

# Proses Mineralojisinin Flotasyon Tesis Performans Analizinde Kullanımı

## Use of Process Mineralogy for Flotation Plant Performance Analysis

İLKAY B. CAN\*<sup>1</sup>, ZAFİR EKMEKÇİ<sup>1</sup>, N. METİN CAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe – Ankara, Türkiye

Geliş (received) : 23 Ağustos (August) 2018

Kabul (accepted) : 24 Kasım (November) 2018

### ÖZ

Zenginleştirme tesislerinin tasarımı ve optimizasyonu çalışmalarında cevher yatağının mineralojisi çok önemli bir yere sahiptir. Zenginleştirme tesisinin farklı noktalarından alınan cevher örneklerine uygulanan detaylı mineralojik analizler sayesinde, zenginleştirme performansını sınırlayan ana etkenler ve performansın artırılabilmesi için yapılması gereken düzenlemeler hakkında yorum yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, altın içeren kompleks bakır-arsenikli sülfürlü cevherin işlendiği bir flotasyon tesisinin performansı detaylı kantitatif mineraloji verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Flotasyon tesisinin beslemesi, bakır ve pirit konsantreleri ve bakır süpürme artığı akışlarından numuneler alınarak kimyasal ve mineralojik analizler yapılmış, QemSCAN ile ayrıca konsantrelerdeki altının davranımı da incelenmiştir. Flotasyon beslemesinin mineralojik analiz sonuçları minerallerin serbestleşme derecesinin  $-45 \mu\text{m}$ 'de ancak %60 seviyesine ulaştığını göstermiş, dolayısıyla daha ince tane boyuna öğütülen bir flotasyon beslemesiyle bakır veriminin artabileceği öngörülmüştür. Bakır konsantrisinin ise serbest pirit taneleriyle kirlendiği belirlenmiş, buna göre flotasyon işletme koşullarının da gözden geçirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Devrede bakır kaybı açısından en önemli akışın süpürme flotasyonu artığı olduğu ve bu kaybın özellikle en ince tane boyunda ve serbest formda olduğu belirlenmiştir. Cevherde bulunan altın tanelerinin ise daha çok nabit formda olduğu, %80'inin  $20 \mu\text{m}$ 'den küçük ve genellikle pirit ve enargit ile bağlı bulunduğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sülfürlü mineraller, flotasyon, kantitatif mineralojik analiz, altın, serbestleşme.

### ABSTRACT

Mineralogy of the ore deposit has very great importance in the design and optimization of concentration plants. With detailed mineralogical analyzes applied to the ore samples taken from different points of the concentration plant, comments can be done on the main factors limiting the enrichment performance and the necessary arrangements to improve performance.

In this study, the performance of a flotation plant, treating complex copper-arsenic sulfide ore containing gold, was evaluated using detailed quantitative mineralogical data. Chemical and mineralogical analyzes were carried out by taking the samples from the flotation feed, copper and pyrite concentrates and copper scavenger tail streams, and the gold behavior in the concentrates was also examined by QemSCAN. Mineralogical analysis of the feed revealed that the liberation degree of minerals reached only 60% at  $-45 \mu\text{m}$ , so it is anticipated that the copper recovery could be increased by finer flotation feed. It was determined that the copper concentrate was diluted with free pyrite particles, and accordingly the flotation operating conditions had to be revised. The most important stream in terms of copper loss in the circuit was determined as the scavenger flotation tail, and that loss was particularly via finest size fraction and liberated form. It has been observed that the gold grains found in the ore are mostly in native form, 80% of which are smaller than  $20 \mu\text{m}$  and are usually associated to pyrite and enargite.

Kuvars damarlardaki sıvı kapanımlarının homojenleşme sıcaklıkları  $160^\circ \text{C}$ 'den  $400^\circ \text{C}$ 'nin üzerinde geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Sıvı kapanımları genelde karbon dioksitçe zengin olup yüksek tuz içeriklidirler (% 20-33 NaCl eşdeğeri).

Altınlı kuvars damarları, metal içeriği, yan kayaç alterasyonu, mineraloji, oluşum koşulları ve yapısal kontrol açısından orojenik altın yatakları ile benzer özelliklere sahiptir. Damarların migmatitlerle, yüksek dereceli metamorfik kayalar ve granitoidlerle olan mekânsal birlikteliği bunların oluşumunun Orta Anadolu'daki metamorfizma, yükselme ve/veya migmatitik domlaşma ve granitoid yerleşimi ile ilgili olduğunu ifade etmektedir.

**Keywords:** Sulphide minerals, flotation, quantitative mineralogical analysis, gold, liberation.

\* İ.B. Can

e-posta: ilkay@hacettepe.edu.tr

## GİRİŞ

Enargit ( $Cu_3AsS_4$ ) ve tennantit ( $Cu_{12}As_4S_{13}$ ) arsenik içeren bakır mineralleri olup genellikle kalkopirit ( $CuFeS_2$ ), kalkozin ( $Cu_2S$ ) gibi diğer bakır sülfür mineralleriyle birlikte bulunurlar. Enargit ve tennantitin diğer bakır sülfürlü minerallerden palp potansiyelinin kontrolü gibi koşullarla seçimli olarak ayrılması yönünde çalışmalar olsa da (Fornasiero vd., 2001; Lotter vd. 2016) genellikle flotasyon davranımlarının benzer olması sebebiyle ayrılmaları zor ve ekonomik olmadığı için birlikte zenginleştirilirler (Plackowski vd., 2012). Enargit ve tennantit ile birlikte bulunan bakır sülfürlü cevherlerde altın içeriğine de sık rastlanılmakta, ancak bazen oluşum koşulları nedeniyle bu altın varlığına doğrudan liç yöntemleri uygulanamamaktadır. Bu durumda özellikle altının sülfürlü minerallerle olan birlikteliği mineralojik olarak tespit edildiğinde, zenginleştirme yöntemi olarak toplu flotasyon yöntemi tercih edilebilmektedir (Curreli vd., 2005; Cabri vd. 2005).

Enargit ve tennantit ile birlikte kalkopirit, bornit, digenit, kalkozin gibi diğer bakır minerallerini içeren sülfürlü cevherler mineral çeşitliliği nedeniyle genellikle "kompleks" olarak adlandırılmakta, bu minerallerin oluşum tane büyüklüğü ve cevher içindeki dağılımları da özellikle öğütme serbestleşme boyunun belirlenmesi ve daha efektif akım şeması geliştirme açısından oldukça önem taşımaktadır (Petruk, 2000; Tungpalan vd., 2015, Sutherland, 2007). Dolayısıyla mineral miktarını ifade eden modal mineraloji ve cevher yapı-dokusu jeolojik bilgiyi, cevhere uygun seçilen zenginleştirme yöntemi ise prosese ilişkin bilgiyi temsil etmektedir. Bu iki bilgi bir arada kullanıldığında üretim yönteminde elde edilecek ürünün verim ve tenörünü teorik olarak tahmin etmek mümkün olmaktadır (Lund vd., 2015). Mineralojik bilgilerin cevher yatağının tanımlanması, zenginleştirme işleminin tasarımı ve elde edilen konsantrelerin izabesi aşamalarında karşılaşılabilecek olası sorunların belirlenmesi ve çözüm önerilerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılması genel olarak proses ya da uygulamalı mineraloji olarak adlandırılmaktadır. Cevher hazırlama işlemlerinin verimliliği ise genellikle basit ve hızlı olması sebebiyle kimyasal analiz sonuçlarıyla kontrol edilmektedir. Ancak, kimyasal analizin mineral içeriğini her zaman doğru tanımlayamaması, yapı-doku ve serbestleşmeye ait bilgi içermemesi nedeniyle cevher hazırlama süreçlerinin yorumlanmasında yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu nedenle proses mineraloji verileri, özellikle tesis işleyişini kararlı tutmak, üretim

sırasında meydana gelebilecek olası değişikliklerin etkilerini ve hatta uzun süreli olarak tesis performansını kontrol etmek için oldukça değerli bilgiler sunmaktadır (Sutherland, 1998a ve b).

Bu çalışmada, proses mineralojisinden elde edilen bilgiler ile altın içeren sülfürlü bakır cevherinin zenginleştirildiği bir flotasyon tesisinin performans değerlendirilmesi yapılarak, proses mineralojisinin bu tür çalışmalarda kullanımına yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışma genel bir sonuç çıkarmaktan öte, cevherin flotasyon davranımının detaylı mineralojik verilerle nasıl yorumlanabileceğini ve gelecekte yapılacak çalışmalar için bu yaklaşımın nasıl kullanılacağını ifade etmektedir. Bu kapsamda, tesis beslemesi, bakır (Cu) konsantresi, pirit (Py) konsantresi ve bakır süpürme artığındaki minerallerin tanımlanması, serbestleşme durumları ve bağlı tanelerdeki mineral birliktelikleri tane boyu bazında detaylı analiz edilerek hem sülfürlü mineral hem de altın davranımı prosesle ilişkilendirilmiştir.

## MALZEME ve YÖNTEM

Çalışma kapsamında, tesisinin flotasyon beslemesinden, bakır ve pirit konsantrelerinden ve Cu flotasyon süpürme artığı akışlarından elde edilen numuneler kullanılmıştır. Bu akışlardan alınan numuneler, tesisin kararlı çalıştığı durumda yapılan örnekleme çalışmasıyla elde edilmiştir. Çalışmada izlenen yöntem, seçilen akışların detaylı mineralojik karakterizasyonu ve metalurjisinin birlikte değerlendirilmesini içermektedir. Tüm proses mineraloji verileri, tonaj, metal içerikleri ve ana minerallerin verimleri gibi madde denkliği değerleri, tesis performansının değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Bu bağlamda, incelenen üzere seçilen akışlar tesisteki problemlerin tanımlanması ve yapılacak iyileştirmenin potansiyel önemine göre belirlenmiştir. Dolayısıyla, bakır ve altının kaybı, bakır konsantresinin gang mineralleri tarafından kirlenmesinin olası nedenleri değerlendirilebilmiştir. Buna dayanarak, flotasyon beslemesi, Cu konsantre ve Cu süpürme artığındaki sülfürlü minerallerin tane boyu bazındaki serbestleşme verileri Clemex Vision PE 5.0 otomatik görüntü analiz sistemi ile belirlenmiştir. Mineralojik karakterizasyonun temel amacı, bakır minerallerinin, sülfürlü ve sülfürlü olmayan gang minerallerinin (NSG: non-sulphide gangue) ve bağlı tanelerdeki mineral birlikteliklerinin türü ve serbestleşme durumlarını belirlemektir. Bu amaçla, incelenen akışlardaki numunelerin dar tane boyu aralığında

parlak kesitleri hazırlanmıştır. Bunun için farklı keçe ve incelikteki elmas solüsyonlarla aşındırma ve parlatma yapabilen Struers marka kesit parlatma cihazı kullanılmıştır.

Numune alınan noktaları da gösteren flotasyon devresinin basitleştirilmiş akım şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Buna göre, sülfürlü mineraller öncelikle toplu olarak yüzdürülmekte, sonrasında bakır ve pirit için seçimli flotasyon uygulanmaktadır. Cu süpürme artığı akışı, hem Cu devresinin artığı hem de pirit devresinin beslemesi olması açısından önemlidir.

Şekil 1'de belirtilen numune alma noktalarının yanısıra Cu devresindeki bazı önemli akışların da tonaj ve tenör bilgisi flotasyon devrelerinin kararlı olduğu koşul için tesis tarafından temin edilmiştir. Bu verilere göre akışların tonaj, tenör ve verim değerleri JKSimFluat madde denkliği programı kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 1).

Clemex Vision PE 5,0 otomatik optik görüntü analiz sistemi ile pirit (Py), sülfürlü olmayan gang mineralleri (NSG), enargit, tennantit, kalkopirit (Cp), bornit (Bor), galen (Gal) ve sfalerit (Sp) gibi akışlardaki ana mineraller nicel olarak belirlenmiştir. Kalkozin ve kovellin gibi ikincil bakır mineralleri oldukça eser miktardadır. Bilindiği üzere optik sistemler minerallerin refleksiyon ve renk gibi optik özelliklerini baz alır. Enargit ( $Cu_3AsS_4$ : %48,4 Cu, %19,0 As ve %32,5 S) ve tennantit ( $(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$ : %3,8 Fe, %47,5 Cu, %20,4 As ve %28,3 S) mikroskop altında parlak kesit renkleri oldukça benzer olduğu için birbirlerinden ayırt edilmesi oldukça zordur. Her iki mineral de bir Cu-As minerali olup konsantrde alınması gerektiği için çalışmada bu mineraller tek bir grup olarak tanımlanmış ve E&T olarak kodlanmıştır. Ana minerallerin ağırlık bazında yüzde miktarını ifade eden modal analizi, serbestleşme durumları ve ikili ve çoklu bağlı tane miktarları dar tane boyu fraksiyonlarında nicel olarak belirlenmiştir.

Çalışmada, sülfürlü minerallere ek olarak cevherin altın içeriğinden dolayı altın davranımının da incelenmesi yapılmış, özellikle bakır ve pirit konsantrelerindeki altın fazlarının ve birlikteliklerinin tanımı Activation Laboratories'de (Kanada) bulunan QemSCAN cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. QemSCAN, optik sistemlerden farklı olarak kimyasal analiz hassasiyetinde mineral tanımlama ve nicel serbestleşme analizi yapan, bir yazılımla donatılmış otomatik bir taramalı elektron mikroskobudur.

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

### Mineralojik Karakterizasyon

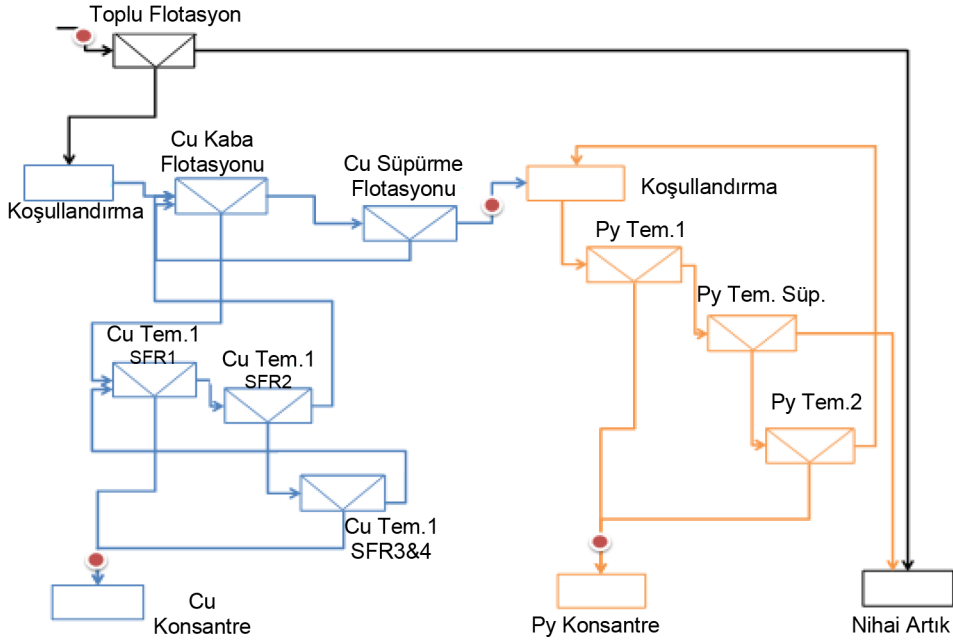
Ekonomik öğütme boyunda elde edilen serbestleşme derecesi tüm zenginleştirme işlemlerinin başarısı için çok önemli bir parametredir; dolayısıyla özellikle tane boyu bazında hesaplanan serbestleşme dereceleri öğütmenin yeterli olup olmadığı hakkında fikir vermektedir. Buna göre ana bakır mineralleri olan enargit ve tennantitin (E&T) incelenen akışlardaki serbestleşme derecelerini gösteren grafik Şekil 2'de verilmektedir.

Flotasyon beslemesinde E&T minerallerinin -45µm boyunda ancak %60 serbestleşme derecesine sahip olduğu görülmekte, daha yüksek serbestleşme sağlanabilmesi için daha ince öğütmenin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Tesisin mevcut işleyişinde, flotasyon beslemesinde toplam malzemenin %70'i ve Cu metalinin ise %92,7'si -90 µm tane boyundadır. Bakır konsantrisinde de serbest E&T taneleri -45µm boyunda bulunmaktadır. Bakır süpürme artığında ise açıkça görüleceği gibi E&T mineralleri genellikle bağlı formdadır. Serbest taneler ancak en ince boyda görülmektedir.

Tesisteki problemlerin tanımı için nasıl ki sadece kimyasal analiz verileri yeterli değilse, serbestleşme derecesi verisi de minerallerin bağlılık formları bilinmeden özellikle çözüm aşamasında yeterli olmamaktadır. Bu nedenle Cu devresinde numune alınan akışlar bazında detaylı yapılan mineralojik karakterizasyon çalışmaları aşağıda verilmektedir.

### Flotasyon beslemesi

Flotasyon besleme akışından alınan bu numune +180µm, -180+90µm, -90+45µm, -45+20µm ve -20µm dar tane boyu fraksiyonlarına elenip parlak kesitleri hazırlanmıştır. Numune %1,1 Cu, %15,3 S, %0,1 Pb, %0,2 Zn, %12,4 Fe ve %0,3 As içermektedir. Tesisin mevcut işleyişinde, flotasyon beslemesinin %70'i, beslemedeki Cu metalinin ise %92,7'si -90 µm tane boyundadır. Kimyasal analizler fraksiyonel bazda da yapılmış olup sonuçlar Çizelge 2'de ağırlık yüzdeleri ile birlikte verilmiştir. Clemex Vision görüntü analiz sistemi ile incelenen parlak kesitlerden ana minerallerin miktarını ifade eden modal analiz hesaplanmış, sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. Beslemenin tesis verilerine göre kimyasal analiz baz alınarak yapılan madde denkliği hesabında belirlenen Cu içeriği



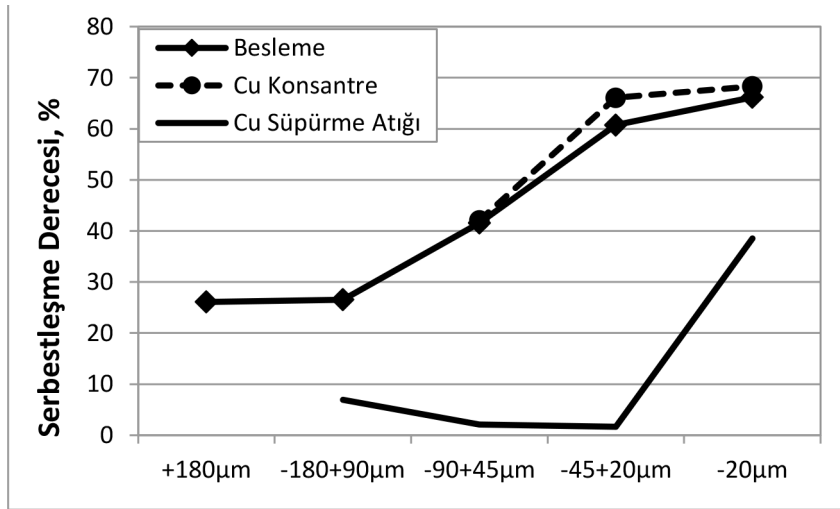
Şekil 1. Bakır ve pirit flotasyon devreleri ve numune alma noktaları.  
Figure 1. Copper and pyrite flotation circuits and sampling points.

Çizelge 1. Madde denklığı sonucu hesaplanan tonaj, Cu tenör ve verim değerleri.  
Table 1. Tonnage, Cu grade and recovery values calculated by mass balance.

Akışlar	Tonaj, t/s	Cu, %	Cu Verim, %
Flotasyon Beslemesi	265,00	1,09	100,00
Toplu Flotasyon Konsantresi	65,36	4,07	92,36
Toplu Flotasyon Artığı	199,64	0,11	7,62
Cu Kaba Flotasyon Konsantresi	71,33	7,69	190,29
Cu Kaba Flotasyon Artığı	96,66	1,50	50,32
Cu Süpürme Konsantresi	45,79	2,50	39,73
Cu Süpürme Artığı	50,87	0,60	10,59
Cu Konsantresi	14,49	16,27	81,78
Nihai Artık	250,51	0,21	18,22

ile mineralojik verilerden geri hesaplama sonucu elde edilen Cu değeri neredeyse aynı (~%1,1) olup mineralojik analizle kimyasal analiz oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Diğer bir deyişle, kimyasal ve mineralojik analiz uyumluluğu, Clemex Vision sistemiyle mineral tanımlama ve ölçümlerin yüksek doğrulukta yapıldığını desteklemektedir.

Mineral miktarlarının yanı sıra, bu minerallerin serbest, ikili ve çoklu bağlı formları da Clemex sistemi ile ölçülmüş, fraksiyonların ağırlıkları oranında Şekil 3'deki gibi grafiklendirilmiştir. Fraksiyonel bazdaki bağlı tane sınıfları, miktarca yüksek serbest piritin diğer bağlı tane miktarlarını maskeleyesi nedeniyle serbest piritli (a) ve serbest pirit içermeyen (b)



Şekil 2. Numune alınan akışlardaki Cu minerallerinin serbestleşme dereceleri.  
Figure 2. Liberation degrees of Cu minerals in sampled streams.

olmak üzere iki şekilde sunulmuştur. Çizelge 3'te de görüldüğü gibi Cu minerallerinin önemli miktarının -90µm tane boyunda olması, beklendiği üzere bağlı tanelerinin de bu boyun altında yoğunlaştığını göstermektedir. E&T mineralleri beslemede hem serbest (%0,2-0,8) hem de ikili ve çoklu bağlı tane formunda bulunmaktadır. E&T mineralleri genellikle pirit ve NSG mineralleri ile bağlı olup en ince fraksiyon olan -20µm'da bile gözlenmektedir.

E&T minerallerinin bağlı tanelerdeki kenetlenme miktarı Çizelge 4'te verilmekte olup bu veriler aynı zamanda E&T minerallerinin bağlı bir tane içinde nasıl dağıldığını göstermekte ve serbestleşme boyunu işaret etmektedir. Örneğin, E&T minerallerinin %60,8'i -45+20µm fraksiyonunda ve %100-95 serbestleşme sınıfındadır. İlgili çizelge E&T minerallerinin %80'den fazlasının -90µm boyunda ve >%50 serbestleşme sınıfında olduğunu göstermektedir. Bu durum, kaba flotasyon aşaması ve konsantre tenörünün önemli bir sorun olmadığı koşul için kabul edilebilir. E&T mineralleri %30-15 gibi daha düşük serbestleşme sınıflarında ince boylara göre daha yoğun görülmektedir. E&T minerallerinin daha düşük alan yüzdesine sahip olduğu böyle bağlı tanelerin toplu flotasyon artığında kaybedilme olasılığı yüksektir.

### Cu konsantre

Bakır konsantresi de flotasyon beslemesi gibi 5 fraksiyondan oluşmaktadır ancak, +180µm ve -180+90µm fraksiyonlarında oldukça az malzeme kalması nedeniyle mineralojik analiz bu iki fraksiyona

uygulanmamıştır. Fraksiyonel bazda yapılan kimyasal analize göre toplamdaki tenör değerleri %15,9 Cu, %43,3 S, %1,4 Pb, %2,92 Zn, %25,8 Fe ve %4,9 As'dir (Çizelge 5). Galen ve sfaleritin de bir miktar konsantreye geldiği görülmektedir. Fe içeriğinin ana kaynağının pirit olduğu da Çizelge 6'da verilen modal analizden anlaşılmaktadır.

Cu konsantresinin modal mineralojik analiz sonucuna göre, E&T mineralleri fraksiyonlarda yakın miktarlarda dağılmakta, diğer önemli Cu minerali olan kalp pirit ise %2-3,1 civarında bulunmaktadır. Tüm Cu minerallerinin serbest ve bağlı formdaki fraksiyonel dağılımı Şekil 4'de grafiklendirilmiştir.

Şekil 4'te verilen üç boyutlu grafiğe göre, serbest E&T minerallerinin miktarı fraksiyonlar içinde %1,2-7,3 arasında değişmektedir. Bağlı formda olan E&T taneleri ise genellikle piritle -45µm boyutunda ve NSG mineralleri ile daha iri boylarda kenetlenme göstermektedir. İncelenen 3 fraksiyonda da serbest pirit miktarı dikkat çekicidir. Serbest pirit %3,7-22 oranında görülmekte özellikle ince boylarda bir miktar artış eğiliminde olmaktadır. Özellikle en ince boy olan -20µm'de serbest piritin konsantrede kazanım mekanizması için suyla taşınımından söz edilebilir. Literatürdeki pek çok araştırma serbest gang tanelerinin 45µm'den irilerinin konsantreye ancak gerçek flotasyonla kazanılacağını ifade etmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 45µm'den iri fraksiyonda yaklaşık %5 kadar serbest pirit bulunmaktadır. Bu durum, bu tanelerin konsantreye gerçek flotasyonla kazanıldı-

Çizelge 2. Flotasyon beslemesinin fraksiyonel kimyasal analizi.

Table 2. Chemical analysis of flotation feed on size basis.

	Ağırlık, %	Cu, %	S, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	As, %
+180µm	7,88	0,11	4,52	0,012	0,02	3,85	0,06
-180+90µm	20,25	0,35	7,96	0,027	0,10	6,40	0,13
-90+45µm	20,70	1,25	19,82	0,079	0,24	15,30	0,33
-45+20µm	15,31	1,48	23,90	0,115	0,24	19,50	0,39
-20µm	35,86	1,52	15,44	0,15	0,20	12,94	0,47
Toplam	100,00	1,11	15,27	0,10	0,18	12,39	0,33

Çizelge 3. Flotasyon beslemesinin fraksiyonel modal mineralojik analizi.

Table 3. Modal mineralogical analysis of flotation feed on size basis.

	Cp	Sp	Py	Gal	Bor	NSG	E&T	Toplam
+180µm	0,00	0,00	2,24	0,00	0,00	97,45	0,30	100,00
-180+90µm	0,08	0,10	7,57	0,00	0,00	91,70	0,55	100,00
-90+45µm	0,17	0,45	34,16	0,00	0,00	62,52	2,71	100,00
-45+20µm	0,42	0,72	33,51	0,07	0,13	62,72	2,43	100,00
-20µm	0,36	0,31	29,98	0,08	0,06	66,01	3,20	100,00

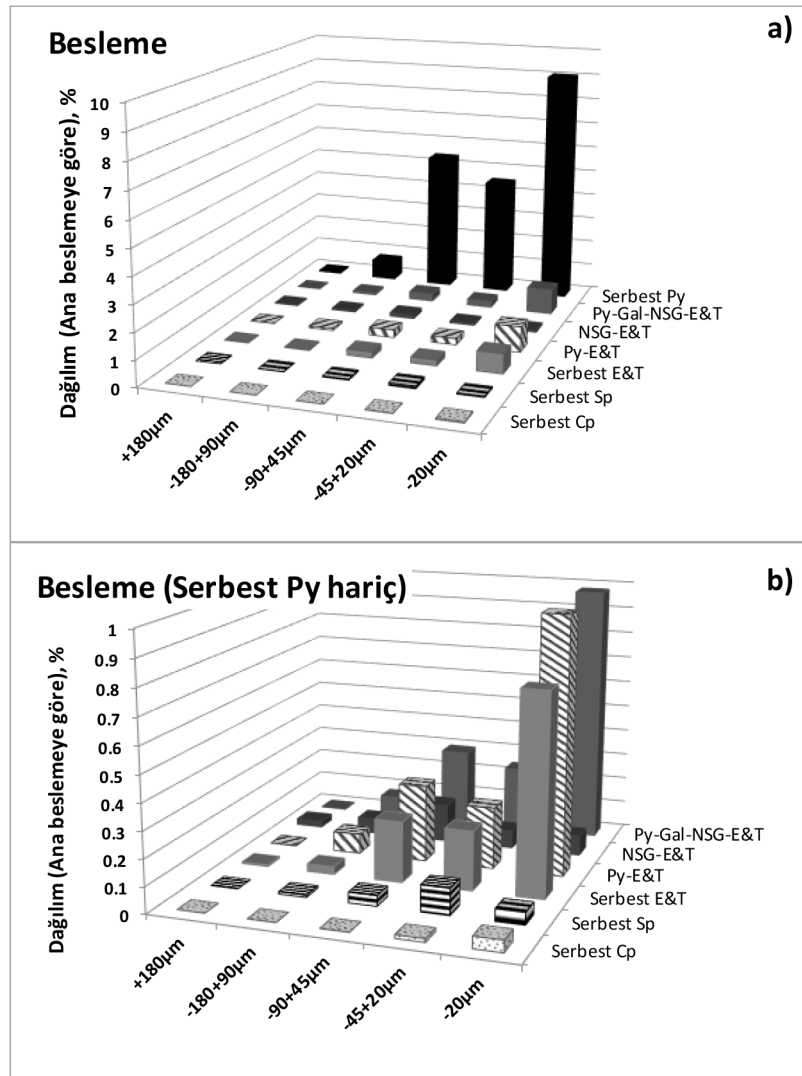
ğını ve dolayısıyla tesisteki flotasyon kimyasının çok uygun olmadığını işaret etmektedir. Flotasyon tesisinde, toplayıcı olarak Potasyum Amil Ksantat (PAX) pH 12 değerinde kullanılmaktadır. PAX sülfürlü mineral flotasyonunda iyi bilinen kuvvetli bir toplayıcı olup özellikle sülfürlü mineraller arasında seçimliliğin ön planda olmadığı toplu flotasyon koşullarında genellikle tercih edilmektedir. Dolayısıyla, pirit tanelerinin gerçek flotasyonla konsantrede kazanılmasında en önemli nedenin PAX olabileceği öngörülebilir. Buna ek olarak, su kimyası ve özellikle Ca iyonlarının varlığı da dikkate alınmalıdır. Çünkü, Ca iyonlarının hidroksil bileşikleri yüksek pH değerinde sülfür minerallerinin yüzey elektrik yüklerini tersine çevirebilmekte ve anyonik karakterdeki PAX iyonları elektrostatik etkileşim yoluyla mineral yüzeyine soğurulabilmektedir.

E&T mineralleri ile kalkopiritin Cu konsantresindeki bağlı taneler içindeki dağılımı Çizelge 7'de verilmektedir. Daha serbest E&T minerallerinin -45µm boyunda olduğu ancak, daha az serbestleşme sınıfını tem-

sil eden %95-50 aralığında ise önemli miktarda bu minerallerin dağıldığı görülmektedir. Serbestleşme sınıfının <%30 aralığında ise flotasyon beslemesine oranla daha az miktarda tane olduğu görülmektedir. Bu da toplu flotasyon aşamasında, bu sınıftaki bağlı tanelerin kaybedildiği şeklinde yorumlanabilir. Toplu flotasyon artığının fraksiyonel kimyasal ve mineralojik analizi ile bu durum daha açık bir şekilde ortaya konulmalıdır. Kalkopiritin ise konsantreye hem serbest hem de bağlı tanelerinin kazanıldığı görülmektedir.

### Cu süpürme artışı

Cu süpürme artışı da diğer iki akış numunesi gibi 5 fraksiyonda elenmiş ancak +180µm fraksiyonunda analiz yapacak kadar numune kalmamıştır. Fraksiyonel bazda yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 8'de verilmektedir. Akışın Cu tenörü ~0,8 olup fraksiyon ağırlıkları göz önüne alındığında bakırın ~%45'inin 20µm'den daha ince boyda kaybedildiği görülmektedir.



Şekil 3. Flotasyon beslemesinin fraksiyonel bazda serbest ve bağlı tane dağılımı a) besleme b) besleme (serbest Py hariç).

Figure 3. Distribution of free and binary particles of flotation feed on size basis a) feed b) feed (except free Py).

Çizelge 4. Flotasyon beslemesinde E&T minerallerinin serbestleşme sınıflarına dağılımı.

Table 4. Distribution of E&T minerals to liberation classes in flotation feed.

	Serbestleşme Sınıfları, %							Toplam
	100-95	95-75	75-50	50-30	30-15	15-5	5-0	
+180µm	25,96	41,02	14,03	0,17	0,26	10,48	8,09	100,00
-180+90µm	26,70	20,98	15,06	8,66	13,14	6,22	9,23	100,00
-90+45µm	38,42	24,69	19,64	5,42	5,51	3,14	3,18	100,00
-45+20µm	60,81	11,91	13,42	2,60	3,67	4,46	3,13	100,00
-20µm	64,83	13,56	7,30	2,68	3,75	5,78	2,10	100,00

Çizelge 5. Cu konsantresinin fraksiyonel kimyasal analizi.

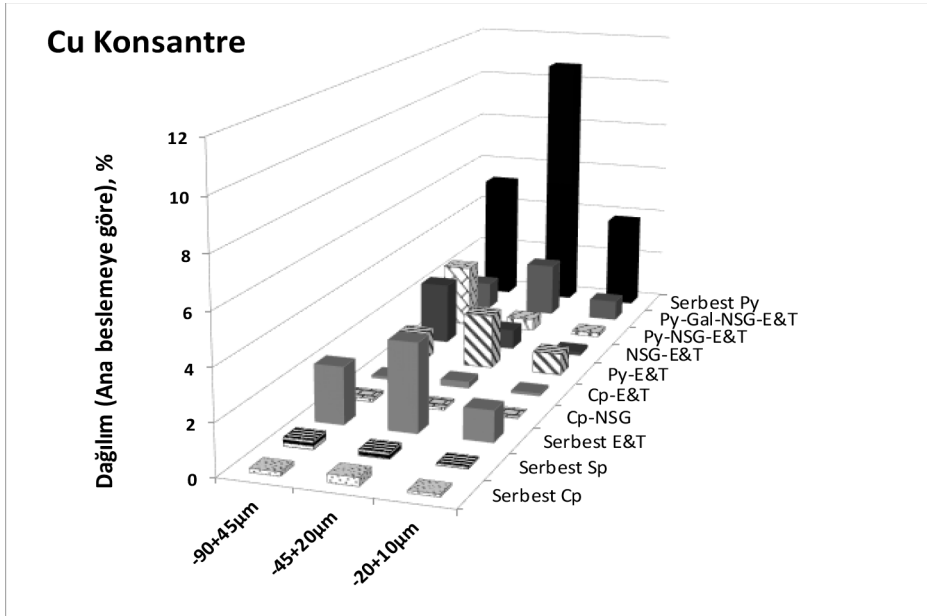
Table 5. Chemical analysis of Cu concentrate on size basis.

	Ağırlık, %	Cu, %	S, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	As, %
+180 $\mu$ m	0,25	-	-	-	-	-	-
-180+90 $\mu$ m	3,89	16,05	35,50	0,70	6,02	18,92	5,32
-90+45 $\mu$ m	23,27	15,21	43,43	1,49	3,32	24,95	4,79
-45+20 $\mu$ m	24,18	12,66	46,74	1,47	2,25	29,00	4,01
-20 $\mu$ m	48,41	17,93	42,34	1,44	2,84	25,34	5,57
Toplam	100,00	15,91	43,29	1,42	2,92	25,82	4,99

Çizelge 6. Cu konsantresinin fraksiyonel modal mineralojik analizi.

Table 6. Modal mineralogical analysis of Cu concentrate on size basis.

	Cp	Sp	Py	Gal	Bor	NSG	E&T	Toplam
-90+45 $\mu$ m	2,24	3,49	46,98	0,30	0,57	23,23	23,19	100,00
-45+20 $\mu$ m	3,11	1,88	63,28	0,56	0,58	7,04	23,54	100,00
-20 $\mu$ m	2,36	1,99	62,87	0,44	0,49	6,81	25,04	100,00



Şekil 4. Cu konsantresinin fraksiyonel bazda serbest ve bağlı tane dağılımı.

Figure 4. Distribution of free and binary particles of Cu concentrate on size basis.



Çizelge 7. Cu konsantresinde E&T ve kalkopirit minerallerinin serbestleşme sınıflarına dağılımı.  
Table 7. Distribution of E&T and chalcopyrite minerals to liberation classes in Cu concentrate.

Enargit&Tennantit	Serbestleşme Sınıfları, %							Toplam
	100-95	95-75	75-50	50-30	30-15	15-5	5-0	
-90+45µm	40,66	25,13	14,85	9,56	6,31	2,43	1,06	100,00
-45+20µm	63,85	14,32	10,20	5,33	2,52	2,37	1,41	100,00
-20+10µm	67,76	11,68	9,15	5,89	3,30	1,66	0,57	100,00
CU CONC	Liberation Classes, %							Toplam
Kalkopirit	100-95	95-75	75-50	50-30	30-15	15-5	5-0	
-90+45µm	30,83	23,24	18,82	5,94	12,75	7,03	1,38	100,00
-45+20µm	45,67	17,28	19,32	8,53	6,01	2,76	0,44	100,00
-20+10µm	46,35	14,78	18,78	11,89	5,05	2,41	0,75	100,00

Çizelge 9'da verilen modal mineralojik analiz sonuçları ise, kalkopirit gibi diğer majör Cu mineral miktarının bu akışta ihmal edilebilir oranda düşük olduğu için asıl Cu kaybının E&T minerallerinden kaynaklandığını işaret etmektedir.

Artıktaki Cu kaybının E&T minerallerinden kaynaklandığının belirlenmesi üzerine bu kayıpların serbest ya da bağlı tane gibi hangi formda olduğunu gösteren fraksiyonel bazda 3 boyutlu serbestleşme grafiği çizilmiştir (Şekil 5). Serbest E&T mineralleri görüldüğü gibi sadece -20µm tane boyundadır. -45µm fraksiyonunun ağırlıkça oranının yüksek olması nedeniyle ikili ve çoklu bağlı tanelerin de bu boyun altında yoğunlaştığı görülmektedir. E&T minerallerinin bu bağlı tane sınıflarına dağılımına bakılacak olursa, 20µm'den iri tanelerin çoğunun %50'den daha düşük serbestleşme sınıflarında olduğu görülmektedir. Yüzde 75 ve üstündeki serbestleşme sınıflarında ise E&T minerallerinin ~%60'ı -20µm fraksiyonunda olup bu tanelerin uygun flotasyon kimyası ve hidrodinamiğinin ayarlandığı koşullarda kazanılması mümkün olabilir. Ancak, 20µm'den daha iri tanelerde serbestleşmeyi artırmak için ince öğütme gerekmektedir (Çizelge 10).

Çizelge 1'de verilen tesis ölçüm bazlı madde denkliliği sonuçlarına göre, Cu süpürme artığının tonajı 50,9 t/s, Cu tenörü ve verimi ise sırasıyla %0,6 ve %10,6 olarak hesaplanmıştır. Fraksiyonel yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre ise bu akışın ortalama tenörü %0,8 Cu olarak ölçülmüştür. Tesisin akım şemasında (Şekil 1), Cu kaba flotasyon bankına Cu süpürme

konsantresi ve SFR2 (Stage Flotation Reactor) temizleme artığının geri çevrildiği görülmektedir. Ancak geri dönen bu akışlardaki Cu metal miktarı %150 olup oldukça yüksektir. Cu süpürme artığındaki bakır kaybının önemli nedenlerinden biri olarak bu yüksek devreden yük miktarı dikkate alınmalıdır. Çizelge 11'de toplam Cu metal kaybının 0,4 t/s olduğu ve bunun neredeyse yarısının -20µm fraksiyonundan kaynaklandığı görülmektedir. Şekil 5 ve Çizelge 11 birlikte incelendiğinde, bakırın %44,3'ünün bu fraksiyonda biriktiği ve E&T mineral tanelerinin yaklaşık %60'ının serbest formda olduğu görülmektedir. Bu miktar flotasyon beslemesindeki %2,8'lik kısma yani saatte 101 kg bakıra karşılık gelmektedir. Diğer tane boyu fraksiyonlarındaki bakır kaybı, pirit ve NSG mineralleri ile bağlılık durumundan kaynaklanmaktadır.

Cu süpürme artığının proses mineraloji verileri ile madde denkliliğini içeren ilgili hesaplamalar, bakır verimini %3 oranında artırmanın mümkün olacağını göstermiştir. Bununla birlikte, ince tanelerin flotasyonunda karşılaşılan zorluklardan literatürde pek çok araştırmada bahsedilmektedir. İnce tanelerin düşük kazanım değerleri için, yetersiz flotasyon süresi, sülfürlü minerallerin yüzey oksidasyonu ve uygun olmayan hücre dinamiği gibi olası nedenler öne sürülmektedir. Cu kaba ve süpürme banklarındaki toplam flotasyon süresi yaklaşık 38 dakika olarak hesaplanmış olup bu süre yaklaşık %4 Cu tenörlü (toplu flotasyon konsantresi) bir bakır cevherinin flotasyonu için yeterlidir. Dolayısıyla, problem aşırı yüzey oksidasyonu

Çizelge 8. Cu süpürme artığının fraksiyonel kimyasal analizi.

Table 8. Chemical analysis of Cu scavenger tail on size basis.

	Ağırlık, %	Cu, %	S, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	As, %
+180µm	0,36	-	-	-	-	-	-
-180+90µm	8,04	0,63	21,01	0,05	0,04	16,77	0,16
-90+45µm	25,87	0,79	41,55	0,08	0,04	32,87	0,13
-45+20µm	24,2	0,67	47,38	0,06	0,19	36,27	0,08
-20µm	41,53	0,81	41,81	0,09	0,03	35,69	0,20
Toplam	100,00	0,75	41,27	0,08	0,07	33,45	0,15

Çizelge 9. Cu süpürme artığının fraksiyonel modal mineralojik analizi.

Table 9. Modal mineralogical analysis of Cu scavenger tail on size basis.

	Cp	Sp	Py	Gal	Bor	NSG	E&T	Toplam
-180+90µm	0,01	0,01	20,83	0,00	0,00	78,84	0,30	100,00
-90+45µm	0,02	0,02	60,44	0,00	0,00	39,21	0,30	100,00
-45+20µm	0,01	0,06	82,35	0,01	0,00	17,25	0,32	100,00
-20µm	0,01	0,05	80,02	0,00	0,02	19,44	0,46	100,00

Çizelge 10. Cu süpürme artığında E&amp;T minerallerinin serbestleşme sınıflarına dağılımı.

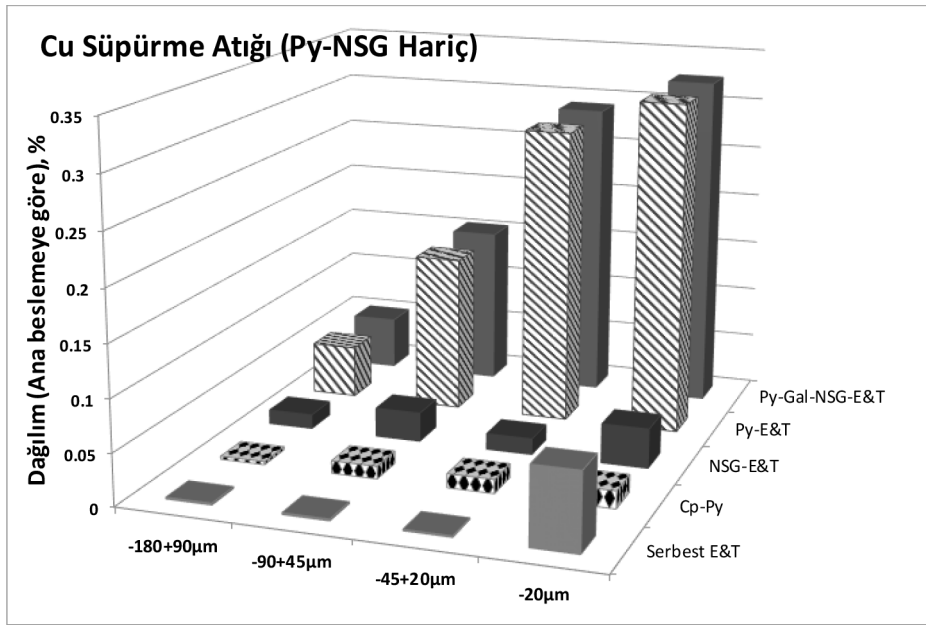
Table 10. Distribution of E&amp;T minerals to liberation classes in Cu scavenger tail.

	Serbestleşme Sınıfları, %							Toplam
	100-95	95-75	75-50	50-30	30-15	15-5	5-0	
-180+90µm	7,02	1,71	7,58	8,55	23,28	22,96	28,91	100,00
-90+45µm	2,08	3,03	1,88	9,56	24,34	35,06	24,05	100,00
-45+20µm	1,62	0,71	1,05	11,52	15,90	44,64	24,56	100,00
-20µm	38,40	20,74	2,23	3,58	6,97	11,25	16,82	100,00

ve/veya hücre dinamiğine bağlı olabilir. Madde denkliği hesaplamaları, Cu süpürme konsantrinden ve SFR2 artığından Cu kaba devresine gelen devreden yükün oldukça yüksek (yaklaşık %150) olduğunu göstermiştir. Yüksek devreden yük, aynı zamanda Cu süpürme artığından bakır kaybının ana nedenlerinden biri olarak görülmelidir.

### Bakır (Cu) ve Pirit (Py) Konsantrelerinde Altın (Au) Davranımı

Bakır ve pirit konsantrelerinin mineralojik analizleri ActLab (Kanada)'da bulunan FEI QUANTA 650F model taramalı elektron mikroskopla ve özel bir yazılımla donatılmış QemSCAN cihazıyla yapılmıştır. Özellikle altına yönelik analizde, 1 pikselin 1 mikron olduğu eser mineral tayini olarak adlandırılan SMS (Specific Mineral Search) modu kullanılmıştır.



Şekil 5. Cu süpürme artığının fraksiyonel bazda serbest ve bağlı tane dağılımı.  
Figure 5. Distribution of free and binary particles of Cu scavenger tail on size basis.

Çizelge 11. Cu süpürme artığındaki malzeme ve Cu metal dağılımı.  
Table 11. Distribution of material and Cu metal in Cu scavenger tail.

	Ağırlık, %	Tonaj, t/s	Cu, %	Cu, t/s	Cu dağılımı, %
+180µm	0,36	0,18	-	-	-
-180+90µm	8,04	4,09	0,63	0,03	6,77
-90+45µm	25,87	13,16	0,79	0,10	27,37
-45+20µm	24,20	12,31	0,67	0,08	21,59
-20µm	41,54	21,13	0,69	0,17	44,27
Toplam	100,00	50,87	0,75	0,38	100,00

### Bakır konsantre

Cu konsantresinde -90+45 µm, -45+20 µm ve -20 µm fraksiyonları analiz edilmiş, mineral miktarlarını ifade eden modal mineraloji ağırlık bazında Çizelge 12'de sunulmuştur. Altın taneleri, nabit ve Au-Sb alaşım formunda olmak üzere iki fazda görülürken, altının nabit formu özellikle -90+45 µm ve -45+20 µm fraksiyonlarında daha fazla dikkati çekmektedir. Altın için serbestleşme verisi serbest yüzey alanı cinsinden hesaplanmıştır. Serbest yüzey alanı ile tanımlanan serbestleşme verisi flotasyon açısından daha

anamlı olup ilgili mineralin tane yüzeyinde serbest olan kısmını ifade eder.

Nabit altın ve Au-Sb alaşımın Çizelge 13'de sunulan serbestleşme verilerine göre, eğer altın tanelerinin serbest yüzey alanı %10'dan küçükse o tane tamamen kenetli kabul edilmektedir. Eğer bu oran %10-75 aralığında ise o tanenin diğer minerallerle belirli oranlarda birlikte bulunduğunu, %75'den fazla olduğunda ise o tanenin serbest kabul edileceğini ifade etmektedir. Buna göre, nabit altın -45 µm boyutlarında serbestleşme göstermekte, daha iri boyda

Çizelge 12. Cu konsantresinin fraksiyonel modal mineraloji verileri.  
Table 12. Modal mineralogy data of Cu concentrate on size basis.

Tane Boyu	-90+45 µm	-45+20 µm	-20 µm
Nabit Altın	0,028	0,024	0,009
Au-Sb Alaşım	0,001	0,00	0,001
Enargit	23,68	18,65	20,85
Tennantit	0,18	0,15	0,07
Kalkopirit	3,31	2,84	7,17
Altere Kalkopirit	0,54	0,66	5,85
Kalkopirit (As içeren)	0,67	0,61	1,94
Bornit	0,92	0,86	0,75
Pirit	54,13	58,61	41,72
Altere Pirit	4,57	8,85	13,65
Sfalerit	3,75	2,25	2,11
Kalkozin	0,61	0,57	0,23
Kovellin	0,86	0,83	0,49
Barit	1,04	0,53	0,12
Kuvars	1,74	0,80	0,28
Diğerleri	3,97	3,77	4,76
Toplam	100,00	100,00	100,00

Çizelge 13. Cu konsantresindeki altın serbestleşme verileri.

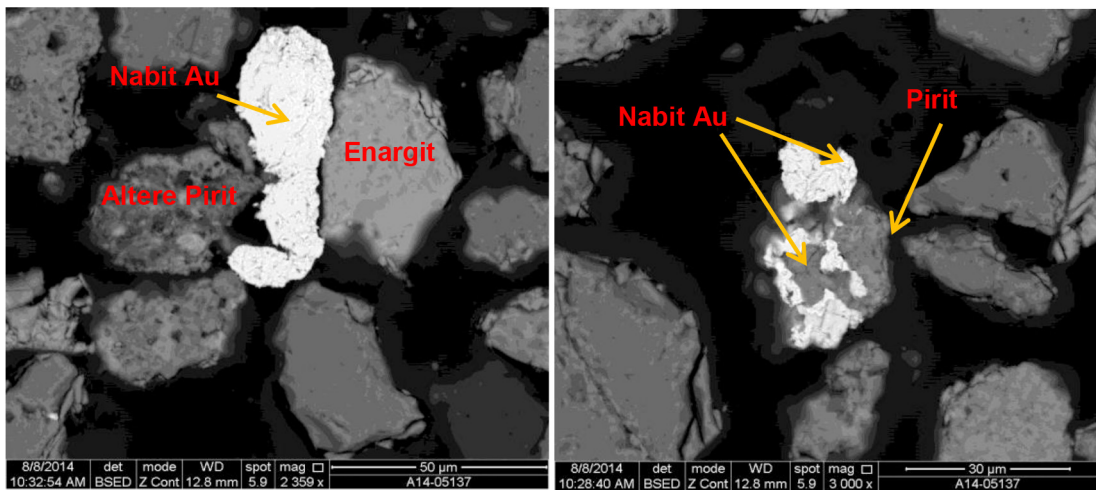
Table 13. Gold liberation data in Cu concentrate.

Nabit Altın Serbestleşme Verileri						
	Kenetli		Bağlı		Serbest	
Serbest Yüzey Alanı, %	<= 10	10-20	20-50	50-75	75-90	90-100
-90+45µm	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-45+20µm	4,17	0,00	33,22	0,00	62,60	0,00
-20µm	7,85	47,65	0,04	0,25	0,00	44,21
Au-Sb Serbestleşme Verileri						
	Kenetli		Bağlı		Serbest	
Serbest Yüzey Alanı, %	<= 10	10-20	20-50	50-75	75-90	90-100
-90+45µm	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-45+20µm	66,22	33,78	0,00	0,00	0,00	0,00
-20µm	28,32	4,06	6,68	56,96	0,17	3,80

Çizelge 14. Cu konsantresindeki altının bağlılık durumu.

Table 14. Gold association in Cu concentrate.

Tane Boyu	-20 $\mu$ m		-45+20 $\mu$ m		-90+45 $\mu$ m	
	Nabit Altın	Au-Sb Alaşım	Nabit Altın	Au-Sb Alaşım	Nabit Altın	Au-Sb Alaşım
Nabit Altın	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00	4,55
Au-Sb Alaşım	0,00	0,00	0,32	0,00	1,67	0,00
Frayberjit (düşük Fe-Sb_S az Ag)	0,00	1,54	0,97	0,00	0,00	0,00
Enargit	16,67	5,38	11,94	32,69	0,83	61,36
Kalkopirit	0,00	3,08	5,48	0,00	0,00	2,27
Altere Kalkopirit	5,56	0,00	0,97	0,00	0,83	11,36
Pirit	52,78	59,23	30,32	51,92	95,00	20,45
Altere Pirit	11,11	9,23	15,16	0,00	0,00	0,00
Galen	0,00	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00
Barit	0,00	7,69	0,00	0,00	0,00	0,00
Matris	13,89	13,85	28,39	13,46	0,83	0,00



Şekil 6. Cu konsantresindeki altın tanelerinin BSE görüntüleri.

Figure 6. BSE images of gold grains in Cu concentrate.

ise kenetli formda bulunmaktadır. Au-Sb alaşım taneleri ise çok daha az serbestleşmeye sahiptir.

Nabit altın ve Au-Sb tanelerinin hangi minerallerle bağlı olduğu bilgisi ise Çizelge 14'te verilmektedir. Nabit altın genellikle pirit, enargit ve altere piritle bağ-

lı olup özellikle +45  $\mu$ m'da %95'i piritle bulunmaktadır. Au-Sb alaşım tanelerinin ise %61,4'ü enargitle, %20,5'i ise piritle bağlıdır. İnce boylarda kompozit altın taneleri çoğunlukla pirit ve altere piritle birlikte bulunurken (%45-60), geri kalan kısmı ise enargitle birliktelik göstermektedir.

Çizelge 15. Py konsantresinin fraksiyonel modal mineraloji verileri.

Table 15. Modal mineralogy data of Py concentrate on size basis.

Tane Boyu	-180+90µm	-90+45 µm	-45+20 µm	-20 µm
Nabit Altın	0,01	0,00	0,00	0,00
Enargit	0,75	0,33	0,09	0,11
Kalkopirit	0,34	0,27	0,12	0,23
Altere Kalkopirit	0,09	0,08	0,05	0,27
Kalkopirit (As içeren)	0,11	0,08	0,04	0,09
Bornit	0,04	0,01	0,00	0,00
Pirit	62,40	82,78	82,86	64,84
Altere Pirit	3,51	7,72	12,93	28,25
Pirotit	0,15	0,21	0,34	0,10
Galen	0,03	0,02	0,01	0,00
Barit	0,35	0,22	0,09	0,02
Alunit	0,01	0,01	0,00	0,00
Rutil	0,09	0,05	0,03	0,01
Kuars	21,30	4,28	1,51	0,45
K-Feldspat	0,07	0,02	0,01	0,00
Plajiyoklas	0,69	0,14	0,05	0,01
Muskovit	0,21	0,06	0,02	0,01
Kaolinit	4,20	0,94	0,27	0,06
Pirofillit	0,47	0,12	0,06	0,02
Pirit-Kil Karışımı	4,43	2,25	1,31	4,90
Diğerleri	0,73	0,39	0,24	0,63
Toplam	100,00	100,00	100,00	100,00

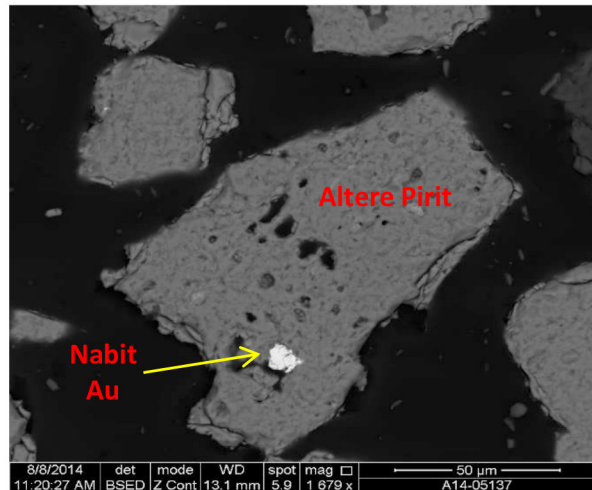
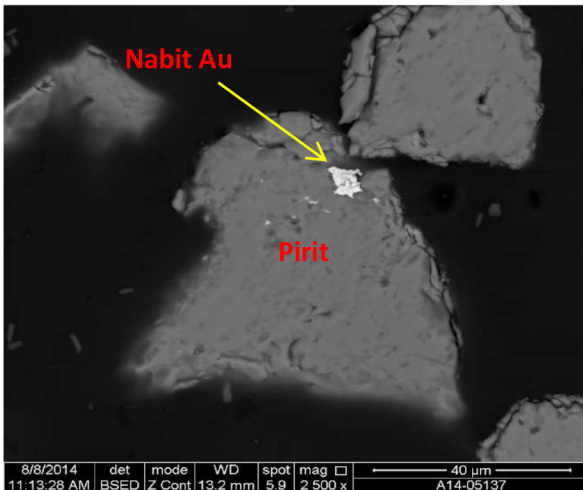
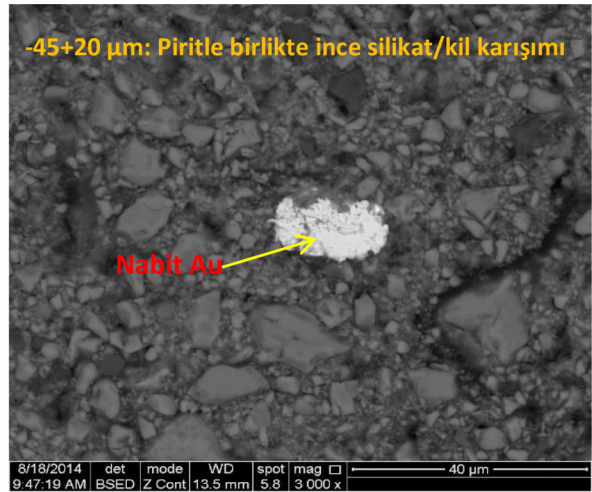
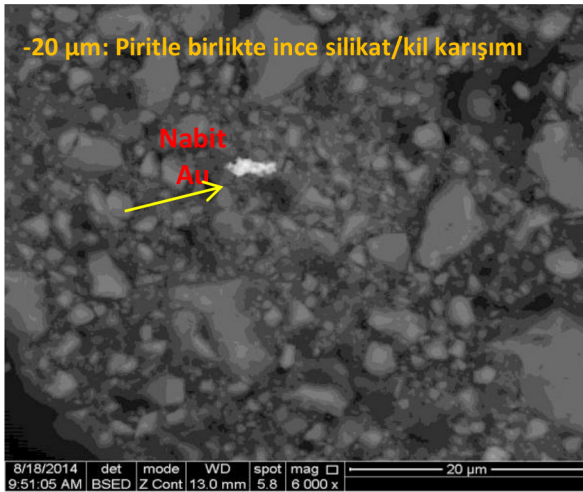
Yapılan mineralojik analizde nabit altın tanelerinin %80'inin 20 µm'den daha küçük olduğu, Au-Sb tanelerinin ise daha ince boylarda olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, Cu konsantreden yerçekimiyle kazanılabilir altın (GRG-gravity recoverable gold) üretimi an-

cak çok ince tane boyunda mümkün görünmektedir. Nabit altın tanelerinin diğer minerallerle olan bağlılığı Şekil 6'da verilen geri saçınımlı elektron (BSE) görüntülerinden görülmektedir.

Çizelge 16. Py konsantresindeki altının bağlılık durumu.

Table 16. Gold association in Py concentrate.

Tane Boyu	-20 $\mu$ m	-45+20 $\mu$ m	-90+45 $\mu$ m	-180+90 $\mu$ m
	Nabit Altın	Nabit Altın	Nabit Altın	Nabit Altın
Kalkopirit	0,00	0,00	0,00	0,00
Altere Kalkopirit	0,00	0,00	2,38	0,00
Bornit	0,00	0,00	0,00	7,29
Pirit	16,67	14,29	92,86	90,63
Altere Pirit	0,00	4,76	0,00	0,00
Galen	0,00	0,00	0,00	2,08
Kovelin	0,00	0,00	2,38	0,00
Matris	83,33	80,95	2,38	0,00



Şekil 7. Py konsantresindeki altın tanelerinin BSE görüntüleri.

Figure 7. BSE images of gold grains in Py concentrate.

## Pirit konsantre

Pirit konsantresinin QemSCAN ile analizi 4 tane boyu fraksiyonunda ağırlıkça yüzde bazında yapılmış ve konsantrenin toplam Cu içeriğinin %0,8 olduğu, bunun da çoğunlukla -90 µm fraksiyonlarına dağıldığı belirlenmiştir. Fraksiyonel bazda modal mineraloji verileri Çizelge 15'te verilmektedir. Buna göre majör mineraller pirit ve altere pirit olup bazı silikatlar ve killere de rastlanmaktadır. Ana bakır minerali enargittir. Bu konsantrede altın taneleri beklenildiğinden daha az miktarda tespit edilmiş olup genellikle ince tane boyu fraksiyonlarındadır. Özellikle -45+20 µm ve -20 µm fraksiyonlarından tekrarlı parlak kesitler hazırlanarak analizler yinelenmiştir. Ancak sonucun değişmediği görülmüş, bu durum iki olasılıkla yorumlanmıştır:

- Görünür altının yanında, piritler içinde görünmez veya mikronaltı tane boyunda altın taneleri olabilir; bu da sadece EMPA (Electron Microprobe Analysis) veya Lazer ablasyon analizi ile belirlenebilir,
- Bu iki ince fraksiyonda, altın toz haline getirilmiş olabilir (altın sertliği: 2,5-3) ve toz halindeki altın tanelerinin mineral taneleri arasında gömülü ya da gizlenmiş halde bulunması olabilir. Altın arama için 1 mikron piksel boyutunun kullanıldığı ve tekrarlama analiz sırasında numunenin yaklaşık 1000 kat büyütmede ve hatta bazen 10000'de tarandığı düşünüldüğünde bu altın tanelerinin gerçekten çok ince boyda olması gerekmektedir.

10 µm'den daha ince boyda görülen altın tanelerinin serbest yüzeylerinin oldukça sınırlı olduğu ve genellikle pirit ile ince silikat/kil/pirit karışımının olduğu matrisle bağlı olduğu görülmüştür (Çizelge 16 ve Şekil 7).

## SONUÇLAR

Detaylı kantitatif mineralojik analiz, altın içeren kompleks bir Cu-As sülfürlü cevherin tesis ölçeğinde flotasyon davranımının çok daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Yapılan mineralojik ölçümler sayesinde tesisin genel performansı hakkında oldukça değerli bilgiler elde edilmiş, konsantre kirliliğini azaltacak ve verimi yükseltecek, tesis işleyişine yönelik iyileştirmeler önerilebilmiştir. Varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Enargit ve tennantit minerallerinin serbestleşme derecesi -45 µm tane boyunda sadece %60 civarında olup bakır minerallerinin %70'i bu boyun altında biriktirmektedir. Bu nedenle, serbestleşmeyi sağlayabilmek için daha ince tane boyuna öğütme yapmak gerekmektedir. Ancak, bu kararı vermeden önce kaba flotasyon artığındaki minerallerin serbestleşme ve bağlılık durumlarını kontrol etmek gerekir. Çünkü kaba flotasyon artığı hem nihai artığın ana bileşeni hem de bakırın %7,6'lık kısmının kaybedildiği bir akıştır.
- Bakır konsantreyi kirlüten ana unsurun serbest pirit mineral tanelerinin olduğu belirlenmiştir. Özellikle 45 µm'den daha iri boylarda serbest pirit tanelerinin varlığının flotasyon kimyasının uygun olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu anlamda toplayıcı tipi ve su kimyasının dikkate alındığı test çalışmalarının yapılması önerilmektedir.
- Flotasyon devresindeki en büyük bakır kaybının Cu süpürme artığı akışından olduğu belirlenmiştir. Enargit ve tennantit mineralleri -20 µm fraksiyonundan %60'ı serbest halde kaybedilmekte, bu da beslemedeki toplam bakır metalinin %2,8'ine karşılık gelmektedir. Diğer bir deyişle saatte 101 kg bakır artığa gitmektedir. İnce tanelerin düşük verim probleminin kaynağı olarak aşırı yüzey oksitlenmesi ve/veya hücre hidrodinamiği öngörülmektedir. Bakır kaybına diğer bir sebep de kaba flotasyona devresine Cu süpürme konsantresi ve SFR2 artığından gelen yüksek devreden yüklerdir.
- Devredeki altının nabit ve Au-Sb alaşım formunda olduğu da yine detaylı mineralojik analizlerle belirlenmiştir. Cu konsantresinden özellikle nabit altının çok ince tane boylarında yerçekimi ile kazanılabileceği öngörüldükten, pirit konsantresinde altının serbest hale gelebilmesi için çok daha ince boyda besleme yapmanın gerekli olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Curreli, L., Ghiani, M., Surracco, M. And Orr, G., 2005. Beneficiation of a gold bearing enargite ore by flotation and As leaching with Na-hypochlorite. Minerals Engineering, 18, 849-854.



- Cabri, L.J., Beattie, M., Rudashevsky, N.S. and Rudashevsky, V.N., 2005. Process mineralogy of Au, Pd and Pt ores from the Skaergaard intrusion, Greenland, using new technology. *Minerals Engineering*, 18, 887–897.
- Lotter, N.O., Bradshaw, D.J. and Barnes, A.R., 2016. Classification of the Major Copper Sulphides into semiconductor types, and associated flotation characteristics. *Minerals Engineering*, 96–97, 177–184.
- Fornasiero, D., Fullston, D., Li, C. and Ralston, J., 2001. Separation of enargite and tennantite from non-arsenic copper sulfide minerals by selective oxidation or dissolution. *Int. J. Miner. Process.*, 61, 109–119.
- Lund, C., Lamberg, P. and Lindberg, T., 2015. Development of a geometallurgical framework to quantify mineral textures for process prediction. *Minerals Engineering*, 82, 61–77.
- Petruk, W., 2000. *Applied Mineralogy in the Mining Industry*. Elsevier Science, The Netherlands.
- Plackowski, C., Nguyen, A. V. and Bruckard, W. J. 2012. A critical review of surface properties and selective flotation of enargite in sulphide systems. *Minerals Engineering*, 30, 1–11.
- Sutherland, D., 1998a, Improving plant performance through process mineralogy. *Cu '98 –Australian Copper Forum*.
- Sutherland, D., 1998b, Applications of quantitative process mineralogy through the mining cycle. *AusIMM Annual Conference: The Mining Cycle, Mt Isa, Qld*, pp. 333–337.
- Sutherland, D., 2007. Estimation of mineral grain size using automated mineralogy. *Minerals Engineering*, 20, 452–460.
- Tungpalan, K., Wightman, E. and Manlapig, E., 2015. Relating mineralogical and textural characteristics to flotation behaviour. *Minerals Engineering*, 82, 136–140.

