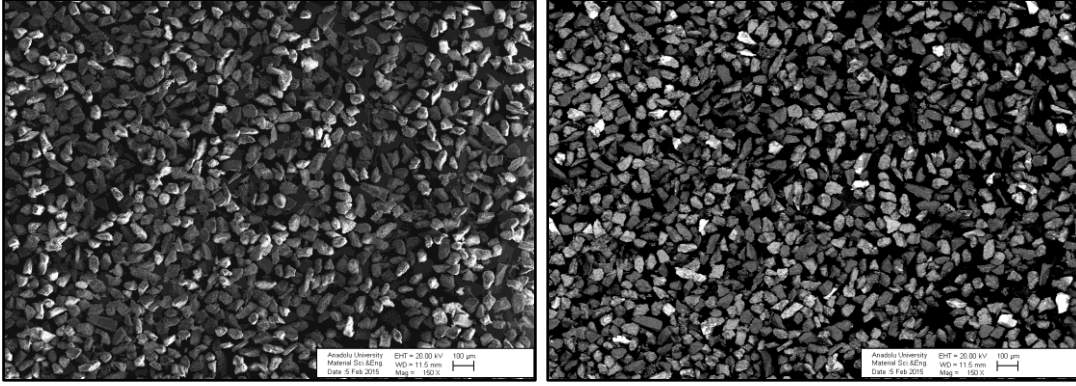


Şekil B11 53 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 5Kx büyütmede SEM görüntüleri

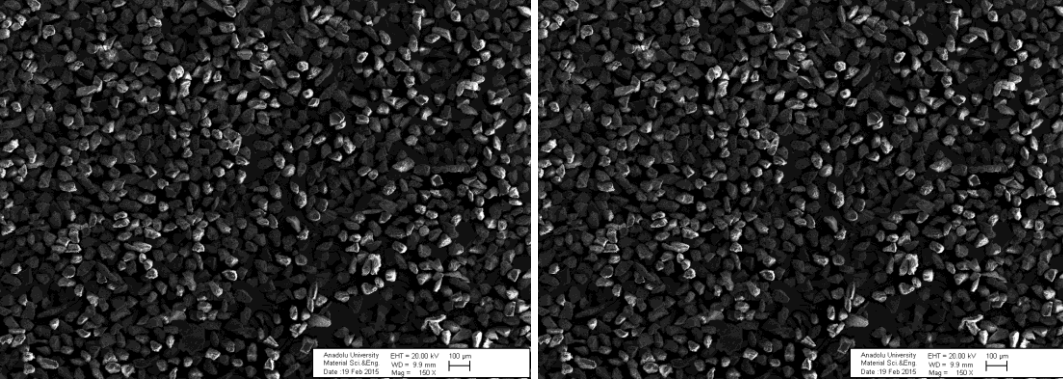
**RM 53 mikron (15 Kx)****LM-1 53 mikron (15 Kx)****LM-2 53 mikron (15 Kx)**

Şekil B12 53 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 15Kx büyütmede SEM görüntüleri

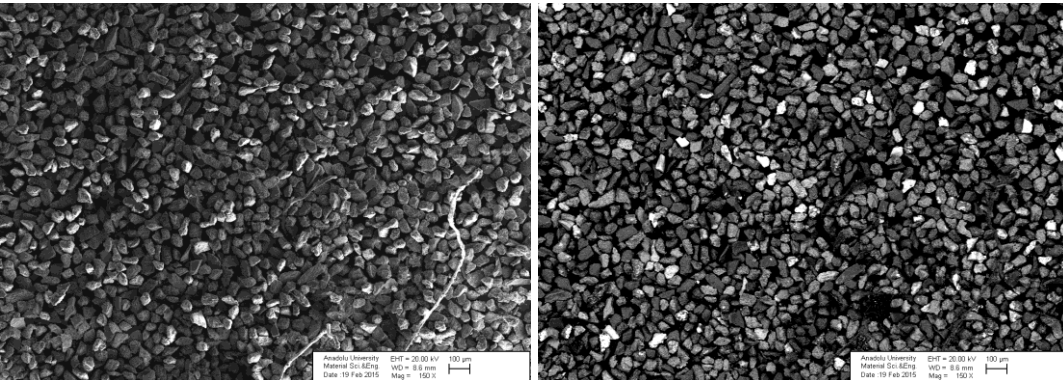
### RM 45 mikron (150x)



### LM-1 45 mikron (150x)



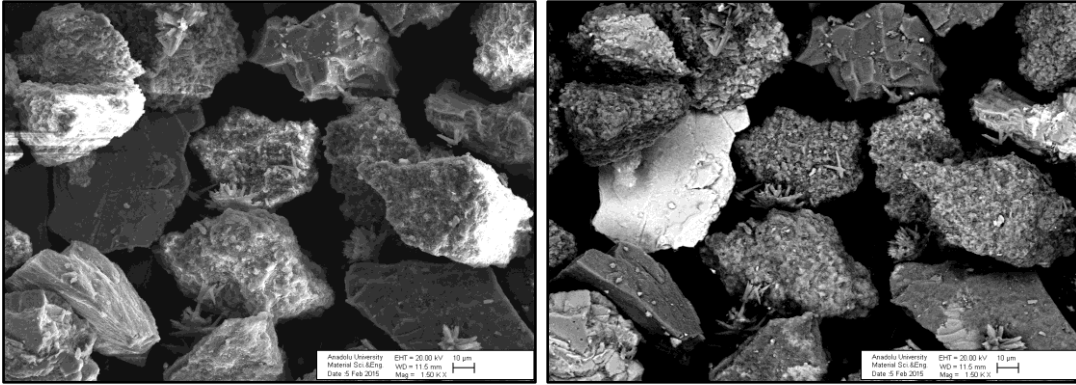
### LM-2 45 mikron (150x)



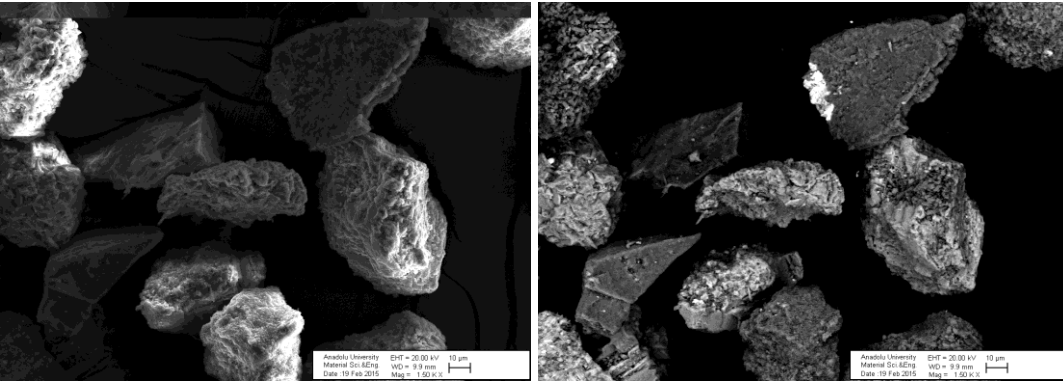
Şekil B13 45 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 150x büyütmede SEM görüntüleri



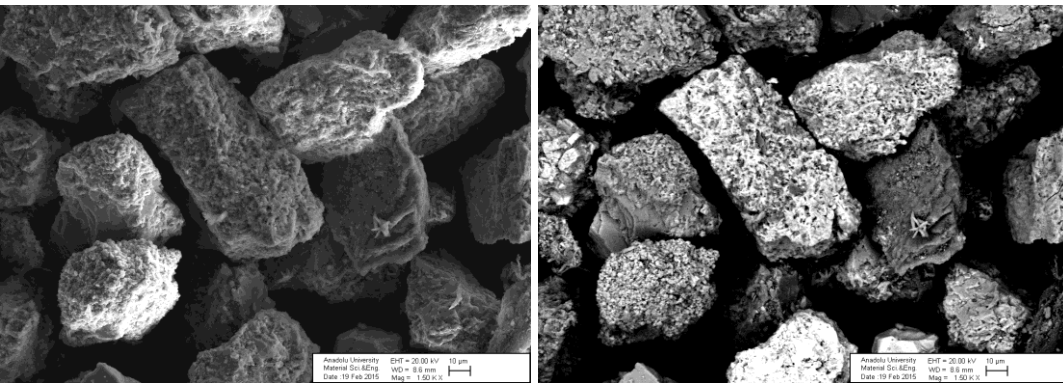
### RM 45 mikron (1,5Kx)



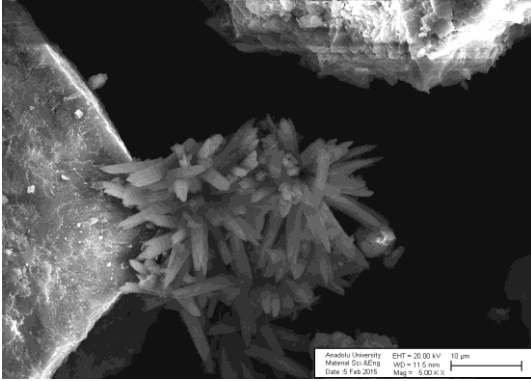
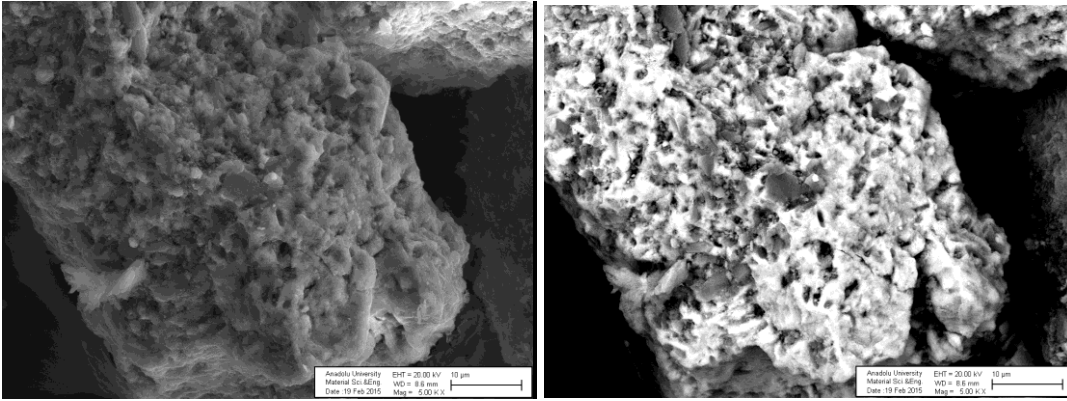
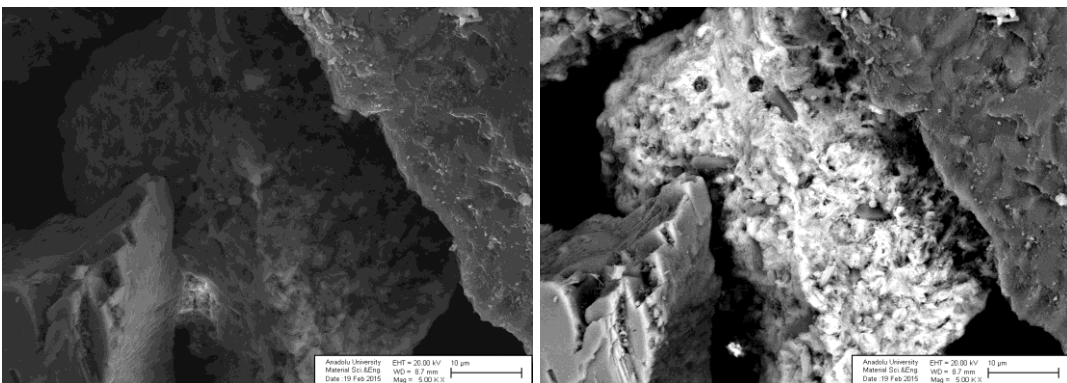
### LM-1 45 mikron (1,5Kx)



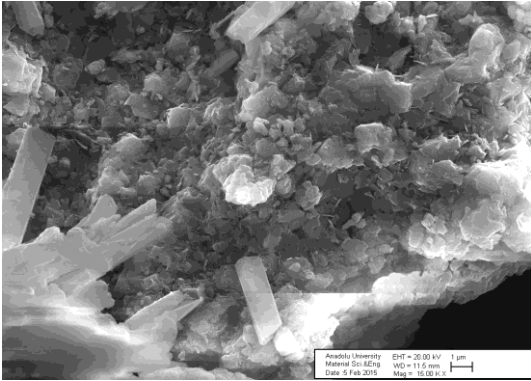
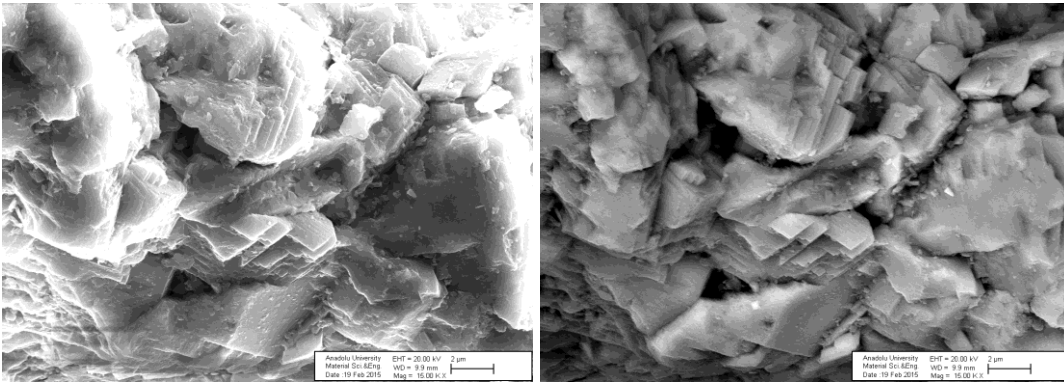
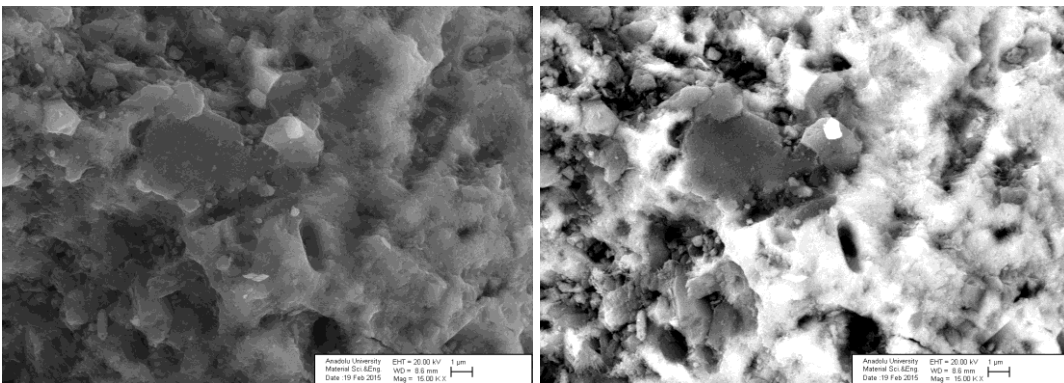
### LM-2 45 mikron (1,5Kx)



Şekil B14 45 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 1,5Kx büyütmede SEM görüntüleri

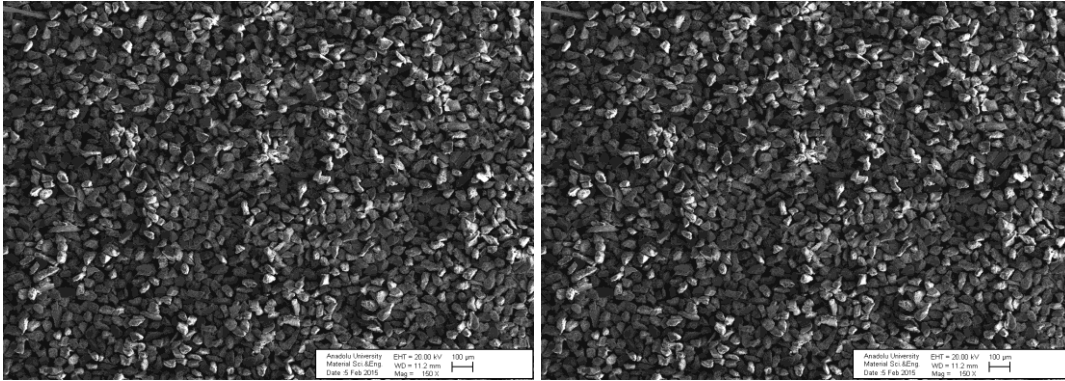
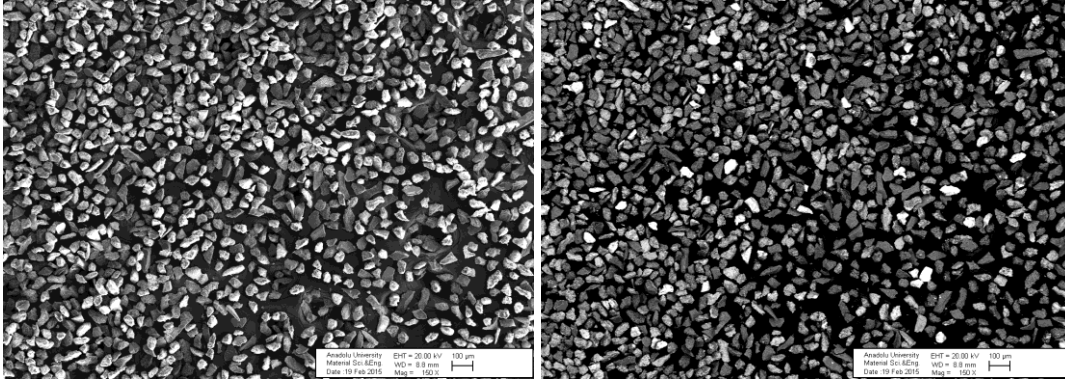
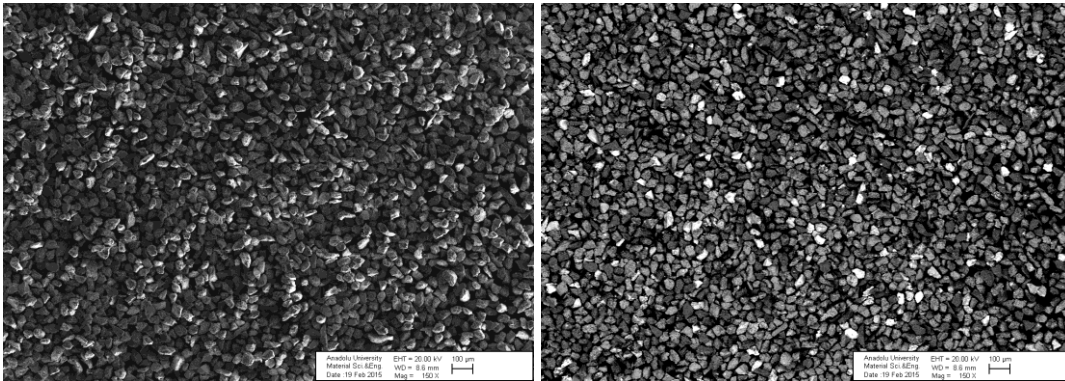
**RM 45 mikron (5Kx)****LM-1 45 mikron (5Kx)****LM-2 45 mikron (5Kx)**

Şekil B15 45 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 5Kx büyütmede SEM görüntüleri

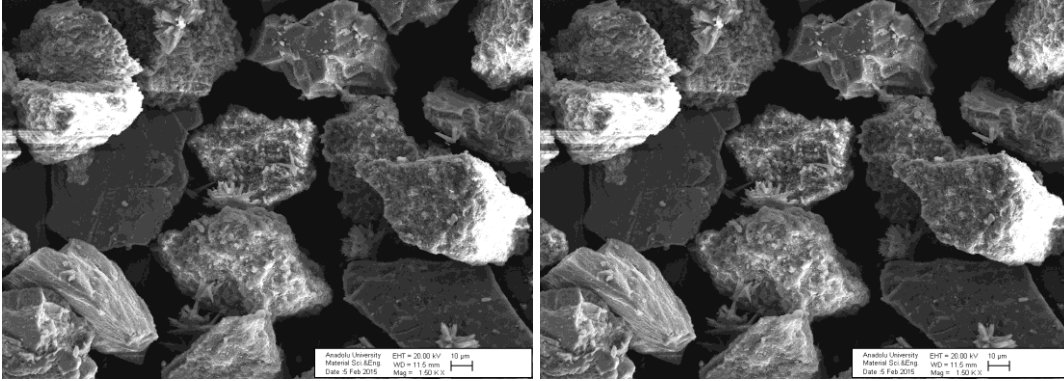
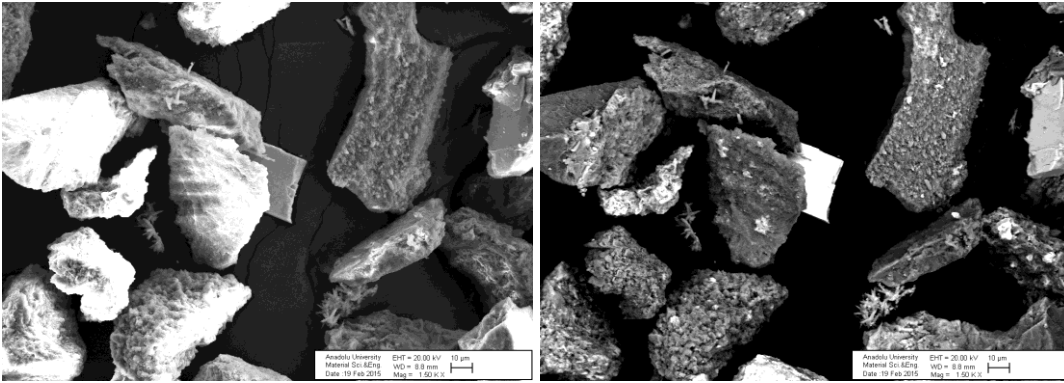
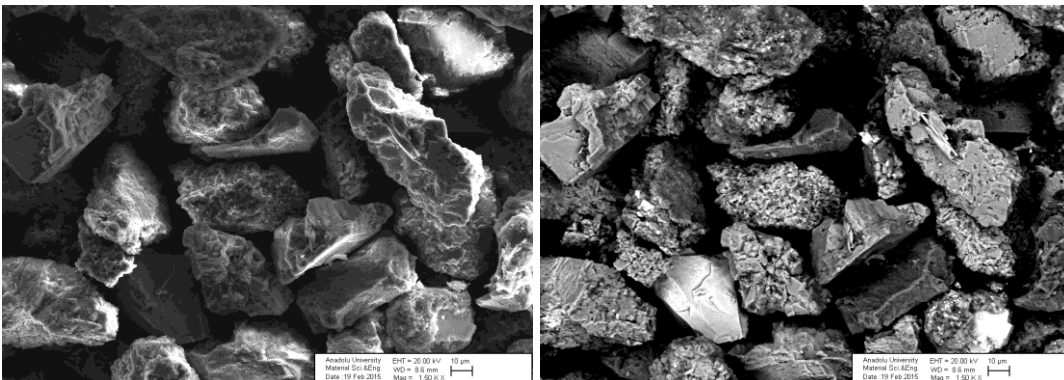
**RM 45 mikron (15Kx)****LM-1 45 mikron (15Kx)****LM-2 45 mikron (15Kx)**

Şekil B16 45 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 15Kx büyütmede SEM görüntüleri

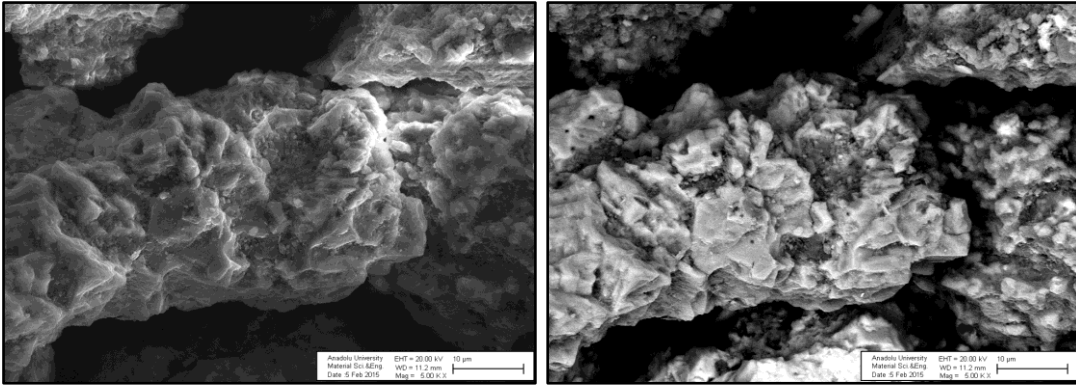
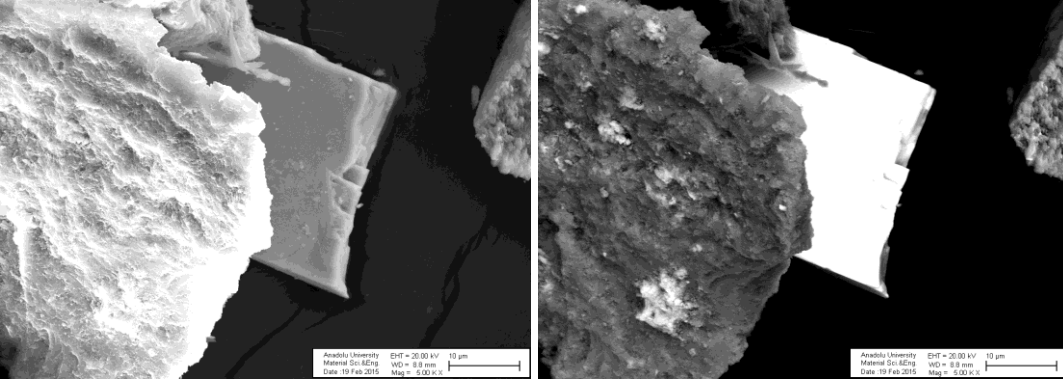
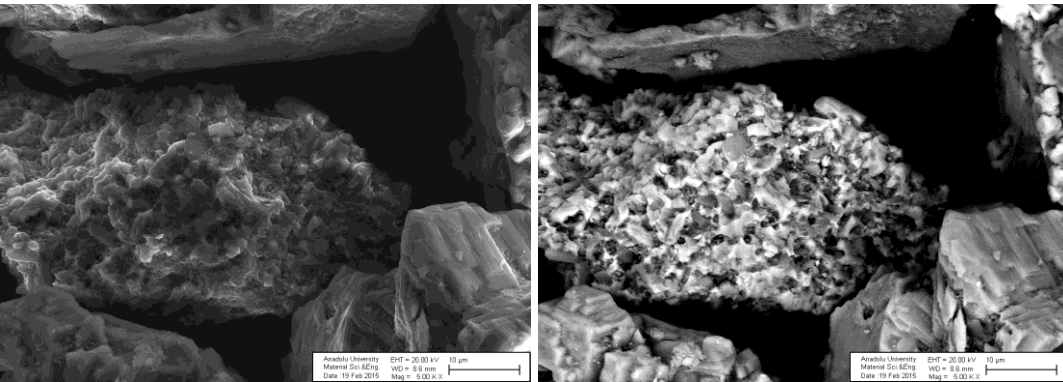


**RM 38 mikron (150x)****LM-1 38 mikron (150x)****LM-2 38 mikron (150x)**

Şekil B17 38 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 150x büyütmede SEM görüntüleri

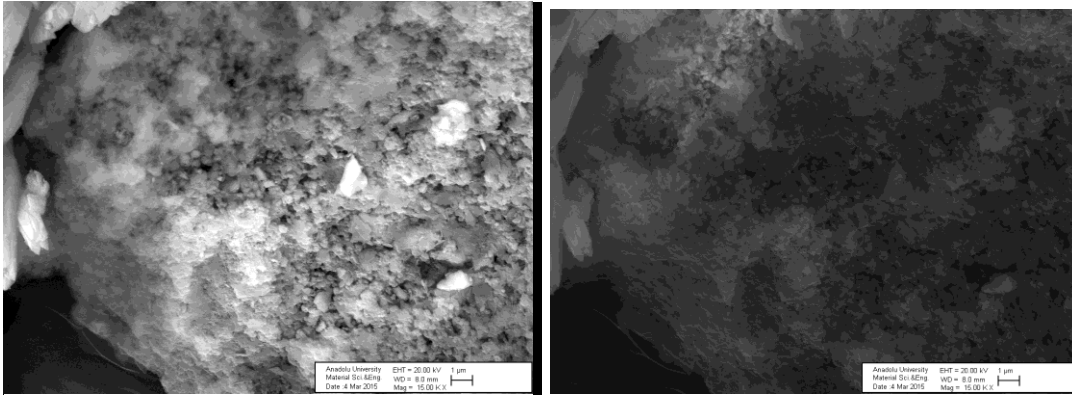
**RM 38 mikron (1,5x)****LM-1 38 mikron (1,5x)****LM-2 38 mikron (1,5x)**

Şekil B18 38 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 1,5x büyütmede SEM görüntüleri

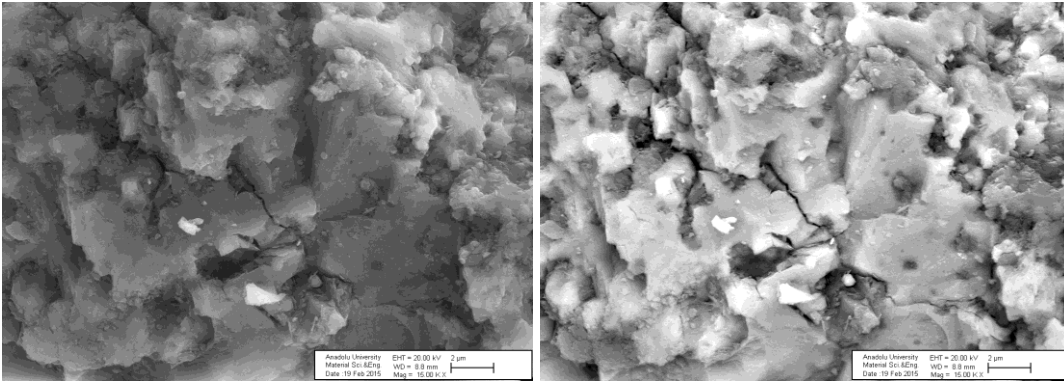
**RM 38 mikron (5x)****LM-1 38 mikron (5x)****LM-2 38 mikron (5x)**

Şekil B19 38 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 5x büyütmede SEM görüntüleri

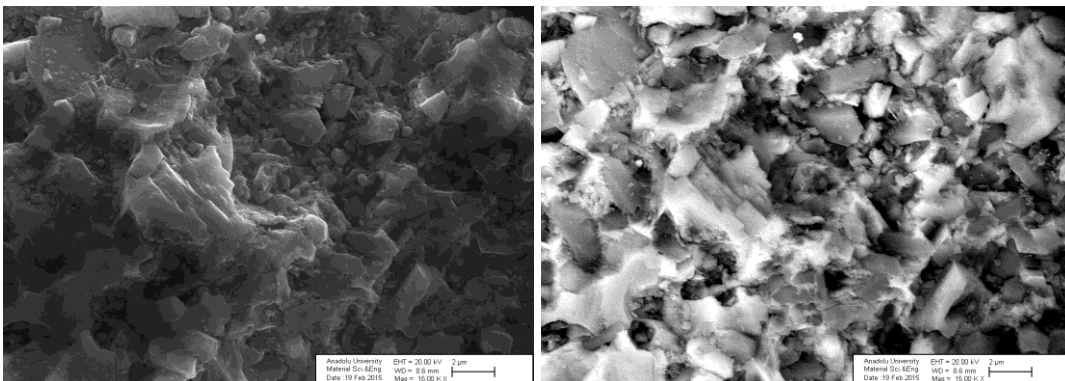
### RM 38 mikron (15x)



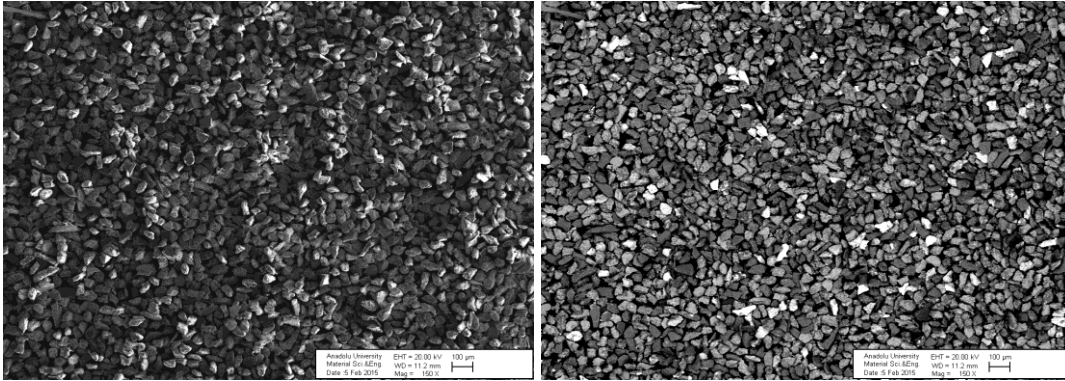
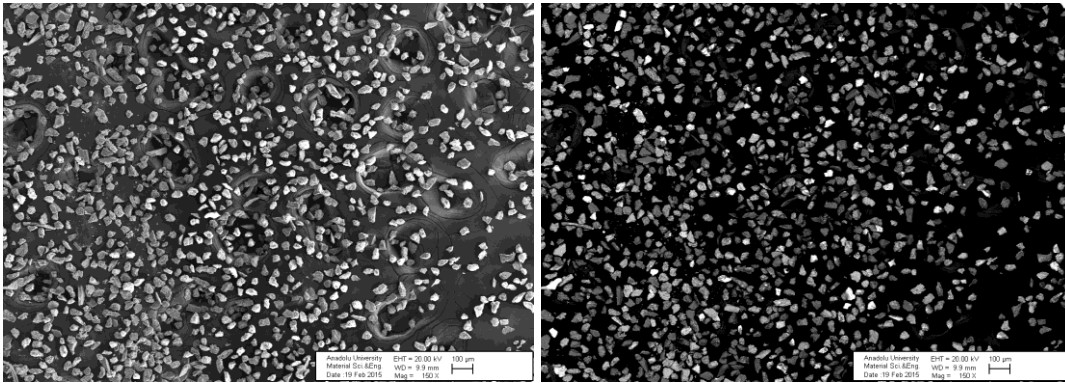
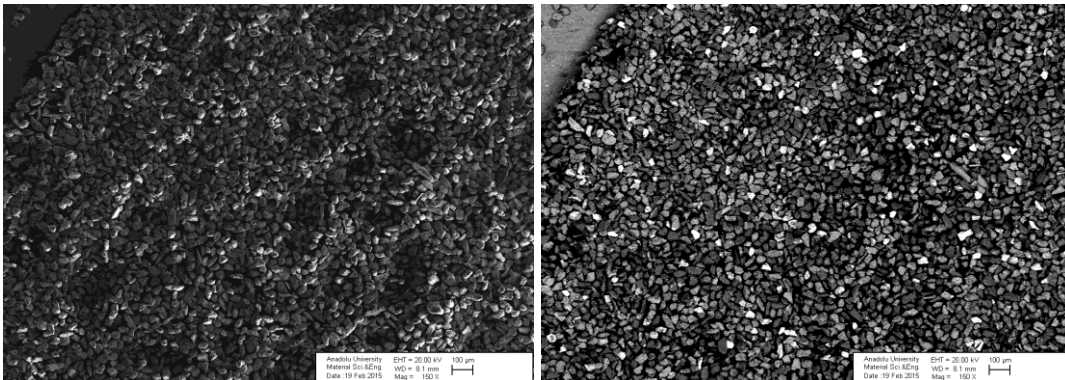
### LM-1 38 mikron (15x)



### LM-2 38 mikron (15x)



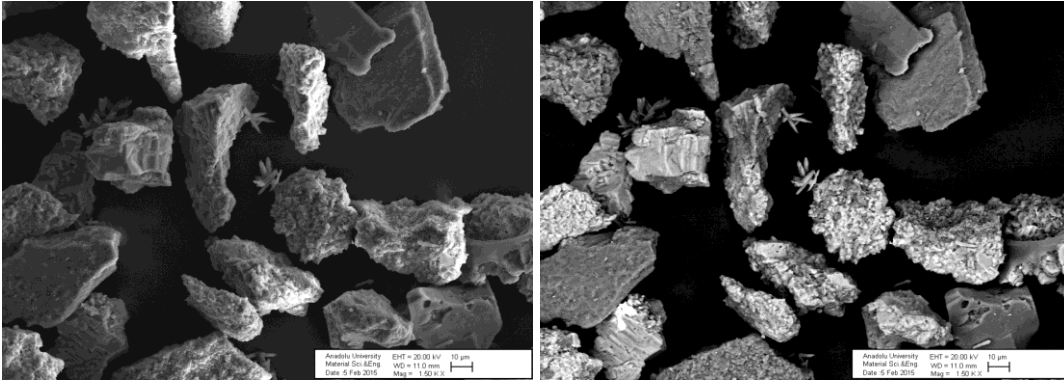
Şekil B20 38 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 15x büyütmede SEM görüntüleri

**RM 25 mikron (150x)****LM-1 25 mikron (150x)****LM-2 25 mikron (150x)**

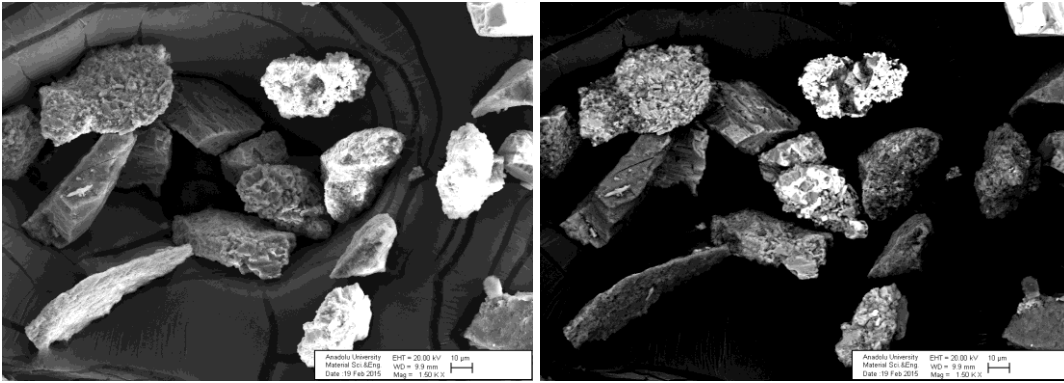
Şekil B21 25 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 150x büyütmede SEM görüntüleri



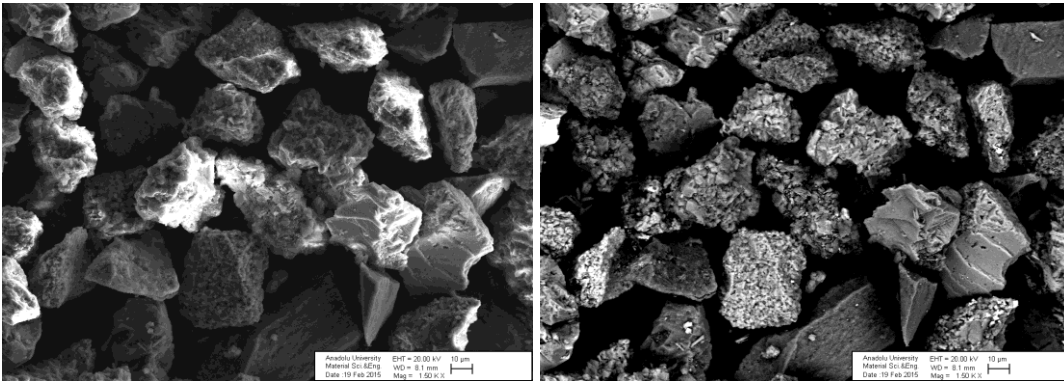
**RM 25 mikron (1,5 Kx)**



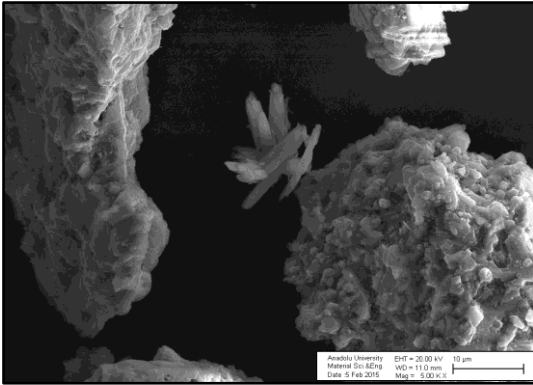
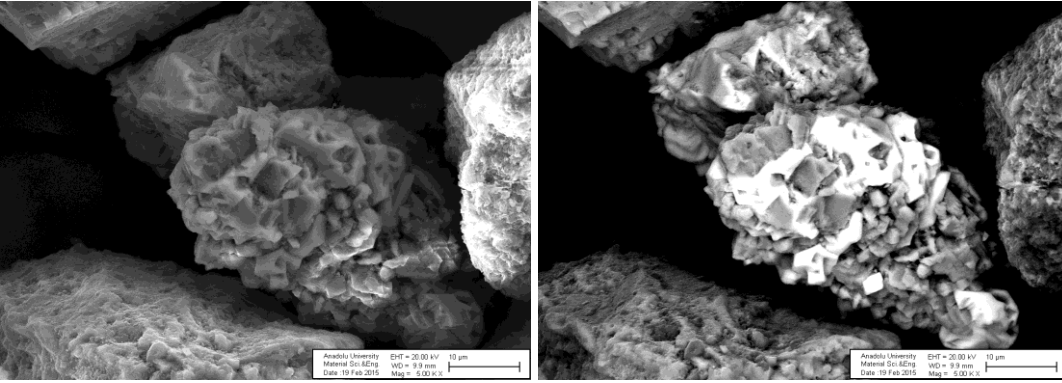
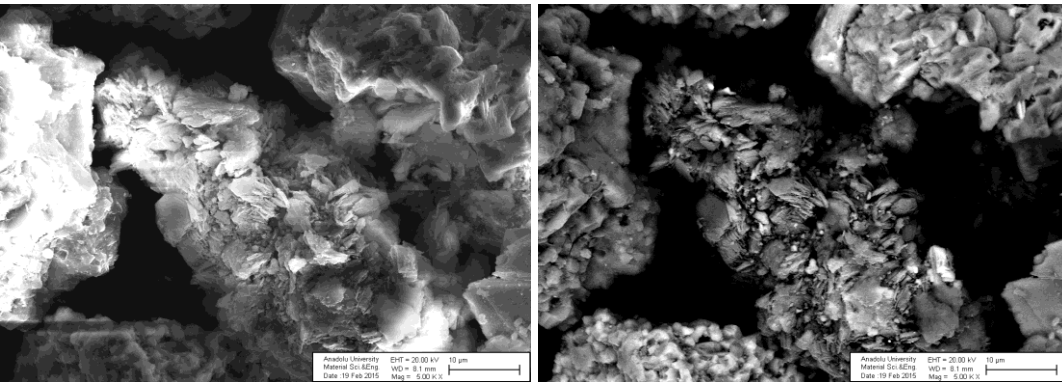
**LM-1 25 mikron (1,5 Kx)**



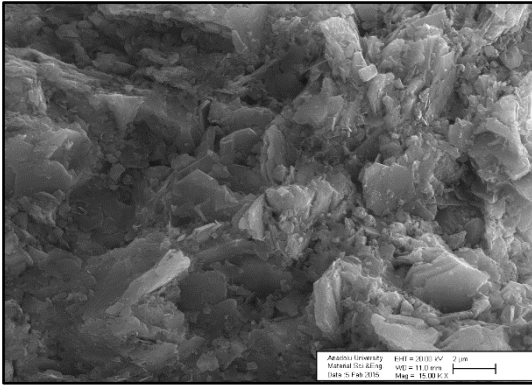
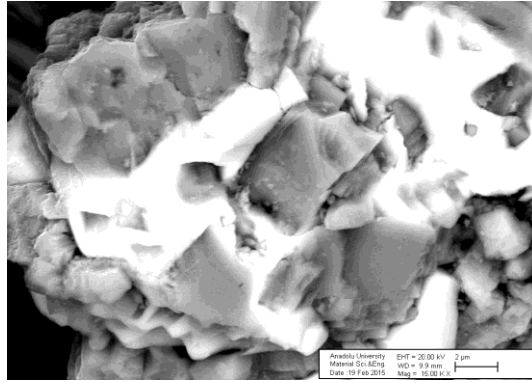
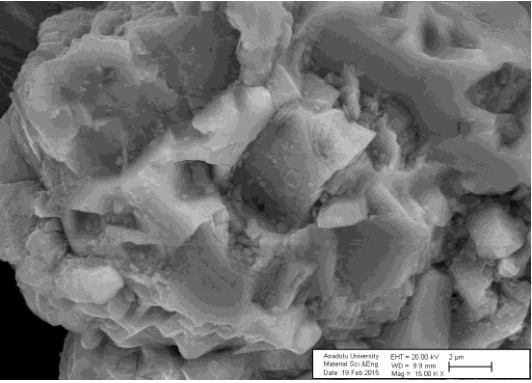
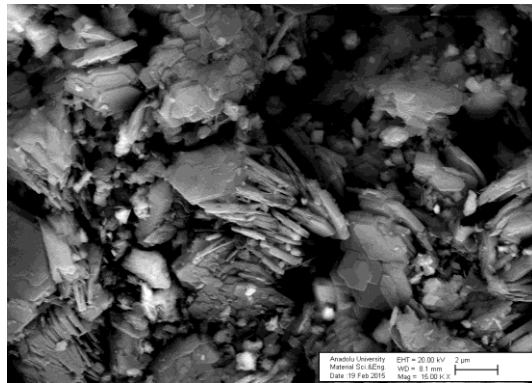
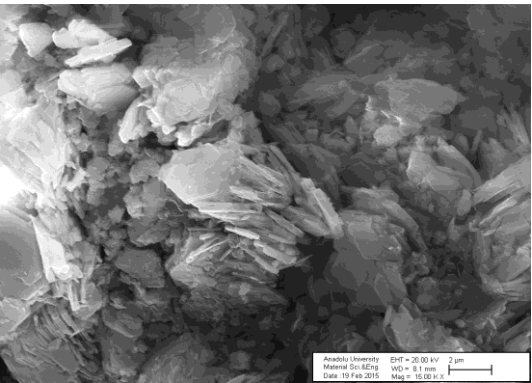
**LM-2 25 mikron (1,5 Kx)**



Şekil B22 25 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 1,5Kx büyütmede SEM görüntüleri

**RM 25 mikron (5 Kx)****LM-1 25 mikron (5 Kx)****LM-2 25 mikron (5 Kx)**

Şekil B23 25 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 5Kx büyütmede SEM görüntüleri

**RM 25 mikron (15 Kx)****LM-1 25 mikron (15 Kx)****LM-2 25 mikron (15 Kx)**

Şekil B24 25 µm boyutundaki RM, LM-1 ve LM-2 numunelerinin 15Kx büyütmede SEM görüntüleri



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

<b>Adı Soyadı</b>	Işıl TOKCAN		
<b>Ünvanı</b>	Araştırma Görevlisi		
<b>Birimi</b>	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi		
Maden	Mühendisliği Bölümü		
<b>Doğum Yeri</b>	Ankara		
Doğum Tarihi	23.08.1984		
E-posta	isilkilickaplan@gmail.com	//	ikilickaplan@ogu.edu.tr

### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Lisans	Maden Mühendisliği (İNG)	Hacettepe Üniversitesi	2002-2007
Yüksek Lisans	Maden Mühendisliği/ Cevher Hazırlama Anabilim Dalı	University of British Columbia	2007-2009
Doktora	Maden Mühendisliği/ Cevher Hazırlama Anabilim Dalı	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2011-2017

### TEZLER

Yüksek Lisans	Effect of pulp rheology on flotation: the nickel sulfide ore with asbestos gangue system	2009
Doktora	Farklı öğütme koşullarının kurşun-çinko flotasyonu üzerindeki etkisi	2017

## **PROJELER**

Farklı Öğütme Koşullarının Kurşun-Çinko Flotasyonuna Etkisi, Bilimsel Araştırma Projesi, Doktora Öğrencisi, 20/02/2015-20/02/2016

Yaş ve Kuru Öğütme Şartlarının Sülfürlü Pb-Zn Cevheri Flotasyonu Üzerine Etkisi, Bilimsel Araştırma Projesi, Doktora Öğrencisi, 2/6/2017- (Devam ediyor)

## **ESERLER**

### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler**

Kilickaplan, I.; Ndlovu, B., Laskowski, J., 2010. Rheology of Aqueous Suspensions of Needle-like Mineral Particles, Proceedings of the 8<sup>th</sup> University of British Columbia McGill-University of Alberta International Symposium on the Fundamentals of Mineral Processing, 193-200.

Genç A. M, Kilickaplan, I; Laskowski, J., 2010. Pulp Rheology in the Flotation of Serpentinised Ultramafic Nickel Sulfide Ore and Its Effect on Flotation, Proceedings of the 8th University of British Columbia McGill-University of Alberta International Symposium on the Fundamentals of Mineral Processing, 13-19.

Genc, A.M., Kilickaplan, I., Laskowski, J.S., 2012. Effect of pulp rheology on flotation of nickel sulphide ore with fibrous gangue particles. Can. Metall. Quart. 51 (4), 368–375