

İşlem Parametrelerinin Altın Flotasyonu Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Semih Oluklulu

**DOKTORA TEZİ**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2020

Investigation Of The Effects Of Process Parameters On Gold Flotation

Semih Oluklulu

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Mining Engineering

January 2020

# İşlem Parametrelerinin Altın Flotasyonu Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Semih Oluklulu

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

Danışman: Prof. Dr. Yaşar Uçbaş

Bu Tez ESOGÜ BAP tarafından “2019-2570” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

Ocak 2020

## ONAY

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Semih OLUKLULU'nun DOKTORA tezi olarak hazırladığı “İşlem Parametrelerinin Altın Flotasyonu Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Yaşar UCBAŞ

**İkinci Danışman** : Prof. Dr. Volkan BOZKURT

**Doktora Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Yaşar UCBAŞ

**Üye** : Prof. Dr. Halil İPEK

**Üye** : Prof. Dr. Hakan BENZER

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Kemal BİLİR

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Hakan DÜNDAR

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. Yaşar Ucaş danışmanlığında hazırlamış olduğum “Farklı İşlem Parametrelerinin Altın Flotasyonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı DOKTORA 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. 16/01/2020

Semih Oluklulu

İmza

## ÖZET

Bu çalışmada, Artvin, Yusufeli bölgesinin düşük tenörlü altın cevherinin flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi olanakları araştırılmıştır. Mineralojik analizlere göre cevher, tipik bir epitermal altın yatağı olarak tanımlanmaktadır ve 1,40 g/t Au, %0,20 Cu, %5,20 Fe ve %1,40 S içermektedir. Flotasyon deneyleri, Loesche GmbH tarafından valsli dik değirmende kuru olarak öğütülmüş temsili cevher örneği üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar, kaba flotasyon, açık devre ve kapalı devre flotasyon deneylerinden oluşmaktadır. Kaba flotasyon deneylerinde, P<sub>80</sub> tane boyutu, pH, köpürtücü dozajı, toplayıcı tipi ve dozajı, flotasyon süresi, pH ayarlayıcı, E<sub>h</sub> ve koşullandırma süresinin Au, Cu, Fe ve S tenör ve verimlerindeki etkileri irdelenmiştir. Sonrasında, kaba flotasyon deneyleri ile belirlenen parametrelerin nihai konsantrenin verim ve tenör değerlerinde göstereceği etkileri araştırmak amacıyla iki temizleme kademesinden oluşan açık devre flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde de temizleme kademelerinde altın ve bakırın verim ve tenör değerlerini önemli ölçüde etkileyebileceği düşünülen, tane boyutu, pH, koşullandırma süresi, toplayıcısız flotasyon ve flotasyon süreleri parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Son olarak açık devre flotasyonu ile pekiştirilen şartlarda, bir kapalı devre flotasyon deneyi gerçekleştirilerek, belirlenen şartların uygulanabilirliği, süpürme kademesinin de ilavesi ile elde edilebilecek nihai tenör ve verim değerlerinin araştırılması sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalar, Au ve Cu'nun toplayıcısız flotasyon ile seçimli olarak yüzdürülebileceğini göstermektedir. Benzer olarak, yüksek Au ve Cu seçimliliğinin, kısa koşullandırma ve kısa flotasyon süreleri ile toplayıcılı olarak da sağlanabileceği tespit edilmiştir. Bu bulgular, sülfürlü minerallerin yaş öğütmesinde meydana gelen ve flotasyonun seçimliliğine negatif etki eden galvanik etkileşimlerin, kuru öğütme sayesinde tamamen veya kısmen ortadan kaldırılması ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** altın, bakır, flotasyon, toplayıcısız flotasyon, kuru öğütme

## SUMMARY

In this study, flotation possibilities of a low grade gold ore from Artvin Yusufeli region were investigated. According to the mineralogical analyzes, ore is defined as a typical high-sulphidation epithermal gold ore, containing 1,40 g/t Au, 0,20% Cu, 5,20% Fe and 1,40% S. Bench scale flotation experiments were carried out with the representative samples of the ore, which were previously dry ground at Loesche GmbH by vertical roller mill.

Experimental studies consist of rougher flotation, open circuit and locked cycle flotation tests. In rougher flotation tests, the effects of flotation parameters such as P<sub>80</sub> size, pH, frother dosage, collector dosage and type, flotation times, pH modifier, Eh and conditioning times were investigated in terms of Au, Cu, Fe and S recoveries and grades. Following that, in order to investigate the effects of the parameters determined by rougher flotation tests on the recoveries and grades of the final concentrate, open circuit flotation tests consisting of two cleaning stages were carried out. In these tests, the effects of grain size, pH conditioning time, collectorless flotation and flotation times parameters, which are thought to affect significantly the recovery and grade values of gold and copper in cleaning stages, were studied. Finally, in conditions strengthened by open circuit flotation tests, a locked cycle flotation test was carried out by adding the scavenger stage, to investigate applicability of the specified conditions and grade and recovery values of the final concentrate.

Experimental studies revealed that, Au and Cu could be floated selectively without a collector. Similarly, it was found that high Au and Cu selectivity could also be obtained with short conditioning and short flotation times with the collector as well. It was concluded that, these findings can be explained with the galvanic interactions which affects selectivity negatively during the wet grinding, which were partially or completely eliminated by the dry grinding.

**Keywords:** gold, copper, flotation, collectorless flotation, dry grinding

## TEŞEKKÜR

Çalışmamın başından bu yana, bana yol gösteren, fikir ve desteklerini esirgemeyerek her anlamda yanımda olan kıymetli hocalarım ve danışmanlarım Prof. Dr. Yaşar UCBAŞ ve Prof. Dr. Volkan BOZKURT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın her aşamasında değerli görüş ve fikirleriyle katkı sağlayan, zamanını paylaştan Prof. Dr. Hakan BENZER'e teşekkürü borç bilirim.

Örneklerin hazırlanmasındaki ve deneysel çalışmalardaki katkılarından ötürü Dr. Serkan GÖKÇEN'e teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen Bilimsel Araştırma Projesi (BAP: 2019-2570) aracılığıyla aynı katkıları sunan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na, sağladığı imkanlardan dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Sevgi ve şefkatleriyle her zaman yanımda olduğunu hissettiren, her türlü nazımı, kaptırımı çeken ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili anneme, babama, canım kardeşime teşekkür ederim.

Son olarak sabırla, hoşgörüsü ve en önemlisi sevgiyle yanımda olduğunu hep bildiğim, hissettiğim sevgili eşim, hayat arkadaşım Sinem OLUKLULU'ya sonsuz teşekkürlerimi iletirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>vi</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>3</b>
2.1. Altının Oluşumu ve Sınıflandırılması .....	3
2.2. Altın Mineralleri .....	6
2.3. Altının Zenginleştirilmesi .....	7
2.3.1. Gravite ayırması .....	7
2.3.2. Liç yöntemleri .....	8
2.3.3. Diğer yöntemler .....	10
2.3.4. Flotasyon .....	10
<b>3. ALTIN FLOTASYONU</b> .....	<b>13</b>
3.1. Etkileyen Parametreler .....	13
3.1.1. Altının yüzey özellikleri .....	13
3.1.2. Tane boyu ve şekli .....	14
3.1.3. Gang mineralleri ve yüzey kaplamaları .....	17
3.1.4. pH .....	18
3.1.5. Pülp potansiyeli ( $E_h$ ) .....	21
3.2. Kullanılan Kimyasallar .....	24
3.2.1. Toplayıcılar .....	24
3.2.2. Köpürtücüler .....	29
3.2.3. Canlandırıcılar .....	30
3.2.4. Bastırıcılar .....	31
3.3. Toplayıcısız Flotasyon .....	33
3.4. Endüstriyel Uygulamalar .....	35

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>44</b>
4.1. Materyal .....	44
4.1.1. Mineralojik analizler .....	45
4.1.2. Kimyasal analizler .....	47
4.1.3. Tane boyutu analizleri .....	48
4.1.4. Flotasyon reaktifleri .....	52
4.2. Yöntem .....	53
4.2.1. Flotasyon deneyleri .....	53
4.2.2. Stokiyometrik Hesaplamalar .....	56
4.2.3. Besleme Tenörlerinin Tutarlılığı .....	57
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>60</b>
5.1. Kaba Flotasyon Deneyleri .....	60
5.1.1. Tane boyutu .....	60
5.1.2. pH .....	63
5.1.3. Köpürtücü dozajı .....	66
5.1.4. Toplayıcı dozajı .....	68
5.1.5. Toplayıcı tipi .....	71
5.1.6. Flotasyon süresi .....	73
5.1.7. pH ayarlayıcı .....	77
5.1.8. $E_h$ .....	80
5.1.9. Koşullandırma süresi .....	83
5.2. Açık Devre Flotasyon Deneyleri .....	89
5.2.1. Tane boyutu .....	90
5.2.2. pH .....	92
5.2.3. Koşullandırma süresi .....	97
5.2.4. Toplayıcısız flotasyon .....	99
5.2.5. Flotasyon süreleri .....	102
5.3. Kapalı Devre Flotasyon Deneyi .....	105
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>110</b>
6.1. Sonuçlar .....	110

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.2. Öneriler .....	115
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ</b> .....	<b>117</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>124</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Altının, sülfür mineralleriyle bulunuş şekilleri (Marsden ve House, 2006) .....	5
2.2. Flotasyonun şematik gösterimi .....	11
2.3. Flotasyonu etkileyen parametreler .....	12
3.1. Temas açısının şematik gösterimi .....	13
3.2. Bazı metal mineralleri için tane boyu – verim ilişkisi (Fuerstenau vd., 2007) .....	15
3.3. İnce altın tanelerinin flotasyon verimleri (Chryssoulis ve McMullen, 2016) .....	15
3.4. Toplayıcılı ve toplayıcısız şartlarda altın verimlerinin tane boyutlarına göre değişimi a) Toplayıcısız durum b) Toplayıcılı durum (Klimpel, 1999) .....	16
3.5. Bazı metal sülfür minerallerinde toplayıcı miktarı - kiritk pH ilişkisi .....	19
3.6. Altın-pirit verimlerinin pH ile ilişkisi (Nagaraj vd., 1992) .....	20
3.7. Farklı pH ayarlayıcıların Au verimine etkisi a) Verimin zamana göre değişimi b) Verimin pH'a göre değişimi (Bulatovic, 1997) .....	21
3.8. Kurşun-çinko cevherinde kuru ve yaş öğütmenin pülp potansiyeli (a) ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu (b) üzerindeki etkileri (Seke ve Pistorius, 2006) .....	23
3.9. İki farklıcevher için Eh – Verim ilişkisi a) Saattopora cevheri b) Pirila cevheri (Hintikka ve Leppinen, 1995) .....	24
3.10. Toplayıcı türünün Au ve Cu verimlerine farklı pH'lardaki etkisi a) Bakır verimi b) Altın verimi (Klimpel, 1999) .....	26
3.11. Toplayıcı türü ile Au – Pirit verimi ilişkisi (Bulatovic, 1997) .....	27
3.12. Altın veriminin ksantat tipiyle ilişkisi (Bulatovic, 2010) .....	28
3.13. Altın yüzeylerinde Ag, Cl miktarı ilişkisi (Chryssoulis ve Dimov, 2004) .....	31
3.14. Beaconsfield altın madeni akım şeması (Holder, 2013) .....	38
3.15. Bougainville altın madeni akım şeması (Woodcock vd., 2007) .....	39
3.16. Cadia Hill altın madeni flotasyon tesisi akım şeması (Cesnik vd., 2005) .....	40
3.17. Kanowna Belle Altın Madeni akım şeması (Newcombe vd., 2013) .....	42
3.18. Lepanto altın-bakır madeni akım şeması (Woodcock vd., 2007) .....	42
3.19. Telfer altın madeni flotasyon akım şeması (Zheng ve Manton, 2010) .....	43
4.1. Deneysel süreçlerin şematik gösterimi .....	44
4.2. İnce kesit için alınan karot örneklerinden bazıları .....	45
4.3. Örneğe ait bazı SEM görüntüleri a) Kalkopirit konağında altın b) Altın ve pirit taneleri c) Kalkopirit altın katı çözeltisi d) Kalkopirit ve altın taneleri .....	46
4.4. Örneğe ait XRD analizi .....	47
4.5. Farklı P <sub>80</sub> boyutuna öğütülen örneklerin tane boyu dağılımları .....	49

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.6. Tane boyutlarına göre boyut fraksiyonlarındaki malzeme miktarları ve Au, Cu, Fe ve S dağılımları a) 48 µm b) 79 µm c) 100 µm .....	51
4.7. Deneyleerde kullanılan flotasyon düzeneği .....	53
4.8. Hesaplanan tenör değerlerinin kontrol grafiği .....	59
5.1. Tane boyunun verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (pH 8, 24g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S .....	61
5.2. Tane boyutuna göre konsantre miktarının değişimi (pH 8, 24g/t AF70).....	62
5.3. pH'ın verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P <sub>80</sub> 100 µm, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S .....	64
5.4. Konsantre miktarının pH'a bağlı olarak değişimi (P <sub>80</sub> 100 µm, 24 g/t AF70).....	65
5.5. Köpürtücü dozajının Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörleri üzerindeki etkisi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8) a) Au b) Cu c) Fe d) S .....	66
5.6. Köpürtücü dozajına bağlı göre konsantre miktarı (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8).....	67
5.7. Toplayıcı dozajının Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerine etkisi (pH 8, 100 µm, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S .....	69
5.8. Toplayıcı dozajına bağlı göre konsantre miktarı (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8).....	71
5.9. Toplayıcı tipinin Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörleri üzerindeki etkisi (100 µm, pH 8, 15 g/t toplayıcı) a) Au b) Cu c) Fe d) S.....	72
5.10. Toplayıcısız şartta Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerinin zamana göre değişimi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 10,5).....	74
5.11. Toplayıcılı şartta Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerinin zamana göre değişimi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 10,5, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894).....	76
5.12. Kireç ve soda külünün verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S .....	78
5.13. Konsantre miktarının pH ayarlayıcıya göre değişimi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70) .....	79
5.14. Na-ditiyonitin farklı pH değerlerinde pülp potansiyeli üzerindeki etkisi .....	81
5.15. Na-ditiyonitin farklı pH değerlerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P <sub>80</sub> 100 µm, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S.....	82
5.16. Koşullandırma süresinin toplayıcısız şartta verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8, 24 g/t AF70).....	84
5.17. Konsantre miktarının koşullandırma süresine göre değişimi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 8, 5 g/t, toplayıcısız 24 g/t AF70) .....	85
5.18. Koşullandırma süresinin toplayıcılı şartta verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 10,5, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70).....	86
5.19. Konsantre miktarının koşullandırma süresine bağlı olarak değimi (P <sub>80</sub> 100 µm, pH 10,5, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70).....	87
5.20. Açık devre flotasyon deneylerinin şematik gösterimi.....	89

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.21. P <sub>80</sub> boyutunun flotasyon kademelerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a)Au b)Cu c)Fe d)S .....	90
5.22. Temizleme kademelerinde farklı pH değerlerinin verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a) Au b)Cu c) Fe d)S.....	93
5.23. Kaba flotasyon pH'sının temizleme kademelerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a)Au b)Cu c)Fe d)S.....	95
5.24. Koşullandırma süresinin toplayıcı şartta flotasyon kademelerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkileri a)Au b)Cu c)Fe d)S.....	97
5.25. Toplayıcılı ve toplayıcısız şartta, flotasyon kademelerinde verim ve tenör değerlerinin karşılaştırılması a)Au b)Cu, c)Fe d)S.....	100
5.26. Flotasyon süresinin flotasyon kademelerinde, verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a)Au b)Cu c)Fe d)S .....	103
5.27. Kapalı devre flotasyon deneyinin şematik gösterimi .....	106
5.28. Kapalı devre flotasyon deneyi, giren-çıkan ürünler dengesi.....	107

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bazı altın mineralleri (Chryssoulis ve McMullen, 2016).....	7
3.1. Altın flotasyonunda kullanılan bazı toplayıcılar (Cytec Industries, 2010) .....	25
3.2. Dünyada flotasyon yöntemi uygulanan altın madenlerinden bazıları.....	36
4.1. Cevher örneğinin kimyasal analizi.....	48
4.2. Farklı P <sub>80</sub> boyutlarında tane boyu dağılımları ve kimyasal analizler.....	50
4.3. Toplayıcısız şartta flotasyon parametrelerinin etkisi .....	54
4.4. Toplayıcılı şartta flotasyon parametrelerinin etkisi .....	54
4.5. Deneyle ilgili olarak kullanılan flotasyon hücreleri ve hacimleri .....	55
4.6. Hücre hacmine göre karıştırma hızları ve hava miktarları.....	55
4.7. Flotasyon deneylerinde uygulanan koşullandırma prosedürü.....	56
4.8. Kalkopirit ve piritin stokiyometrik dengesi .....	57
4.9. Deneysel besleme tenörlerinin tanılayıcı istatistiği.....	58
5.1. Zamana bağlı olarak gerçekleştirilen deneylerde uygulanan flotasyon süreleri .....	73
5.2. Toplayıcısız şartta flotasyon sürelerine bağlı olarak konsantrenin altın, kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demir içerikleri .....	75
5.3. Toplayıcılı şartta flotasyon sürelerine bağlı olarak konsantrenin altın, kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demir içerikleri .....	77
5.4. pH 8’de Na-ditiyonitin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	81
5.5. pH 10,5’da Na-ditiyonitin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	83
5.6. Toplayıcısız şartta koşullandırma sürelerine bağlı olarak konsantrenin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	85
5.7. Toplayıcısız şartta koşullandırma sürelerine bağlı olarak konsantrenin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	87
5.8. Açık devre flotasyon deneylerinde flotasyon şartları.....	89
5.9. P <sub>80</sub> boyutuna göre flotasyon kademelerinde konsantre miktarının değişimi.....	91
5.10. Temizlemede uygulanan pH’a bağlı olarak nihai konsantrede kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması.....	94
5.11. Kaba flotasyonda uygulanan pH’a bağlı olarak nihai konsantrede kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	96
5.12. Koşullandırma sürelerine göre nihai konsantredeki kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	98
5.13. Koşullandırma sürelerine bağlı olarak konsantre miktarlarının karşılaştırılması .....	99
5.14. Toplayıcılı ve toplayıcısız şartta nihai konsantredeki kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması .....	101

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.15. Kademelerde uygulanan flotasyon süreleri .....	102
5.16. Flotasyon sürelerine göre, konsantre miktarlarının değişimi .....	105
5.17. Flotasyon sürelerine göre sürelerine göre nihai konsantredeki kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması.....	105
5.18. Kapalı devre flotasyon deneyinde uygulanan şartlar .....	106
5.19. Kapalı devre flotasyon deneyi sonuçları .....	108
5.20. Kapalı devre flotasyon deneyinin son döngüsünde temizleme kademesi artıklarındaki Cu, Fe ve S verim ve tenör değerleri .....	108
5.21. Kapalı devre flotasyon deneyinin 5 ve 6. döngülerinde elde edilen konsantre ve artığın verim ve tenör değerleri.....	109



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
$\theta$	Temas açısı
$\gamma$	Yüzey gerilimi
$\gamma_{K/H}$	Katı-hava arayüzeyi gerilimi
$\gamma_{S/H}$	Sıvı-hava arayüzeyi gerilimi
$\gamma_{K/S}$	Katı-sıvı arayüzeyi gerilimi
$\mu\text{m}$	Mikro metre
$\sigma$	Standart sapma
dk	Dakika
g/t	tonda gram
mV	Milivolt
s	Saniye
<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
AAS	Atomik Adsorpsiyon Spektrometresi
ATP	Aminothiophenol
CIP	Pülpte karbon
Cp	Kalkopirit
CIL	Liçte karbon
CIP	Pülpte karbon
CIC	Kolonda karbon
CMC	Karboksimetil selüloz
DTP	Ditiyofosfat
EDX	Enerji yayımlı X-Işını Analizi
EDTA	Etilendiamin tetraasetik asit
ICP-ES	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Emisyon Spektrometresi
ICP-MS	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi
MIBC	Metil izobütil karbinol
MLA	Mineral serbestleşme analizi
MBT	Mercaptobenzothiazole
NaIBX	Sodyum izobütil ksantat

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
NaEX	Sodyum etil ksantat
NS-Fe	Sülfür içermeyen demir
PAX	Potasyum amid ksantat
PEX	Potasyum etil ksantat
PGME	Poliglikol metil eter
Py	Pirit
RSs	Relatif standart sapma
QEMSCAN	Kantitatif Elektron Mikroskobu Analizi
SCE	Doymuş civa(I) klorür elektrodu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SHE	Standart hidrojen elektrodu
XRD	X ışını difraksiyonu

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Altının zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemleri gravite ayırması, siyanür liçi, hidrometalurjik süreçler ve flotasyon olarak sınıflandırmak mümkündür. Ancak uygun yöntemin seçimi cevherin miktarı, tenörü, dağılımı, mineralojik özellikleri gibi birçok değişkene göre farklılıklar göstermektedir. Günümüzde, işletilen ya da işletilmeye aday altın cevherlerinin düşük tenörlü ve karmaşık yapıda olmaları bu yöntemlerin birinin ya da birkaçının birlikte uygulanmasını gerektirmekte, bazı durumlarda ise birinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır (Klimpel, 1995).

Gravite yöntemleri özellikle görece iri boyutlu, kolay işlenebilir altın cevherleri için yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak günümüz altın cevherlerinin çoğunlukla düşük tenörlü, karmaşık yapıda olması nedeniyle gravite ayırması genellikle yetersiz kalmakta ve uygun koşullarda ön zenginleştirme amacıyla uygulanabilmektedir. Liç yöntemleri dünyada yaygın olarak kullanılmasına karşın bazı cevher tipleri için uygulanması mümkün ya da ekonomik değildir. Ayrıca çevresel kaygılar nedeniyle, özellikle ülkemizde son yıllarda liç yöntemine karşı önemli bir toplumsal muhalefet oluşmuştur.

Flotasyon, görece düşük yatırım ve işletme maliyetleri, esnek ve kolay uyarlanabilir olması, mineral seçimli olarak uygulanabilmesi gibi avantajları nedeniyle özellikle sülfürlü minerallerin zenginleştirilmesinde uzun yıllardır uygulanmaktadır. Fiziko-kimyasal bir süreç olan flotasyon işleminin performansı, cevher mineralojisinden, öğütme sistemine, pülp kimyasından, reaktif seçimine kadar birçok parametrenin etkisiyle önemli değişiklikler göstermektedir (Klimpel, 1995). Flotasyon, sülfürlü altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde de uzun yıllardır uygulanmakla birlikte, gerek altın cevherlerinin karmaşık mineralojik yapısı, gerekse altının bu cevherler içerisinde bulunuş biçimi flotasyon yönteminde uygulanacak parametrelerin seçimini kökten değiştirebilmektedir (Klimpel, 1999; Dunne, 2005).

Özellikle sülfürlü cevherlerin flotasyonunu doğrudan ilgilendiren bir başka konu ise öğütmedir. Geleneksel öğütme yöntemlerinin galvanik etkileşimler yoluyla gerek altın, gerekse diğer sülfürlü minerallerinin flotasyon davranışları üzerinde önemli bir etkisinin

olduğu bilinmektedir (Zhang vd., 1997; Teague vd., 1999b). Metalik minerallerin öğütülmesinde henüz yeni sayılabilecek bir uygulama olan kuru öğütmenin, geleneksel öğütme yöntemlerinden kaynaklanan bazı dezavantajları ortadan kaldıracıabileceği düşünölmekle birlikte, kuru öğütmenin flotasyon üzerindeki etkileri ile ilgili çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır (Feng ve Aldrich, 2000; Seke, 2006; Tokcan, 2017).

Bu çalışmada, kuru olarak öğütölmüş olan bir sülfürlü altın cevherinin flotasyon yöntemi kullanılarak zenginleştirilmesi olanakları, tane boyu, pH,  $E_h$  düzenleyici, toplayıcısız flotasyon, toplayıcı tipi ve dozajı, köpürtücü dozajı, koşullandırma süresi ve köpük toplama süresi gibi bazı temel flotasyon parametreleri etkisinde irdelenmiştir. Parametrelerin etkileri, nedenleri ile açıklanmaya çalışılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Altının Oluşumu ve Sınıflandırılması

Altın, yaygın olarak kabul edildiği şekilde, yaklaşık 2.5 milyar yıl önce Archean devrinde yaşanan yoğun metamorfizma sonucu hidrotermal sıvılar ve volkanik faaliyetler ile yer kabuğuna dağılmıştır. Ancak oluşum sürecinden günümüze kadar etkili olan tektonizma, volkanizma, erozyon, kimyasal çözünme, soğuma, sıcaklık gibi farklı fiziksel ve kimyasal olaylar altının, değişken formlarda ve çok geniş bir yelpazede farklı minerallerle birlikte cevherleşmesine yol açmıştır. Bu çeşitlilik, nedeniyle altın cevherleri için genel kabul görmüş bir sınıflama olmamakla birlikte, araştırmacıların uygulama alanlarına göre yaptığı farklı sınıflamalar mevcuttur (Boyle, 1979; Poulsen vd., 2000; Rowe ve Zhou, 2007). Bu sınıflandırmalardan bazıları şunlardır;

- Oluşum özelliklerine göre, (epitermal, mezotermal,vb.),
- Tektonik yapılarına göre, (magmatik, metamorfik, sedimanter vb.),
- Yataklanma çeşitlerine göre, (damar, girişim, ağ yapılı vb.),
- Özgün tipolojisine göre (Carlin, Witwatersrand, Homestake vb.).

Cevher hazırlama perspektifinden bakıldığında ise altın cevherlerinin sınıflandırılması, çoğunlukla altının bulunuş şekline göre yapılmaktadır. Buna göre altın cevherlerini, plaserler, oksitli cevherler, gümüşçe zengin cevherler, tellüritler, karbon bazlı cevherler, metal sülfürler olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırma da yer alan cevherlerin genel özellikleri aşağıda verilmektedir (Zhou vd., 2004; Marsden ve House, 2006).

**Plaserler:** Altının, çeşitli fiziksel (nehirler, atmosfer olayları vb.) ve kimyasal etkiler sonucunda, ana cevher kütesinden taşınması ya da yerinde serbestleşmesi sonucu oluşmuş altın yataklarıdır. Bu tip yataklarda genellikle iri ve nabit taneler halinde bulunan altın, çoğunlukla serbestleştirme gerektirmeksizin gravite yöntemleriyle zenginleştirilmektedir.

**Kolay işlenebilir altın cevherleri:** Altın ve diğer metalleri taşıyan hidrotermal çözeltilerin soğuyup, çökmesi başta kuvars olmak üzere sıklıkla silikat bazlı minerallerin damar, çatlak ve fissürlerinde gerçekleşmiştir. Bu yüzden altın kuvars birliktelikleri dünyada üretilen altının büyük bir kısmını temsil etmektedirler. Güney Afrika'da yer alan Witwatersrand yatakları bu tipteki yatakların en belirgin örneklerindedir. Bu tip cevherlerde, altın sıklıkla nabit ve kolay serbestleşir halde bulunduğu için genellikle gravite ayırması ya da siyanür liçi yöntemleri ile kolayca zenginleştirilebilmektedir.

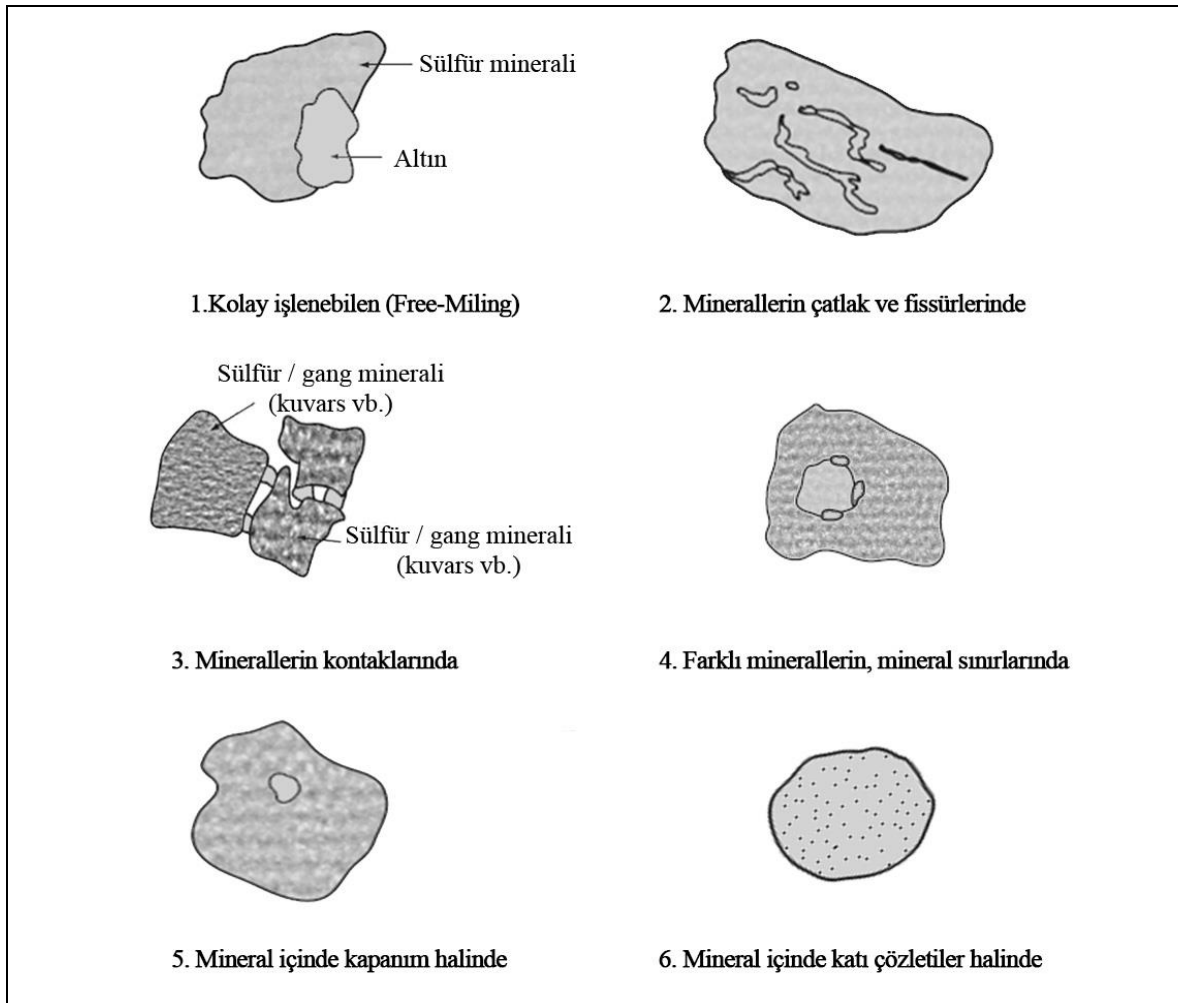
**Okside cevherler:** Genellikle ana cevher kütlelerinin oksidasyonu ve atmosferik koşullardan etkilenmesi sonucu oluşan ve alterasyonla yan kayaçlarından kolaylıkla ayrılan cevherlerdir. Bu cevherler sıklıkla amorf silikatlar, kil mineralleri, sülfat tuzları, oksit, hidroksit ve karbonatlar içerirler. Altın bu cevherlerde genel olarak nabit altın ya da demir sülfürlerin oksidasyon ürünleri olan hematit ( $Fe_2O_3$ ), manyetit ( $Fe_3O_4$ ), götit ( $FeOOH$ ) ve limonit ( $FeOOH \cdot nH_2O$ ) ile birlikte bulunur.

**Gümüşçe zengin cevherler:** Altın birçok cevher yatağında gümüş ile birlikte bulunmaktadır. Gümüş tenörünün 10 g/t'dan yüksek olduğu cevherlerde altın genellikle elektrik olarak temsil edilir. Gümüşün yüksek reaktivitesi hem flotasyon, hem de liç süreçlerinde farklı etkilere sahiptir ve gümüş miktarı genellikle proses seçiminde belirleyici olmaktadır.

**Tellüritler:** Altın tellür alaşımları, nabit altın ve altın-gümüş alaşımları dışında, ekonomik değeri bulunan tek altın minerali kaynağıdır. Nadiren nabit altın ve elektrik içeren bu tür cevherleri çeşitli sülfür mineralleri ve hessite ( $Ag_2Te$ ) formunda gümüşle birlikte bulunmaktadır. Proses açısından tellür minerallerinin çözünme kinetikleri yavaştır, ancak flotasyon tepkileri sülfür mineralleriyle benzerlik göstermektedir.

**Karbon kökenli cevherler:** Bu tip cevherlerde altın genellikle pirit, pirotit gibi metal sülfürlerle birlikte, karbon kökenli malzemeler içinde (grafit, şeyl vb.) dağılmış halde bulunmaktadır. Karbon kökenli cevherler düşük özgül ağırlıkları ve hidrofobik doğaları gereği, kolayca köpüğe taşınarak düşük flotasyon verimlerine neden olmaktadır (Dunne, 2005). Liç süreçlerinde ise çözülmüş altın komplekslerini adsorbe ederek altın verimini düşürmektedir (Harris, 1990; Tabatabaei vd., 2014).

**Metal sülfürler:** Sülfür mineralleri, nabit altının ardından en önemli altın kaynağıdır (Yannopoulos, 1991). Altın, sülfür mineralleri içinde serbest taneler halinde bulunabildiği gibi, bu minerallerin kristal yapıları içinde mikron altı boyutlarda dağılmış halde de oluşabilmektedir (Şekil 2.1). Altının, diğer minerallerinin kristal yapıları içinde bulunduğu durumlarda, söz konusu mineraller “altın taşıyıcılar” ya da “konak mineraller” olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Altının, sülfür mineralleriyle bulunuş şekilleri (Marsden ve House, 2006)

Pirit doğada en çok bulunan sülfür mineralidir. Aynı zamanda altının konak minerali olarak da en sık karşılaşılandır. Ayrıca arsenopirit ( $FeAsS$ ) bazı cevher yataklarının önemli bir bölümünü temsil etmektedir. Daha az yaygın olmakla birlikte pirotit ( $Fe_{1-x}S$ ) ve markazit ( $Fe_2S$ ) de altın ile birlikte bulunan diğer demir sülfür mineralleridir. Demir sülfürlerin yanı sıra, kalkopirit, galen, sfalerit gibi bazı metal sülfürler de sıkça karşılaşılan altın taşıyıcı minerallerden bazılarıdır (Chryssoulis ve McMullen, 2016).

Sülfür içeren altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde izlenecek yol, altın minerallerinin, hangi sülfür minaralleriyle birlikte bulunduğu ve bu mineraller içinde bulunuş biçimiyle yakından ilişkidir. Görece kolay serbestleşebilen, altın minerallerinin yüzeysel olarak bağlı olduğu cevherlerde, sınıflandırma sonrası gravite ayırmasını takiben flotasyon ve siyanür liçi uygulamaları yaygındır. Ancak bornit ( $Cu_5FeS_4$ ), kalkolisin ( $Cu_2S$ ), pirotit ( $Fe_{1-x}S$ ), arsenopirit ( $FeAsS$ ), stibnite ( $Sb_2S_3$ ) gibi bazı sülfür minerallerinin, yüksek asit reaktifliği ve oksijen tüketimleri sebebiyle, liç bu tipteki cevherler için genellikle doğrudan uygulanabilir değildir (O'Connor ve Dunne, 1994). Ayrıca, ince altın tanelerinin, sülfür mineralleri içinde kapanım halinde olduğu ve/veya altının kimyasal olarak bu minerallere bağlı bulunduğu durumlarda, flotasyon yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Refrakter olarak değerlendirilen bu tip altın cevherlerinde yaygın olarak sülfür flotasyonunu takiben kavurma ve/veya basınçlı liç süreçleri takip edilmektedir (Harris, 1990; Allan ve Woodcock, 2001; Tabatabaei vd., 2014).

## 2.2. Altın Mineralleri

En nadir elementlerden biri olan altın yer kabuğunda ortalama olarak 0,005 g/t oranında bulunur. Nadir olmasının yanında altın yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay şekil alması, oksitlenmemesi, kimyasal dayanımı, yüksek özgül ağırlığı gibi pek çok özelliği sebebiyle, elementler arasında özel bir yere sahiptir (Marsden ve House, 2006). Kararlı yapısı nedeniyle yalnızca belirli formlarda bulunan altın, doğada farklı alışımlar halinde bulunur.

Altının en yaygın karşılaşılan formu nabit altındır. Nabit altın genellikle %10-20 oranında gümüş içermektedir. Alaşım içeriğindeki gümüş miktarının %20'den fazla olduğu durumlarda alaşım elektrum olarak adlandırılırken, %50'den fazla gümüş içeren altın-gümüş alaşımı kustelit olarak isimlendirilir. Altın-bakır alaşımaları gümüştten sonra en yaygın karşılaşılan alaşımlardır. Altın ayrıca, tellür, civa, platin grubu elementleri, bizmut, antimon, uranyum ve rodyum elementleri ile de alaşım yapmaktadır, ancak bu oluşumlar genellikle cevher yatağına özgüdür. Çizelge 2.1.'de bazı önemli altın mineralleri verilmektedir.



Çizelge 2.1. Bazı altın mineralleri (Chryssoulis ve McMullen, 2016)

Mineral	Formül	Au İçeriği (%)
Nabit Altın	Au	>75
Electrum	(Au, Ag)	>50-75
Kustelite	(Ag, Au)	<50
Aurostibite	AuSb <sub>2</sub>	43-51
Maldonite	Au <sub>2</sub> Bi	63-68
Auricupride	Cu <sub>3</sub> Au	50-56
Tetra-auricupride	AuCu	70-76
Yuanjiangite	AuSn	62.4
Hunchunit	Au <sub>2</sub> Pb	62.6
Calaverite	AuTe <sub>2</sub>	39-44
Krenerite	(Au, Ag)Te <sub>2</sub>	30-44
Montbrovite	(Au, Sb) <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	38-45
Sylvanite	(Au, Ag) <sub>2</sub> Te <sub>4</sub>	23-35
Bessmertnovite	Au <sub>4</sub> Cu(Te, Pb)	68-88
Bogdannovite	(Au, Te, Pb) <sub>3</sub> (Cu, Fe)	57-63
Liujiyinite	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>	18,6-36
Fishesserite	Ag <sub>3</sub> AuSe <sub>2</sub>	~27,3

### 2.3. Altının Zenginleştirilmesi

Altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde uygulanan pek çok yöntem bulunmaktadır. Ancak bu yöntemlerden hangisini tercih edileceği başta cevher mineralojisi olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Altın zenginleştirmede tercih edilecek sürecin seçiminde belirleyici olan cevherin mineralojik yapısıdır. Bu yöntemlerden başlıcaları gravite ayırması, flotasyon ve siyanür liçidir.

#### 2.3.1. Gravite ayırması

Altının gravite ile zenginleştirilmesi antik çağlardan bu yana en yaygın olarak uygulanan yöntemdir. Gravite ayırması, mineraller arasındaki özgül ağırlık farkından yararlanılarak birbirlerinden ayrılması esasına dayanmaktadır. Yüksek yoğunluğu (19,3 gr/cm<sup>3</sup>) sayesinde altın, kuvars (2,7 gr/cm<sup>3</sup>), pirit (5,0 gr/cm<sup>3</sup>), manyetit (4,3 gr/cm<sup>3</sup>) ve feldspat (2,6 g/cm<sup>3</sup>) gibi başlıca gang minerallerinden gravite yöntemiyle ayrılabilir. Ancak gravite yönteminin uygulanabilmesi için altın tanelerinin serbest, görece iri, saf veya safa yakın olması gerekmektedir (Bayraktar ve Yarar, 1985).

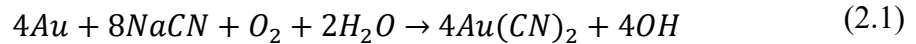
Özellikle plaser tipi yataklar altının gravite yöntemleriyle zenginleştirilmesi için son derece uygundur. Günümüzde altın cevherlerinin çoğunlukla düşük tenörlü ve refrakter yapıda olduğu göz önünde bulundurulduğunda, gravite yöntemi genellikle flotasyon ya da siyanür liçi öncesinde, gravite ile ayrılabilen altını kazanmak ya da ön konsantre almak amacıyla uygulanmaktadır (Laplante ve Gray, 2005).

Altın zenginleştirmede yaygın olarak kullanılan gravite ayırıcıları, oluklar, masalar, jigler, ağır ortam ayırıcıları ve Multi-Gravite Separatör (MGS), Knelson ve Falcon konsantratörü gibi santrifüjlü ayırıcılar olarak sıralanabilir (Gul vd., 2012).

### 2.3.2. Liç yöntemleri

Uygulama şekli ve kimyasından bağımsız olarak, liç yöntemleri temel olarak altının, farklı kimyasallar yardımıyla çözündürülerek, gang minerallerinden ayrılması esasına dayanır. Çözündürmede kullanılan en yaygın kimyasal sodyum siyanür olmakla birlikte, klorine/klorit, çoklu asit çözeltileri, tiyosiyanat, tiyoüre, tiyosülfat, brom ve iyot çözeltileri de kullanılabilir. (Marsden ve House, 2006).

Altın, alkali sodyum siyanür (NaCN) çözeltisinde Eşitlik (2.1)'e göre çözünmektedir.



Çözünme performansı fiziksel ve kimyasal birçok faktöre göre değişmekle beraber bu faktörlerin en önemlisi cevher mineralojisidir. La Brooy vd. (1994), liç performansını etkileyen mineralojik faktörleri üç başlıkta değerlendirmektedir. Bunlar;

- 1) Diğer mineral taneleri içerisinde kapanım halinde olan altın tanelerine çözücülerin ulaşamaması sonucu reaksiyonun gerçekleşmemesi,
- 2) Cevher içerisinde çözücülerle reaksiyon veren diğer malzemelerin varlığı sonucu yüksek reaktif tüketimlerinin ve düşük altın verimlerinin ortaya çıkması
- 3) Bazı malzemelerin, oluşan altın-siyanür komplekslerini adsorplayarak kayıplara yol açmasıdır.

Cevherin mineralojik yapısı ve sürecin ekonomikliğine göre liç işleminin uygulanmasında tercih edilen yöntemler farklılık göstermektedir. Bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

**Tank Liçi:** Yüksek tenörlü, ince altın taneleri içeren cevherlere uygulanmaktadır. Gerekli serbestleşme tane boyutuna öğütülen cevher, karıştırmalı tanklarda liç çözeltisi ile muamele edilmektedir.

**Yığın Liçi:** Düşük tenörlü ince altın taneleri içeren cevherlerde uygulanmaktadır. Cevher genellikle ocaktan çıkarıldığı halde ya da kırma işlemleri sonrasında geçirimsiz bir tabaka üzerine serilerek, liç çözeltisi fiskeleme ile yığına uygulanır. Doğal akışla yığın altına ulaşan dolu çözelti toplanır.

**Vat Liçi:** Yüksek tenörlü, serbest halde ve görece daha iri cevherlerin zenginleştirilmesinde uygulanmaktadır. Tank liçinden farklı olarak kesikli olarak tanka alınan cevherler belirli sürelerde çözeltiye maruz bırakılarak çözündürme işlemi gerçekleştirilmektedir

**Yerinde Liç:** Eski üretimlerde veya düşük tenörlü çözünebilir altın bulunduran cevher yataklarında, cevherin üretiminin ekonomik olmadığı ve uygun jeolojik yapıdaki cevher yataklarında uygulanmaktadır. Cevher yatağına verilen siyanür çözeltisi, formasyonun kırık ve çatlaklarından altını çözerek, yatağın alt seviyelerinde toplanarak yeryüzüne pompalanmaktadır.

Liç süreçleri sonrasında, altın-siyanür kompleksleri olarak çözeltiye geçen altının, çözüldükten tekrar altın olarak kazanılması gerekmektedir. Çözeltideki altını kazanmak için uygulanan yöntemler, aktif karbon adsorpsiyonu (CIP, CIL, CIC), çinko tozu ile çöktürme (Merill-Crowe yöntemi), iyon değişimi ve elektroliz olarak sıralanabilir (Bayraktar ve Yazar, 1985; Yannopoulos, 1991).

### 2.3.3. Diğer yöntemler

Altın zenginleştirmede, gravite ayırması, flotasyon ve liç dışında uygulanabilen, ancak endüstriyel olarak uygulanmayan ya da diğer yöntemlere tamamlayıcı olarak uygulanan çeşitli yöntemler bulunmaktadır.

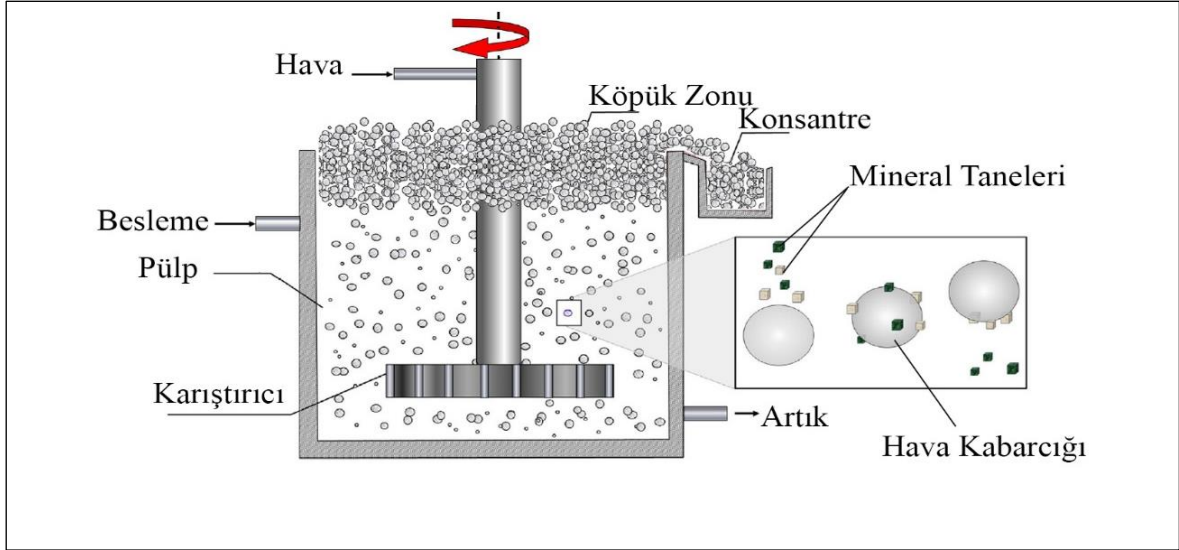
Nabit altının civa ile doğal bileşikler yapabilme özelliğine dayanan amalgamasyon bu yöntemlerin başında gelmektedir. Altın ve civanın düşük yüzey gerilimleri nedeniyle, altının civa ile teması  $Au_8Hg$ ,  $AuHg_2$  gibi bileşikler ortaya çıkarır. Asırlardır bilinen ve uygulanan yöntem, yakın geçmişte yaygın olarak gravite ile zenginleştirilen iri altın cevherlerinden altın kazanmada kullanılmıştır. Civanın insan sağlığı ve çevreye olumsuz etkileri nedeniyle uygulama alanı günümüzde giderek azalmaktadır (Bayraktar ve Yarar, 1985).

Diğer bir yöntem olan aglomerasyon ile altın kazanımı ise, oleofilik ince altın tanelerinin genellikle çok ince öğütülmüş kömür, yağ gibi hidrofobik malzemeler içerisinde hapsolarak, aglomeratlar oluşturmaya dayanan bir yöntemdir. Hidrofobik yapıları gereği kolaylıkla flotasyon yöntemiyle kazanılabilen bu aglomeratlardan pirometalurjik yöntemlerle altın elde edilebilmektedir (Sen vd., 2005; Akcil vd., 2009).

### 2.3.4. Flotasyon

Flotasyon düşük işletme maliyetleri, operasyonun esnekliği ve mineral seçimli olması gibi özellikleriyle günümüzde cevher zenginleştirme uygulamalarındaki en önemli yöntemdir (Klimpel, 1997; Fuerstenau vd., 2007). Bugün bilinen anlamıyla flotasyonun endüstriyel uygulamaları 20.yy'ın başlarında, gerçekleşmiştir ve flotasyon sayesinde geçmişte değerlendirilemeyen düşük tenörlü, karmaşık cevherlerin zenginleştirilmesi mümkün hale gelmiştir (Wills ve Napier-Munn, 2006). Altının flotasyon ile zenginleştirilmesi, flotasyon tarihçesiyle paralellik gösterse de, yaygınlaşması 1930'larda suda çözünebilen reaktiflerin (ksantat ve ditiyofosfatlar) ortaya çıkışı ile gerçekleşmiştir. Bu sayede sülfürlü minerallerin seçimli flotasyonu mümkün hale gelmiş, böylece sülfür içeren, refrakter altın cevherlerinde flotasyon uygulamaları yaygınlaşmıştır (Dunne, 2005).

En basit haliyle flotasyon, yüzeyi hidrofobik haldeki ince boyutlu değerli mineral taneciklerinin, oluşturulan hava kabarcıklarına tutunarak yüzdürülmesiyle, gang minerallerinden seçimli olarak ayrılması işlemidir. Geleneksel bir flotasyon işlemi şematik olarak Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Flotasyonun şematik gösterimi

Ancak basit tanımlamasına karşın bu işlem çok sayıda alt işlemden oluşan karmaşık bir süreçler bütünüdür. King (2001), bu süreçte gerçekleşen adımları aşağıdaki gibi sıralamaktadır.

- 1) İstenilen mineral yüzeylerinin hidrofobik hale getirilmesi,
- 2) Mineral tanelerinin, pulp içinde askıda olması,
- 3) Tanelerin oluşturulan hava kabarcıkları ile çarpışması,
- 4) Hidrofobik tanelerin, hava kabarcıklarına tutunması,
- 5) Tutunan tanelerin, hava kabarcıkları üzerinde durağan kalması,
- 6) Hava kabarcığının taneleri pulp yüzeyine taşıması.

Bu süreçlerin doğru bir şekilde gerçekleşmesi çok sayıda parametrenin bir bütünlük içinde doğru seçilmesine bağlıdır. Klimpel (1995) bu parametreleri kimyasal, operasyonel ve donanımsal olmak üzere üç başlık altında sınıflandırmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Flotasyonu etkileyen parametreler

Flotasyon, altın zenginleştirmede, tek başına uygulanabildiği gibi diğer yöntemlere tamamlayıcı olarak da uygulanabilmektedir. Serbest altın, elektrik ve altın içeren sülfür minerallerinin zenginleştirilmesinde, flotasyon doğrudan uygulanan bir yöntem olabildiği gibi, siyanür liçi uygulamaları öncesinde ön konsantre elde etmek amacıyla da kullanılabilir. Altında flotasyon uygulamaları pek çok farklı parametreye bağlı ve genellikle maden yatağına özgüdür (Klimpel, 1999). Bu nedenle konu ayrı bir başlık altında detaylı olarak ele alınmaya çalışılacaktır.



$$\gamma_{K/H} = \gamma_{K/S} + \gamma_{S/H} \cos \theta \quad (3.1)$$

Adhezyon kuvvetleri ile bir arada duran katı-hava yüzeyinin ayrılması için yapılacak olan işin miktarı:

$$W_{K/H} = \gamma_{S/H} + \gamma_{K/S} - \gamma_{K/H} \quad (3.2)$$

İki eşitliğin birleştirilmesi sonucunda ise Young eşitliği elde edilmektedir.

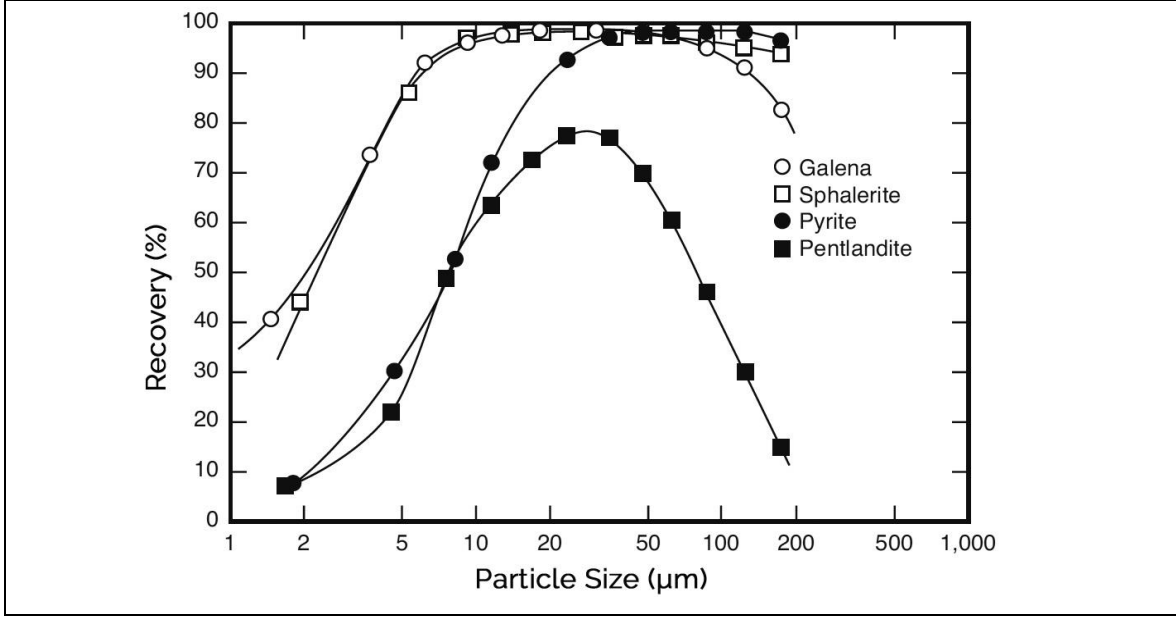
$$W_{K/H} = \gamma_{S/H}(1 - \cos \theta) \quad (3.3)$$

Literatürde altının yüzey özellikleri ile ilgili farklı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, saf veya yüzeyi temizlenmiş altının su ile sıfır temas açısına sahip olduğu ve bu nedenle saf altının hidrofilik olduğu, ortaya konulmuştur (Gardner ve Woods, 1977). Smith (1980) yılında benzer bulgulara ulaşmakla beraber, altının karbon bazlı malzemelerle ufak bir temasının altın yüzeyini hidrofobik hale getirdiği sonucuna ulaşmıştır. Aksoy ve Yarar (1989) yaptıkları çalışmada nabit altının hidrofobik olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla temas açısının da arttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak günümüzde araştırmacılar saf altının hidrofilik olduğunu, ancak oluşum süreçlerinde organik maddelerle teması sonucunda nabit altının hidrofobik özellik gösterdiği konusunda uzlaşmışlardır (Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005; Chryssoulis ve McMullen, 2016).

### 3.1.2. Tane boyu ve şekli

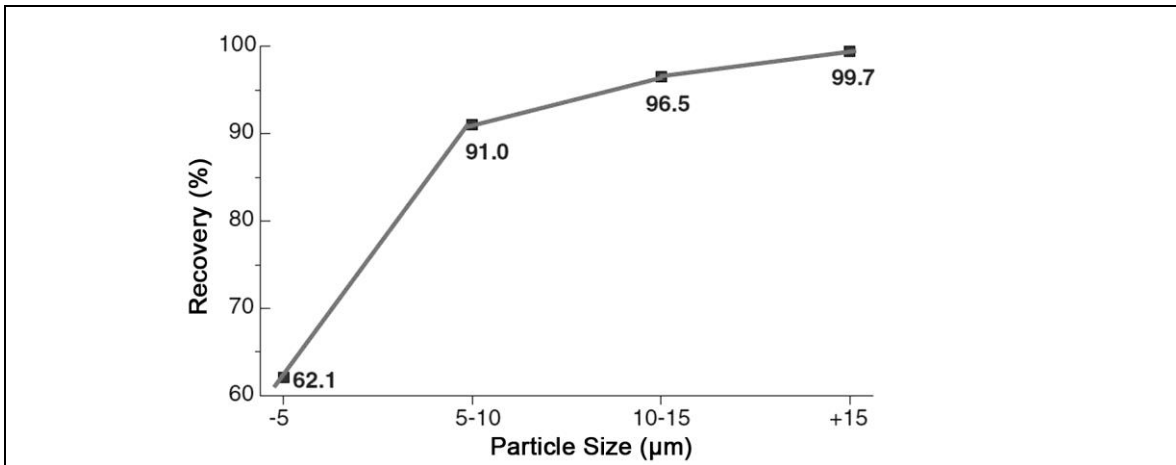
Cevher zenginleştirme süreçlerinin uygulanabilmesi öncelikli olarak zenginleştirilmek istenilen minerallerin, cevher içerisinde bulunan diğer minerallerden serbest hale getirilmesine bağlıdır ve tane boyutu ufaldıkça serbestleşme artmaktadır. Tane boyutu aynı zamanda zenginleştirme süreçlerini kısıtlayıcı bir etkiye de sahiptir. Flotasyonda mikro olayların gerçekleşmesi için taneciklerin belirli bir boyut aralığında olması oldukça önemlidir ve malzeme için flotasyonun mümkün olduğu bir tane boyut aralığından bahsetmek mümkündür. Şekil 3.2’de bazı metal sülfür mineralleri için tane boyut dağılımı ve flotasyon verimi ilişkisi gösterilmektedir.





Şekil 3.2. Bazı metal mineralleri için tane boyu – verim ilişkisi (Fuerstenau vd., 2007)

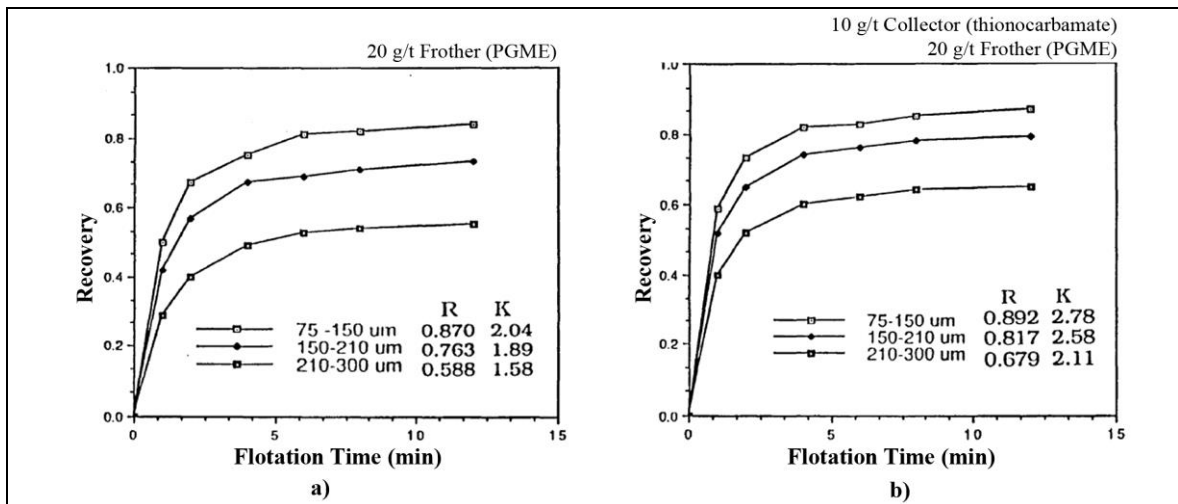
Tane boyut dağılımı, altının flotasyon performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir (Trahar, 1981). Allan ve Woodcock (2001), altın flotasyonu için uygun tane boyut aralığını 5-200 µm olarak tanımlarken, Chryssoulis ve McMullen (2016) yaptığı çalışmada 5 µm'dan ince tanelerin flotasyon tesislerindeki altın kaçağının büyük bir kısmını oluşturduğunu ifade etmektedir. Bu boyutlardan daha ufak taneler pülp içerisinde gerçekleşen hidrodinamik olaylardan kolaylıkla etkilenmekte ve hava kabarcıkları ile karşılaşma olasılıkları azaldığı için düşük flotasyon verimlerine neden olmaktadır. Şekil 3.3'te flotasyon tesislerinin temizleme devrelerinde gerçekleştirilen bir çalışmada ince boyuttaki altın tanelerinin flotasyon verimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. İnce altın tanelerinin flotasyon verimleri (Chryssoulis ve McMullen, 2016)

Çok ince tane oluşumunun ana nedenlerinden biri özellikle temizleme devreleri öncesinde uygulanan yeniden öğütme işlemleridir. Bu sorunun önüne geçmek amacıyla tesislerde değirmen çıkışından ya da sınıflandırma sonrasında, siklon alt akımlarından beslenen flash flotasyon devrelerinin uygulanması yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamanın diğer bir amacı yeni öğütülmüş uygun boyuttaki altın tanelerinin hızlı flotasyon kinetiklerinden yararlanılarak yüksek verimlerle kazanılmasıdır (Allan ve Woodcock, 2001; Newcombe vd., 2013; McGrath, 2014).

Altın tanelerinin 200  $\mu\text{m}$ 'dan daha iri olduğu durumlarda ise, tanelerin ağırlıkları nedeniyle hava kabarcıkları tarafından konsantreye taşınmaları zorlaşmaktadır (Teague vd., 1999a). Altının yüksek özgül ağırlığı, bu etkiyi ayrıca önemli hale getirmektedir. Bazı çalışmalar iri tanelerin, reaktif rejiminde de önemli farklılıklara yol açtığını göstermiştir. Lins ve Adamian (1993) yaptıkları çalışmada, 160  $\mu\text{m}$ 'dan küçük altın tanelerinin yalnızca köpürtücü ilavesi ile toplayıcısız olarak yüzdüğünü, daha iri boyuttaki tanelerin ise toplayıcı ilavesi gerektirdiğini ortaya koymuşlardır. Klimpel (1999) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, farklı boyut fraksiyonlarındaki altın tanelerinin toplayıcı olmadan ve toplayıcı varlığında gösterdikleri yüzme davranışları değerlendirilmiştir. Çalışma, her iki durumda da, iri tanelerin yüzdürülmesinin ince tanelerin yüzdürülmesine oranla hem daha yavaş hem de daha düşük verimle gerçekleştiğini göstermektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Toplayıcılı ve toplayıcısız şartlarda altın verimlerinin tane boyutlarına göre değişimi a) Toplayıcısız durum b) Toplayıcılı durum (Klimpel, 1999)

Altının bir diğ er önemli özelliğ i ise yumuşaklığ ıdır. Altın, öğütme süreçlerinde ufalanmaktansa, yassılaşarak geniş yüzey alanına sahip taneler haline gelmekte, bu da altın tanelerinin hava kabarcıkları tarafından taşınmasını zorlaştırmakta ve kullanılması gereken toplayıcı miktarını arttırmaktadır (Dunne, 2005). Altının yumuşaklığ ının neden olduğu bir diğ er sorun ise, öğütme süreçlerinde altın yüzeyine yapışan farklı mineral tanelerinin altına toplayıcı adsorpsiyonunu engelleyebilmesidir (Taggart ve Behre, 1945).

### 3.1.3. Gang mineralleri ve yüzey kaplamaları

Altın pek çok farklı minerallerle birlikte bulunmaktadır. Schwartz (1944), en yaygın olanları pirit, arsenopirit, kalkopirit galen, sfalerit gibi metal sülfürler ve kuvars killer, karbonatlar, grafit gibi gang mineralleri şeklinde tanımlamaktadır. Ancak altın flotasyonu açısından sorun yaratan mineraller genellikle demir oksitler, killer, karbonatlar ve karbon bazlı malzemelerdir (Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005).

Karbon bazlı malzemeler (grafit, şeyl vb.), düşük özgül ağırlıkları ve hidrofobik doğaları gereğ i, kolayca köpüğe taşınarak düşük flotasyon verimlerine neden olurken (Dunne, 2005), liç süreçlerinde çözünmüş altın komplekslerini adsorbe ederek altın verimlerini düşürmektedir (Harris, 1990; Tabatabaei vd., 2014). Bu tür malzemelerin yoğun olduğu cevherlerde yaygın uygulama, değerli minerallerin bastırıcılar yardımıyla bastırılarak ters flotasyon uygulanmasıdır. Benzer sorunlar yüksek oranlarda karbonat (kalsit, dolomit, siderit vb.) içeren cevherlerde de meydana gelmektedir. Yüksek reaktif tüketimleri nedeniyle karbonatlı cevherler de, karbon içeren cevherlere benzer şekilde ilk adım olarak ters flotasyon ile zenginleştirilebilmektedir (Liu ve Liu, 2004).

Flotasyon süreçlerinde sorun yaratan diğ er önemli malzeme ise kil mineralleridir. Kil mineralleri, şlam kaplama, yüksek pülp viskozitesi, köpük kararlılığ ı sorunları, aşırı reaktif tüketimi gibi pek çok soruna yol ağmaktadır. Altın özelinde de sorunlar benzerdir ve yüksek miktarlarda kil içeren cevherlerde altın verimlerinin düşük olmasının başlıca sorumluları killerdir. (Bulatovic, 1997; Cruz vd., 2013). Ancak şlam atma, uygun dağıtıcı ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$  vb.) ve bastırıcıların (nişasta, dextrin vb.) kullanılmasıyla bu sorunlar genellikle aşılabilmektedir (Dunne, 2005). Ayrıca Valderrama ve Rubio (1998), yaptıkları çalışmada

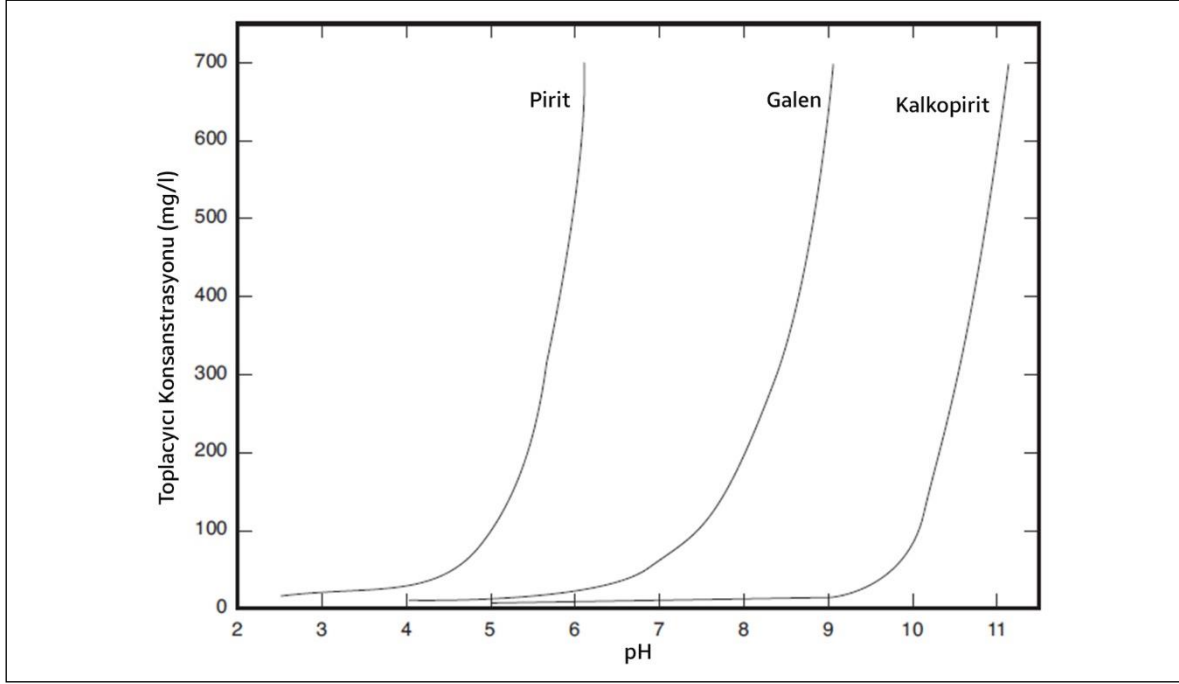
özellikle killerin yüzeylerden uzaklaştırılmasında yüksek hızda karıştırmanın etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Altının flotasyon performansını düşüren bir diğer önemli etken ise altın yüzeylerine kaplanan bazı malzemelerin, hidrofobikliği azaltarak ve/veya toplayıcı adsorpsiyonunu engelleyerek altının yüzdürülmesine engel olmasıdır (Taggart ve Behre, 1945; Aksoy ve Yarar, 1989). Ancak bu sorunlar genellikle doğru pH, uygun reaktif seçimi ve yüksek hızda karıştırma gibi uygulamalarla aşılabilmektedir.

Yüzey kaplanması nedeniyle oluşan flotasyon problemleri genel olarak oksitli demir minerallerinden (hematit, götit vb.) kaynaklanmaktadır. Demir minerallerinin oksidasyon ürünleri özellikle yüzeye yakın cevherlerde atmosferik olaylar nedeniyle oluşabileceği gibi, öğütme ortamı nedeniyle de oluşabilmektedir. Bu ürünler altın yüzeylerine kaplanarak toplayıcıların altın yüzeylerine adsorpsiyonunu engellemektedir (Allan ve Woodcock, 2001; Brook vd., 2003). Small vd. (2003) yaptıkları çalışmada, altın yüzeylerinin demir oksit kaplamasından arındırılması amacıyla farklı dozajlarda EDTA kullanımının altın ve bakırın flotasyon verimleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bir başka çalışmada ise Brook vd. (2003) altın yüzeylerindeki demir oksit iyonlarının nitrik asit ile temizlenmesi sonrasında altın verimlerindeki değişimi incelemiştir. Demir oksitler dışındaki, diğer metalik (cıva, gümüş vb.) yüzey kaplanmaları genellikle uygun reaktif seçimi ile aşılabilmektedir.

#### 3.1.4. pH

Altın, geniş bir pH aralığında (3-11) yüzmekle beraber, cevherin mineral bileşimi ve toplayıcı adsorpsiyonu açısından pH, altın flotasyonunda oldukça önemlidir (Agorhom, 2014). Uygun pH seçimi için dikkate alınan faktörler genellikle gang mineralleri ve bu minerallerin miktarlarıdır. Altın yaygın olarak sülfür mineralleriyle birlikte bulunmaktadır. Wills ve Napier-Munn (2006)'na göre yeteri kadar yüksek pH ile pülpte neredeyse tüm sülfür minerallerini bastırmak mümkün olduğu gibi, herhangi bir toplayıcı konsantrasyonunda ilgili mineralin yüzmesini sağlayacak bir pH değeri de vardır. Kritik pH olarak adlandırılan bu kavramın grafiksel bir gösterimi Şekil 3.5'te pirit, galen ve kalkopirit için, toplayıcı konsantrasyonuna bağlı olarak gösterilmiştir.

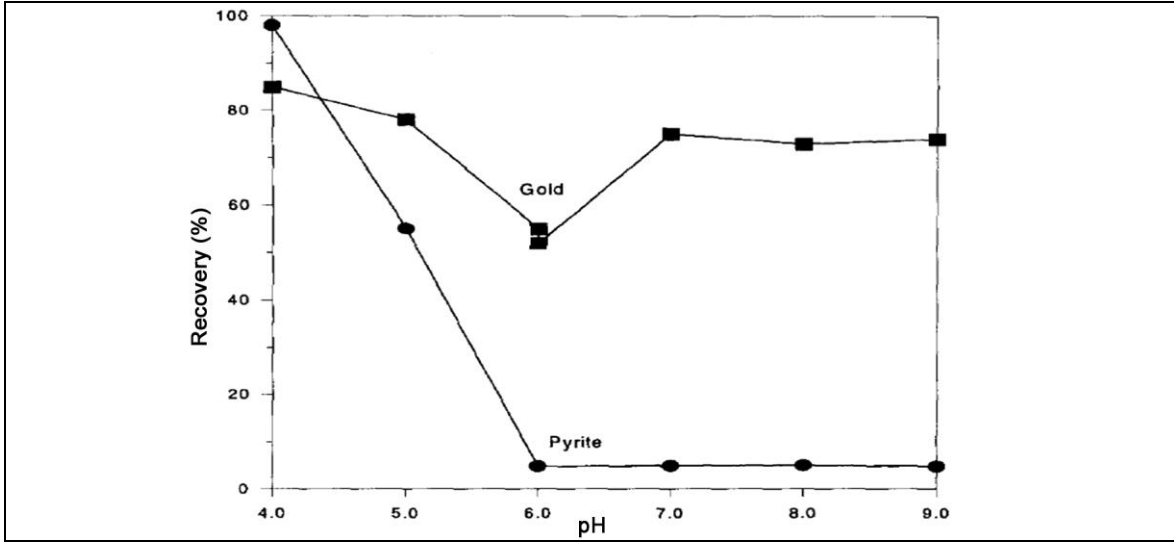


Şekil 3.5. Bazı metal sülfür minerallerinde toplayıcı miktarı - kiritk pH ilişkisi

Sülfür içeren altın cevherlerini işleyen tesislerin çoğunda flotasyon işlemi cevherin doğal pH'sında uygulanmaktadır (Klimpel, 1997). Ancak seçimliliği arttırmak, kararlı bir reaktif rejimi elde etmek, tesisin tank, pompa ve boru sistemlerinde oksidasyonu engellemek gibi nedenlerden dolayı alkali pH'lar tercih edilmektedir. Alkali pH'ların elde edilmesinde çoğunlukla kireç ve soda külü (sodyum karbonat) kullanılırken, daha az yaygın olarak sodyum hidroksit ve amonyak uygulamaları da vardır.

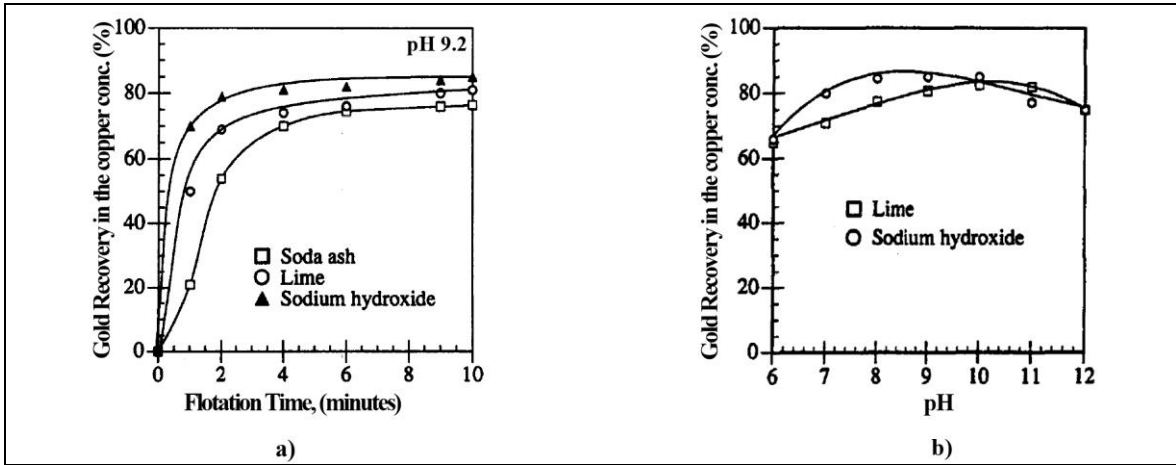
Pirit ve arsenopirit gibi yaygın olarak karşılaşılan gang mineralleri, pH 3-10 aralığında kolaylıkla yüzerler. Altının bu mineraller içerisinde bulunuş şekli pH ayarlanmasında genellikle belirleyicidir. Altının pirit içerisinde dağılım halinde olduğu durumlarda, pirit flotasyonu asidik (pH 4) ya da alkali (pH 8) pülplerde gerçekleştirilmektedir. Serbest altının seçimli flotasyonu ise daha zorlayıcıdır ve pirit bastırma amacıyla daha yüksek pH'lara çıkmayı gerektirmektedir. Benzer bir yaklaşım yüksek miktarda pirit içeren altın-bakır cevherleri için de geçerli olmakla beraber, çeşitli çalışmalarda yüksek dozajlarda kireç kullanımının altını da bastıracağı ifade edilmektedir. Düşük pirit içeren cevherlerde ise flotasyon genellikle cevherin doğal pH değerinde gerçekleştirilmektedir (O'Connor ve Dunne, 1994; Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2016).

Nagaraj vd. (1992), 50 g/t toplayıcı olarak dikresil monotiyofofat kullanarak yaptıkları çalışmada altın ve pirit verimlerinin pH ile olan ilişkisini incelemiştir. Çalışmada, asidik pH'larda altın ve pirit verimlerinin oldukça yüksek olduğu, alkali pH'larda ise piritin bastırılmasıyla seçimli altın flotasyonunun gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Altın-pirit verimlerinin pH ile ilişkisi (Nagaraj vd., 1992)

Kil içeren altın minerallerinin flotasyonu ise genellikle alkali pH'larda gerçekleştirilmektedir. Dunne (2005) kil minerallerinin pH 5-9 aralığında kolaylıkla yüzdüğünü, bu nedenle kil içeren altın cevherlerinin flotasyonunun pH 9 ve üzeri pH'larda gerçekleştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Bulatovic (1997) ise kil içeren cevherlerde pH ayarlamada kireç kullanımının pülp viskozitesini arttırarak flotasyon hızını azalttığını ifade etmektedir. Yüksek miktarda kil içeren bir altın cevherinin flotasyonunda pH ayarlayıcı olarak kireç, soda külü ve sodyum hidroksitin verim üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmada, pH 7-9 aralığında sodyum hidroksit kullanımıyla kireç ve soda külüne göre daha yüksek verimler elde edilmiştir. Ancak, daha yüksek pH'larda sodyum hidroksitin olumlu etkisinin ortadan kalktığı sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 3.7). Bulatovic (2010) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, altın ve gümüş içeren bakır-çinko ve bakır molibden cevherlerinde soda külünün kirece kıyasla daha yüksek altın ve gümüş verimleri sağladığı bulunmuştur.

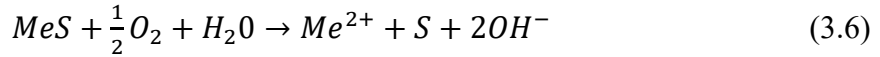


Şekil 3.7. Farklı pH ayarlayıcıların Au verimine etkisi a) Verimin zamana göre değişimi b) Verimin pH'a göre değişimi (Bulatovic, 1997)

### 3.1.5. Pülp potansiyeli ( $E_h$ )

Pülp potansiyelinin, altın ve diğer sülfürlü mineraller için önemli bir flotasyon parametresi olduğu uzun yıllardır bilinmektedir (Hintikka ve Leppinen, 1995). Elektrokimyasal potansiyel, pülpün yükseltgen ya da indirgen kapasitesinin bir ifadesidir ve  $E_h$  ile temsil edilir. Toplayıcıların mineral yüzeylerine adsorpsiyonu ve mineral yüzeylerindeki oksidasyon mineral ve pülp yüzeylerinin potansiyeline bağlıdır ve her bir mineral için flotasyonun gerçekleştiği karakteristik bir potansiyelden bahsetmek mümkündür (Dunne, 2005). Ancak pülp potansiyelini kontrol etmek oldukça güçtür. Pülp potansiyeli pülp içinde gerçekleşen reaksiyonlar, galvanik etkileşimler, öğütme ortamı, pülpün pH'sı, hava (oksijen) miktarı, sülfürlü minerallerin oranına göre değişiklik göstermektedir (Kydrös vd., 1993; Teague vd., 1999b).

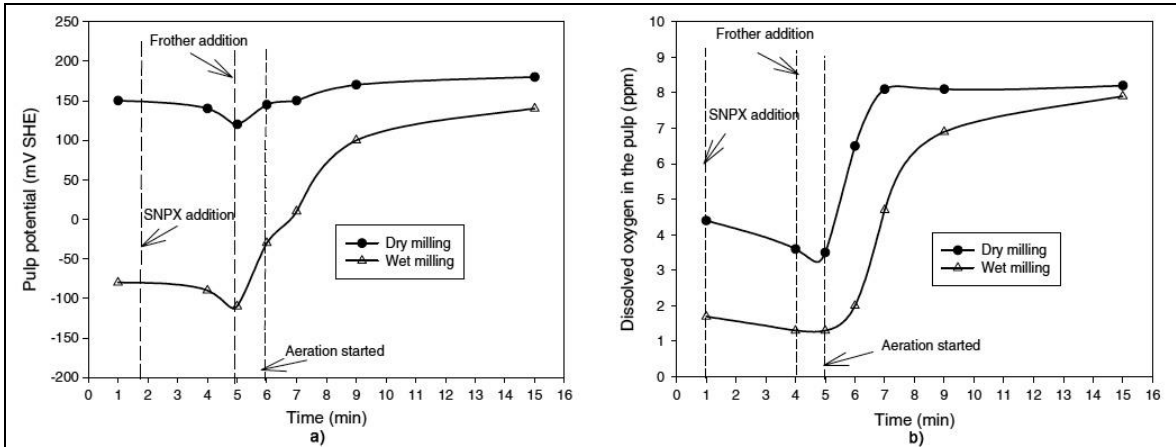
Pülp içerisinde yüksek potansiyele sahip mineraller katot, düşük potansiyele sahip mineraller ise anot gibi davranırlar. Pülpde gerçekleşen katodik reaksiyonlar oksijen tüketip, hidroksil iyonları üreterek yükseltgenme eğilimindedir (Eşitlik 3.4). Metal sülfür mineralleri ise anodik reaksiyonlar sonucu indirgenerek elementel sülfür ve metal katyonları üretmektedirler (Eşitlik 3.5). Her iki reaksiyonun bir sonucu olarak (Eşitlik 3.6), oluşan hidroksil iyonları metal ve mineral yüzeylerine adsorplanarak ya da metal hidroksitler halinde mineral yüzeylerine çökerek bu mineral yüzeylerini hidrofilik hale getirmektedir. Bu nedenle oksidasyon birçok flotasyon sisteminde arzu edilen seçimliliğin elde edilememesine neden olmaktadır (Chander, 2003; Dunne, 2005).



Oksidasyon sonucu oluşan hidroksil iyonlarının flotasyon üzerindeki olumsuz etkileri, reaksiyonlar tersinir olmadığı için genellikle tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. Ancak mevcut koşullarda arzulanın pülp potansiyelini sağlamak için çeşitli reaktifler kullanılabilir. Bu reaktiflerden bazıları sodyum sülfid, hidrazin, sodyum ditiyonit, hidrojen peroksit olarak sayılabilir. Ancak farklı metal sülfürlerin bulunduğu bir cevherde, gerek öğütme sürecinde yaşanan galvanik etkileşimler ve gerek hava kabarcığı üretilmesinde atmosferik hava kullanılması, flotasyon süreçlerinde yüksek oksidasyon ve dolayısıyla düşük flotasyon seçimliliğine neden olmaktadır. Literatürde, oksidasyonun önüne geçmek için, hava sistemlerinde azot gibi gazların kullanılmasına dair araştırmalar da bulunmaktadır (Trahar, 1983; Hintikka ve Leppinen, 1995).

Metalik cevherlerin öğütülmesinde kullanımı giderek yaygınlaşan kuru öğütmenin de özellikle  $E_h$  üzerindeki belirgin bir etkisinin olduğu düşünülmektedir. Seke ve Pistorius (2006) kurşun-çinko cevheri ile yaptıkları çalışmada, flotasyon öncesinde kuru olarak öğütülmüş örnekte pozitif pülp potansiyellerinin, yaş olarak öğütülmüş örnekte ise negatif potansiyellerin elde edildiğini bildirmişlerdir. Buna paralel olarak kuru öğütülen örnekte çözünmüş oksijen miktarı daha yüksekken, yaş öğütülen örnekte, çözünmüş oksijen miktarı daha düşüktür (Şekil 3.8). Bu durum kuru öğütülen örneğin oksitlenme potansiyelinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

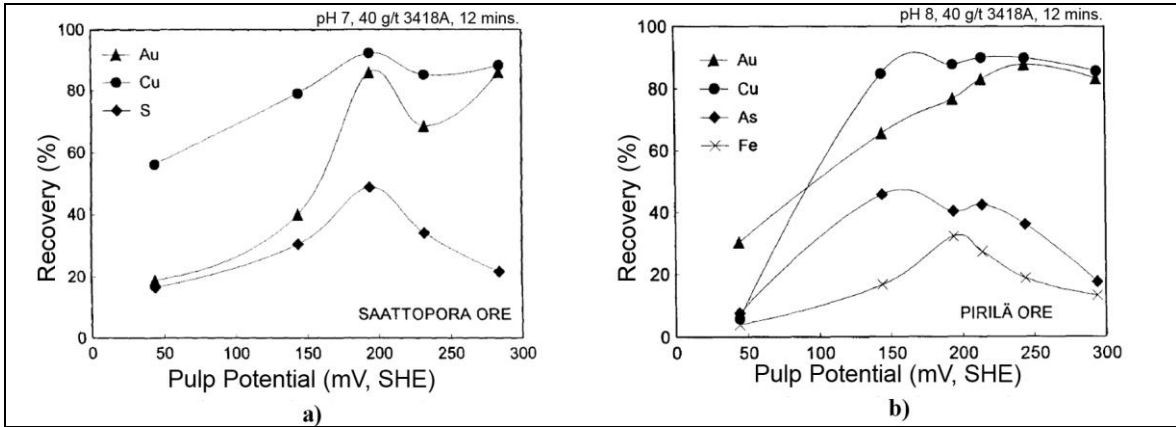




Şekil 3.8. Kurşun-çinko cevherinde kuru ve yaş öğütmenin pülp potansiyeli (a) ve çözülmüş oksijen konsantrasyonu (b) üzerindeki etkileri (Seke ve Pistorius, 2006)

Çalışmalar altın yüzeylerine ksantat adsorpsiyonunun geniş bir  $E_h$  aralığında gerçekleştiğini göstermektedir. Leppinen vd. (1991), yılında yaptıkları çalışmada, etil ksantatın +200 mV ve üzerindeki  $E_h$ 'larda altın üzerinde diksantojen oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Woods vd. (1994) ise, farklı oranlarda Au ve Ag içeren alaşımlara etil ksantat adsorpsiyonunun  $E_h$ 'a bağlı değişimini araştırmıştır. Çalışmaya göre, alaşımdaki Ag içeriğinin artması, etil ksantatın yüzeye daha düşük  $E_h$ 'larda adsorbe olmasını sağlamaktadır.

Bir başka çalışmada ise, Hintikka ve Leppinen (1995), farklı mineral kompozisyonlarındaki karmaşık cevherlerde, metal verimlerinin  $E_h$ 'a göre değişimini incelemiştir. Çalışmada pülp potansiyeli kontrolü, azot hava karışımı ile yapılmıştır. Nabit altın için en yüksek flotasyon verimleri, pülp potansiyelinin +250 ile +300 mV (SHE) olduğu durumlarda elde edilirken, bakır için en yüksek verimler +150 ile +250 mV'da elde edilmiştir. Aynı çalışmaya göre demir ve arsenik verimleri +50 ve +200 mV arasında artarken, daha yüksek potansiyelerde ise düşüş göstermektedir. Şekil 3.9'da iki cevherdeki Au, Cu, Fe, As ve S verimlerinin  $E_h$ 'a göre değişimi verilmektedir.



Şekil 3.9. İki farklıcevher için Eh – Verim ilişkisi a) Saattopora cevheri b) Pirilä cevheri (Hintikka ve Leppinen, 1995)

### 3.2. Kullanılan Kimyasallar

Altının karmaşık mineralojik yapısı, flotasyon sürecinde tercih edilecek kimyasal rejiminin belirlenmesinde de etkin rol oynamaktadır. Hedef minerallerin seçilerek seçimli ya da yığın flotasyonu yapılması, gerek arzu edilen konsantrenin elde edilmesinde gerekse, kimyasal masraflarının en düşük seviyede tutulmasında kritik bir öneme sahiptir. Örnek olarak, altının serbest taneler halinde bulunduğu bir cevherde uygulanacak kimyasal rejimi ile altının taşıyıcı sülfür mineralleri içinde çeşitli şekillerde bulunduğu cevherlerin kimyasal rejimleri farklılık gösterecektir. Bu da seçimli flotasyon için uygun reaktif seçimini altın flotasyonunda önemli bir parametre haline getirmektedir.

Flotasyon süreçlerinde kullanılan reaktifleri toplayıcılar, köpürtücüler, bastırıcılar, canlandırıcılar şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

#### 3.2.1. Toplayıcılar

Minerallerin yüzdürülmesi, mineral yüzeylerinin hidrofobik özelliklerine bağlıdır. Toplayıcılar, basit olarak hedef mineral yüzeylerinde istenen hidrofobikliği sağlayan yüzey aktif maddeler olarak tanımlanabilirler. İdeal olarak toplayıcıların yalnızca seçimli olarak mineral yüzeylerine adsorplanması arzulanır.

Altın özelinde bakıldığında ise, yapılmış çalışmalar, nabit altın gibi kolaylıkla yüzebilen mineraller için uygun toplayıcıların iyonlaşmayan ve suda çözünmeyen

toplayıcılar olduğunu göstermektedir (Klimpel, 1997, 1999). Bu tipteki toplayıcılardan altın flotasyonunda yaygın olarak kullanılanları thinocarbamateler, ksantojen formatlar, merkaptanlar, di-alkil sülfürler olarak sıralanabilirler. Ancak, altın cevherlerinin sıklıkla karmaşık yapıda ve çeşitli sülfür mineralleriyle birlikte bulunduğu göz önüne alındığında anyonik yapıda ve suda çözünen toplayıcılar ön plana çıkmaktadır. Bu tipteki toplayıcıların başında ksantatlar ve ditiofosfatlar gelmektedir. Altın flotasyonunda kullanılan toplayıcılardan bazıları ticari isimleriyle Çizelge 3.1’de verilmiştir.

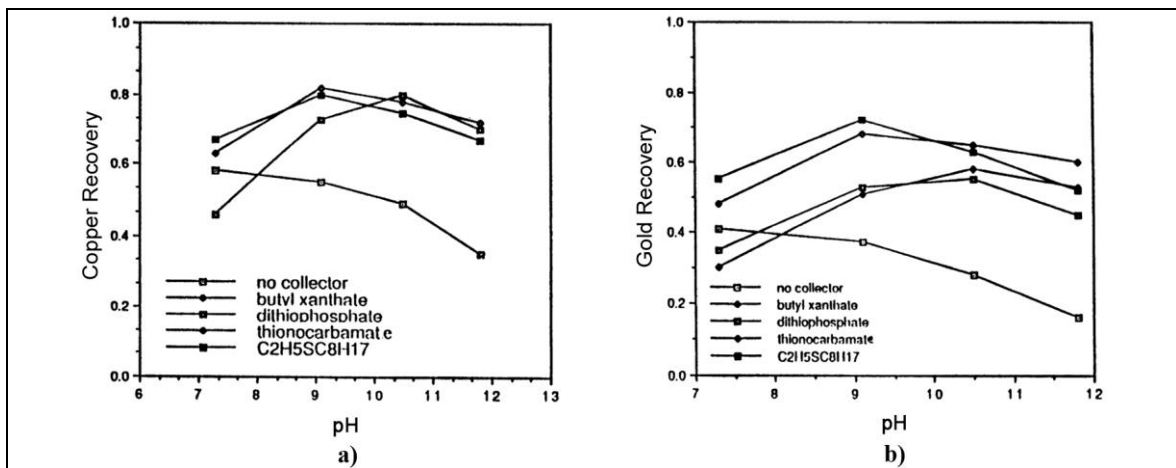
Çizelge 3.1. Altın flotasyonunda kullanılan bazı toplayıcılar (Cytec Industries, 2010)

<b>Toplayıcı Bileşimi</b>	<b>Ticari İsmi</b>
Sodium isobutyl xanthate	AERO 317
Potassium amyl xanthate	AERO 343
Xanthogen formate	AERO 3758
Diisobutyl dithiophosphate	AERO 3477
Mercaptobenzothiazole (MBT)	AERO 404
Monothiophosphate	AERO 6697
Xanthate ester	AERO 3302
Modifiye thionocarbamate	AERO XD-5002
Modifiye dithiocarbamate	AERO MX-900
Thionocarbamate	AERO 3894
Dithiophosphinate	AEROPHINE 3418
Dithiophosphate	AERO 8045
Alkil dithiophosphate	AEROFLOAT 208
Alkil dithiophosphate	AEROFLOAT 238
Dithiophosphate/monothiophosphate	AERO 7249
Monothiophosphate/dithiophosphate	AERO 8761
Dithiophosphate/mercaptobenzothiazole	AERO 405
Dithiophosphate/mercaptobenzothiazole	AERO 7156
Thionocarbamate/dithiophosphate	AERO 3926
Thionocarbamate/dithiophosphate	AERO 473

Ksantatlar uzun yıllardır sülfür cevherlerinin flotasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006). Metal yüzeyine adsorplanan ksantat iyonları, metal yüzeylerinde hidrofobik metal ksantat ürünleri oluşturarak sülfürlü metallerin hava kabarcıklarına tutunmasını ve seçimli olarak yüzdürülmesini sağlamaktadır. Altın özelinde ise, bazı çalışmalar altın flotasyonunun, ksantatların oksidasyon ürünü olan diksantojenler tarafından gerçekleştirildiğini göstermektedir (Woods vd., 1994; Woods vd., 1995). Ancak, Chryssoulis ve McMullen (2016)’a göre cevher içeriğindeki gümüş miktarının artması diksantojenin altın flotasyonundaki etkinliğini azaltmaktadır. Ditiyofosfatlar ise ksantatlara göre daha zayıf toplayıcılar olmakla beraber genelde ksantatlarla karışım halinde kullanılmaktadır.

Altın flotasyonunda doğru toplayıcıların ve uygun dozajların seçimi cevherin mineralojik yapısı, tane boyut dağılımı, pülp elektrokimyası, pH gibi birçok faktöre bağlıdır. Bulatovic (1997), altın cevherlerinin birçoğunda ksantatların, fosfin veya ditiyofosfat tipindeki toplayıcılarla birlikte kullandığında tatmin edici sonuçlar elde edildiğini belirtmektedir. Bulatovic (2010) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, altın içeren kurşun-çinko-gümüş cevherlerinde dimetil dithiocarbamate tipindeki toplayıcıların daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Ayrıca, doğru toplayıcının tercih edilmesi kadar, toplayıcının doğru devre tasarımlarında kullanılması da oldukça önemlidir. Chryssoulis ve McMullen (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, şlam boyutundaki malzemeden serbest altın kazanımında, toplayıcının öğütme süreçlerinde ilave edilmesinin öneminden bahsedilmektedir. Bu sayede yeni oluşan mineral yüzeylerine toplayıcı adsorpsiyonun arttığı düşünülmektedir.

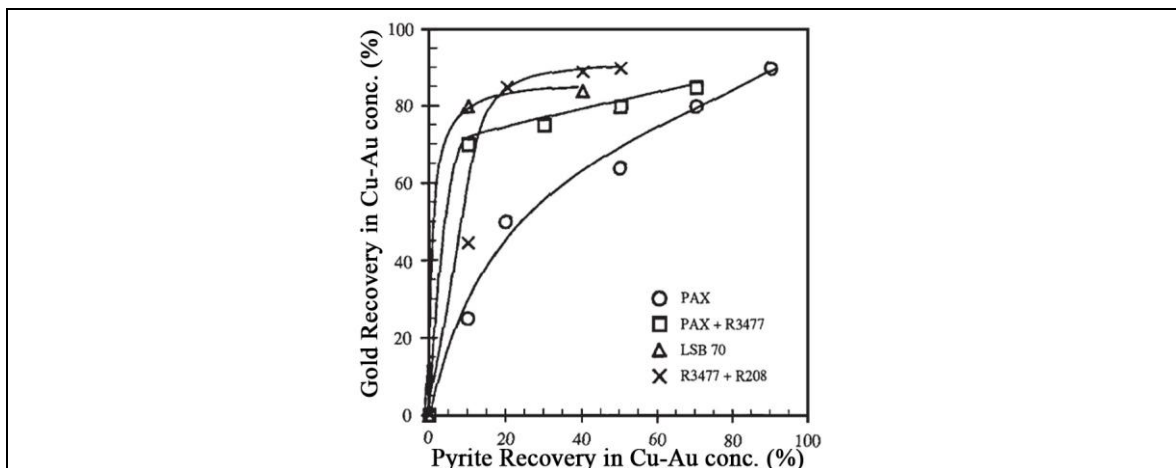
Literatürde, farklı tipteki toplayıcıların altın flotasyonu üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Klimpel (1999) tarafından Kuzey Amerika kökenli bir altın cevheri ile yapılan çalışmada, kalkopirit barındıran altın cevherlerinin farklı pH ve toplayıcı dozajlarındaki davranışları altın ve bakır özelinde araştırılmıştır. Toplayıcısız olarak ve farklı tipteki toplayıcılar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, pH kireç ile ayarlanırken, köpürtücü olarak 15 g/t PGME (poliglikol metil eter) kullanılmıştır (Şekil 3.10).



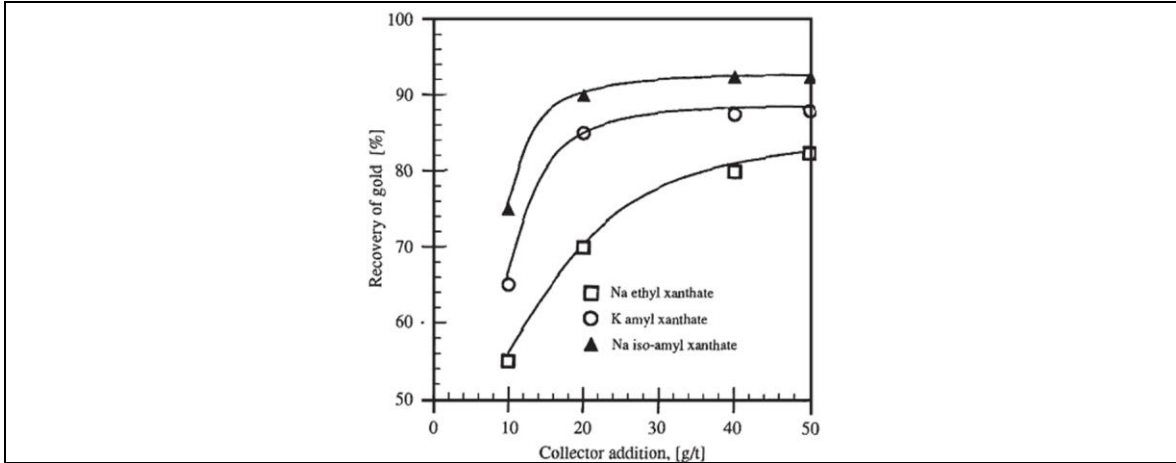
Şekil 3.10. Toplayıcı türünün Au ve Cu verimlerine farklı pH'lardaki etkisi a) Bakır verimi b) Altın verimi (Klimpel, 1999)

Forrest vd. (2001)'nin gerçekleştirdiği bir başka çalışmada ise, yaklaşık %50'si gravite yöntemleriyle kazanılabilen, kalanı ise kalkopirit, kalkosin ve pirit ile ilişkili bir altın cevherinde farklı tipteki toplayıcıların altın verimi üzerindeki etkilerini pH'a bağlı olarak araştırmışlardır. Çalışmada en yüksek altın verimleri potasyum amil ksantat ile elde edilirken, en yüksek tenör değerleri AEROFLOAT 7249 (diisobütil ditiyofosfat/di-isobütil monotiyofofosfat karışımı) ve AERO 208 (ditiyofosfat) toplayıcıları ile 10 ve üzeri pH'larda elde edilmiştir. Araştırmacılar, yüksek pH'lardaki tenör artışını bu pH'larda piritin bastırılarak, daha temiz bir altın konsantrasi elde edilmesi ile açıklamışlardır.

Bulatovic (2010) ise pirit içeren altın-bakır cevherlerinde altın veriminin konsantredeki pirit verimiyle yakın bir ilişki içinde olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.11). Özellikle pirit içeren sülfürlü altın cevherlerinin flotasyonunda altının verimi ve kinetiğinin kullanılan ksantatın cinsine göre de değişiklik gösterdiği düşünülmektedir. Yine Bulatovic (2010) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, altın veriminin, kullanılan ksantatın cinsine ve dozajına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir (Şekil 3.12). Endonezya kökenli düşük pirit içeren bir altın cevheriyle yapılmış çalışmada, altında en yüksek verim değerleri NaIBX ile elde edildiği, PAX'ta verimlerin bir oranda azaldığı, NaEX'te ise verim değerlerinde belirgin bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Ayrıca, toplayıcı miktarının artırılmasıyla verim değerlerinin ksantat tipine göre belirli bir değere kadar yükseldiği, sonrasında ise dozajın önemini kaybettiği görülmektedir.



Şekil 3.11. Toplayıcı türü ile Au – Pirit verimi ilişkisi (Bulatovic, 1997)



Şekil 3.12. Altın veriminin ksantat tipiyle ilişkisi (Bulatovic, 2010)

Bravo vd. (2005) tarafından yapılan bir çalışmada PAX ve MBT'nin 30 ve 60 g/t dozajlardaki karşılaştırılması, pH 6'da, 20 g/t MIBC kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en yüksek altın verimi 60 g/t PAX ile elde edilmiştir. Acarkan vd. (2010) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, altın-gümüş içeren bir kurşun cevherinin zenginleştirilmesinde ATP ve PAX karışımının 3418A (dithiophosphate) ve AERO 208 (dithiophosphate) karışımına karşı etkinliği araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, reaktif dozajları sırasıyla 600 + 600 g/t ve 350 + 350 g/t olarak denenmiştir. Çalışma sonucunda ATP + PAX karışımı ile kayda değer oranda yüksek kurşun verimleri elde edilirken, 3418A + AERO 208 karışımı ile altın ve gümüş seçimliliğinin daha yüksek olduğu ortaya koyulmuştur.

Günümüzde firmalar, cevher mineralojisine özgü, yüksek altın seçimliliği sunan yeni toplayıcıları geliştirmeye ve piyasaya sunmaya devam etmektedir (Dunne, 2016). Örneğin, Cytec firması 2008 yılında MAXGOLD ticari ismiyle piyasaya sürdüğü toplayıcıların özellikle serbest altın ve demir sülfür içeren altın cevherlerinin flotasyonunda verimleri kayda değer ölçüde arttırdığını ifade etmektedir (Cytec Industries, 2010). Diğer taraftan endüstride kullanılan kimyasalların çevre ve insan sağlığı üzerinde yarattığı etkilerin azaltılması amacıyla, daha çevreci alternatiflerin de kullanım olanakları araştırılmaktadır. Williams vd. (2013), farklı okaliptüs yağlarını, ksantatlar yerine kullanarak yaptıkları çalışmada, özellikle serbest altın taneleri özelinde yüksek tenör ve verimler elde edildiğini ifade etmektedir. Bununla birlikte, araştırmacılar okaliptüs yağlarının özellikle altın taşıyıcı sülfürlerin varlığında ksantatların yerini alacak toplayıcı potansiyeline sahip olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

### 3.2.2. Köpürtücüler

Daha önce de bahsedildiği üzere, flotasyon hidrofobik haldeki mineral tanelerinin pülpten hava kabarcıkları yardımıyla köpük yüzeyine taşınması ve bu sayede ayrılması esasına dayanmaktadır. Ancak bu işlemin yüksek bir etkinlikle gerçekleştirilmesi için hava kabarcıklarının mineral tanelerini taşımaya uygun boyutta, güçte ve duraylılıkta olması arzu edilmektedir. Hava kabarcıklarına bu özellikleri kazandırmak amacıyla kullanılan köpürtücüler, genellikle heteropolar organik kimyasallardır. Köpürtücüler, hava kabarcıklarının etrafını sararak suyun yüzey gerilimini azaltmaktadır. Bu sayede hava kabarcıklarının daha kararlı hale gelmesi sağlanmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Köpürtücüler pek çok yönden anyonik toplayıcılarla benzer özellikler gösterirler ve birçok toplayıcının (aminler, oleatlar, alkoller vb.) aynı zamanda köpürtücü özelliği gösterdiği bilinmektedir. Benzer olarak köpürtücüler de toplayıcı özelliği gösterebilmektedir. Ancak bu durum mineral seçimliliğini kontrol etmeyi zorlaştıracığı için, ideal olarak, köpürtücülerin toplayıcı özelliği göstermemesi beklenmektedir.

Köpürtücülerle ilgili bir diğer beklenti ise, köpürtücülerin belirli bir oranda suda çözünebilir olmalarıdır. Bu sayede pülp içerisinde homojen olarak dağılarak en yüksek faydayı sağlarlar. Suda çözünebilen köpürtücüler olan yağ asitleri, aminler ve alkoller flotasyonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak alkoller, toplayıcı özelliği göstermedikleri, geniş bir pH aralığında çalışabilir oldukları için bunların arasında en yaygın olanlarıdır. Çam yağı ve kresilik asit geçmişten bu yana bilinen doğal köpürtücüler olmakla beraber, günümüzde yerlerini kimyasal yapıları istenilen özelliklere göre değiştirilmiş sentetik köpürtücülere bırakmaktadır. (Wills ve Napier-Munn, 2006; McGrath, 2014).

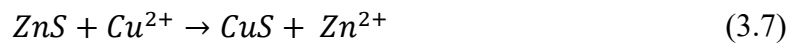
Sentetik köpürtücüler genel olarak alkollerin yüksek molekül ağırlığına sahip türevleridir ve sülfür flotasyonunda en yaygın olarak kullanılan örneklerinden birisi MIBC'dir. Sentetik köpürtücüler günümüzde cevherlerin mineralojik yapısına ve flotasyon süreçlerine göre tek başlarına ya da karışım halinde kullanılmaktadır. Klimpel (1999), bu gereksinimi, köpürtücülerin kimyasal yapılarının, değişik tane boyutlarındaki tanecikleri taşımadaki performanslarıyla açıklamaktadır. Günümüzde altın tesislerinde yaygın olarak kullanılan köpürtücüler, poliglikol ether bazlı köpürtücülerdir. Yüksek seçimliliğin

arzulandığı durumlarda, örneğin temizleme devrelerinde zayıf köpürtücüler tercih edilirken, kaba flotasyon, süpürme flotasyonu gibi verimin ön planda olduğu flotasyon işlemlerinde polipropilen glikol metil eter gibi yüksek molekül ağırlıklı, köpük üretme gücü yüksek köpürtücüler tercih edilmektedir (Dunne, 2005; McGrath, 2014).

### 3.2.3. Canlandırıcılar

Canlandırıcılar, basit olarak mineral yüzeylerini toplayıcı adsorpsiyonuna uygun hale getirerek hidrofobikliği arttırmak amacıyla kullanılan kimyasallardır ve çoğunlukla sudaki çözeltilerinde iyonlaşan tuzlar bu amaçla kullanılırlar.

Örnek olarak, sfalerit flotasyonunda, sfalerit yüzeylerinde oluşan çinko ksantat ürünlerinin kısmen suda çözünebilir olması nedeniyle ksantatların beklenen performansı göstermediği ancak, yüksek dozajlarda ksantat kullanılarak bu durumun aşılabildiği bilinmektedir. Diğer bir yöntem ise sülfürlü minerallerin flotasyonunda canlandırıcı olarak sıklıkla tercih edilen  $CuSO_4$  kullanımınıdır. Bakır, çinkoya oranla daha fazla elektronegatifdir. Bu sayede Cu iyonları, sfalerit yüzeylerinde ZnS yerine CuS molekülleri oluşturarak, çinko ksantata kıyasla daha kararlı olan bakır ksantat ürünlerinin oluşmasını sağlamaktadır (Eşitlik 3.7; Eşitlik 3.8). Böylece bakır iyonları sayesinde sfalerit yüzeyi hidrofobik hale getirilmiş olur (Wills ve Napier-Munn, 2006).

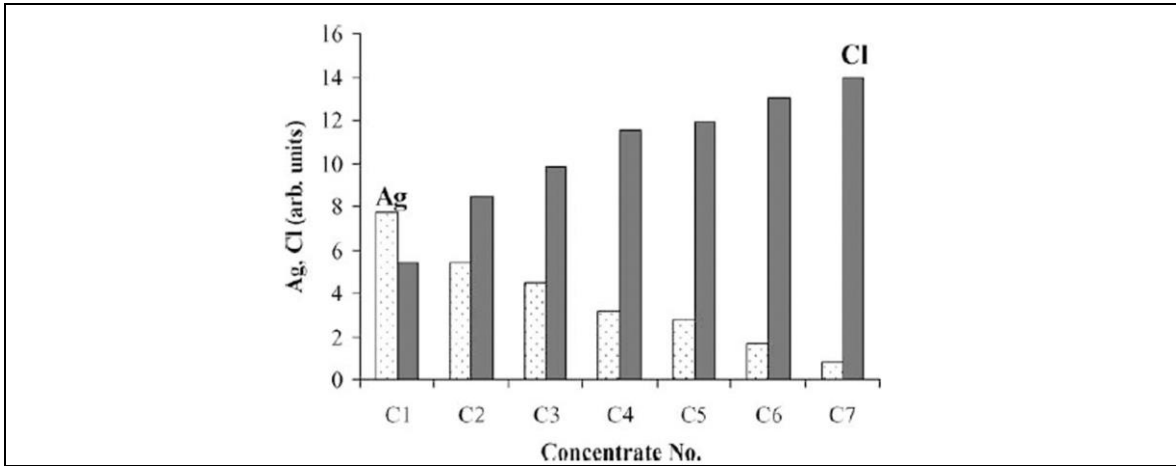


Altın özelinde ise, canlandırıcılar cevherin mineralojik özellikleriyle yakından ilişkilidir. Woodcock vd. (2007), serbest altının nadiren aktive edilmesi gerektiğini ifade ederken, altının genellikle altın taşıyıcı sülfürlü minerallerle birlikte yüzdürüldüğü göz önüne alındığında canlandırıcılar ön plana çıkmaktadır. Çalışmalar, altın flotasyonu yapılan birçok tesiste canlandırıcı olarak  $CuSO_4$  kullanıldığını belirtmektedir. (O'Connor ve Dunne, 1994; Klimpel, 1999; Dunne, 2005; Woodcock vd., 2007). Teague vd. (1999a) yaptıkları çalışmada,  $CuSO_4$  kullanımının serbest altın verimini değiştirmedeğini ancak, konsantrasyonunun arttığını belirtmektedirler. O'Connor vd. (1988), ise bakır sülfatın köpük kararlılığı ve kalınlığını artırarak flotasyonu desteklediğini düşünmektedir. Bakır sülfat dışında



sülfürlü minerallerin canlandırılmasında kullanılan kurşun nitrat (özellikle arsenopirit, stibnit vb.), ve oksitli cevherlerin flotasyonunda sülfürleme amacıyla kullanılan NaS ve NaHS de altın flotasyonu yapan tesislerde kullanılmaktadır (Dunne, 2005; Wills ve Napier-Munn, 2006).

Altın için bir diğer önemli canlandırıcı ise gümüşdür. Literatürde, altının yüzeylerinin hidrofobikliğinin ve toplayıcı adsorpsiyonunun gümüş miktarına bağlı olarak arttığını gösteren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Leppinen vd., 1991; Allan ve Woodcock, 2001). Chryssoulis ve Dimov (2004) ise yaptıkları çalışmada, serbest altın tanelerinin ortamdaki klor varlığında bastırıldığını ancak ortamdaki gümüş miktarının artmasıyla bu etkinin tersine döndüğü sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Altın yüzeylerinde Ag, Cl miktarı ilişkisi (Chryssoulis ve Dimov, 2004)

Bir başka çalışmada ise, başlıca pirit ve kalkopirit içeren altın cevherinde, farklı dozajlarda EDTA (etilen diamin tetra asetik asit) kullanılarak altının canlandırılmasının olanakları araştırılmıştır. Toplayıcı olarak PAX ve DTP kullanılan laboratuvar ölçekli çalışmada 1000 g/t EDTA kullanımının serbest altın tanelerinin yüzeylerini temizleyerek, bakır ve demir verimlerini değiştirmeden altının daha yüksek bir verimle elde edilmesine olanak tanıdığı sonucuna ulaşılmıştır (Small vd., 2003).

### 3.2.4. Bastırıcılar

Bastırıcılar, yüzmesi istenmeyen minerallerin yüzeylerinin hidrofilik yapılarak, bastırılmasını sağlayan kimyasallardır. Böylece istenmeyen minerallerin köpüğe taşınması

engellenerek daha seçimli bir flotasyon gerçekleştirilmektedir. Bastırıcılar temelde inorganik ve polimerik olmak üzere iki ana grupta toplanabilir, ancak bu çok geniş bir sınıflama olacağı için, konu altın cevherleri özelinde ele alınmıştır

Altın çok çeşitli minerallerle birlikte bulunabildiği için, istenmeyen minerallerin bastırılması amacıyla kullanılacak bastırıcılar da geniş bir çeşitliliktedir. Örnek olarak diğer pek çok flotasyon uygulamasında yer bulan sodyum silikat, altın flotasyonunda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sodyum silikat, şlam boyutundaki tanelerin yüzey yüklerini arttırarak dağıtılmasını ve bu şekilde bastırılmasını sağlamaktadır (McGrath, 2014). Ek olarak, sodyum silikat şelit, kalsit florit gibi minerallerin bastırılmasında da kullanılmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Nişasta, dextrin, selüloz gibi polimer tipi bastırıcılar sıklıkla silikatlı gangin bastırılması amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca sülfürlü cevherlerin zenginleştirilmesinde, bakır-kurşun ayırımında, kurşun bastırmanın yanı sıra, demir sülfürlerin, karbonatlı gangin, kalsitin bastırılmasında kullanılmaktadır. Yine altın flotasyonunda yaygın olarak kullanılan, guar gum, CMC (karboksimetil selüloz) gibi anyonik polimerler ise magnezyum silikatlar, alümina silikatlar, kloritler, ve aktive olmuş kuvarsın bastırılmasında kullanılmaktadır (Marsden ve House, 2006; Bulatovic, 2010).

Sülfürlü cevherlerde ise istenmeyen sülfür minerallerinin bastırılması daha karmaşık bir süreçtir. Örneğin pH ayarlamakta kullanılan kireç, aynı zamanda ortama verdiği kalsiyum iyonları nedeniyle hem altın hem de metal sülfürler için bastırıcı özellik göstermektedir. Her ne kadar, bu etki yüksek dozajlarda ksantat kullanımıyla aşılabilsede, kireç bu yönüyle altının, piritten seçimli flotasyonunu gerektiren uygulamalarda sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Klimpel, 1999; Dunne, 2005). Bu nedenle, uygun mineralojiye sahip cevherlerde kireç yerine sodyum karbonat kullanımı da yaygındır. Allan ve Woodcock (2001) yaptıkları çalışmada, sodyum karbonatın, ağır metalleri çöktürme ve pülp pH'sını altın için uygun değerler (pH 8-9) arasında tamponlama avantajından dolayı tercih edilebileceğini ifade etmektedir. Altın flotasyonunda, metal sülfürlerin bastırılmasında kullanılan bir diğer önemli reaktif ise sodyum siyanürdür. Özellikle pirit ve sfaleritin bastırılmasında yaygın olarak kullanılan sodyum siyanürün aşırı dozajlarda kullanılması ise, ksantat iyonlarının adsorpsiyonunu engelleyerek, bakır ve altını bastırmakta, ayrıca altının

çözünmesine neden olarak verimi düşürmektedir (Marsden ve House, 2006). Altının arsenopirit ve pirotitten seçimli flotasyonunu gerektiren uygulamalarda ise, arsenopirit ve pirotit bastırma amacıyla potasyum permanganat kullanılmaktadır (Dunne, 2005).

Baz metal sülfürlerin bastırılmasında sodyum ditiyonit gibi indirgeyici ajanların kullanılması da mümkündür. İndirgeyici ajanların yüksek indirgeme potansiyelleri ile metal sülfür minerallerini bastırıldığı düşünülmektedir. Hayes ve Ralston (1988), sodyum ditiyonitin kullanıldığı indirgen pülp koşullarında yüksek saflıktaki kalkopirit, galen ve sfaleritin minerallerinin düşük yüzebilirlik özelliği sergilediğini göstermişlerdir. Monte vd. (1997), ise altının piritten seçimli flotasyonunda hidrojen peroksit kullanılmasının olanaklarını araştırdıkları çalışmada, oksitleyici bir ajan olan hidrojen peroksitin kullanımıyla, pirit yüzeylerinin oksitlenerek bastırıldığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmada, hidrojen peroksit kullanımının özellikle yüksek alkali pH'larda ( $\text{pH} > 10$ ) pirit yüzeylerine toplayıcı adsorpsiyonunu engelleyerek, altının ksantatla seçimli olarak yüzdürüldüğü sonucuna ulaşılmıştır.

### 3.3. Toplayıcısız Flotasyon

Toplayıcısız flotasyon, doğal hidrofobik özellik gösteren minerallerin, hidrofilik minerallerden herhangi bir toplayıcı ilavesi olmaksızın yüzdürülmesi olarak ifade edilebilir. Doğal hidrofobik özellik gösteren, grafit, stibnite ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) gibi minerallerin toplayıcısız olarak yüzdürülebildiği 20. yüzyılın başından beri bilinmektedir (Hayes vd., 1987). Günümüzde molibdenit ( $\text{MoS}_2$ ), orpiment ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), realgar ( $\text{AsS}$ ) gibi sülfürlü minerallerin doğal hidrofobik özellik gösterdiği, ayrıca pirit, kalkopirit, sfalerit, galen, bornit, kovelit ve arsenopirit gibi metal sülfürlerin farklı  $E_h$ 'larda toplayıcısız olarak yüzdürülebildiği bilinmektedir (Trahar, 1983; Hayes vd., 1987; Hayes ve Ralston, 1988; Ekmekçi ve Demirel, 1997; Chander, 2003; Zheng ve Manton, 2010).

Altın özelinde ise, altının yüzey özellikleri bölümünde bahsedildiği üzere normal koşullarda, saf altın hidrofilik özellik gösterirken, oluşum süreçleri etkisiyle serbest nabit altın tanelerinin hidrofobik özellik gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle birçok araştırmacı uygun koşullarda altın tanelerinin ilave bir kimyasala ihtiyaç duymadan yalnızca köpürtücü ilavesiyle yüzebildiğini belirtmektedir (Aksoy ve Yarar, 1989; O'Connor ve Dunne, 1994;

Klimpel, 1997; Dunne, 2005). (Lins ve Adamian, 1993) tane boyunun büyümesiyle altının nihai veriminin ve yüzme hızının azaldığını, 160 µm boyutundaki altın tanelerinin, yalnızca köpürtücü ilavesiyle 50 ve 300 g/t dozajlarındaki PAX ile benzer verimlerle yüzdüğü sonucuna ulaşmıştır. Benzer sonuçlara ulaşan Klimpel (1999) 150 µm altındaki serbest altın tanelerinin toplayıcısız olarak yüzdürülebildiğini ifade etmektedir.

Altın sıklıkla pirit, kalkopirit gibi metal sülfürlerle birlikte bulunduğu için altının toplayıcısız flotasyonu esas olarak bu minerallerle birlikte ele alınmalıdır. Sülfür minerallerinin toplayıcısız flotasyonundan metal yüzeylerindeki elementel sülfür ( $S^0$ ), sülfürce zengin metal ürünleri ( $M_1-nS$ ) ve polisülfid ( $S_n$ ) gibi sülfür bazlı bileşiklerin sorumlu olduğu düşünülmektedir. Bu ürünler metal yüzeylerinde çoğunlukla oksidasyon nedeniyle oluşurken, diğer taraftan oksidasyon sonucu ortaya çıkan metal hidroksit iyonları hidrofilikliğı de arttırmaktadır (Chander, 1991). Sonuç olarak, toplayıcısız flotasyonun, metal yüzeylerinde meydana gelen oksidasyon ürünlerinin hidrofobik ve hidrofilik özelliklerinin bir dengesi sonucunda meydana geldiğini söylemek mümkündür (Ekmekçi ve Demirel, 1997; Agorhom, 2014).

Hayes vd. (1987) yaptığı çalışmada, metal sülfürlerin toplayıcısız olarak yüzebilirlik özelliklerini kolaydan zora kalkopirit, galen, pirotit, pentlandit, kovellin, bornit, kalkosin, sfalerit, pirit ve arsenopirit şeklinde sıralamaktadır. Metal sülfür minerallerinin farklı hidrofobik özellikleri, toplayıcısız flotasyon ile seçimli olarak zenginleştirilmelerine de olanak tanımaktadır. Bu bilgiler ışığında altın cevherleri içinde en sık rastlanan sülfür mineralinin pirit olduğu göz önüne alındığında, altının uygun koşullarda toplayıcısız flotasyon ile piritten seçimli olarak yüzdürülmesi mümkün gözükmektedir. Zheng ve Manton (2010) yaptıkları çalışmada altın içeren bir kalkopirit cevherinde, toplayıcısız flotasyon ile pirit veriminin %52,7'den %3,9'a kadar düştüğünü, paralel olarak kalkopirit tenörünün ise benzer bir verimle %9,7'den %13,5'e ulaştığını ifade etmektedirler. Oluklulu vd. (2019) yaptıkları çalışmada altının toplayıcısız olarak pirit seçimli olarak yüzdürülebileceğini ifade etmektedirler.

### 3.4. Endüstriyel Uygulamalar

Dünyanın farklı yerlerindeki altın cevherleri, daha önce de bahsedildiği üzere birbirinden çok farklı özellikler göstermektedirler. Bu nedenle, her cevher için tercih edilen flotasyon tasarımları, akım şemaları, reaktif rejimleri birbirinden önemli ölçüde farklı olabilmektedir. Flotasyon bir cevhere uygulanacak esas zenginleştirme yöntemi olabileceği gibi siyanür liçi sonrası çözeltiye alınamayan altınların kazanılmasında ya da gravite veya flaş flotasyon sonrasında artıkların değerlendirilmesinde de kullanılabilir. Cevherin mineralojik yapısına, altının tenör ve oluşumuna bağlı olarak bazı uygulamalarda sülfür minerallerinin toplu flotasyonu tercih edilirken, bazı uygulamalarda altının, mevcutsa bakırın, diğer sülfür minerallerinden seçimli flotasyonu tercih edilmektedir. Altının toplayıcısız flotasyonu uygun cevherlerde genellikle düşük verimle ancak çok yüksek tenörlerle altın konsantresi elde edilmesine olanak tanımaktadır (Allan ve Woodcock, 2001). Bu bölümde Türkiye ve dünyada işletilmekte olan altın madenlerinde uygulanan yöntemlerden bahsedilecektir. Çizelge 3.2’de dünyada ve Türkiye’de altın zenginleştirmede flotasyon yönteminin uygulandığı bazı tesisler ve işletme parametrelerine ilişkin temel bilgiler verilmiştir.

Bu tesislerden, İzmir’in Menderes ilçesinde 2011 yılından beri faaliyet gösteren Efemçukuru işletmesinde, altın üretimi gravite ve flotasyon yöntemlerinin birlikte uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Tesise beslenen cevher, yarı otojen değirmende öğütüldükten sonra hidrosiklon ile sınıflandırılmakta, siklon alt akımı tekrar boyut küçültmeye tabi tutularak sonrasında flaş flotasyon ile kazanılmaktadır. Siklon üst akımı ise altın – pirit konsantresi elde edilmesi amacıyla kaba flotasyona tabi tutulmaktadır. Kaba flotasyon öncesi cevher %35-40 katı yoğunluğunda reaktiflerle şartlandırılmaktadır. Pülpe, sülfürleme amacıyla  $\text{Na}_2\text{S}$ , canlandırıcı olarak  $\text{CuSO}_4$  ve killerin bastırılması amacıyla guar gum ilave edilirken, toplayıcı olarak sodyum izopropil ksantat ve S8045, köpürtücü olarak ise glikol eter bazlı bir köpürtücü olan F549 kullanılmaktadır. Süreç sonunda kaba flotasyon konsantresi ve flaş flotasyon konsantresi birleştirilerek gravite zenginleştirmesine tabi tutulurken, kaba flotasyon artıkları altın kaçaklarının azaltılması amacıyla da Knelson ve MGS ayırıcıları ile tekrar değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.2. Dünyada flotasyon yöntemi uygulanan altın madenlerinden bazıları

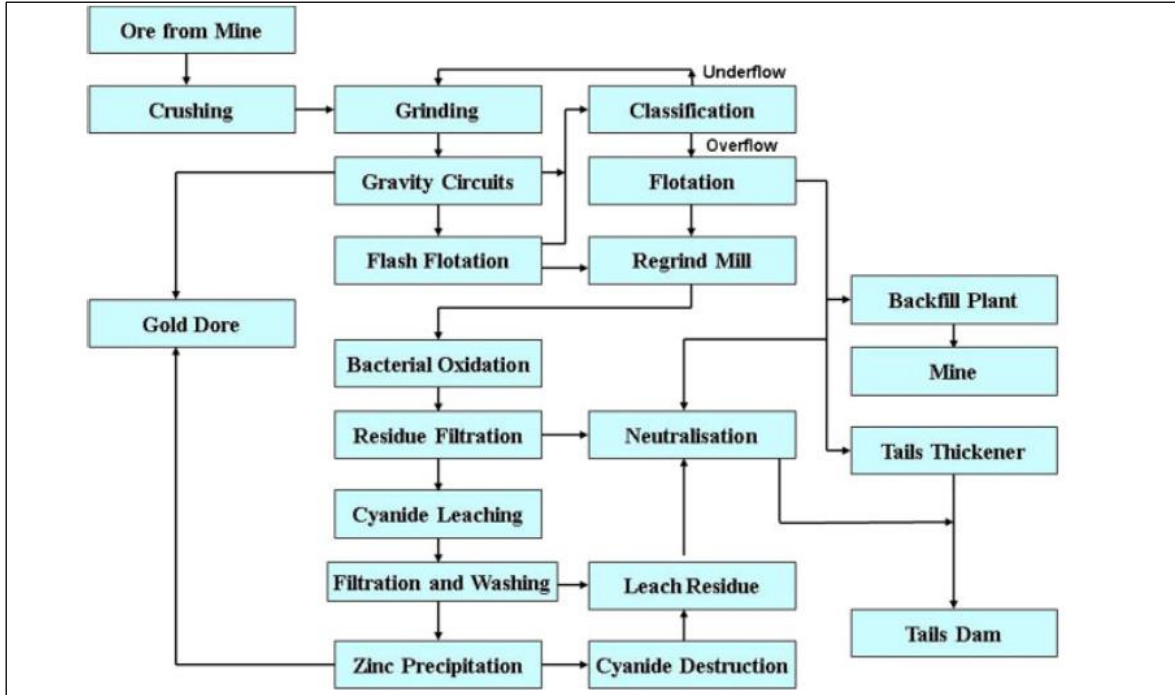
Maden	Mineraloji	P80	Besleme Tenörü		pH	Reaktifler	Akım Seması	Referanslar
		(µm)	Au (g/t)	Cu (%)				
Efemçukuru Türkiye	Au, FeS <sub>2</sub>	50	5-8 10-15	?	8,5	PAX, S 8045, F549 CuSO <sub>4</sub> , NaS, guar gum		
Batu Hijau Endonezya	Au, CuFeS <sub>2</sub> , Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	?	0,32-0.64	0,47-0,75	9,5	PAX, Dithiophosphate + mercaptobenzothioazole		
Beaconsfield Avustralya	Au, CuFeS <sub>2</sub> , FeS <sub>2</sub> , FeAsS, ZnS, PbS	170	10-20	0,4	?	NaIBX, CuSO <sub>4</sub> Interforth IF106	Şekil 3.14	(Holder, 2013)
Bougainville, Papua Yeni	Au, Ag, CuFeS <sub>2</sub> , Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub> , FeS <sub>2</sub>	150 (P <sub>70</sub> )	0,4	0,22	?	PAX, NaIPX, Dow AP 273, MIBC, Dow 400	Şekil 3.15	(Woodcock vd., 2007)
Cadia Hill, Avustralya	Au, Ag, CuFeS <sub>2</sub> FeS <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	150	0,77	?	?	PAX, 3418A	Şekil 3.16	(Cesnik vd., 2005)
Carlin, ABD	Au, CuFeS FeS <sub>2</sub> , FeAsS, ZnS	?	4,73	?	5,5-6	PAX, 6025, Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CMC, NaSiO <sub>2</sub>		(Orlich vd., 2009) (MDO, 2019a)
Kanowna Belle Avustralya	Au, AuAg, FeS <sub>2</sub> , Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub> , ZnS, NiAsS	106 143	3,7 5,2	3,29	7,2 8,1	NaIBX, M27, AF25, A404, Çam yağı, ZnSO <sub>4</sub>	Şekil 3.17	(Newcombe vd., 2013)
Lepanto, Filipinler	Au, Au <sub>x</sub> Te <sub>y</sub> 3Cu <sub>2</sub> S.As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , CuFeS <sub>2</sub>	?	4,45	?	5,6 10,5	PAX, Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Şekil 3.18	(Woodcock vd., 2007)
Lone Tree, ABD	Au, CuFeS FeS <sub>2</sub> , FeAsS, ZnS	53	0.29	?	5,5	PAX, Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		(Orlich vd., 2009) (MDO, 2019b)
Telfer Avustralya	Au, CuFeS <sub>2</sub> FeS <sub>2</sub>	120	1,4	0,28	9	PAX, RTD11A DSF004, NaS, NaCN	Şekil 3.19	(Zheng ve Manton, 2010)

\*P<sub>80</sub> boyutu referansta verilen duruma göre siklon üst akımı ya da hedef öğütme boyutunu ifade etmektedir

Endonezya’da faaliyet göstermekte olan Batu Hijau altın-bakır madeninde, kompleks porfiri olarak tanımlanan altın-bakır cevherinin zenginleştirilmesinde flotasyon yöntemi uygulanmaktadır. Cevherde altın, başlıcaları kalkopirit ve bornit olmak üzere çeşitli sülfür mineralleriyle birlikte bulunmaktadır. Cevherin altın ve bakır tenörü sırasıyla 0,47-0,75 g/t %0,32-0,64 arasında değişiklik göstermektedir. Kaba flotasyon kademesinde pirit seçimliliği alkali pH (>9,5) ile sağlanırken, toplayıcı olarak PAX ve ditiyofosfat/MBT karışımı kullanılmaktadır. Kaba flotasyon konsantresi üç kademe temizlendikten sonra doğrudan izabeye gönderilmektedir. Tesisin altın verimi ortalama %85, bakır verimi ise %78’dir. Tesise sonradan stok sahasında okside olan cevherlerin sülfürlenmesi amacıyla bir sülfürleme devresi ilave edilmiştir. Batu Hijau flotasyon tesisini diğer tesislerden ayıran bir diğer özellikle ise süreç suyunun okyanustan temin edilmesidir (Orlich vd., 2009).

Avustralya’nın Tasmanya bölgesinde 1999-2012 yılları arasında faaliyet gösteren Beaconsfield altın madeninde flotasyon, gravite ayırması, bakteriyel oksidasyon, siyanür liçi yöntemleri birlikte uygulanmaktadır. Tesiste, faaliyet gösterdiği süre içerisinde 27 tondan fazla altın üretilmiştir. Bölgede cevherleşme sülfür minerallerinin kuvars, ankerit damarları içerisinde dağılım halinde olduğu kum, kireç ve silt taşları şeklindedir. Cevherde başlıca sülfür mineralleri pirit ve arsenopirittir. Onlara az miktarda kalkopirit, daha seyrek olarak ise galen ve sfalerit eşlik etmektedir. Cevher yapısında altın sıklıkla serbest taneler halinde veya arsenopirit ve pirit matrisinde refrakter taneler şeklinde bulunmakta, tenörü ise 10-20 g/t arasında değişmektedir. Tesiste uygun tane boyutuna öğütülen cevher (170 µm) gravite ayırmasının ardından flaş flotasyon sonrası flotasyon ile zenginleştirilmektedir.

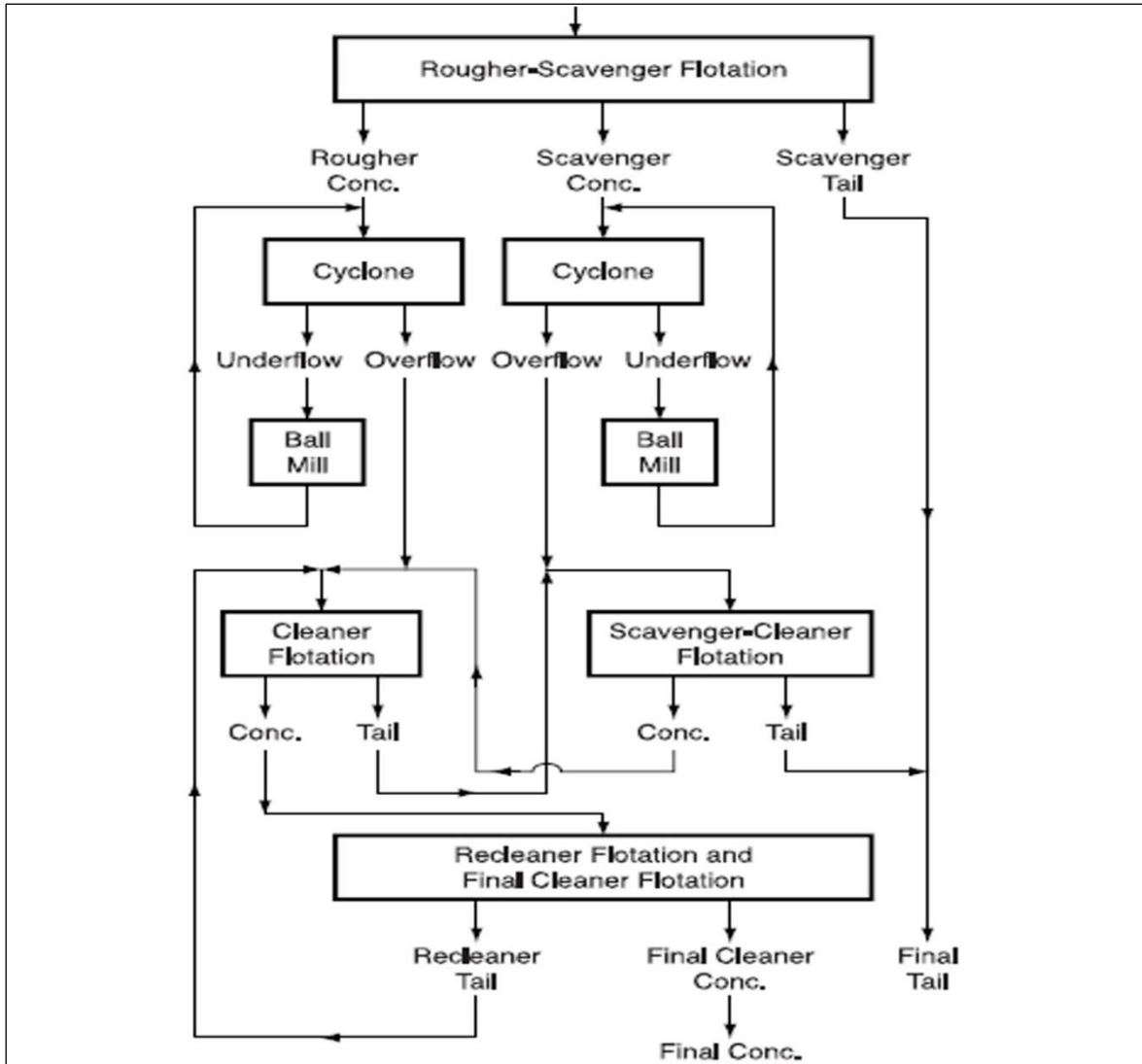
Beaconsfield altın madeninde flotasyon, kaba, süpürme ve temizleme kademelerinden oluşan devrede gerçekleştirilmektedir. Temizleme devresi sonrasında yeniden öğütülen altın konsantresi bakteriyel oksidasyonu takiben siyanür liçine tabi tutulmaktadır. Altın cevherleşmesi arsenopirit ile yakın ilişkili olduğundan sülfür flotasyonu uygulanmaktadır. Bu amaçla arsenopiritin canlandırılması amacıyla bakır sülfat kullanılırken, toplayıcı olarak sodyum isobütil ksantat ve köpürtücü olarak Interfroth IF106 kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar flotasyon tesisinde altın kaçağının 1 g/t seviyelerinde olduğunu ve altın kaçaklarının %50’sinin 10 µm ve altındaki boyutlarda gerçekleştiğini göstermektedir (Holder, 2013). Tesis akım şeması Şekil 3.14’te gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Beaconsfield altın madeni akım şeması (Holder, 2013)

Papua Yeni Gine’de faaliyet gösteren Bouganville Au-Cu madeninde, altın içeren porfiri bakır cevher, flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmektedir. Cevherde altın 0,4 g/t, bakır ise %0,4 miktarlarında bulunmaktadır. Cevherde altın çoğunlukla nabit altın olarak bulunurken, başlıca bakır kaynağı mineraller kalkopirit ve bornittir. Cevher yatağında, sülfür oluşumu çoğunlukla kuvars diorit ve tüfler içerisinde gerçekleşmiştir ve cevher %0,5-0,7 oranında pirit içermektedir. Tesisin flotasyon akım şeması basitleştirilmiş haliyle Şekil 3.15’te verilmiştir. Kırma sonrasında bilyalı değirmen ile hedef tane boyutuna ( $P_{70}$ : 150  $\mu$ m) öğütülen cevher, hidrosiklon sınıflandırması sonrasında, kaba flotasyon devresine beslenmektedir. Kaba flotasyon artığı süpürme devresine gönderilirken, kaba ve süpürme flotasyonu konsantreleri ayrı olarak bilyalı değirmende kapalı devre öğütülmekte ve sınıflandırılmaktadır. Kaba flotasyon konsantresi sınıflandırma sonrasında temizleme devresine beslenirken süpürme flotasyonu konsantresi süpürme temizlemesi devresine beslenmektedir. Üç kademeli temizleme sonrasında 25 g/t tenörlü altın ve %30 tenörlü bakır konsantresi sırasıyla, %70,6 ve %84,7 verimlerle elde edilmektedir (Woodcock vd., 2007).

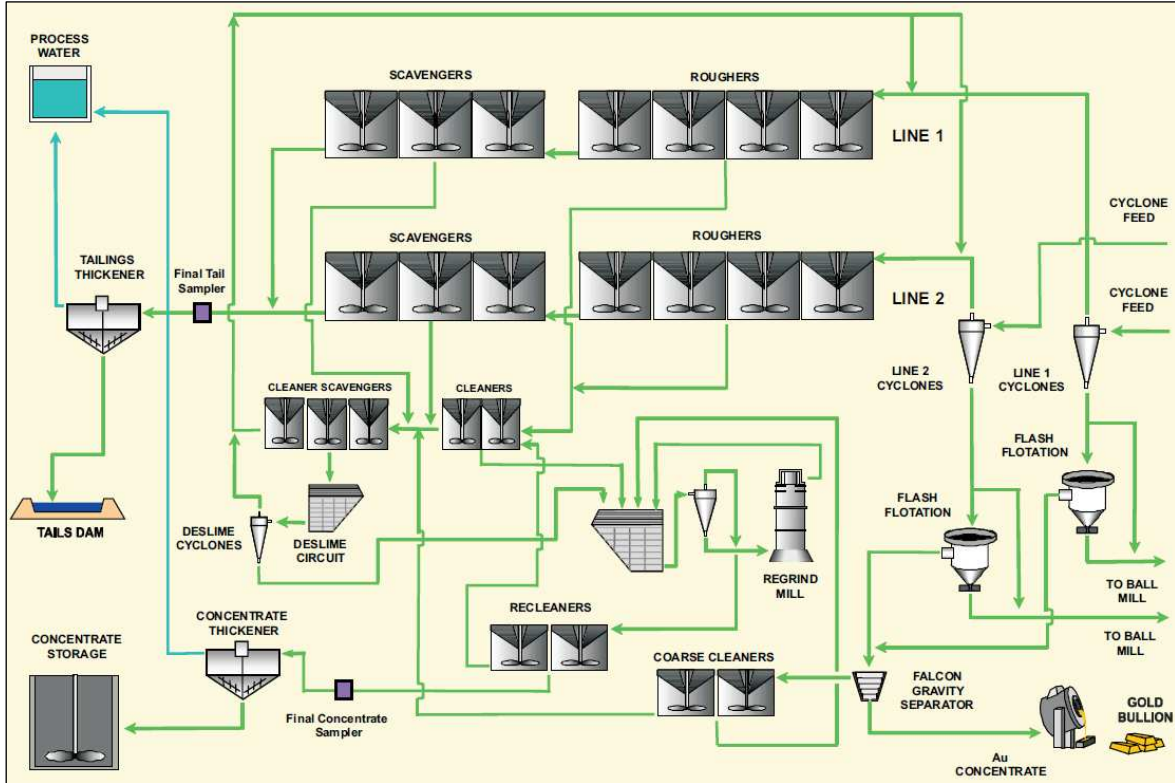




Şekil 3.15. Bougainville altın madeni akım şeması (Woodcock vd., 2007)

Avustralya'nın South Wales bölgesinde bulunan Cadia Hill düşük tenörlü altın madeninde, altın ve bakır zenginleştirilmesi gravite ayırması, flaş flotasyon ve flotasyon yöntemlerinin bir birleşimi ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.16). Besleme tenörü altın için 0,77 g/t ve bakır için %0,22 olan tesiste 1998-2004 yılları arasında yaklaşık 60 ton altın ve 190 bin ton bakır sırasıyla %74,1 ve %82,6 verimle üretilmiştir. İşletmede, yarı otojen, çakıllı ve bilyalı değirmenler kullanılarak 150  $\mu\text{m}$  ( $P_{80}$ ) hedef boyutuna indirilen cevher, hidrosiklon ile sınıflandırılmaktadır. Hidrosiklon alt akımı flaş flotasyonu takiben Falcon konsantratörü ile zenginleştirilirken, hidrosiklon üst akımı ise kaba flotasyon sonrası iki kademeli temizleme devresi ile temizlenmektedir. Devrede performans arttırmak amacıyla 2003-2004 yılları arasında hem akım şemasında hem de reaktif rejiminde bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu düzenlemeler, gravite devresi artıklarının boyut sınıflandırılması sonrası

tekrar öğütülmesi, birincil temizleme devresi konsantrelerinden şlam uzaklaştırma, altın seçimli reaktif denemeleri sonrası reaktifin kademeli olarak ilave edilmesi gibi bazı uygulamaları içermektedir. Yapılan bu düzenlemeler sonucunda altın verimi %7 artışla %80'e, bakır verimi ise %3'lük artışla %88'e çıkarılmıştır (Cesnik vd., 2005).



Şekil 3.16. Cadia Hill altın madeni flotasyon tesisi akım şeması (Cesnik vd., 2005)

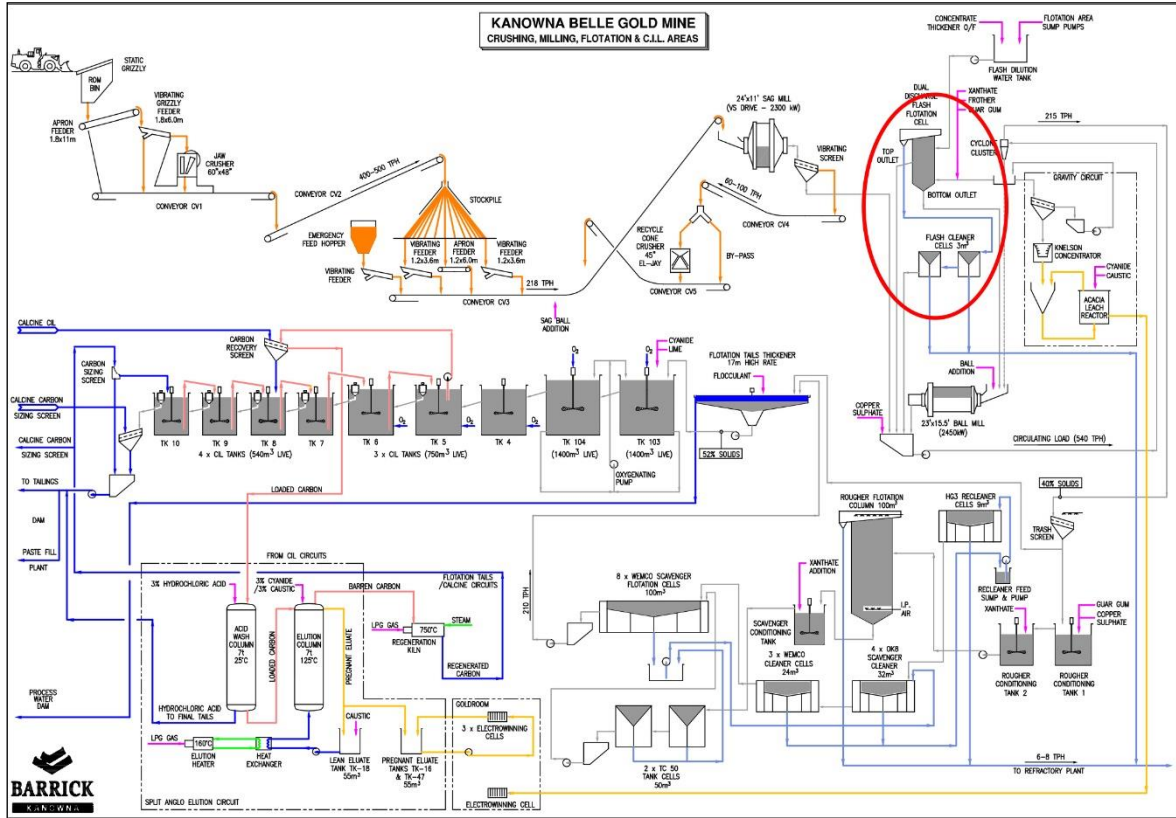
ABD'nin Nevada eyaletinde bulunan Carlin bölgesinden adını alan, Carlin tipi altın yatakları süreç tercihini etkileyen önemli cevher tiplerinden biridir. Bu tipteki yataklarda altın, karbonat bazlı kayalarda başta pirit, arsenopirit olmak üzere çeşitli sülfür minerallerinin matrislerinde çok ince taneler olarak kapanım halinde bulunmaktadır (Zhou vd., 2004; Cline vd., 2005). Flotasyon yöntemi, Carlin tipi cevherlerde genellikle altın içeren sülfürlü minerallerden ön konsantre elde edilmesi amacıyla tercih edilmektedir. Bu nedenle flotasyon görece asidik pH'larda (~5) gerçekleştirilmektedir. Ancak cevherlerin yüksek karbonat içeriği genellikle pH kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu tipteki cevherlerde yaygın olan bir diğer uygulama ise oksidasyonun önüne geçmek için hava yerine saf azot kullanılmasıdır (Chryssoulis ve McMullen, 2016). Nevada'da faaliyet gösteren Carlin ve Lone Tree altın madenlerinde de süreçler bu temel özellikleri göstermektedir. Newmont firması tarafından işletilen her iki tesiste de kaba ve temizleme flotasyonundan oluşan

devrelerde, pülp pH'sı sülfürik asit kullanılarak 5,5-6 arasında tutulmaktadır ve flotasyon hava yerine saf azot kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu tesislerde flotasyon aşamasında kullanılan reaktifler de birbirleriyle benzerdir ve toplayıcı olarak PAX tercih edilirken, altın aktivasyonu için gümüş nitrat kullanılmaktadır (Orlich vd., 2009).

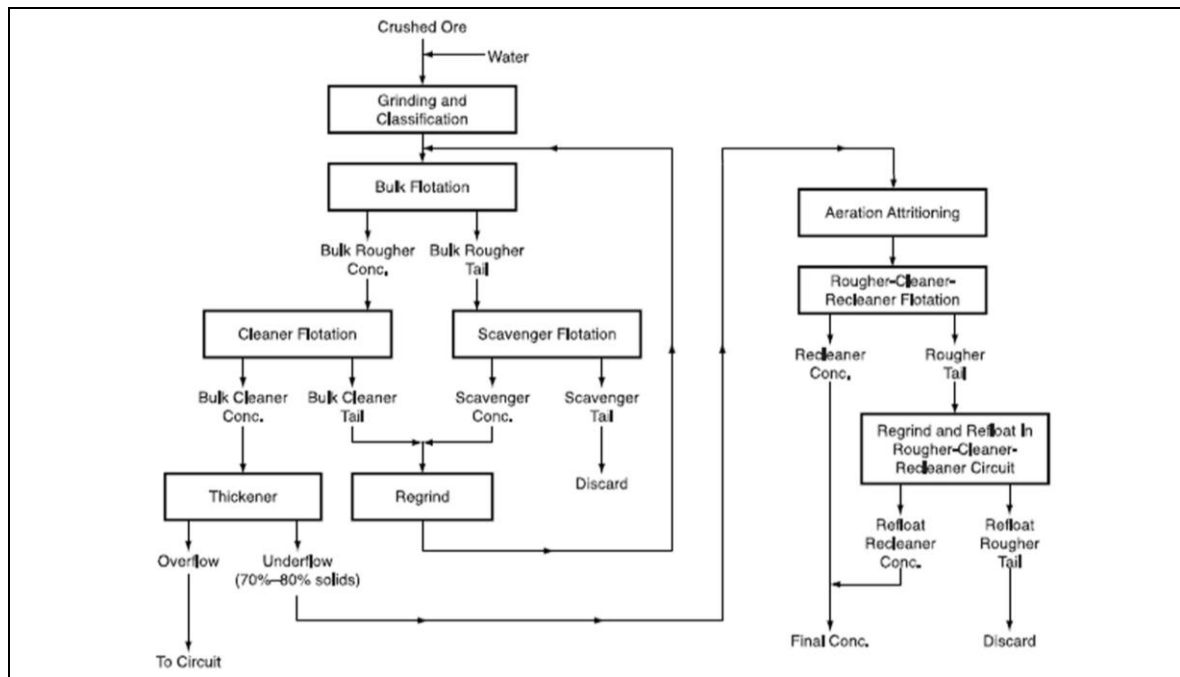
Batı Avustralya'da Kalgoorlie yakınlarında bulunan Kanowna Belle altın madeninde refrakter tipteki altın cevherinin işletilmesi flotasyon ve siyanür liçi yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Tesiste bulunan gravite devresi yalnızca farklı ocaklardan gelen oksitli altın cevherleri beslendiğinde devreye alınmakta, bu durumlarda flotasyon devreden çıkarılmaktadır (Şekil 3.17). Sülfür minerali olarak piritin baskın olduğu cevher yapısında az miktarda pirotit, sfalerit ve gersdorfit (NiAsS) bulunmaktadır. Sülfür içermeyen gang mineralleri ise kuvars, muskovit, feldspatlar ve karbonatlar (ankerit ve dolomit) olarak tanımlanmaktadır. Cevherde altın çoğunlukla nabit altın ve elektrik formunda olup, pirit, kuvars ve feldspatlarla ilişkilidir. Cevher, öğütme sonrasında flaş flotasyonu takiben, önce kolon flotasyonuna, ardından kaba, süpürme ve temizleme devrelerini içeren konvansiyonel flotasyona tabi tutulmaktadır. Flotasyon artıkları liç ünitesine pompalanırken, flotasyon konsantrisi izabe tesisine gönderilmektedir. Flotasyon devresinde pH 7,2-8,1 arasında tutulmaktadır ve devrede toplayıcı olarak PAX, canlandırıcı olarak  $\text{CuSO}_4$ , bastırıcı olarak guar gum kullanılmaktadır. Flaş flotasyonda poliglikol (DOW400) tarzı köpürtücü tercih edilirken, konvansiyonel flotasyon devresinde alkol/poliglikol karışımı olan OTX140 kullanılmaktadır (Newcombe vd., 2013).

Cevherin mineralojik yapısına göre, uygulanan farklı akım şemalarına başka bir örnek olarak Filipinlerde faaliyet gösteren Lepanto altın madeni gösterilebilir (Şekil 3.18). Cevherde altın büyük ölçüde tellüritler ve nabit altın, bakır ise enarjit ve luzonit ( $3\text{Cu}_2\text{S}.\text{As}_2\text{S}_3$ ) formunda, kuvars, kalsedon ve serizit ile beraber bulunmaktadır. Tesisi iki kademede ele almak mümkündür. İlk kademede arsenik ile yakın ilişkide olan altın ve bakır asidik pH'da (5,6) sülfür minerallerinin toplu flotasyonu ile yüzdürülürken sonraki kademede seçimli flotasyon ile altın ve bakırın seçimli flotasyon gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla ilk kademede elde edilen ön konsantr, tikiner ile %70-80 katı oranına susuzlandırılarak, 30 dakika hızlı karıştırma tankında hava ile koşullandırılmaktadır. Kireç ile pH 10,5'a yükseltilerek piritin bastırılması amaçlanırken, cevher herhangi bir reaktif ilavesi olmadan üç kademeli temizleme flotasyonu ile zenginleştirilmektedir. Temizleme

devresi artıkları ise kapalı devre öğütme ve hidrosiklon simflandırması sonrasında ayrı bir devrede tekrar üç kademeli temizlemeye tabi tutulmaktadır (Woodcock vd., 2007).



Şekil 3.17. Kanowna Belle Altın Madeni akım şeması (Newcombe vd., 2013)

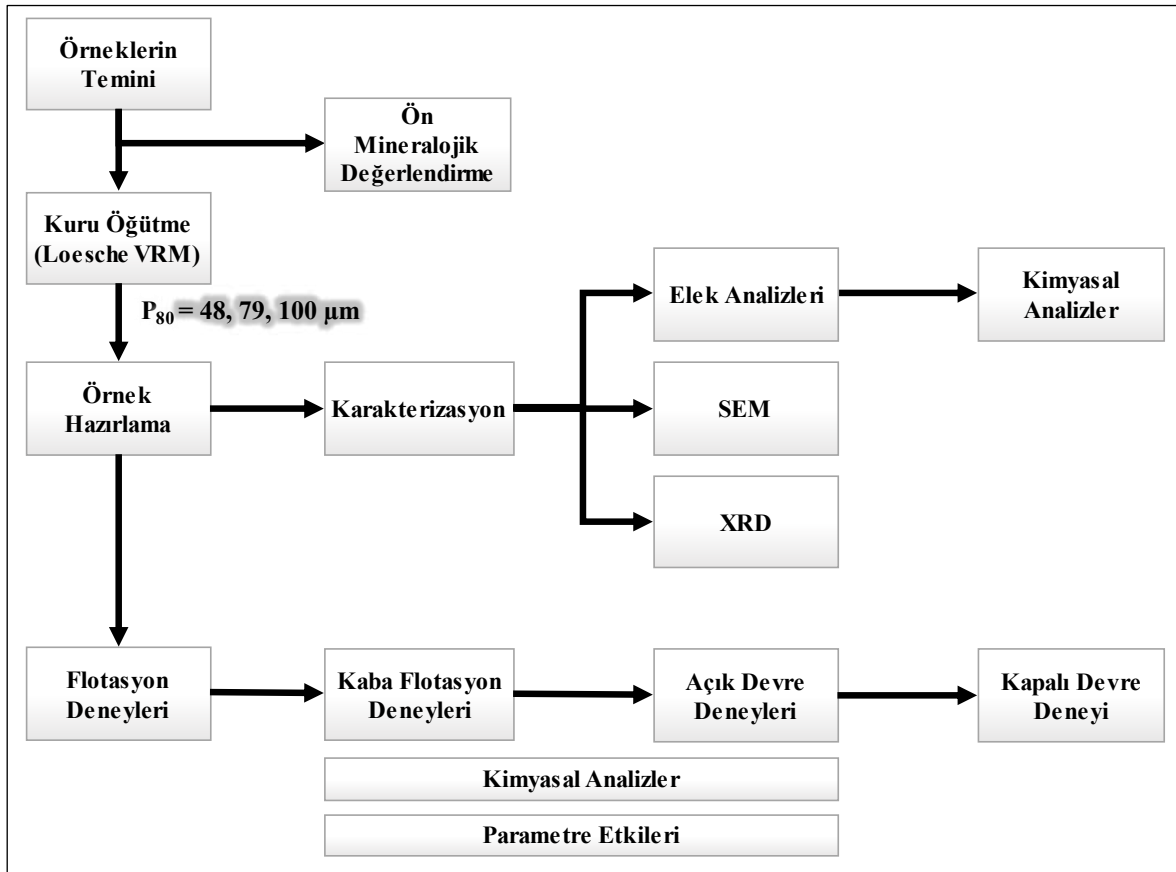


Şekil 3.18. Lepanto altın-bakır madeni akım şeması (Woodcock vd., 2007)



#### 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada uygulanan deneysel süreçlerin şematik bir gösterimi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Şemada gösterilen aşamalar, bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.



Şekil 4.1. Deneysel süreçlerin şematik gösterimi

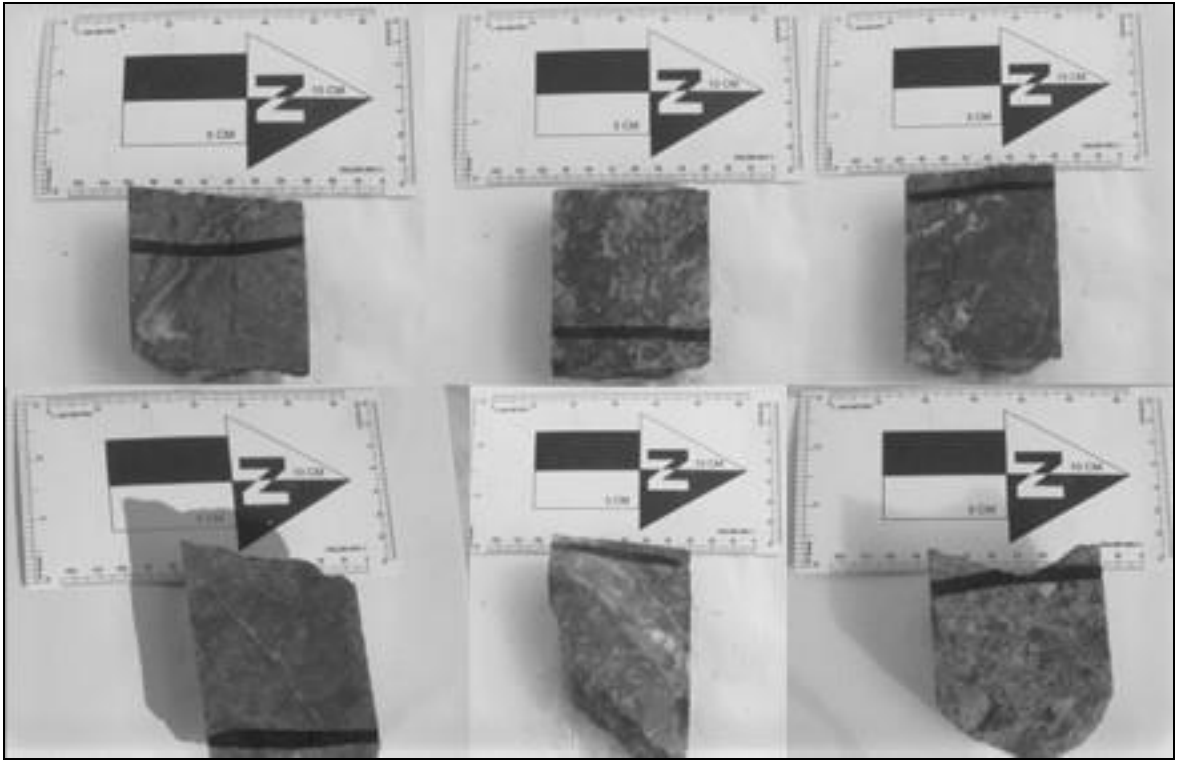
##### 4.1. Materyal

Bu tez çalışmasında, Artvin, Yusufeli bölgesinden alınan cevher örneği kullanılmıştır. Cevher örneğinin Loesche GmbH tarafından valsli dik değirmen ile kuru olarak 48, 79 ve 100 µm P<sub>80</sub> tane boyutlarına öğütülmesi sağlanmış ve öğütülmüş örnekler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Cevher Hazırlama Laboratuvarına gönderilmiştir.

Temin edilen örnekler, uygun numune azaltma yöntemleri kullanılarak 1 kg'lık miktarlara azaltılıp, torbalanmıştır ve olası oksitlenmenin önlenmesi amacıyla derin dondurucuda muhafaza edilmiştir.

#### 4.1.1. Mineralojik analizler

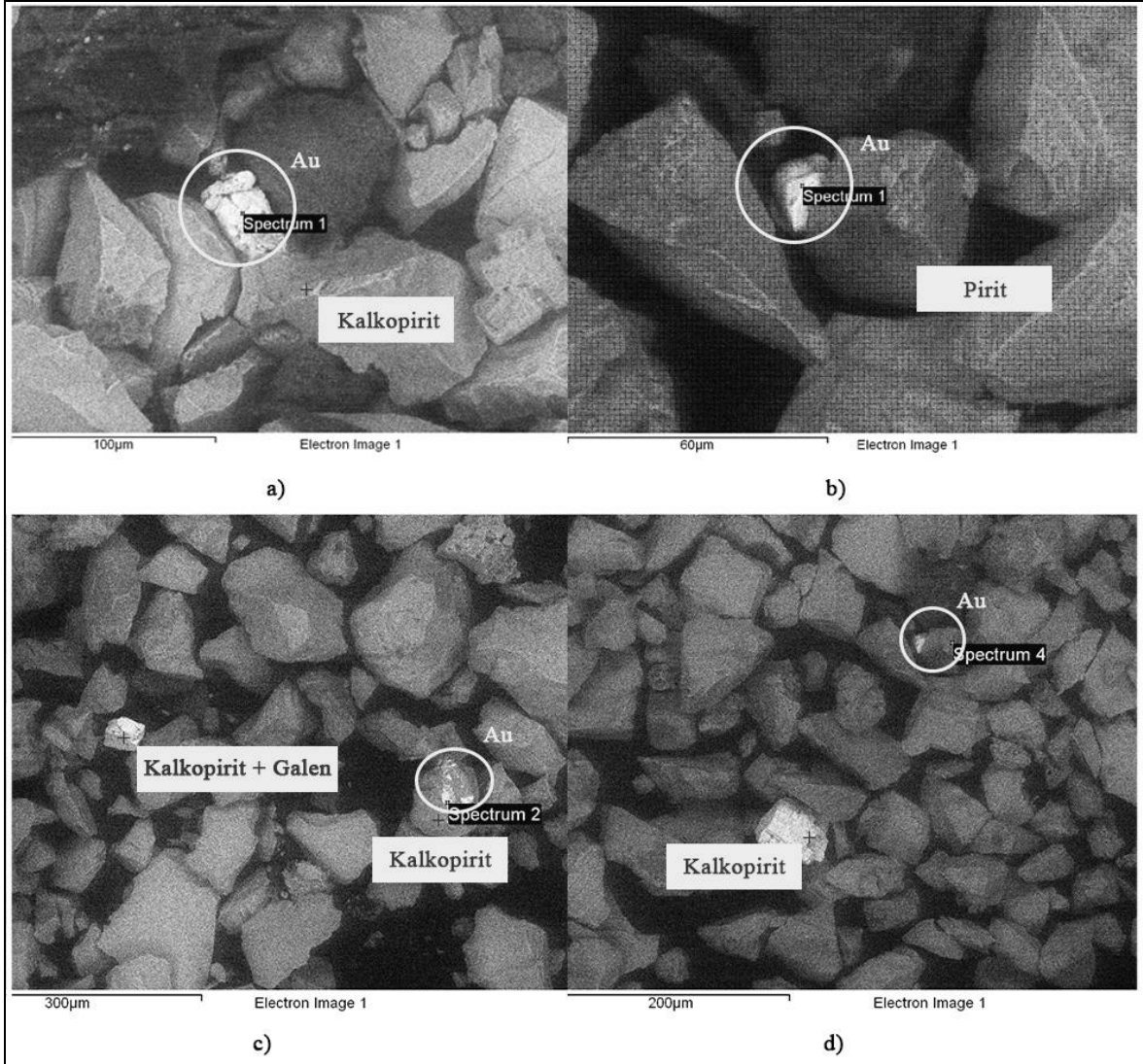
Cevher örneğine yapılan mineralojik analizler sondaj karotlarından alınan örneklerin parlatılmış ince kesitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). Mineralojik analizler, cevherleşmenin kuvars damarları içerisinde gelişen sülfür mineralleri şeklinde olduğunu göstermektedir. Bu cevherleşme tipik bir epitermal altın yatağı olarak tariflenmektedir. Örnekte başlıca sülfür mineralleri pirit ve kalkopirittir ve bunlara daha nadir olarak sfalerit ve galenit eşlik etmektedir.



Şekil 4.2. İnce kesit için alınan karot örneklerinden bazıları

Örneklerin parlatılmış ince kesitlerinde gözlenen altın taneleri 30 µm ve daha ince boyutlardadır. Nabit altın formunda olan taneler çoğunlukla serbest haldedir. Bağlı tanelerin çoğunlukla kalkopirit ve pirit ile ilişkili olduğu gözlenmiştir. Örnekte kalkopirit serbestleşmesinin ise, 0,1 mm boyutunda yüksek oranlarda gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

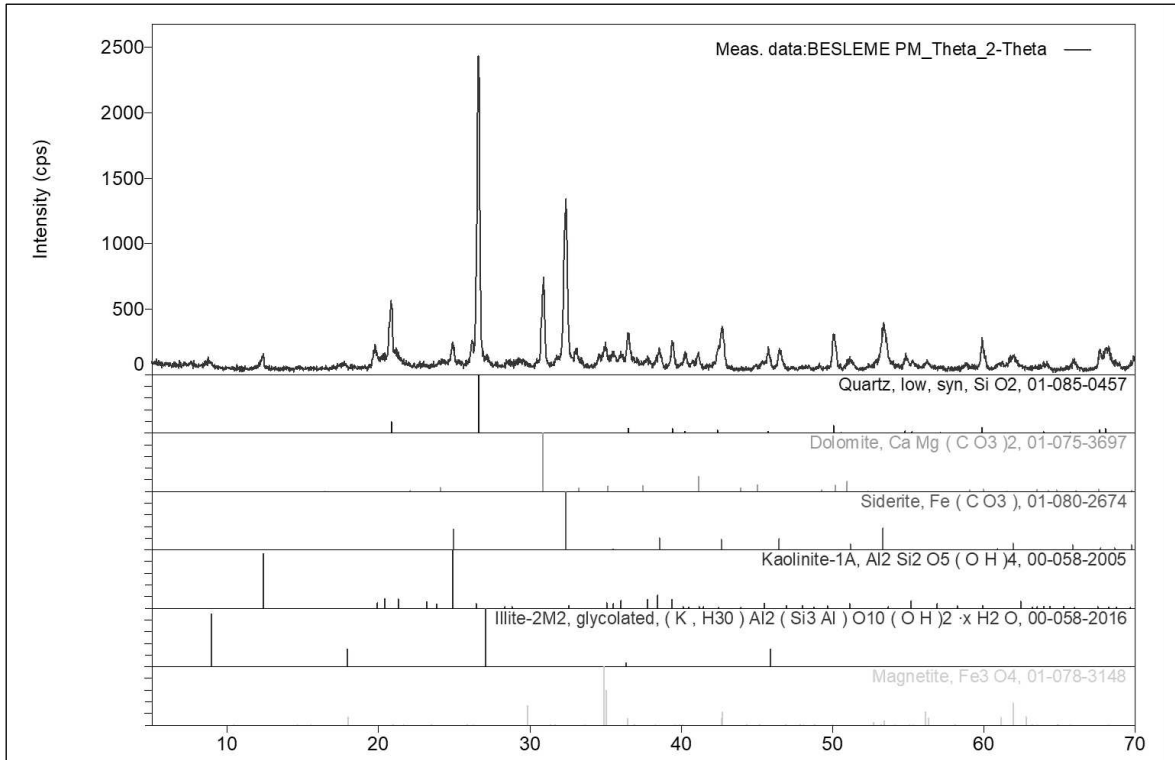
Öğütülmüş örneklerle gerçekleştirilen SEM ve EDX analizlerinde de mineralojik analizlere benzer sonuçlar ulaşılmıştır. Şekil 4.3'te örnekteki altın tanelerinden bazılarının SEM görüntüleri verilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi altın taneleri 10-50 µm boyutlarında çoğunlukla serbest ya da kalkopirit ve pirit ile ilişkili taneler halindedir. Ayrıca, kalkopirit ya da pirit ile katı çözeltiler halindeki altın tanelerine de rastlanmıştır.



Şekil 4.3. Örneğe ait bazı SEM görüntüleri a) Kalkopirit konağında altın b) Altın ve pirit taneleri c) Kalkopirit altın katı çözeltileri d) Kalkopirit ve altın taneleri

Örnekte, sülfürlü olmayan gang minerallerinin çoğunlukla kuvars, dolomit ve bunların alterasyon ürünleri olan mika, kil ve karbonat mineralleridir (Şekil 4.4). XRD analizinde kuvars ve dolomitin ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) yanı sıra kaolen ve illite de rastlanmıştır. Cevherde demir, oksit ve karbonat olarak da, başlıca manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ve siderit ( $\text{FeCO}_3$ ) mineralleri şeklinde bulunmaktadır.





Şekil 4.4. Örneğe ait XRD analizi

#### 4.1.2. Kimyasal analizler

Hazırlanan örnekler kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla, Kanada'da bulunan Bureau Veritas Commodities Ltd. şirketine gönderilerek kimyasal analizlerinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kimyasal analizler, temel ve iz elementler olarak toplam 42 elementi içermektedir. Altın elementinin analizi, kupelasyon (Fire Assay, FA430) ve gravimetrik yöntemi içeren FA530 ile gerçekleştirilirken, diğer elementlerin analizi çoklu asit çözündürmesi sonrası ICP ES/MS (MA270) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Örneğin ortalama tenör değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Gerçekleştirilen kimyasal analizlere göre, örneğin 1,4 g/t Au ve %0,2 Cu içerdiği saptanmıştır. Örneğin gümüş içeriği 1,1 g/t ile altından düşükken, demir ve kükürt içerikleri ise sırasıyla %5,2 ve %1,4'tür. Kayda değer miktarda kurşun ve çinko içermeyen örnekte, mineralojik analizler de göz önüne alınarak başlıca kükürt kaynağının pirit ve kalkopirit olduğunu söylemek mümkündür.

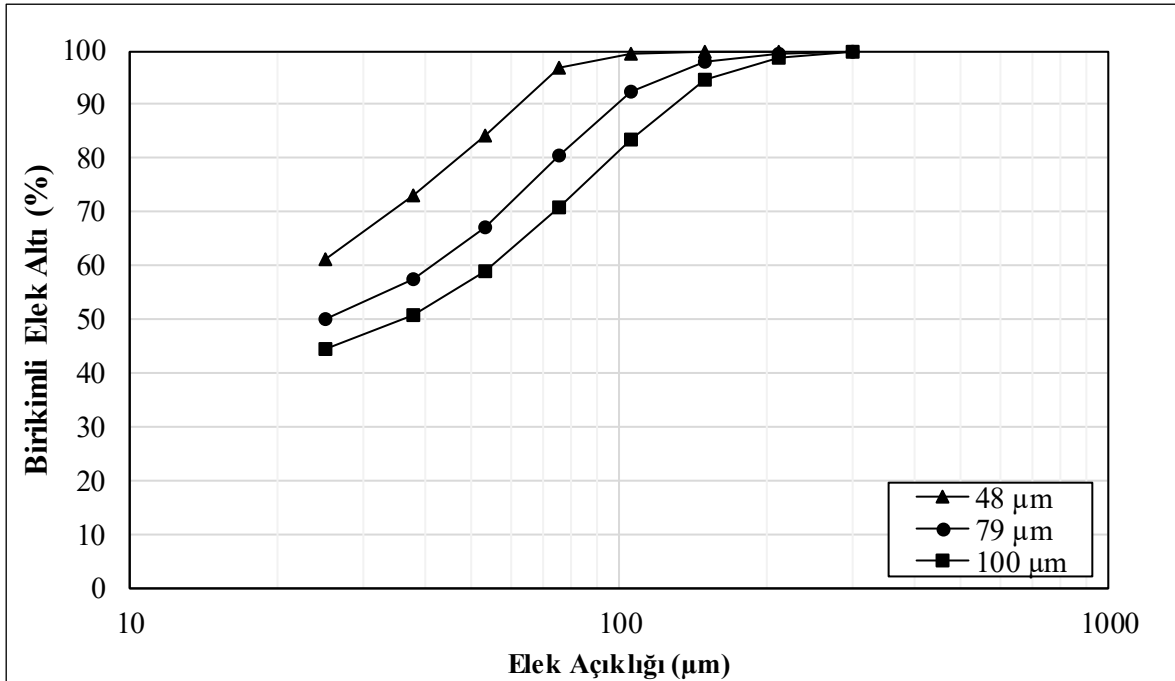
Çizelge 4.1. Cevher örneğinin kimyasal analizi

Element	Birim	Değer	Element	Birim	Değer
<i>Au</i>	<i>g/t</i>	<i>1,40</i>	Mg	%	4,00
<i>Ag</i>	<i>g/t</i>	<i>1,10</i>	Mn	%	0,16
<i>Cu</i>	%	<i>0,20</i>	Mo	g/t	7,80
<i>Fe</i>	%	<i>5,20</i>	Na	%	0,30
<i>S</i>	%	<i>1,40</i>	Nb	g/t	5,20
<i>Pb</i>	<i>g/t</i>	<i>19,32</i>	Ni	g/t	5,80
<i>Zn</i>	%	<i>0,04</i>	P	%	0,10
Al	%	5,50	Rb	g/t	44,80
As	g/t	56,90	Sb	g/t	1,90
Ba	g/t	274,70	Sc	g/t	14,60
Be	g/t	7,10	Se	g/t	7,40
Bi	g/t	1,10	Sn	g/t	1,60
Ca	%	15,20	Sr	g/t	110,40
Cd	g/t	1,10	Ta	g/t	0,70
Ce	g/t	22,60	Th	g/t	1,70
Co	g/t	9,80	Ti	%	0,30
Cr	g/t	9,10	U	g/t	1,10
Hf	g/t	1,40	V	g/t	58,70
K	%	1,90	W	g/t	2,10
La	g/t	11,30	Y	g/t	9,30
Li	g/t	10,40	Zr	g/t	37,40

#### 4.1.3. Tane boyutu analizleri

Uygun flotasyon tane boyutunun belirlenmesi amacıyla cevher örnekleri 48, 79 ve 100 µm olacak şekilde üç farklı P<sub>80</sub> boyutuna öğütülmüştür. Gerçekleştirilen elek analizlerinde malzeme -300+212, -212+150, -150+106, -106+75, -75+53, -53+38, -38+25 ve -25 boyut fraksiyonlarına ayrılmıştır. Her bir boyut fraksiyonundan alınan temsili örnekler kimyasal analize gönderilmiştir.

Örneklerin tane boyut dağılımları Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere 100 µm'da malzemenin %40'dan fazlası -25 µm'a da bulunurken, öğütme boyutunun 79 µm'a düşmesiyle bu oran %50'ye, 48 µm'a düşmesiyle ise %60'ın üzerine çıkmaktadır.



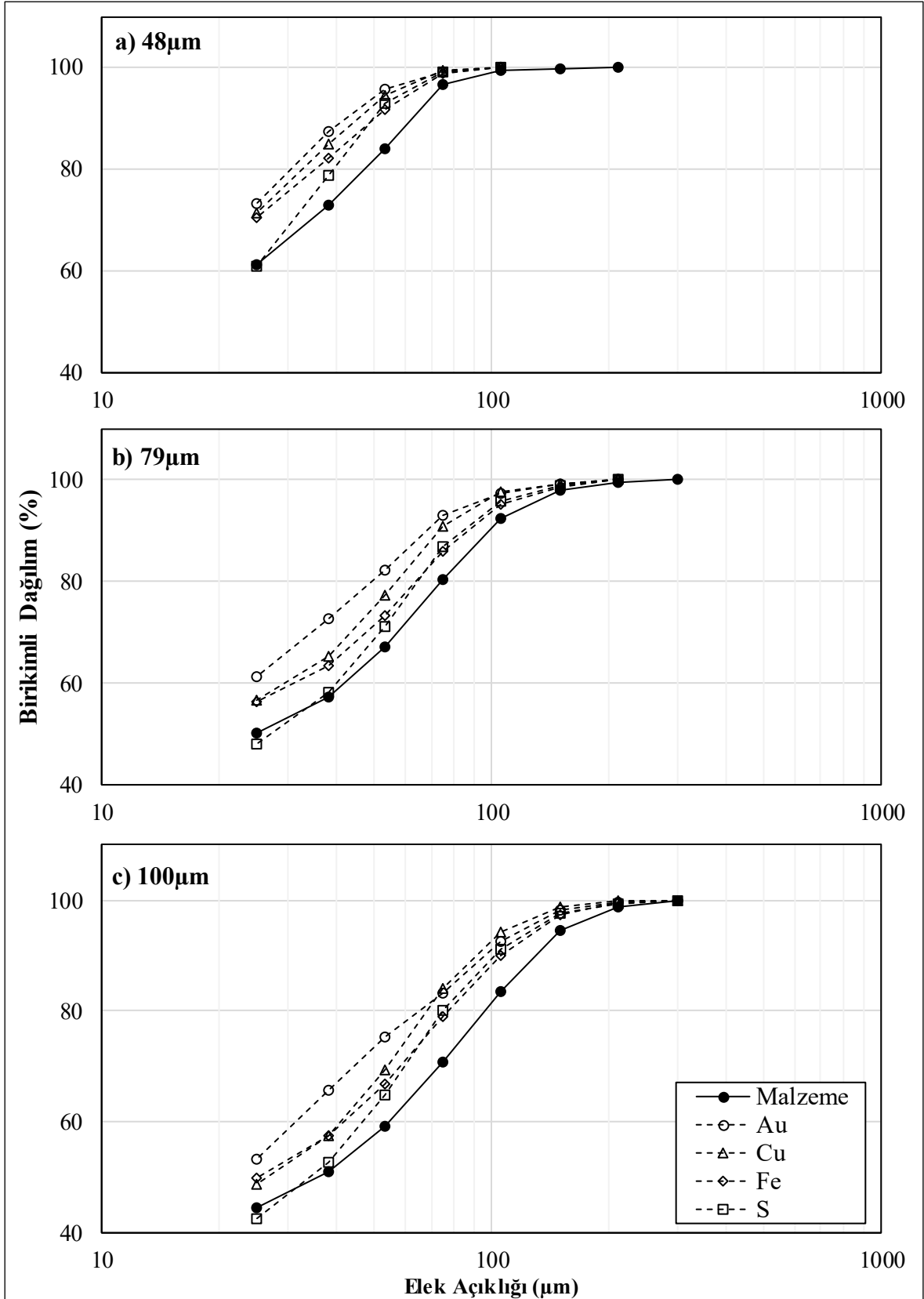
Şekil 4.5. Farklı P<sub>80</sub> boyutuna öğütülen örneklerin tane boyu dağılımları

Au, Cu, Fe ve S içeriklerinin boyut fraksiyonlarına göre değişimi ise Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Öğütme boyutunun incelişmesiyle, fraksiyonlardaki malzeme miktarına paralel olarak ince fraksiyonlardaki altın oranının arttığı görülmektedir. Üç örnekte de malzeme miktarından daha fazla oranda altının -25 µm boyutunda bulunduğu görülmektedir. 48 µm'da bu oran %70'lerin üzerindeyken, 79 µm'da %61,2'ye, 100 µm'da ise %53,3'e düşmektedir. 100 µm boyutunda altının %26,8'lik bölümü -106+38 boyut aralığında bulunurken, 79 µm'da bu oran %24,6'ya, 48 µm'da ise %12,6'ya düşmektedir.

Boyut fraksiyonlarındaki bakır içeriğinin de, altın ile benzerlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Boyutun incelişmesi ile malzeme miktarına paralel olarak -25 µm altına geçen bakır miktarı artmaktadır. 100 µm'da bakırın %48,8'lik bir kısmı -25 µm boyutunda bulunurken, 79 µm'da bu oran %56,6'ya, 48 µm'da ise %71,4'e yükselmektedir. Özellikle 79 ve 100 µm boyutlarında, bakırın altına kıyasla daha çok -106+38 boyut aralığında bulunduğunu söylemek mümkündür. Demir dağılımı da bakır ile oldukça benzer iken, kükürtün diğer elementlere kıyasla daha düşük oranlarda -25 µm boyutunda bulunduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. Farklı P<sub>80</sub> boyutlarında tane boyu dağılımları ve kimyasal analizler

			Tenör				Dağılım			
P <sub>80</sub> µm	Elek µm	Ağırlık %	Au g/t	Cu %	Fe %	S %	Au %	Cu %	Fe %	S %
48	+212									
	-212+150	0,24								
	-150+106	0,48								
	-106+75	2,56	0,34	0,04	2,03	0,43	0,81	0,68	1,31	0,98
	-75+53	12,54	0,38	0,08	2,78	0,71	3,49	4,75	6,87	6,15
	-53+38	11,22	1,01	0,17	4,41	1,81	8,32	9,54	9,75	14,04
	-38+25	11,78	1,64	0,23	4,99	2,19	14,25	13,66	11,57	17,83
	-25	61,19	1,62	0,24	5,85	1,44	73,13	71,37	70,51	60,99
	Σ	100,00	1,36	0,20	5,08	1,44	100,00	100,00	100,00	100,00
79	+212	0,52								
	-212+150	1,48	0,47	0,07	3,27	0,80	0,69	0,67	1,28	1,04
	-150+106	5,73	0,47	0,06	3,11	0,86	2,00	1,79	3,50	3,20
	-106+75	11,93	0,50	0,11	3,95	1,14	4,40	6,77	9,25	8,90
	-75+53	13,08	1,08	0,20	4,96	1,83	10,53	13,30	12,74	15,62
	-53+38	9,97	1,31	0,24	4,98	2,01	9,70	12,23	9,76	13,07
	-38+25	7,24	2,14	0,24	5,03	2,15	11,49	8,59	7,16	10,15
	-25	50,05	1,65	0,23	5,73	1,47	61,18	56,63	56,32	48,02
	Σ	100,00	1,35	0,20	5,09	1,53	100,00	100,00	100,00	100,00
100	+212	1,17	0,32	0,03	1,96	0,74	0,27	0,18	0,44	0,55
	-212+150	4,40	0,48	0,05	2,59	0,65	1,55	1,04	2,21	1,83
	-150+106	10,92	0,69	0,08	3,42	0,92	5,57	4,48	7,25	6,43
	-106+75	12,77	0,99	0,16	4,48	1,37	9,27	10,17	11,09	11,21
	-75+53	11,63	0,95	0,25	5,46	2,02	8,17	14,71	12,31	15,05
	-53+38	8,19	1,55	0,29	5,75	2,34	9,39	11,99	9,14	12,30
	-38+25	6,49	2,61	0,26	6,14	2,45	12,47	8,62	7,73	10,19
	-25	44,43	1,63	0,22	5,78	1,49	53,29	48,80	49,82	42,44
	Σ	100,00	1,36	0,20	5,16	1,56	100,00	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.6. Tane boyutlarına göre boyut fraksiyonlarındaki malzeme miktarları ve Au, Cu, Fe ve S dağılımları a) 48 µm b) 79 µm c) 100 µm

#### 4.1.4. Flotasyon reaktifleri

Deneyle, cevherin doğal pH'sının yanında çoğunlukla seçimli altın flotasyonunun mümkün olduğu bazı pH'larda gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle pH'ın ayarlanmasında kireç kullanılmıştır. Kirecin yanı sıra, pH ayarlayıcı etkisinin belirlenmesi amacıyla bazı deneylerde Merck firmasından temin edilen %99,5 saflıktaki soda külü ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) kullanılmıştır. Deneylerde  $E_h$ 'ın ayarlanması ve piritin bastırılması amacıyla ise, Merck firmasından temin edilen, %87 saflıktaki Na-ditiyonit ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) kullanılmıştır.

Deneylede kullanılan toplayıcılar, ECS Kimya firmasından temin edilen PAX, PEX, SIPX, Cytec Solvay firmasından temin edilen AERO 3894, AERO XD-5002 ve AEROFLOAT 238'dir. Bu reaktiflerin temel özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

**PAX (potasyum amil ksantat) :** Metalik sülfürlerin flotasyonunda yaygın olarak kullanılan, kuvvetli ancak seçimlilik özelliği olmayan bir toplayıcıdır.

**PEX (potasyum etil ksantat):** Özellikle Cu, Ag, Ni flotasyonunda kullanılan yüksek seçimli, düşük toplayıcılık özelliği gösteren bir toplayıcıdır.

**SIPX (sodyum izopropil ksantat):** Sülfürlü metallerin flotasyonunda kullanılan kuvvet ve seçimlilik bakımından PAX ve PEX'in arasında yer alan toplayıcıdır.

**AERO 3894 Promoter (A3894):** Thinocarbamate türündeki toplayıcı bakır cevherlerinin alkali pH'larda yüzdürüldüğü devrelerde ksantatlarla birlikte kullanılmaktadır.

**AERO XD-5002 Promoter (XD5002):** Modifiye thinocarbamate tipinde bir toplayıcıdır. Cu ve Mo flotasyonunda pH 9-10 aralığında seçimlilik sağlamaktadır.

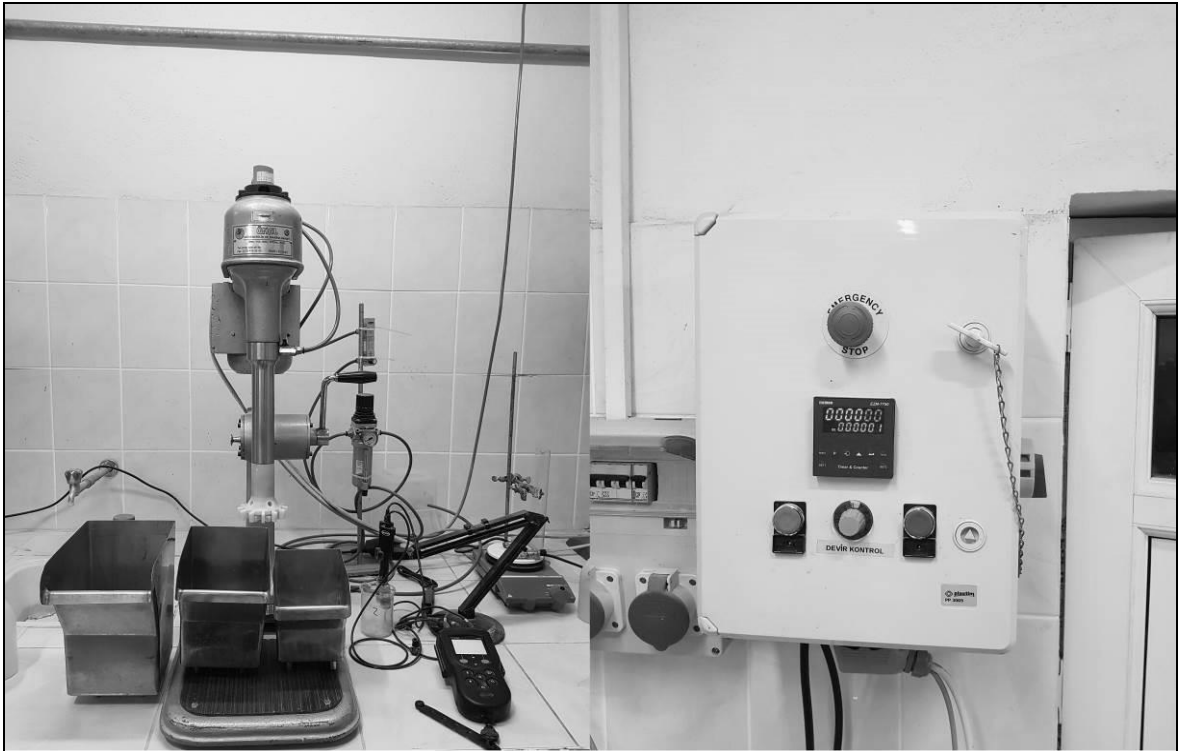
**AEROFLOAT 238 Promoter (A238):** Dialkil ditiyofosfat tipinde bir toplayıcıdır. Altın içeren bakır cevherlerinde demir sülfürlere karşı seçimli flotasyon sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

PAX, PEX ve SIPX suda çözündükleri için günlük olarak hazırlanan seyreltik çözeltilerinden pülpe ilave edilirken, diğer toplayıcılar suda çözünmedikleri için doğrudan pülpe eklenmiştir. Köpürtücü olarak ise MIBC benzeri olan Cytec Solvay firmasından temin edilen, alkol türündeki AEROFROTH 70 (AF70) kullanılmıştır.

## 4.2. Yöntem

### 4.2.1. Flotasyon deneyleri

Tez çalışması kapsamında flotasyon deneyleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan, Ünal Makine tarafından üretilen flotasyon makinesiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7). Flotasyon makinesi karıştırma hızının elektronik olarak ayarlanmasına imkan verecek şekilde geliştirilmiştir. Flotasyon için gereken hava kompresörden sağlanırken, hava miktarının kontrolü hava akış metre ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Deneylerde kullanılan flotasyon düzeneği

DeneySEL çalışmalarını kaba flotasyon deneyleri ve açık devre flotasyon deneyleri olarak gruptandırmak mümkündür.

Kaba flotasyon deneylerinde tane boyutu, pH, köpürtücü dozajı, toplayıcı tipi ve dozajı, flotasyon süresi, pH ayarlayıcı,  $E_h$  ve koşullandırma süresinin etkisi incelenmiş ve nedenleriyle açıklanmaya çalışılmıştır. Flotasyon açısından temel parametreler olduğu düşünülen tane boyutu, pH, köpürtücü dozajı ve toplayıcı dozajı parametrelerinin etkilerinin incelenmesi olası tüm kombinasyonların birlikte uygulandığı tasarım matrisleri çerçevesinde gerçekleştirilmiştir ve deney sonuçları seçilen şartlarda tartışılmıştır (Çizelge 4.3; Çizelge 4.4). Toplayıcı tipi, flotasyon süresi, pH ayarlayıcı ve  $E_h$  ve koşullandırma süresinin etkilerinin incelendiği deneylerde ise parametre etkilerinin değerlendirilmesi, belirlenen şartlara göre ikili karşılaştırmalar halinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Toplayıcısız şartta flotasyon parametrelerinin etkisi

Parametreler	Seviyeler			
Tane Boyutu	-	48	79	100
pH	Doğal pH	pH 8	pH 9	pH 10,5
Köpürtücü Dozajı	-	12	24	48

Çizelge 4.4. Toplayıcı şartta flotasyon parametrelerinin etkisi

Parametreler	Seviyeler		
Tane Boyutu		79	100
Toplayıcı Dozajı	0	15	30
Köpürtücü Dozajı		12	24

Altın ve bakır cevherlerinden ekonomik olarak kıymetli bir konsantrenin elde edilmesi genellikle kaba flotasyonu takip eden temizleme flotasyonu ile mümkün olabilmektedir. Flotasyon tüm kademelerinde bütünsellik arz eden bir süreç olduğundan, kaba flotasyon kademesinde meydana gelen bir değişimin nihai konsantrenin verim ve tenör değerlerini değiştirmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle, kaba flotasyon deneyleri ile belirlenen parametrelerin nihai konsantrenin verim ve tenör değerlerinde göstereceği etkileri araştırmak amacıyla iki temizleme kademesinden oluşan açık devre flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde temizleme kademelerinde altın ve bakırın verim ve tenör değerlerini önemli ölçüde etkileyebileceği düşünülen, tane boyutu, pH, koşullandırma süresi, toplayıcısız flotasyon ve flotasyon süreleri parametrelerinin etkileri incelenmiştir.



Son olarak açık devre flotasyonu ile pekiştirilen şartlarda, bir kapalı devre flotasyon deneyi gerçekleştirilerek, belirlenen şartların uygulanabilirliği, süpürme kademesinin de ilavesi ile elde edilebilecek nihai tenör ve verim değerlerinin araştırılması sağlanmıştır.

Tüm deneyler %35 katı oranında, şebeke suyu kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve deneyler boyunca pH ve  $E_h$  (Ag/AgCl elektrodu) kayıt altına alınmıştır. Deneylerde pH'ın alkali seviyelere yükseltildiği şartlarda kireç,  $E_h$  ayarlayıcı olarak ise Na-ditiyonit kullanılmıştır.  $E_h$  değerlerinin Ag/AgCl'den Standart Hidrojen Elektrodu değerlerine dönüşümü Eşitlik 4.1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$E_{SHE} = E_{Ag/AgCl} + 0,207 \text{ (volt)} \quad (4.1)$$

Deneylerde ihtiyaç duyulan örnek miktarlarının kullanılabilmesi ve sonraki flotasyon kademelerinde katı oranının ayarlanabilmesi için farklı hacimde flotasyon hücreleri kullanılmıştır (Çizelge 4.5). Kullanılan flotasyon hücresinin hacmine göre hava miktarları ve karıştırma hızları ayarlanarak, her hücre için uygun flotasyon koşullarının oluşturulması sağlanmıştır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.5. Deneylere bağlı olarak kullanılan flotasyon hücreleri ve hacimleri

<b>Flotasyon Kademelerine Göre Kullanılan Hücrelerin Hacimleri (l)</b>				
	Kaba	1.Temizleme	2.Temizleme	Süpürme
Kaba Flotasyon Deneyleri	1,5	-	-	-
Açık Devre Deneyleri	2,5	1,5	1,5	1,5
Kapalı Devre Deneyi	5	2,5	1,5	5

Çizelge 4.6. Hücre hacmine göre karıştırma hızları ve hava miktarları

<b>Hücre hacmi (l)</b>	<b>Karıştırma hızı (dev/dk)</b>	<b>Hava miktarı (l/dk)</b>
1,5	1000	5
2,5	1300	7
5	1600	9

Flotasyon kademelerinde, Çizelge 4.7'de belirtilen koşullandırma süreleri uygulandırmıştır. Koşullandırma sürelerinin sonunda, köpük toplama işlemi, 30 saniyelik köpük sıyırmayı takiben 15 saniyelik havalandırma periyotları şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.7. Flotasyon deneylerinde uygulanan koşullandırma prosedürü

Süre (dk)	Açıklama
0-3	Pülpün koşullandırılması, pH ve $E_h$ değerlerinin kararlı hale gelmesi
3-6	Gerekliyorsa, pH ve $E_h$ 'ın ayarlanması
6-9	Varsa, toplayıcının ilavesi ve koşullandırılması
9-10	Varsa, köpürtücünün ilavesi ve koşullandırılması
10-11	Havanın açılarak köpük oluşumunun sağlanması

Deneyler sonucunda elde edilen ürünler, olası altın kayıplarının önüne geçmek amacıyla filtre edilmeksizin etüvde kurutulup, hazırlandıktan sonra kimyasal analize gönderilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi Au, Cu, Fe ve S'in içerik ve verim değerleri üzerinden yapılmıştır.

#### 4.2.2. Stokiyometrik Hesaplamalar

Günümüzde sülfürlü minerallerin kantitatif analizinde en yaygın kullanılan teknikler AAS (Atomik Adsorpsiyon Spektrometresi) ve ICP (İndüktif Eşleşmiş Plazma)'dir. Ancak bu teknikler ile sadece elementel analiz mümkün olduğu için mineral bazında bir dengenin elde edilmesi oldukça güçtür. Bu amaçla kullanabilecek MLA (Mineral Serbestleşme Analizi) ve QEMSCAN (Kantitatif Elektron Mikroskopu Analizi) gibi teknikler mevcuttur. Ancak bu analiz teknikleri gerek ihtiyaç duyulan temsili örnek miktarlarının fazlalığı, gerekse analiz maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle çoğunlukla uygulanabilir değildir (Sadeghi vd., 2018). Bu nedenle mineraller özelinde dengenin oluşturulmasında stokiyometrik yaklaşımın kullanıldığı örnekler mevcuttur (Kelebek ve Tükel, 1999; Whiten, 2007; Owusu vd., 2014).

Örnekte başlıca sülfür minerallerinin pirit ve kalkopirit olduğu bilinmektedir. Sülfürlü minerallerin stokiyometrik analizinde kükürt üzerinden gerçekleştirilecek bir dengeyi baz almak mümkündür. Örnekte bulunan diğer sülfür mineralleri olan sfalerit ve galenit ise kayda değer miktarlarda bulunmadığından stokiyometrik hesaplarda dikkate alınmamıştır. Kalkopirit ve piritin stokiyometrik dengesi Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Kalkopirit ve piritin stokiyometrik dengesi

	Pirit (FeS <sub>2</sub> )		Kalkopirit (CuFeS <sub>2</sub> )	
	Atom Ağırlığı (g/mol)	İçerik (%)	Atom Ağırlığı (g/mol)	İçerik (%)
Cu	-	-	63,55	34,63
Fe	55,85	46,55	55,85	30,43
S	64,13	53,45	64,13	34,94
<b>Toplam</b>	<b>119,98</b>	<b>100</b>	<b>183,53</b>	<b>100</b>

Kimyasal analiz değerlerinden, stokiyometrik hesaplamanın yapılmasında örnekte miktarca en düşük oranda bulunan bakır baz alınarak, bakırın tamamının kalkopirit (Cp) kaynaklı olduğu varsayılmıştır.

$$C_p = Cu / 34,63 \times 100 \quad (4.2)$$

Kalkopiritte bulunan kükürt (C<sub>p<sub>s</sub></sub>), toplam kükürten düşüldükten sonra, kalan kükürdün tamamının pirit (Py) kaynaklı olduğu varsayılmıştır.

$$C_{p_s} = C_y \times 34,94 / 100 \quad (4.3)$$

$$P_y = ((S - C_{p_s}) / 53,45) \times 100 \quad (4.4)$$

Kalkopirit ve pirit dağılımı elde edildikten sonra, açıkta kalan Fe'nin (NS-Fe), kükürt içermeyen demir minerallerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir ve dağılımı pirit ve kalkopirit içerisindeki Fe miktarının toplam Fe miktarından çıkarılmasıyla elde edilmiştir.

$$NS - Fe = Fe - (C_p \times 30,43) \times 100 - (P_y \times 46,55) \times 100 \quad (4.5)$$

#### 4.2.3. Besleme Tenörlerinin Tutarlılığı

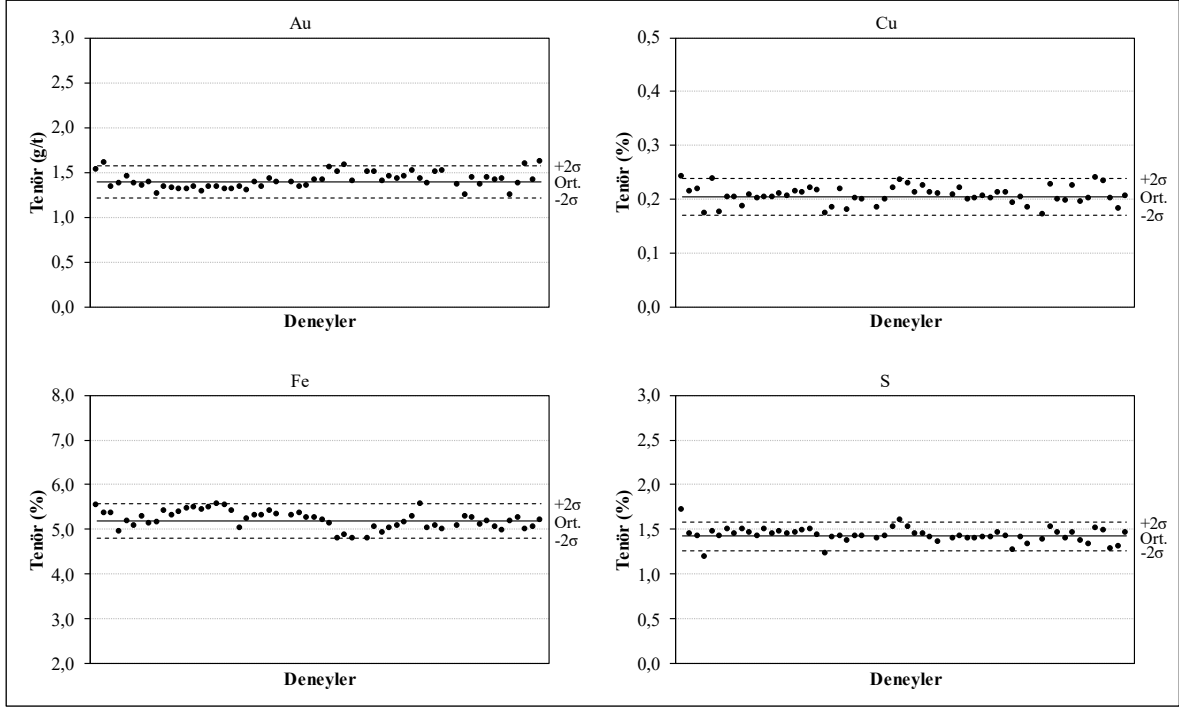
Altının örnekleme ve numune hazırlama yöntemleri gerek yerinde alınan örneklerde gerekse, laboratuvar ve tesis ölçeğinde önemli bir sorundur. Chierigati ve Pitard (2009) örneklemede karşılaşılan başlıca sorunları, külçe etkisi, çok ince tanelerin kaybı olarak açıklamaktadır.

Külçe etkisi olarak tanımlanan etki, örneklemede görece iri boyuttaki altın tanesi ya da tanelerinin tesadüfen ya da örnekleme hatalarından kaynaklanan nedenlerle bir örneğin tenörünü anormal biçimde değiştirmesi olarak tanımlanabilir ve bu durumlarda örnek bölme yöntemlerinin önemi kat be kat artmaktadır. İnce tanelerin örnek alma süreçlerinde kaybı da temsili örnek alma ve azaltma süreçlerinde sıkça rastlanan bir problemdir ve yine örnek bölme yöntemlerine dikkati çekmektedir. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda, kullanılan örnek miktarlarının maden ve tesis ölçeğinin yanında oldukça küçük miktarlarda olması sorunu daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Çalışmaya konu olan cevher örneğinde de gerek altın, gerekse bakır tenörlerinin oldukça düşük seviyelerde olduğu düşünüldüğünde belirtilen sorunlarla karşılaşılması çok olası görünmektedir.

Bu nedenle deneyler sonucunda elde edilen ürünlerin analizi daha önce de değinildiği üzere ICP analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Besleme tenörleri ürünlerin konsantre ve artıklarından geriye dönük olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan besleme tenörlerinin referans örnek ve birbirleriyle olan karşılaştırılması için tanılayıcı istatistikten faydalanılmıştır (Çizelge 4.9). Çizelgeden de görüleceği üzere referans örneğin Au, Cu, Fe ve S tenörleri ile deneylerin hesaplanan besleme tenörleri birbirine oldukça yakındır. Relatif standart sapmalar özelinde ise tüm elementler için tenör değerlerinin ortalamadan sapma oranı %10'dan düşüktür. İlave olarak, deneysel verilerin kontrol grafiği incelendiğinde, hesaplanan tenör değerlerinin %95 olasılıkla  $2\sigma$  değerleri arasında yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.8).

Çizelge 4.9. Deneysel besleme tenörlerinin tanılayıcı istatistiği

Element	Birim	Referans Tenör	Ortalama Besleme Tenörü	SS ( $\sigma$ )	RSS(%)
Au	g/t	1,40	1,395	0,091	6,493
Cu	%	0,20	0,205	0,017	8,215
Fe	%	5,20	5,193	0,197	3,790
S	%	1,40	1,424	0,082	5,752



Şekil 4.8. Hesaplanan tenör değerlerinin kontrol grafiği

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, flotasyon parametrelerinin altın ve bakırın flotasyon performansına olan etkilerinin araştırıldığı deneysel çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsantrelerinin Au, Cu, Fe ve S tenör ve verim değerleri ile gerçekleştirilmiştir ve parametrelerin etkileri nedenleri ile açıklanmaya çalışılmıştır.

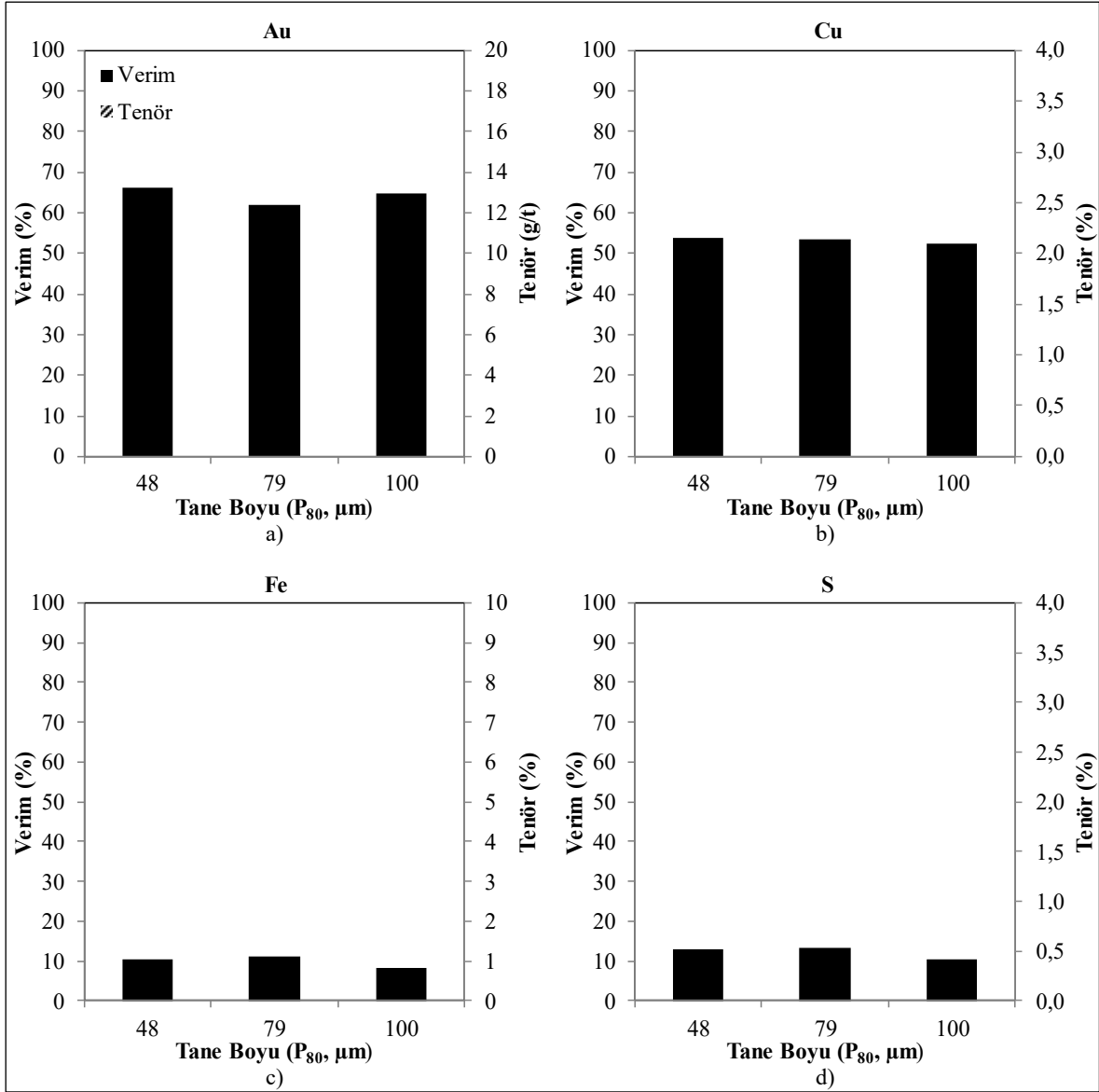
### 5.1. Kaba Flotasyon Deneyleri

Serbest haldeki nabit altın ve kalkopiritin uygun flotasyon şartlarında toplayıcısız olarak yüzdürülebileceği bilinmektedir (Aksoy ve Yarar, 1989; Dunne, 2005). Bu nedenle parametre etkilerinin tartışılmasında akış olarak öncelikle toplayıcısız olarak yüzdürülebilir nitelikteki altın ve kalkopirit için tane boyutu, pH ve köpürtücü dozajı etkileri tartışılmıştır. Toplayıcısız olarak belirlenen şartları takiben, toplayıcı tipi ve dozajı, flotasyon sürelerinin etkisi, pH ayarlayıcı,  $E_h$  ve koşullandırma sürelerinin etkileri toplayıcılı ve toplayıcısız şartlarda ele alınmıştır.

#### 5.1.1. Tane boyutu

$P_{80}$  tane boyutunun, verim ve tenörler üzerindeki etkisi pH 8 ve 24 g/t köpürtücü dozajında incelenmiştir. Şekil 5.1'de, Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerinin  $P_{80}$  boyutuna göre değişimleri 180 saniyelik flotasyon süreleri için gösterilmektedir.

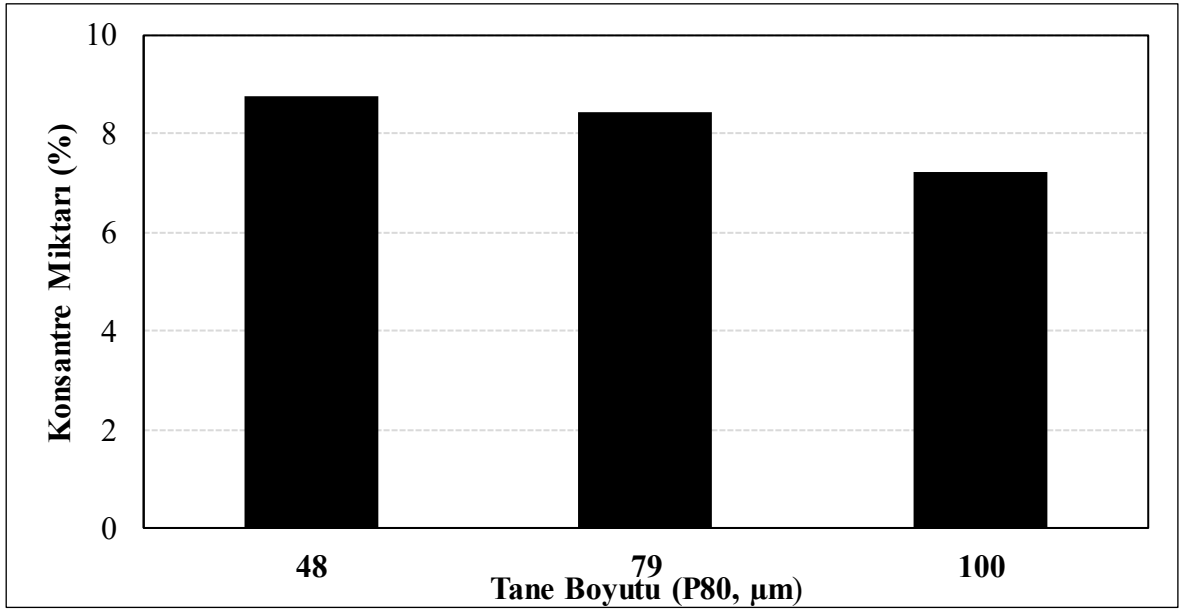
Altın için en yüksek verim değeri, %66,1 ile 48  $\mu\text{m}$ 'da elde edilirken en düşük tenör değeri 9,8 g/t ile yine bu boyuttadır. Tane boyutunun artmasıyla, altın tenörlerinin belirgin olarak yükseldiği, buna karşın verim değerlerinin ise bir miktar azaldığı görülmektedir. 79  $\mu\text{m}$ 'da elde edilen konsantrenin altın içeriği 11,8 g/t verimi ise %61,9 olurken, 100  $\mu\text{m}$ 'da hem tenör, hem de verim değeri artarak, sırasıyla 12,8 g/t'a ve %64,8'e yükselmektedir.



Şekil 5.1. Tane boyunun verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (pH 8, 24g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S

Bakırda ise, tüm tane boyutlarında yaklaşık olarak aynı verim değerlerinin (~%53) elde edildiği ve altın ile benzer olarak tane boyutunun artmasıyla tenör değerlerinin de belirli bir ölçüde arttığını söylemek mümkündür. 48 μm'da %1,2 olan bakır tenörü, 79 μm'da %1,3'e, 100 μm'da ise, %1,4'e yükselmektedir. Demir ve kükürtte ise, en yüksek verim ve tenör değerlerinin 79 μm'da elde edildiğini söylemek mümkündür. 48 ve 79 μm boyutları verim değerleri açısından benzerlik gösterirken, 48 μm'da tenör değerleri 79 μm'a kıyasla az da olsa düşüktür. Ancak, 100 μm'da verim ve tenör değerlerinin diğer boyutlara kıyasla düşük olduğu görülmektedir.

Altın ve bakır verimi açısından farklı tane boyutları arasında önemli bir farklılığın bulunmadığı, 48 ve 100  $\mu\text{m}$  boyutlarında benzer verim değerlerinin elde edildiği, 79  $\mu\text{m}$ 'da verimin diğer boyutlara kıyasla bir miktar düşük olduğu görülmektedir. 48  $\mu\text{m}$ 'da malzemenin %60, altının ise %25'ten fazlası -25  $\mu\text{m}$  boyutundadır (Çizelge 4.2). Bu boyutta, altın tenörlerinin diğer boyutlara kıyasla oldukça düşük olduğu değerlendirildiğinde, konsantrenin şlam boyutundaki gang mineralleri nedeniyle seyreltiğini ve seçimliliğin azaldığını söylemek mümkündür. İnce tane boyutlarında artan konsantre miktarı da bu bulguyu desteklemektedir (Şekil 5.2). Fuerstenau vd. (2007), çok ince boyuttaki altın tanelerinin (2-5  $\mu\text{m}$ ) tanelerinin mekanik sürüklenme yoluyla da yüzebileceğini ifade etmektedir. Feng ve Aldrich (1999), çok ince boyuttaki tanelerin köpük kararlılığını bozarak sürüklenmeye ve seçimlilik kaybına neden olduğunu belirtmektedir.



Şekil 5.2. Tane boyutuna göre konsantre miktarının değişimi (pH 8, 24g/t AF70)

Tane boyutunun büyümesiyle, konsantre miktarı azalırken, altın tenörlerinin de belirgin olarak arttığı görülmektedir. P<sub>80</sub> 100  $\mu\text{m}$ 'da -25  $\mu\text{m}$  boyutundaki malzeme miktarı yaklaşık %40'lara gerilerken, iri fraksiyonlarda bulunan altın miktarı da önemli ölçüde artmaktadır (Çizelge 4.2). Altında, %64,8 verimle ile en yüksek tenör değerinin de 100  $\mu\text{m}$ 'da elde edildiği göz önünde bulundurulduğunda bu boyutun altın flotasyonu için uygun olduğu anlaşılmaktadır.



Tane boyutunun bakır verimlerini belirgin olarak etkilemediği görülürken, tane boyutundaki artışla birlikte tenör değerleri yükselmektedir. Bu durumu, altın ile benzer konsantre miktarlarıyla ilişkilendirmek mümkündür. Ayrıca, 100 µm boyutunda hem demir hem de kükürt verim ve tenörlerinin diğer boyutlara kıyasla düşük olmasının bu boyutta altın ve bakır seçimliliğine katkı sağladığı düşünülmektedir.

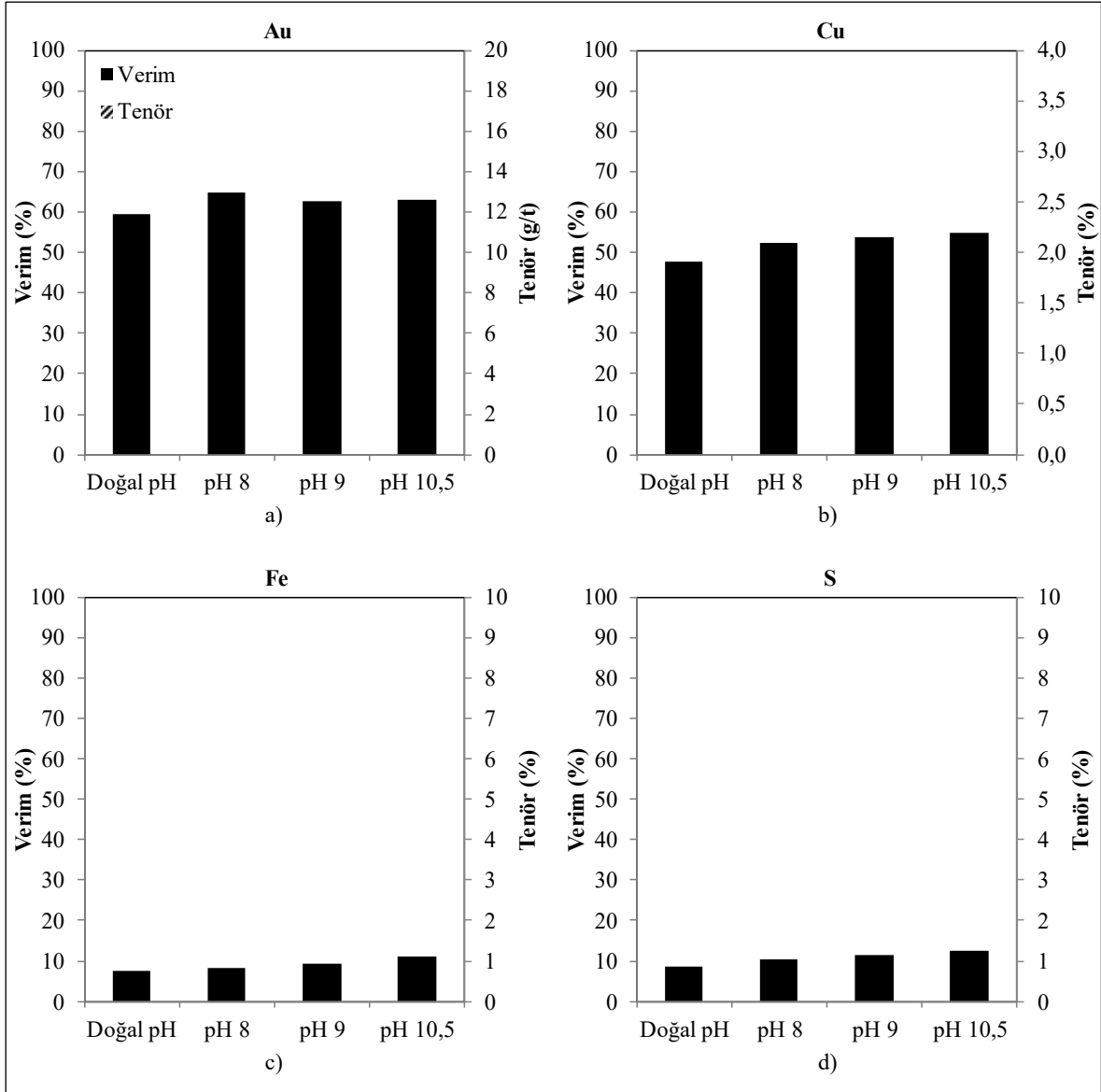
Sonuçlar değerlendirildiğinde, 48, 79 ve 100 µm boyutlarında altın ve bakır flotasyonu açısından önemli bir farkın bulunmadığını söylemek mümkündür. Ancak boyutun incelmeye bağlı olarak konsantredeki altın ve bakır içeriğinin azaldığı anlaşılmaktadır. Tane boyutunun küçülmesine bağlı olarak tenör değerlerinde meydana gelen düşüş konsantrenin gang mineralleri tarafından seyreltildiğini ve seçimliliğin azaldığını göstermektedir.

### 5.1.2. pH

Sülfürlü altın cevherlerini işleyen tesislerde pH elde edilecek konsantrenin niteliğine göre değişkenlik göstermektedir. Altının pirit ile birlikte kazanıldığı tesislerin çoğunluğunda flotasyon işlemi cevherin doğal pH'sında gerçekleştirilirken, altın ve bakırın seçimli olarak kazanıldığı tesislerde ise alkali pH'lar uygulanmaktadır (Klimpel, 1997)

Çalışmaya konu olan örneğin pülpteki doğal pH değeri 6-6,5 olarak ölçülmüştür. Deneyle, bu pH değerinin yanı sıra daha alkali pH değerleri olan 8, 9 ve 10,5 olmak üzere dört pH değerinde gerçekleştirilmiş ve alkali pH'ların elde edilmesinde kireç kullanılmıştır. Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerinin pH'a göre değişimi 100 µm tane boyu, 24 g/t köpürtücü dozajı ve 180 saniyelik flotasyon süresinde incelenmiştir (Şekil 5.3).

Şekil değerlendirildiğinde en yüksek altın verimi %64,8 ile pH 8'de elde edilirken, pH 9 ve pH 10,5'ta verim değerleri %63 seviyelerindedir. En düşük verim değeri ise cevherin doğal pH'sında gözlenmiştir. Tenör ile pH ilişkisi değerlendirildiğinde ise pH 8'de, cevherin doğal pH değerine kıyasla daha yüksek tenör değerleri elde edilirken, pH'taki artışa paralel olarak tenör değerleri azalmaktadır. pH 8'de 12,8 g/t olan tenör değeri, pH 9'da 10,1 g/t'a, pH 10,5'ta ise 9,3 g/t'a düşmektedir.



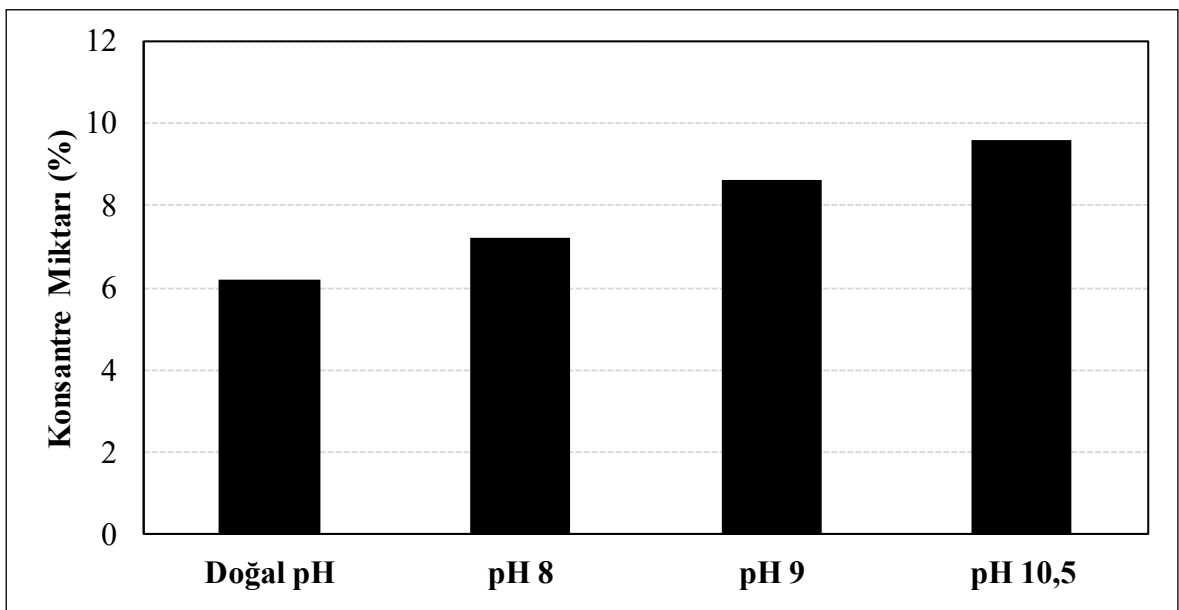
Şekil 5.3. pH'nin verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi ( $P_{80}$  100  $\mu$ m, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S

Bakırda ise, verim değerlerinin pH'taki artışa paralel olarak arttığı görülmektedir. Doğal pH'ta %47,8 olan verim değeri, pH 8'de %52,3'e, pH 9'da %53,5'a ve pH 10,5'ta %54,8'e yükselmiştir. Tenör değeri ise pH'taki artışa paralel olarak azalarak %1,4'ten %1,1 seviyelerine düşmektedir. Demir ve kükürtte ise, bakıra benzer olarak, doğal pH değerinde verim değerlerinin diğer pH'lara göre bir miktar düşük olduğu görülürken, pH 8 ve 9'da benzer verim değerleri elde edilmektedir. Demirde pH'nın azalmasıyla tenör değerlerinin de azaldığı görülürken, benzer bir yorumu kükürt için de yapmak mümkündür.

Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm elementler için en düşük verim değerlerinin doğal pH'da elde edildiği gözlenmektedir. Altın verimleri pH 8'de en yüksek değerine ulaşırken, daha yüksek pH'larda bir miktar azalmaktadır. Bakır, demir ve kükürtte ise altının tersine verim değerlerinin pH'a bağlı olarak bir miktar yükseldiğini söylemek mümkündür. Tenör değerleri ise, tüm elementlerde pH'a bağlı olarak azalmaktadır. Genel bir yorum olarak pH'taki artışın verim değerlerini arttırdığı, tenör değerlerini ise azalattığı ifade edilebilir. Konsantre miktarlarının pH'a bağlı olarak artması da, bu bulguyu desteklemektedir (Şekil 5.4).

Deneyle sırasında da, aynı köpürtücü dozajlarında pH'taki artışa bağlı olarak köpürtücü etkinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Köpürtücü olarak kullanılan AF70 alifatik alkol tipinde bir köpürtücüdür. Gupta vd. (2007), çalışmalarında alifatik alkollerin köpürtücü özelliklerinin alkali pH'larda arttığını ifade etmiştir. Ayrıca, kirecin özellikle kil içeren cevherlerde Ca iyonları ile kil minerallerini koagüle ederek pülp viskozitesini arttırdığı, bunun sonucunda özellikle ince gang minerallerinin köpüğe taşınarak seçimliliği azalttığı çeşitli çalışmalarda ifade edilmektedir (Cruz vd., 2015a; Zanin vd., 2019).

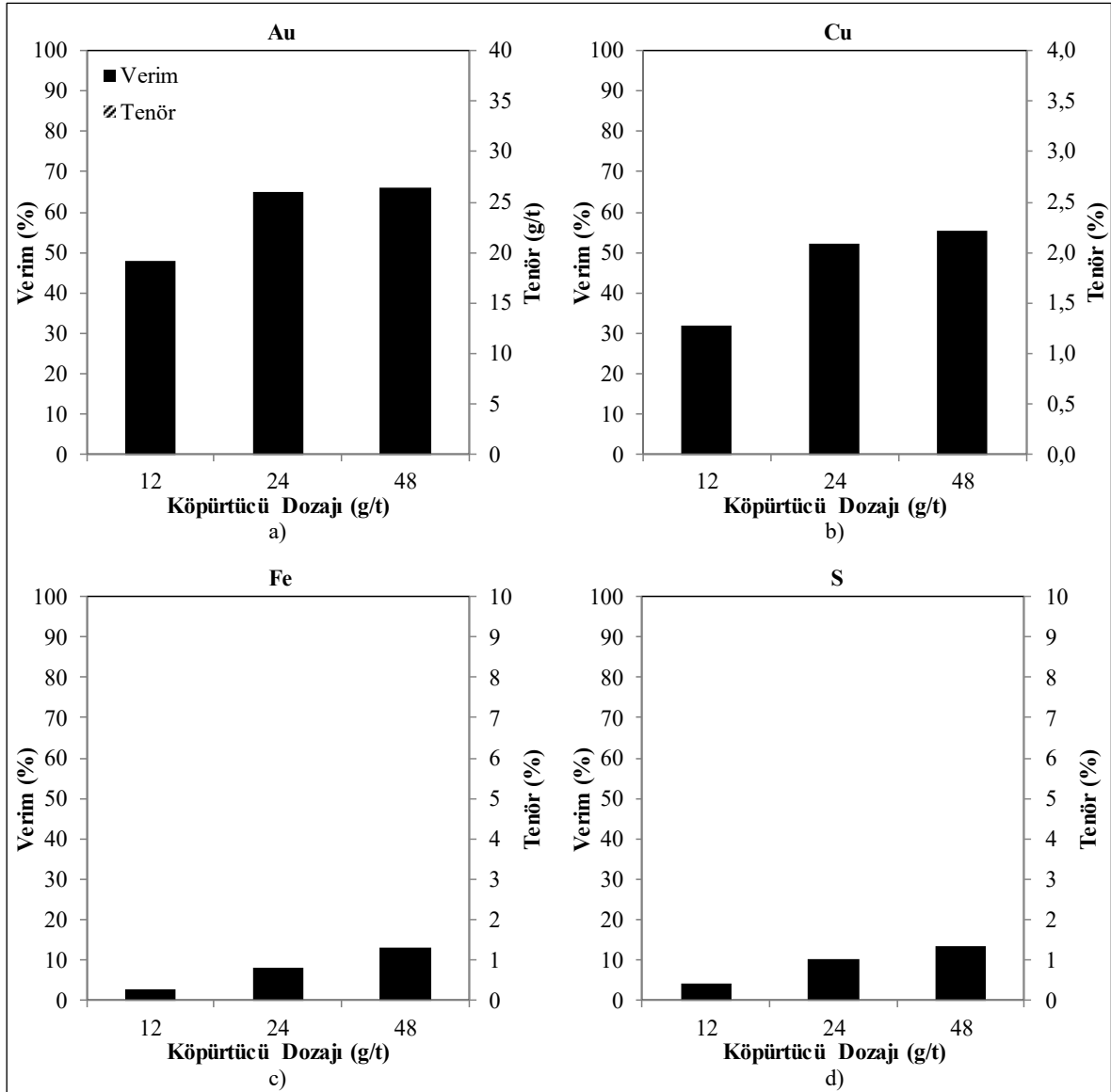
Sonuç olarak, pH 8, pH 9 ve pH 10,5 seviyelerinde altın ve bakırın flotasyon performansının önemli bir farklılık göstermediği, buna karşın pH'ın yükselmesiyle, gang minerallerinin konsantreye taşınması sonucunda, tenör değerlerinin azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.4. Konsantre miktarının pH'a bağlı olarak değişimi (P<sub>80</sub> 100 µm, 24 g/t AF70)

### 5.1.3. Köpürtücü dozajı

Köpük kararlılığı ve kabarcık boyutu dağılımının flotasyonun verim ve tenörleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Aldrich vd., 1997). Köpük kararlılığı ve kabarcık boyutu ise, mineraloji, pülp viskozitesi, pH, hava miktarı, köpürtücü tipi ve miktarı gibi çok sayıda parametreye göre değişkenlik göstermektedir (Bulatovic, 2010). Bu çalışmada ise, yalnızca köpürtücü dozajının etkisi, sülfürlü cevherlerin flotasyonun yaygın olarak kullanılan AF70 kullanılarak incelenmiştir. Köpürtücü dozajının,  $P_{80}$  100  $\mu\text{m}$  ve pH 8'de tenör ve verimlerine etkisi Şekil 5.5'te verilmiştir.

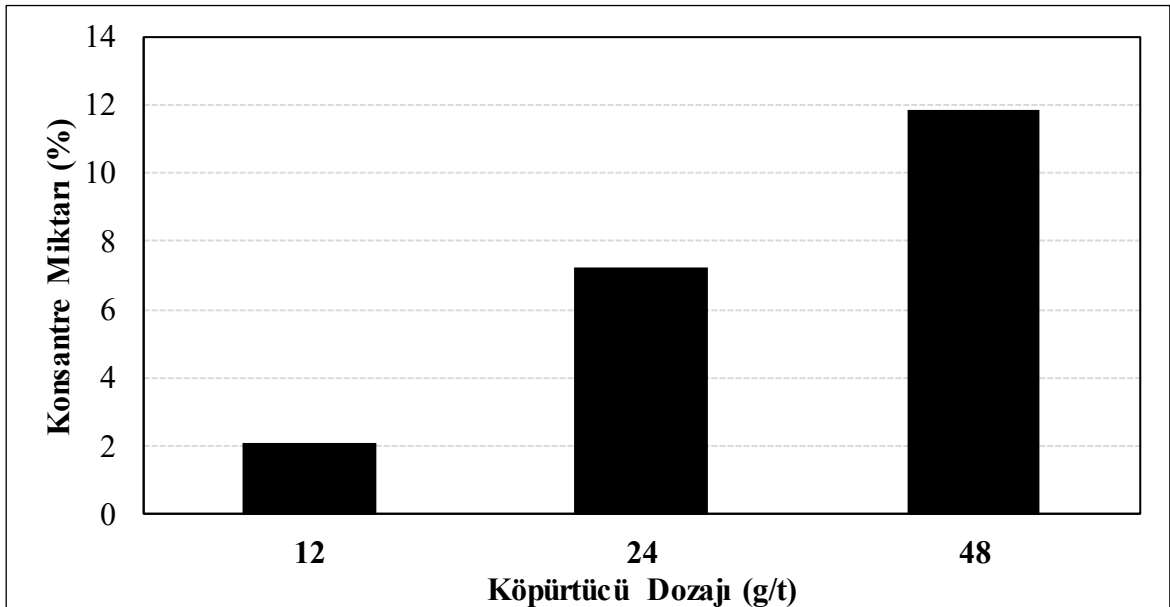


Şekil 5.5. Köpürtücü dozajının Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörleri üzerindeki etkisi ( $P_{80}$  100  $\mu\text{m}$ , pH 8) a) Au b) Cu c) Fe d) S

Altında, 30,6 g/t ile en yüksek tenör değerinin elde edildiği, 12 g/t köpürtücü dozajında verim değeri %47,8'de kalırken, köpürtücü dozajının 24 g/t'a yükselmesiyle verimin %17 artarak %64,8'e yükseldiği, tenörün yarıdan fazla azalarak 12,8 g/t'a düştüğü gözlemlenmektedir. Köpürtücü dozajının 48 g/t'a yükselmesi ile altının verim değeri küçük bir artışla %66,1'e yükselirken, tenör değeri azalarak 7,7 g/t olmaktadır.

Altın ile benzer yorumları bakır özelinde de yapmak mümkündür. 12 g/t dozajında %2,75 bakır içeren konsantride, bakırın verim değeri %32 seviyelerinde kalırken, köpürtücü dozajının iki katına çıkarılması sonunda bakırın verim değerinde %20'ye yakın bir artış meydana gelirken, tenör değeri neredeyse yarı yarıya azalmaktadır. Köpürtücü dozajının 48 g/t'a yükseltilmesi ise altında olduğu gibi bakırda da kısıtlı bir verim artışına (%55,3) neden olmuştur ancak, konsantrideki bakır tenörü %1'in altına düşmüştür. Demir ve kükürt için de benzer bir etkinin gözlemlendiğini söylemek mümkündür.

Verim ve tenör değerlerinin, köpürtücü dozajına bağlı olarak gösterdikleri değişimin sebebi, köpürtücü miktarına bağlı olarak artan konsantr miktarlarıdır. Şekil 5.6'dan görüleceği üzere köpürtücü dozajının 12 g/t'dan 24 g/t'a yükseltilmesi ile konsantr miktarı 3 kata yakın artarken, dozajın 24 g/t'dan 48 g/t'a yükseltilmesiyle 1,5 kattan fazla bir artışın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.6. Köpürtücü dozajına bağlı göre konsantr miktarı (P<sub>80</sub> 100 µm, pH 8)

Köpürtücü dozajının 12 g/t'dan 24 g/t'a yükseltilmesine paralel olarak, altın ve bakır verimleri artarken, 48 g/t'da aynı etki gözlenmemiştir. Demir ve kükürt verimlerinin ise köpürtücü dozajının yükseltilmesiyle artış eğilimini sürdürdüğü söylenebilir. Sonuç olarak, 12 g/t köpürtücü dozajında altın ve bakırda yüksek seçimlilikle kısıtlı miktarda altın ve bakır yüzdürülürken, köpürtücü dozajının 48 g/t'a yükseltilmesiyle verim değerlerinde önemli bir artış meydana gelmekte, ancak konsantredeki altın ve bakırın tenörleri belirgin olarak düşmektedir. 24 g/t'da ise yüksek verim değerlerinin elde edilmesinin yanı sıra, seçimliliğin de belirli bir ölçüde korunduğu düşünülmektedir. Köpürtücü dozajının belirlenmesinde verim ve tenör değerleri arasında hassas bir dengenin olduğunu söylemek mümkündür. Kaba flotasyon sonrasında temizleme kademeleri ile tenör değerleri daha da yukarı taşınabileceğinden, köpürtücü dozajının belirlenmesinde mümkün olan en yüksek verim değerlerinin, kabul edilebilir tenör değerleriyle sağlanması gerekmektedir.

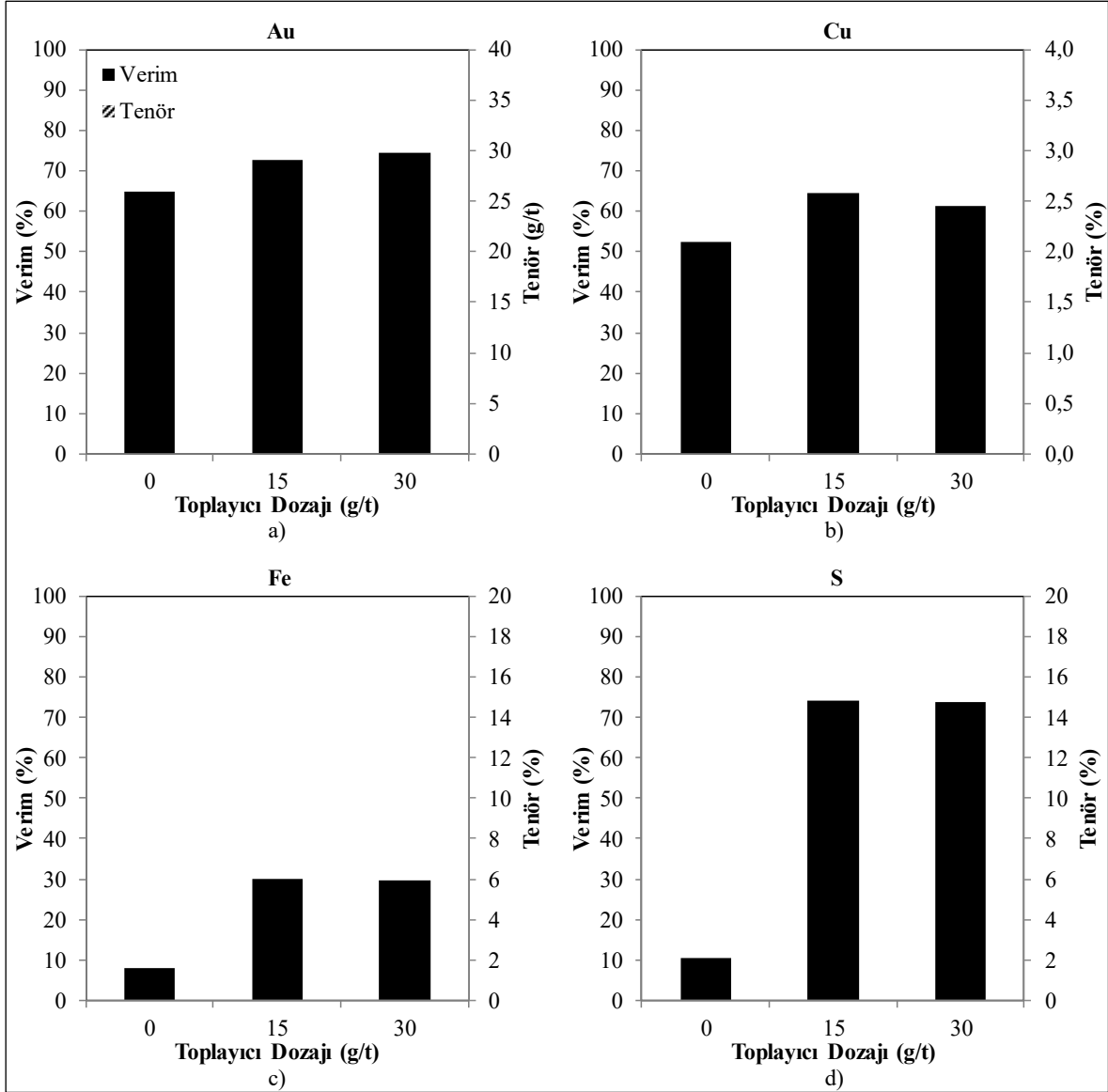
#### 5.1.4. Toplayıcı dozajı

Deneyleerde, toplayıcı olarak altın içeren sülfürlü minerallerin flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bir toplayıcı olan potasyum amil ksantat (PAX) kullanılmıştır. Toplayıcı miktarının verim ve tenör değerleri üzerinde yaratacağı etkinin anlaşılması amacıyla deneyler 15 ve 30 g/t olmak üzere iki farklı toplayıcı dozajında gerçekleştirilmiştir. Toplayıcı dozajının Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörleri üzerindeki etkisi aynı şarttaki (P<sub>80</sub> 100 µm, 24 g/t köpürtücü) toplayıcısız deneyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.7).

Toplayıcısız durum ile karşılaştırıldığında, toplayıcının altın verimlerini %8-10 seviyelerinde arttırarak %70'in üzerine taşıdığı, buna karşılık tenör değerlerinin her iki toplayıcı dozajı için 3 g/t seviyelerinde azaldığı görülmektedir. Toplayıcısız şartta 12,75 g/t altın içeren konsantrede verim değeri %64,8 iken, 15 g/t toplayıcı kullanıldığında tenör değeri 9,88 g/t'a düşerken, verim değeri %72,8'e yükselmektedir. Toplayıcı dozajının 30 g/t'a yükseltilmesi ise, tenör değerinde belirgin değişikliğe neden olmazken verim değerinde yaklaşık %2'lik bir artış sağlamaktadır.

Altına benzer olarak, bakırda da, toplayıcı kullanılması verim değerlerini toplayıcısız şartta kıyasla %8-10 seviyelerinde arttırmaktadır. Ancak, 15 g/t toplayıcı kullanılan şartta tenör değerlerinin, toplayıcısız şart ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Toplayıcısız

şartta %1,44 bakır içeren konsantride verim %52,3 iken, 15 g/t toplayıcı kullanılması ile benzer bakır tenörüne sahip konsantrinin, verim değeri %64,7'ye yükselmektedir. Toplayıcı dozajının 30 g/t'a çıkarılması ise dikkate değer olarak, hem verim, hem de tenör değerlerini 15 g/t'a kıyasla düşürmektedir.



Şekil 5.7. Toplayıcı dozajının Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerine etkisi (pH 8, 100 µm, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S

Demir ve kükürtte ise, toplayıcı kullanılmasıyla verim ve tenör değerleri önemli miktarda artmaktadır. Toplayıcısız şartta %6 olan demir verimi, toplayıcı ile %30 seviyelerine yükselirken, kükürtte %10 seviyelerinde olan verim değeri %70'in üzerine çıkmaktadır.

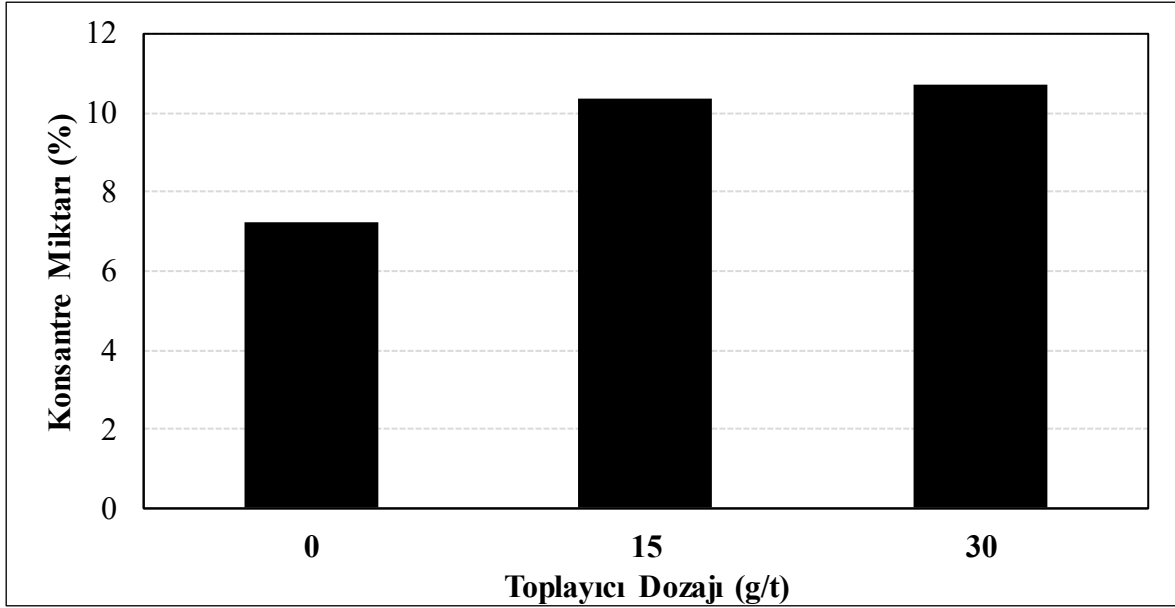
Toplayıcısız flotasyon ile altının %60'lık bir bölümünün kazanıldığı anlaşılırken, toplayıcı ilavesi ile bu oranın %75 seviyeleri çıktığı anlaşılmaktadır. Bakır da ise, toplayıcısız olarak %50 seviyelerinde olan verim değerleri toplayıcı ile %65'lere yükseldiği görülmektedir. Sonuç olarak, toplayıcısız flotasyonun hem altın, hem de bakır için belirli bir ölçüde mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Toplayıcısız şartta elde edilen altın ve bakırın serbest haldeki nabit altın ve kalkopirit olduğu düşünülmektedir (Trahar, 1983; Hayes vd., 1987; Fairthorne vd., 1997; Klimpel, 1999; Allan ve Woodcock, 2001).

Toplayıcı kullanılması ile altın ve bakırda verim değerlerinin %10-15 seviyelerinde artması, toplayıcısız olarak yüzdürülemeyen altın ve bakırın toplayıcı ile yüzdürüldüğünü göstermektedir. Flotasyon için toplayıcıya ihtiyaç duyan altın ve bakırın yeteri kadar serbestleşmediği ya da toplayıcısız flotasyon için uygun tane boyutuna sahip olmadığı düşünülmektedir. Bilindiği gibi, uygun tane boyutundaki nabit altın taneleri yalnızca köpürtücü ilavesi ile yüzdürülebilirken, daha iri boyuttaki tanelerin köpüğe taşınmasında toplayıcı kritik bir rol oynamaktadır (Lins ve Adamian, 1993; Klimpel, 1999). Ancak, bu durumun flotasyon konsantre ve artıklarına yapılacak detaylı mineralojik analizler ile değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Bir diğer önemli bulgu ise, toplayıcı kullanılması durumunda demir ve kükürt verimlerinin de önemli oranda arttığı toplayıcılı şartta konsantre miktarlarının da yükseldiği görülmektedir (Şekil 5.8). Buna göre, toplayıcılı flotasyonda, toplayıcısız şartın aksine, pirit flotasyonunun gerçekleştiği, toplayıcısız flotasyon ile altın ve bakırın piritten seçimli olarak yüzdürülebildiği anlaşılmaktadır. Benzer bulgular Zheng ve Manton (2010) ve Oluklulu vd. (2019) tarafından yapılan çalışmalarda da ifade edilmiştir.

Sonuçlar toplayıcı dozajı açısından değerlendirildiğinde ise, dozajın 15 g/t'dan 30 g/t'a yükseltilmesi altın verimini az da olsa arttırsa da, bakırda hem verim hem de tenör değerlerinin bir miktar düşürdüğü görülmektedir. Demir ve kükürt özelinde de verim değerlerindeki düşüş bakır ile benzerdir. Klimpel (1997), çalışmasında yüksek dozajda kullanılan toplayıcının altın ve kalkopirit gibi doğal hidrofobik özellik gösteren malzemelerin flotasyonunu yavaşlattığından bahsetmektedir. Her ne kadar altın özelinde, bir değişim gözlenmemişse de, bakır, demir ve pirit verimlerindeki değişimi bu bulgu ile ilişkilendirmenin mümkün olduğu düşünülmektedir.





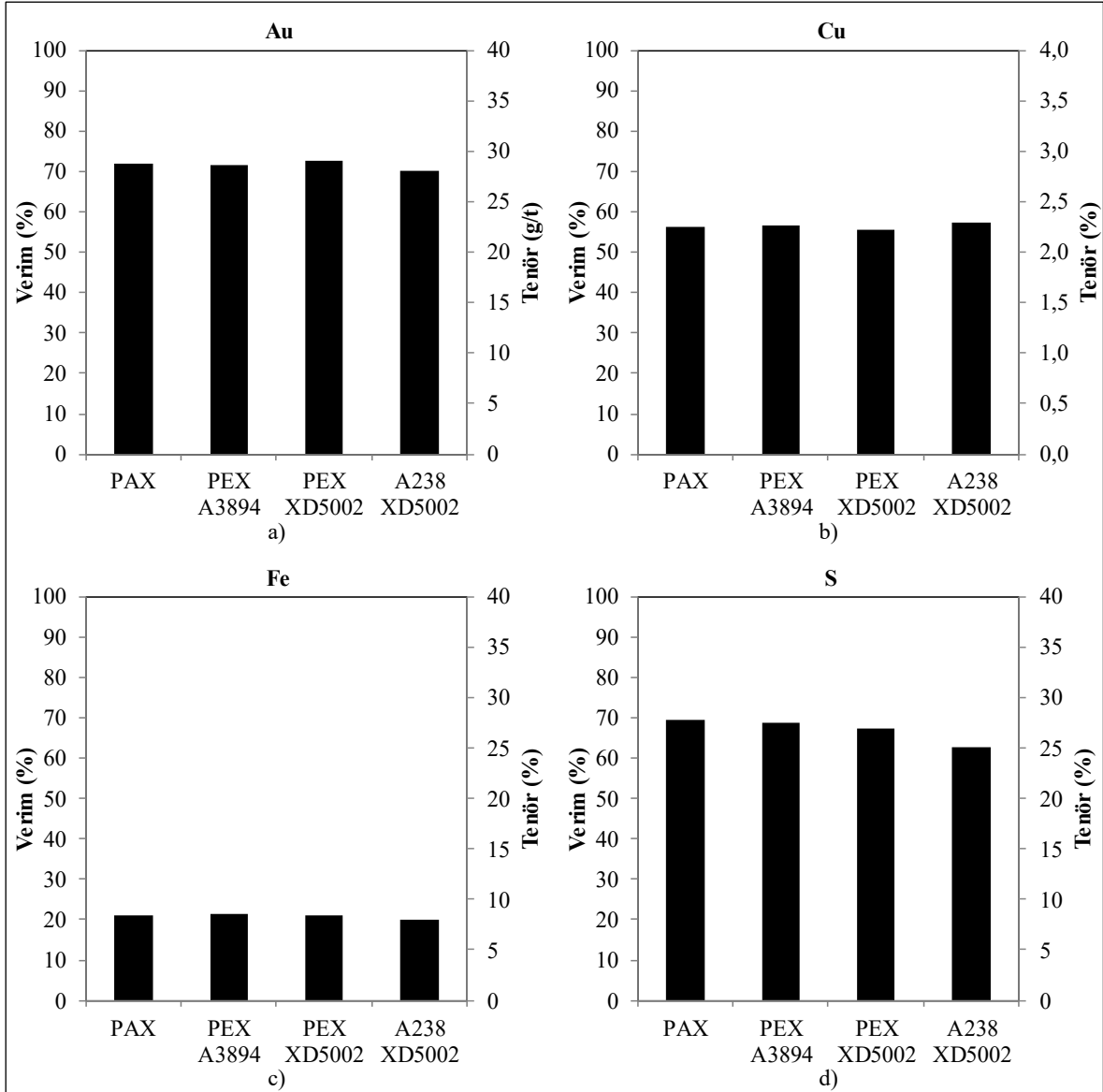
Şekil 5.8. Toplayıcı dozajına bağlı göre konsantre miktarı (P<sub>80</sub> 100 µm, pH 8)

### 5.1.5. Toplayıcı tipi

Altın flotasyonunda yaygın olarak ksantat tipinde toplayıcılar kullanılmaktadır (O'Connor ve Dunne, 1994; Allan ve Woodcock, 2001). Ancak, araştırmacılar kalkopirit ve pirit gibi altın taşıyıcı minerallerin flotasyonunda, ksantatlar ile birlikte, promoter olarak da isimlendirilen, ditiyofosfat, MBT, thionocarbamate gibi toplayıcıların verim ve tenör değerlerinde iyileşmeler sağladığını belirtmektedir (Dunne, 2005).

Bu nedenle, PAX'a ilave olarak, endüstride kullanılan bazı toplayıcı karışımlarının verim ve tenörleri üzerindeki etkilerinin incelendiği deneyler gerçekleştirilmiştir. Toplayıcı karışımlarının dozajlanması 5 g/t toplayıcı + 10 g/t promoter şeklinde gerçekleştirilerek, PAX için belirlenen 15 g/t dozajının elde edilmesi sağlanmıştır. Belirlenen toplayıcı karışımları PEX + XD5002, PEX + A3894 ve A238 + XD5002'dir ve bu toplayıcıların verim ve tenör değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

Şekilden de görüleceği üzere, etkisi incelenen tüm toplayıcılar altın için benzer sonuçlar üretmektedir. PAX ve PEX + A3894 toplayıcıları ile oldukça yakın altın verimleri elde edilirken, A238 + XD5002'ta verim değeri bu toplayıcılara kıyasla %1 kadar düşüktür. Verim değeri PAX ve PEX + A3894'e göre %1 seviyesinde yüksek olan PEX + XD5002'de ise, tenör değerinin diğer toplayıcılara göre yaklaşık 1 g/t düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9. Toplayıcı tipinin Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörleri üzerindeki etkisi (100  $\mu$ m, pH 8, 15 g/t toplayıcı) a) Au b) Cu c) Fe d) S

Bakırda da, tüm toplayıcılar ile benzer verim değerlerine sahip konsantreler elde edilmiştir. Tenör değerleri değerlendirildiğinde ise, A238 + XD5002 ile %2,3, PEX + A3894 ile %2,2, PAX ile %2,1 ve PEX + XD5002 ile %1,9 bakır içeren konsantreler elde edilmiştir.

Demir de, sonuçların bakır ile benzerlik gösterdiği gözlemlenirken, kükürt için sonuçların farklılık gösterdiğini söylemek mümkündür. PAX ve PEX + A3894 toplayıcıları kükürt için benzer verim ve tenör değerleri üretirken, PEX + XD5002'nin bu toplayıcılara kıyasla verim ve tenör değerlerini bir miktar düşürdüğü görülürken, A238 + XD5002 karışımının kükürt verimlerini daha da düşürdüğü anlaşılmaktadır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde farklı tipteki toplayıcı karışımlarının altının verim ve tenör değerlerinde belirgin bir fark yaratmadığını söylemek mümkündür. Bakırda ise, PEX + A3894 ve A238 + XD5002 karışımlarının tenör değerlerini az da olsa arttırdığı gözlenmiştir. Bu toplayıcı karışımlarında A3894 ve XD5002 thionocarbamate türünde iken, A238 ise dithiophospate türünde toplayıcıdır ve bu toplayıcılar bakır seçimlilikleriyle ön plana çıkmaktadırlar (Cytec Industries, 2010). Sonuç olarak, bakır seçimliliğini yanı sıra, maliyet avantajı ve temin kolaylığı göz önünde bulundurularak sonraki deneylerde PEX + A3894 karışımı kullanılmıştır.

### 5.1.6. Flotasyon süresi

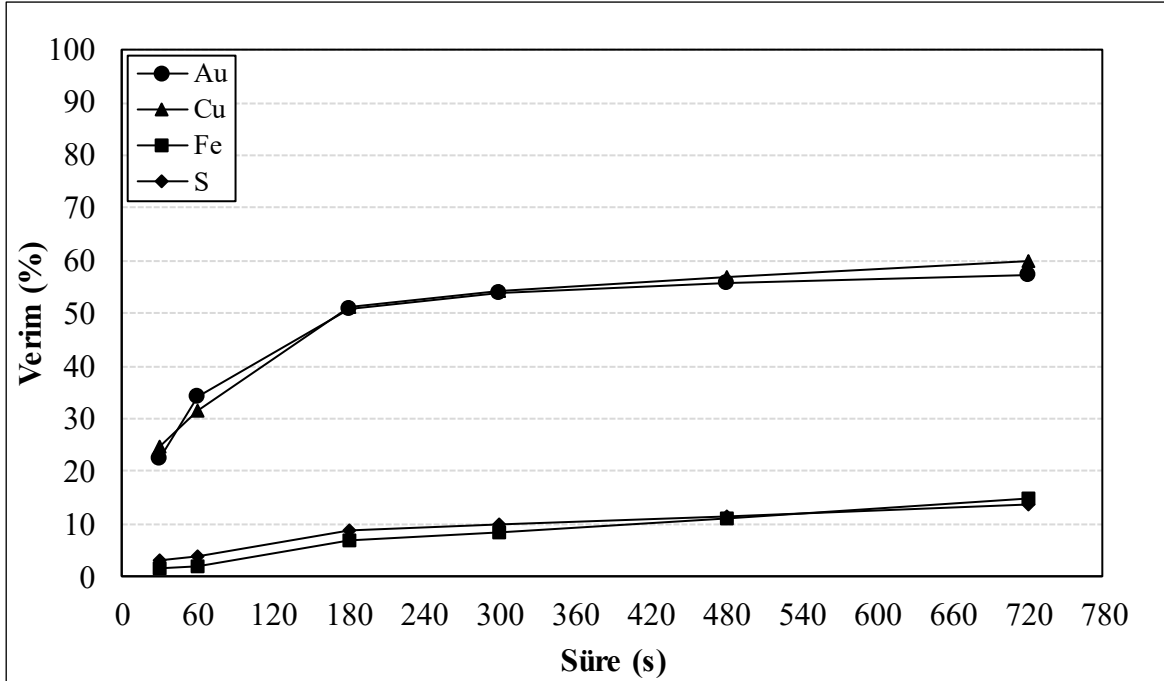
Mineral tanelerinin flotasyon hızları, pülp içerisinde gerçekleşen mikro olayların zamana bağlı bir olasılık fonksiyonu olarak ifade edilir (Alexander ve Morrison, 1998; Polat ve Chander, 2000; Nguyen ve Schulze, 2003). Bu nedenle flotasyonun süresi flotasyonun hangi mineral ya da taneler özelinde, ne ölçüde gerçekleştiğinin belirlenmesi bakımından önemlidir.

Flotasyon sürelerinin etkisini toplayıcı ve toplayıcısız şartlarda araştırmayı amaçlayan deneylerde farklı flotasyon sürelerinde altı konsantre elde edilmiştir (Çizelge 5.1). Deneyler pH 10,5'ta gerçekleştirilirken, toplayıcı olarak, PEX + A3894 karışımı 5 + 10 g/t dozajında yalnızca koşullandırma aşamasında ilave edilmiştir. Deneylerde köpürtücü olarak kullanılan AF70'in ilave ise her bir köpük toplama işlemi öncesinde, köpük kalınlığı gözetilerek kademeli olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.1. Zamana bağlı olarak gerçekleştirilen deneylerde uygulanan flotasyon süreleri

Ürün	Süre (s)	Birikimli Süre (s)
1. Konsantre	30	30
2. Konsantre	30	60
3. Konsantre	120	180
4. Konsantre	120	300
5. Konsantre	180	480
6. Konsantre	240	720

Şekil 5.10'da toplayıcısız şartta Au, Cu, Fe ve S verimlerinin değişimi verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, tüm flotasyon süreleri boyunca altın ve bakır verimleri benzerlik gösterirken, demir ve kükürt de kendi aralarında benzer verim değerlerine sahiptir.



Şekil 5.10. Toplayıcısız şartta Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerinin zamana göre değişimi ( $P_{80}$  100  $\mu$ m, pH 10,5)

30 saniyelik flotasyon sonunda altın ve bakırda sırasıyla %22,4 ve %24,6 verim değerleri elde edilirken, flotasyon süresinin uzamasıyla verim değerleri artarak, 60 saniye sonunda %30'un üzerine, 180 saniye sonunda, %50'nin üzerine çıkmaktadır. 180 saniyelik flotasyon süresi sonunda hem altın hem de bakır için verimlerin artış hızı belirgin olarak yavaşlayarak 720 saniyelik flotasyon süresi sonunda altın için %57,4'e bakır için ise %60'a ulaşmaktadır.

Şekil incelendiğinde demir ve kükürt verimlerinin tüm flotasyon sürelerinde oldukça düşük olduğu görülmektedir. 30 saniyelik flotasyon süresi sonunda verim değeri demirde %1,6, kükürtte ise %3,1'dir. Altın ve bakıra benzer olarak demir ve kükürtte de verim değerlerinin artış hızı 180 saniye sonunda belirgin olarak azalırken, 720 saniyelik flotasyon süresi sonunda her ikisi de %15'in altında kalmaktadır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, 180 saniyelik flotasyon süresi sonunda altın ve bakırın flotasyonunun büyük ölçüde gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Sonuçlar tenör bakımından ele alındığında ise flotasyonun ilk aşamalarında konsantrenin altın ve bakır içeriğinin oldukça yüksek olduğu, konsantredeki demir ve kükürtün ise büyük ölçüde kalkopirit kaynaklı olduğunu söylemek mümkündür (Çizelge 5.2). Flotasyon sürelerinin uzamasıyla birlikte konsantrenin, gang mineralleri tarafından kirletildiği, buna paralel olarak altın ve bakır içeriğinin de belirgin olarak düştüğü, ancak, konsantredeki pirit miktarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

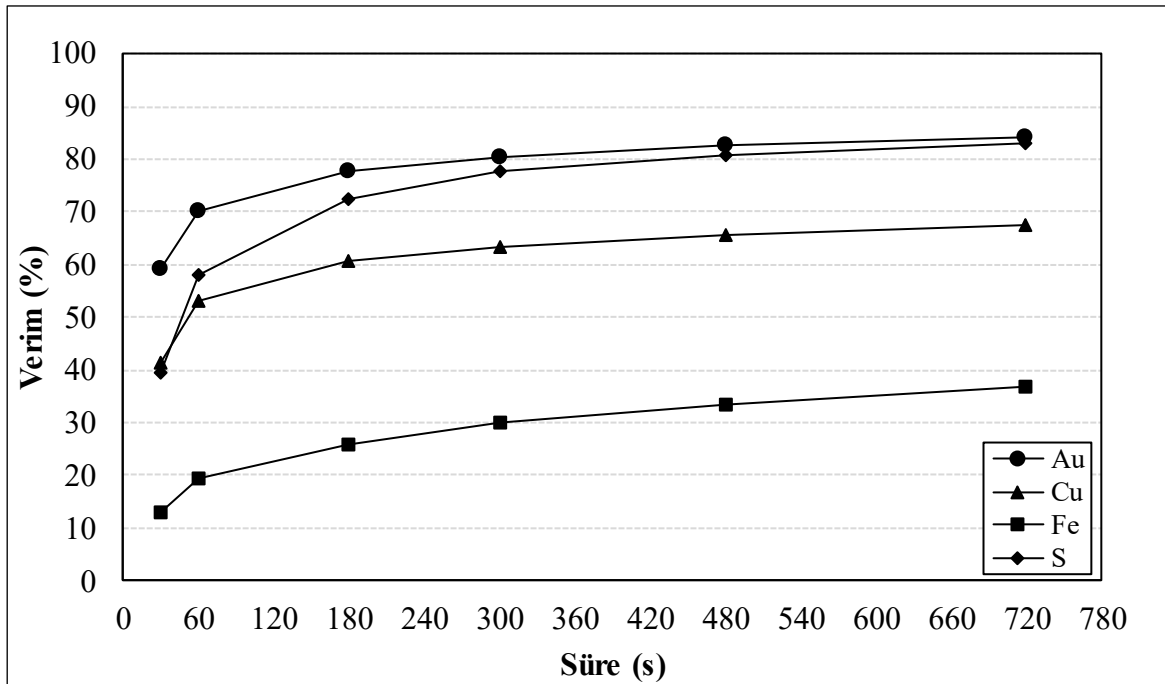
Çizelge 5.2. Toplayıcısız şartta flotasyon sürelerine bağlı olarak konsantrenin altın, kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demir içerikleri

Flotasyon Süresi (s)	Au (g/t)	Cp (%)	Py (%)	NS-Fe (%)
30	60,1	25,3	0,0	6,2
60	56,5	20,1	0,0	5,3
180	17,5	6,8	1,0	5,0
300	13,7	5,3	1,1	4,7
480	10,1	4,0	1,2	4,6
720	7,5	3,0	1,3	4,6

Flotasyon sürelerinin etkisi toplayıcı şartta değerlendirildiğinde ise, tüm sürelerde toplayıcısız şarta göre daha yüksek verim değerlerinin elde edildiği görülmektedir (Şekil 5.11). Toplayıcısız şartta oldukça benzer olan altın ve bakır verimlerinin toplayıcı şartta farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. 30 saniyelik flotasyon süresi sonunda, altın verimi %60 seviyelerindedir. 60 saniyelik flotasyon süresi sonunda altın verimindeki artış önemli ölçüde azalırken, 180 saniye sonunda verim artışının sabit bir hızda gerçekleştiği görülmektedir. 720 saniyelik flotasyon süresi sonunda ise verim değeri %84'e ulaşmaktadır.

Bakırda, 30 saniyelik flotasyon süresi sonunda verim değeri %41,4'dir. Altın ile benzer olarak 60 saniyelik flotasyon süresi sonunda verimin artışı hızı önemli ölçüde azalmaktadır. 180 saniye sonunda ise verimin artış hızı tekrar yavaşlayarak sonraki flotasyon sürelerinde artışın düşük bir hızda devam ettiği görülmektedir. 720 saniyelik flotasyon süresi sonunda ise, bakır verimi %67,6'ya ulaşmaktadır.

Toplayıcı ilavesi ile verim ve tenör değerlerinde en belirgin değişimin demir ve kükürtte meydana geldiğini söylemek mümkündür. Toplayıcısız şartta %10'un altında kalan demir ve kükürt verimleri, 30 saniyelik flotasyon süresi sonunda sırasıyla, %12,9 ve %39,7'ye yükselmektedir. Demir veriminin artışı, 60 saniyelik flotasyon süresi sonunda altın ve bakır ile paralel bir eğim gösterirken, kükürt veriminin sonraki flotasyon sürelerinde de olarak artmayı sürdürdüğü görülmektedir. 720 saniyelik flotasyon süresi sonunda demirde %36,9'luk verim değerine ulaşılırken, kükürt verimi %83'e ulaşmaktadır.



Şekil 5.11. Toplayıcılı şartta Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörlerinin zamana göre değişimi (P<sub>80</sub> 100 µm, pH 10,5, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894)

Sonuçlar tenör bakımından ele alındığında ise, verim değerlerindeki artışa karşın flotasyonun ilk aşamalarında konsantrenin altın ve bakır içeriğinin toplayıcısız şarta kıyasla belirgin olarak düştüğü, konsantredeki pirit miktarının ise kayda değer oranda yükseldiği görülmektedir (Çizelge 5.3). Flotasyon sürelerinin uzaması ile birlikte ise, konsantredeki altın, kalkopirit ve piritin, gang mineralleri nedeniyle önemli ölçüde seyreltiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3. Toplayıcı şartta flotasyon sürelerine bağlı olarak konsantrenin altın, kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demir içerikleri

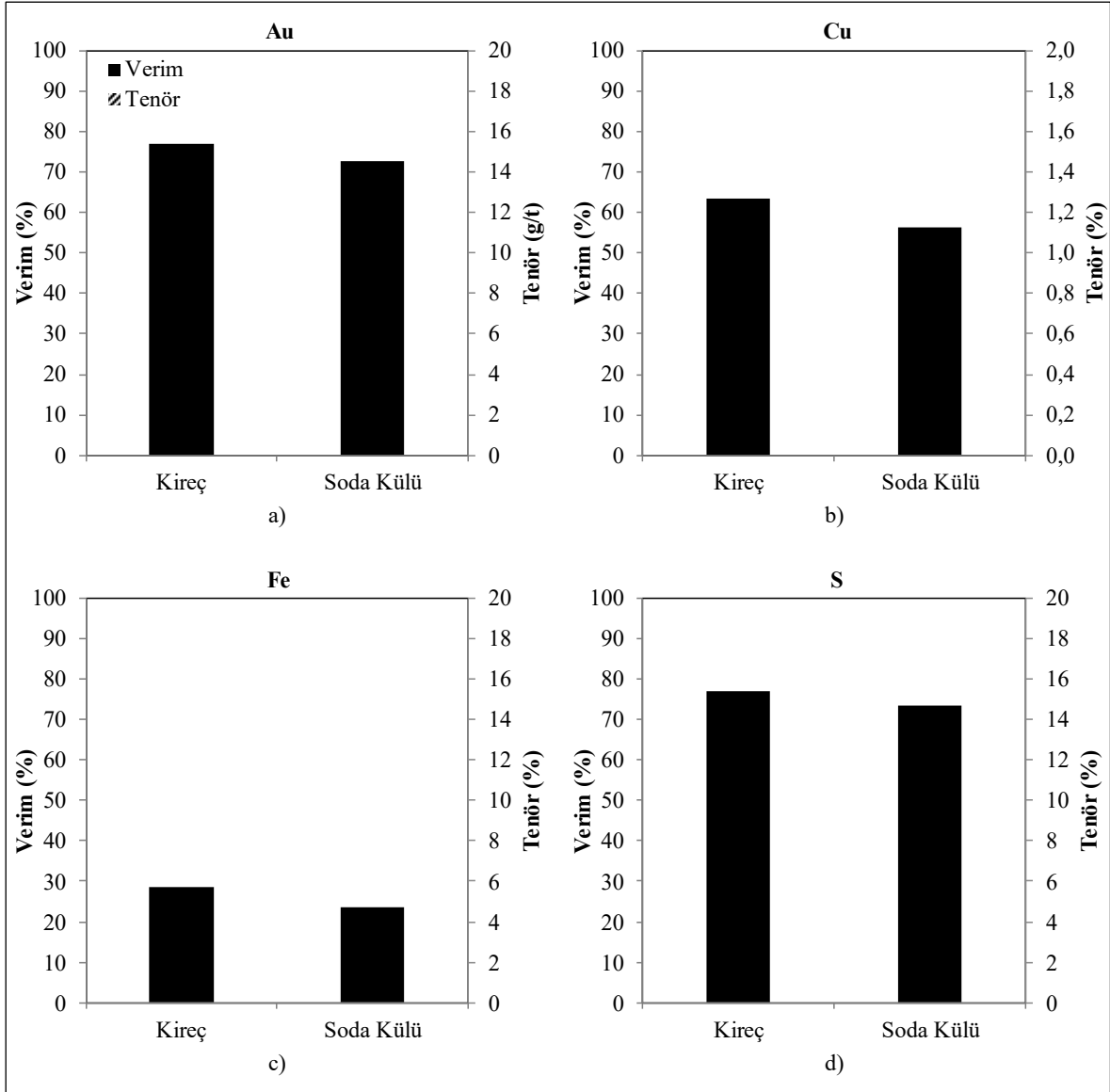
Flotasyon Süresi (s)	İçerik (%)			
	Au (g/t)	Cp (%)	Py (%)	NS-Fe (%)
30	25,2	7,6	29,1	3,6
60	18,6	6,1	27,5	3,8
180	13,7	4,6	22,8	4,2
300	10,2	3,5	17,6	4,3
480	8,4	2,9	14,7	4,4
720	7,0	2,5	12,4	4,4

### 5.1.7. pH ayarlayıcı

Altının flotasyon ile zenginleştirildiği birçok tesiste pH ayarlama kireç ve soda külü kullanılmaktadır. Kireç güçlü bir pH ayarlayıcıdır ve alkali pH'ların ayarlanmasında düşük dozajlarda kullanılmaktadır. Soda külü ise, güçlü bir tamponlayıcıdır ve yüksek alkali pH'ların uygulanmasında çok yüksek dozajlarda kullanılması gerekmektedir (Bulatovic, 2010). Bu nedenle, genellikle daha düşük (8-9) alkali pH'ların uygulanmasında kullanılmaktadır (Dunne, 2005).

Klimpel (1999), kireç kullanımının altın flotasyonunu olumsuz etkilediğini ifade ederken, Bulatovic (1997) pirit içeren altın cevherlerinin flotasyonunda kireç ile daha yüksek verim değerlerinin elde edildiği sonucuna ulaşmıştır. Cruz vd. (2015b) ise, kirecin pülp viskozitesini artırarak ince gang minerallerinin konsantreye taşınmasına ve altın ve bakır seçimliliğinin azalmasına neden olduğunu ifade ederken, aynı etkinin sodyum karbonatta görülmediğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, altın ve bakır flotasyonunda pH ayarlayıcı tercihinin cevher mineralojisiyle yakından ilişkili olduğunu söylemek mümkündür (Dunne, 2005; Bulatovic, 2010).

Kireç ve soda külünün verim ve tenör değerlerini üzerindeki etkilerinin araştırıldığı deneyler 100 µm tane boyutu, pH 8, PEX + A3894 toplayıcı karışımının kullanıldığı şartlarda 420 saniyelik flotasyon süresinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen Au, Cu, Fe ve S verim ve tenörleri Şekil 5.12'de verilmiştir.

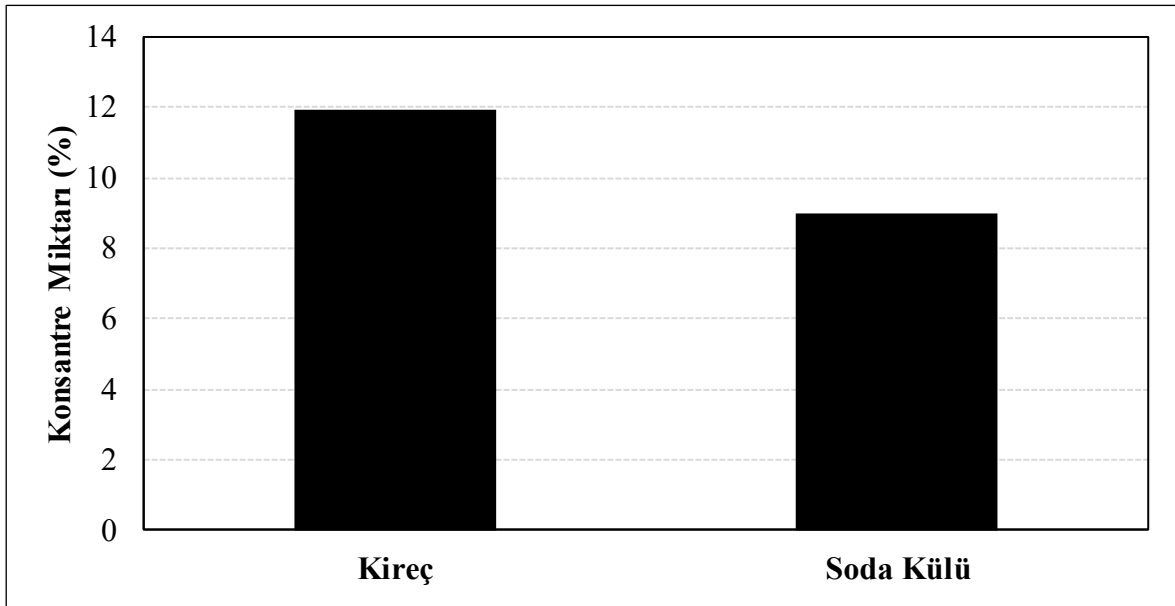


Şekil 5.12. Kireç ve soda külünün verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi ( $P_{80}$  100  $\mu$ m, pH 8, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S

Şekilden görüleceği üzere kireç yerine soda külünün kullanılması altın verimlerini düşürürken, tenör değerlerini bir miktar arttırmaktadır. Kireç kullanılan şartta 9,3 g/t altın içeren konsantrede verim değeri %77,1 olurken, pH'ın soda külü kullanılarak ayarlanması durumunda tenör değeri 11 g/t'a yükselmekte ancak verim değeri %72,6'ye düşmektedir. Bakırda ise, kireç ile %1,2 bakır içeren konsantrede verim değeri %63,6 olurken, soda külün ile aynı tenör değerine sahip konsantrede bakır verimi %56,3'dır. Demir ve kükürtte ise, soda külünün demir ve kükürtün verim değerlerini düşürürken, tenör değerlerini arttırdığı görülmektedir.



Sonuçlar değerlendirildiğinde, kireç ile verim değerlerinin daha yüksek olduğu, buna karşın tenör değerlerinin soda külüne kıyasla düşük olduğu gözlenmiştir. İki şartta elde edilen konsantre miktarları arasında yaklaşık %3'lük bir farkın bulunduğu göz önünde bulundurulduğunda, verim değerleri arasındaki farkın büyük ölçüde açıklanabileceği düşünülmektedir (Şekil 5.13). Ancak, konsantre tenörleri açısından bakıldığında, verim değerlerindeki düşüşe karşın tenör değerlerinde meydana gelen artışın sınırlı olduğunu söylemek mümkündür. Soda külü ile bakırın verim değerinde meydana gelen düşüşe karşın, tenör değeri aynı kalırken, konsantredeki demir ve kükürt içeriklerinin arttığı göz önünde bulundurulduğunda, soda külünün konsantredeki pirit içeriğini arttırdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.13. Konsantre miktarının pH ayarlayıcıya göre değişimi (P<sub>80</sub> 100 µm, pH 8, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70)

Çeşitli araştırmacılar düşük pH seviyelerinde kireç yerine soda külü kullanılmasının altın flotasyonunda avantajlar sağladığından bahsetmektedir (Klimpel, 1999; Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005). Ancak, kirecin altın flotasyonu etkilemediğini, pirit içeren cevherlerde kirecin piriti bastırarak daha yüksek altın seçimliliği sağladığını ifade eden çalışmalar da mevcuttur (Bulatovic, 1997; Forrest vd., 2001; Dunne, 2005). Sonuç olarak, pH ayarlamada kireç yerine soda külünün kullanılmasının altın ve bakır verimlerine bir katkı sağlamadığı, aksine soda külünde azalan konsantre miktarına rağmen konsantredeki pirit miktarının arttığı anlaşılmaktadır.

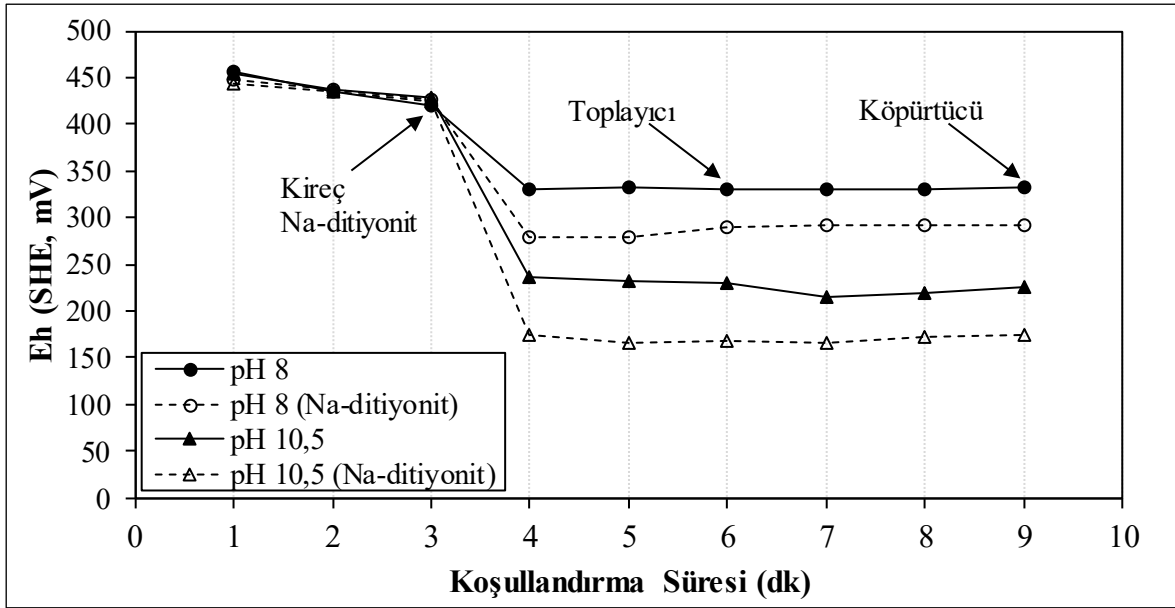
### 5.1.8. $E_h$

Pülöp potansiyelinin ( $E_h$ ), minerallerin yüzme davranışları üzerinde kritik bir öneme sahip olduğu ve her mineralin yüzdüğü kritik bir  $E_h$  değerin bulunduğu bilinmektedir (Hayes ve Ralston, 1988). Elementler özelinde bakıldığında, nabit altının pH 8'de +250 ile +300 mV (SHE)  $E_h$  aralığında en yüksek verimlerle yüzdüğü gözlenirken, bakır için bu değerler +150 ve +200 mV'dur. Demir için ise söz konusu potansiyel aralığı hem altın hem de bakıra göre daha geniştir (Hintikka ve Leppinen, 1995).

Geleneksel öğütme yöntemleri ile yaş olarak öğütülen sülfürlü cevherlerde görülen düşük pülöp potansiyelleri, galvanik etkileşimler ve öğütme ortamındaki aşınmadan kaynaklanan demir gibi oksijen tüketici malzemelerin varlığı flotasyon süreçlerini önemli ölçüde etkilemektedir (Bruckard vd., 2011). Kuru öğütmede ise, bu durumun tersine altın ve bakır flotasyonunda rol oynayan, pülpte yüksek çözünmüş oksijen konsantrasyonları ve pozitif pülöp potansiyelleri elde edilmektedir (Seke ve Pistorius, 2006; Tokcan, 2017). Bu çalışma kapsamında, da kuru olarak öğütülen cevher örneğinde, malzemenin suyla ilk olarak temas ettiği flotasyon pülpünde pozitif pülöp potansiyelleri (~460 mV, SHE) gözlenmiştir (Şekil 5.14).

$E_h$ 'ın farklı pH değerlerinde (8 ve 10,5) verim ve tenör değerlerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilen deneylerde indirgeyici bir reaktif olan Na-ditiyonit ( $Na_2S_2O_4$ ) kullanılmıştır. Na-ditiyonitin,  $E_h$ 'ı düşürücü etkisinin yanında mineral yüzeylerinde diksantojen oluşumunu e uygun şartlarda pirit ve diğer sülfürlü mineralleri de bastırdığı bilinmektedir (Hayes ve Ralston, 1988; Drzymala ve Wheelock, 1992; Ma ve Bruckard, 2009).

$P_{80}$  100  $\mu m$  boyutunda 5 g/t PEX + 10 g/t A3894 ve 24 g/t AF70 kullanılarak, 420 saniyelik flotasyon süresinde gerçekleştirilen deneylerde, 410 g/t Na-ditiyonit pH'ın ayarlanmasının ardından pülpe ilave edilmiştir. Bu dozajda Na-ditiyonitin her iki pH değerinde de pülöp potansiyellerini 40-50 mV seviyelerinde düşürdüğü gözlenmiştir. Buna göre pH 8'de 330 mV seviyelerinde olan  $E_h$  değeri Na-ditiyonit ile 280 mV'a düşerken, pH 10,5'ta 237 mV olan  $E_h$  değeri, Na-ditiyonit ile 174'e düşmektedir (Şekil 5.14).



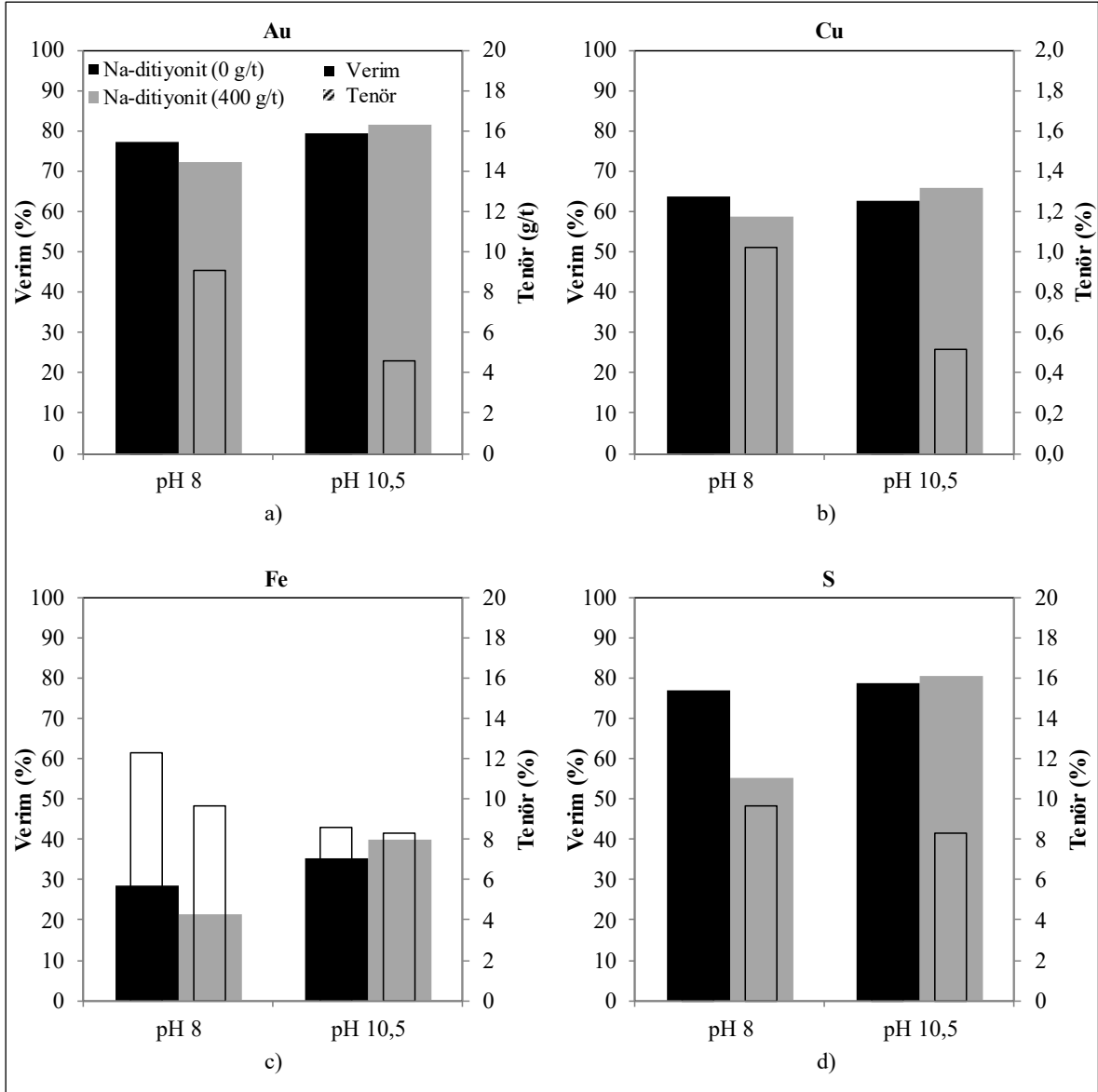
Şekil 5.14. Na-ditiyonitin farklı pH değerlerinde pülp potansiyeli üzerindeki etkisi

Deneyler sonucunda elde edilen verim ve tenör değerleri pH 8 için değerlendirildiğinde, Na-ditiyonit pH 8’de tüm verim değerlerini belirgin olarak düşürdüğünü söylemek mümkündür (Şekil 5.15). Na-ditiyonitin pH 8’de uygulandığı şartta altın ve bakır verimleri %5 seviyelerinde azalırken, demir ve kükürtte verim düşüşünün sırasıyla %7 ve %22 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Na-ditiyonitli şartta 9,2 g/t olan altın tenörü değişmezken, demir ve kükürt tenörlerinin belirgin olarak azaldığı, bakırda ise bu etkinin daha sınırlı olduğunu söylemek mümkündür.

Na-ditiyonit ile bakır tenörü %1,2’den, %1’e düşerken demir ve kükürtte yaklaşık %3’lük bir tenör kaybı meydana gelmektedir. Her iki şartta da konsantr miktarları önemli ölçüde değişmezken, özellikle demir ve kükürt tenör ve verim değerlerinde meydana gelen düşüş, piritin belirli bir ölçüde bastırıldığı şeklinde yorumlanmaktadır (Çizelge 5.4). Ancak, Na-ditiyonitin bir miktar altın ve kalkopiriti de bastırıldığını söylemek mümkündür.

Çizelge 5.4. pH 8’de Na-ditiyonitin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	E <sub>h</sub>	İçerik (%)			Verim (%)		
	g/t		Cp	Py	NS-Fe	Cp	Py	NS-Fe
pH 8	0	332	3,4	15,4	4,1	63,6	79,5	12,5
pH 8	410	291	2,9	10,7	3,8	58,7	54,7	11,0



Şekil 5.15. Na-ditiyonitin farklı pH değerlerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P<sub>80</sub> 100 µm, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70) a) Au b) Cu c) Fe d) S

pH 10,5'ta ise Na-ditiyonit'in kullanıldığı şartta, tüm verim değerlerinin %1-2 seviyelerinde yükseldiği, buna karşın tenör değerlerinin bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Ancak iki konsantre miktarı arasında yaklaşık %4'lük bir farkın olduğu göz önüne alındığında verim ve tenör değerlerinde meydana gelen değişimi konsantre miktarı ile ilişkilendirmek mümkündür. Konsantre miktarının artmasıyla verim değerleri yükselirken, konsantrede meydana gelen seyrelme sonucunda tenör değerleri düşmektedir. Dolayısıyla, pH 10,5'ta, bu E<sub>h</sub> değerinde altın ve bakır verimlerinin yükseldiği, piritin ise bastırılmadığı anlaşılmaktadır (Çizelge 5.5).

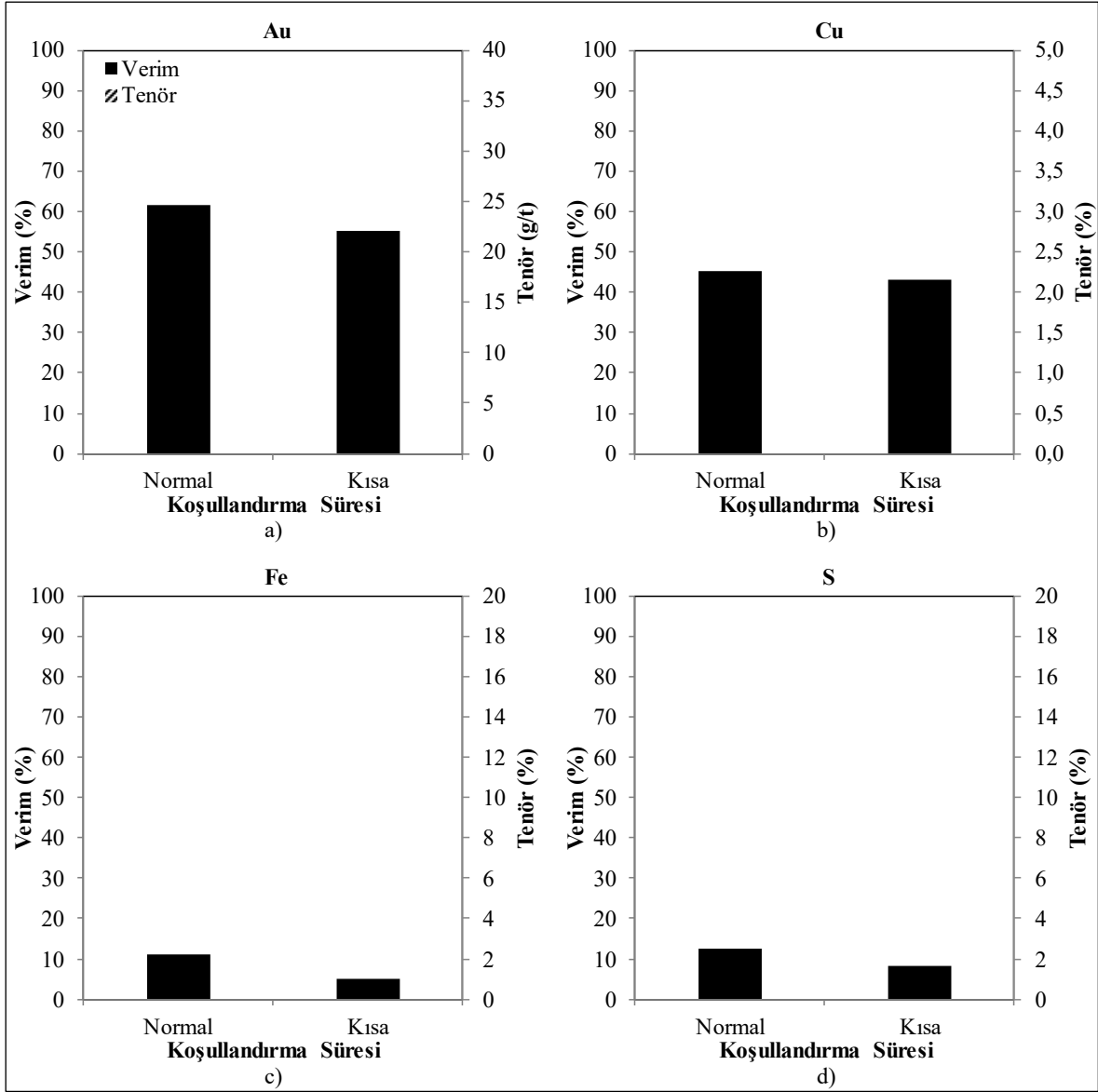
Çizelge 5.5. pH 10,5’da Na-ditiyonitin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	E <sub>h</sub>	İçerik (%)			Verim (%)		
	g/t	mV	Cp	Py	NS-Fe	Cp	Py	NS-Fe
10,5	0	225	1,6	8,4	4,1	62,6	81,3	22,3
10,5	410	175	1,5	7,7	4,2	65,7	82,8	26,8

### 5.1.9. Koşullandırma süresi

Bilindiği gibi, flash flotasyon ile öğütme sonrasında oluşan taze mineral yüzeyleri sayesinde minerallerin, oksidasyona maruz kalmadan, kısa kalma süreleri ve mümkün olduğunca iri tane boyutlarında yüzdürülmesi amaçlanmaktadır (Newcombe vd., 2013; McGrath, 2014). Ancak, flash flotasyon öğütme ve hidrosiklon sınıflandırması sonrasında gerçekleştirilmektedir ve bu aşamada cevher hali hazırda katı-sıvı süspansiyonu halindedir. Cevher örneğinin öğütüldüğü, valsli dik değirmenlerde ise, kuru olarak öğütülen malzeme öğütme ile eş zamanlı olarak hava ile sınıflandırılarak değirmenden uzaklaştırılmaktadır (Schaefer, 2001; Altun vd., 2017).

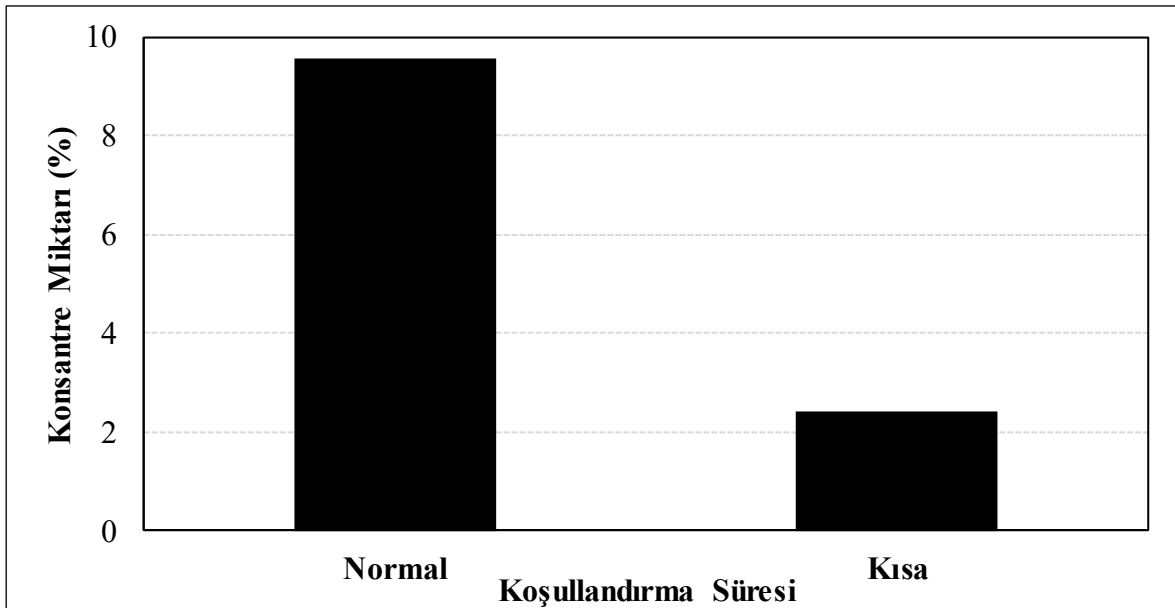
Koşullandırma süresinin etkisinin araştırıldığı deneylerde, normalde 3’er dakikalık aşamalar halinde (Çizelge 4.7) toplamda 9 dakika olarak uygulanan koşullandırma süresinin olabildiğince kısaltılması amaçlanmıştır. “Kısa koşullandırma” olarak isimlendirilen bu şartta, belirlenen reaktiflerin toplu ilave edilmesi sonrasında, koşullandırma 1 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Koşullandırma süresi sonunda, hücreye hava girişi açılarak, flotasyon hemen gerçekleştirilmiştir Dolayısıyla “kısa koşullandırma” uygulamasının bir anlamda flash flotasyon ile benzerlik gösterdiğini söylemek mümkündür. Koşullandırma süresinin etkisinin araştırıldığı deneyler, 100 µm tane boyutunda, pH 10,5’da, toplayıcısız ve toplayıcılı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Toplayıcısız şartta elde edilen verim ve tenör değerleri Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. Koşullandırma süresinin toplayıcısız şartta verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi (P<sub>80</sub> 100 µm, pH 8, 24 g/t AF70)

Koşullandırmanın normal sürede gerçekleştirildiği şartta %61,6 olan altın verimi, kısa koşullandırma ile %6,5 azalırken, tenör değeri 3 kattan fazla artarak 28,4 g/t'a ulaşmaktadır. Bakırda, kısa koşullandırma sonucunda verim değerindeki kayıp, altına kıyasla oldukça düşüktür. Kısa koşullandırmanın gerçekleştirildiği şartta verim değeri yaklaşık %2 azalarak %43,1 olurken, tenör değeri 4 kattan fazla artarak %0,8'den, %4'e yükselmektedir. Koşullandırma süresinin kısa olarak uygulanması demir ve kükürte de verim değerlerini aşağıya çekerken, tenör değerlerini artırmaktadır.

Koşullandırma süresinin kısaltılmasıyla, konsantre miktarı da 4'te 1 oranında azalırken (Şekil 5.17). Konsantre miktarında meydana gelen düşüğe karşın altın ve bakırdaki verim kayıplarının sınırlı olması, kısa koşullandırma ile gang minerallerinin flotasyonunun önemli ölçüde engellendiğini göstermektedir. Altın ve bakırda elde edilen yüksek tenör değerleri de bu bulguyu desteklemektedir. Kısa koşullandırma sonucunda konsantrenin kalkopirit içeriği 5 kattan fazla artarken, toplayıcısız flotasyon ile flotasyonu büyük ölçüde engellenen piritin verim değerlerinin daha da düştüğü görülmektedir (Çizelge 5.6).

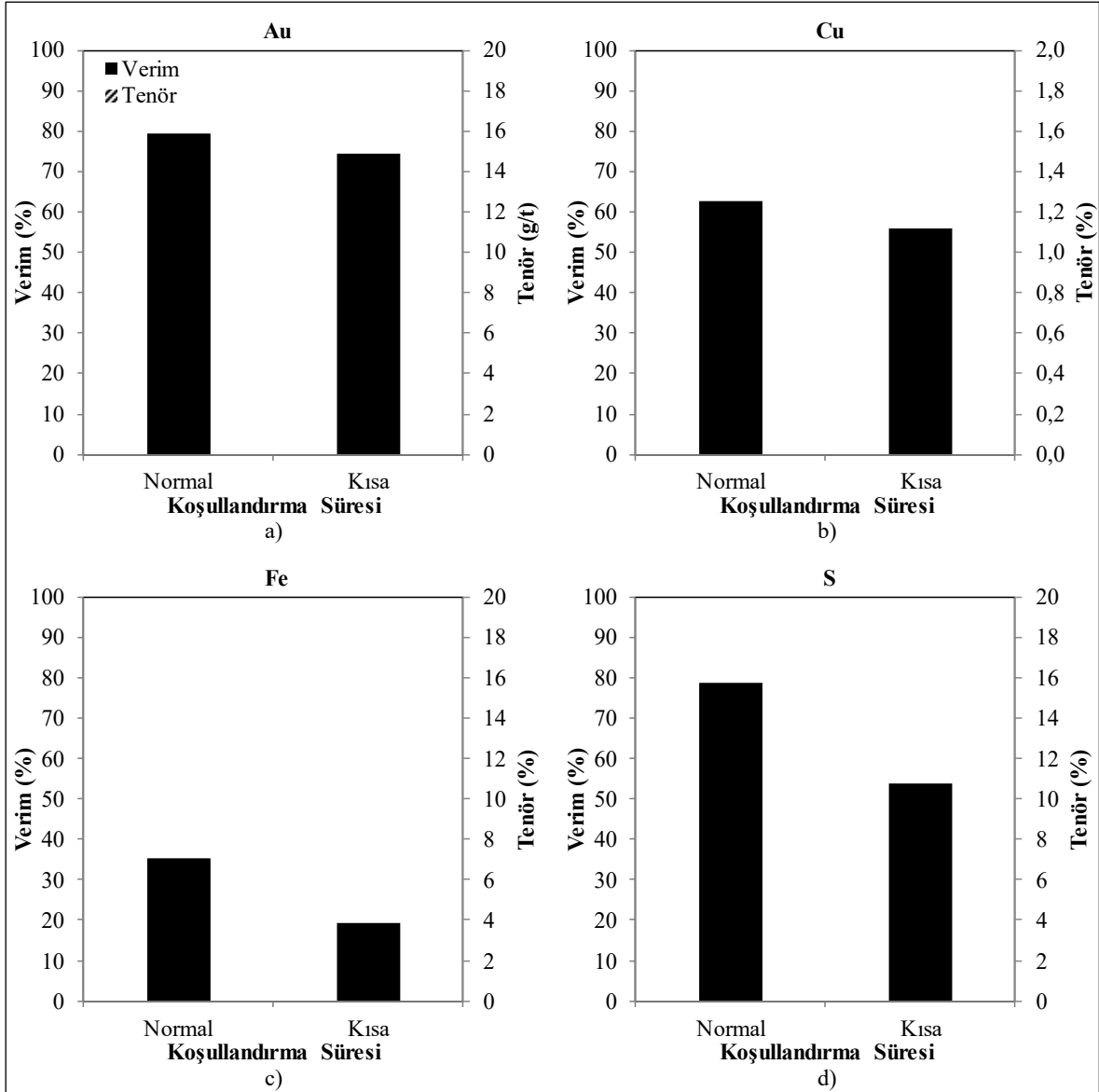


Şekil 5.17. Konsantre miktarının koşullandırma süresine göre değişimi ( $P_{80}$  100  $\mu$ m, pH 8, 5 g/t, toplayıcısız 24 g/t AF70)

Çizelge 5.6. Toplayıcısız şartta koşullandırma sürelerine bağlı olarak konsantrenin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

Koşullandırma Süresi	İçerik (%)			Verim (%)		
	Cp	Py	NS-Fe	Cp	Py	NS-Fe
Normal	2,3	1,8	5,0	45,2	7,8	12,6
Kısa	11,7	2,1	9,6	43,1	2,1	5,6

Kısa koşullandırmanın, toplayıcılı şartta gerçekleştirilmesi durumunda ise, toplayıcısız şartta benzer olarak verim değerlerindeki düşüğe karşın, tenör değerlerinin arttığı gözlenmektedir (Şekil 5.18).



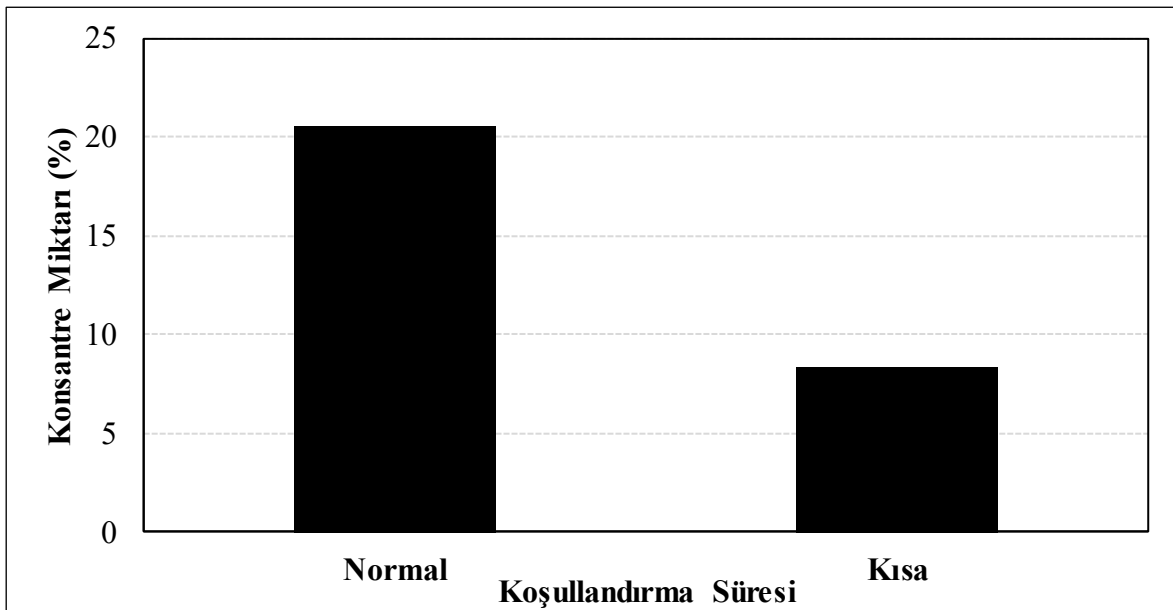
Şekil 5.18. Koşullandırma süresinin toplayıcı şartta verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi ( $P_{80}$  100  $\mu$ m, pH 10,5, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70)

Şekilden de görüleceği üzere, koşullandırma süresinin kısaltılması ile altın ve bakırda verim değerleri bir miktar azalırken, tenör değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Normal koşullandırma süresinin uygulandığı şartta altın tenörü 5,8 g/t verimi %79,4 olurken, kısa koşullandırma süresinde altın verimi yaklaşık %3 azalmakta, tenör ise 2 kattan fazla artarak 12,0 g/t'a ulaşmaktadır. Aynı şartta bakır verimi yaklaşık %6,5 azalırken, tenör değeri 2 kattan fazla artarak değeri %0,56 'dan %1,3'e yükselmektedir.



Kısa koşullandırma şartında demir ve kükürt verimlerinde meydana gelen düşüş altın ve bakıra göre daha yüksektir. Koşullandırmanın normal sürede gerçekleştirildiği şartta sırasıyla, %35,4 ve %78,7 olan demir ve kükürt verimleri kısa koşullandırma ile %19,3 ve %53,7'ye düşerken, tenör değeri demirde yaklaşık %3, kükürtte ise %4 kadar artmaktadır.

Toplayıcısız şarta benzer olarak, kısa koşullandırma süresinin uygulanması konsantre miktarını da belirgin olarak azaltmaktadır (Şekil 5.19). Ancak daha önce de değinildiği üzere, bu azalmanın nedeni altın ve bakırdan ziyade gang mineralleriyle ilişkilendirilmektedir. Toplayıcı şarta, toplayıcısız şarttan farklı olarak konsantrede önemli ölçüde piritin de bulunduğu unutulmamalıdır (Çizelge 5.7). Kısa koşullandırma süresinin uygulanması ile konsantredeki pirit oranının da arttığı görülmekle birlikte, demir ve kükürt verimlerindeki düşüşün yüzdürülen piriti de önemli ölçüde azalttığı, konsantredeki kalkopirit miktarının ise belirgin olarak arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.19. Konsantre miktarının koşullandırma süresine bağlı olarak değimi ( $P_{80}$  100  $\mu$ m, pH 10,5, 5 g/t PEX + 10 g/t A3894, 24 g/t AF70)

Çizelge 5.7. Toplayıcısız şartta koşullandırma sürelerine bağlı olarak konsantrenin kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

Koşullandırma Süresi	İçerik (%)			Verim (%)		
	Cp	Py	NS-Fe	Cp	Py	NS-Fe
Normal	1,6	8,4	4,1	62,6	81,3	22,3
Kısa	3,8	14,2	4,0	56,0	53,4	8,6

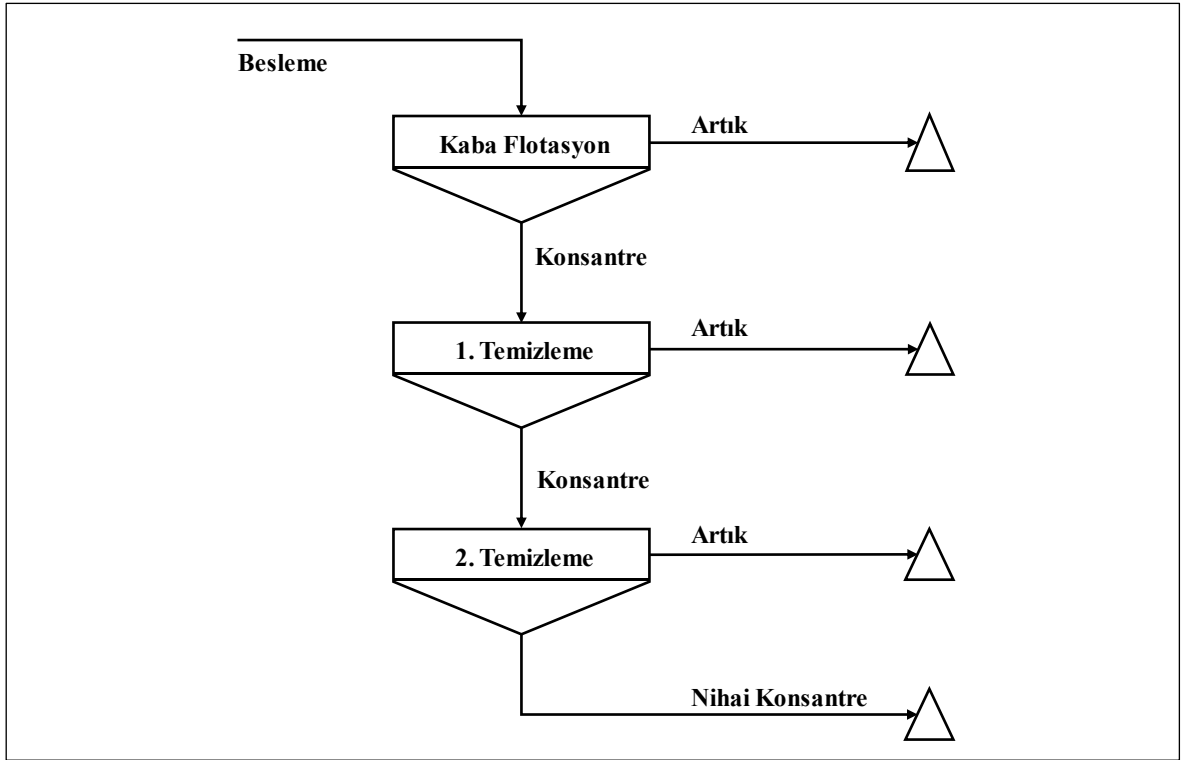
Geleneksel öğütme yöntemleri sonrasında gerçekleştirilen flotasyon süreçlerinde, öğütme ortamında gerçekleşen galvanik etkileşimlerin altın ve sülfür minerallerinin flotasyonunu önemli ölçüde etkilemektedir (Brook vd., 2003; Bruckard vd., 2011). Özellikle demir minerallerinin oksidasyon ürünlerinden kaynaklanan hidrofilik hidroksil iyonlarının, altın ve mineral yüzeylerine kaplanarak, flotasyon verimlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Senior ve Trahar, 1991; Allan ve Woodcock, 2001). Hidroksil iyonlarının konsantrasyonu mineral yüzeylerinde zamana bağlı olarak arttığından, zamanla flotasyon verimlerinin düştüğü bilinmektedir (Fairthorne vd., 1997).

Kuru öğütme ortamında gerçekleşmeyen etkilerin, cevherin suyla ilk olarak temas ettiği flotasyon sürecinde gerçekleşmesi çok daha olası hale gelmektedir (Seke ve Pistorius, 2006). Ayrıca, kuru öğütme ortamında altın ve bakır flotasyonunun gerçekleştiği pozitif pülp potansiyellerinin elde edildiği değerlendirildiğinde, örneğin suyla temas süresinin olabildiğince kısaltılmasının altın ve bakır flotasyonuna katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kısa koşullandırma sonucunda altın ve bakırda artan seçimliliğin cevher örneğinin kuru olarak öğütülmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Literatürde altın cevherlerinin kuru olarak öğütülmesinin altının flotasyon üzerindeki davranışına ilişkin sınırlı çalışma mevcuttur (Zheng ve Manton, 2010). Manlapig ve Vargas (2000), kalkopiritin toplayıcısız flotasyonu ile ilgili patent uygulamalarında pnömatik flotasyon hücresi kullanılarak, pülpün hücrede kalma sürelerinin kısaltılarak, oksidasyon etkilerinin azaltılabileceğini, bu sayede toplayıcısız olarak ve daha yüksek verimlerle flotasyonun gerçekleştirilebileceğini belirtmektedir. Ancak, çalışmada galvanik etkileşimlerin ilk olarak yaş öğütme ile başladığının göz ardı edildiği düşünülmektedir. Gökçen vd. (2019), altının flotasyon davranışının kuru ve yaş öğütmeye bağlı olarak değişimini araştırdıkları çalışmada, kuru öğütmenin altının flotasyon performansına olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Daha önemli olarak ise, kuru öğütmede elde edilen olumlu sonuçların uzun kondisyonlama süreleri sonunda bozularak, yaş öğütmenin gerçekleştirildiği şart ile benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

## 5.2. Açık Devre Flotasyon Deneyleleri

Açık devre flotasyon deneyleleri, kaba flotasyon deneyleleri sonucunda belirlenen parametrelerin, temizleme kademelerinde altın ve bakırın verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler tane boyutu, pH, koşullandırma süresi, toplayıcı varlığı ve flotasyon süreleri olarak belirlenmiştir. Deneyleler, kaba flotasyon konsantresinin iki kademede temizlendiği aşamalar şeklinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.20). Açık devre flotasyon deneylelerinin gerçekleştirildiği şartlar Çizelge 5.8’de verilmiştir.



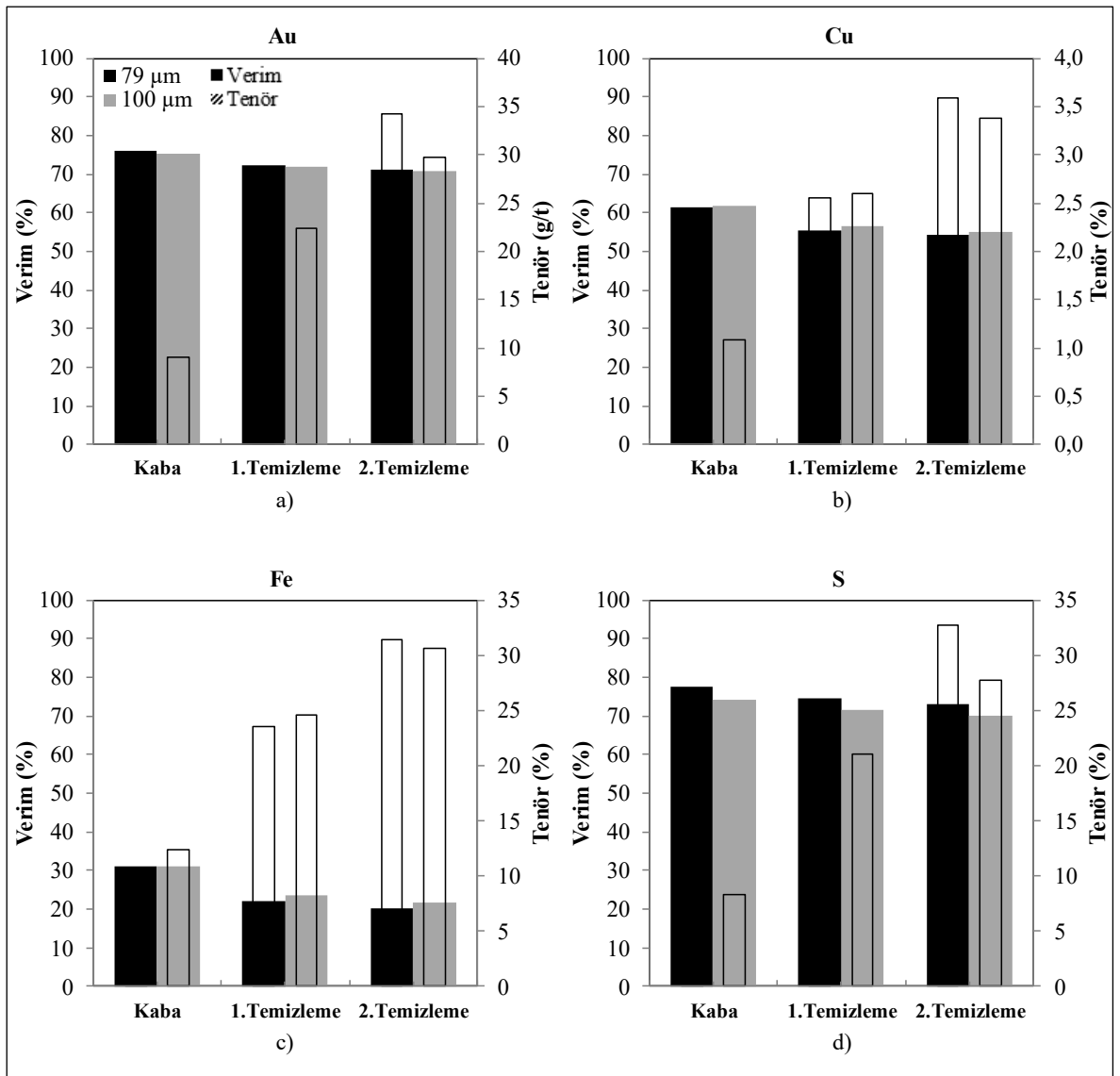
Şekil 5.20. Açık devre flotasyon deneylelerinin şematik gösterimi

Çizelge 5.8. Açık devre flotasyon deneylelerinde flotasyon şartları

Kademe	pH	Toplayıcı		Köpürtücü	Flotasyon Süresi
	Kireç	PEX	A3894	AF70	s
<b>Kaba</b>	8	5	10	24	420
<b>1. Temizleme</b>	10,5		5	4	300
<b>2. Temizleme</b>	10,5				180

### 5.2.1. Tane boyutu

Kaba flotasyon deneyleri, etkisi incelenen P<sub>80</sub> boyutları arasında 100 µm'nun hem verim, hem de tenör değerleri bakımından altın ve bakır flotasyonu için tercih edilebilir olduğunu göstermiştir. Ancak, temizleme kademelerinde piritin bastırılması amacıyla pH'ın artırılması ve reaktif rejiminin değişmesinin, tane boyutuna bağlı olarak farklı sonuçlar ortaya koyabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, temizleme kademelerinde de tane boyutunun verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi bu nedenle incelenmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. P<sub>80</sub> boyutunun flotasyon kademelerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a)Au b)Cu c)Fe d)S

Şekilden de görüleceği üzere, altın için her iki boyutta ilk temizleme kademesinde yaklaşık olarak aynı verim değerleri elde edilmiştir. Ancak kaba flotasyon kademesinde 100  $\mu\text{m}$ 'da daha yüksek olan altın tenörü, ilk temizleme kademesinde 79  $\mu\text{m}$ 'a kıyasla daha düşük oranda artarak, 79  $\mu\text{m}$ 'nun gerisinde kalmaktadır. İkinci temizleme kademesine bakıldığında ise, her iki boyutta da verim değerleri %71 olarak gerçekleşirken, tenör değerleri arasındaki farkın arttığı görülmektedir. 100  $\mu\text{m}$ 'da konsantrenin altın içeriği 29,7 g/t olurken, 79  $\mu\text{m}$ 'da altın içeriği 34,3 g/t'a ulaşmaktadır.

Tane boyutuna bağlı olarak, temizleme kademelerinde bakırın verim ve tenör değerlerinde meydana gelen değişim altın ile oldukça benzerdir. Kaba flotasyon kademesinde, her iki boyutta benzer verim değerlerine sahip konsantreler elde edilirken, 100  $\mu\text{m}$ 'da bakır içeriği 79  $\mu\text{m}$ 'a kıyasla daha yüksektir. Ancak, ilk temizleme kademesi sonunda 79  $\mu\text{m}$ 'da bakır içeriğinin 100  $\mu\text{m}$ 'u yakaladığı, ikinci temizleme de ise geçtiği görülmektedir. Her iki boyutta da iki temizleme kademesi sonunda bakır verimleri yaklaşık %54 olurken, tenör değeri 100  $\mu\text{m}$ 'da %3,4, 79  $\mu\text{m}$ 'da ise %3,6'dır.

Verim ve tenör değerlerindeki değişimin kükürt ve demir için de benzerlik gösterdiği görülmektedir. İkinci temizleme kademesi sonunda, konsantredeki demir ve kükürt içeriklerinin 79  $\mu\text{m}$ 'da 100  $\mu\text{m}$ 'a kıyasla yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Her ne kadar temizleme kademeleri sonucunda 79  $\mu\text{m}$ 'da altın ve bakır tenörleri bir miktar yüksek gibi görünse de, konsantre miktarları karşılaştırıldığında iki konsantre arasında 5 gr (%0,5)'lık bir farkın olduğu görülmektedir (Çizelge 5.9). İki temizleme kademesi sonucunda elde edilen konsantre miktarlarının 30-35 gr seviyelerinde olduğu düşünüldüğünde bu küçük farkın tenör değerlerini etkilemesi kaçınılmazdır. Altın ve bakır verimlerinin benzerliği de göz önünde bulundurulduğunda iki boyut arasında flotasyon davranışı bakımından önemli bir farkın bulunmadığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.9. P<sub>80</sub> boyutuna göre flotasyon kademelerinde konsantre miktarının değişimi

Tane Boyutu (P <sub>80</sub> )	79 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
Kademe	Konsantre Miktarı (%)	
Kaba Flotasyon	14,0	12,6
1: Temizleme	4,5	4,8
2. Temizleme	3,1	3,6

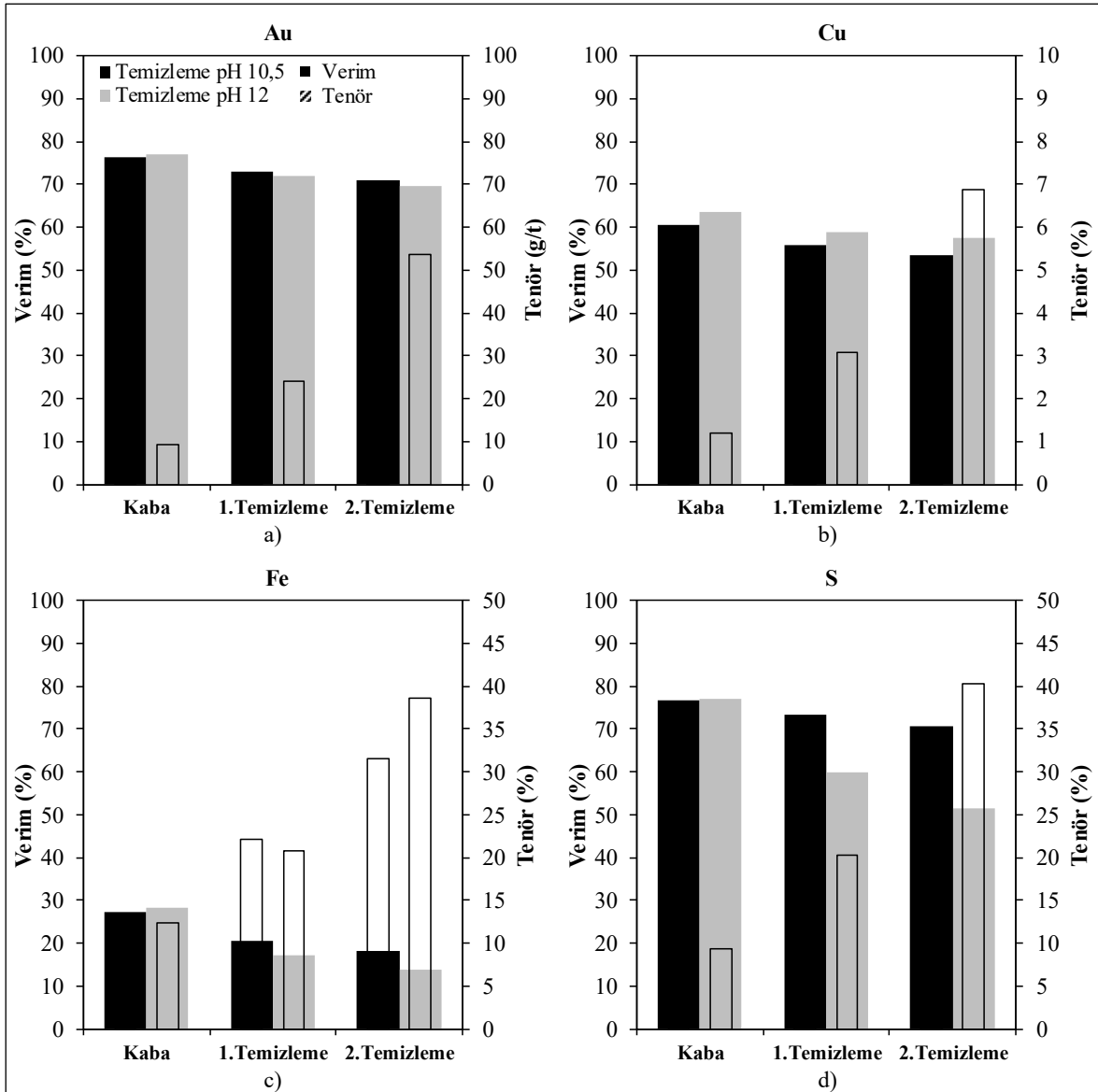
### 5.2.2. pH

Kaba flotasyonda önemli miktarda piritin de yüzdürüldüğü anlaşılmaktadır. Temizleme kademeleri sonucunda elde edilecek konsantrelerde piritin bulunması, altın ve bakır tenörlerini düşüreceğinden arzu edilmeyen bir durumdur. Bu nedenle temizleme kademelerinde piritin yüksek pH'larda bastırılması yaygın bir uygulamadır (Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005; Woodcock vd., 2007).

Temizleme kademelerinde pH'ın verim ve tenör değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla kaba flotasyonda pH 8'de gerçekleştirildiği şartta, temizleme kademelerinde pH'ın 10,5 ve 12 olarak uygulandığı deneyler 79 µm (P<sub>80</sub>) boyutunda gerçekleştirilmiştir. Temizleme kademelerinde uygulanan farklı pH'ların verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi Şekil 5.22'de gösterilmektedir

Şekilden de görüleceği üzere pH'ın temizleme kademelerinde 12 olarak uygulanması altında tenör değerlerini belirgin olarak yükseltirken, verim değerlerini oldukça az etkilemektedir. İlk temizleme kademesinde, pH 10,5'ta %73,2 olan verim değeri pH 12'de %72,1'e düşerken, tenör değeri 20,4 g/t'tan 24,1 g/t'a yükselmektedir. İkinci temizleme kademesinde verim değerlerinde bir önceki temizleme ile benzer bir eğilimin olduğu görülürken, pH 12'de tenörün önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. İkinci temizleme sonunda, pH'ın 10,5 yerine 12 olarak uygulanması verimi %71,1'den, %69,7'ye düşürürken, konsantrenin altın içeriği 1,5 kattan fazla artarak 31,9 g/t'dan, 53,6 g/t'a yükselmektedir.

Temizleme kademelerinde pH'ın arttırılmasının, altın gibi bakırda da olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. pH 12'de temizleme kademelerinde bakırın hem verim, hem de tenör değerleri bakımından pH 10,5'tan üstündür. İkinci temizleme kademesi sonunda ise tenör değerleri arasındaki farkın 2 kata yaklaştığı görülmektedir. Temizleme kademesinin pH 10,5'ta gerçekleştirildiği şartta %3,5 bakır içeren konsantrenin verim değeri %53,4 olurken, pH 12'de tenör değeri %6,9, verim değeri ise %57,6'dır.



Şekil 5.22. Temizleme kademelerinde farklı pH değerlerinin verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a) Au b) Cu c) Fe d) S

Temizleme kademelerinde pH'ın artışına bağlı olarak altın ve bakıra benzer olarak konsantride demir ve kükürt içeriğinin de belirgin olarak yükseldiği görülmektedir. Ancak, altın ve bakırdan farklı olarak pH'taki artışa paralel olarak demir ve kükürt verimlerinin azaldığı, bu etkinin kükürt özelinde daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle ikinci temizleme kademelerinde, demir ve kükürt verimlerinin azalmaktadır. Demir ve kükürt verim değerlerindeki düşüşe karşın, altın ve bakır verimlerinin korunması, konsantrideki altın ve bakır içeriklerindeki artış, iki kademeli temizleme sonucunda pH 12'de piritin bastırıldığını ve konsantride altın ve kalkopirit oranının yükseldiğini göstermektedir (Çizelge 5.10).

Çizelge 5.10. Temizlemede uygulanan pH'a bağlı olarak nihai konsantride kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

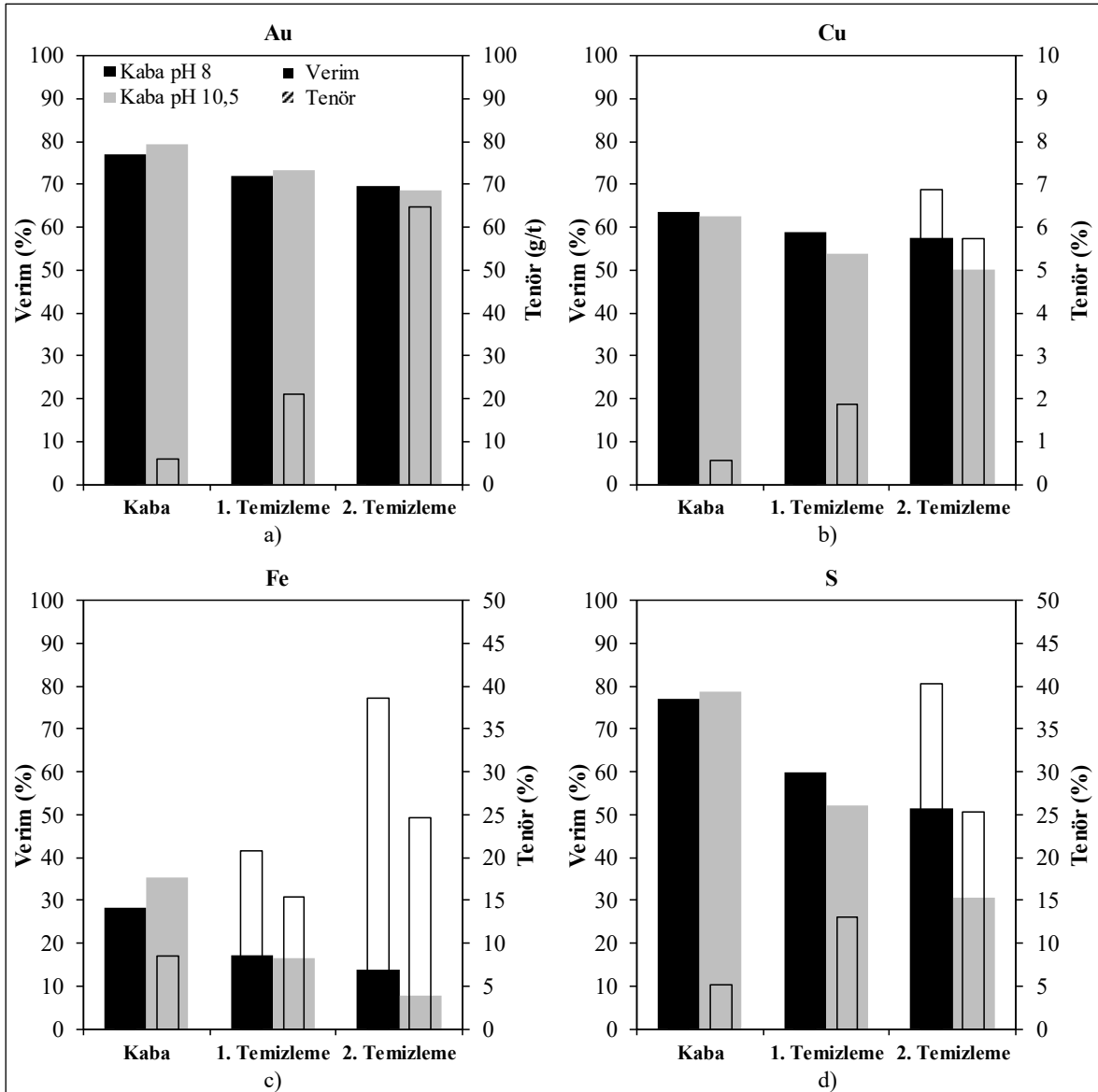
Temizleme Kademesi pH Değeri	İçerik (%)			Toplam (%)	Verim (%)		
	Cp	Py	NS-Fe		Cp	Py	NS-Fe
pH 10,5	10,2	52,6	4,0	66,8	53,4	73,8	2,9
pH 12	19,9	62,4	3,5	85,8	57,6	50,5	1,7

Bilindiği üzere düşük pH seviyelerinde, metal iyonlarının yüksek konsantrasyonu pirit flotasyonuna katkı sağlarken, pH'ın artmasıyla azalan iyonlaşma, hidroksil iyonlarının demir yüzeylerine çökmesi ile pirit flotasyonunu engellemektedir (Hayes vd., 1987; Hintikka ve Leppinen, 1995; Zhang vd., 1997). Forrest vd. (2001), altın verimlerinin kireç ilavesinden etkilenmediği, en yüksek tenör değerlerinin ise pH 11,5 ve üzeri değerlerde piritin bastırılmasıyla elde ettiklerini ifade etmektedir. Monte vd. (1997) da, çalışmalarında altının piritten seçimli flotasyonunun yüksek alkali pH'ta (12) gerçekleştiğini ifade belirtmişlerdir. Sonuç olarak piritin pH 10,5 değerinde yüksek verimlere sahip olduğu, pH 12'de ise yüzdürülen pirit miktarının yaklaşık 3'te 1 oranında azaldığı anlaşılmaktadır. Ancak, daha temiz altın ve bakır konsantrasyonu elde edilebilmesi için bu değer yeterli olmadığı düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen kaba flotasyon deneylerinde, kaba flotasyonun yüksek pH'larda gerçekleştirilmesinin, altın ve bakır flotasyonuna olumsuz bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Ancak pH'taki artışa bağlı olarak, köpürtücü etkinliğinin arttığı, buna paralel olarak konsantrasyon miktarlarının yükseldiği ve konsantrasyonun altın ve bakır içeriklerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Kaba flotasyonda uygulanan pH değerlerinin temizleme kademelerinde yaratacağı etki ise bilinmemektedir.

Bu etkiyi araştırmak amacıyla gerçekleştirilen deneylerde kaba flotasyon kademesinde pH 8 ve 10,5 olmak üzere iki pH değeri uygulanırken, temizleme kademeleri piritin bastırılarak altın ve bakır seçimliliğinin sağlanması amacıyla, pH 12'de gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verim ve tenör değerleri Şekil 5.23'te gösterilmektedir.





Şekil 5.23. Kaba flotasyon pH'sının temizleme kademelerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a)Au b)Cu c)Fe d)S

Şekilden de görüleceği üzere, altın için kaba flotasyondaki verim-tenör ilişkisi ilk temizleme kademesinde de sürmektedir. Buna göre, kaba flotasyonu pH 8'de gerçekleştirilen şartta tenör değeri daha yüksekken, pH 10,5'ta ise verim değeri daha yüksektir. Ancak, ikinci temizleme kademesine geçildiğinde, iki şart arasında verim değerleri açısından önemli bir fark bulunmazken, kaba flotasyonu pH 10,5'ta gerçekleştirilen şartta, altın içeriğinin pH 8'e kıyasla belirgin olarak yüksek olduğu görülmektedir. İkinci temizleme kademesi, sonunda kaba flotasyonu pH 8'de gerçekleştirilen şartta 53,6 g/t altın içeren konsantre %69,7 verime sahipken, pH 10,5'ta tenör değeri 64,9 g/t verim değeri ise %68,5'tir.

Bakırda ise, kaba flotasyonu 10,5 olarak gerçekleştirilen şartta, temizleme kademelerinde verim değerlerinin pH 8'e kıyasla hızla düştüğü görülmektedir. İlave olarak, temizleme kademelerinde bakırda elde edilen tenör değerlerinin de, pH 10,5'ta pH 8'in gerisinde kaldığı anlaşılmaktadır. İkinci temizleme kademesi sonunda, kaba flotasyonu pH 8'de gerçekleştirilen şartta konsantrenin bakır tenörü %6,9, verimi %57,6 olurken, pH 10,5'da tenör değeri %5,8'dir, verim değeri ise %50'de kalmaktadır.

Demir ve kükürtte, kaba flotasyon kademesinde pH 10,5'ta daha yüksek olan verim değerleri, temizleme kademelerinde hızla azalırken, kaba flotasyonu pH 8'de gerçekleştirilen şartta azalmanın daha sınırlı olduğu gözlenmektedir. İki temizleme kademesi sonunda kaba flotasyonu pH 8 olan şartta %38,6 demir ve %40,3 kükürt içeren konsantrede verim değerleri %13,9 ve %53,7'dir. pH 10,5'ta ise demir tenörü %24,65'e, kükürt tenörü %25,3'e inerken, verim değerleri de sırasıyla %7,9 ve %30,5'a düşmektedir.

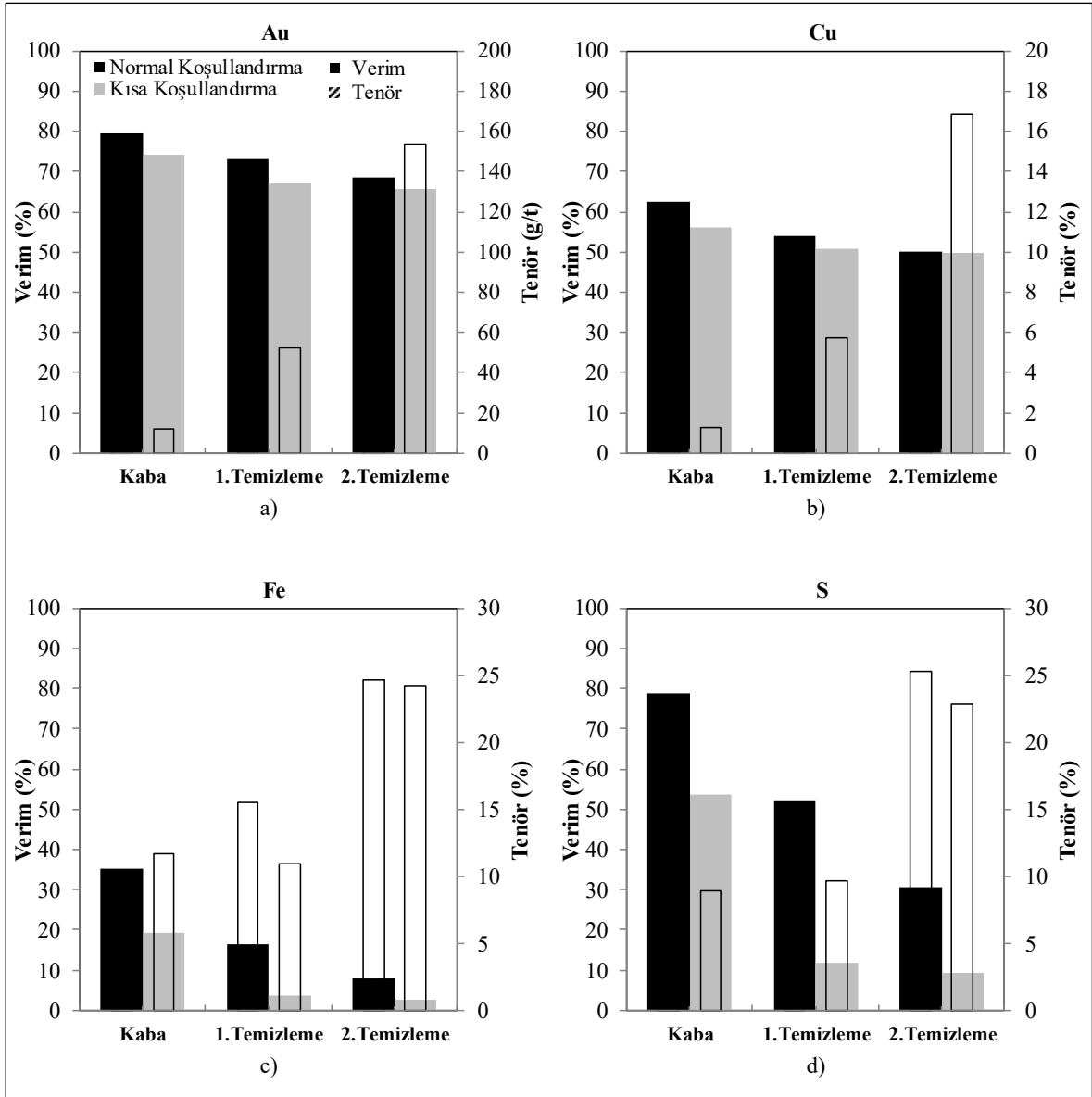
Sonuç olarak kaba flotasyon pH'sının, temizleme kademelerindeki flotasyon performansını önemli ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır. Kaba flotasyon aşamasında pH'ın 10,5 olarak uygulanması flotasyon kademelerinde altının flotasyon davranışını belirgin olarak etkilemezken, bakırda verim değerlerinin düştüğü, dolayısıyla bir miktar kalkopiritin bu şartta yüzdürülemediği görülmektedir. Kaba flotasyon pH'sının en büyük etkiyi ise demir ve kükürtte gösterdiğini söylemek mümkündür. Temizleme kademeleri sonunda kaba flotasyonu pH 10,5'ta gerçekleştirilen şartta demir ve kükürtte hem verim, hem de tenör değerlerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Bu etki, bakırda elde edilen sonuçlar ile birleştirildiğinde kalkopiritin yanı sıra önemli miktarda piritin de bastırıldığını göstermektedir (Çizelge 5.11). Nihai konsantrelerde, pH 8'de %50 seviyesinde olan pirit verimi yaklaşık olarak yarı yarıya azalarak, pH 10,5'ta %27,3'e düşmektedir. Bu durumun, konsantrenin altın içeriğinde meydana gelen artışı da açıkladığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.11. Kaba flotasyonda uygulanan pH'a bağlı olarak nihai konsantrede kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

Kaba Flotasyon pH Değerleri	İçerik (%)			Toplam (%)	Verim (%)		
	Cp	Py	NS-Fe		Cp	Py	NS-Fe
pH 8	19,9	62,4	3,5	85,8	57,6	50,5	1,7
pH 10,5	16,6	36,5	2,6	55,7	50,0	27,3	1,1

### 5.2.3. Koşullandırma süresi

Kaba flotasyon kademesinde koşullandırma süresinin kısaltılması ile altın ve bakırda verimlerden bir miktar kayıp verildiği buna karşın, tenör değerlerinin önemli ölçüde yükseldiği anlaşılmaktadır. Koşullandırma süresinin temizleme kademelerinde olası etkilerinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilen deneylerde, daha önce değinildiği şekilde 9 dakika olarak uygulanan koşullandırma süresi 1 dakika olarak uygulanmıştır. Deneyler 79  $\mu\text{m}$  ( $P_{80}$ ) boyutunda gerçekleştirilmiş, pH kaba flotasyonda 10,5, temizleme kademelerinde ise 12 olarak ayarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.24'te gösterilmektedir.



Şekil 5.24. Koşullandırma süresinin toplayıcı şartta flotasyon kademelerinde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkileri a)Au b)Cu c)Fe d)S

Kısa koşullandırılan şartta, kaba flotasyon kademesinde altın ve bakır verimlerinde oluşan farkın, temizleme kademelerinde belirli bir oranda kapandığını söylemek mümkündür. Buna göre, kısa koşullandırmanın gerçekleştirildiği şartın temizleme kademelerinde altın ve bakırın daha az kayıpla yüzdürüldüğü anlaşılmaktadır. Tenör değerleri açısından bakıldığında ise, hem altın hem de bakır için kaba flotasyon kademesinde yaklaşık olarak 2 kat olan farkın, temizleme kademelerinde 3 kata yaklaştığı anlaşılmaktadır. Normal koşullandırma sürelerinin uygulandığı şartta, iki temizleme kademesi sonunda 64,9 g/t altın içeren konsantrenin verim değeri %68,5 olurken, kısa koşullandırma ile 154 g/t altın içeren konsantrede verim değeri %65,8'dir. Bakırda ise, her iki şartta da yaklaşık %50 verim değerleri elde edilirken, normal sürede %5,8 seviyesinde kalan bakır tenörünü kısa koşullandırma ile %15'in üzerine çıkararak %16,8'e ulaşmaktadır.

Kısa koşullandırmada altın ve bakırda oldukça yüksek tenör değerlerine ulaşılmasının nedeni olarak ise, koşullandırma süresinin demir ve kükürtte ortaya koyduğu etkiyle açıklamak mümkündür. Normal sürede koşullandırılan şartta, kaba flotasyon kademesinde %81,3 olan pirit verimi, iki temizleme kademesi sonunda %27,3'e düşerken, kısa koşullandırmada %53,4 olan verim %2,8'e düşmüştür (Çizelge 5.12). Kısa koşullandırma ile konsantredeki piritin tamamına yakınının uzaklaştırılması sonucunda, konsantrenin altın ve bakır içeriğinin çok büyük oranda arttığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.12. Koşullandırma sürelerine göre nihai konsantredeki kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

Koşullandırma Süresi	Flotasyon Kademesi	İçerik (%)			Toplam (%)	Verim (%)		
		Cp	Py	NS-Fe		Cp	Py	NS-Fe
Normal	Kaba	1,6	8,4	4,1	14,2	62,6	81,3	22,3
	1. Temizleme	5,4	21,0	4,1	30,4	53,8	51,9	5,6
	2. Temizleme	16,6	36,5	2,6	55,7	50,0	27,3	1,1
Kısa	Kaba	3,8	14,2	4,0	21,9	56,0	53,4	8,6
	1. Temizleme	16,5	7,2	2,5	26,2	50,9	5,6	1,1
	2. Temizleme	48,6	10,9	4,4	63,9	49,8	2,8	0,7

Koşullandırma süresinin kısaltılmasıyla altın ve bakır seçimliliğinde meydana gelen yüksek artışın diğer bir göstergesi ise, flotasyon kademelerinde konsantre miktarlarının belirgin olarak azalmasıdır (Çizelge 5.13). Altın ve bakır verimlerinde önemli bir kayba neden olmaksızın meydana gelen bu artış, kısa koşullandırma ile yüzdürülen gang minerali

miktarının da ciddi oranda azaldığı şeklinde yorumlanmaktadır. Sonuç olarak kaba flotasyon kademesinde kısa koşullandırma ile görülen olumlu etkinin temizleme kademelerinde çok daha belirgin hale geldiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.13. Koşullandırma sürelerine bağlı olarak konsantre miktarlarının karşılaştırılması

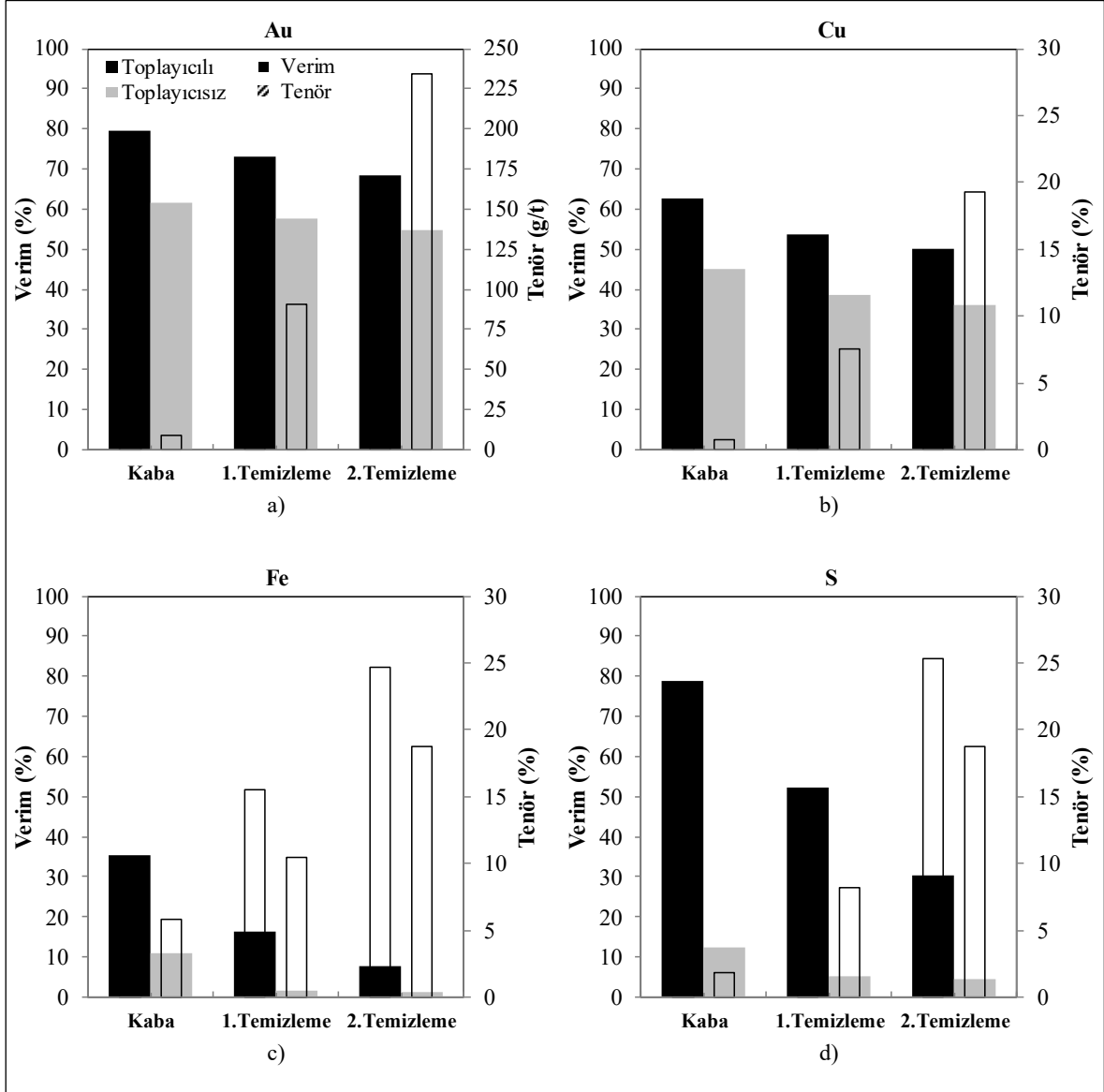
Kademe	Konsantre Miktarı (%)	
	Normal Koşullandırma	Kısa Koşullandırma
<b>Kaba Flotasyon</b>	%20,7	%8,37
<b>1. Temizleme</b>	%5,3	%1,73
<b>2. Temizleme</b>	%1,6	%0,58

#### 5.2.4. Toplayıcısız flotasyon

Kaba flotasyon deneyleri toplayıcısız flotasyon ile altın ve bakırın piritten seçimli olarak yüzdürülebildiğini göstermiştir. Konsantredeki pirit miktarının azalması ile temizleme kademelerinde altın ve bakırda yüksek tenör değerlerine ulaşılmasının mümkün olacağı düşünülmektedir. Bu etkiyi araştırmak amacıyla 79 µm (P<sub>80</sub>) boyutunda, kaba flotasyonun pH 10,5, temizleme kademelerinin ise pH 12’de gerçekleştirildiği toplayıcılı ve toplayıcısız flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplayıcısız şartta kaba flotasyon kademesinde toplayıcı ilave edilmezken, 1. Temizleme kademesinde diğer şart ile benzer olarak 5 g/t A3894 kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.25’te gösterilmektedir.

Şekilden de görüleceği üzere, kaba flotasyon deneylerinde elde edilen bulgulara paralel olarak, toplayıcısız şartta, toplayıcılı şartta kıyasla yüksek altın içeriğine sahip bir konsantre elde edilmiştir. He ne kadar toplayıcısız şartta altın verimlerinin önemli ölçüde düşük olduğu görülse de, temizleme kademelerine geçildiğinde toplayıcılı şartta verim kayıplarının daha yüksek olduğunu söylemek mümkündür. İlave olarak toplayıcısız flotasyonun gerçekleştirildiği durumda, temizleme kademelerinde altın içeriği büyük bir hızla artmaktadır. İki kademeli temizleme sonunda toplayıcısız şartta 64,9 g/t altın içeren konsantrede verim değeri %68,5’tir. Toplayıcısız şartta ise, 234,7 g/t olan konsantrenin altın içeriği, toplayıcılı şarttan yaklaşık 4 kat fazladır. Buna karşılık, verimdeki kayıp %13,5’tir.

Bakırda ise, kaba flotasyonda verim değerleri arasında bulunan fark, temizleme kademelerinde de büyük ölçüde korunmaktadır. Ancak altına benzer olarak, toplayıcısız şartta konsantrenin bakır içeriğinin hızla arttığı görülmektedir. İki temizleme kademesi sonunda toplayıcı şartta konsantrenin bakır içeriği %5,8, verim değeri %50,0'dir. Toplayıcısız şartta ise bakır içeriği %20'ye yaklaşırken, verim değeri %35,9'da kalmaktadır.



Şekil 5.25. Toplayıcılı ve toplayıcısız şartta, flotasyon kademelerinde verim ve tenör değerlerinin karşılaştırılması a) Au b) Cu, c) Fe d) S

Toplayıcısız flotasyon ile pirit flotasyonunun kaba flotasyon aşamasında büyük ölçüde engellendiği bilinmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, toplayıcısız şartın temizleme kademelerinde demir ve kükürtte verim değerleri %5'in altına kadar düşmektedir.

Tenör değerlerinin bakır ile oldukça benzer olduğu görülmektedir (Şekil 5.25). Toplayıcı şartta elde edilen tenör değerlerine, toplayıcısız şartın ilk temizleme kademesinde ulaşılmaktadır. Konsantreler kalkopirit, pirit ve sülfür içermeyen demir açısından karşılaştırıldığında da toplayıcısız şartta piritin konsantreden tamamen uzaklaştırıldığını, konsantredeki demir ve kükürtün ise kalkopirit kaynaklı olduğunu söylemek mümkündür (Çizelge 5.14).

Çizelge 5.14. Toplayıcı ve toplayıcısız şartta nihai konsantredeki kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

Koşullandırma Süresi	İçerik (%)			Toplam (%)	Verim (%)		
	Cp	Py	NS-Fe		Cp	Py	NS-Fe
<b>Toplayıcı</b>	16,6	36,5	2,6	55,7	50,0	27,3	1,1
<b>Toplayıcısız</b>	55,6	0,0	1,9	57,5	35,9	0,0	0,2

Toplayıcısız flotasyon ile altın ve bakırda düşük verim değerleri elde edilmektedir, ancak yüksek tenör değerlerinin konsantrenin ekonomik değeri açısından çok daha önemli olduğu değerlendirilmektedir. Birçok metalde olduğu gibi, altın konsantresinden nihai ürün elde edilmesi izabe süreçleriyle gerçekleştirilmektedir ve konsantrenin ekonomik değerinin hesaplanmasında belirleyici olan konsantrenin metal içeriğidir. İzabe kontratlarında konsantrenin altın ve bakır içeriğine göre ödeme tutarları önemli değişiklikler gösterirken, belirli değerlerden düşük metal içeriğine sahip konsantreler için ödeme yapılmamaktadır (Wellmer vd., 2007).

Ayrıca, toplayıcısız flotasyon sonrasında artıktaki kalan altın ve bakırın da farklı bir flotasyon devresi ile kazanılabileceği düşünülmektedir. Klimpel (1999) de benzer olarak, kolaylıkla yüzdürülen ve yüzdürülemeyen farklı nitelikteki altın cevherlerinin flotasyonun iki aşamalı bir süreç ile daha az maliyetli olarak gerçekleştirilebileceğini ifade etmektedir. Buna göre ilk aşamada kolay yüzebilen nabit altın düşük reaktif dozajlarında pH ayarlamasına ihtiyaç kalmadan kazanılırken, artıktaki kalan altının kazanılmasının yüksek dozajda reaktif uygulaması ile mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Bu durumda, artıktaki kalan altının niteliği, serbestleşme durumu ve gang minerallerinin MLA, QEMSCAN gibi nicel yöntemlerle ortaya konulmasının kritik bir öneme sahip olduğu düşünülmektedir. İlave olarak, koşullandırma süresinin etkisinin

tartışıldığı şartta belirtildiği, kuru öğütme sonrasında flotasyon sürecinde suyla temas eden örnekte, pülp kimyasının da önemli ölçüde değişeceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, oluşan flotasyon artığının yeni bir besleme gibi ele alınarak, flotasyon parametrelerinin bu şartlar ışığında belirlenmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu da ayrı bir çalışmanın konusudur.

### 5.2.5. Flotasyon süreleri

Altın ve bakır flotasyonunun 180 saniye sonunda büyük ölçüde gerçekleştiği, uzayan süreye bağlı olarak altın ve bakır verimlerinde bir miktar artışın olduğu ancak demir ve kükürt verimlerinin de artmaya devam ettiği anlaşılmaktadır. Demir ve kükürte ilave olarak flotasyon sürelerinin uzamasıyla yüzdürülen gang minerali miktarı da artarak, altın ve bakır seçimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu etkinin temizleme kademelerinde de nihai konsantredeki altın ve bakır tenörünü düşüreceği öngörülmektedir.

Buna göre daha kısa flotasyon sürelerinde verimlerden bir miktar ödün verilerek, altın ve bakırın daha seçimli olarak yüzdürülmesi mümkün görünmektedir. Bu etkiyi temizleme kademelerinde incelemek amacıyla, gerçekleştirilen deneylerde Çizelge 5.15'te gösterilen flotasyon süreleri uygulanmıştır. Kısa sürenin uygulandığı şartta, kademelerde uygulanan köpürtücü dozajları flotasyon süresine bağlı olarak azaltılırken, diğer şartlar aynı tutulmuştur. Flotasyon sürelerinin, kademelerde verim ve tenör değerleri üzerindeki etkileri Şekil 5.26'da verilmiştir.

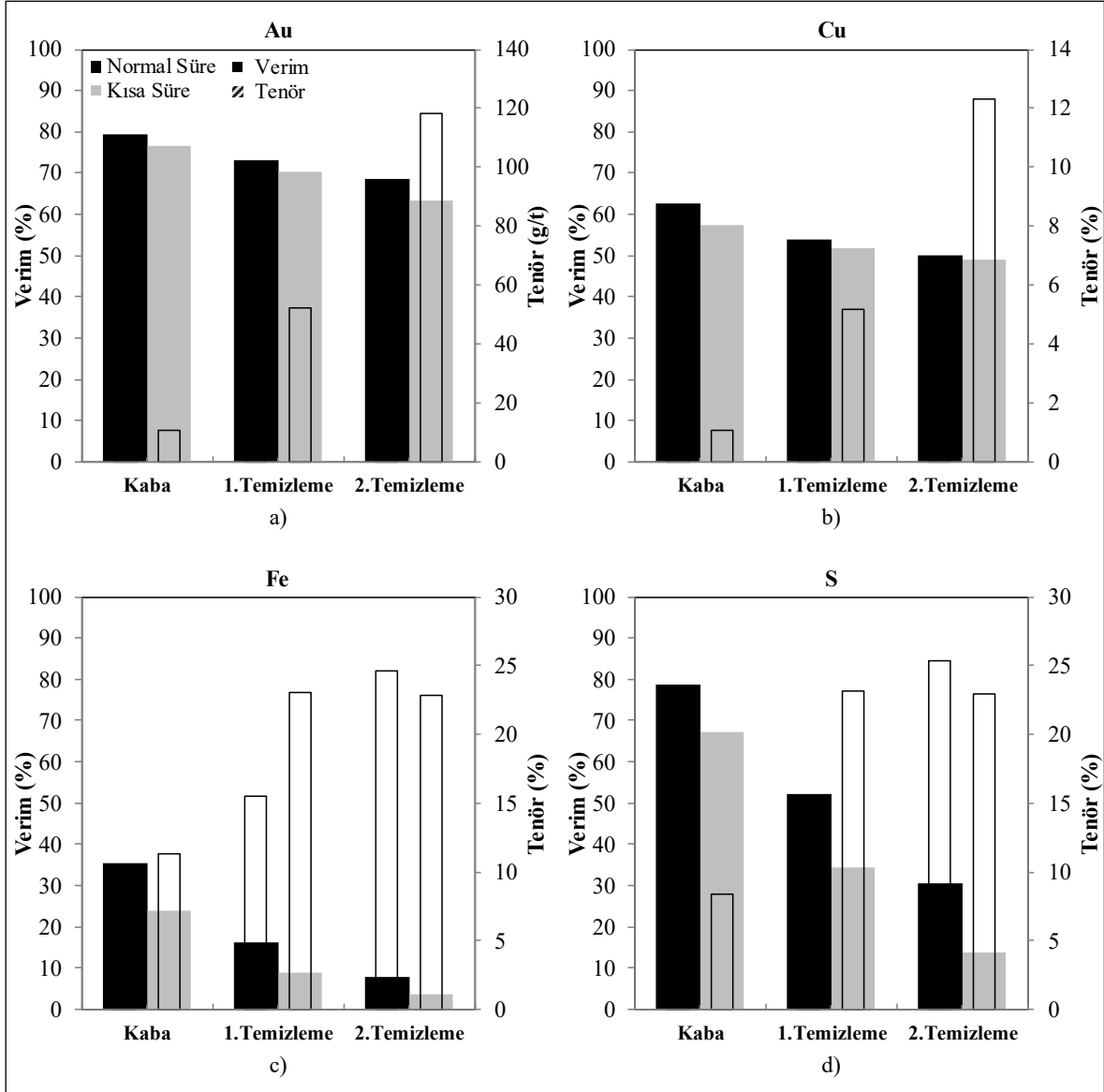
Çizelge 5.15. Kademelerde uygulanan flotasyon süreleri

Flotasyon Kademesi	Flotasyon Süreleri (s)	
	Normal Süre	Kısa Süre
Kaba Flotasyon	420	180
1. Temizleme	300	120
2. Temizleme	120	90

Kaba flotasyon kademesinde 420 saniye sonunda 5,8 g/t altın içeren konsantrenin verim değeri %79,4 olurken, 180 saniyede tenör değeri iki kattan fazla artarak 10,7 g/t verim değeri ise bir miktar azalarak %76,6 olmaktadır. Temizleme kademelerine geçildiğinde, verimler arasındaki farkın korunduğu buna karşılık, kısa sürelerin uygulandığı şartta tenör



değerlerinin hızla yükseldiği görülmektedir. İki kademeli temizleme sonucunda, kısa sürelerin uygulandığı şartta 118,5 g/t altın içeren konsantrenin verimi %63,5 olurken, sürelerin normal olarak uygulandığı şartta, yaklaşık %5 daha yüksek verim değerine sahip konsantrede altın tenörü 64,9 g/t'da kalmaktadır.



Şekil 5.26. Flotasyon süresinin flotasyon kademelerinde, verim ve tenör değerleri üzerindeki etkisi a)Au b)Cu c)Fe d)S

Sonuçlar bakır özelinde değerlendirildiğinde ise, kaba flotasyon kademesinde, 420 saniyelik flotasyon süresi sonunda, %0,6 bakır içeren konsantrede verim, %62,6 olurken, flotasyon süresinin 180 saniyeye düşürülmesi ile tenör değeri iki kata yakın artarak %1,1, verim yaklaşık %5 azalarak %57,5 olmaktadır. Temizleme kademelerinde ise, verim

değerleri arasındaki fark büyük ölçüde kapanırken, kısa flotasyon sürelerinin uygulandığı şartta konsantrenin bakır içeriği hızla artmaktadır. İki temizleme kademesi sonunda kısa flotasyon sürelerinin uygulandığı şartta %12,3 bakır içeren konsantrede verim %49,1'dir. Normal flotasyon sürelerinin uygulandığı şartta ise %5,8 bakır içeren konsantrede verim %49,5 olmaktadır.

Kaba flotasyon kademesinde flotasyon süresinin kısaltılması hem demir, hem de kükürt için verim değerlerinin düşmesine, tenörlerin ise bir miktar artmasına neden olmaktadır. Kaba flotasyonda, 420 saniyelik köpük toplama süresi sonunda, %8,6 demir ve %5,1 kükürt içeren konsantrenin verimleri, sırasıyla %35,4 ve %78,7 olurken, 180 saniyelik köpük toplama süresinde, tenör değeri demirde %11,4'e, kükürtte ise %8,4'e yükselmekte verim değerleri ise sırasıyla %23,8'ye ve %67,1'e düşmektedir. Şartların verim ve tenör değerlerinde benzer bir etkinin ilk temizleme kademesinde de devam ettiği görülmektedir. İkinci temizleme kademesinde ise kısa sürelerin uygulandığı şartta demir ve kükürtün belirgin olarak bastırıldığı anlaşılmaktadır. Flotasyonun normal sürelerde gerçekleştirildiği şartta nihai konsantredeki demir tenörü %24,7 verimi ise %7,9 olurken, kükürt tenörü %25,3, verimi ise %30,5'tir. Kısa sürelerin uygulandığı şartta ise, konsantredeki demir ve kükürt içerikleri yaklaşık %23 ile benzerlik gösterirken, verim değeri demir için %3,6, kükürt için %13,6'dır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, flotasyon sürelerinin kısaltılmasının yüzdürülen demir ve sülfür miktarını belirgin olarak azalttığı, altın ve bakırda ise bir miktar verim kaybına karşılık tenör değerlerinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Çizelge 5.16'da flotasyon sürelerinin normal ve kısa olarak uygulandığı şartlarda, flotasyon kademelerinde elde edilen konsantrelerin beslemeye göre yüzde miktarları verilmiştir. Altın ve bakırda verim değerlerinde önemli bir değişim olmaksızın, tenör değerlerinin artması, uzun flotasyon sürelerinde konsantrenin pirit ve diğer gang mineralleri tarafından kirletildiğini göstermektedir. Flotasyon sürelerine bağlı olarak, konsantredeki pirit ve kalkopirit içerikleri de bu bulguyu desteklemektedir (Çizelge 5.17).

Çizelge 5.16. Flotasyon sürelerine göre, konsantre miktarlarının değişimi

Kademe	Konsantre Miktarı (%)	
	Uzun Süre	Kısa Süre
Kaba flotasyon	20,7	10,5
1. Temizleme	5,3	2,0
2. Temizleme	1,6	0,8

Çizelge 5.17. Flotasyon sürelerine göre sürelerine göre nihai konsantredeki kalkopirit, pirit ve sülfürlü olmayan demirin tenör ve verimlerinin karşılaştırılması

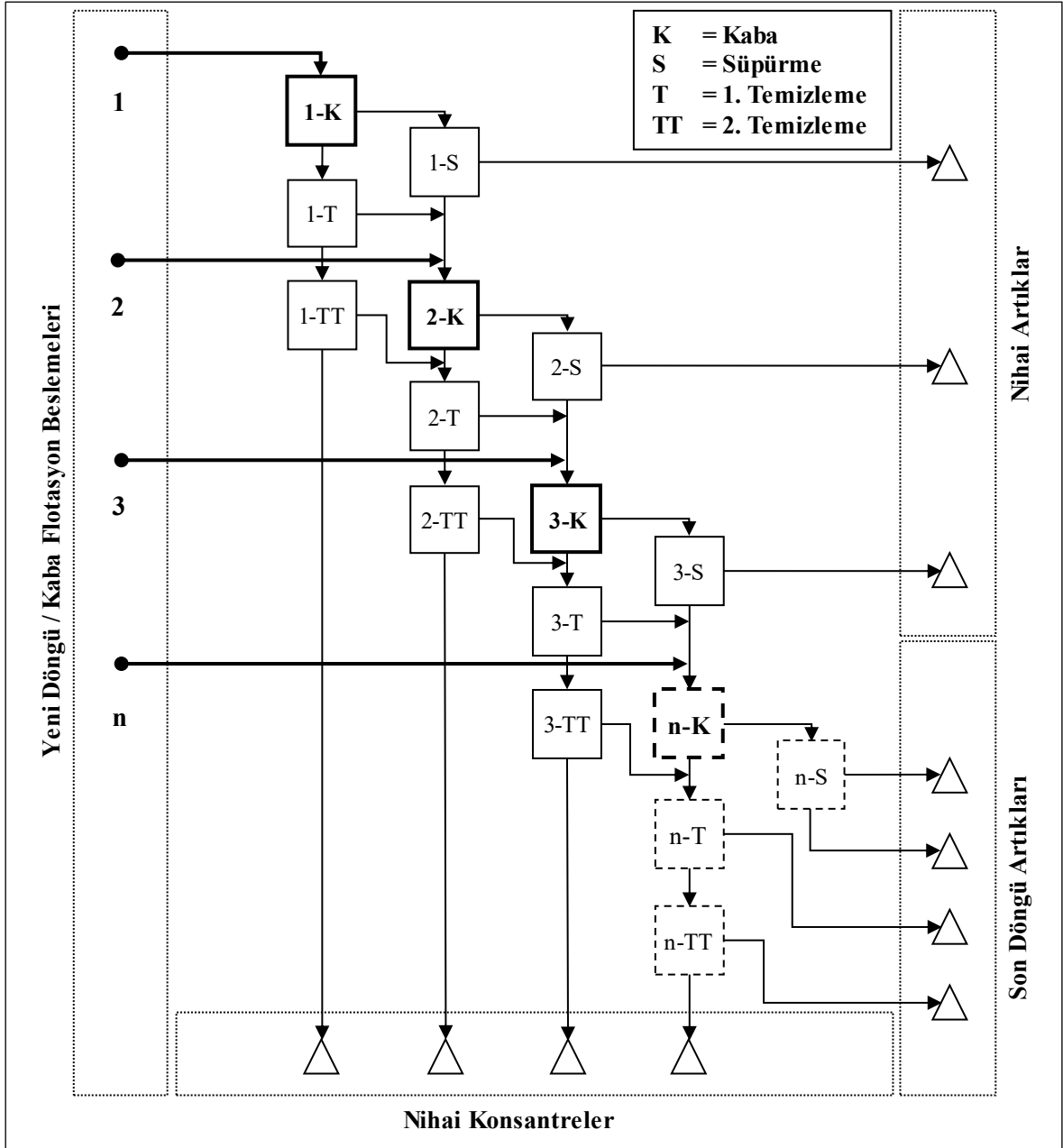
Flotasyon Süresi	İçerik (%)			Toplam (%)	Verim (%)		
	Cp	Py	NS-Fe		Cp	Py	NS-Fe
Normal Süre	16,6	36,5	2,6	55,7	50,0	27,3	1,1
Kısa Süre	35,5	19,8	2,8	58,1	49,1	7,4	0,6

Buna göre, altın ve bakırın, pirit ve diğer gang minerallerinden daha hızlı yüzdürüldüğünü, flotasyonun mümkün olduğunca kısa sürelerde gerçekleştirilmesinin altın ve bakır seçimliliğine önemli katkı sağladığını söylemek mümkündür. Altın ve bakırın flotasyonunun kısa sürelerde gerçekleşmesinin bir diğer avantajının ise, kısa sürelerde gerçekleştirilen flotasyon sonucunda kalma sürelerinin azalması, buna bağlı olarak ise, tesis aşamasında daha düşük hücre kapasitelerine ihtiyaç duymasıdır. Bu da maliyetleri düşürücü bir etki olarak değerlendirilmektedir (Klimpel, 1999).

### 5.3. Kapalı Devre Flotasyon Deneyi

Kapalı devre flotasyon deneyleri, flotasyon kademelerinde elde edilen ara ürünlerin, uygun kademelerde devreye tekrar beslenmesiyle devrenin devamlılığının sağlanarak tesis aşamasını laboratuvar ortamında benzetimini amaçlamaktadır. Açık devre flotasyon deneyleri sonucunda belirlenen şartlarda, iki temizleme ve bir süpürme kademesini içeren bir kapalı devre flotasyon deneyi gerçekleştirilmiştir.

Kapalı devre flotasyon deneyinde, her yeni döngüdeki kaba flotasyon beslemesine, bir önceki döngüde elde edilen süpürme kademesinin konsantresi ve 1. temizleme kademesinin artığı beslenmiştir. Bir önceki devrenin 2. temizleme artığı ise, aynı döngüde elde edilen kaba flotasyon konsantresi ile birleştirilerek 1. temizleme gerçekleştirilmiştir. Kapalı devre flotasyon deneyi 8 döngüde gerçekleştirilmiştir. Deneyin şematik bir gösterimi Şekil 5.27’de, deney koşulları Çizelge 5.18’de verilmiştir.

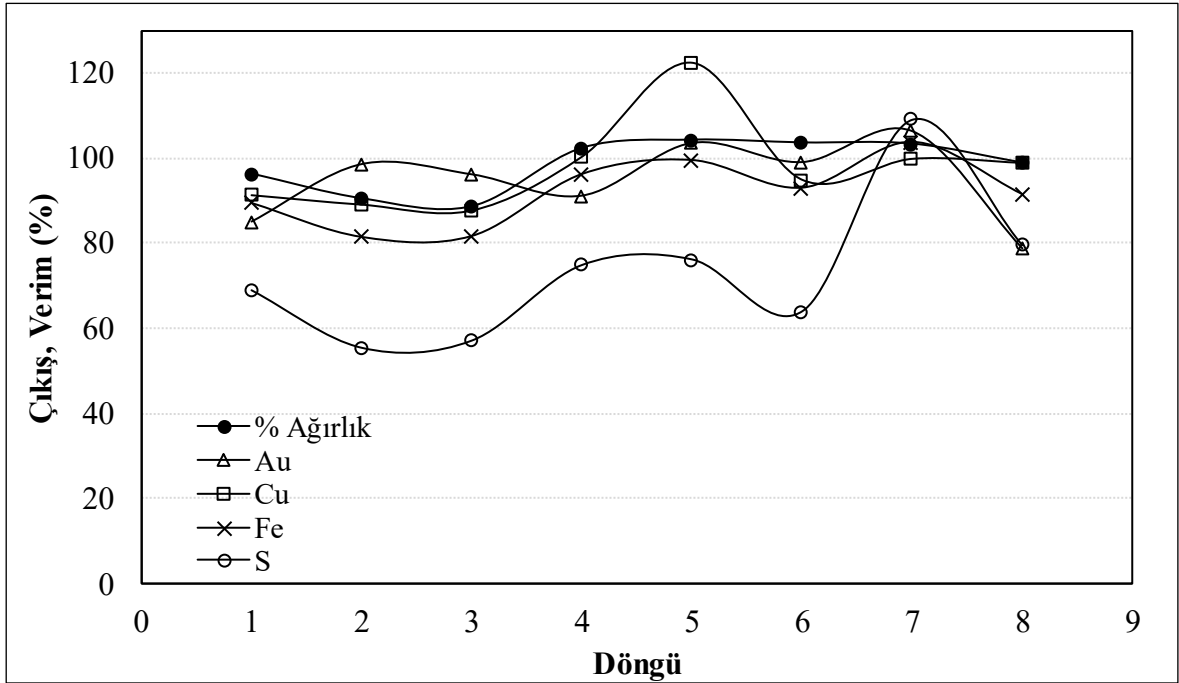


Şekil 5.27. Kapalı devre flotasyon deneyinin şematik gösterimi

Çizelge 5.18. Kapalı devre flotasyon deneyinde uygulanan şartlar

Flotasyon Kademeleri	pH	Toplayıcı (g/t)		Flot. Süresi (s)
		PEX	A3894	
Kaba	10,5	5	10	180
1. Temizleme	12	-	5	150
2. Temizleme	12	-		90
Süpürme	10,5	-	5	180

Düzgün çalışan bir sistemde giren malzeme kadar malzemenin sistemden uzaklaşması gerekmektedir. Aksi halde dengesiz olarak nitelenecek böyle bir sistemin işlerliği belirli bir süre sonunda bozulacaktır. Kapalı devre flotasyon deneyinde döngüler boyunca giren ve çıkan ürünlerin dengesi Şekil 5.28’de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, 4. Döngü sonunda malzeme dengesinin %100 seviyelerine ulaştığı, yani giren malzemenin çıkan malzemeye eşit olduğu ve bu dengenin 5 ve 6. döngülerde devam ettiği görülmektedir. Elementler özelinde ise 5 ve 6. döngülerde çıkan ürün miktarlarının %100’ler seviyesinde olduğu, ancak özellikle bakır ve kükürtte dalgalanmaların yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.28. Kapalı devre flotasyon deneyi, giren-çıkan ürünler dengesi

Döngülerde elde edilen ürünlerin verim tenör değerleri ise Çizelge 5.19’da gösterilmektedir. Altın ve bakır için, iki kademeli temizlemede elde edilen konsantre miktarlarının toplam beslemeye göre %0,15-0,20 seviyelerinde olduğu düşünüldüğünde, küçük miktardaki değişimlerin bile tenör ve verim değerlerinde dalgalanmalara yol açtığı göz önünde bulundurulmalıdır. Kükürtte ise malzeme dengesindeki bozulmanın sebebinin temizleme kademelerinin artık ürünlerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Çizelge 5.20’de son döngülerde temizleme kademelerinin artıklarındaki bakır, demir ve kükürt tenörlerinin, toplam beslemeye göre verim değerleri verilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere demir ve kükürtün, dolayısıyla piritin yaklaşık %25’lik kısmı temizleme kademeleri artıklarında

bulunmaktadır. Temizleme kademelerinde bastırılan piritin, bir sonraki döngüde tekrar bir önceki kademeye dönerek, tekrar yüzdürüldüğü ve devreden atılmadığı anlaşılmaktadır. 1. temizleme kademesi artığına eklenecek bir süpürme kademesiyle bu durumun önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

Çizelge 5.19. Kapalı devre flotasyon deneyi sonuçları

Döngü	Kademe	Ürün	Ağ (%)	Tenörler			
				Au (g/t)	Cu (%)	Fe (%)	S (%)
1	2. Temizleme	K.	0,16	65,81	8,59	43,42	46,52
2	2. Temizleme	K.	0,15	89,04	9,64	36,72	37,02
3	2. Temizleme	K	0,17	73,58	8,00	33,39	32,24
4	2. Temizleme	K	0,20	57,55	7,80	36,92	37,94
5	2. Temizleme	K	0,12	114,24	18,07	57,09	58,04
6	2. Temizleme	K	0,13	87,29	10,40	38,30	38,28
7	2. Temizleme	K	0,35	41,30	4,42	38,52	38,52
8	2. Temizleme	K	0,19	51,55	8,16	45,73	46,38
8	2. Temizleme	A	0,50	7,88	0,43	36,21	36,21
8	1. Temizleme	A	0,75	3,76	0,16	25,88	24,29
8	Süpürme	K	0,30	2,53	0,33	9,99	5,63
1	Süpürme	A	11,87	0,38	0,09	4,16	0,38
2	Süpürme	A	11,17	0,40	0,09	4,12	0,38
3	Süpürme	A	10,92	0,42	0,09	4,20	0,41
4	Süpürme	A	12,58	0,39	0,09	4,25	0,45
5	Süpürme	A	12,90	0,42	0,10	4,36	0,52
6	Süpürme	A	12,81	0,50	0,10	4,20	0,49
7	Süpürme	A	12,55	0,37	0,09	4,15	0,46
8	Süpürme	A	12,17	0,37	0,10	4,05	0,44
	Hes. Besleme		100,00	1,44	0,22	5,06	1,41

Çizelge 5.20. Kapalı devre flotasyon deneyinin son döngüsünde temizleme kademesi artıklarındaki Cu, Fe ve S verim ve tenör değerleri

Döngü	Kademe	Ürün	Ağ (%)	Tenör (%)			Verim (%)		
				Cu	Fe	S	Cu	Fe	S
8	2. Temizleme	A	0,50	0,43	36,21	36,21	1,00	3,58	12,84
8	1. Temizleme	A	0,75	0,16	25,88	24,29	0,56	3,84	12,92
	<b>Toplam</b>		1,25	0,27	<b>30,01</b>	<b>29,06</b>	1,56	<b>7,42</b>	<b>25,76</b>

Kapalı devre flotasyon deneylerinin değerlendirilmesi ise malzeme dengesinin en tutarlı olduğu 5 ve 6. döngüler ile gerçekleştirilmiştir. Bu döngüler sonucunda elde edilen konsantre ve artığın verim ve tenör değerleri Çizelge 5.21’de gösterilmektedir. Çizelgeden de görüleceği üzere, iki kademeli temizleme sonrasında beslemeye göre %0,95’lik bir konsantre, yaklaşık 100 g/t altın, %14,0 bakır, %47,1 demir ve %47,6 kükürt içeriğine sahiptir. Verim değerleri altın için %67,6, bakır için %58,3, demir için %9,5 ve kükürt için %47,4’tür. Analiz sonuçlarına göre, altının %32,4’lük bir kısmı, bakırın ise %41,7’lik bir kısmı artıktaki kalırken, artıktaki altın ve bakır tenörleri sırasıyla 0,46 g/t ve %0,1’dir.

Çizelge 5.21. Kapalı devre flotasyon deneyinin 5 ve 6. döngülerinde elde edilen konsantre ve artığın verim ve tenör değerleri

	Ağ	Tenörler (Au g/t; Cu, Fe, S %)				Verimler (%)			
	%	Au	Cu	Fe	S	Au	Cu	Fe	S
Konsantre	0,95	99,96	14,01	47,14	47,57	67,62	58,33	9,54	47,42
Artık	99,05	0,46	0,10	4,28	0,51	32,38	41,67	90,46	52,58
Besleme	100,00	1,40	0,23	4,69	0,95	100,00	100,00	100,00	100,00

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Çeşitli flotasyon parametrelerinin, altın flotasyonu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, Artvin, Yusufeli bölgesinden temin edilen 1,4 g/t altın, %0,2 bakır, %5,2 demir ve %1,4 kükürt içeren bir altın cevheri kullanılmıştır. Loesche GmbH tarafından valsli dik değirmen kullanılarak, P<sub>80</sub> 48, 79 ve 100 µm olacak şekilde kuru olarak öğütülen cevher örnekleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarına getirilmiştir.

Kaba flotasyon ve açık devre flotasyon deneylerinden oluşan flotasyon çalışmalarında parametrelerin etkileri nedenleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Kaba flotasyon deneylerinde etkisi incelenen parametreler tane boyutu, pH, köpürtücü dozajı, toplayıcı tipi ve dozajı, flotasyon süresi, pH ve Eh ayarlayıcı, koşullandırma süresidir. Bu parametrelerden parametrelerden temizleme kademelerinde verim ve tenör değerlerini etkileyebilecek parametreler belirlenmiştir. Tane boyutu, pH, koşullandırma süresi, toplayıcı varlığı, flotasyon süreleri olarak belirlenen bu parametrelerin etkileri, kaba flotasyon konsantrasyonunun iki kademeli olarak temizlendiği açık devre flotasyon deneylerinde incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi Au, Cu, Fe ve S verim ve tenör değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir ve ulaşılan başlıca sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Gerçekleştirilen tane boyut analizleri, tüm tane boyutlarında (48, 79 ve 100 µm), örnekteki altının %50'den fazla oranda, 25 µm'dan ince boyutlarda bulunduğunu ve P<sub>80</sub> boyutun azalması ile bu oranın arttığını göstermektedir. 48 µm boyutunda şlam olarak nitelenen -38 µm boyutundaki malzeme miktarı yaklaşık %70'dir. Farklı boyutlarda gerçekleştirilen deneylerde tüm boyutlar için benzer altın verimleri elde edilirken, 48 µm'da tenör değerlerinin diğer boyutlara kıyasla belirgin olarak düşük olduğu bulunmuştur. Benzer bir yorumu bakır özelinde de yapmak mümkündür. Sonuçlar, tane boyutu açısından değerlendirildiğinde, 79 ve 100 µm boyutlarında serbestleşmenin altın ve bakır için yeterli olduğu, daha ince boyutlara öğütmenin, şlam miktarını arttırarak, seçimliliği azalattığı şeklinde yorumlanmaktadır.



- Altın ve bakırın toplayıcısız flotasyon ile yüzdürülebildiği daha önceki çalışmalardan da bilinmektedir (Aksoy ve Yazar, 1989; Dunne, 2005; Zheng ve Manton, 2010). Bu çalışmada kullanılan cevher örneğinde de toplayıcısız flotasyon ile altın ve bakırın önemli bir bölümü yüzdürülmektedir. Toplayıcısız flotasyon ile kaba flotasyon kademesinde altında %60-65 bakırda ise %55-60 verimler elde edilmiştir. Ayrıca toplayıcısız flotasyonda demir ve kükürt verimlerinin %10 seviyelerinde ve oldukça düşük olduğu görülmektedir. Gökçen vd. (2019) kuru ve yaş öğütmenin altının flotasyon davranışı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada, kuru öğütme sonrası gerçekleştirilen toplayıcısız flotasyonun yaş öğütmeye kıyasla daha yüksek verim ve tenör değerleri sağladığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu nedenle, cevher örneğinde toplayıcısız flotasyon sonucunda ulaşılan verim değerlerinin cevherin kuru öğütülmüş olması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.
- Toplayıcı kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ise toplayıcının altın ve bakır verimlerinde %10-20 arasında artışlar sağladığı görülmektedir. Ancak toplayıcı kullanılması ile konsantreye taşınan demir ve kükürt miktarı da önemli ölçüde artmaktadır. Toplayıcılı ve toplayıcısız flotasyon koşulları birlikte değerlendirildiğinde, toplayıcısız olarak altın ve bakırın, demir ve kükürten, dolayısıyla piritten seçimli flotasyonunun büyük ölçüde mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Benzer bulgulara daha önce Zheng ve Manton (2010) ve aynı cevher için gerçekleştirilen çalışmada Oluklulu vd. (2019) tarafından da yer verilmiştir. Ancak, toplayıcı kullanılması durumunda, temizleme kademelerinde altın ve bakır seçimliliğini arttırmak için piritin bastırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Yüksek dozajlarda toplayıcı kullanımının ise verim değerlerini önemli ölçüde etkilemediği, ancak seçimliliği bir miktar düşürdüğünü söylemek mümkündür.
- Kaba flotasyon deneyleri, köpürtücü dozajının altın ve bakırın verim değerlerini en belirgin şekilde etkileyen parametre olduğunu göstermektedir. Beklenildiği üzere köpürtücü dozajının arttırılmasıyla konsantreye taşınan malzeme miktarındaki artışa paralel olarak verim değerleri yükselirken, tenör değerleri düşmektedir. Ayrıca kullanılan köpürtücünün (AF70) köpürtme etkinliğinin pH'taki artışa bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Gupta vd. (2007), yaptıkları çalışmada benzer bir bulguya ulaşmışlardır. Köpürtücü etkinliğinin pH'a bağlı olarak artışı konsantreye taşınan

malzeme miktarını arttırırken, konsantredeki altın ve bakır seyrelterek tenör değerlerini düşürmektedir. Bu durumun cevherin doğal pH'sında elde edilen düşük verim değerlerini ve pH 10,5'ta elde edilen düşük tenör değerlerini açıkladığı düşünülmektedir.

- Altının flotasyonla zenginleştirildiği birçok tesiste, ksantata ilave olarak ditiyofosfat, thionocarbamate gibi farklı tipteki toplayıcıların birlikte kullanılmasının altın ve altın taşıyıcı minerallerin verimlerini arttırdığı çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Klimpel, 1999; Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005). Bu kapsamda farklı tipteki toplayıcı karışımlarının etkileri PAX ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Toplayıcı karışımlarının altının verim ve tenör değerleri üzerinde belirgin bir etki yaratmadığı görülmekle birlikte, PEX + A3894 (thionocarbamate) ve A238 (dithiophosphate) + XD5002 (thionocarbamate) toplayıcı karışımlarının bakırın verim ve tenör değerlerinde bir miktar artış sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Flotasyon süresinin etkisini araştırıldığı flotasyon deneyleri, altın ve bakırın flotasyonunun 180 saniyelik flotasyon süresi sonunda büyük ölçüde gerçekleştiğini, bu süreden sonra flotasyon hızının oldukça yavaşladığını göstermektedir. Toplayıcılı şartta 480 saniye sonunda altının %80'den fazlasının, bakırın ise %65'lik bir kısmının konsantreye taşınmaktadır. Özellikle kaba flotasyon kademesinde, olabildiğince yüksek verim değerlerinin elde edilmesi arzulanan bir durumdur ancak, açık devre flotasyon deneylerinde de görüldüğü üzere, altın ve bakırın hızlı kinetiğinden faydalanılarak flotasyon süresinin kısaltılmasının yüksek tenörlü ve özellikle piritten seçimli altın ve bakır konsantrisinin elde edilmesine önemli bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır.
- Kaba flotasyon kademesinde pH'ın 8'den 10,5'a yükseltilmesinin altın, demir ve kükürt verimlerini arttırdığı, bakır verimlerinin ise önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür. Verim değerlerindeki bu artış, pH'ın 8'den 10,5'a yükseltilmesiyle konsantre miktarında meydana gelen 2 kata yakın artışla ilişkilendirilmektedir. Daha önce değinildiği üzere, pH'taki artışa paralel olarak AF70'in köpürtme özelliğinin artması, verimlerin yükselerek, seçimliliğin, dolayısıyla tenör değerlerinin azalmasını açıklamaktadır. Temizleme kademelerinde ise, pH 12'de pH 10,5'a

kıyasla demir ve kükürt verimlerinin önemli ölçüde azaldığı, buna karşılık konsantredeki altın ve bakır içeriklerinin ise belirgin olarak arttığı görülmektedir. Bilindiği üzere düşük pH seviyelerinde, metal iyonlarının yüksek konsantrasyonu pirit flotasyonuna katkı sağlarken, pH'ın artmasıyla azalan iyonlaşma, hidroksil iyonlarının demir yüzeylerine çökmesi ile pirit flotasyonunu engellemektedir (Hayes vd., 1987; Hintikka ve Leppinen, 1995; Zhang vd., 1997). Buna göre, pH 12'de, piritin pH 10,5'a kıyasla daha etkin bir biçimde bastırıldığı ve bu sayede konsantredeki altın ve bakır içeriklerinin önemli ölçüde arttığı söylenebilir. Sonuç olarak piritin etkin bir biçimde bastırılabilmesi için temizleme kademelerinde pH 12'nin tercih edilmesinin gerekliliği anlaşılmaktadır. Ayrıca kirecin yüksek pH değerlerinde altın verimlerinde olumsuz bir etki yarattığına dair bir bulguya rastlanılmamıştır. Forrest vd. (2001) benzer sonuçları paylaştıkları çalışmada, altın verimlerinin kireç ilavesinden etkilenmediği, en yüksek tenör değerlerinin ise pH 11,5 ve üzeri değerlerde piritin bastırılmasıyla elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

- Çeşitli araştırmacılar düşük pH seviyelerinde kireç yerine soda külü kullanılmasının altın flotasyonunda avantajlar sağladığından bahsetmektedir (Klimpel, 1999; Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005). Ancak, kirecin altın flotasyonu etkilemediğini, pirit içeren cevherlerde kirecin piriti bastırarak yüksek altın seçimliliği sağladığını ifade eden çalışmalar da mevcuttur (Bulatovic, 1997; Forrest vd., 2001; Dunne, 2005). Sonuç olarak, pH ayarlamada kireç yerine soda külünün kullanılmasının altın ve bakır verimlerine bir katkı sağlamadığı, aksine soda külünde azalan konsantre miktarına rağmen konsantrenin pirit içeriğinin yükseldiği anlaşılmaktadır.
- İndirgeyici bir reaktif olan Na-ditiyonitin, tüm pH koşullarında pülp  $E_h$ 'sını belirli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Kaba flotasyon kademesinde pülpe eklenen Na-ditiyonitin tenör ve verim değerleri üzerindeki etkisi pH 10,5'ta sınırlıdır. pH 8'de ise, tüm elementlerin tenör ve verim değerlerinde farkedilir bir düşüşe neden olmaktadır. Literatürde Na-ditiyonitin başta pirit olmak üzere sülfürlü minerallerinin bastırılması amacıyla kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Hayes ve Ralston, 1988; Drzymala ve Wheelock, 1992; Ma ve Bruckard, 2009). Deneyler, Na-ditiyonitin bu etkisinin pH ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Ancak, Na-ditiyonitin piritin yanı sıra altının verim değerlerini de düşürdüğü gözlenmiştir.

- Koşullandırma sürelerinin kısaltılması, hem altın, hem de bakırın tenör değerlerini önemli verim kaybına yol açmadan dikkate değer biçimde arttırmaktadır. Literatür kısmında da bahsedildiği gibi cevherin yaş öğütme koşullarında meydana gelen galvanik etkileşimler ve oksidasyon ürünlerin ortaya çıkmasıyla altın ve bakır yüzeylerinde meydana gelen kaplamalar altın verimlerinde düşüşe neden olmaktadır. Kısa koşullandırma sürelerinde altın ve bakırın hem verim hem de tenörlerinde meydana gelen artışın nedeninin, cevherin suyla temas süresinin kısa olmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Cevherin kuru öğütülmüş olması da göz önünde bulundurulduğunda bu etkinin öğütmeden gelen bir etki olduğu da söylenebilir. Gökçen vd. (2019) çalışmalarında kuru öğütülmüş altın cevherinde, yaş öğütmeye kıyasla daha yüksek verim ve tenör değerlerine ulaşıldığını belirtmekle beraber, koşullandırma sürelerinin uzatılmasının, kuru öğütülmüş örnekte flotasyon performansını önemli ölçüde bozarak yaş öğütülmüş örnek ile benzer hale getirdiğini belirtmektedirler.
- Açık devre flotasyon deneyleri sonucunda toplayıcı şartta kısa koşullandırma ve flotasyonun sürelerinin kısaltılması ile altın ve bakırda yüksek seçimliliğin elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Kısa koşullandırma ile, 154 g/t altın, %16,8 bakır içeren konsantre sırasıyla %65,8 ve %49,8 verimlerle elde edilirken, konsantrenin demir tenörü %24,3, kükürt tenörü ise %22,8'dir. Flotasyon sürelerinin kısaltılması ile ise, 118 g/t altın, %12,3 bakır içeren konsantrede verim değerleri sırasıyla %63,5 ve %49,1'dir. Konsantrenin demir tenörü %22,8, kükürt tenörü ise %23'tür.
- Gerçekleştirilen kapalı devre flotasyon deneyinde, malzeme dengesi ve metalürjik dengenin 5 ve 6. döngülere büyük ölçüde sağlandığı anlaşılmaktadır. Bu döngülerde konsantrenin 100 g/t, altın %14 bakır içerdiği verim değerlerinin sırasıyla %67,6 ve %58,3 olduğu görülmektedir. Konsantre %47,1 demir ve %47,6 kükürt içermektedir. Aynı şartta gerçekleştirilen açık devre flotasyon deneyi sonucunda benzer tenör değerlerinin elde edildiği, buna karşılık kapalı devre flotasyon ile verim değerlerinin hem altın hem de bakır için yükseldiği görülmektedir.
- Kapalı devre flotasyon deneyinde, iki kademeli temizleme sonrasında elde edilen konsantre miktarları toplam besleme miktarının %0,15-0,30 arasında değişmektedir. Buna bağlı olarak konsantre miktarındaki ufak bir değişimin altın ve bakır

tenörlerinde büyük değişimlere neden olduğu görülmektedir. Bir diğer bulgu olarak, son döngüde elde edilen temizleme artıkları incelendiğinde piritin önemli bir bölümünün, temizleme kademelerinde bastırılarak bir önceki kademeye geri döndüğü ve tekrar yüzerek temizleme kademelerine taşındığı anlaşılmaktadır.

## 6.2. Öneriler

- Flotasyon deneylerinde etkisi incelenen birçok parametreye rağmen, örneğin nihai artıklarında önemli ölçüde altın ve bakırın kaldığı görülmektedir. Bu durumun temel sebebinin cevher mineralojisi olduğu düşünülmektedir. Artıkta kalan altın ve bakırın tane boyut dağılımları, serbestleşme dereceleri ve bağlılarsa hangi minerallerle birlikte buldukları, artıkta kalan altın ve bakırın kazanılmasında belirleyici olacaktır. Özellikle artıklarda gerçekleştirilecek detaylı MLA ve QEMSCAN analizleri ile artıkta kalan altın ve bakırın flotasyon ile kazanılması olanaklarının araştırılması gerekmektedir. Bu araştırma, flotasyon sürecinde devre tasarımı, reaktif rejimi, cevherin farklı flotasyon kademelerinde yeniden öğütülmesinin gerekliliği ve öğütme tane boyutunun belirlenmesi gibi parametrelerin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.
- Toplayıcı ve toplayıcısız şartlarda altın ve bakırın verim değerleri arasında meydana gelen farkın cevher mineralojisiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Toplayıcısız şartta yüzdürülen altın ve bakırın serbest haldeki nabit altın ve kalkopirit olduğu bilinmektedir (Aksoy ve Yarar, 1989; Fairthorne vd., 1997; Allan ve Woodcock, 2001; Dunne, 2005). Ancak, toplayıcı ilavesi sonrasında yüzdüren altın ve bakırın niteliği mineralojik olarak araştırılmalıdır.
- Kısa koşullandırma sürelerinde gerçekleştirilen flotasyon deneylerinden elde edilen bulgularla, cevherlerin kuru öğütülmüş olmasının altın ve bakırın seçimli flotasyonuna önemli katkı sağladığı düşünülmektedir. Feng ve Aldrich (2000) sülfürlü mineraller üzerinde yaptıkları çalışmada, kuru öğütülmüş minerallerin, yaş öğütülmüşlere kıyasla daha kararlı köpüğe sahip olduğunu ve kuru öğütmenin flotasyon kinetiğini hızlandırdığını ifade etmektedir. Bu etkinin, kuru ve yaş öğütmenin karşılaştırmalı olarak incelendiği flotasyon deneylerinin

gerçekleştirilerek ortaya konulması gerekmektedir. Ayrıca, varsa, böyle bir etkinin nedenlerinin daha somut olarak (pülp kimyası, galvanik etkileşimler, tane yüzey özellikleri, tane şekli vb.) açıklanması kritik bir önem arz etmektedir. Bu kapsamda, cevherin kuru ve yaş olarak öğütülmesinin, cevherin flotasyon davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlayan bir çalışma yürütülmektedir.

- Flotasyon uygulamasının yaygınlığına paralel olarak, çok sayıda reaktif üreticisi firma daha yüksek seçimlilik sağlayan reaktiflerin üretilmesi için rekabet etmektedir. Ayrıca günümüzde reaktiflerin, laboratuvar ortamında, ihtiyaca yönelik olarak üretilmesi ya da cevher mineralojisine göre belirli bileşimlerde karıştırılması gibi olanaklar da bulunmaktadır. Bu çalışmada, farklı reaktiflerin etkilerinin belirlenmesine yönelik detaylı bir araştırma gerçekleştirilmemiştir. Bunun temel nedenlerinden biri olarak reaktiflerin temin edilmesindeki zorluklar gösterilebilir. Ancak farklı bileşimlerdeki altın ve bakır seçimli reaktiflerinin kullanılarak daha yüksek verimlerle, daha temiz konsantrelerin elde edilmesinin mümkün olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, demir, çinko gibi konsantreyi kirleten içeriklerin bastırılmasına olanak tanıyan reaktiflerin de kullanılmasının daha temiz bir konsantre eldesinde önemli olduğu unutulmamalıdır.
- Kapalı devre flotasyon deneyi, mevcut devre düzeninde piritin önemli bir bölümünün temizleme kademelerinde bastırıldığını, ancak artıklar yoluyla bir önceki kademelere dönerek sistem içerisinde devir daim ettiğini göstermektedir. Bu durumun devre kademelerindeki yükü arttırarak, altın ve bakır flotasyonunu engelleyebileceği düşünülmektedir. 1. temizleme kademesi artığına eklenecek bir süpürme kademesi ile sistemde dönen piritin uzaklaştırılabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle daha sonra gerçekleştirilecek kapalı devre deneyinde bu uygulamanın yapılması planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acarcan, N., Bulut, G., Gül, A., Kangal, O., Karakaş, F., vd., 2010, The Effect of Collector's Type on Gold and Silver Flotation in a Complex Ore, *Separation Science and Technology*, 46, 2, 283-289.
- Agorhom, E.A., 2014, Free gold recovery-effects of gold composition and surface chemistry on flotation and collector adsorption properties (Ph. D. thesis), University of South Australia, Australia, PhD.
- Akcil, A., Wu, X.Q., Aksay, E.K., 2009, Coal-Gold Agglomeration: An Alternative Separation Process in Gold Recovery, *Separation & Purification Reviews*, 38, 2, 173-201.
- Aksoy, B., Yarar, B., 1989, Natural hydrophobicity of native gold flakes and their flotation under different conditions, *Processing of complex ores*, 19-27.
- Aldrich, C., Moolman, D.W., Bunkell, S.J., Harris, M.C., Theron, D.A., 1997, Relationship between surface froth features and process conditions in the batch flotation of a sulphide ore, *Minerals Engineering*, 10, 11, 1207-1218.
- Alexander, D.J., Morrison, R.D., 1998, Rapid estimation of floatability components in industrial flotation plants, *Minerals Engineering*, 11, 2, 133-143.
- Allan, G.C., Woodcock, J.T., 2001, A review of the flotation of native gold and electrum, *Minerals Engineering*, 14, 9, 931-962.
- Altun, D., Benzer, H., Aydoğan, N., Gerold, C., 2017, Operational parameters affecting the vertical roller mill performance, *Minerals Engineering*, 103, 67-71.
- Bayraktar, İ., Yarar, B., 1985, Altın Cevherlerinin Zenginleştirilmesi ve Altının Ekstraksiyonu, 9th Mining Congress of Turkey, Ankara, Turkey, 75-96.
- Boyle, R.W., 1979, The geochemistry of gold and its deposits, *Geological Survey of Canada*, 280, 333-361.
- Bravo, S.V.C., Torem, M.L., Monte, M.B.M., Dutra, A.J.B., Tondo, L.A., 2005, The influence of particle size and collector on the flotation of a very low grade auriferous ore, *Minerals Engineering*, 18, 4, 459-461.
- Brook, C., Small, G., Michelmores, A., Skinner, W., Grano, S., 2003, Collection and characterization of free gold particles from low grade copper concentrator streams and methods to improve their recovery, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 42, 3, 261-269.
- Bruckard, W.J., Sparrow, G.J., Woodcock, J.T., 2011, A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides, *International Journal of Mineral Processing*, 100, 1-2, 1-13.
- Bulatovic, S.M., 1997, Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides, *Minerals Engineering*, 10, 9, 895-908.
- Bulatovic, S.M., 2010, *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 2: Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals*, Elsevier,

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Cesnik, F., Hart, S., Dioses, J., Clements, B., Dunne, R., 2005, Low-Grade Concentrator Regrind Circuit Upgrade at Newcrest's Cadia Valley Operations, Centenary of Flotation Symposium, Brisbane, 815-822.
- Chander, S., 1991, Electrochemistry of Sulfide Flotation - Growth-Characteristics of Surface-Coatings and Their Properties, with Special Reference to Chalcopyrite and Pyrite, *International Journal of Mineral Processing*, 33, 1-4, 121-134.
- Chander, S., 2003, A brief review of pulp potentials in sulfide flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 72, 1-4, 141-150.
- Chierigati, A.C., Pitard, F.F., 2009, The challenge of sampling gold, *World Conference on Sampling and Blending*, 107-112.
- Chryssoulis, S.L., Dimov, S.S., 2004, Optimized conditions for selective gold flotation by ToF-SIMS and ToF-LIMS, *Applied Surface Science*, 231, 265-268.
- Chryssoulis, S.L., McMullen, J., 2016, Mineralogical Investigation of Gold Ores, M.D. Adams (Ed.), *Gold Ore Processing (Second Edition)*, Elsevier, p.57-93.
- Cline, J.S., Hofstra, A.H., Muntean, J.L., Tosdal, R.M., Hickey, K.A., 2005, Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models, *Economic Geology 100th anniversary volume*, 451, 484.
- Cruz, N., Peng, Y., Farrokhpay, S., Bradshaw, D., 2013, Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: Part 1 – Rheological properties of clay mineral suspensions in the presence of flotation reagents, *Minerals Engineering*, 50-51, 30-37.
- Cruz, N., Peng, Y.J., Wightman, E., Xu, N., 2015a, The interaction of clay minerals with gypsum and its effects on copper-gold flotation, *Minerals Engineering*, 77, 121-130.
- Cruz, N., Peng, Y.J., Wightman, E., Xu, N., 2015b, The interaction of pH modifiers with kaolinite in copper-gold flotation, *Minerals Engineering*, 84, 27-33.
- Cytec Industries, I., 2010, *Mining Chemicals Handbook*, Cytec Industries Inc., West Patterson, N.J.,
- Drzymala, J., Wheelock, T.D., 1992, Potential Pyrite Depressants for use in Oil Agglomeration of Fine-Size Coal, *Coal Preparation*, 10, 1-4, 189-201.
- Dunne, R., 2005, Flotation of gold and gold-bearing ores, *Developments in Mineral Processing*, 15, 309-344.
- Dunne, R., 2016, Flotation of gold and gold-bearing ores, M.D. Adams (Ed.), *Gold Ore Processing (Second Edition)*, Elsevier, p.315-338.
- Ekmekçi, Z., Demirel, H., 1997, Effects of galvanic interaction on collectorless flotation behaviour of chalcopyrite and pyrite, *International Journal of Mineral Processing*, 52, 1, 31-48.
- Fairthorne, G., Fornasiero, D., Ralston, J., 1997, Effect of oxidation on the collectorless flotation of chalcopyrite, *International Journal of Mineral Processing*, 49, 1-2, 31-48.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Feng, D., Aldrich, C., 1999, Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores, *Minerals Engineering*, 12, 7, 721-731.
- 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.
- Forrest, K., Yan, D., Dunne, R., 2001, Optimisation of gold recovery by selective gold flotation for copper-gold-pyrite ores, *Minerals Engineering*, 14, 2, 227-241.
- Fuerstenau, M.C., Jameson, G.J., Yoon, R.H., 2007, *Froth Flotation: A Century of Innovation*, Society for Mining Metallurgy and Exploration,
- Gardner, J.R., Woods, R., 1977, The hydrophilic nature of gold and platinum, *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 81, 2, 285-290.
- Gökçen, H., Oluklulu, S., Bozkurt, V., Uçbaş, Y., 2019, The Effect of Dry and Wet Grinding on Gold Ore Flotation, 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya, Turkey, 1010-1016.
- Gul, A., Kangal, O., Sirkeci, A.A., Onal, G., 2012, Beneficiation of the gold bearing ore by gravity and flotation, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 19, 2, 106-110.
- Gupta, A.K., Banerjee, P.K., Mishra, A., 2007, Effect of frothers on foamability, foam stability, and bubble size, *Coal Preparation*, 27, 1-3, 107-125.
- Harris, D.C., 1990, The Mineralogy of Gold and Its Relevance to Gold Recoveries, *Mineralium Deposita*, 25, 1, 3-7.
- Hayes, R.A., Price, D.M., Ralston, J., Smith, R.W., 1987, Collectorless Flotation of Sulphide Minerals, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2, 3, 203-234.
- Hayes, R.A., Ralston, J., 1988, The collectorless flotation and separation of sulphide minerals by Eh control, *International Journal of Mineral Processing*, 23, 1-2, 55-84.
- Hintikka, V.V., Leppinen, J.O., 1995, Potential control in the flotation of sulphide minerals and precious metals, *Minerals Engineering*, 8, 10, 1151-1158.
- Holder, R., 2013, Optimisation of processing at the Beaconsfield gold mine, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 121, 4, 190-198.
- Kelebek, S., Tukul, C., 1999, The effect of sodium metabisulfite and triethylenetetramine system on pentlandite-pyrrhotite separation, *International Journal of Mineral Processing*, 57, 2, 135-152.
- King, R.P., 2001, *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Butterworth-Heinemann,
- Klimpel, R.R., 1995, The Influence of Frother Structure on Industrial Coal Flotation, *SME*,
- Klimpel, R.R., 1997, An Approach to the Flotation of Complex Gold Ores Containing Some Free Gold and/or Some Gold Associated with Easily Floatable Sulphide Minerals, *World Gold*, 109-113.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Klimpel, R.R., 1999, Industrial experiences in the evaluation of various flotation reagent schemes for the recovery of gold, *Minerals & Metallurgical Processing*, 16, 1, 1-11.
- Kydros, K.A., Angelidis, T.N., Matis, K.A., 1993, Selective Flotation of an Auriferous Bulk Pyrite - Arsenopyrite Concentrate in Presence of Sodium Sulphoxy Salts, *Minerals Engineering*, 6, 12, 1257-1264.
- La Brooy, S.R., Linge, H.G., Walker, G.S., 1994, Review of gold extraction from ores, *Minerals Engineering*, 7, 10, 1213-1241.
- Laplante, A., Gray, S., 2005, Advances in gravity gold technology, *Developments in Mineral Processing*, 15, 280-307.
- Leppinen, J.O., Yoon, R.H., Mielczarski, J.A., 1991, FT-IR studies of ethyl xanthate adsorption on gold, silver and gold—silver alloys, *Colloids and Surfaces*, 61, 189-203.
- Lins, F.F., Adamian, R., 1993, The Influence of Some Physical Variables on Gold Flotation, *Minerals Engineering*, 6, 3, 267-277.
- Liu, Y., Liu, Q., 2004, Flotation separation of carbonate from sulfide minerals, I: flotation of single minerals and mineral mixtures, *Minerals Engineering*, 17, 7-8, 855-863.
- Ma, X., Bruckard, W.J., 2009, Rejection of arsenic minerals in sulfide flotation - A literature review, *International Journal of Mineral Processing*, 93, 2, 89-94.
- Manlapig, E.S.V., Vargas, A.P., 2000, Collectorless flotation, *Uluslararası Patent*, WO/2000/015346.
- Marsden, J., House, I., 2006, *The chemistry of gold extraction*, SME,
- McGrath, T.D.H., 2014, *A study of the behaviour of free gold in flash flotation and gravity recovery*, Curtin University, PhD.
- MDO, 2019a, Carlin Complex, <https://miningdataonline.com/property/2967/Carlin-Complex.aspx>, Erişim Tarihi: 30.09.2019
- MDO, 2019b, Lone Tree Mine, <https://miningdataonline.com/property/2987/Lone-Tree-Mine.aspx>, Erişim Tarihi: 30.09.2019
- Monte, M.B.M., Lins, F.F., Oliveira, J.F., 1997, Selective flotation of gold from pyrite under oxidizing conditions, *International Journal of Mineral Processing*, 51, 1-4, 255-267.
- Nagaraj, D.R., Brinen, J.S., Farinato, R.S., Lee, J., 1992, A Study of the Interaction of Di-P-Cresyl Monothiophosphate with Noble-Metals Using Electrochemical, Wetting, and Spectroscopic Methods, *Langmuir*, 8, 8, 1943-1949.
- Newcombe, B., Wightman, E., Bradshaw, D., 2013, The role of a flash flotation circuit in an industrial refractory gold concentrator, *Minerals Engineering*, 53, 57-73.
- Nguyen, A., Schulze, H.J., 2003, *Colloidal science of flotation*, CRC Press,
- O'Connor, C.T., Botha, C., Walls, M.J., Dunne, R.C., 1988, The role of copper sulphate in pyrite flotation, *Minerals Engineering*, 1, 3, 203-212.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- O'Connor, C.T., Dunne, R.C., 1994, The flotation of gold bearing ores — A review, *Minerals Engineering*, 7, 7, 839-849.
- Oluklulu, S., Gökçen, H., Bozkurt, V., Uçbaşı, Y., 2019, Collectorless Flotation Approach to a Low Grade Gold Ore, 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya, Turkey, 779-786.
- Orlich, J., Gathje, J., Kappes, R., 2009, The application of froth flotation for gold recovery at Newmont Mining Corporation, *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design*,
- Owusu, C., Brito e Abreu, S., Skinner, W., Addai-Mensah, J., Zanin, M., 2014, The influence of pyrite content on the flotation of chalcopyrite/pyrite mixtures, *Minerals Engineering*, 55, 87-95.
- Polat, M., Chander, S., 2000, First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of notation rate constants, *International Journal of Mineral Processing*, 58, 1-4, 145-166.
- Poulsen, K.H., Robert, F., Dubé, B., 2000, Geological classification of Canadian gold deposits, *Geological Survey of Canada*, 540, 1-106.
- Rowe, R.R., Zhou, X., 2007, Models and exploration methods for major gold deposit types, *Proceedings of Exploration*, 691-711.
- Sadeghi, M., Hodouin, D., Bazin, C., 2018, Mineral processing plant data reconciliation including mineral mass balance constraints, *Minerals Engineering*, 123, 117-127.
- Schaefer, H.U., 2001, Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals, *Minerals Engineering*, 14, 10, 1155-1160.
- Schwartz, G.M., 1944, The Host Minerals of Native Gold, *Economic Geology*, 39, 6, 371-411.
- Seke, M.D., 2006, Optimisation of the selective flotation of galena and sphalerite at Rosh Pinah mine, University of Pretoria,
- Seke, M.D., Pistorius, P.C., 2006, Effect of cuprous cyanide, dry and wet milling on the selective flotation of galena and sphalerite, *Minerals Engineering*, 19, 1, 1-11.
- Sen, S., Seyrankaya, A., Cilingir, Y., 2005, Coal–oil assisted flotation for the gold recovery, *Minerals Engineering*, 18, 11, 1086-1092.
- Senior, G.D., Trahar, W.J., 1991, The Influence of Metal-Hydroxides and Collector on the Flotation of Chalcopyrite, *International Journal of Mineral Processing*, 33, 1-4, 321-341.
- Small, G., Michelmore, A., Grano, S., 2003, Size dependent gold deportment in the products of copper flotation and methods to increase gold recovery, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 103, 9, 573-579.
- Smith, T., 1980, The Hydrophilic Nature of a Clean Gold Surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, 75, 1, 51-55.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tabatabaei, R.H., Nagaraj, D.R., Vianna, S.M.S.M., Napier-Munn, T.J., Gorain, B., 2014, The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores, *Minerals Engineering*, 60, 26-32.
- Taggart, A.F., Behre, H.A., 1945, *Handbook of mineral dressing, ores and industrial minerals*, John Wiley & Sons,
- Teague, A.J., Van Deventer, J.S.J., Swaminathan, C., 1999a, A conceptual model for gold flotation, *Minerals Engineering*, 12, 9, 1001-1019.
- Teague, A.J., Van Deventer, J.S.J., Swaminathan, C., 1999b, The effect of galvanic interaction on the behaviour of free and refractory gold during froth flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 57, 4, 243-263.
- Tokcan, I., 2017, Farklı öğütme koşullarının kurşun-çinko flotasyonu üzerindeki etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, PhD.
- 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., 1983, A laboratory study of the influence of sodium sulphide and oxygen on the collectorless flotation of chalcopyrite, *International Journal of Mineral Processing*, 11, 1, 57-74.
- Valderrama, L., Rubio, J., 1998, High intensity conditioning and the carrier flotation of gold fine particles, *International Journal of Mineral Processing*, 52, 4, 273-285.
- Wellmer, F.-W., Dalheimer, M., Wagner, M., 2007, *Economic evaluations in exploration*, Springer Science & Business Media,
- Whiten, B., 2007, Calculation of Mineral Composition from Chemical Assays, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 29, 2, 83-97.
- Williams, C., Peng, Y., Dunne, R., 2013, Eucalyptus oils as green collectors in gold flotation, *Minerals Engineering*, 42, 62-67.
- Wills, B.A., Napier-Munn, T.J., 2006, *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Elsevier,
- Woodcock, F., Sparrow, G.J., Bruckard, W.J., N.W., J., Dunne, R., 2007, *Plant Practice: Sulfide Minerals and Precious Metals*, M.C. Feurstenau, G. Jameson and R. Yoon (Ed.), *Froth flotation : A century of innovation*, SME, p.781-837.
- Woods, R., Basilio, C.I., Kim, D.S., Yoon, R.H., 1994, Chemisorption of ethyl xanthate on silver—gold alloys, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 83, 1, 1-7.
- Woods, R., Kim, D.S., Basilio, C.I., Yoon, R.H., 1995, A Spectroelectrochemical Study of Chemisorption of Ethyl Xanthate on Gold, *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 94, 1, 67-74.
- Yannopoulos, J.C., 1991, *The Extractive Metallurgy of Gold*, Springer Science & Business Media,

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Zanin, M., Lambert, H., du Plessis, C.A., 2019, Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review, *Minerals Engineering*, 143, 105922.
- 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, 2-3, 187-201.
- Zheng, X., Manton, P., 2010, A potential application of collectorless flotation in a copper/gold operation, *Minerals Engineering*, 23, 11-13, 895-902.
- Zhou, J., Jago, B., Martin, C., 2004, Establishing the process mineralogy of gold ores, *Technical Bulletin*,

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Ad, Soyad: Semih Oluklulu  
Ünvanı: Araştırma Görevlisi  
Birimi: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,  
Maden Mühendisliği Bölümü  
Doğum Yeri: Eskişehir  
E-Posta: soluklulu@ogu.edu.tr

## ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği	2005-2011
Yüksek Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği / Cevher Hazırlama	2011-2014
Doktora	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği / Cevher Hazırlama	2014-2020

## BİLİMSEL ÇALIŞMALAR

### Tezler

Yüksek Lisans Çayırhan Bölgesi Linyitleri Kullanılarak Multi-Gravite Separetörü Çalışma Parametrelerinin İstatistiksel Yöntemle Değerlendirilmesi (2014)

Doktora İşlem Parametrelerinin Altın Flotasyonu Üzerine Etkilerinin İncelenmesi (2020)

### Projeler

1. Farklı Tipteki Altın Cevherlerinin Flotasyon Davranışlarının Belirlenmesi, BAP, Araştırmacı, 2019

2. Boyanın Reolojik Davranışı Üzerine Dolgu Hammaddeleri Özelliklerinin ve Miktarının Etkisi, Özel Kuruluşlarla Gerçekleştirilen Projeler, Araştırmacı, 2017
3. Çayırhan Bölgesi Linyitlerinin Fiziksel, Fizikokimyasal ve Biyolojik Yöntemlerle Temizlenebilirliğinin Araştırılması, BAP, Araştırmacı, 2013

#### **Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler**

1. Oluklulu, S., Koca, S., 2018, Tam Faktöriyel Tasarımın MGS ile Kömür Zenginleştirmeye Uygulanması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(3), 117-122. Doi: 10.31796/ogummf.426696
2. Oluklulu, S., Koca, S., 2018, Modeling some of the operational parameters of MGS for lignite cleaning by full factorial design methodology. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 40(12), 1520-1531. Doi: 10.1080/15567036.2018.1477878
3. Koca, S., Öz Aksoy, D., Çabuk, A., Aytar, P., Sağol, E., Toptaş, Y., Oluklulu, S., Koca, H., 2017, Evaluation of combined lignite cleaning processes, flotation and microbial treatment, and its modelling by Box Behnken methodology. Fuel, 192, 178-186. Doi: 10.1016/j.fuel.2016.12.015

#### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler**

1. Oluklulu S., Gökçen, H.S., Bozkurt, M.M.V., Uçbaş, Y., 2019, Collectorless Flotation Approach to a Low Grade Gold Ore. 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 779-786.
2. Gökçen, H.S., Oluklulu S., Bozkurt, M.M.V., Uçbaş, Y., 2019, The Effect of Dry and Wet Grinding on Gold Ore Flotation. 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 1012-1016.
3. Toptaş, Y., Aytar, P., Öz Aksoy, D., Oluklulu, S., Çabuk, A., Koca, S., Koca H., 2015, Biological and physical cleaning of Çayırhan lignites, VI. International Conference on Environmental, Industrial and Applied Microbiology, Barcelona, p.482.
4. Toptaş, Y., Aytar, P., Öz Aksoy, D., Oluklulu, S., Çabuk, A., Koca, S., Koca H., 2015, Investigation of Çayırhan lignite biodesulphurization of microorganisms isolated from coal itself, VI. International Conference on Environmental, Industrial and Applied Microbiology, Barcelona, p.513.

5. Aytar, P., Toptaş, Y., Sağol, E., Oluklulu, S., Öz Aksoy, D., S., Çabuk, A., Koca, S, Koca, H., 2013, Bidesulphurization as a Complement to Floatation for Cleaning Coal. 17th International Coal Preparation Congress, p.413
6. Öz Aksoy, D., Koca S., Oluklulu, S., Koca, H., 2012, Seperation of Unburned Carbon From Seyitomer Power Plant Bottom Ashes, 16th Conference on Environment and Mineral Processing, Ostrava, p.223.