



## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ş. Beste AYDIN<sup>1,\*</sup>, Deniz AYDIN<sup>2</sup>, Alim GÜL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
<sup>2</sup>Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

### ÖZET

Bu çalışma kapsamında refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinin zenginleştirilmesinde çevreye daha dost proseslerden olan flotasyon yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Çanakkale-Serçeler bölgesinden temin edilen 18,85 ppm Au ve 120 ppm Ag içeren numune üzerinde gerçekleştirilen flotasyon çalışmalarına göre, -74 µm tane boyutunda, kaba devrede 1000+1000 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 kullanımı ve 2 kademeli temizleme devresi ile konsantride %75,8 verim ile 625 ppm Au, %86,5 verim ile 4833 ppm Ag elde edilmiştir. Kaba devrede 1500+1500 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 kullanımı ve 3 kademeli temizleme devresi ile ise konsantride %69,6 verim ile 1026,5 ppm Au, %80,6 verim ile 8058,1 ppm Ag elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinden flotasyon yöntemi ile doğrudan izabaya gönderilebilecek nitelikte bir konsantride elde edilebileceği belirlenmiştir. Flotasyon kinetiği ile ilgili çalışmalarda ikinci derece kinetik modelinin bu cevher için uygulanabilir olduğu ve ikinci dereceden flotasyon kinetik sabitleri göz önüne alındığında, gümüşün altına göre 2,5 kat daha fazla flotasyon hızına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri, Flotasyon, Flotasyon kinetiği

## INVESTIGATION OF FLOTATION BEHAVIOR OF NON-REFRACTORY SULPHIDE GOLD-SILVER ORE

### ABSTRACT

In this study, the applicability of the flotation method, which is one of the more environmentally friendly processes, was investigated in the enrichment of non-refractory sulphide gold ore. According to the flotation tests carried out on the sample obtained from Çanakkale-Serçeler region and contained 18.85 ppm Au and 120 ppm Ag, at -74 µm particle size, with the use of Aerophine 3418 A+Aero 208 of 1000 + 1000 g/t in rougher circuit and with applying two stages cleaning circuit, the flotation concentrate assayed as 625 ppm Au and 4833 ppm Ag was obtained with recoveries of 75.8% and 86.5%, respectively. In addition, using 1500+1500 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 in rougher circuit and following 3-stage cleaning circuit, 1026.5 ppm Au with recovery of 69.6% and 8058.1 ppm Ag with recovery of 80.6% were obtained in concentrate. Considering these results, it was determined that a concentrate that could be sent directly to the smelter from the non-refractory sulphide gold ore can be produced by the flotation method. In studies related to flotation kinetics, it was concluded that the second order kinetic model is applicable for this ore and, considering the second order flotation kinetic constants, silver has a 2.5 times higher flotation rate than gold.

**Keywords:** Non-refractory sulphide gold-silver ore, Flotation, Flotation kinetic

### 1. GİRİŞ

Flotasyon yönteminin altın madenciliğindeki uygulaması 1930'lu yıllarda suda çözünen ksantat ve dithiofosfat gibi flotasyon kollektörlerinin bulunması ile başlamıştır [1]. Bundan önce Kanada, Avustralya ve Kore'de yer alan birkaç altın madeninde

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: beste.aydin@itu.edu.tr

Geliş / Received: 26.02.2020 Kabul / Accepted: 29.06.2020 doi: 10.28948/ngumuh.693562

kompleks ve refrakter altın cevherinin kazanılmasında ilk aşamada flotasyon yöntemi uygulanmaktaydı. Bu tesislerde, flotasyon kollektörü olarak yağlar kullanılarak düşük içerikli kaba altın konsantreleri üretilmekteydi. Kanada, 1960'ların sonuna kadar ikinci büyük altın üreticisiydi ve ürettiği altının büyük çoğunluğu kompleks, refrakter ve bakır-altın cevherlerinin flotasyonu ile elde edilmekteydi [2]. 1980'lerde ve 1990'larda Avustralya, Afrika ve Amerika'da yeni imkânların yaratılması ile altın üretiminde büyük artışlar meydana gelmiştir. O zamanlardan beri flotasyon ile altın kazanımı için kullanılabilir selektif flotasyon kollektörleri ile ilgili araştırmalar önem kazanmıştır [3, 4]. Ancak yine de, baz metal içeren cevherlerin flotasyon davranışları hakkında çok fazla bilgi olmasına rağmen, altın- gümüş içeren cevherlerin flotasyon davranışları ile ilgili rapor edilen araştırmalar sınırlıdır.

Serbest haldeki altının flotasyon verimi, köpük kararlılığı ve altın tanelerinin şekil, boyut gibi fiziksel özelliklerinden etkilenmektedir. Reaktif türü ve pül pH'ı ise kimyasal açıdan flotasyona etki etmektedir [5, 6].

Flotasyonda önemli bir parametre olan tane boyutu, altının yüksek yoğunluğundan dolayı daha fazla önem taşımakta ve altın flotasyonu için 10-200 µm arasında olmaktadır. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda 3 µm tane boyutunda flotasyon yapılabilirse de, endüstriyel ölçekli uygulamalarda 10 µm'dan daha düşük tane boyutlarında flotasyon verimi hızlı bir şekilde azalmaktadır [7, 8].

Altın flotasyonunda, pH düzenleyici olarak genellikle kireç ve sülfürik asit tercih edilmektedir. Altın flotasyonunda pH değerinin seçimi birçok faktöre bağlıdır. pH seçiminde genellikle cevherdeki sülfürlü ve silikatlı gang bileşenlerinin miktarı ve türü dikkate alınmaktadır. Kil mineralleri pH 5-9 arasında yüzebildiğinden, cevher içerisinde bu minerallerin bulunması durumunda, bu pH aralığının dışında bir pH değeri seçilmektedir. Arsenopirit ve pirit içeren sülfürlü altın cevherlerinin flotasyonunda pH aralığı 7-9 arasında olmaktadır. Pahalı gang bastırıcılarının kullanımından kaçınmak için daha yüksek pH değerlerinde de flotasyon gerçekleştirilebilmektedir [2].

Altın flotasyonunda dithiofosfatlar ikincil kollektör olarak kullanılmaktadırlar. Aero 208, altın flotasyonunda etkili bir kollektör olarak bilinmektedir. Genellikle altın için selektif olmayan dithiofosforik asitler belirli koşullar altında altın yüzeyine adsorplanmaktadır. Monothiofosfatlar yüksek gümüş içerikli altın için iyi bir selektiflik sağlamaktadır ve bazı sülfürlü cevherlerden altın kazanılmasında kullanılmaktadır [9]. Merkaptanlar asidik ortamda piritte bağlı altın ve altın flotasyonunda tercih edilen kollektörlerdir. Oksitlenmiş veya kısmen oksitlenmiş piritik altın cevherlerinin flotasyonunda kullanılmaktadır [2]. Altın flotasyonunda ikincil kollektör olarak bilinen Aero 208, Aero 3477, Aero 407, Aero 412 ve Aerophine 3418 A kollektörlerinin yanısıra Aero Maxgold 900 serisi kollektörlerde serbest haldeki ve demir sülfürlere bağlı altının kazanılmasında kullanılmaktadır. Gümüş flotasyonunda ise Aerofloat 242 ve Aerophine 3418 A, Aero 6931, Aero MX-950 ve Aero MX-6205 gibi kollektörler tercih edilmektedir [10].

Serbest altının flotasyonunda köpüğün dayanıklılığı ve stabilitesi önemlidir. Çoğu altın tesisinde bir veya diğer köpürtücülerle kombinasyon halinde poliglikol eter bazlı köpürtücüler tercih edilmektedir. Bunun nedeni, poliglikol köpürtücüler ile diğer köpürtücülere kıyasla daha kararlı köpük elde edilebilmesidir [11]. Selektif bir altın flotasyonunda metil izobütil karbinol (MIBC) gibi daha zayıf bir köpürtücü kullanılabilir. Genel olarak, glükol veya polipropilen glükol metil eter köpürtücüleri bu uygulama için idealdir [12]. Köpürtücü karışımları Avustralya'daki altın tesislerinde üzerinde geniş kabul görmüş olup, bu uygulamadaki esas reaktif alkil aril esterlerdir [13].

Gümüş genellikle bakır ve kurşun sülfürler ile konsantre edilme eğilimi göstermektedir. Gümüş flotasyonunda Aerofloat 242 ve Aerophine 3418 A en çok tercih edilen kollektörlerdir. Aero 6931, Aero MX-950 ve Aero MX-6205 kollektörleri bakır sülfürlere bağlı gümüşün kazanılmasında etkili olmaktadır. Gümüşlü galenin flotasyonunda ise Aero 6931 ve Aerophine 3418 A kollektörleri kullanılmaktadır. Gümüş; sfalerit, arsenopirit ve piritte bağlı olarak bulunabilmektedir. Arjantit ( $Ag_2S$ ), polibazit ( $8Ag_2S.Sb_2S_3$ ), prüstit ( $Ag_3AsS_3$ ), pirarjirit ( $Ag_3SbS_3$ ), stefanit ( $5Ag_2S.Sb_2S$ ) ve tetrahedrit ( $Cu_{12}Sb_4S_{13}$ ) gibi gümüş sülfürler ve gümüş-antimuan-arsenik sülfürler, flotasyon yöntemi ile kazanılabilmektedir. Sodyum sülfür, kireç, kostik soda ve nişasta gibi düzenleyici maddeler gümüşün bastırılmasına neden olmaktadır. Gümüş cevheri, baz metal sülfürlerden çok az miktarda içerdiği zaman sülfürlü cevherlerin toplu flotasyonu maksimum gümüş verimi için en iyi sonuçları vermektedir. Cevher içerisindeki gümüşün pirit, pirotin, arsenopirit ve çinko sülfürlere bağlı olması durumunda, bu minerallerin aktive olması için bakır sülfat ilave edilmesi gerekmektedir. Bu cevher türleri için, dithiofosfatların, Aerofloat 242 ve Aero 3477 gibi kollektörlerin, ksantatlara göre daha az miktarlarda kullanımı yeterli olmaktadır. Aerophine 3418 A kollektörü tek başına ya da ksantatlar ile beraber kullanılabilir. Aero MX-950 ve Aero XD-5002 kollektörleri ise gang minerallerine bağlı gümüşün kazanılmasında etkili olmaktadır. Serüzit, malakit, kuprit ve kerarjirit gibi oksit minerallerine bağlı olan gümüşün yüzdürülebilmesi için flotasyon işleminden önce sülfürleme işlemi yapılması gerekmektedir. Sülfürleme işleminden sonra bu mineraller Aero 407 ve Aero 7151 gibi kollektörlerle rahatlıkla yüzdürülebilir [10].

Son yüzyılda altın kazanımında etkin olarak siyanür liçi yöntemi tercih edilmektedir. Altın-gümüş içeren cevherler, özellikle sülfürlü olanlar genellikle siyanür liçinden önce flotasyon işlemine tabi tutulur. Flotasyon ile elde edilen düşük altın içerikli konsantre doğrudan izabeye gönderilemediği için siyanür liçi devresine gönderilmektedir. Bu çalışmanın amacı, refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinin flotasyon davranışını inceleyerek sadece flotasyon yöntemi ile doğrudan izabeye gönderilebilecek konsantre elde edebilmektir.

## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

## 2. MALZEME VE METOT

## 2.1. Malzeme

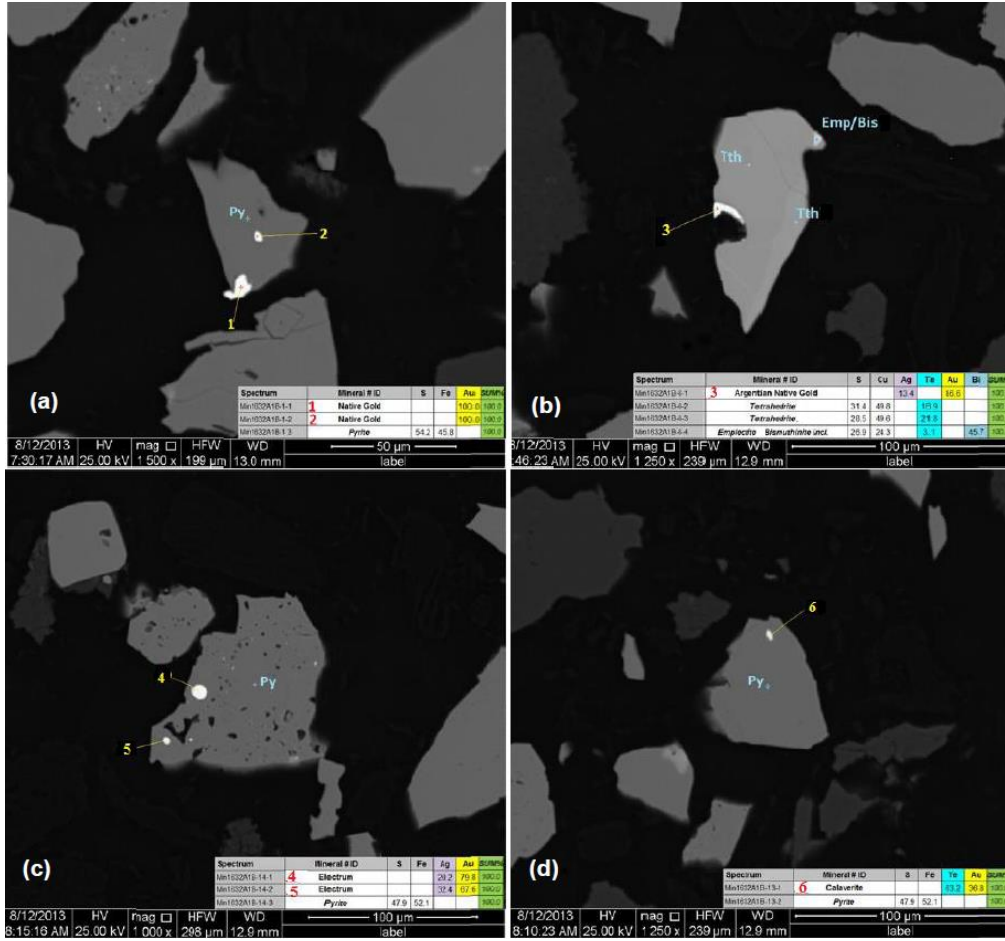
Çanakkale-Serçeler bölgesinden tedarik edilen cevher numunesi sırasıyla çeneli, konili ve merdaneli kırıcıdan geçirilerek tamamı kontrollü olarak 2 mm altına indirilmiştir. Temsili numune üzerinde kimyasal ve mineralojik analizler ALS (Australian Laboratory Services) laboratuvarlarında yapılmıştır. Tablo 1’de gösterilen kimyasal analiz sonuçlarına göre, numune 18,85 ppm Au ve 120 ppm Ag içermektedir. Parlak kesitler üzerinde QEMSCAN (taramalı elektron mikroskobu) cihazı ile mineralojik analizler gerçekleştirilmiştir. Numunenin QEMSCAN görüntüleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Çanakkale-Serçeler bölgesine ait numunenin kimyasal analiz sonuçları.

Element	İçerik (ppm)	Element	İçerik (%)
Au	18,85	Al	1,04
Ag	120	Ca	0,05
As	137,5	Fe	3,51
Bi	511	K	0,03
Zn	79	Mg	0,02
Co	41,8	Na	0,01
Cu	182	S	0,8
Se	51	Si	41
Te	7,3	Ti	<0,005

Mineralojik analiz sonuçlarına göre, numune içerisinde yaygın olan mineraller pirit ve kuvars, geriye kalan ise kaolinitir. Numune içerisinde oldukça serbestleşmiş pirit taneleri, tetrahedrit, tennantit ve daha az oranda sülfürler ile kükürt tuzları bulunmaktadır. Cevher içerisindeki piritin ortalama tane boyutu 50 µm, tetrahedritin ortalama tane boyutu 27 µm ve sülfürlerin ortalama tane boyutu ise 23 µm olarak belirlenmiştir.

Altının çoğunluğu nabit altın ve elektrum olarak bulunmaktadır. Mineral Serbestleşme Analiz (Mineral Liberation Analyzer-MLA) cihazı ile altının tane boyutunun 19-0,62 µm arasında değiştiği,  $d_{80}$  boyutunun 16,18 µm ve  $d_{50}$  boyutunun ise 12,54 µm olduğu belirlenmiştir. Gümüş geniş olarak klorarjirit ve az miktarda arjantitten oluşmaktadır. Klorarjiritin tane boyutları 75-0,87 µm arasında değişirken  $d_{80}$  boyutu 68,43 µm, arjantitin tane boyutları 13,5-0,87 µm arasında değişirken  $d_{80}$  boyutu ise 9,05 µm olmaktadır. Altın ve gümüş mineralleri çoğunlukla piritte bağlıdır. Geriye kalan altın ve gümüş taneleri kuvarsa, kaolinite, demir sülfürlere ve demir hidroksitlere bağlı bulunmaktadır. Tanımlanan demirin büyük bir kısmı pirit olarak yer almaktadır. Geriye kalan demir ise Fe-Ti oksitleri içinde kapanım halindedir. Kükürdün neredeyse tamamı (%99) piritte, çok az kısmı da diğer sülfürler ve sülfatlar içerisinde bulunur. Numunedeki altın ve gümüş oluşumları nabit altın (%95-100 Au ve %0-5 Ag), gümüşlü nabit altın (%80-95 Au ve %5-15 Ag), elektrum (%20-80 Au ve %20-80 Ag), kalaverit ( $AuTe_2$ , %~37 Au), klorarjirit (AgCl), arjantit ( $Ag_2S$ ) ve jalpaite-proustite ( $Ag_3CuS_2-Ag_3AsS_3$ ) olarak gözlenmiştir.



Şekil 1. Çanakkale-Serçeler Bölgesine ait numunenin QEMSCAN görüntüleri (a) 1- nabit altın, 2-nabit altın (b) 3-gümüşlü nabit altın (c) 4-elektrum, 5-elektrum (d) 6-kalaverit.

## 2.2. Metot

Flotasyon deneylerinde doğrudan izabeye gidebilecek nitelikte altın ve gümüş içeren konsantrite üretmek için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneylerde tane boyutunun, kademe sayısının, kollektör türü ve miktarının etkisi incelenmiştir. En uygun koşullar değerlendirilerek, yüksek altın ve gümüş içerikli konsantrite elde etmek için çok kademeli temizleme devreli flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerinde kullanılacak malzeme %60 pülpte katı oranında bilyalı değirmende öğütülerek hazırlanmıştır. Flotasyon deneyleri, Denver marka D 12 model laboratuvar tipi flotasyon makinasında yapılmıştır. Deneyler, %30 pülpte katı oranında, 1 kg malzeme ile 2,5 L'lik flotasyon hücrelerinde 1500 dev/dk karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan bastırıcı reaktif ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) %10'luk, kollektörler ve köpürtücüler ise %1'lik derişimde hazırlanmıştır. Aerophine 3418 A, Aero 208, ATP (amino tiyo fenol), KAX (potasyum amil ksantat) kollektör olarak, MIBC (metil izobutil karbinol) ise köpürtücü olarak kullanılmıştır. Silikat bastırıcı olarak kullanılan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ilk kademe ilave edildikten sonra pülp 10 dk kondüsyonlanmaktadır. Her kademe için pülpün kollektörler ile kondüsyonlanma süresi ve flotasyon süresi 3'er dk'dır. Flotasyon hücresine beslenen pülpün doğal pH'sı 6,5-7,0 arasındadır.

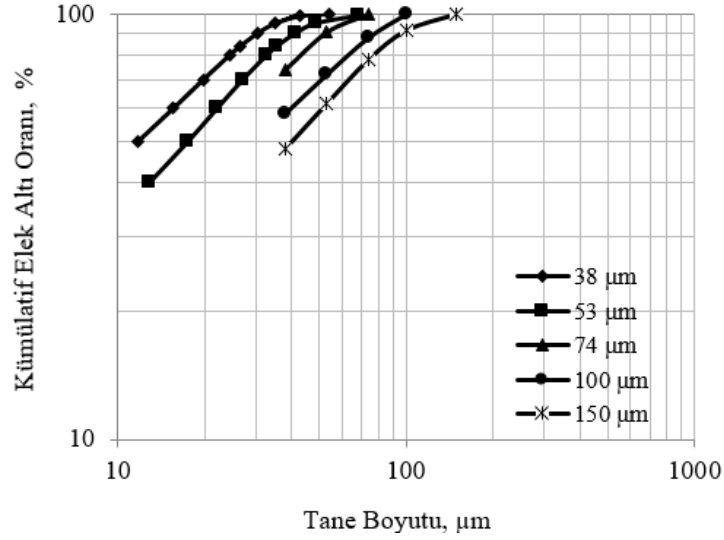
## 3. BULGULAR ve TARTIŞMALAR

### 3.1. Tane Boyutunun Etkisi

Tane boyutunun etkisini inceleyebilmek için malzemenin tamamı 150, 100, 74, 53 ve 38  $\mu\text{m}$  altına öğütülmüştür. 150  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  ve 74  $\mu\text{m}$  boyut altındaki malzemenin boyut dağılımını belirlemek için ASTM (ASTM-Amerikan Society for Testing and Materials) standartlarına göre elekler kullanılırken, 53  $\mu\text{m}$  ve 38  $\mu\text{m}$  boyut altındaki malzemenin boyut dağılımını belirlemek

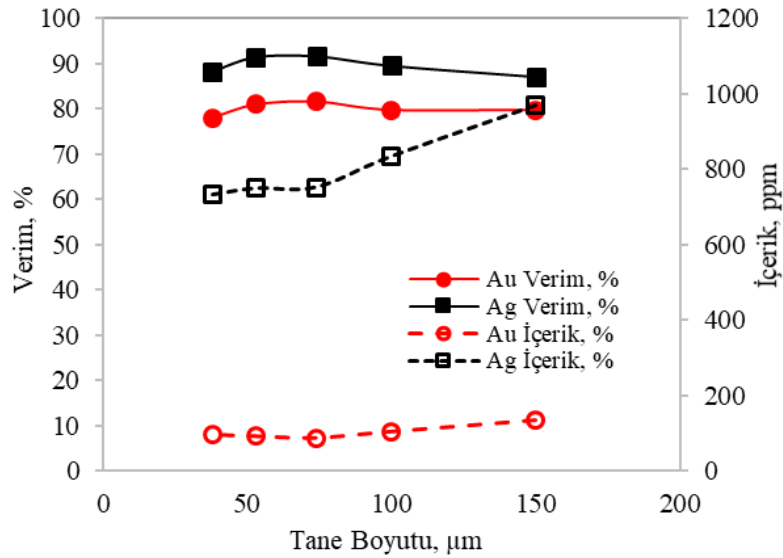
## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

için ise partikül boyut cihazı (Malvern Mastersizer) kullanılmıştır. Şekil 2’de, elde edilen veriler ile çizilen log-log eksenli kümülatif elek altı eğrileri gösterilmiştir. Öğütme sonrasında, pH 4,5-5,0 ‘de gerçekleştirilen dört kademeli flotasyon deneylerinde 1000 g/t  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 250+250 g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 (Her iki kollektör 50+50+50+100 g/t olarak ilave edilmiştir), 50 g/t MIBC (20+10+10+10 g/t) kullanılmıştır. Her kademe için flotasyon süresi 3 dk’dır. Tane boyutunun etkisinin incelendiği flotasyon deneylerinin sonuçları Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 2. Öğütme sonucunda elde edilen malzemelerin tane boyut dağılımı.

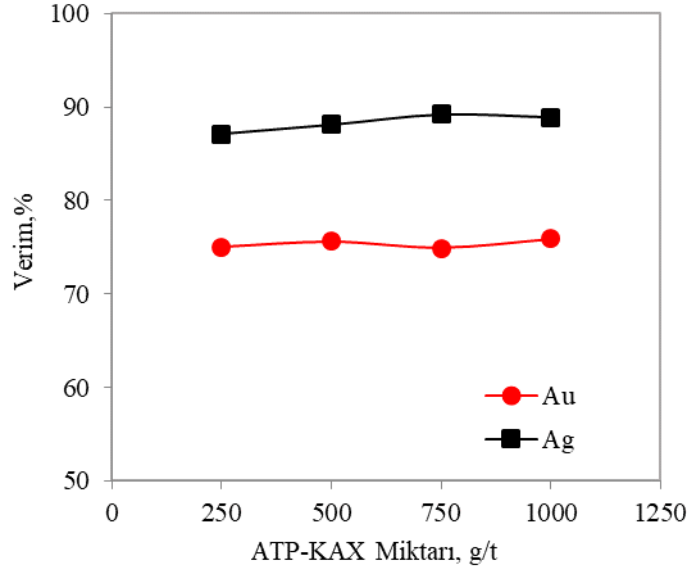
Tane boyutunun etkisinin incelendiği deneylerde, tane boyutu küçüldükçe konsantradaki altın ve gümüş kazanma verimlerinde çok önemli artışlar görülmektedir. Ancak 38 µm tane boyutu ile yapılan deneyde, altın ve gümüş verimlerinde düşüşler gözlenmiştir. İnce boyutlarda, bazı durumlarda şlam oluşumu kontrol edilerek altın kazanımının sağlanmasına rağmen, gang bileşenlerinin de flotasyonu sebebiyle altının selektivitesinin azaldığı bilinmektedir [14]. Cevher numunesi kaolinit ve kuvars ağırlıklı olduğundan, uzun süreli öğütme muhtemelen şlam etkisi yaratarak altın ve gümüş verimlerinde az miktarda düşüslere sebep olmuştur. Beş farklı boyut ile yapılan deneylere göre, %81,7 Au ve %91,7 Ag verimleri ile en uygun boyut -74 µm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Tane boyutunun etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları

### 3.2. Kollektör Cins ve Miktarının Etkisi

Kollektör cins ve miktarlarının etkisinin incelendiği deneylerde, ATP-KAX ve Aerophine 3418 A-Aero 208 kollektör kombinasyonlarının ayrı ayrı kullanımının flotasyona etkisi araştırılmıştır. pH 6,5-7,0'de (doğal) -74 µm tane boyutunda, 1000 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve 50 g/t MIBC (20+10+10+10 g/t) ilave edilerek, 4 kademe gerçekleştirilen deneylerde, ATP+KAX kollektörlerinden 250+250 g/t (100+50+50+50 g/t), 500+500 g/t (200+100+100+100 g/t), 750+750 g/t (300+150+150+150 g/t), 1000+1000 g/t (400+200+200+200 g/t) kullanılmıştır. Flotasyon süreleri her kademe için 3 dk'dır. Deney sonuçları, Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. ATP-KAX miktarının etkisi.

ATP+KAX kollektörleri ile gerçekleşen deneylerin sonuçları incelendiğinde, kollektör miktarının artırılmasının altın ve gümüş verimleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. 250 g/t ATP+KAX kullanımı ile %75,1 Au ve %87,1 Ag verimleri elde edilirken, kollektör miktarları 1000 g/t'a çıkarıldığında ise altın verimi %75,7'ye, gümüş verimi ise %88,8'e ulaşmıştır.

Fenilmerkaptan olarak adlandırılan ATP (Aminotiyofenol-C<sub>6</sub>H<sub>7</sub>NS) yapı olarak fenole benzer olan aromatik tiyol bileşiğidir. Fenollerden farkı, aromatik zincire hidroksil grupların (-OH) yerine sülfhidril (-SH) grupların bağlı olmasıdır. Özellikle oksitli kurşun-çinko minerallerinin flotasyonunda kullanılan ATP'nin oksitli kurşun ve demir minerallerine bağlı bulunan nabit altın, nabit gümüş ve elektrum gibi altın ve gümüş minerallerinin flotasyonundaki etkisi Acarkan ve vd. (2011) [15] tarafından ortaya konulmuştur. ATP-KAX kombinasyonu ile yaptıkları çalışmada, %52,5 verim ile 235 ppm altın ve %37,6 verim ile 3740 ppm gümüş konsantrasyonu elde edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, elde edilen %75 altın ve %87 gümüş verimleri ile ATP-KAX kombinasyonunun sülfürlü demir minerallerine bağlı olan altın ve gümüşün flotasyonunda daha etkili olduğu sonucuna varılmaktadır. Sonuçlara benzer olarak, O'Connor ve Dunne (1991) [16] tarafından yapılan çalışmada da asidik ortamda merkaptanların pirite bağlı altının ve diğer altın minerallerinin flotasyonunda tercih edilebileceği belirtilmiştir.

ATP+KAX kollektörlerinin kullanım miktarlarındaki değişimin, altın ve gümüş kazanımında herhangi bir artışa sebep olmamasından dolayı ortamda okside olmuş altın yüzeylerinin olabileceği düşünülmüştür. Mendiratta (2000) tarafından yapılan çalışmada, dönüşümlü voltmetri kullanılarak 10<sup>-4</sup> M Na<sub>2</sub>S çözeltisindeki altının yüzeyinde polisülfürler (S<sub>x+1</sub><sup>-2</sup>) belirlenmiştir. Flotasyon ortamına ilave edilen Na<sub>2</sub>S yüzeydeki oksidasyon ürünlerini uzaklaştırarak, oluşan polisülfürler ile altın yüzeyini hava sever hale getirmiştir [17]. Okside olmuş altın yüzeylerinin varlığını saptayabilmek için deney koşulları sabit tutularak 2500 g/t (3x10<sup>-2</sup> M) Na<sub>2</sub>S ilavesi ile flotasyon gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda %75,9 Au ve %89,4 Ag verimleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Na<sub>2</sub>S ilavesinin belirgin bir iyileştirme yaratmadığı görülmüş ve okside olmuş altın yüzeylerinin varlığı belirlenmemiştir.

Aerophine 3418 A+Aero 208 kollektörlerinden 5 kademe 500+500 g/t (100+100+100+100+100 g/t) kullanılarak, her kademe 3 dk köpük alınarak ve diğer koşullar sabit tutularak deney yapılmıştır. ATP+KAX ve Aerophine 3418 A+Aero 208 kollektör kombinasyonlarının altın ve gümüş flotasyonu üzerindeki etkisini daha iyi karşılaştırabilmek için 500+500 g/t kollektör kullanımında elde edilen sonuçlar Tablo 2'de değerlendirilmiştir.

## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Tablo 2.** Aerophine 3418 A+Aero 208 ve ATP+KAX kollektörleri ile yapılan deneylerin değerlendirilmesi.

Kollektör Cinsi, g/t (500+500)	Ürünler	Miktar, %	İçerik, ppm		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
Aerophine 3418 A+Aero 208	Konsantre	27,6	57,40	397,40	85,9	91,6
	Artık	72,4	3,60	13,90	14,1	8,4
	Toplam	100,0	18,45	119,75	100,0	100,0
ATP+KAX	Konsantre	8,6	161,50	1160,0	75,6	88,0
	Artık	91,4	4,90	14,90	24,4	12,0
	Toplam	100,0	18,37	113,38	100,0	100,0

Tablo 2'deki deney sonuçları incelendiğinde, 500 g/t Aerophine 3418 A-Aero 208 kullanımı ile %85,9 Au ve %91,6 Ag verimlerine ulaşıldığı görülmektedir. Ancak, aynı miktardaki ATP+KAX kollektörlerinin kullanımında ise daha yüksek içerikli altın ve gümüş daha düşük verimlerle elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, verim açısından altın ve gümüş flotasyonu üzerinde Aerophine 3418 A-Aero 208 kollektörlerinin, ATP+KAX kollektörlerine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Altın flotasyonunda etkili kollektörler olarak bilinen Aero 208 (sodyumizopropildithiofosfat) dithiofosfat kökenli, Aerophine 3418 A (sodyumizobütildithiofosfin) ise dithiofosfin kökenli ikincil kollektörlerdir [10]. Aynı yapıda olan dithiofosfinlerin ve dithiofosfatların bazı özellikleri farklıdır. Aerophine 3418 A'nın metal kompleksleri daha kararlıdır ve yüzdürebilme kapasitesi Aero 208'den yüksektir [12, 18, 19]. Aero 208, bazı sülfürlü cevherlerden selektif olarak altın kazanımında etkilidir [9, 20]. Aerophine 3418 A ise gümüş ve gümüş sülfürlerin flotasyonunda kullanılmaktadır. Yüksek pirit içerikli cevherlerden altın kazanımında etkilidir [21-22]. Aerophine 3418 A ve Aero 208 kollektörlerinin ağır metallerle yaptığı tuzların çözünürlüğü genellikle ksantat tuzlarının çözünürlüğünden daha fazladır. Bu sebeple bu kollektörler ksantatlara göre daha zayıf kollektördür. Ancak Bulatovic (1997), dithiofosfatların piritte karşı daha selektif olduğunu, cevherin içerisinde pirit minerali bulunması durumunda bu kollektörlerin kullanılması ile ksantatlara göre daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini belirtmiştir [14].

### 3.3. Kademe Sayısının Etkisi

Aerophine 3418 A ve Aero 208 kollektörleri ile 5 kademeli deney sonuçları göz önüne alınarak, kademe sayısının etkisini belirleyebilmek için daha önce yapılan 5 kademeli flotasyon deneyine ilave olarak 10 ve 15 kademeli deneyler yapılmıştır. 10 kademeli deneyde her kademede 100'er g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 kullanarak toplam 1000+1000 g/t kollektör ilave edilirken MIBC köpürtücüsünden ise her kademede 10'ar g/t eklenerek toplamda 100 g/t kullanılmıştır. Benzer şekilde 15 kademeli flotasyon deneyinde her kademede 100'er g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 kullanmak üzere her iki kollektörden 1500'er g/t, MIBC'den ise her kademede eşit kullanılarak toplamda 150 g/t ilave edilmiştir. pH 4,5-5'de gerçekleştirilen deneylerde her kademedeki flotasyon süresi 3 dk'dır. Kademeli flotasyon deneylerinin sonuçları Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3'deki deney sonuçları incelendiğinde, kademe sayısının artırılmasının altın ve gümüşün kazanılmasında olumlu etki sağladığı görülmektedir. Bu olumlu etki, kademe sayısı arttırıldıkça kullanılan reaktif miktarının ve flotasyon süresinin de artmış olmasına bağlıdır. 5 kademeli flotasyon deneyinde artıktaki 3,60 ppm Au ve 13,90 ppm Ag, 10 kademeli flotasyon deneyinde ise artıktaki 2,90 ppm Au ve 11,80 ppm Ag saptanmıştır. 15 kademeli flotasyon deneyinde altın kazanımı açısından çok az bir iyileştirme olmasına rağmen, gümüş veriminde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

**Tablo 3.** Kademe sayısının etkisinin incelendiği flotasyon deneylerinin sonuçları.

Kademe Sayısı	Ürünler	Miktar, %	İçerik, ppm		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
5	Konsantre	27,6	57,40	397,40	85,9	91,6
	Artık	72,4	3,60	13,90	14,1	8,4
	Toplam	100,0	18,45	119,75	100,0	100,0
10	Konsantre	22,2	71,50	512,50	87,5	92,6
	Artık	77,8	2,90	11,80	12,5	7,4
	Toplam	100,0	18,13	122,96	100,0	100,0
15	Konsantre	28,0	56,20	394,50	89,0	92,4
	Artık	72,0	2,70	12,60	11,0	7,6
	Toplam	100,0	17,70	120,01	100,0	100,0

### 3.4. Temizleme Devreli Flotasyon Deneyleri

Doğrudan izabeye gönderilebilecek altın-gümüş konsantresindeki limit altın içeriğinin 100 ppm, gümüş içeriğinin ise 500 ppm olduğu bilinmektedir. Ancak mümkün olduğu kadar yüksek içerikli altın-gümüş konsantresi üretebilmek, hem altın kayıplarının azalmasını hem de izabe gelirlerinin artmasını sağlayacaktır. Bu sebeple, 10 ve 15 kademeli deneylerden elde edilen kaba konsantreye temizleme flotasyonunun uygulanması gerekmektedir. 10 kademeli deneyin kaba konsantresi 2 kademeli temizleme devresine, 15 kademeli deneyin kaba konsantresi ise 3 kademeli temizleme devresine tabi tutulmuştur. Bu deneylerde, ilk temizleme devresinde 30+30 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208, 20 g/t MIBC, ikinci temizleme devresinde ise 20+20 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208, 10 g/t MIBC ilave edilmiştir. Flotasyon süreleri sırasıyla 7 dk ve 4 dk'dır. 15 kademeli flotasyon deneyinde yapılan üçüncü temizleme devresinde ise köpürtücü ilave edilmeden 10'ar g/t Aerophine 3418 A ve Aero 208 kollektörleri eklenerek 3 dk boyunca köpük alınmıştır. Temizleme devreli flotasyon deneylerinin sonuçları Tablo 4'de verilmiştir.

10 ve 15 kademeli flotasyon deneylerinde elde edilen kaba konsantrelerin içerikleri ve verimleri benzerlik gösterdiğinden elde edilen sonuçlar 2 kademe ve 3 kademe temizleme devrelerinin etkisi olarak incelenebilir. 2 kademeli temizleme devresi ile konsantrede %75,8 verim ile 625 ppm Au, %86,5 verim ile 4833 ppm Ag elde edilmiştir. 3 kademe temizleme ile ise konsantrede %69,6 verim ile 1026,5 ppm Au ve %80,6 verim ile 8058,1 ppm Ag kazanılmıştır.

**Tablo 4.** Temizleme devreli flotasyon deneylerinin sonuçları.

Deney Koşulları	Ürünler	Miktar, %	İçerik, ppm		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
10 kademeli kaba flotasyon ve 2 kademe temizleme flotasyonu	Konsantre	2,2	625	4833	75,8	86,5
	Ara Ürün 2	2,5	23,30	96,70	3,2	2,0
	Ara Ürün 1	17,5	8,80	28,80	8,5	4,1
	Artık	77,8	2,90	11,80	12,5	7,4
	Toplam	100,0	18,13	122,96	100,0	100,0
15 kademeli kaba flotasyon ve 3 kademe temizleme flotasyonu	Konsantre	1,2	1026,5	8058,10	69,6	80,6
	Ara Ürün 3	1,8	70,80	354	7,2	5,3
	Ara Ürün 2	13,9	14,60	52,20	11,5	6,0
	Ara Ürün 1	11,1	1,20	5,50	0,7	0,5
	Artık	72,0	2,70	12,60	11,0	7,6
Toplam	100,0	17,70	120,01	100,0	100,0	

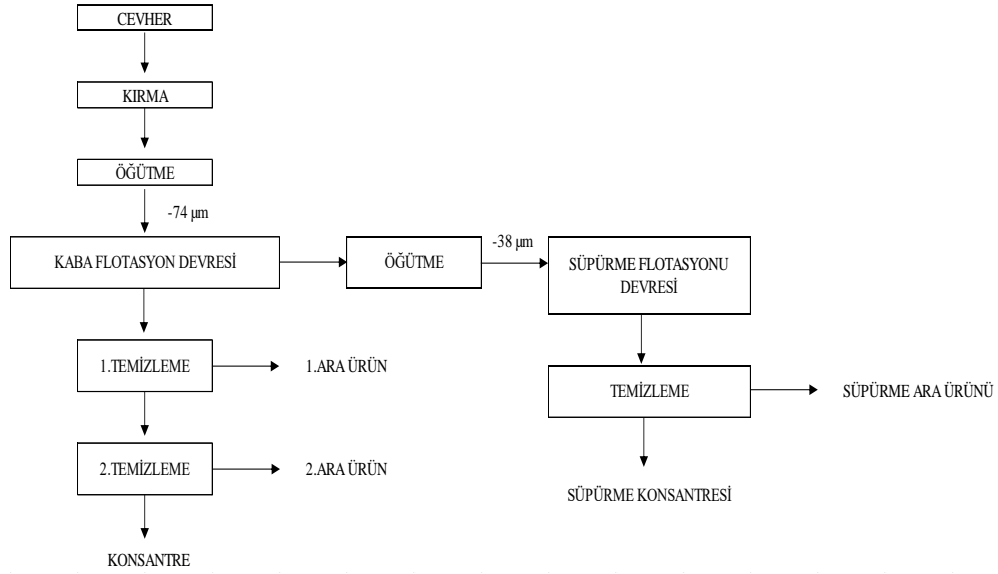
### 3.5. Flotasyon Artıklarından Altın ve Gümüş Kazanımı

10 kademeli flotasyon işlemi sonucunda artıktaki 2,90 ppm altın ve 11,80 ppm gümüş bulunmaktadır. Daha sonra gerçekleştirilen 15 kademeli flotasyon deneyi ile hem kullanılan reaktif miktarı hem de flotasyon süresi arttırılmasına rağmen artıktaki altın ve gümüş içeriklerinde önemli bir iyileştirme sağlanamamıştır. Mineralojik analizlerden altın ve gümüş minerallerinin çoğunluğunun piritte bağlı olduğu bilindiğinden, pirit minerali açısından tam serbestleşmenin sağlanamadığı düşünülerek flotasyon artığı tekrar öğütülmüş ve ardından süpürme flotasyonu gerçekleştirilmiştir. 10 kademe yapılan flotasyon deneyinden elde edilen artık %60 pülpte katı oranında 60 dk boyunca bilyalı değirmende öğütülerek -38 µm tane boyutuna getirilmiştir. pH 4,5-5,0 'de 4 kademeli gerçekleştirilen süpürme flotasyonu deneyinde 200+200 g/t (50+50+50+50 g/t) Aerophine 3418 A+Aero 208 ve 80 g/t (20+20+20+20 g/t) MIBC ilave edilmiştir. Her kademe köpük alma süresi 3 dk olup, toplam flotasyon süresi 12 dk'dır. Süpürme flotasyonu devresinin ardından 10'ar g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 ve 10 g/t MIBC kullanılarak temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Temizleme devresinde flotasyon süresi 6 dk'dır. Deneyin akım şeması Şekil 5'de, sonuçları ise Tablo 5'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tekrar öğütme ve süpürme flotasyonu sonucunda nihai artıktaki altın içeriği 2,20 ppm, gümüş içeriği ise 8,40 ppm olarak bulunmuştur.

Cevher içerisindeki altın tanelerinin boyutu 19-0,62 µm arasında olup  $d_{50}$  boyutu 12,54 µm'dur. Çoğunlukla klorarjirit ve arjantit olarak bulunan gümüşün  $d_{50}$  boyutu ise özellikle arjantit için 6,05 µm gibi çok düşük tane boyutlarındadır. Bu sebeple malzemenin boyutunun 38 µm altına indirilmesi pirit haricinde kuvars, kaolinit ve demir hidroksitlere bağlı olan altın ve gümüşün serbestleşmesi için yeterli olmamıştır.



## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ



Şekil 5: Flotasyon artıklarından altın-gümüş kazanımı için yapılan flotasyon deneyinin akım şeması.

Tablo 5. Flotasyon artıklarından altın-gümüş kazanımı için yapılan flotasyon deneyinin sonuçları.

Ürünler	Miktar (%)	İçerik (ppm)		Verim (%)	
		Au	Ag	Au	Ag
Konsantre	2,2	625	4833	75,8	86,5
Ara Ürün 2	2,5	23,30	96,70	3,2	2,0
Ara Ürün 1	17,5	8,80	28,80	8,5	4,1
Süpürme Konsantresi	1,9	19,50	110,10	2,0	1,7
Süpürme Ara Ürün	15,0	3,40	12,30	2,9	1,6
Artık	60,9	2,20	8,40	7,6	4,1
Toplam	100,0	18,13	122,96	100,0	100,0

### 3.6. Flotasyon Kinetiğinin İncelenmesi

#### 3.6.1. Kinetik Teorisi

Literatürde yaygın olarak kullanılan flotasyon modelleri flotasyon hızı ile ilgili olarak formüle edilmiştir. Flotasyon modelleri, flotasyon sisteminin hidrodinamik, kimyasal ve fiziksel parametrelerini nicel olarak ifade edebilmektedir [24]. Flotasyon hızı, zaman ile bağlantılı yüzen malzeme miktarı olarak açıklanabilir [25]. Flotasyon hız sabiti (k), cevherin yüzey kimyası, tane boyutu ve mineralojisi gibi özelliklerine bağlıdır [26]. Aynı zamanda hız sabiti reaktif miktarı ve havalandırma seviyesi gibi flotasyon değişkenleri ile de ilgilidir [27]. Flotasyon hız sabiti (k), konsantrede değerli mineral kazanma olasılığını ifade eden sayısal bir değerdir. Aynı hücre içerisinde farklı reaktif koşullarının veya malzemenin farklı tane boyutlarının flotasyondaki etkilerini karşılaştırmak için kullanılabilir. Cevher içerisinde her mineral bir k değerine sahiptir. Bu değerlerin oranları flotasyonun seçiciliğini sayısal olarak ifade etmektedir [24]. Flotasyon kinetik hız sabiti arttıkça, değerli mineralin flotasyon hücresindeki kalış süresi azalır, bu durum flotasyon hücresinin hacimsel kapasitesinin azalmasını sağlar [28].

Flotasyon kinetiğinin belirlenmesinde kullanılan denklemler kimyasal kinetik alanında kullanılan denklemler ile açıklanmaktadır. Denklem 1'de görüldüğü gibi

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C^n \quad (1)$$

C; t zamanında hücredeki değerli mineral konsantrasyonunu, n değeri; denklemin derecesini, k ise; flotasyon hız sabitini ifade etmektedir.

Zuniga'ya (1935) ve Schuhmann'a (1942) kadar uzanan birinci derece kinetik modeli, birçok flotasyon sistemi için deneysel verilere uygun sonuçlar verir [29, 30]. Birinci dereceden kinetik model, bir flotasyonda belirli bir süre içinde değerli minerallerin

Ş. Beste Aydın, Deniz Aydın, Alim Gül

konsantrasyonundaki değişime dayanır. Denklem 1 'in integralinin alınması ile oluşturulan birinci derece kinetik denklemde (denklem 2) [31];

$$R = R_{\infty} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

R; t zamanındaki verim,  $R_{\infty}$  ( $t \rightarrow \infty$ ); maksimum verim,  $k_1$ ; birinci derece flotasyon kinetik sabiti olarak ifade edilmektedir. Denklem 2, denklem 3 ve 4'de gösterildiği gibi tekrar düzenlendikten sonra logaritması alınarak denklem 5 oluşturulmuştur. Denklem 5'in sol tarafında hesaplanan değerler t değerine (kümülatif flotasyon süresi) karşı çizildiğinde grafik düz bir çizgi olmalıdır. Elde edilen düz çizginin eğimi birinci derece kinetik sabitini ( $k_1$ ) vermektedir.

$$R_{\infty} e^{-k_1 t} = R_{\infty} - R \quad (3)$$

$$e^{-k_1 t} = (R_{\infty} - R)/R_{\infty} \quad (4)$$

$$\ln[(R_{\infty} - R)/R_{\infty}] = -k_1 t \quad (5)$$

Arbiter (1951) [32] tarafından önerilen ikinci derece kinetik modeli, denklem 1'de ki n değerinin yani denklemin derecesinin 2 yapıldıktan sonra integralinin alınmasıyla elde edilen denklem 6 ile ifade edilmektedir. Denklem 6 tekrar düzenlendiğinde denklem 7 yazılmaktadır.

$$R = \frac{R_{\infty}^2 k_2 t}{1 + R_{\infty} k_2 t} \quad (6)$$

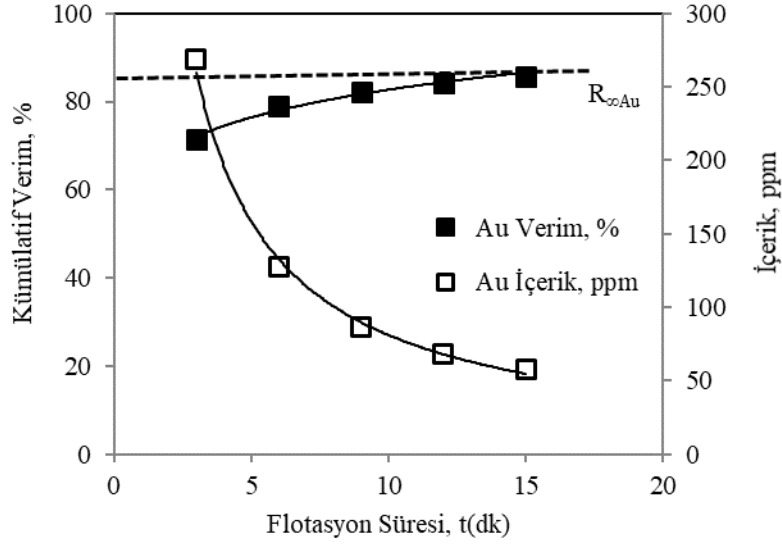
$$\frac{t}{R} = \frac{t}{R_{\infty}} + \frac{1}{R_{\infty}^2 k_2} \quad (7)$$

Denklem (7)'de, R değeri "t" anındaki kümülatif verim,  $R_{\infty}$  değeri maksimum verim ve  $k_2$  değeri ise ikinci derece kinetik hız sabitidir. İkinci dereceden denklem geçerliyse, zamana karşı çizilen t/R grafiği düz bir çizgiyle ifade edilmelidir. İkinci derece kinetik modelinde doğru eğimi  $1/R_{\infty}$ 'a, kesme noktası değeri ise  $1/R_{\infty}^2 k_2$ 'ye eşit olmaktadır.

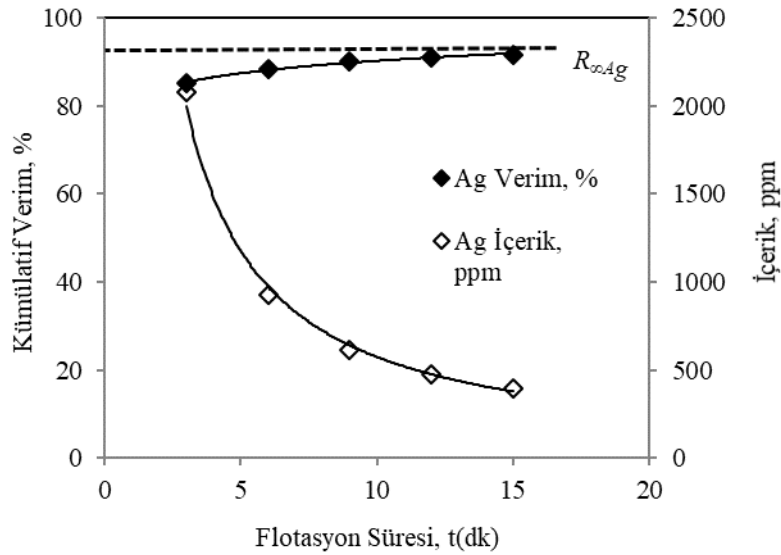
### 3.6.2. Kinetik Modelleme

Altın ve gümüş verimleri üzerinde flotasyon süresinin etkisi, pH 4,5-5'de, 1000 g/t  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 500'er g/t Aero 208 ve Aerophine 3418 A, 50 g/t MIBC ilavesi ile incelenmiştir. Zamana bağlı yapılan deney, 1 kg numune ile 2,5 L'lik flotasyon hücresinde gerçekleştirilmiştir. 3, 6, 9, 12 ve 15 dk köpük alma süreleri sonunda altın için elde edilen sonuçlar Şekil 6'da, gümüş için elde edilen sonuçlar ise Şekil 7'de verilmiştir.  $R_{\infty\text{Au}}$  ve  $R_{\infty\text{Ag}}$  değerleri kümülatif verim eğrisinin sabitlenmeye başladığı nokta olarak ifade edilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 15 dk sonunda altın ve gümüş verimlerinin sabitlenmeye başladığı ve kabul edilebilir altın ve gümüş verimlerinin elde edildiği görülmektedir.  $R_{\infty\text{Au}}$  değeri Şekil 6'dan %85,9,  $R_{\infty\text{Ag}}$  değeri ise Şekil 7'den %91,7 olarak bulunmuştur.

## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ



Şekil 6. Altın verim ve içeriklerinin zamana bağlı fonksiyonu.



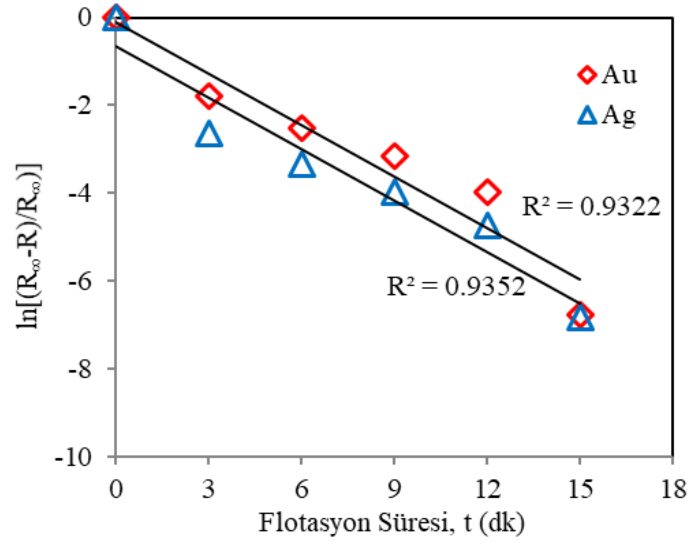
Şekil 7. Gümüş verim ve içeriklerinin zamana bağlı fonksiyonu.

Birinci derece kinetik modelinde, denklem 5'in sol tarafındaki  $\ln[(R_{\infty} - R)/R_{\infty}]$  ifadesi ile hesaplanan değerler Tablo 6'da gösterilirken, bu değerlerin kümülatif flotasyon süresine karşı çizilmesi ile oluşturulan grafik Şekil 8'de gösterilmiştir. Au ( $k_{1Au}$ ) ve Ag ( $k_{1Ag}$ ) için birinci dereceden kinetik sabitler, Şekil 8'de verilen doğruların eğimlerinden sırasıyla  $0,390 \text{ dk}^{-1}$  ve  $0,391 \text{ dk}^{-1}$  olarak bulunur. Doğrusal regresyondan korelasyon katsayıları Au için  $0,9322$  ( $r_{Au}^2$ ) ve Ag için  $0,9352$  ( $r_{Ag}^2$ ) olarak elde edilmiştir.

Tablo 6. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri için birinci derece kinetik modelinde kullanılan veriler.

Au			Ag		
t	R	$\ln((R_{\infty Au}-R)/R_{\infty Au})$	t	R	$\ln((R_{\infty Ag}-R)/R_{\infty Ag})$
0	0	0	0	0	0
3	71,4	-1,779	3	85,1	-2,631
6	79,0	-2,522	6	88,4	-3,324
9	82,3	-3,172	9	90,0	-3,987
12	84,3	-3,983	12	90,9	-4,742
15	85,8	-6,756	15	91,6	-6,821

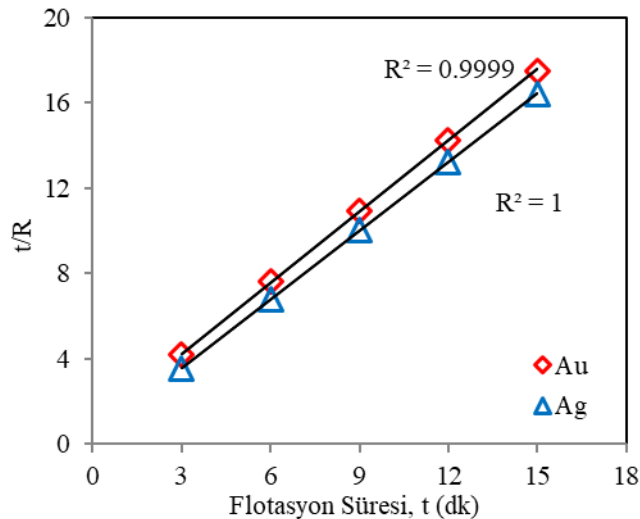
Ş. Beste Aydın, Deniz Aydın, Alim Gül



Şekil 8. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri için birinci derece kinetik modeli.

İkinci derece kinetik model için, kümülatif zamana karşı çizilen  $t/R$  (kümülatif zaman/kümülatif verim) değerleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Çizilen verilere göre, elde edilen korelasyon katsayıları 0,99'dan büyüktür, bu da ikinci derece kinetik modelin birinci derece kinetik modele kıyasla yüksek doğrusallık sağladığı anlamına gelir.  $R_{\infty Au}$  ve  $R_{\infty Ag}$  değerleri doğruların eğimlerinden elde edilirken ikinci dereceden flotasyon kinetik sabitleri ise ( $k_{2Au}$  ve  $k_{2Ag}$ ) kesişme değerlerinden bulunur. İki kinetik model ile elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 7'de gösterilmektedir.

Birçok çalışmada, flotasyonda tek bir mineral yüzdürülecekse veya pülpün katı oranı ağırlıkça %15'den az ise flotasyon sisteminin birinci dereceden kinetik modeline uygun olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, düşük değerli mineral içerikli cevherlerin veya yüksek pülp katı oranına sahip pülpün flotasyon kinetikleri ikinci dereceden kinetik modelde ifade edilmektedir [33-34]. İkinci derece kinetik modelinde elde edilen yüksek korelasyon katsayısı haricinde, bu bilgiler de göz önüne alındığında ikinci derece kinetik modelinin uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. İkinci derece kinetik modelinde flotasyon kinetik sabiti ( $k_2$ ) Au için  $1,318 \text{ g}^{-1} \text{ dk}^{-1}$ , Ag için ise  $3,329 \text{ g}^{-1} \text{ dk}^{-1}$  olarak hesap edilmiştir. Elde edilen verilere göre gümüşün altına göre 2,5 kat daha hızlı yüzdüğü saptanmıştır.



Şekil 9. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri için ikinci derece kinetik modeli.

## REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Tablo 7.** Birinci ve ikinci derece kinetik modellerden elde edilen parametreler ( $R_{\infty}$ ; maksimum verim,  $k_1$ ; birinci derece flotasyon kinetik sabiti,  $k_2$ ; ikinci derece flotasyon kinetik sabiti,  $r^2$ ; korelasyon katsayısı)

	Birinci derece kinetik model			İkinci derece kinetik model		
	$R_{\infty}$ , %	$k_1$ , dk <sup>-1</sup>	$r^2$	$R_{\infty}$ , %	$k_2$ , g <sup>-1</sup> dk <sup>-1</sup>	$r^2$
Au	85,9	0,390	0,9322	90,1	1,318	0,9999
Ag	91,7	0,391	0,9352	93,3	3,329	1,0

#### 4. SONUÇLAR

Günümüzde altın fiyatlarındaki artış eğilimi ile Dünya’da olduğu gibi Türkiye’de de altın üretimine olan ilgi artmış ve yeni altın kaynakları bulma arayışına girilmiştir. Türkiye’de altın-gümüş kazanımını siyanür liçi yöntemi ile yapan bir liç tesisinin siyanür kullanımından dolayı çevresel etki değerlendirmesi kapsamında yasal ve sosyal yükümlülükleri fazla olmakta ve bu nedenle birçok tesisin üretime geçmesinde problemler çıkabilmektedir. Bu çalışmada, Çanakkale-Serçeler bölgesinden temin edilen 18,85 ppm altın ve 120,0 ppm gümüş içeren refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinin flotasyon davranışı incelenmiştir. Cevher üzerinde yapılan mineralojik incelemeler sonucunda yaygın olan minerallerin pirit, kuvars ve kaolinit olduğu tespit edilmiştir. Altın ve gümüş minerallerinin nabit altın, gümüşlü nabit altın, elektrik, kalaverit, klorarjirit, arjantit ve jalpaite-proustite olarak bulunduğu saptanmıştır. Refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevheri üzerinde 500+500 g/t ATP+KAX ve Aerophine 3418 A+Aero 208 kollektör kombinasyonlarının etkisinin incelendiği deneylerde ATP+KAX ile yaptıkları çalışmada, %52,5 verim ile 235 ppm altın ve %37,6 verim ile 3740 ppm gümüş içeren, Aerophine 3418 A-Aero 208 kullanımı ile ise %85,9 verim ile 57,4 ppm altın ve %91,6 verim ile 397,4 ppm gümüş içeren konsantre elde edilmiştir. Tane boyutunun, kollektör cins ve miktarının, kademe sayısının etkisinin incelendiği deneylerden elde edilen optimum sonuçlar ile - 74 µm tane boyutunda, kaba devrede 1000+1000 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 kullanımı ve 2 kademeli temizleme devresi ile konsantrede %75,8 verim ile 625 ppm Au, %86,5 verim ile 4833 ppm Ag kazanılmıştır. Aynı tane boyutunda, kaba devrede 1500+1500 g/t Aerophine 3418 A+Aero 208 ilavesi ve 3 kademeli temizleme devresi ile %69,6 verim ile 1026,5 ppm Au ve %80,6 verim ile 8058,1 ppm Ag içeren konsantre üretilmiştir. Flotasyon kinetiği ile ilgili çalışmalarda yüksek korelasyon katsayısından dolayı ikinci derece kinetik modelinin, birinci derece kinetik modeline göre daha uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. İkinci derece kinetik modeline göre gümüşün flotasyon hızı altına göre 2,5 kat daha fazladır.

Siyanürün çevre ve insan sağlığı üzerindeki toksik etkisi nedeniyle siyanür liçi tesislerinde uygulanan ciddi yasal mevzuat dikkate alındığında siyanür liçine kıyasla daha çevre dostu bir yöntem olan flotasyon ile altın eldesi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, doğrudan ergitmeye hazır bir altın konsantrinin refrakter olmayan sülfürlü altın-gümüş cevherinden flotasyon yöntemi ile elde edilebileceğini belirlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışmada numune temininde, mineralojik ve kimyasal analizlerde destek sağladıkları için Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. firmasına çok teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

- [1] A.F. Taggart, “Ores and Industrial Minerals”, in *Handbook of Mineral Dressing*, vol. 12, pp.116-119, New York: Wiley, 1945.
- [2] R. Dunne, “Flotation of gold and gold-bearing ores”, in *Advances in Gold Ore Processing*, M.D. Adams, Ed., Netherlands: Elsevier, pp. 315–338, 2016.
- [3] B. Damjanovic, J.R. Goode, “Canadian milling practice”, *CIM Special*, vol. 49, pp. 3-74, 2000.

- [4] A. Winckers, "Overview of recent developments in flotation technology and plant practice for copper ores", *Proceedings of Mineral processing plant design, practice and control, Colorado: The society for mining, metallurgy and exploration*, pp.1124-1140, 2002.
- [5] D.R. Nagaraj, "Developments of new flotation chemicals" *Transaction Indian Institute Metals*, vol. 50(5), pp. 355-363, 1997.
- [6] A.J. Teague, J.S.J. Van Deventer, C.I Swaminathan, "A conceptual model for gold flotation", *Minerals Engineering*, vol. 12, pp. 1000-1019, 1999.
- [7] G.C. Allan, J.T. Woodcock, "A review of flotation of native gold and electrum", *Minerals Engineering*, vol. 14(9), 931-962, 2001.
- [8] S.L. Chrystoulis, S. Dimov, "Speciation of sorbed gold", 36<sup>th</sup> CMP Proceedings Ottawa: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, pp. 455-472, 2004.
- [9] D.R. Nagaraj, J.S. Brinen, R.S. Farinato, J. Lee, "A study of the interactions of dithiophosphate with noble metals using electrochemical, wetting and spectroscopic methods", *Langmuir*, vol. 8, pp. 1943-1949, 1991.
- [10] Cytec, "Flotation of Sulfide Ores", in *Mining Chemical Handbook*, pp. 145-148, 2010.
- [11] F. Azgomi, C.O. Gomez, J.A. Finch, "Frother persistence: a measure using gas holdup", *Minerals Engineering*, vol. 22 (9-10), pp. 874-878, 2009.
- [12] R.R. Klimpel, "A review of sulphide mineral collector practice Advances in Flotation Technology", B.K. Parekh, J.D. Miller Eds., Littleton: SME, pp. 115-127, 1999.
- [13] L.A. Goold, Private Communication, *Chemical and Mining Services*, Sydney, 1990.
- [14] S.M. Bulatovic, "Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold bearing sulphides", *Minerals Engineering*, vol. 10(9), pp. 895-908, 1997.
- [15] N. Acarkan, G. Bulut, A. Gul, O. Kangal, F. Karakaş, O. Kökkılıç, G. Önal, "The effect of collector's type on gold and silver flotation in a complex ore", *Separation Science and Technology*, vol. 46, pp. 283-289, 2011.
- [16] C.T. O'Connor, R.C. Dunne, "The practice of pyrite flotation in South Africa and Australia", *Minerals Engineering*, vol. 4(7-11), pp. 1057-1069, 1991.
- [17] N.K. Mendiratta, "Kinetic studies of sulfide mineral oxidation and xanthate adsorption", Doctoral thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2000.
- [18] J. Leppinen, "FTIR and flotation investigation of adsorption of diethyldithiophosphate on sulfide minerals", Technical Research Centre of Finland, Report No.726., 1991.
- [19] T. Güler, C. Hiçyılmaz, "Hydrophobicity of chalcopyrite with dithiophosphate and dithiophosphinate in electrochemically controlled condition", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspect*, vol. 235, pp. 11-15, 2004.
- [20] C.I Basilio, D.S., Kim, R.H. Yoon, Studies on the use of monothio phosphates for precious metals flotation, *Minerals Engineering*, vol. 5(3-5), pp. 397-409, 1992a.
- [21] P.A. Mingione, "Use of Aerophine 3418 A promoter for sulfide minerals flotation", Proceedings of 22<sup>nd</sup> Canadian Mineral Processors Conference Montreal, pp.485-508, 1990.
- [22] C.I. Basilio, D.S. Kim, R.H. Yoon, "Interaction of thiophosphinate collectors with precious metals", SME Annual Meeting, Arizona, The Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, pp.92-174 1992b.
- [23] P. Ofori, G. O'Brien, P. Hapugoda, B. Firth, "Distributed flotation kinetics models – A new implementation approach for coal flotation", *Minerals Engineering*, vol. 66-68, pp. 77-83, 2014.
- [24] A. Gupta, D.S Yan, "Mineral Processing Design and Operations: An Introduction", Netherlands: Elsevier, 2006.
- [25] S.M. Bulatovic, "Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores", Amsterdam: Elsevier, vol. 1, pp. 235–293, 2007.
- [26] X. Bu, G. Xie, Y. Peng, L. Ge, C. Ni, "Kinetics of Flotation. Order of Process, Rate Constant Distribution and Ultimate Recovery", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53(1), pp. 342-365. 2016.
- [27] S. Kelebek, B. Nanthakumar, "Characterization of stockpile oxidation of pentlandite and pyrrhotite through kinetic analysis of their flotation", *International journal of Mineral Processing*, vol. 84, pp. 69-80, 2007.
- [28] K. Jiang, J.E. Dickinson, K.P. Galvin, "The kinetics of Fast Flotation using the Reflux Flotation Cell", *Chemical Engineering Science*, vol. 196, pp. 463-477, 2019.
- [29] H.G. Zuniga, "Flotation recovery is an exponential function of its rate", *Bo In. Soc. Nac. Min. (Santiago)*, vol. 47, pp. 83–86, 1935.

REFRAKTER OLMAYAN SÜLFÜRLÜ ALTIN-GÜMÜŞ CEVHERİNİN FLOTASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

- [30] J. R. Schuhmann, “Flotation Kinetics I: Methods for steady-state study of flotation problems”, *J. Phys. Chem*, vol. 46 (8), pp. 891-902, 1942.
- [31] X. De-gang, L. Cong, C. Yi-wan, X. Yong-fang, “Non-first-order Kinetics Modelling Method for Stibnite Flotation Process”, IFAC (International Federation of Automatic Control) Papers Online, vol. 51-21, pp. 317-322, 2018.
- [32] N. Arbiter, “Flotation rates and flotation efficiency”, *Trans. AIME*. pp. 791-796. 1951.
- [33] S.P. Mehrotra, P.C. Kapur, “The effects of aeration rate, particle size and pulp density on the flotation rate distributions”, *Powder Technology*, vol. 9(74), pp. 213–219, 1974.
- [34] A.V. Nguyen, H.J., Schulze, “Colloid Science of Flotation”, Chapter 30, in *Surfactant Series* vol. 118. Marcel Dekker, Inc, New York, 2004.

