

**ALTIN KAZANIMINDA FLAŞ FLOTASYON VE GRAVİTE İLE
ZENGİNLEŞTİRME PROSESLERİNİN PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

**COMPARISON OF FLASH FLOTATION AND GRAVITY
SEPARATION PERFORMANCE IN GOLD RECOVERY**

EMRE ERKAN

PROF. DR. ZAFİR EKMEKÇİ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Doktora Tezi olarak yazılmıştır.

2022

Bir tanecik kızıma ...

ÖZET

ALTIN KAZANIMINDA FLAŞ FLOTASYON VE GRAVİTE İLE ZENGİNLEŞTİRME PROSESLERİNİN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Emre ERKAN

Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ

Eş Danışmanı: Prof. Dr. Emre ALTUN

Nisan 2022, 101 sayfa

Altın ve altına bağlı sülfür minerallerinin geri kazanılması çok aşamalı kazanım işlemi gerekmektedir. Serbest altın tanelerinin aşırı öğütülmesini önlemek için öğütme devrelerinden itibaren kazanım prosesleri başlamaktadır. Altının yüksek özkütlesinden dolayı, altın taneleri hidrosiklon alt akımına gitme eğiliminde olup devreden yükte metal miktarı artmaktadır. Son yıllarda öğütme devreleri, serbest altın veya altın içeren tanelerin kazanımını artırmak için tasarlanmaktadır. Gravite (Yer çekimi ile zenginleştirme) ve flaş flotasyon prosesleri öğütme devreleri içinde kullanılan en yaygın altın kazanım prosesleridir. Bu çalışmada, gravite, flaş flotasyon ve geleneksel sülfür minerali flotasyonu içeren farklı akım şemaları üzerinde modelleme simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Standart GRG, flaş ve kaba flotasyon kinetik testleri bu modelleme çalışmaları için kullanılmıştır. Laboratuvar ölçekli yapılan testlere göre flaş flotasyon, gravite işlemine göre altın kazanımı %7 ve sülfür kazanımında %17 daha yüksek gerçekleşmiştir. Fakat gravite ile zenginleştirmede elde edilen konsantrenin tenörleri daha yüksek gerçekleşmiştir.

Bu nedenle, cevherin karakterine bağlı olarak altın kazanımı için bu proseslerden biri ya da birden fazlası birlikte seçilebilir. Simülasyon çalışmalarında, farklı akım şemaları üzerinde altın kazanım performansları gösterilmiştir. Bu yöntem, özellikle geliştirilme aşamasındaki projelerin akım şeması geliştirme aşamasında kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Altın kazanım, gravite, flaş ve kaba flotasyon, serbest ve iri taneli altın,

ABSTRACT

COMPARISON OF FLASH FLOTATION AND GRAVITY SEPERATION PERFORMANCE IN GOLD RECOVERY

Emre ERKAN

Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Zafir EKMEKCI

Co- Supervisor: Prof. Dr. Emre ALTUN

April 2022, 101 pages

Recovery of gold and gold-containing sulfide mineral particles requires multiple-stage recovery processes starting from the grinding circuits to avoid over-grinding of the liberated gold particles. Due to high density, these gold grains tend to follow the hydrocyclone underflow, and a significant amount of metal increases in the circulating load. Therefore, in recent years the grinding circuits have been designed to improve the recovery of free gold/gold-containing particles in the grinding circuit. Gravity separation (centrifugal gravity separators) and flash flotation processes are commonly used for gold recovery in the grinding circuit. This study used a methodology based on modeling-simulation studies to assess various flowsheet configurations involving flash flotation, gravity separation, and the conventional sulfide mineral flotation process. The standard GRG, flash flotation, and rougher kinetic tests were used for the model development of each process. The laboratory tests and simulation studies showed that gold and sulfur recoveries in flash flotation were approximately 7% and 17% higher than that of the gravity separation process. However, the grade of the gravity concentrate was considerably higher. Therefore, one of these unit processes or their combinations can be selected depending on the ore characteristics and the aim of the recovery process. Simulation studies were performed to illustrate the gold recovery performance of various

flowsheet configurations. This methodology could be used effectively for flowsheet development, particularly for greenfield projects.

Keywords: gold, recovery, flash flotation, gravity, rougher flotation,

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Altın Mineralleri	3
2.1.1. Nabit Altın.....	3
2.1.2. Elektrum	4
2.1.3. Altın Tellürler.....	4
2.1.4. Diğer Altın Mineralleri.....	4
2.1.5. Sülfürlü Cevherlerde Altın	4
2.2. Altınlı Cevherlerin Sınıflandırılması	5
2.2.1. Birincil Cevherler	6
2.2.2. İkincil Cevherler.....	12
2.3. Altın Kazanım Yöntemleri	14
2.3.1. Liç İşlemi.....	14
2.3.2. Amalgamasyon.....	20
2.3.3. Gravite (Yerçekimi) ile Zenginleştirme	21
2.3.4. Flotasyon	28
2.3.5. Gravite İle Zenginleştirme ve Flaş Flotasyon ile Altın Kazanımı.....	40
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44

3.1. Cevher Numunesinin Tanımlanması	44
3.2. Tez Kapsamında Yapılan Deneyler	49
3.2.1. E-GRG (Extended Gravity Recoverable Gold) Test Programı	51
3.2.2. Flaş Flotasyon Test Programı	55
3.3. Simülasyon Çalışmaları	58
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	60
4.1. E-GRG Test Programı Sonuçları	60
4.2. Flaş Flotasyon Test Programı Sonuçları	67
4.3. Kütle Denkliği	74
4.4. Simülasyon Çalışmaları	75
4.4.1. Senaryo #1 Hidrosiklon Alt Akımına Gravite İle Zenginleştirme ve Flaş Flotasyonu Ekipmanı Konulması	77
4.4.2. Senaryo #2 Değirmen Çıkışına Gravite ile Zenginleştirme ve Flaş Flotasyon Konulması	83
4.4.3. Senaryo #3 Hidrosiklon Beslemesine Gravite ile Zenginleştirme ve Flaş Flotasyon Konulması	85
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
6. KAYNAKLAR	93
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	99
TEZ ORJİNALLİK RAPORU	100
ÖZGEÇMİŞ	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Altın Cevherlerinin Sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.2.	Serbestleşmiş altın taneleri sülfür mineralleri ile birlikte	8
Şekil 2.3.	Altın tanelerinin sülfürlü mineraller içinde dağılmış halde bulunması.....	9
Şekil 2.4.	Altın siyanür liçi mekanizması.....	15
Şekil 2.5.	pH'a bağlı HCN miktarı	15
Şekil 2.6.	Refrakter cevherin özellikleri [27]	17
Şekil 2.7.	Refrakter altın cevherlerinde uygulanan prosesler	18
Şekil 2.8.	Bate Yöntemi.....	22
Şekil 2.9.	Yıkama Makinası	23
Şekil 2.10.	Jig işlemi basit çalışma prensibi.....	23
Şekil 2.11.	Sallantılı Masa.....	24
Şekil 2.12.	Spiral Zenginleştirici Şematik Gösterimi	25
Şekil 2.13.	Santrifüj kuvvetli konsantretör şematik gösterimi	26
Şekil 2.14.	Flotasyon şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.15.	Toplayıcı mineral etkileşimi.....	30
Şekil 2.16.	Toplayıcıların Sınıflandırılması [52].....	32
Şekil 2.17.	Mineral-hava kabarcığı etkileşimi.....	33
Şekil 2.18.	Bakır ksansantın pirit yüzeyine soğurulma mekanizması [62]	36
Şekil 2.19.	Flaş flotasyon ve geleneksel flotasyon şematik gösterimi	38
Şekil 2.20.	Altın tanelerinin öğütme devresindeki davranışı	40
Şekil 2.21.	Hidrosiklon alt akımına gravite ekipmanı yerleştirildiğinde altının davranışı.....	41
Şekil 2.22.	Hidrosiklon beslemesine gravite ekipmanı konulursa altının davranışı.....	42
Şekil 3.1.	SEM Analizinden Görüntüler a) Soldaki örnekte altının pirit mineralinin dışında görüntülenmiştir b) Sağdaki örnekte ince altın taneleri pirit minerali içerisinde görüntülenmiştir.	45
Şekil 3.2.	Tanımlayıcı liç testi sonuçları	46
Şekil 3.3.	Test programı	49
Şekil 3.4.	Örnek hazırlama aşamasından bir görüntü	50
Şekil 3.5.	Çalışmada kullanılan Retsch PT100 model döner numune bölücü.....	50

Şekil 3.6.	E-GRG testi programı	51
Şekil 3.7.	E-GRG testi besleme tane boyu dağılımı	52
Şekil 3.8.	E-GRG testi öğütme kalibrasyonu	53
Şekil 3.9.	Siyanürleme Testi (Şişe Çevirme) düzeneği	55
Şekil 3.10.	Flaş flotasyon test programı	56
Şekil 3.11.	Simülasyon Çalışmalarında Kullanılan Akım Şeması	58
Şekil 3.12.	Simülasyon çalışmasında kullanılan tane boyu dağılımı	59
Şekil 4.1.	E-GRG testi kümülatif altın verimleri % - Nihai kazanıma göre.....	62
Şekil 4.2.	E-GRG testi fraksiyonlardaki altın verimleri %.....	62
Şekil 4.3.	E-GRG testi kümülatif verimler % - Nihai kazanıma göre.....	63
Şekil 4.4.	E-GRG testi fraksiyonların sülfür verimleri %	63
Şekil 4.5.	E-GRG atığı kaba flotasyon testi tenör-verim ilişkisi - Altın	65
Şekil 4.6.	E-GRG atığı kaba flotasyon testi tenör-verim ilişkisi -Sülfür.....	65
Şekil 4.7.	Fraksiyonlarda kümülatif altın verimleri % - E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon testi	66
Şekil 4.8.	Fraksiyonlarda kümülatif sülfür verimleri % - E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon testi	66
Şekil 4.9.	Flaş flotasyon altın verim - tenör ilişkisi.....	69
Şekil 4.10.	Flaş flotasyon sülfür verim - tenör ilişkisi	69
Şekil 4.11.	Fraksiyonlardaki altın tanelerinin flaş flotasyon kinetiği – Flaş flotasyon	70
Şekil 4.12.	Fraksiyonlardaki sülfür tanelerinin flaş flotasyon kinetiği – Flaş flotasyon	70
Şekil 4.13.	Flaş flotasyon atığı kaba flotasyon verim - tenör ilişkisi (Altın)	71
Şekil 4.14.	Flaş flotasyon atığı kaba flotasyon verim - tenör ilişkisi (Sülfür).....	72
Şekil 4.15.	Fraksiyonlardaki altın tanelerinin flotasyon kinetiği – Flaş atığı kaba flotasyon	73
Şekil 4.16.	Fraksiyonlardaki sülfür tanelerinin flotasyon kinetiği - Flaş atığı kaba flotasyon...	73
Şekil 4.17.	Hidrosiklon alt akışına (%50) gravite ile zenginleştirme ekipmanı konulması	78
Şekil 4.18.	Hidrosiklon alt akışına (%50) flaş flotasyon konulması	78
Şekil 4.19.	Gravite ile zenginleştirme seçeneğine temizleme devresi eklenmesi	80
Şekil 4.20.	Flaş flotasyon seçeneğine temizleme devresi eklenmesi	80
Şekil 4.21.	Hidrosiklon alt akışına gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon paralel şekilde konumlandırılması.....	81

Şekil 4.22.	Flaş konsantresinin gravite ile zenginleştirmeye verilmesi.....	82
Şekil 4.23.	Değirmen çıkışına gravite ile zenginleştirme ekipmanı konulması	84
Şekil 4.24.	Değirmen çıkışına flaş flotasyon konulması	84
Şekil 4.25.	Hidrosiklon beslemesine gravite ile zenginleştirme konulması	86
Şekil 4.26.	Hidrosiklon beslemesine flaş flotasyon konulması.....	86
Şekil 5.1.	Hidrosiklon alt akımına konulan gravite/flaş konsantreleri tane boyu dağılımı	91
Şekil 5.2.	Bilyalı değirmen çıkışına konulan gravite/flaş konsantreleri tane boyu dağılımı....	91
Şekil 5.3.	Hidrosiklon beslemesine konulan gravite/flaş konsantrelerinin tane boyu dağılımı.....	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Gravite ile Altın Kazanımının Liç işlemi Öncesindeki Faydaları [39]	27
Çizelge 2.2.	Gravite işleminin türüne göre faydaları [40]	28
Çizelge 3.1.	Cevherin kayaç ve Arsenik, Sülfat Sülfür ve Organik Karbon Analizi.....	44
Çizelge 3.2.	Kaba flotasyon testi	46
Çizelge 3.3.	Gravite atığına yapılan kaba flotasyon testi	47
Çizelge 3.4.	Optimum koşullarda gravite atığına yapılan kaba flotasyon testi sonuçları.....	48
Çizelge 3.5.	Flaş flotasyon ve kaba flotasyon testi sonucu	48
Çizelge 3.6.	Kaba flotasyon koşulları – E-GRG atığı.....	54
Çizelge 3.7.	Flaş flotasyon koşulları.....	57
Çizelge 3.8.	Kaba flotasyon koşulları – Flaş flotasyon atığı	57
Çizelge 4.1.	Teste kullanılan cevherin analiz yöntemleri ve sonuçları	60
Çizelge 4.2.	E-GRG testi besleme analizi.....	61
Çizelge 4.3.	E-GRG testi özet sonuçları	61
Çizelge 4.4.	E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon sonuçları	64
Çizelge 4.5.	Kaba flotasyon atığı liç testi	67
Çizelge 4.6.	Flaş flotasyon beslemesi fraksiyonlardaki altın ve sülfür dağılımı	68
Çizelge 4.7.	Flaş flotasyon testi sonuçları – Özet tablo.....	68
Çizelge 4.8.	Flaş flotasyon atığına yapılan kaba flotasyon test sonucu.....	71
Çizelge 4.9.	Flaş ve kaba flotasyon atığı liç testi sonucu	74
Çizelge 4.10.	E-GRG test programı kütle denklığı.....	74
Çizelge 4.11.	Flaş flotasyon test programı kütle denklığı	75
Çizelge 4.12.	Gravite ile zenginleştirmeye tanımlı verim değerleri %.....	76
Çizelge 4.13.	Flaş flotasyon tanımlı verim değerleri %	76
Çizelge 4.14.	Kaba flotasyon tanımlı verim değerleri%.....	77
Çizelge 5.1.	Tüm Senaryolar Özet Tablo	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% Yüzde

Kısaltmalar

g	Gram
Kg	Kilogram
°C	Santigrat Derece
g/t	gram ton
kg/m ³	Metreküp başına Kilogram
CIP	Çamurda Karbon
CIL	Liçte Karbon
CIC	Kolondaki Karbon
ICP	İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektroskopisi
AAS	Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi
FA	Ateş Analizi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SIMS	İkincil İyon Kütle Spektrometrisi
PAX	Potasyum Amil Ksantat
SIPX	Sodyum İzobutil Ksantant

1. GİRİŞ

Altın başta emtia olarak kullanılan ve direk paraya dönüştürülen değerli bir metal olmasının yanında iletken özellikleri sayesinde teknoloji içinde önemli bir metaldir. Eski çağlardan beri altına talep yoğundur ve günümüzde altın fiyatlarının yüksek olmasından dolayı altın kazanımları üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Altın üretimi altının mineralojisine, birlikte olduğu minerallerine, tane boyuna, metal içeriğine, kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Altın üretiminde başlıca kullanılan yöntemler aşağıdaki gibidir:

- Amalgamasyon
- Liç
- Gravite (yerçekimi) ile Zenginleştirme
- Flotasyon

Amalgamasyon, altının cıva ile bileşik yapabilme özelliğine dayanır. Altın-cıva arasındaki yüzey gerilimi, altın-su arasındaki yüzey geriliminden daha düşük olduğundan pulp içinde altın yüzeyleri cıva ile kaplanır. Genellikle iri taneli nabit altın içeren cevherlerin gravimetrik yolla zenginleştirilen konsantrelerine uygulanır. Amalgamasyon işlemi için altın yüzeyinin temiz olması gerekmektedir. Civanın çok zehirleyici olması ve kullanımının işçi sağlığını ve çevreyi olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle amalgamasyon ile altın üretimi azalmıştır. [1]

Altın içerikli oksitli cevherlerde altının kazanımı genellikle siyanür liçi yapılmaktadır. Siyanür liçi yönteminin cevherin tenör değeri ve rezerv durumuna göre tank liçi ve yığın liçi gibi farklı uygulamaları bulunmaktadır. Yığın liçi işlemi genel olarak cevherin belirli bir boyuta kırılıp geçirimsiz yüzeye (plastik jeomembran) serilerek bir cevher yığını oluşturulmasına ve bu yığının üzerine çeşitli noktalardan çözücü bir solüsyon verilmesine dayanmaktadır. Üstten verilen çözücü solüsyon cevher yığını içindeki değerli metalleri çözerek aşağı yönde süzülür ve yığının alt kısmından yüklü solüsyon şeklinde toplanıp çözünen altının kazanımı için altın kazanım devresine gönderilir. Altın tenörünün daha yüksek olduğu durumlarda altının serbestleşme boyutuna bağlı olarak kırma sonrası belirli bir boyuta öğütülen cevher karıştırılmalı tanklarda yine çözücü bir solüsyon kullanımı ile liçe tabi tutulur. Tank liçi adı verilen bu işlemde, metalürjik verimler ve

çözünme kinetiği yığın liçine göre daha yüksektir. [2] Gravite ile zenginleştirme yöntemi altın ve ana kayacın özgül ağırlığı farkından yararlanılarak yapılmaktadır. Elementer altının özgül ağırlığı 19.3 kg/m³ ve tipik ana kayacın özgül ağırlığı ise genellikle 2.6 kg/m³ civarındadır. Altının zenginleştirilmesinde, klasik gravite zenginleştirme yöntemleri/ekipmanları yerine merkezkaç kuvvetinden yararlanarak ince boyutlu taneleri ayırmak mümkündür. Söz konusu cihazlara örnek olarak Knelson ve Falcon konsantratörleri ile Kelsey Jig'i verilebilir. Bu cihazlarda, konvansiyonel gravite zenginleştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ağır ve hafif tanelerin ayrılması için altın ve ana kayacın tanecikleri arasında merkezkaç kuvvetinin etkisi ile çok daha etkin bir ayırım/zenginleştirme sağlanır. [3]

Gravite yönteminde olduğu gibi, flotasyon da sadece belirli koşullarda altın zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır. Genel olarak flotasyon işleminin uygulanabildiği iki tür altın cevheri vardır. Bunlardan birincisi; altının serbest olarak bulunduğu ancak, birlikte olduğu sülfürlü minerallerin kısmen veya tamamen okside oldukları cevherler, ikincisi ise altının serbest metalik halde veya tellüridler şeklinde bulunduğu cevherlerdir. Cevher içinde "refrakter" mineraller olduğunda, bu minerallerin siyanür liçi öncesinde alınması gerekir. Ama bazı cevherler için gravite ve siyanür liçi yöntemleri uygun değildir. Bu koşullar ortaya çıktığında, flotasyon yöntemi zorunlu olarak kullanılır. Genelde flotasyon işlemi, altın kazanımında bir ön zenginleştirme yöntemi olarak uygulanmaktadır. Çok az sayıdaki tesiste, flotasyondan elde edilen altın konsantrasyonu doğrudan izabeye gönderilmektedir. Genel uygulamada ise refrakter altın cevherlerinde altın mineralleri bağlı olduğu sülfür mineralleri birlikte yüzdürülür ve sonrasında elde edilen ön-konsantrasyon oksitleme işlemine tabi tutulur. Oksidasyona uğrayan ön-konsantrasyon liçi işleme uygun hale gelir. [4] Flaş flotasyon ise değirmen devresinde serbestleşmiş değerli minerallerin hızlıca öğütme ortamında uzaklaştırılarak aşırı öğütüp şlam üretimini en aza üretmek için kullanılan yöntemdir. Hidrosiklon alt akımına yerleştirilen flaş flotasyon hem bir sınıflandırıcı hem de bir cevher zenginleştirme ekipmanı gibi davranır. Çok iri taneler hücreden hızlıca atığa (by-pass) gider ve ince taneler ise karışma bölgesine geçer.

2. GENEL BİLGİLER

Altın minerali yeryüzü kabuğunda ortalama tenör 0.005 g/t olarak bulunmaktadır. Altın kazanımı, altın minerallerinin mineralojine göre değişiklik göstermektedir. Altın mineralojisi belirleyen değişenler aşağıdadır : [5]

- Altının oluşumu sırasında mineralojik ortam
- Altın tanelerinin dağılımı
- Ana ve yan kayacın mineral tipi
- Ana ve yan kayacın mineral tane boyu dağılımı
- Minerallerinin birliktelikleri
- Minerallerin alterasyonları
- Yukarıdaki maddelerin yatak içindeki değişimi

Bu maddelerin yanında altın kazanımında ekonomik, jeopolitik ve mühendislik gibi faktörler de etkilidir.

2.1. Altın Mineralleri

2.1.1. Nabit Altın

Nabit altının altın içeriği genellikle %85-%95 arasında değişmekte olup, bilinen en yüksek altın içeriği %99.8'dir. Saf altının özkütlesi 19.3kg/m^3 iken nabit altının genellikle özkütlesi ortalama $16.4-19.3\text{ kg/m}^3$ civarındadır. Eğer gang minerallerinden ayrılırsa 10 mikronun üzerinden yoğunluk farkı alınabilmektedir. Gravite konsantreleri oldukça seçimli bir şekilde gang veya diğer minerallerden ayrılmış şekilde olabilir. [6]

Saf altının erime noktası 1.064^0 C derece ve kaynama noktası 2.808^0 C derecedir. Kendine özgü ışığı yatsıtma özelliği ve çok yumuşak bir malzeme olan altın, bu özellikleri sayesinde parlak kesit mikroskopik incelemelerinde tespit edilebilir. Saf altın çok iyi elektrik ve termal iletkenidir. [7]

2.1.2. Elektrum

Altın bazen gümüş gibi diğer metallerle de alaşım şeklinde doğada bulunabilir. Bu alaşımda gümüş içeriği %25-%55 arasında ise, bu minerale elektrum denmektedir. İçeriğindeki gümüş miktarına göre rengi soluk sarı tonlarındadır. İçinde yer alan gümüşün saf özgül ağırlığı 10.5kg/m^3 olan mineralin özkütlesi $13.0\text{-}16.0\text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir.

2.1.3. Altın Tellürler

Altın tellür minerallerinin kimyası biraz kompleks bir yapıdadır. En yaygın altın içeren tellür mineralleri Silvanit ($(\text{Au,Ag})_2\text{Te}_4$), Kalaverit (AuTe_2), Petzit (Ag_3AuTe_2) ve daha az yaygın olan Krennerit (AuTe_2), Montbrayit (AuTe_3) ve Kostovit (CuAuTe_4) mineralleri doğada bulunmaktadır. Altın tellür mineralleri serbest altın ve sülfür mineralleri ile birlikte de bulunabilir. Altın tellür minerallerinin yoğunluğu $8.0\text{-}10.0\text{kg/m}^3$ ve rengi beyaz, gri ve siyah tonlarında olabilir. Altın tellür mineralleri ile birlikte en çok karşılaşılan gümüş minerali Hessit (Ag_2Te)'dir.

2.1.4. Diğer Altın Mineralleri

Altın çok nadir de olsa bizmut minerali olan (Au_2Bi) formunda da oluşabilir. Bu mineral adını Avustralya'daki Maldon bölgesinden almıştır. Özkütlesi 15.5 kg/m^3 olan Maldonit, Mohs sertliği $1.5\text{-}2.0$ 'dir. Siyanür solüsyonunda az çözünmektedir.

Altın ve Bakır nadir de olsa metalik birleşik oluşturarak Auricupride (AuCu_3) ve tetra-auricupride (AuCu_3) formu oluşturabilir.

2.1.5. Sülfürlü Cevherlerde Altın

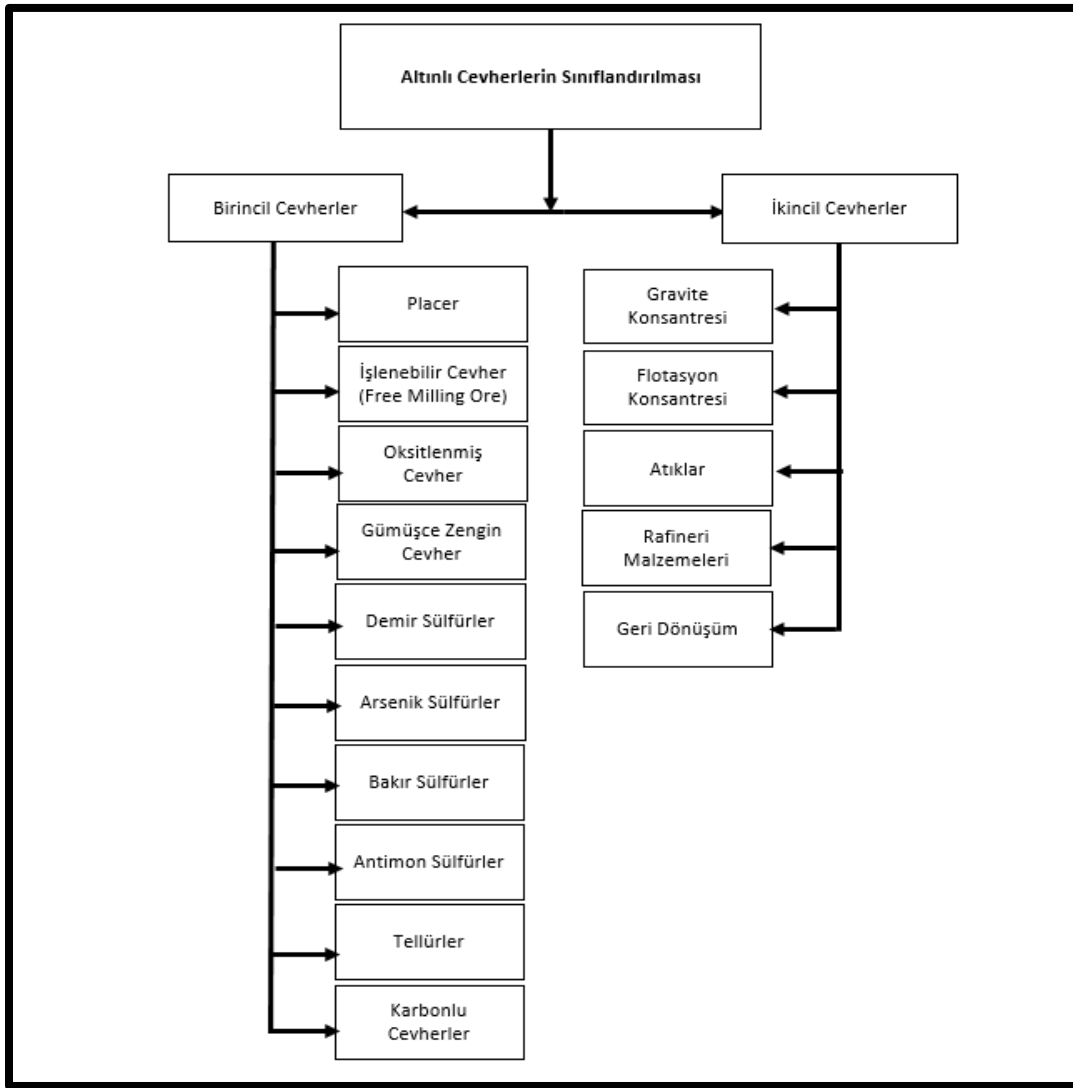
Altın çok ince taneler halinde sülfür minerallerinin içinde dağılmış halde de bulunabilir. Gözle görülemeyen bu ince altın taneleri aşağıdaki mineraller içinde olabilir:

- Arsenopirit (FeAsS)

- Pirit (Fe_2S)
- Tetrahedirit ($Cu_6[Cu_4(Fe,Zn)_2]Sb_4S_{13}$) ve Kalkopirit($CuFeS_2$)

2.2.Altınlı Cevherlerin Sınıflandırılması

Birincil ve ikincil altın kaynaklarının mineralojik ve tarihi karakterine göre sınıflandırılması Şekil 2.1.'de verilmiştir. [8]



Şekil 2.1. Altın Cevherlerinin Sınıflandırılması

2.2.1. Birincil Cevherler

Placer tipi altın cevherleri alüvyon, çökelti ve birikinti yatak oluşumu gibi birden fazla doğal işlem sonucunda oluşmuşlardır. Genellikle kırma ve öğütme gerektirmeyen cevherlerdir. Placer yataklar, altının birincil altın yatağından ayrılma ve hidrolik güçler tarafından taşınmasıyla oluşmaktadır. Bunun sebebi ise altının kimyasal olarak reaksiyonlara duyarlı olmaması ve ağır olmasından dolayı birincil altın yatağına göreceli olarak yakın bir ortamda birikmesidir.

İşlenebilir altın cevheri tanımı, tipik olarak endüstriyel uygulamasına göre yaklaşık %80'i 75 mikron civarına öğütülmüş, siyanür liçi ile %90 üstü altın kazanımlarla elde edilen ve bu işlem sırasında çok yüksek kimyasal tüketimlerine ihtiyaç duyulmayan cevhere yapılmıştır. Genel olarak Palaeo placer ve damar tipi kuvars cevherler olmak üzere iki sınıf işlenebilir altın cevheri bulunmaktadır. Palaeo placer tipi cevherler genç alüvyon tipi yataklardan proses açısından farklıdır. Bu tip yataklarda altın serbest olmadığı ve sağlam yapıda olduğu için kırma-eleme ve öğütme işlemleri yapılması gerekmektedir. Ayrıca bu tip cevherler için yeryüzünün derinliklerinde oluştuğu için önemli miktarda madencilik maliyetleri vardır.

Oksitlenmiş cevherler, ana sülfürlü cevher yatağındaki malzemenin oksitlenip bozulmasıyla oluşmuştur ve bazı özel yöntemlerle işlenebilir. Oksitlenme ve diğer hidrotermal alterasyon sayesinde kayaç yapısında bozulmalar oluşup kayaç boşluklu ve geçirgen bir hal alır. Bazen bu tip cevherlerde, cevherin geçirgen ve boşluklu yapısı sayesinde boyut küçültme yapılmadan tüvenan cevherde yüksek yığın liçi altın kazanımları alınmaktadır. Genel olarak oksitlenme derecesi artıkça altının serbestleşme derecesinin artmasına rağmen bazı durumlarda altın mineralinin yüzeyi sulu oksitli mineraller tarafından kaplanabilir. Böyle durumlarda çözücü kimyasal siyanür altın mineraline erişmez fakat yeterince iri boydaysa gravite ile zenginleştirilebilir. [9] Oksitlenmiş cevherlerde karıştırmalı tank liçi ya da yığın liçi uygulamaları ile altın kazanımı yapılabilir. Fakat büyük bir oranda kil ve kil mineralleri olan cevherler yığın liçi ve karıştırmalı tank liçi uygulamalarını etkiler.

Altın genellikle gümüş mineralleri ile birlikte bulunmasına rağmen gümüş tenörü 10 g/t üstünde ve altın minerali elektrik olduğu zaman uygulanacak proseste değişiklik yapılması gerekmektedir. Gümüş altından çok düşük bir değerde olmasına rağmen tesislere ciddi miktarda gelir getirmektedir. Eğer proses dizayn edilirken gümüş minerali dikkate alınmaz ise, yüksek gümüş kazanımı altın kazanımını düşürebilir. Siyanür solüsyon ortamında elektrik mineralinin yüzeyinde sülfür iyonları 1-2 mikron kalınlığında gümüş sülfür oluşturur. Bu da çözünme kinetiğini ve değerli metallere (altın ve gümüş) kazanımını düşürür. Bu tür cevher kaplamaları parçalı bir oksitlenme veya gümüş sülfatın gümüş okside dönüşmesinden dolayı hidrofobikliği azalır ve bu yüzden de flotasyonda kazanımları azalır. Gümüş mineralinin E_h -pH diagramına göre az miktarda yükseltgen ortamda ve doğal pH'da Ag_2SO_4 oluşturur. Bir miktar asidik ve indirgen ortamda Arjentit (Ag_2S) oluşur. Bazik ortamda ise Ag_2O ve AgO oluşur ve termodinamik olarak kararlı yapıdadır. Nabit gümüş çok nadir bir mineraldir ve yaklaşık %95 saflıktadır. Genellikle altın, bakır, kurşun ve eser miktardaki diğer metallere birlikte bulunur. Altına benzer şekilde elektrik iletken, yumuşak ve sünek yapısı bulunmaktadır. Fakat ışığı yansıtma özelliği daha fazladır. Gümüşün özkütlesi 10.0-11.0 kg/m³ ve kaynama noktası 960.5 °C'dir. [10]

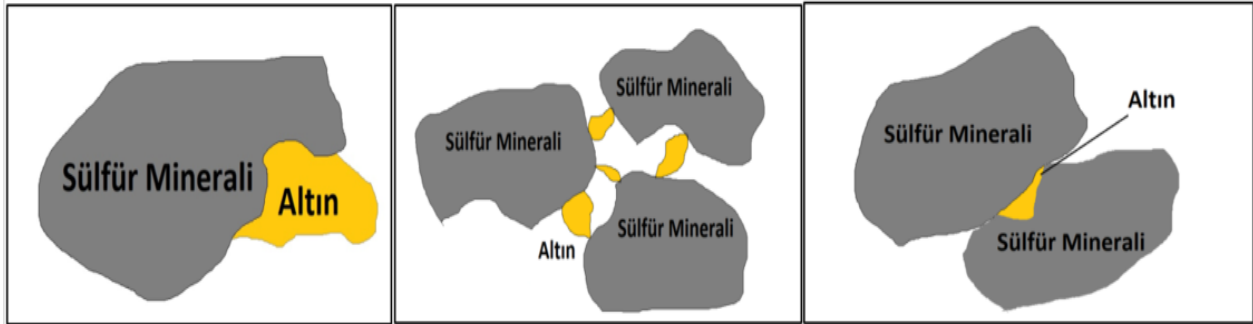
Dünyanın en zengin gümüş maden yatakları, kuvars damarları, karbonat ve florid içeren epitermal yataklardır. Bazen de tersiyer kayalar içinde alterasyona uğramışlardır. Proses tesislerinde genellikle gümüşün kazanımı altına göre daha düşüktür. Bunun sebebi daha kompleks bir yapıda mineralojiye sahip olmasındandır. 75 gümüş minerali ve yaklaşık 200 gümüşle beraber bulunan cevher bulunmaktadır. [11]

Demir Sülfürlü cevherlerde altın serbestleşmemiş halde demir sülfür matriksinin içinde bulunmaktadır. Bundan dolayı proses seçimi ve çalışma koşulları demir sülfürlü minerallere göre belirlenmektedir.

En önemli demir sülfür mineralleri şöyledir :

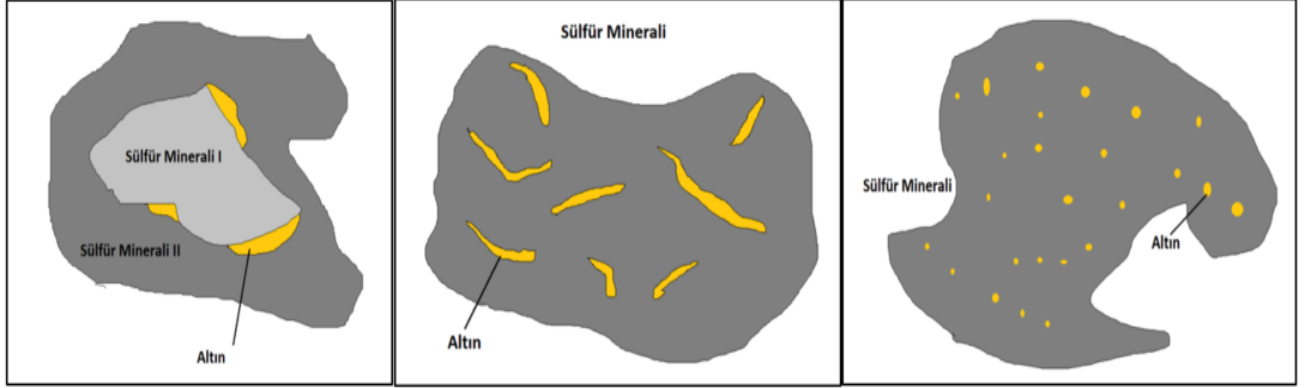
- Pirit (FeS_2)
- Markazit (FeS_2)
- Pirotit ($Fe_{1-x}S$, $x=0.0-0.2$)

Doğada en çok altınla beraber bulunan mineral Pirit mineralidir. Çoğu ocakta ve sülfürlü maden yataklarında bulunmaktadır. Ana kayaç içinde yer almasa dahi, ince cevher damarlarında ve metamorfik kayaçlarda da bulunabilir. Pirit genellikle kübik dilimli, pirinç sarısı renkte ve metalik parlaklığı olan bir mineraldir. Bundan dolayı “aptal altın” olarak da bilinir. Özkütlesi 4.8-5.0 kg/m³ olarak değişmektedir. Mohs skalasına göre 6-6.5 arasında değer alan Pirit sert bir malzemedir. [12] Pirit minerali sulu çözeltiler içerisinde çok kararlı bir mineraldir. Ve yüksek standart indirgenme potansiteli sayesinde az miktardaki yükseltgen ortam olan siyanür liçinde aktif olmaz. Özetle, pirit içerisinde kalan altın tanelerini kazanmak için çok ince öğütme ya da güçlü oksidasyon ortamı gerekmektedir. Altın taneleri iri ve pirit minerali birlikte olduğunda liç solüsyonu ile alınabilir. Pirit çok nadir siyanür tüketir. Fakat altın taneleri pirit minerallerinin içinde olduğu zaman altın kazanmak zordur ve bu tip cevherler refrakter altın olarak tanımlanır. Altın pirit ve arsenopirit ile beraber farklı şekillerde bulunabilir. Arsenopirit de benzer özellik göstermektedir fakat kendine özgü özellikleri vardır. Serbestleşmiş altın tanesinin sülfür minerali ile birlikte bulunması şematik olarak Şekil 2.2.’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Serbestleşmiş altın taneleri sülfür mineralleri ile birlikte

Bu şematik gösterimdeki altın mineralleri öğütme gibi yöntemlerle sülfür minerallerinden ayrılabilir. Fakat bazı durumlarda çok ince öğütme olmasına rağmen altın taneleri sülfür minerallerinden ayrılamaz. Bu durum Şekil 2.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Altın tanelerinin sülfürlü mineraller içinde dağılmış halde bulunması

Altın mineralinin sülfür minerallerinin sınırlarında olma durumu, sülfür minerallerin içindeki kırık ve çatlaklarda oluşma durumu ile sülfür mineralinin içinde çok ince dağılması durumunda kazanmak çok zordur. Çok ince öğütülmesi durumunda ince pirit minerallerin altın tanelerinin yüzeyini kaplaması ve hatta siyanür solüsyonlarında altının piritin yüzeyine soğurulması (preg-robbing) gözlenmektedir. Piritli altın cevherleri oksidasyon ön işlemi yapıldıktan sonra altın kazanımı sağlanabilir. [13] Pirite bağlı altın cevherleri flotasyon konsantresi olarak elde edilebilir. Bazı durumlarda basınçlı oksidasyon veya kavurma yöntemi altın ayrıştırılabilir. Kavurma işleminde sülfürik asit üretilir. Geçmiş dönemlerde piritin kavurulmasında sülfürik asit elde edilmiştir.

Markazit (FeS_2) pirit minerali ile aynı kimyasal formüle sahip olmasına rağmen kristal yapısı farklıdır. Pirit'ten daha düşük sıcaklıklarda ve genellikle ikincil kayalarda oluşur. Piritte göre daha nadir doğada bulunmasına rağmen piritik altın cevherlerinde ciddi oranda karşılaşılmaktadır. Markazit cevherin içinde ana sülfür minerali olduğu durumda liç prosesinde ciddi miktarda siyanür ve oksijen tüketmektedir. Fakat piritten daha basit yöntemlerle oksidasyona uğrayabilir. Diğer bir sülfürlü demir cevheri olan Pirotin mineralinin formülü Fe_{1-x}S 'dir. Genel olarak Fe_9S_{10} ve Fe_7S_8

formunda bulunur. Pirite göre indirgen ortamlarda daha duraylı olan Pirotin pirite göre daha hızlı oksidasyona uğramaktadır. Monoklinik Kristal yapıda olan Fe_7S_8 olan pirotin manyetik alınganlığı olan bir mineral olduğu için manyetik ayırıştırma yöntemi ile kazanılabilmektedir. [14] Pirotin minerali siyanür solüsyonlarında bulunması durumunda ciddi miktarda siyanür ve oksijen tüketiği bilinmektedir.

Altın minerali arsenik sülfürler veya arsenik matriks içinde bulunabilir. Genel olarak bulunan arsenik mineralleri arsenopirit, orpiment ve realgar mineralidir. Arsenopirit($FeAsS$), pirit mineralinden sonra karşılaşılan altın mineraline sahip sülfür mineralidir. Arsenopirit minerali içerisindeki altının tenörü 15.200 g/t gibi yüksek bir değere ulaşabilmektedir. Altın arsenopirit ilişkisi pirit altın birlikteliğine benzemektedir. Arsenopirit minerali pirite göre daha yumuşak fakat daha kırılğan bir yapıdadır. Pirite göre daha inceye boylara öğütülebilmektedir. Altına göre daha yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadır. Soğuma durumunda altın minerali oluşup arsenopiritin yapısında oluşmaktadır.

Orpiment mineralinin (As_2S_3) %61 Arsenik elementinden oluşmaktadır. Altın yataklarında daha az miktarda altın taşıyıcısı olarak görülmektedir. Sarı renkte oluşan bu mineralin rengi 3.5 kg/m^3 'dür. Orpiment minerali alkali siyanür solüsyonlarında çözünmektedir. Ciddi miktarda siyanür tüketebilen orpiment minerali solüsyona istenmeyen Arsenik iyonları vermektedir. Realgar minerali (As_2S_2 ya da AsS) orpiment minerali ile birlikte alterasyon olan bölümlerde oluşur. Kırmızı ya da turuncu renge sahip olan realgar minerali alkali siyanür solüsyonlarında orpimente göre daha fazla çözünmektedir.[15]

Altın içeren sülfürlü bakır minerallerinin varlığı proses seçimini veya koşullarını belirler. Altın, nadiren bakır mineralleri ile beraber olsa da daha çok pirit mineralleri ile birlikte bulunur. Bakır minerallerinin içindeki altın bakır konsantresi elde edildiğinde altınca zengin olduğu için ciddi ekonomik gelir sağlamaktadır. Çok düşük altın tenörüne sahip olsa da büyük bakır projelerinde tonajın fazla olmasından dolayı altın yan ürün olarak elde edilir. [16]

Doğada en çok bulunan sülfürlü bakır minerali olan kalkopirit (CuFeS_2) mineralinin %34.5'i bakırdan oluşmaktadır. Yeşilimsi gri renkte olan kalkopirit mineralinin özkütlesi $4,1-4,3 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Kalkopirit kovelit (CuS) ve hematit (Fe_2O_3)'e yükselgenebilir ya da Kalkosit (Cu_2S)'e indirgenebilir. Diğer önemli bakır minerallerinden Kalkosit (Cu_2S) %79.8 oranında ve Kovelit minerali ise %66.4 oranında bakır içerir. Bu mineraller birincil sülfürlü bakır minerallerinin altere olmuş bölgelerinde ve ikincil zenginleşmiş bakır bölgelerinde gözlemlenir. Kalkozit'in özkütlesi $5.5-5.8 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Bornit minerali (Cu_5FeS_4) genellikle birincil bakır mineralleri ile birlikte ve ikincil zenginleşme bölgelerinde oluşur. Altın-bornit birlikteliği çok nadir görülmektedir.

Antimuan ile altının birlikte olması proses seçimini veya operasyon koşulları etkilemektedir. Aurostibnite (AuSb_3) minerali siyanür çözeltisinde çözünürlüğünü düşük olduğu ve zayıf amalgamasyon özellikleri gösterdiği için altın zenginleştirmede sorunlara yol açmaktadır. Aurostibnite (AuSb_3) minerali genellikle flotasyon ile konsantre üretilir. Stibnite (Sb_2S_3) minerali, ana antimuan kaynağıdır ve kuvarz damarları ile kurşun-çinko sülfür topluğunda oluşmaktadır. Altın-stibnite birlikteliği çok nadir görülmektedir. Stibnite mineralinin siyanür tüketmesinden dolayı stibnite tenörünün yüksek olduğu altın-stibnite minerallerinin prosesinden sorun çıkarmaktadır. [17]

Tellür mineralleri, metalik altın ve altın-gümüş alaşımları dışında ekonomik olarak altın kazanımına sahip altın mineralidir. En önemli karşılaşılan tellür mineralleri, kavalerit (AuTe_2), petzit (Ag_3AuTe_2), hessit (Ag_2Te), krennerit (AuTe_2) ve maldonit (Au_2Bi)'dir. Bu minerallerin özkütlesi $7.5-9.5 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmekte ve altın ve gümüş miktarları %12-%44 arasında değişmektedir. Altın tellür cevherleri genellikle nabit altınla beraber veya diğer tellürler beraber kompleks bir yapıda bulunabilir. Altın tellür mineraline en güzel örnek ABD'deki Cripple Creek ve Fiji'deki Emperor ve Tavatu projeleridir. Altın tellür mineralleri Batı Avusturalya'daki Kalgoorlie'de ve ABD'deki Golden Sunlight'da görülmektedir. [18]

Karbonlu cevherler, siyanür liçi sırasında çözünen altını üzerine soğurabilecek miktarda karbonlu bileşiklere sahip cevherlerdir. Bu tip cevherler bazı durumlarda oksidasyon işlemine ihtiyaç duymaktadırlar. Karbonlu cevherler aktif karbonlar kadar yüksek spesifik yüzey alanına sahip

olmasada yeterince yüzey soğurma özelliğine sahip olduğu için ciddi miktarda altın kazanımını azaltabilir. Bazı durumlarda karbon miktarı %5 den bile fazla olabilir. Hatta bazı durumlarda %0.1 gibi çok düşük miktarda karbon içerikli cevherlerde bile altın çalma (preg-robbing) ya da altın ödünç alma (preg-borrowing) etkisi görülmektedir. [19]

2.2.2. İkincil Cevherler

Gravite konsantreleri kendi alışılmışın dışındaki mineral içeriği sayesinde farklı bir malzemedir. Genellikle iri altınlı cevherler, 50 mikrondan büyük ve 2 santimden küçük olan ve oksitli/sülfürlü cevherlerden özkütlesi yüksek olan cevherlerdir. [20] Bu tip cevherlerde altın jigler, sarmal konsantretörler, sallantılı masalar ve merkezci kuvvet kullanan makinalar sayesinde kazanılır. Bu konsantrelerde tipik olarak ağır oksitli olan Manyetit (Fe_2O_3), ilmenite ($FeTiO_3$), zirkon ($ZrSiO_4$) ve daha az miktarda Pirit gibi sülfürlü mineraller bulunur. Gravite konsantrelerinde altın ana olarak serbestleşmiş halde bulunur. Bir kısmı pirit ve kuvarz içinde bulunurken bir miktarı da kalsiyum, demir oksitler, magnezyum oksitler ve karbonatlar tarafından kaplanmış halde konsantrede bulunabilir. Çok ince serbestleşmemiş halde altın taneleri, ilmenite ($FeTiO_3$) ve Rutil (TiO_2) gibi minerallerin içinde olduğu zaman amalgamasyon ile kazanılamaz fakat gravite ile kazanılabilir.

Cevherin ya da ön konsantredeki cevherin flotasyon prosesi sonucunda elde edilen konsantresinde altın ve hidrofobik (suyu iten) özelliğe sahip mineral elde edilir. Genel olarak flotasyon konsantreleri yüksek sülfür içeriğine sahiptir. Flotasyon konsantresinden elde edilen altın, hem hızlıca yüzen serbest altın tanelerini ve sülfür minerallerinin içinde kitli kalan altın tanelerini temsil eder. Sülfürlü flotasyon konsantreleri eşsiz yüksek hidrofobiklik ve hızlı çökeltme özelliği bulunmaktadır. Bu durum siyanürleme ya da gravite konsantresinin idaresini güçleştirir. [21]

Atık malzemeler çalışan tesislerin ekonomik bir şekilde kazanılamayan atıklarıdır. Siyanürleme, flotasyon, gravite ve amalgamasyon gibi proseslerde altının mineralojisi ve doğada oluşma şeklinden dolayı kazanılamamaktadır.

Tesis atıklarının mineralojik karakteristiği çok çeşitli olmakla birlikte aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Tesise beslenen cevherin çeşitliliği
- Kazanım proseslerin çeşitliliği
- Kazanım proseslerin verimliliği
- Atık depolamanın süresi

Atıkların standart siyanürleme ya da başka siyanürleme verimleri bir veya daha fazla mineralojik faktörden dolayı düşüktür. Bundan dolayı tesisin akım şemasında herhangi bir değişiklik yapmadan önce cevherin oluşumu detaylıca bilinmelidir. [22]

Gravite konsantrelerinin atıkları genellikle ciddi miktarda altın içermektedir. Bundan dolayı ikinci bir proses ile birlikte kullanılır. [23] Siyanürleme altın kazanımı için en yaygın ve en etkili yöntemdir. Altın kazanımları genellikle %90 üstü beklenmektedir ve büyük oranda gerçekleşmektedir. Atık içinde kalan altın kısmi refrakter özellik gösterdiği için altın kazanımını daha fazla olmasını olumsuz yönde etkiler.

Altın eğer serbestleşmemiş, yüzeyi flotasyonda yüzmeyen mineraller ile kaplanırsa (demir oksit, silikatlar gibi) ya da hidrofobik olmayan minerallerin içinde olduğu zaman flotasyon atığında kalabilir. Bu tür cevherde açığa çıkmış altın taneleri var ise altın kazanımı için siyanürleme düşünebilir. Fakat flotasyon atıkları tamamıyla ya da kısmi oksitlenmiş sülfür mineralleri içerebilir ve bunlar siyanür ile etkileşime girebilir.

Geri dönüşümden elde edilen altın, fabrika ürünlerinden ya da kuyumcuların altın içeren malzemelerinden elde edilir. Altının doğası gereği elektronik bileşenlerin yüzeyleri çok ince bir şekilde altın ile kaplanır. Elektronik bileşenlerden elde edilen ve elektrostatik ayırma ile ayrıştırılan

malzemelerin altın içeriği 1.2kg/t, gümüş içeriği 13.7kg/t, bakır içeriği %38, alüminyum içeriği %27 ve demir içeriği %9'dur.

2.3. Altın Kazanım Yöntemleri

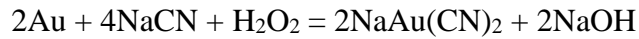
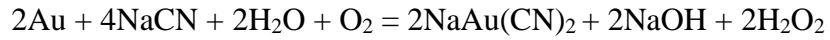
2.3.1. Liç İşlemi

Siyanürleme işlemi 1898 yılından beri yaygın bir şekilde altın ve gümüş cevherleri için kullanılmaktadır.

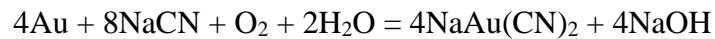
Bunun genel sebepleri;

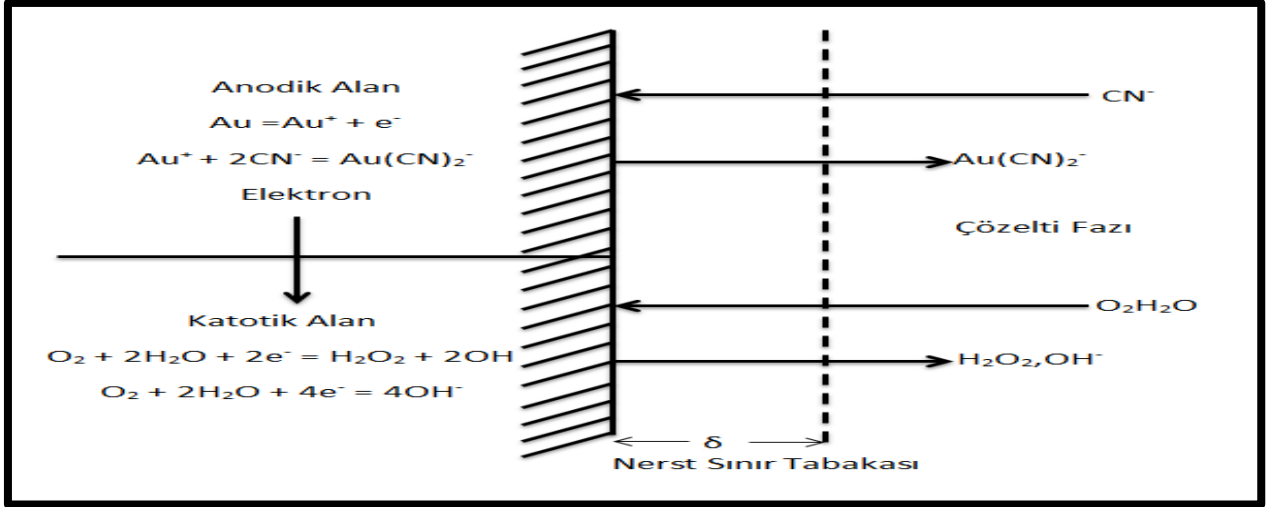
- Siyanürün kolay bulunabilirliği
- Altın ve gümüş liçinin verimliliği
- Hızlı liç kinetiğine sahip olması
- Altın Siyanür bileşiklerinin çözünürlüğü ve kararlılığı

Altının siyanür çözeltisi içindeki işlemi 2 kademeli reaksiyon ile gerçekleştiği düşünülmektedir.



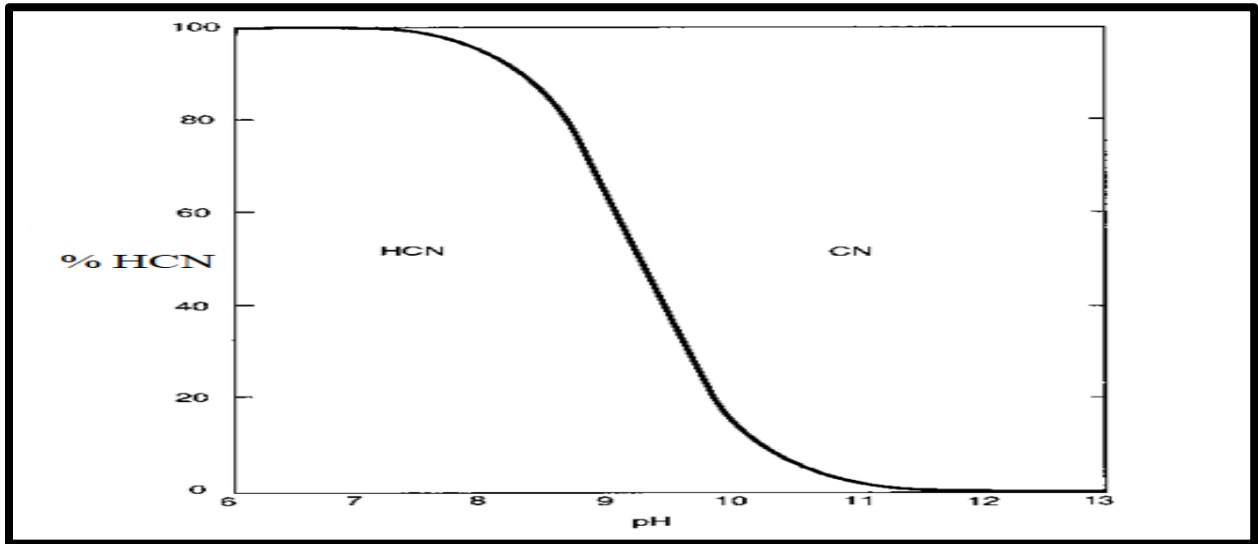
Bu reaksiyonlar toplu şekilde gösterilmesi 'Elsner denklemi' olarak ifade edilmektedir. [24]
Siyanür altın liçi mekanizması Şekil 2.4.'de verilmiştir.





Şekil 2.4. Altın siyanür liçi mekanizması

Siyanürleme işleminde pH kontrolü çok önemlidir. İnsan sağlığı için çok tehlikeli olan HCN oluşumunu en düşük seviyede tutabilmek için yüksek pH'larda yapılmaktadır. pH'a bağlı HCN miktarı Şekil 2.5.'de verilmiştir.



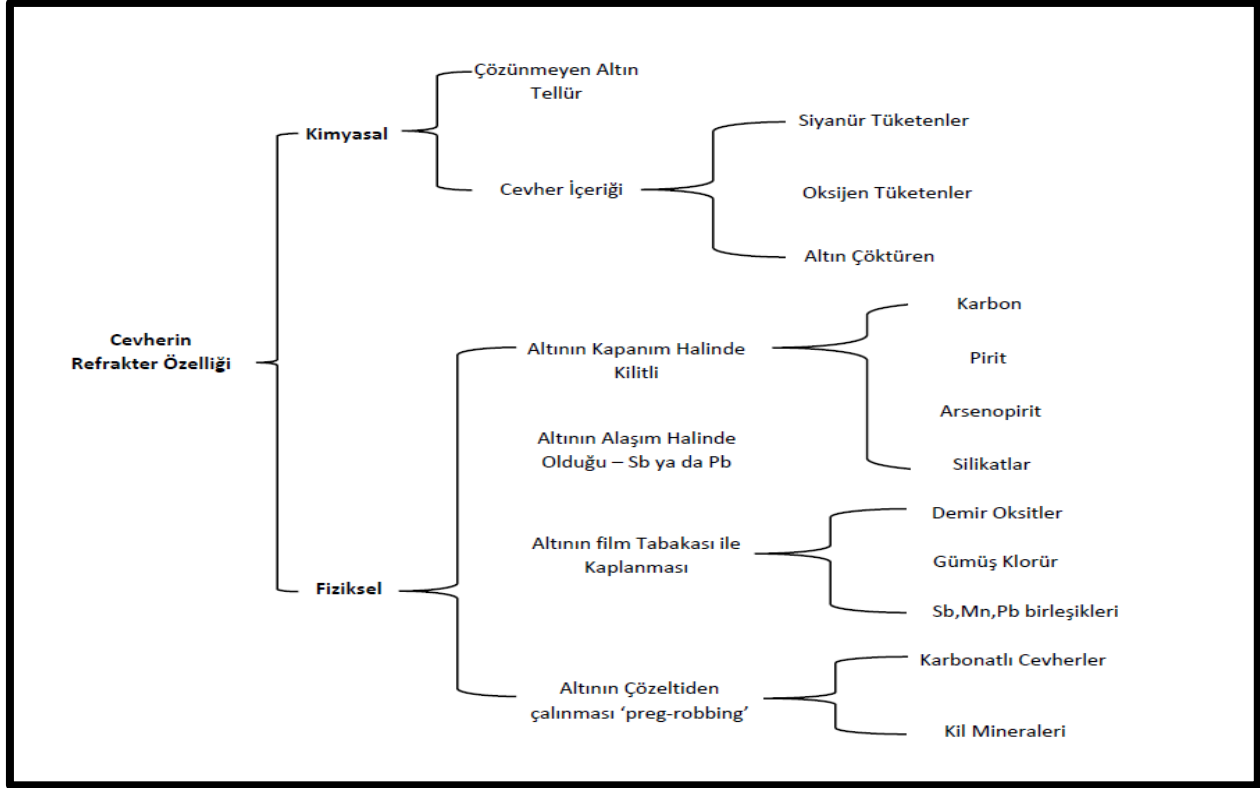
Şekil 2.5. pH'a bağlı HCN miktarı

Aktif karbonun değerli metalleri üzerine soğurma özelliği ortaya 1847 yılında atılmıştır. 1880 yılında altının klor çözeltisinden odun kömürü kullanılarak kazanıldığı bulunmuştur. McArthur ve

Forest kardeşler 1890 yılında siyanürün altın için iyi bir çözücü/ayırıştırıcı olduğunu bulmasından sonra 1894 yılında siyanür çözeltilisinden altının kazanılabilmek için odun kömürü kullanılmıştır. Odun kömürü odundan yapıldığı için günümüzde kullanılan karbonlar gibi yüksek yüzey alanına ve gözenekliliğe sahip değildi. Sıyırma işlemi bilinmediğinden karbondan direk ergitme yöntemi ile altın kazanılmıştır. 1917 yılında aktif karbon kullanımı yüksek verimlilik noktasına gelse de çinko ile çöktürme yöntemi geliştiği için aktif karbona ilgi azalmıştır. [25]

1940'lı yıllarda aktif karbonun yüksek yüzey aktifliği ve yüksek aşınma direnci geliştirmiştir. Ayrıca 1952 yılında sodium hidroksit ve siyanür kullanılarak sıyırma prosesi geliştirilmiştir. 1960 yılında Kanada'da ilk kez aktif karbon kullanılmış ve CIP (Carbon in Pulp) olarak bilinen proses 1973'de Amerika Homestake'teki tesiste günlük 2200 tonluk kapasitede denenmiştir. [26]

Bazen cevherin oluşumundan kaynaklı altın siyanürleme işlemi verimli bir şekilde kazanılamaz. Bu tip cevherlere Refrakter altın cevherleri denilmektedir. Refrakter altın cevherlerini siyanür ile işleyebilmek için ön işlem yapılması gerekmektedir. Bu ön işlem sayesinde cevherin ve mineralin yapısı bozulduğundan siyanürlemeye cevap verebilmektedir. Bu işlemler için uygun havalandırma, basınçlı oksidasyon, kavurma, bakteri oksidasyon ve çok ince öğütme kullanılmaktadır. Refrakter cevherlerin sınıflandırılması Şekil 2.6.'da verilmiştir.

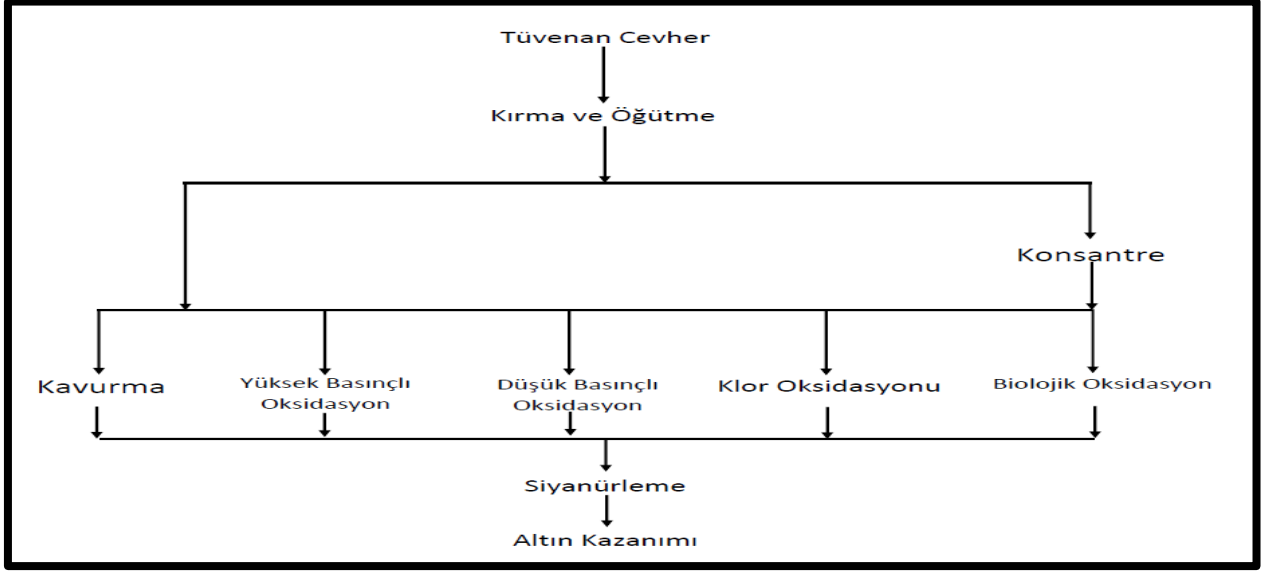


Şekil 2.6. Refrakter cevherin özellikleri [27]

Refrakter altın cevherinin kimyasal doğası çözeltide çözilemeyen altın tellürden, solüsyonda reaksiyona girerek oksijen ve siyanür tüketen koşullardan oluşmaktadır. Ayrıca ortamdaki oksijenin ve siyanür tüketilmesi sonucunda altının çökmesine neden olabilir. Cevherin içerisindeki bazı sülfür mineralleri hızlıca çözünerek siyanür tüketen türleri oluşturur. Sülfürler, tiyosülfürler, arsenikler ve demir iyonları ise ciddi miktarda oksijen tüketir. Humik asit ise altın bileşikleriyle reaksiyona girebilir.

Refrakter altın cevherinin baskın olan türü fiziksel doğal yapısından kaynaklanmaktadır ve bu ancak mikroskobik mineraloji ile belli olmaktadır. Altın taneleri çok ince taneler halinde başka mineralin içinde kapanım halinde olabilmektedir. Karbon, Pirit, Arsenopirit ve silikat içerisinde kapanım halinde olan altın taneleri siyanürleme işlemi ile kazanılamamaktadır. Bazen de altın mineralleri Antimon ve Kurşun ile alaşım halinde bulunmaktadır. Bu da altının çözünürlüğünü düşürmektedir. Siyanürleme ortamında bulunan demir oksitler, gümüş klorür ve antimuan, mangan

ve kurşun bileşikleri altın tanelerinin yüzeyine kaplanır ve altın siyanür temasını azaltarak altın kazanımını etkilemektedir. Bir diğer önemli etken ise cevherin içerisindeki karbonlu ve killi minerallerin çözülmüş altını kendi üzerine soğurmasıdır. Refrakter altın cevherlerinde uygulanan potansiyel oksidasyon yöntemleri Şekil 2.7.'da verilmiştir.



Şekil 2.7. Refrakter altın cevherlerinde uygulanan prosesler

Kavurma işlemi yüksek sıcaklık kullanarak altın tanelerini sülfür, arsenopirit, karbon ve karbonatlı minerallerin yapısı parçalayarak serbestleştirme işlemidir. Diğer ismi Kalsinasyon olan bu proses, refrakter altın cevherleri için kullanılan çok eski bir oksidasyon prosesidir. Kavurma işlemi sonrasında pH ayarlaması yapılır ve cevher liç işlemine gönderilir.

Yüksek basınçlı oksidasyonun patenti 1957 yılında alınmıştır. Yapılan çalışmaya göre cevherden veya konsantredeki arsenopirit, pirit, stibnit, realgar, orpiment ve karbonatlı minerallerin içinde kapanım halinde olan altın kazanılmaktadır. [28] Yüksek basınçlı oksidasyon asidik ve alkali ortamda yapılabilmektedir. Asidik yüksek basınçlı oksidasyon genellikle tepkime gereği pH 2'in altında gerçekleşmektedir. Genellikle 180-225⁰ C derece arasındaki sıcaklıkta oksijen varlığında pirit, pirotin, arsenopirit ve kalkopirit mineralleri oksitlenmektedir.

Cevherin içerisinde ciddi miktarda asit tüketen karbonat türleri bulunur ve düşük sülfürlü içeriğe sahip refrakter altın cevherleri için asidik olmayan yüksek basınçlı oksidasyon prosesi kullanılmaktadır. Doğal pH'da ve bazik ortamda çözülmüş oksijen varlığında pirit, pirotin, arsenopirit ve kalkopirit oksitlenmektedir.

Klor oksidasyonu karbonlu altın cevherleri için 1960 yıllarında geliştirilmiş ve 1971'e kadar uygulanmış bir prosestir. [29] Klor çözeltideki altını çalan (preg-robbing) ya da geçici üstüne soğuran (preg-borrowing) karbonlu cevherlerinin bu özelliklerini engellemek için kullanılmıştır.

Diğer sülfür mineralleri de bu kuvvetli oksidasyon koşullarında benzer şekilde oksitlenmektedir. Klor ile oksidasyona benzer kimyasal oksidasyon yöntemlerinden biri de nitrik asit oksidasyonudur. 1985 yılında geliştirildiğinde konsantrelerden gümüş ve bakır kazanmak için düşünülmüştür. Fakat çok hızlı bir şekilde iyonlaşan nitrik asit kuvvetli bir oksidasyon yöntemidir. Pirit ve arsenopirit hızlı bir şekilde oksidasyona uğrar.

Refrakter cevherlerin oksidasyonu için bir diğer yöntem ise bakteri oksidasyonudur. *T. ferroxidans* ve *T. thiooxidans* bakteriler sülfür oksidasyonunda en aktif kullanılan bakterilerdir. Bu mikroorganizmalar kolaylıkla pirit ve arsenopirit minerallerini oksitleyebilmektedir. Bu bakteriler ılıman sıcaklıklarda hızlı bir şekilde çoğalabilmektedirler fakat 40⁰ derece üstü sıcaklıklarda inaktif olmaktadır. Bu mikroorganizmaların oksidasyon işlemi egzotermik reaksiyon olduğundan dolayı cevherin içerisindeki sülfür miktarının yüksek olduğu koşullarda sıcaklık ciddi miktarda artabilir ve bundan dolayı cevherin ya da konsantrenin soğutulması gerekmektedir. Bu da maliyetleri yükseltmektedir. Bakteri oksidasyonu için önerilen tane boyunun 35 mikrondan daha ince olması deneyler sonucunda öngörülmüştür. En yüksek oksidasyon hızına ulaşabilmek için katı konsantrasyonun %15-%20 olması gerektiği raporlanmıştır. [30] Sülfür oranının artması bakterilerinin çoğalması engelleyebileceği gibi oksidasyonun tamamen durmasına da yol açabilmektedir. Bu mikroorganizmaların çoğalabilmesi ve yaşabilmesi için az miktarda potasyum, fosfor ve nitrojenin besin olarak sistemden olması gerekmektedir. Bu besinlerin en uygun miktarı

yapılacak testler sonucunda belirlenmektedir. Son olarak da bakterilerin çoğalması ve oksidasyonun devamı edebilmesi için ortamda yeterli miktarda oksijen bulunması gerekmektedir.

Siyanürleme haricinde bazı kimyasallar kullanılarak altının çözeltilmeye geçmesi sağlanabilir. Klor (Cl), Bromin (Br₂) ve iyot (I₂) gibi halide türleri altın liçi için iyi bilinen bir ayrıştırıcıdır. [38] Klor kullanımı siyanür kullanımından önce 19. yüzyılda kullanılmıştır. Klor kullanımı özellikle refrakter ve karbonatlı cevherlerin ön oksidasyonu için 1980'li yıllarda Amerika'da bazı tesislerde kullanılmıştır. [31] Oksitli cevherler için klor tabanlı liç işlemleri yüksek çözünme hızından dolayı avantajlıdır. Fakat halojenler özellikle sülfür mineralleri gibi diğer minerallerle de etkili bir şekilde etkileşime girdiği için tüketimler yüksek olabilmektedir.

Son yıllarda siyanürün yerine en çok ilgi çeken Tiyosülfat (S₂O₃²⁻) olmuştur. Daha ucuz ve daha az toksik içeriğe sahiptir. [32] Tiyosülfat, altın ve gümüş ile kuvvetli bağ yapar ve Cu(II) katalizörü ile hızlı bir şekilde altını liç edebilir. Amonyak, bakır ve oksijen varlığında düşük tüketim ile yüksek altın kazanımı gerçekleştirilmektedir. [33]

1980 ve 1990 başlarında altın liçinde tiyoürenin (NH₂CSNH₂) kullanımına ilişkin araştırmalar yapılmıştır. Tiyöüre kanserojen olarak tanımlandığı için yakın zamanda siyanürün muadili olarak kullanılması pek muhtemel görünmemektedir. Ayrıca ekonomik olması için tiyoüre konsantrasyonlarının düşürülmesi gerekmektedir. [34]

2.3.2. Amalgamasyon

Amalgamasyon yöntemi, altının ve gümüşün sıvı civa ile birleşik yapması ve gang minerallerinden ayrılması ile yapılmaktadır. Altın çok hızlı bir şekilde civa ile birleşik yaptığı için tarih boyunca ana kayaçtan altını almak için amalgamasyon yöntemi kullanılmıştır. 1850 yıllarına doğru Güney Afrika'da amalgamasyon yönteminin kullanım oranı %48 olarak bilinmektedir. Daha sonra sağlık ve çevresel sorunlardan dolayı tüvenan cevhere yapılan uygulamaları azalmıştır. Amalgam yöntemi günümüzde gravite konsantrelerinden altın kazanımında basit ve uygun maliyetli bir

yöntem olduğu etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Altın kazanımında civa sadece amalgam yöntemi için önemli değildir. Doğada oluşan Zinabar (HgS) gibi mineraller altın kazanım proseslerinde istenmeyen şekilde zenginleştirilebilir. Civa atmosferik koşullarda sıvı halde bulunurken ciddi miktarda buharlaşabilir ve suda çözünürlüğünü yüksektir. Birçok metal ile bileşik yapma potansiyeline sahiptir. Örneğin sodyum, çinko, potasyum, altın ve gümüş gibi metallerle amalgam yapabilir. Fakat demir gibi doğada çok bulunan bir metal ile amalgam yapmaz. Bazı metallerin civa içerisindeki çözünürlükleri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Altının sıvı içerisinde sınırlı miktarda çözünürlüğü olmasına rağmen altının civa içerisinde etkileşimi büyük oranda yüzey kimyası işlemidir. Genellikle altın amalgam işlemi sırasında altının sadece %5'lik bir kısmı civa içerisinde çözünmektedir. [35]

2.3.3. Gravite (Yerçekimi) ile Zenginleştirme

Gravite ile zenginleştirme yöntemleri genellikle iri altın tanelerini kazanmak kullanılmaktadır. Fiziksel bir ayırım yöntemleri olan bu prosesler genellikle düşük ilk yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptir. Gravite ile zenginleştirme yöntemleri ile elde edilen konsantre yüksek altın içeriyorsa doğrudan döküme gönderilmektedir. Eğer konsantre döküme gönderilecek kadar yüksek tenör içermiyorsa yoğun liç işlemi (yüksek siyanür konsantrasyonu) ile altın kazanılabilmektedir. Altın mineralinin özkütlesi 19.3 kg/m^3 gibi yüksek özgül ağırlığa sahip olduğu için kum ve çakıldan ayırmak için bate yöntemi gibi basit bir yöntem ile kazanılabilmektedir. Bu yöntemde cevher sığ bir tavada su ile karıştırılıp döndürme hareketi sayesinde istenmeyen özkütlesi hafif olan tanelerin su ile beraber tavadan uzaklaştırılması ile yapılmaktadır. Özkütlesi ağır olan altın taneleri ise tavanın dibine çökmektedir. Bate yöntemi işlemi Şekil 2.8.'de verilmiştir.



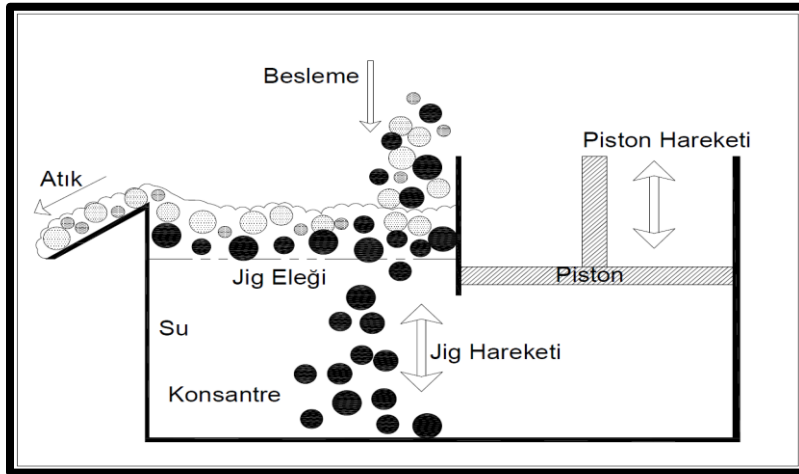
Şekil 2.8. Bate Yöntemi

Bir diğer basit ve yaygın gravite ile altın kazanım yöntemi yıkama makinalarıdır. Genellikle alüvyal çakıllarda altın kazanımın da kullanılmaktadır. Eğimli ve aralıklı oluklardan doluşan yıkama kutularında cevher yukarıdan su ile karıştırılarak verilmektedir. Özgül ağırlığı fazla olan altın taneleri yıkama makinasındaki oluklara takılır ve istenmeyen malzeme su ile taşınarak sistemden uzaklaştırılmaktadır. [36] Yıkama makinası Şekil 2.9.'da gösterilmiştir.



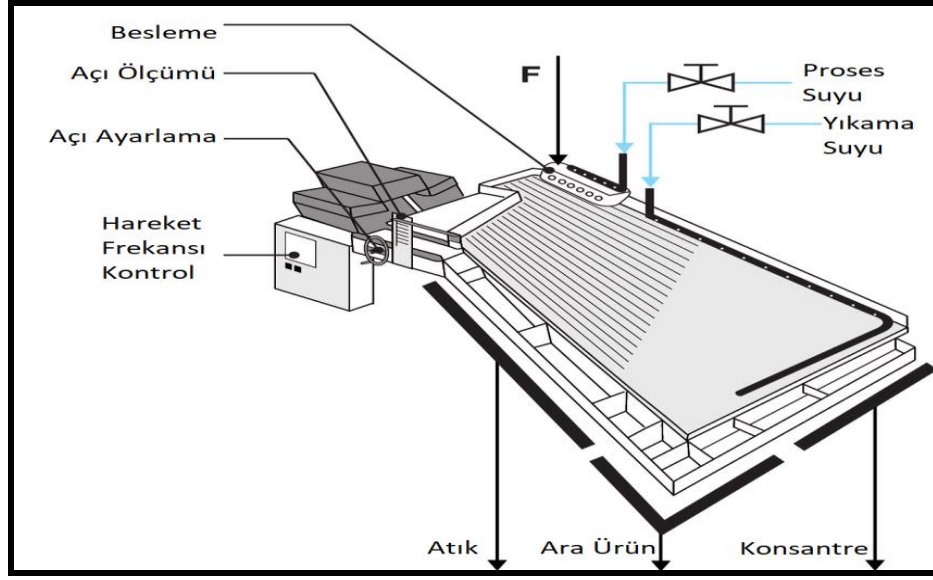
Şekil 2.9. Yıkama Makinası

Jigler, eğilli çökme prensibi kullanan bir ayrıştırma yöntemidir. Su içindeki gözenekli bir eleğin aşağı-yukarı yönlü hareketleri sayesinde ağır minerallerin alt kısma çökmesini ve hafif minerallerin de üst kısımda birikmesini sağlamaktadır. Bu ayrıştırma yöntemi, dar tane boyu aralığında verimli çalışmaktadır. Jig işlemi basit çalışma prensibi Şekil 2.10.'da verilmiştir.



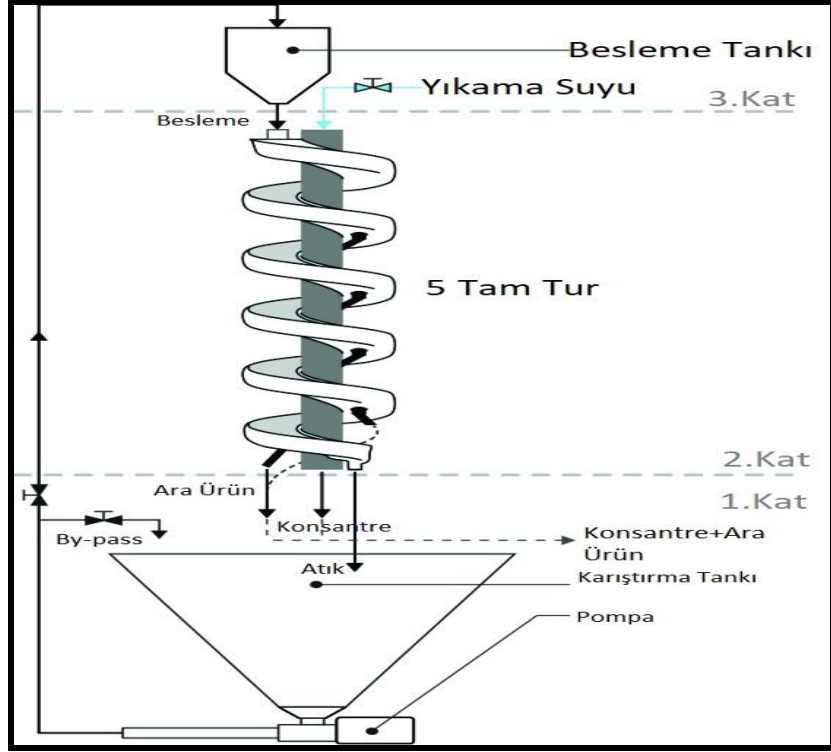
Şekil 2.10. Jig işlemi basit çalışma prensibi

Sallantılı masalarda ağır minerallerin konsantreye gitmesini sağlayan eşikler bulunmaktadır. Masa çalışırken titreşir ve bir miktar eğimlidir. Masanın üst kısmından cevher su ile birlikte verilir. Ağır olan mineraller eşikleri aşamaz ve oluklar içinde hareket ederek konsantreye gider. Hafif mineraller ise suyla taşınarak eşikleri aşarak atığa giderler. Sallantılı masalarda ara ürün de üretilmektedir. Sallantılı masa Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Sallantılı Masa

Spiral zenginleştiricilerde cevher su ile birlikte sınıflandırıcının üstünden sisteme verilir. Yerçekimin etkisi malzeme ile dairesel hareket yapar ve bu merkezci kuvvet sayesinde hafif mineraller dış kenardan ilerler. Ağır mineraller ise merkeze yakın şekilde ilerler. Genellikle 3 ile 5 tam tura sahip, yarı dairesel kesitte, sarmal bir kanaldan oluşmaktadır. Sallantılı masada da olduğu gibi ara ürün almak mümkündür. Spiral sınıflandırıcı şematik gösterimi Şekil 2.12.’de verilmiştir.



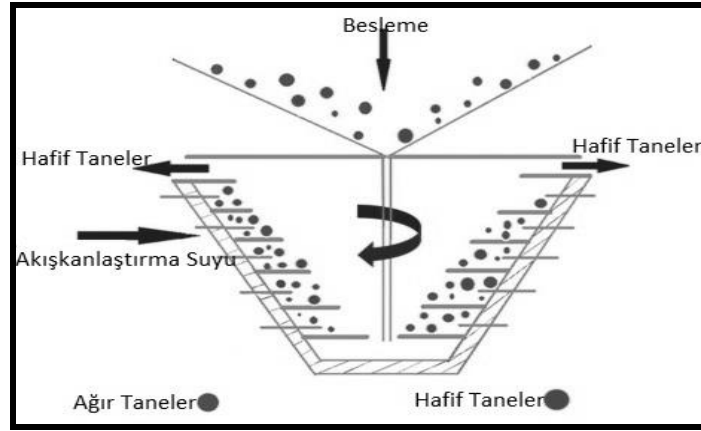
Şekil 2.12. Spiral Zenginleştirici Şematik Gösterimi

Santrifüj kuvveti ayırımında gravite ile kazanılabilecek altın için yarı sürekli üniteler kullanılırken GRG ve diğer altın taşıyan mineraller için sürekli üniteler kullanılmaktadır. Knelson veya Falcon konsantretörler yarı sürekli olarak ve akışkan yatak oluşturarak ağır mineralleri yakalamaktadır. [37]

Üniteler kapasiteleri laboratuvar ölçekli boyutlardan saatlik 150 ton işleyebilen modelleri mevcuttur. Santrifüj kuvveti yer çekiminin 200 katına kadar çıkabilen bu üniteler ağır taneleri içinde hapsederken hafif mineralleri su ile dışarı atmaktadır. Knelson konsantretörleri 10 mikrondan 6 mm'ye kadar olan tanelerin kazanımında kullanılabilir. Kütle kazanımları ağırlıkça %0.05 gibi değerlerde olabilmektedir. Su ile karıştırılan cevher çamuru sabit besleme borusu yardımı ile konsantre konisine gönderilir. Çamur koninin alt tarafına geldiğinde santrifüj kuvvetinin etkisi ile koni duvarına doğru gitme eğiliminde olur. Akışkanlaştırma suyu ile koninin üzerinde bulunan deliklerden içeri gönderilir. Hafif olan malzemeler suyla sistemden uzaklaştırılırken ağır mineraller konsantre konisinin içerisindeki oluklarda birikir. Konsantre kazanma döngüsü bittiğinde ise

konsantre yıkama suyu ile sistemden alınır. Kesikli çalışan Knelson konsantretörler altın, platin, gümüş, civa ve nabit bakır için kullanılmaktadır.

Falcon konsantratörü de Knelson konsantratörü ile aynı prensipte çalışmaktadır. Sadece konsantre konisinin dizaynında farklılıklar bulunmaktadır. Knelson konsantretörün konsantre konisinin iç çeperinin tamamı oluğa ve akışkanlaştırma suyu deliklerine sahip iken Falcon konsantretörlerde koninin alt kısımlarında oluklar ve su delikleri bulunmamaktadır. Ayrıca Falcon konsantretörlerde oluk ve su deliklerine sahip olmayan koninin alt tarafları eğimli iken oluklara ve su deliklerine sahip olan koninin üst kısımları dik bir açığa sahiptir. Knelson konsantretörlerde ise konsantre konisinin kenarları belli bir açığa sahiptir. Bu ekipmanlarda besleme, yüksek hızda dönen koniğe üstten yapılmaktadır. Düşük özgül ağırlığa sahip hafif ve küçük taneler merkezkaç kuvvetinin etkisi ile koniğin dışına doğru hareket ederler. Koniğin dışından içeri doğru gönderilen yıkama (akışkanlandırma) suyu ile hafif taneler koniğin üstünden sistemi terk ederken ağır ve yüksek özgül ağırlığa sahip taneler koniğin içinde kalarak yıkama işlemi ile konsantre üretilir. Santrifüj kuvvetli konsantretörlerin şematik gösterimi Şekil 2.13.'de verilmiştir.



Şekil 2.13. Santrifüj kuvvetli konsantretör şematik gösterimi

Dünya genelinde altın kazanımı siyanür ile yapılmasına rağmen +75 mikrondan daha büyük altın taneleri için gravite ile zenginleştirme kullanılmaktadır. İri altın tanelerinin ayrıştırılması güvenlik riski ve maliyeti artırdığı için tartışılan bir konudur fakat düşük yatırım ve ilk yatırım

maliyetlerinden dolayı ilgi çekmektedir. Ayrıca iri altının öğütülerek yassı şekil almasını önlemek için değirmen devresinde gravite konsantretör kullanılması gerekmektedir. [38] Gravite ile altın kazanımı liç işlemi öncesinde kullanılmaktadır ve bazı faydaları bulunmaktadır. Karşılaştırmalı Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Gravite ile Altın Kazanımının Liç işlemi Öncesindeki Faydaları [39]

Fayda	Yorum
İri altın taneleri liç işleminde yeterince sistemde kalma süresine sahip olmayabilir	Hidrosiklonlardaki zayıf sınıflandırma performansı sebep olabilir
	İri sınıflandırma ve yetersiz liç süresi sebep olabilir
Yüzeyleri pasifleşmiş çok yavaş ya da büyük oranda liç olabilen altın kazanılabilir	Oksitlenmiş (işlem) cevherlerde görülebilir
	Tipik olarak atık barajında serbest altın bulunduğu anlaşılmış ya da atığın tekrar tesise gönderilip analiz yapıldığında anlaşılmıştır
Çözünmüş altın miktarını en alt seviyede olur	Merill Crowe ya da karbon kusurları olduğunda çok önemlidir.
Devrede çöken altın miktarı çok az olacağı için sistemdeki altın az olur.	Önemlidir fakat çok fazla raporlanmamıştır.
Aktif karbon maliyetleri azalır	Aşınmadan kaynaklı karbon miktarı azalır
Besleme altın tenörünün sabit kalması sağlanabilir	Bazen altın tenörü iri ve serbest altından dolayı ani yükselebilir ve bu gravite tarafından kazanılabilir.

İri serbest altın ve bazı kompleks sülfür mineralleri siyanür liç işlemini güçleştirir ve gravite konsantretör ile alınması faydalı olur. Uygulama türüne göre faydaları Çizelge 2.2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Gravite işleminin türüne göre faydaları [40]

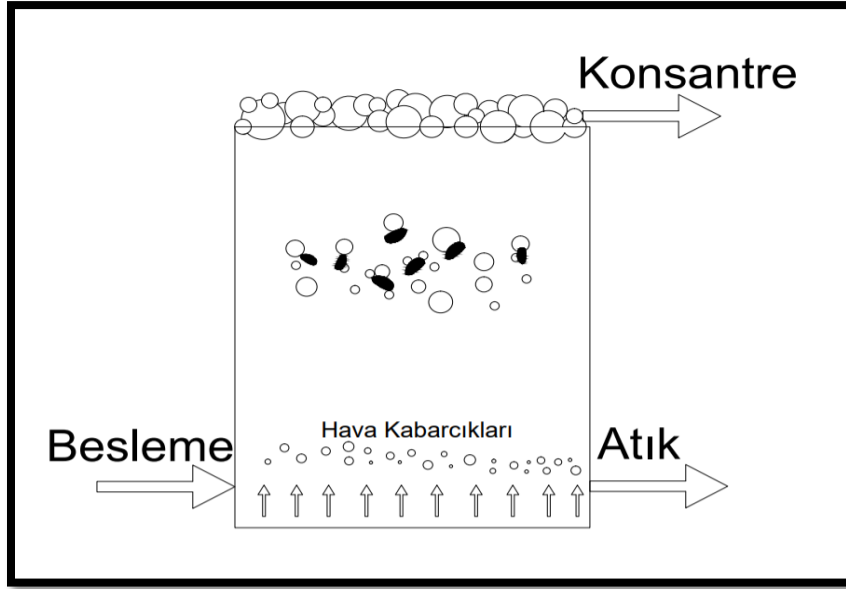
Uygulama Türü	Faydası
Siyanürleme öncesi GRG’i kazanma	Nihai verimi yükseltir
	Aktif karbon maliyetini azaltır
	Daha düşük liç süresi sağlar
Flotasyon öncesi GRG’i kazanma	Nihai verimi yükseltir
	Rafinerinden daha iyi gelir dönüşü olur
	Düşük kimyasal maliyeti sağlar
Ön-konsantrasyon	Prosesin geri kalan kısımlarında ve atık maliyetinin azalması
Scavenger işlemi ile GRG ve altın taşıyıcılarını kazanma (liç atığına)	Nihai verimi yükseltir.
	Daha iri boyda öğütme yapılabilir
Yoğun liç işlemi için kısmi ön-konsantrasyon	Nihai verimi yükseltir
	Daha iri boyda öğütme yapılabilir

Gravite altın kazanımında altının şekil, gözeneklilik ve doğal hidrofobikliğinin önemi literatürde önemli bir yer tutar. Yapılan çalışmaya göre gravite altın kazanımında altının en-boy oranı ve şekil faktörü kazanımı etkilemektedir. [41] Altın dövülebilir yapısından dolayı öğütme işlemi sırasında tabaksı ve yapraksı şekil alabilmektedir. Bu yapraksı şekillenme ve altının doğal hidrofobikliği birleşince gravite kazanımı etkileyebilecek potansiyel oluşmaktadır. Gravite ile zenginleştirme işlemlerinde altın ve altını taşıyan minerallerin tane boyutu küçüldükçe altın kazanımı düşmektedir. [42]

2.3.4. Flotasyon

Flotasyon prosesi değerli metaller ve değersiz mineralleri birbirinden ayırmak için minerallerin fiziksel ve kimyasal açıdan yüzey özelliklerinden yararlanmaktadır.[43] Konvansiyonel kaba flotasyon daha önceden ekonomik olmayan düşük ve kompleks cevherleri kazanmak için 1906 yılında kullanılmıştır. [44] Önceleri baz metal, kömür ve talk gibi mineraller için kullanılan bu yöntem ilerleyen yıllarda madencilik dışında kağıt geri dönüşümünde bile kullanılmıştır. Başlarda flotasyon yöntemi Kanada, Avusturalya, Kore gibi birkaç bölgede yağ bazlı köpürtücüler kullanılarak kompleks ve refrakter cevherler için yapılmıştır. Daha sonra 1930’lu yıllarda suda çözünebilir toplayıcıların (ksantat ve diofosfatlar) kullanılmasıyla daha fazla sülfürlü cevherlerden altın kazanımı sağlamıştır. [45]

Flotasyon yöntemi basit anlam olarak değerli mineralleri kimyasallar kullanarak mineralin yüzeyine hidrofobik (suyu iten) özellik kazandırarak karıştırılmalı tanklarda köpük ile yüzdürerek kazanmaktır. Taneler hava kabarcıklarına tutunarak köpük fazına taşınır. Flotasyon işleminin şematik gösterimi Şekil 2.14.'de verilmiştir.

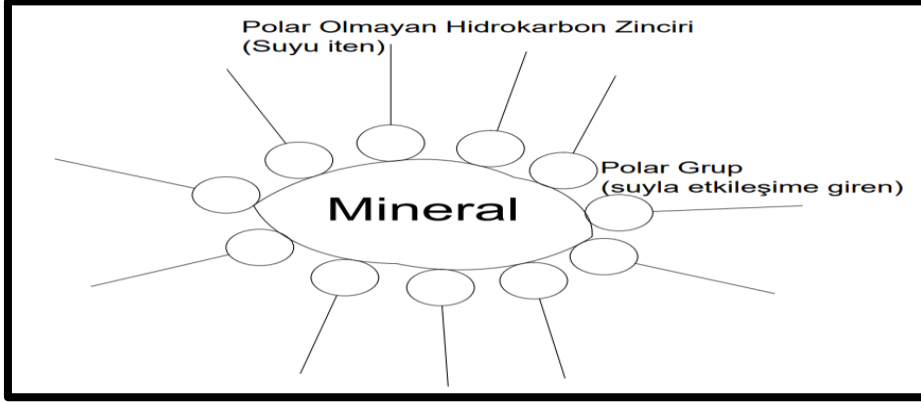


Şekil 2.14. Flotasyon şematik gösterimi

İstenen mineralin yüzeyine suyu iten özellik kazandırmak için kullanılan kimyasallara verilen genel ad toplayıcılardır. Toplayıcılar organik moleküllerden oluşan kompleks yapılardır. Simetrik bir yapısı bulunmamaktadır. Polar ve apolar olmak üzere iki bölümden oluşur. Apolar olan bölüm suyu iten özelliğe sahip olan bölümdür. Polar bölümü ise suyla etkileşime giren kısımdır. Toplayıcıların az miktarda kullanılması gerekmektedir. Eğer fazla kullanılırsa flotasyon işleminin seçiciliği azalmaktadır.

Çözünmeyen yani iyonlaşmayan toplayıcılar tane yüzeyine kaplanarak mineralin yüzeyini hidrofobik yapmaktadırlar. Molekülleri suda çözünerek iyonlaşan toplayıcılara da iyonlaşan toplayıcılar denilmektedir. Bu geniş asimetrik yapıya sahip bileşikler heteropolar ve apolar hidrokarbon grubuna sahiptir. Bunun sonucunda, molekül mineral yüzeyine bağlanan suyu iten ve

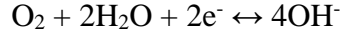
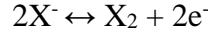
polar gruba sahiptir. Birden fazla toplayıcıyı bir arada kullanarak en uygun altın kazanımı elde edilmeye çalışılması çok yaygın bir uygulamadır. Toplayıcı mineral etkileşiminin şematik gösterimi Şekil 2.15.'te verilmiştir.



Şekil 2.15. Toplayıcı mineral etkileşimi

En yüksek seçicilik ve ekonomik performans için toplayıcılar düşük dozajlarda kullanılmaktadır. Toplayıcının gereken miktardan fazla kullanılması durumunda verime olumsuz etkisi olmaktadır. Ayrıca toplayıcının zincir uzunluğunun ve yapısının çözünmede ve soğurulmada etkisi bulunmaktadır. Örneğin, kollara ayrılmış karbon zincirleri düz zincir yapısına sahip olan toplayıcılardan daha yüksek çözünürlüğe sahiptir ve karbon zinciri 5'ten fazla karbon içeren toplayıcıların çözünürlüğü azalmaktadır. Bundan dolayı karbon sayısı 2 ile 5 arasında tutulur. Katyonik toplayıcılar hidrofobikliği 5 değerlikli azot grubu sayesinde (çoğu kez amin) sağlamaktadır. Ksantat'ların aksine katyonik toplayıcılar mineral yüzeyine elektrostatik güçler sayesinde soğurulduğu için toplama gücü zayıftır. Amfoter toplayıcılar pH'a göre katyonik ya da anyonik özellik gösterebilmektedir. Anyonik toplayıcılar iki gruptan oluşmaktadır. Oksihidril toplayıcıların polar kısımları organik asit veya sabun (yağ asidi tuzları) oluşturmaktadır. Karboksil toplayıcılar hayvan ve bitki yağlarından elde edilir ve güçlü hidrofobiklik özelliğine sahiptir fakat seçiciliği düşüktür. Bu toplayıcılar alkali toprak metalleri ve demir içermeyen metallerin flotasyonda kullanılmaktadır. Sulfo asit düşük toplama gücüne sahip iken seçiciliği yüksektir. Yağ asidine benzer özellik gösteren bu toplayıcılar barit, apatit, mika ve kasiretite minerallerin flotasyonunda kullanılmaktadır.

En yaygın olarak kullanılan toplayıcılar polar grubu iki değerli sülfür veya tiyo bileşini içeren sülfhidril toplayıcılarıdır. Bu toplayıcılar süflürlü minerallerin flotasyonunda güçlü ve seçicidir. Merkaptan en basit tiyo bileşenli toplayıcıdır. Bu grupta Ksantat olarak isimlendirilen toplayıcı sülfür flotasyonu ve bazen de altın flotasyonu için kullanılan en önemli toplayıcıdır. Ksantat'ın mineral yüzeyine çözümeden metal ksantat olarak soğurularak hidrofobiklik sağladığı kabul edilmektedir. Bazı çalışmalar altın flotasyonu için Ksantat türü olan Diksantojen'in görev aldığını göstermiştir. [46] Diksantojen altın tanelerinin yüzeyini yağ gibi kaplayarak minerali hidrofobik yapmaktadır. Diksantojen oluşumu aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

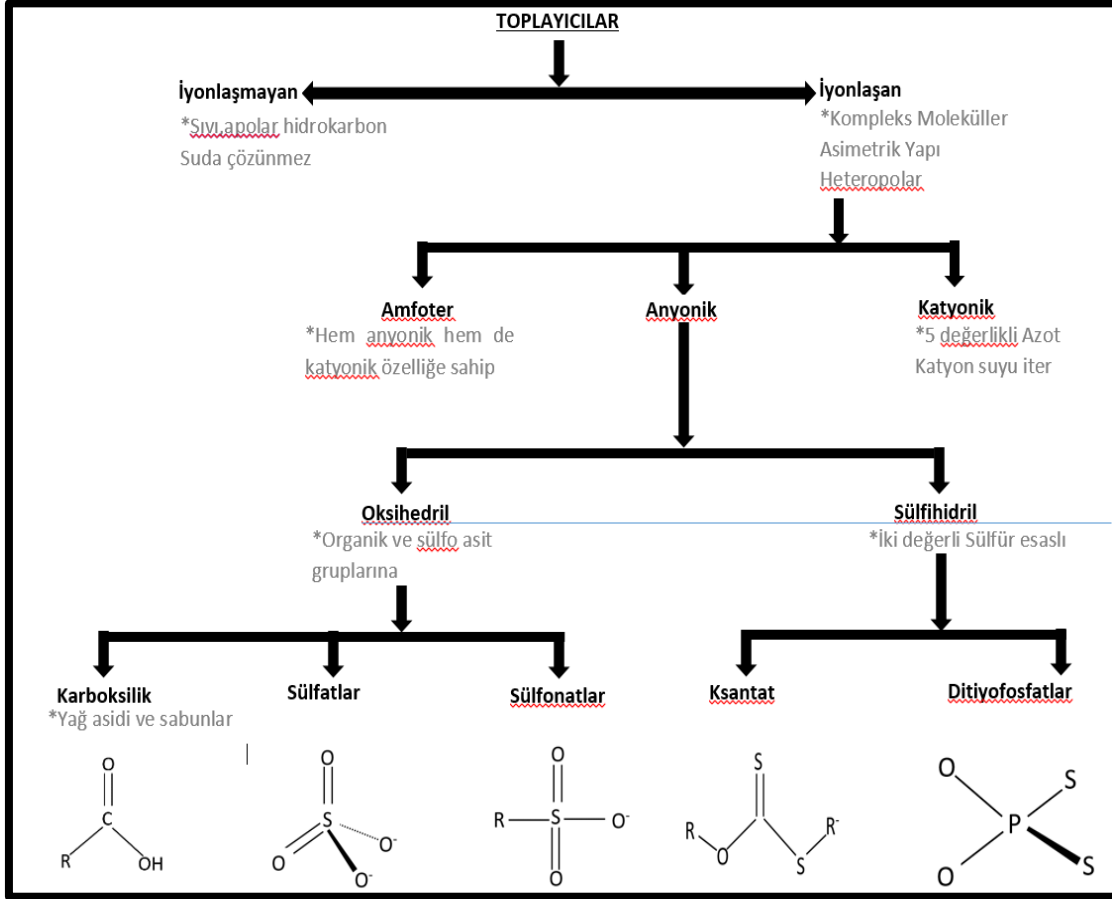


Sülfhidril toplayıcılar grubunda diğer bir önemli toplayıcı Ditiyofosfatlar'dır. Bu toplayıcılar Ksantat'a göre daha zayıf toplayıcılarıdır fakat birlikte kullanıldığında iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Tüm Thiol toplayıcılar flotasyon için oksijen ya da başka oksitleyici maddeye ihtiyaç duymaktadır.

Altın yüzeyi hidrofobikliği ksantat ve ditiyofosfatlar tarafından sağlanmaktadır. Yüzeyi lekesiz olan altın taneleri yüzeyi kirlenmiş/kaplanmış altın tanelerine göre daha az toplayıcılığı sayesinde hidrofobik özellik kazanmaktadır. [47] Uzun yıllar boyunca yüksek altın kazanımı ve yüksek tenörlü konsantreler elde edilirken sadece ksantat kullanılmasına rağmen yakın dönemde ditiyofosfatların ikinci toplayıcı veya canlandırıcı olarak kullanılmasının altın kazanımı artırdığı bilinmektedir. [48]

Eğer tane boyu çok büyük değilse ya da ortamda CaO ve Na₂S bulunuyorsa serbest altın taneleri sadece ksantat kullanarak iyi bir şekilde yüzdürülebilir. [49] Yüzeyi kirlenmiş taneler gibi, iri taneleri yüzdürmek için de yüksek miktarda toplayıcı kullanılması gerekir. İri tanelerinin flotasyonunda toplayıcı miktarının artması flotasyon kinetiğini hızlandırır ve yüksek verimlere ulaştırabilir. [50] Fakat iri taneler ve kirlenmiş yüzeyler için fazladan ilave edilen toplayıcılar ince

taneler tarafında tüketilir. Hidrosiklon alt akımında yapılan flaş flotasyon prosesinde yüksek yüzey alanı sayesinde ciddi miktarda kimyasal tüketecek ince taneler olmadığı için iri taneler flotasyonu hedeflenebilir. [51] Toplayıcıların sınıflandırılması Şekil 2.16.'da verilmiştir.

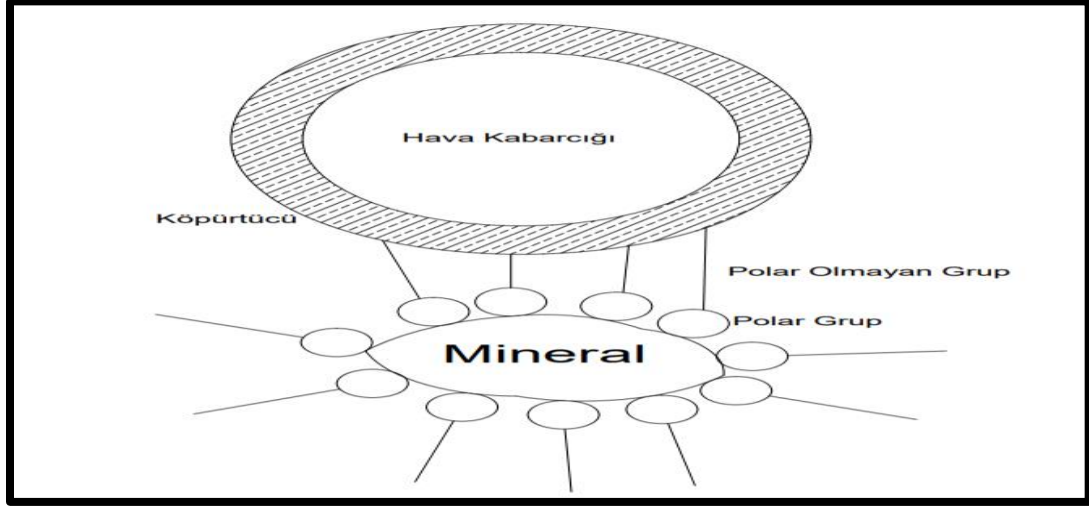


Şekil 2.16. Toplayıcıların Sınıflandırılması [52]

Köpürtücüler kimyasal olarak iyonik toplayıcılar benzer şekilde heteropolar organik kimyasallardır. Bu kimyasallar hava kabarcığının üzerine organik katman oluşturarak hava kabarcığının duraylılığını artırır ve polar olmayan bölümü ile de toplayıcıya bağlanır.

Bazı toplayıcılar da bir miktar köpürtücü yeteneğine sahiptir fakat ideal köpürtücü ilave bir toplama özelliğine sahip olmadan sadece hava kabarcıklarının duraylılığını ve kabarcıklara tutunmuş

taneleri köpük fazına kadar taşınması gerekmektedir. Köpürtücü hava kabarcığının yüzey gerilimini düşürmeli ve hava-su etkileşimini duraylamalıdır. Mineral ve hava kabarcığı etkileşimi Şekil 2.17.'de verilmiştir.



Şekil 2.17. Mineral-hava kabarcığı etkileşimi

Köpürtücüler genelde suda çözünen yapıdadır. Asitler, aminler ve alkoller en çok kullanılan çözülebilen köpürtücülerdir. Alkol toplayıcı özelliğinin olmamasından dolayı en çok kullanılan köpürtücüdür. Eskiden çam yağı ve kresol gibi doğal köpürtücüler kullanılırken günümüzde artık sentetik köpürtücülerin kullanımı artmıştır.

Toplayıcılar gibi kullanılacak köpürtücülerin belirlenmesi mineraloji ve proses ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir ve bazı uygulamalarda en uygun performansı elde etmek için birden fazla köpürtücü karışımı kullanılmaktadır. [53] Yapılan çalışmaya göre sülfürlü bakır kazanımında artan dozajlarda köpürtücü kullanımının genel verimi artırdığı belirlenmiştir. Bunun sebebi karbon zincirleri iri tanelerin altın verimini düşürürken uzun poliglikol zincirlerin iri tanelerin verimini artırması olarak açıklanmıştır. [54]

Düzenleyiciler minerallerin yüzeyinin hidrofobikliğini artırarak ya da azaltarak toplayıcıların seçicilik özelliğini artırmak için kullanılmaktadır. Bundan dolayı düzenleyiciler canlandırıcı, bastırıcı ve pH düzenleyiciler olarak 3 ayrı grupta sınıflandırılır.

Aktivatörler mineral yüzeyinin çözünen tuz iyonları sayesinde hidrofobik olmasını sağlar. Flotasyon verimini yüksek miktarda uzun zincirli ksantat kullanımını artırmasına rağmen uygun canlandırıcının kullanılması daha uygun ve seçici sonuçlar vermektedir. Bu durum kurşun-çinko flotasyonunda ya da galen, pirit ve kalsit flotasyonunda bakır sülfat (CuSO_4) kullanılarak yapılmaktadır. Sülfür flotasyonunda (bazı durumlarda altın flotasyonu da dahil) en yaygın kullanılan canlandırıcı bakır sülfattır. Serbest altın kazanımını artırmak için devrede bakır sülfat PAX ilavesinden sonra eklenmesi tavsiye edilmiştir. [55] Kimyasalların eklenme sırası spesifik bir işlemdir. Sülfür flotasyonunda ksantant ilavesinden önce bakır sülfat verilerek sülfür mineralleri aktive edilir. Bakır sülfatın altın kazanımında farklı iddiaları bulunmaktadır. Diğer bir açıklamada, öğütme işlemi sırasında oluşan demir-altın kompleksinin flotasyon işleminde kullanılan bakır sülfatın demiri canlandırması ile altın kazanımını artırması ile açıklanmaktadır. Bu hipoteze göre bakırın altına etkisiz olduğu ve direk bir şekilde altını değil demiri aktive ettiği iddia edilmektedir. [56] Diğer bir ispatlanan mekanizma artan bakır sülfat eklenmesinin altın kazanımında köpük duraylılığını artırarak altın kazanımını artırmasıdır. Canlandırıcıların temiz yüzeye sahip altın taneleri için kullanımı çok nadirdir. [57] Yapılan testlere göre serbest altın tanelerini canlandıran tek elementin gümüş olduğu ve klor mineralinin tek başına en önemli bastırıcı olduğu belirlenmiştir. Başka bir çalışmada da doğada çok nadir bulunan saf altının çok basit bir şekilde sadece gümüş ilavesi ile hidrofobik yapmak mümkündür. [58]

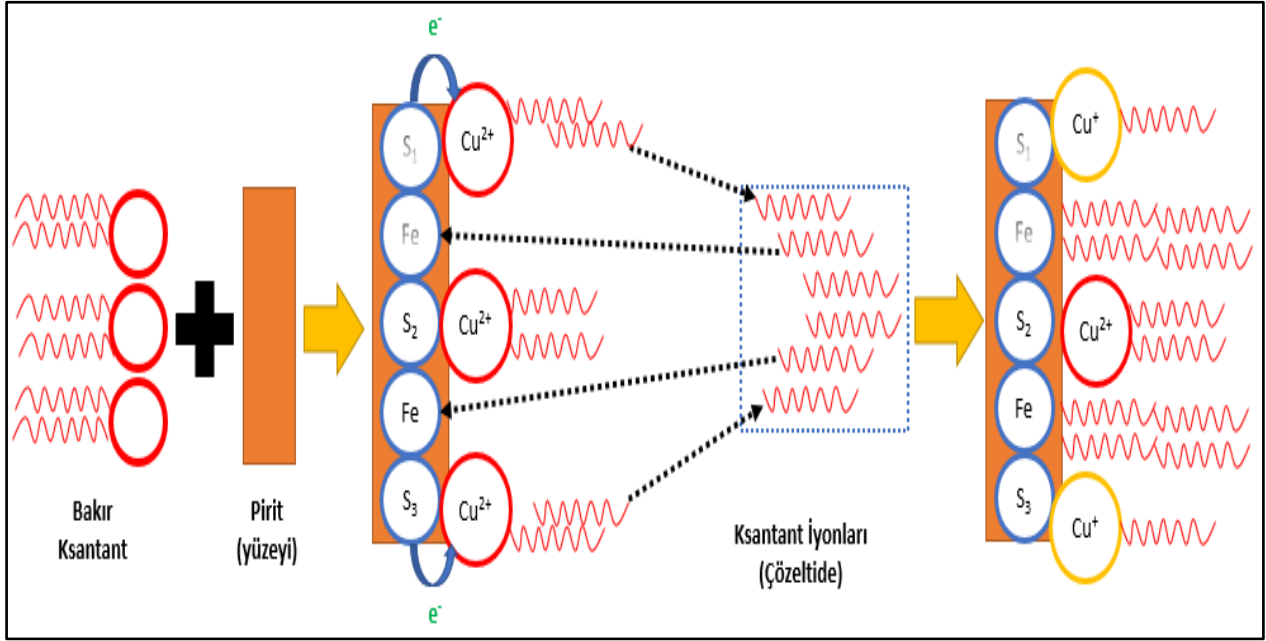
Bastırıcılar belirlenen minerallerin yüzeylerini hidrofilik yaparak toplayıcıların seçiciliğini artırmak için kullanılmaktadır. Örneğin sodyum silikat kullanımını ince taneli şlam malzemeleri birbirinden ayırarak sistemden uzaklaştırmayı sağlamaktadır. Şlam malzemedeki yüzeyi temizlenen mineral kolaylıkla belli kimyasallar kullanılarak kazanılabilmektedir. Bu durum sodyum silikatın şlamı bastırmasını ve istenen mineralin flotasyona cevap vermesini kolaylaştırır.

Bastırıcılar inorganik ya da çoklu bileşikler halinde olabilir. İnorganik bastırıcılar bazen zehirli olabilir. (Örneğin bakır-çinko flotasyonunda kullanılan siyanür ya da molibden flotasyonunda bakırı bastırmak için kullanılan sodyum sülfür gibi) Selüloz, dekstrin ve karboksilmetil selüloz gibi kimyasallar platin ve baz metal flotasyonunda kullanılmaya başlanmıştır. Batı Avustralya'daki The Kanowna Belle madeninde kullanılan uzun zincirli organik polimer olan Guar zamkı (Guar Gum) Serisit minerali ($KAl(AlSi_3O_{10})$) bastırarak mika mineralinin doğal bir şekilde yüzdürülmesini sağlamaktadır. 2006 yılında yapılan bir çalışmada pirit aktivasyonu için kullanılan bakır sülfatın gang mineralini bastırdığı raporlanmıştır. [59] Altın proseslerinde altının yüzebilirliğini kalsiyum oksit, sodyum siyanür ve zayıf asitte çözünen siyanür türlerinin nasıl etkilendiği büyük bir endişe kaynağıdır. Amil ksantat ile beraber 200g/t'a kadar sodyum siyanür (NaCN) ve 2000g/t'a kadar kalsiyum oksit (CaO)'in serbest altının bastırmadığı fakat etil ksantat ile kullanıldığında bastırdığı görülmüştür. Yapılan çalışmaya göre serbest altın yüzebilirliği klor iyonlarının etkili bir şekilde demir oksitlerin bastırılması ile olmaktadır. [60]

Endüstriyel olarak sülfürlü altın flotasyonu tesisinde herhangi bir pH düzenleyici kullanılmaz. pH düzenleyiciler genellikle işlem sonrasında atık barajına gönderilerek atığın pH'ını düzenlemek için kullanılmaktadır. Bazı altın minerali flotasyon tesislerinde bazik koşullarda çalışılır çünkü bazik ortam kimyasallarının duraylılığını artırır ve tesisteki ekipman ve boruların korezyona uğramasını minimize eder. pH uygulaması genellikle kireç ve soda külü ile yapılır. Bazen de hidroksit ve amonyak ile de yapılabilir. Şlam katmanı oluşturup altının flotasyonunu olumsuz etkileyebilecek talk, kil, demir oksit ve karbonat gibi yapıları dağıtmak için sodyum silikat gibi dağıtıcılar kullanılır. [61] Dağıtıcıların seçimine ve kullanımına dikkat edilmelidir. Sistemde kullanılan diğer kimyasalların istenmeyen etkilerinin araştırılması sonucunda en uygun kinetik ve yüksek verim elde edilebilir.

Pirit doğada en çok bulunan ve ekonomik değeri olmadığı düşünülen bir sülfür mineralidir. Fakat içerisinde altın gibi değerli metaller olduğu zaman flotasyon ile kazanılması gerekebilmektedir. Piritin flotasyonunda bazı durumlarda verimin artırılması için bakır sülfat kullanılabilir. Piritin bakır iyonları ile aktivasyonunda piritin bünyesinde bulunan demir iyonları ile bakır iyonları arasında bir yer değiştirme söz konusu değildir. Bakır iyonları birinci aşamada Cu^{2+} hidroksit

formunda yüzeye çökelmekte ve ikinci aşamada Cu^{2+} iyonları Cu^+ formuna indirgenmektedir. Bu bakımdan piritin bakır ile aktivasyon mekanizması sfalerit aktivasyonunda çok farklı olmaktadır. Piritin bakır iyonları ile aktivasyonu ve ardından ksantat iyonlarının yüzeye soğrulması mekanizmaları Şekil 2.18 gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Bakır ksantantın pirit yüzeyine soğurulma mekanizması [62]

Bakır sülfat aktivasyonu yapılmadan sadece toplayıcı kullanılan pirit flotasyonunda verim %32 civarındayken bakır sülfat ile aktive edilen pirit verimi %67'ye çıkmıştır. [63] Bakır aktivasyonu için optimum palp pH'sı pH=8 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek pH değerlerinde pirit veriminin azaldığı görülmüştür. [64]

2.3.4.1.Flaş Flotasyon

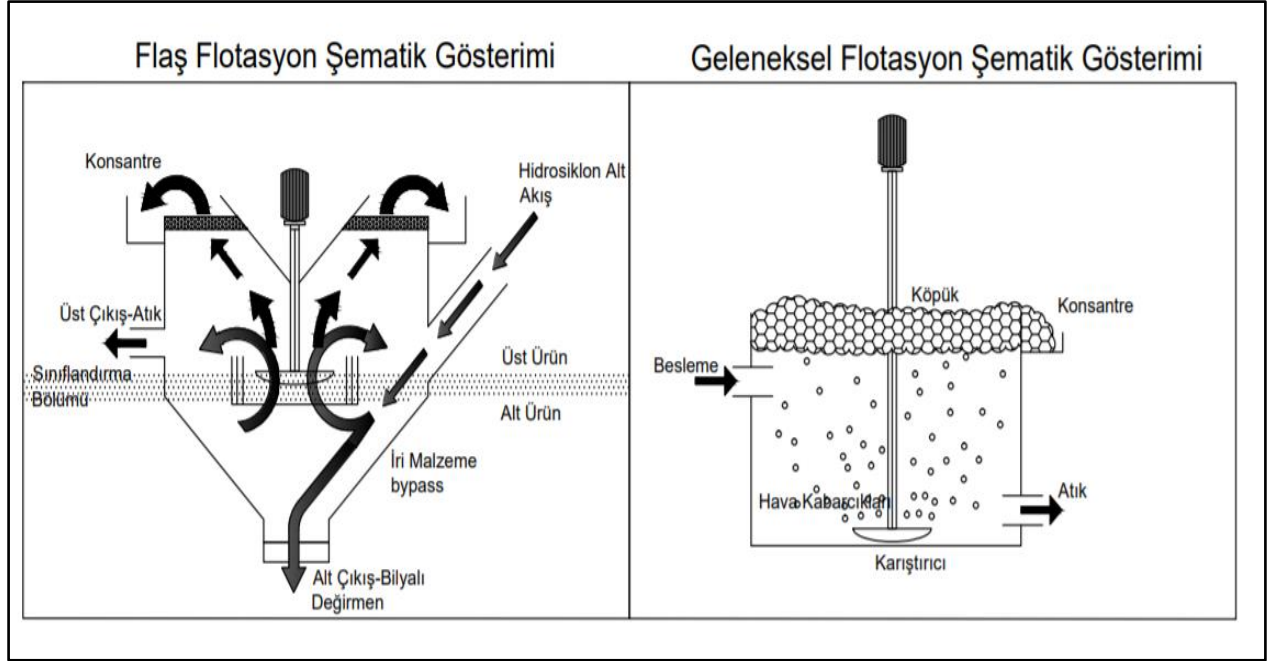
İlk flaş flotasyonu denemesi 1933 yılında North Broken Hill madeninde bilyalı değirmen çıkışında yapılmıştır. [65] 1949 yılında Cominco Maxwell hücrelerini çubuklu değirmen çıkışına koyarak flaş flotasyon yapmıştır. 1960 yılında ilk yüksek yoğunluklu, santifrj akış beslemeli ve iri atık çıkışı

olan bugünkü flaş flotasyon hücrelerinin öncüsü olan Davcra hücresi test edilmiştir. Davcra hücresi çıktığı zaman mineral endüstrisi tarafından pek kabul görmemiş ve kömür flotasyonu haricinde kullanılmamıştır. 1980 yılında şimdiki adı Outotec olan (eski adı Outokumpu) firma ‘Skimair’ flaş flotasyon hücresi ile hızlı yüzen ve serbestleşmiş mineralleri yüksek oranda kazanan hücreyi geliştirmiştir. [66] Bu hücre değirmen devresinde ve geleneksel flotasyon devresi öncesinde sülfür minerallerinin gereksiz öğütülmesini engellemek için tasarlanmıştır. [67] İlk denemesi de 1982 yılında Finlandiya’daki Hammaslahti bakır konsantretöründe olmuştur.

Flaş flotasyon yanlış bir şekilde iri tanelerin flotasyonu için ifade edilse de serbestleşmiş ince taneler için daha basittir. Flaş flotasyon geleneksel flotasyona kimyasal ve flotasyon rejimine göre benzerlik gösterse de, hücre tasarımı, besleme karakteri ve işletme stratejisi bakımından farklıdır. Flaş flotasyonu ve geleneksel flotasyon arasındaki farklıklar; [68]

- İri besleme
- Beslemedeki yüksek yüzde katı oranı
- Kısa sistemde kalma süresi
- Bazen hiç ya da çok kısa koşullandırma süresi
- İri tanelerin kısa-devre(by-pass) ile uzaklaştırılması sonucu düşük karıştırıcı gücü

Bu faktörlerin yanında su balansı ve tanelerin tipi de verim için önemlidir. Değirmen devresinde devrede yük üzerine yerleştirilen flaş flotasyon hücresi serbestleşmiş, oksitlenmemiş sülfür ve ince altın tanelerin kazanımını hedeflemektedir. Yüksek yüzde katı yoğunluğu ile çalışılan sistemlerde bu taneleri yüzdürebilmek için sisteme verilen su miktarının devrenin dengesini bozmaması gerekmektedir. Geleneksel flotasyon ve flaş flotasyon arasındaki en büyük fark sistemde kalma süresidir. Verim-tenör grafikleri incelendiğinde değerli mineralin büyük bir kısmı hızlıca yüzdüğü ve az bir kısmının ya hiç yüzmediği ya da yavaş yüzdüğü görülmüştür. Flaş flotasyon ve geleneksel flotasyon prosesi şematik gösterimi Şekil 2.19.’de verilmiştir.



Şekil 2.19. Flaş flotasyon ve geleneksel flotasyon şematik gösterimi

Flaş flotasyona beslenen iri taneler herhangi flotasyon işlemine dahil olmadan sistemi kısa devre (by-pass) yaparak değirmene gönderilir. Yapılan çalışmaya göre artan derinlikle çamur profilinin değişmesi tane boyuna bağlı olarak çamurun yoğunluğu, tanelerin irileşmesi ve birikme (segregation) eğilimi göstermektedir. Düşük yoğunluklu ince taneler opsiyonel olarak kullanılabilen çıkıştan şlam uzaklaştırma gibi kullanılabilir. Bu da derinlikle beraber katı yoğunluğunu artırarak flaş flotasyon ve değirmen devresindeki farklı su ihtiyacının üstesinden gelinmesini sağlamaktadır. Kullanılan bu ekipman devrenin geri kalanındaki tenör dalgalanmalarının önüne geçip sabit tenörlü ürün elde ederken bir yandan da nihai verimi, öğütme devresi ve tesis susuzlandırma kapasitesini de artırmaktadır. [69] Kullanılan bu ekipman sayesinde flotasyon devresi öncesinde farklı koşullarda seçici bir şekilde düşük kütle kazanımı avantajı bulunmaktadır.

Flotasyon işleminde olduğu gibi mineralin özellikleri, kimyasal türü ve dozajı, sistemde kalma süresi, hücre yapısı ve karıştırıcı hızı mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır fakat tane boyu, hava hızı ve çamur yoğunluğu kilit öneme sahiptir. [70] Eğer değirmen devresinde ince serbest altın

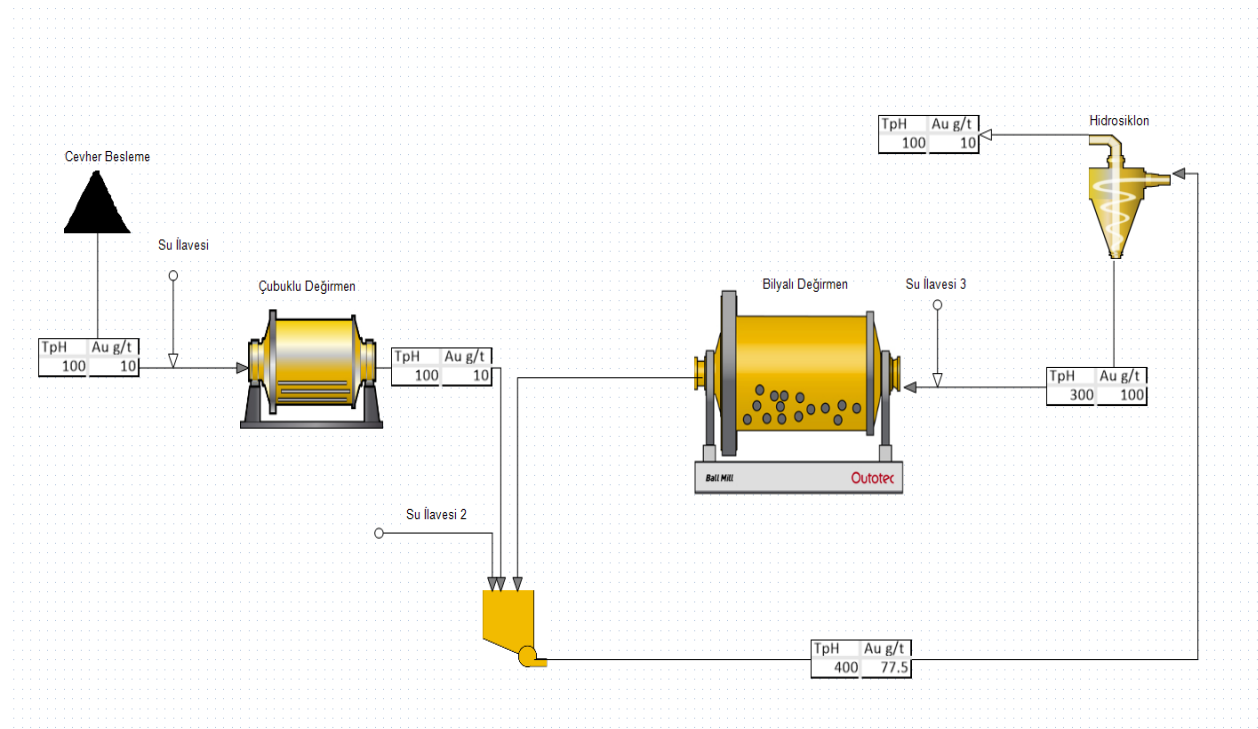
taneleri varsa gravite ile zenginleştirme olsun ya da olmasın flaş flotasyon kullanılabilir. Genel olarak, flaş flotasyon kapalı devre öğütme sisteminde hidrosiklon alt akımı üzerine yerleştirilerek altın taşıyan sülfürlerin sistemden uzaklaştırarak aşırı öğünmeleri engellemektedir. Eğer cevherde gravite ile zenginleştirilecek altın minerali yoksa altın taşıyan sülfür mineralleri ön konsantre elde etmek için kullanılabilir. Bazen bu elde edilen gravite ile zenginleştirilebilecek altın tanelerine sahip olmayan konsantre çok ince öğütme, kavurma, biyolojik ya da basınçlı oksidasyona gönderilir. Eğer cevherde pirit, arsenopirit veya pirotin gibi mineraller kalırsa tanelerin yüzey oksidasyonuna uğramasından dolayı prosesin geri kalanındaki flotasyon işleminde verimde düşme yaşanabilir.

Kesikli çalışan santifrüj kuvveti ile çalışan konsantretörün olduğu sistemde altın tanesi çok ince boylarda veya serbest altının çok az olduğu durumda flaş flotasyon işlemi de uygulanabilir. Eğer gravite ile kazanılacak ciddi miktarda altın varsa flaş flotasyon ve kesikli çalışan santifrüj kuvvetli birlikte kullanılabilir. İnce serbest altın taneleri kuvvetli hidrofobik olmasından dolayı flaş flotasyon için çok uygundur. [71] Yapılan çalışmaya göre serbest altın tanelerinin flotasyonunda tanenin şekli ve boyutu, suyun kalitesi, köpüğe gönderilen gang miktarı, köpüğün duraylılığı ve hava kabarcıklarındaki sülfür yükü altının hidrofobikliğine engel olarak serbest altının hava kabarcığı ile etkileşimini azaltabilir.

Kurulu bir tesiste yapılan çalışmada flaş flotasyon devresi kapalı olarak yapılan denemelerde hidrosiklon üst akımının yani flotasyon devresinin beslemesindeki pirit ya da arsenopirit bağlı olarak toplam sülfür miktarı artmıştır. Fakat flaş flotasyon devreden çıktıktan sonra nihai verimde bir miktar düşüşler gözlemlenmiştir. Flaş flotasyon devrede iken altının %42'si flaş flotasyon devresi tarafından kazanılmaktadır. [72] Bu durumda flaş flotasyonun sülfürlü malzemelerin yüzey oksidasyonuna uğrayıp flotasyonda yüzme özelliğinin azalmasına fırsat tanımadan bir an önce konsantreye geçmesi ile açıklanmıştır.

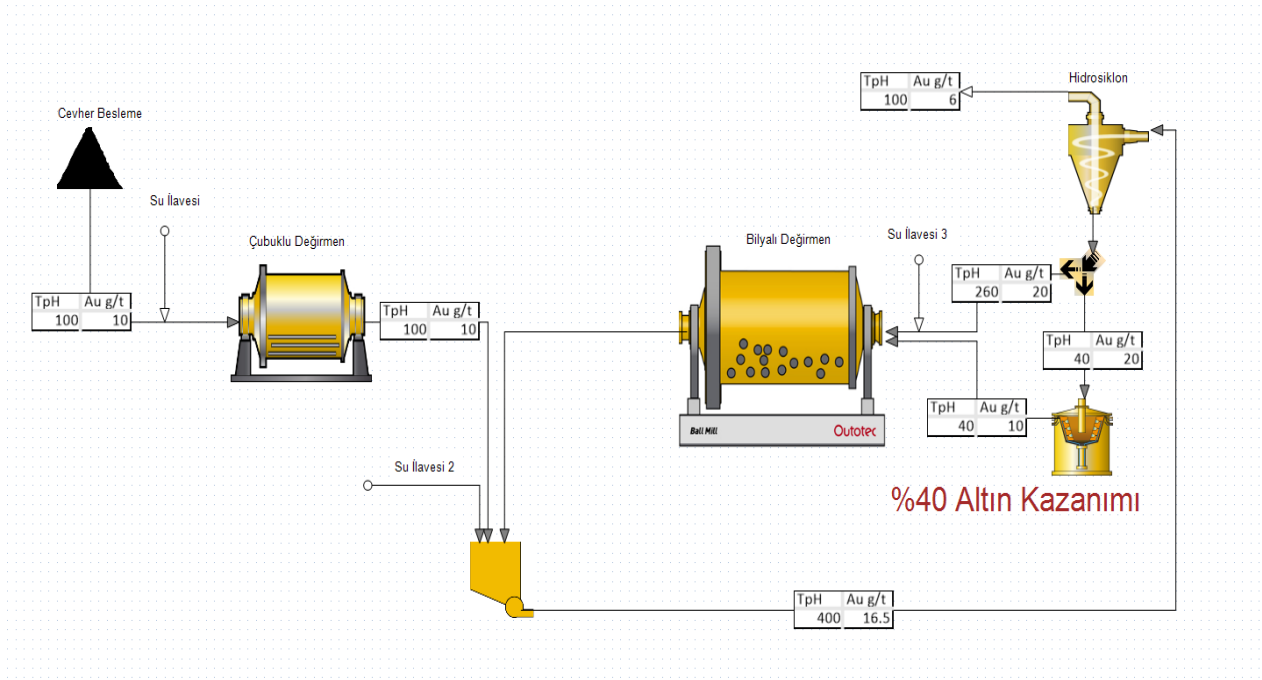
2.3.5. Gravite İle Zenginleştirme ve Flaş Flotasyon ile Altın Kazanımı

Gravite ve flaş flotasyon yöntemleri serbest altın tanelerinin kazanılması için en yaygın olarak kullanılan proseslerdir. Değirmen devresinde serbest altının kazanılması için Falcon® firmasının yaptığı çalışmalarda herhangi bir zenginleştirme ekipmanının kullanılmadığı değirmen devrelerinde altının nasıl davrandığı hipotezi Şekil 2.20.'de verilmiştir. Steve McAlister ve Colin Sprake'in Falcon firması için yaptığı çalışmada eğer öğütme devresinde herhangi bir zenginleştirme ekipmanı kullanılmadığı durumda ve devreden yükün %300 olduğu koşulda altının hidrosiklonlarda besleme tenörüne göre 10 kat zenginleştiği raporlanmıştır. [73]



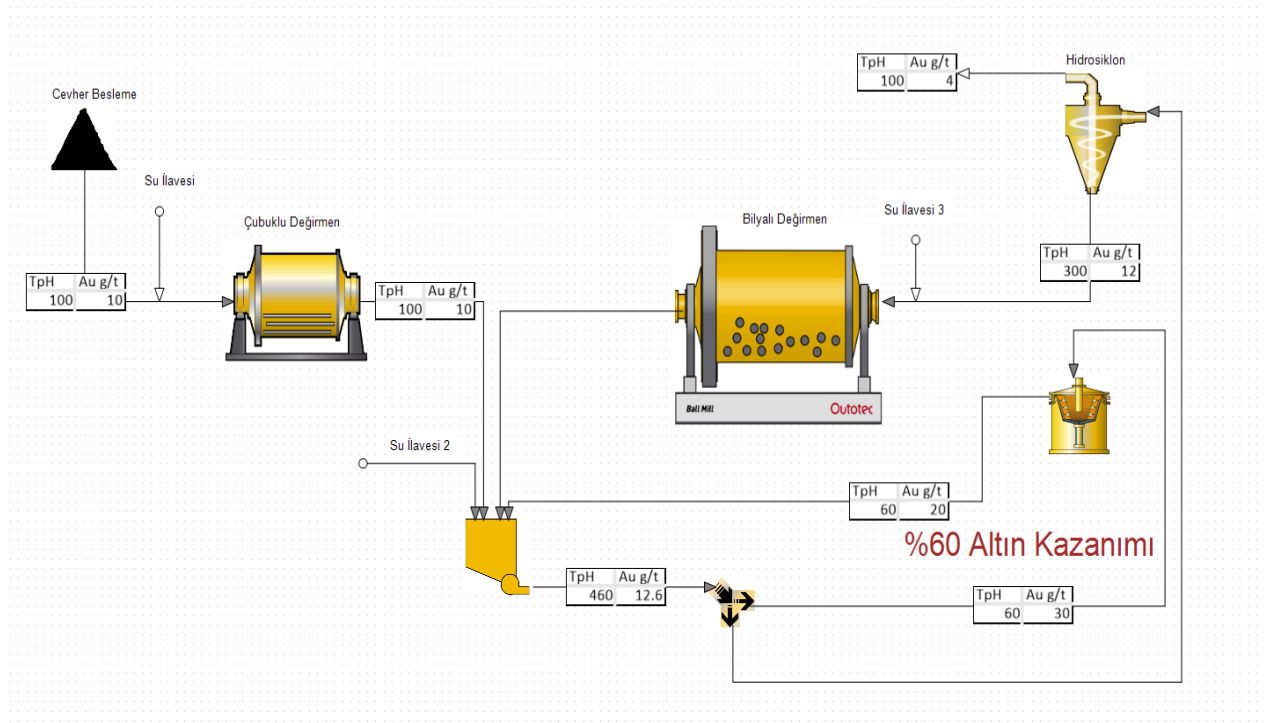
Şekil 2.20. Altın tanelerinin öğütme devresindeki davranışı

Bu bilgiler ışığında gravite ile zenginleştirme ekipmanı kullanıldığında sisteme etkisi araştırılmıştır. Öncelikle hidrosiklon alt akımına yerleştirilen gravite ekipmanı ile araştırmalar başlamıştır. Falcon firmasının yaptığı çalışma Şekil 2.21.'de verilmiştir.



Şekil 2.21. Hidrosiklon alt akımına gravite ekipmanı yerleştirildiğinde altının davranışı

Bu çalışmada hidrosiklon alt akışına gravite ekipmanı konularak altın cevherinin aşırı öğütme işlemi yapılmadan kazanılması amaçlanmıştır. Hidrosiklon alt akımının küçük bir kısmına konulan gravite ile zenginleştirme ekipmanı beslemedeki altının %40'ını kazanmıştır. Aynı çalışmada gravite ile zenginleştirme ekipmanı hidrosiklon beslemesine konulduğunda sisteme etkisi incelenmiştir. Akım şeması Şekil 2.22.'de verilmiştir.



Şekil 2.22. Hidrosiklon beslemesine gravite ekipmanı konulursa altının davranışı

Bu çalışmada ise hidrosiklon beslemesinin bir kısmı gravite ile zenginleştirme ekipmanına verilerek sistem analiz edilmiştir. Aynı cevhere yapılan çalışmada bu sefer altın verimi %60 olarak belirlenmiştir. Böylelikle cevherin karakterine göre gravite ile zenginleştirme ekipmanının konulduğu akış üzerinde farklı verimler elde edildiği belirlenmiştir.

Modelleme ve simülasyon çalışmaları, laboratuvar testleri ve tesis verileri kullanılarak akım şeması dizaynı ve optimizasyonu için çok faydalı bir hale gelmiştir. Lambert (2009) bu yöntemi kullanarak bakır-altın projesini farklı akım şemaları üzerinde göstermiştir. [74] Çalışmasındaki laboratuvar ölçekli flaş flotasyon testlerinde özellikle de -37 mikron fraksiyonunda gravite ile kazanıma göre %10 daha fazla altın kazanımına sahip olduğunu belirtmiştir. Yaptığı simülasyon çalışmasında flaş flotasyon, gravite ile kazanıma göre neredeyse 2 kat daha fazla altının kazanılabileceğini hesaplamıştır. Bunun sebebini de flaş flotasyonun yüksek kapasitesi ve ince altın tanelerindeki başarısı olarak belirtmiştir. Simülasyonlarındaki dikkat edilecek bir diğer husus da altın ve pirit minerallerinin %80'inin alt akıma geçtiğini kabul etmesidir.

Ish Grewal, Mark Van Kleek ve Steven McAlister'in yaptığı çalışmada devreden yük miktarına göre hidrosiklon besleme ve hidrosiklon alt akımının altın tenörü arasında bir oran olduğu belirtilmiştir. Örneğin %300 devreden yükü olan bir değirmen devresinde hidrosiklon besleme altın tenörünün hidrosiklon alt akımı altın tenörüne oranı %83 olarak belirlenmiştir. [75]

Tez çalışmasında literatür çalışmalardan elde edilen bilgiler ve kabullenmeler ile birlikte laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirilmiş olup teorik bir akım şeması üzerinde yöntem araştırması yapılarak altın verimi tahmin edilmeye çalışılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

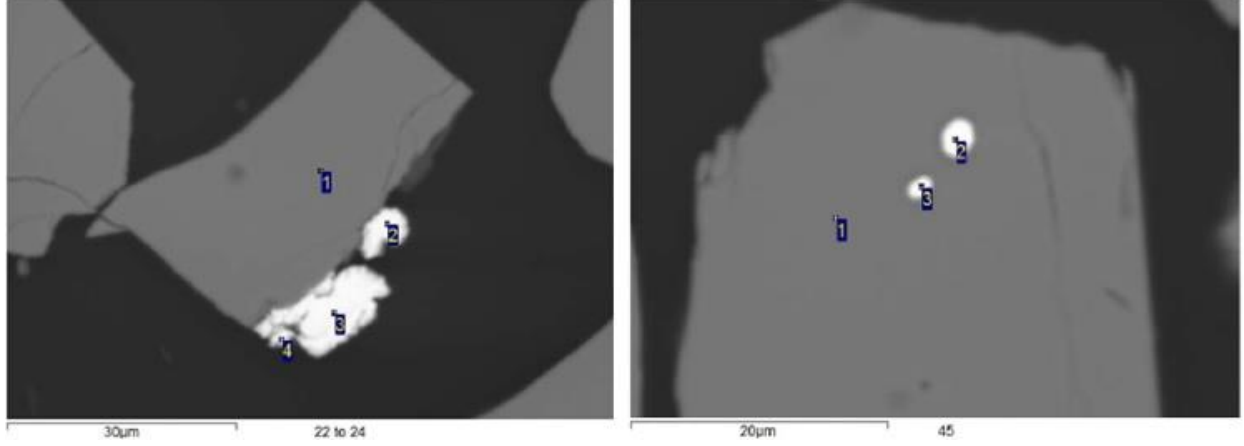
3.1. Cevher Numunesinin Tanımlanması

Tezde kullanılan cevherin mineralojik özellikleri 2012 yılında SGS Lakefield’da yapılan çalışma sonucunda belirlenmiştir. [76] Tüm kayaç analizi ve altın mineralojisi bilinmektedir. Cevherin büyük kısmı kuvars, kalsit ve dolomiten oluşmaktadır. Bunun haricinde ciddi miktarda kil minerali olan kaolinit bulunmaktadır. Cevherin kayaç analizindeki bazı bileşikler ve arsenik, sülfat sülfürü ve organik karbon sonuçları Çizelge 3.1.’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Cevherin kayaç ve Arsenik, Sülfat Sülfür ve Organik Karbon Analizi

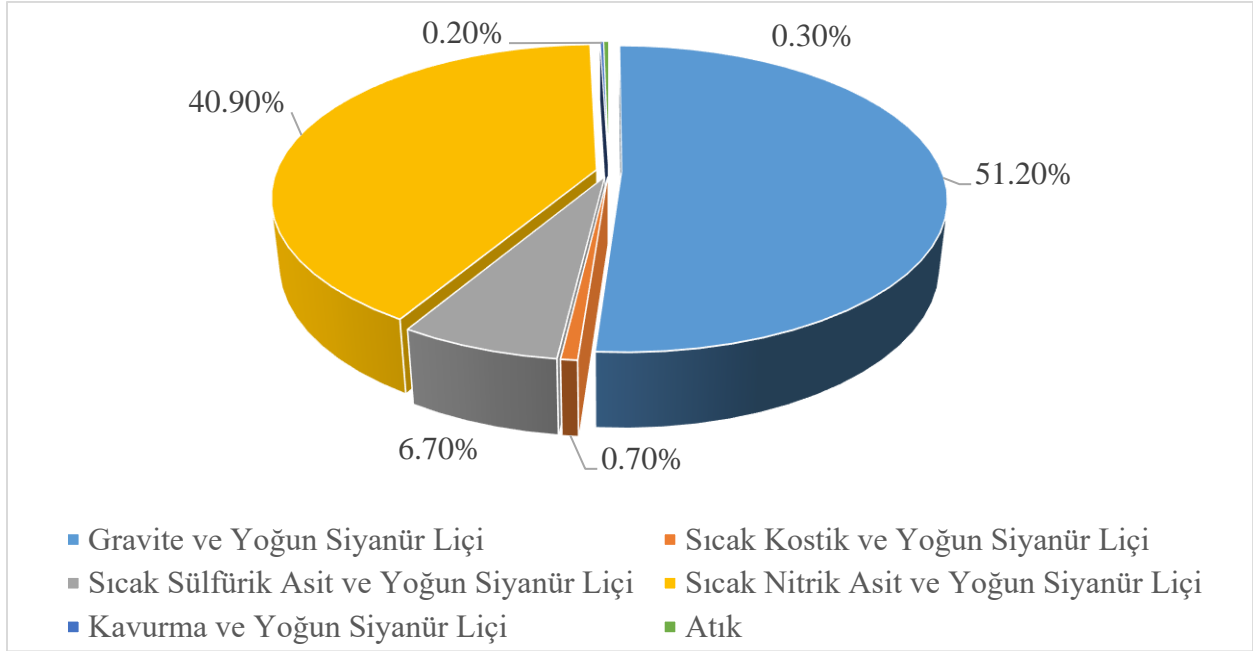
Kompozit	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	K ₂ O %	TiO ₂ %	As%	S ²⁻ (%)	C(t) (%)
	39.10	6.67	7.69	6.41	12.30	1.11	1.00	0.41	2.40	6.19

Cevherin mineralojisini anlamak için SEM (Scanning Electron Microscopy) ve SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) yöntemleri kullanılarak altının hangi minerallerle ve hangi formda bulunduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Altının yaklaşık %15’inin pirit minerali, %11’inin arsenopirit ve %0.4’ünün ise demir oksitler içinde kaldığı görülmüştür. Altının %74’ünü mikroskobik ve geri kalan %26’sı sub-mikroskobik altın olarak tanımlanmıştır. Mikroskobik altının da %56’sının serbest, %6’nın serbestleşmiş ve %10’unun ise kitli kaldığı görülmüştür. Altın mineralinin de nabit altın olduğu görülmüştür. Pirit mineralinin yanında görüntülenen ve pirit mineralinin içindeki altın tanelerinin SEM analizi sırasında görüntüleri Şekil 3.1.’de verilmiştir.



Şekil 3.1. SEM Analizinden Görüntüler a) Soldaki örnekte altının pirit mineralinin dışında görüntülenmiştir b) Sağdaki örnekte ince altın taneleri pirit minerali içerisinde görüntülenmiştir.

Mineralojik çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler ışığında tanımlayıcı liç testi yapılmıştır. Bu testin ilk basamağında cevher gravite ve sonrasında mozzly masasında altının %12.9'u zenginleştirilmiştir. Gravite konsantresinin atığından ise standart siyanürleme işlemi ile %38.2'si kazanılmıştır. Yani gravite ve siyanürleme işlemi ile serbest ya da serbestleşmiş altın kazanımı %51.1 olmuştur. Daha sonraki basamak da arsenatlar içindeki altını serbestleştirmek için 3 saat sıcak kostik ile liç ettikten sonra pH düzenlemesi yapıp siyanür liçi yapılmıştır ve altın kazanımı %0.7 olarak belirlenmiştir. Üçüncü basamakta pirotin, kalsit, ferit, dolomit, galen, hematit, uranit ve değişken bakır sülfürler gibi minerallerin içindeki altını serbestleştirmek ve çözeltilmeye geçirmek için 25 saat sıcak sülfürik asit liçi ve sonrasında standart siyanür liçi yapılmıştır. Altın kazanımı bu basamakta %6.7 olarak gerçekleşmiştir. 4. basamakta pirit, arsenopirit ve diğer sülfürler içindeki altını serbestleştirmek ve çözeltilmeye almak için 3 saat sıcak nitrik asit liçi ve sonrasında standart siyanürleme işlemi yapılmıştır. Altın kazanımı %40.8 olarak gerçekleşmiştir. Son basamakta ise karbonlu bileşenler içindeki altını belirlemek için kavurma işlemi yapılmış ve sonrasında standart siyanür liçi yapılmıştır. Altın kazanımı %0.2 olarak gerçekleşmiştir. 5 basamaklı bu işlemin atığında kalan altın miktarı %0.4 olarak belirlenmiştir. Atıktaki altın silikatlar ya da silikatlar içindeki çok ince sülfürler içindeki kilitli kalan altın miktarı olarak düşünülmektedir. Tanımlayıcı liç testinin sonuçlarını Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Tanımlayıcı liç testi sonuçları

Mineraloji ve tanımlayıcı liç testi sonuçlarına göre ciddi miktarda altının sülfürlü mineraller ile birlikte olduğu ve ana altın taşıyıcısının pirit minerali olduğu görülmüştür. Mineralojisi tanımlanan bu cevhere 2018 yılında flotasyon testlerini de içeren metalürjik çalışma yapılmıştır. [77] Başlangıç testinde bastırıcı olarak 1500g/t sodyum silikat (Na_2SiO_3), canlandırıcı olarak 100g/t bakır sülfat (CuSO_4), toplayıcı olarak 55g/t PAX (potasyum amid ksantat), ikincil toplayıcı olarak 12g/t R208 (dialkil ditiyofostat) ve köpürtücü olarak 65g/t Polyfroth W31 (glükol eter bazlı) kullanılmıştır. İlk önce tüm cevhere kaba flotasyon işlemi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kaba flotasyon testi

Tüm Cevhere Kaba Flotasyon	Kütle	Analizler		%Dağılım	
	%	Au ppm	%S	Au%	%S
Kaba Flotasyon Konsantre	13.5	78.2	19.0	95.11	91.94
Kaba Flotasyon Atığı	86.5	0.6	0.26	4.68	8.06
Kaba Flotasyon Besleme	100	11.1	2.79	100.00	100.00

İkinci testte ise aynı koşullarda gravite atığına kaba flotasyon yapılmıştır. Gravite konsantresi ile birlikte nihai altın kazanımı %94.7 olarak belirlenmiştir. Kaba flotasyon testi sonuçları Çizelge 3.3.'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Gravite atığına yapılan kaba flotasyon testi

Gravite Atığına Kaba Flotasyon	Kütle	Analizler		%Dağılım	
	%	Au ppm	%S	Au%	%S
Kaba Flotasyon Konsantre	12.5	49.6	20.1	91.45	88.47
Kaba Flotasyon Atığı	87.5	0.69	0.38	8.90	11.71
Kaba Flotasyon Besleme	100	6.78	2.84	100.00	100.00

SGS Lakefield'da yapılan testlerde (2018) uygun koşulun bulunması için aşağıdaki testler yapılmıştır.

- Birincil toplayıcı etkisi : 3418A (diakil ditiyofosfinat) , SIPX (sodyum izopropil ksantant) ve PAX denenmiştir.
- İkincil toplayıcı etkisi : R208, Aero 404 (merkaptobenzotiazol ve ditiyofosfat karışımı) ve Aerofloat 5100 (tiyonokamat türü) denenmiştir.
- Seçilen birincil toplayıcı dozajı belirlenmesi : 55g/t ve 70g/t ksantat denenmiştir.
- Aktivatör olarak kullanılan bakır sülfat dozajının belirlenmesi: 0, 100 ve 200g/t bakır sülfat (CuSO₄) dozajlarında denenmiştir.
- Bastırıcı olarak kullanılan sodyum silikat dozajının belirlenmesi: 500, 1000 ve 1500g/t Sodyum silikat denenmiştir.
- Bastırıcı çeşitlerinin denenmesi ve dozajı: IL200T (polimer), Pionera 100 (biyopolimer) ve Aero 633 (karbonhidrat polimer türevi) denenmiştir.
- Öğütme ve çamur yüzde katı testleri: P80 94, 68 ve 49mikron öğütme boylarında ve %33, %25 ve %15 katı oranlarında denenmiştir.
- Uzatılmış kaba flotasyon test süreleri: 20 ve 36 dakika kaba flotasyon testleri denenmiştir.

Yapılan testler sonucunda en uygun koşul için bastırıcı olarak 500g/t sodyum silikat (Na₂SiO₃), canlandırıcı olarak 100g/t bakır sülfat (CuSO₄), toplayıcı olarak 70g/t ksantat ve köpürtücü olarak 54g/t W31 (alkol ve glikol bazlı) belirlenmiştir. Bu testlerde en yüksek altını kazanımını

hedeflemek yerine flotasyonun arkasından gelecek olan basınçlı oksidasyon için sülfür karbonat oranı 1.28 olması hedeflenmiştir. Altın kazanımı %95.3 ve sülfür kazanımı %95.4 olarak gerçekleşmiştir. Optimum koşullarda yapılan gravite atığına yapılan kaba flotasyon testi sonuçları Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Optimum koşullarda gravite atığına yapılan kaba flotasyon testi sonuçları

Gravite Atığına Kaba Flotasyon (optimum koşul)	Kütle	Analizler		%Dağılım	
	%	Au ppm	%S	Au%	%S
Kaba Flotasyon Konsantre	18.3	37.4	14.7	95.3	95.4
Kaba Flotasyon Atığı	81.7	0.4	0.2	4.7	4.6
Kaba Flotasyon Besleme	100	7.2	2.8	100.00	100.00

Ayrıca aynı çalışmada cevhere flaş flotasyon testi yapılmıştır. 50 g/t CuSO₄, 10 g/t PAX, 10 g/t Aero 5100 ve 20 g/t W31 kimyasallar kullanılarak toplamda 2 dakikalık flaş flotasyon testi yapılmıştır. Flaş flotasyon atığına ise 1500 g/t Na₂SiO₃, 100 g/t CuSO₄, 35 g/t PAX, 35 g/t Aero 5100 ve 63 g/t W31 kullanılarak kaba flotasyon yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.5.'de verilmiştir.

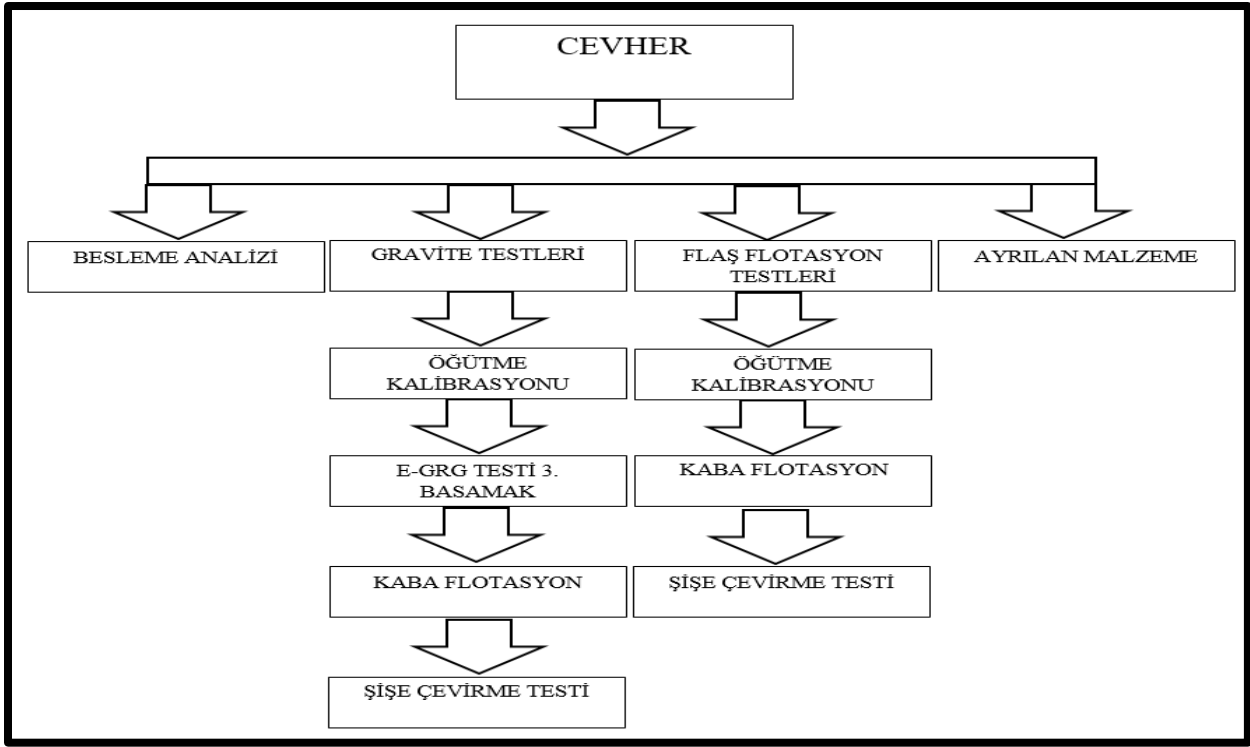
Çizelge 3.5. Flaş flotasyon ve kaba flotasyon testi sonucu

Flaş ve Kaba Flotasyon	Kütle	Analizler		%Dağılım	
	%Ağırlık	Au ppm	%S	Au	%S
Flaş Konsantre	3.4	163.3	19.9	42.7	24.1
Kaba Konsantre	18.7	37.5	10.5	54.3	70.1
Birleştirilmiş Konsantre	22.1	56.7	11.9	97.0	94.1
Flotasyon Atık	77.9	0.5	0.2	3.0	5.9
Hesaplanan Besleme	100.0	12.9	2.8	100.0	100.0

Flaş flotasyon işlemi ile altının %42.7'i ve sülfürün %24.1'i kazanılmıştır. Atığına yapılan kaba flotasyon testinde de toplam altının %54.2'i ve sülfürün %70.1'i kazanılmıştır. Flaş ve kaba flotasyon konsantreleri birleştirildiğinde beslemedeki toplam altının %97'i ve sülfürün %94.1'i kazanılmıştır. Atıkta ise altının %3'ü ve sülfürün %5.9'u kalmıştır. Tezde yapılan flaş flotasyon ve kaba flotasyon testleri SGS'de yapılan koşullar baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

3.2. Tez Kapsamında Yapılan Deneyler

Altın kazanımında flaş flotasyon ve gravite ile zenginleştirme proseslerinin karşılaştırması için yaklaşık 36 sondaj kuyusundan elde edilen 111 örnekten temsili yaklaşık 150 kg numune temin edilmiştir. Temin edilen cevherin tamamı laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı ile -2mm'ye kırılmıştır. Numune bölücü kullanılarak testler için gerekli malzeme homojen olarak ayrılmıştır. Test programı Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Test programı

Kırılan cevher iyice homojen bir şekilde karıştırılıp konileme dörtleme yöntemi ile deneyler için ayrılmıştır. Gerekli testlerde kullanılacak malzemeler ağzı kapalı poşetlere sonradan kullanılmak üzere saklanmıştır. Test çalışma kapsamında örnek hazırlama çalışmasından bir görüntü Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Örnek hazırlama aşamasından bir görüntü

Teste başlamadan önce besleme analizleri için örnek alınmıştır. Dönen numune bölücü kullanılarak altın gümüş, bakır, arsenik, demir ve sülfür analizleri için temsili numune alınmıştır. Temsili numune almak için kullanılan dönen numune bölücü Şekil 3.5.'de verilmiştir.

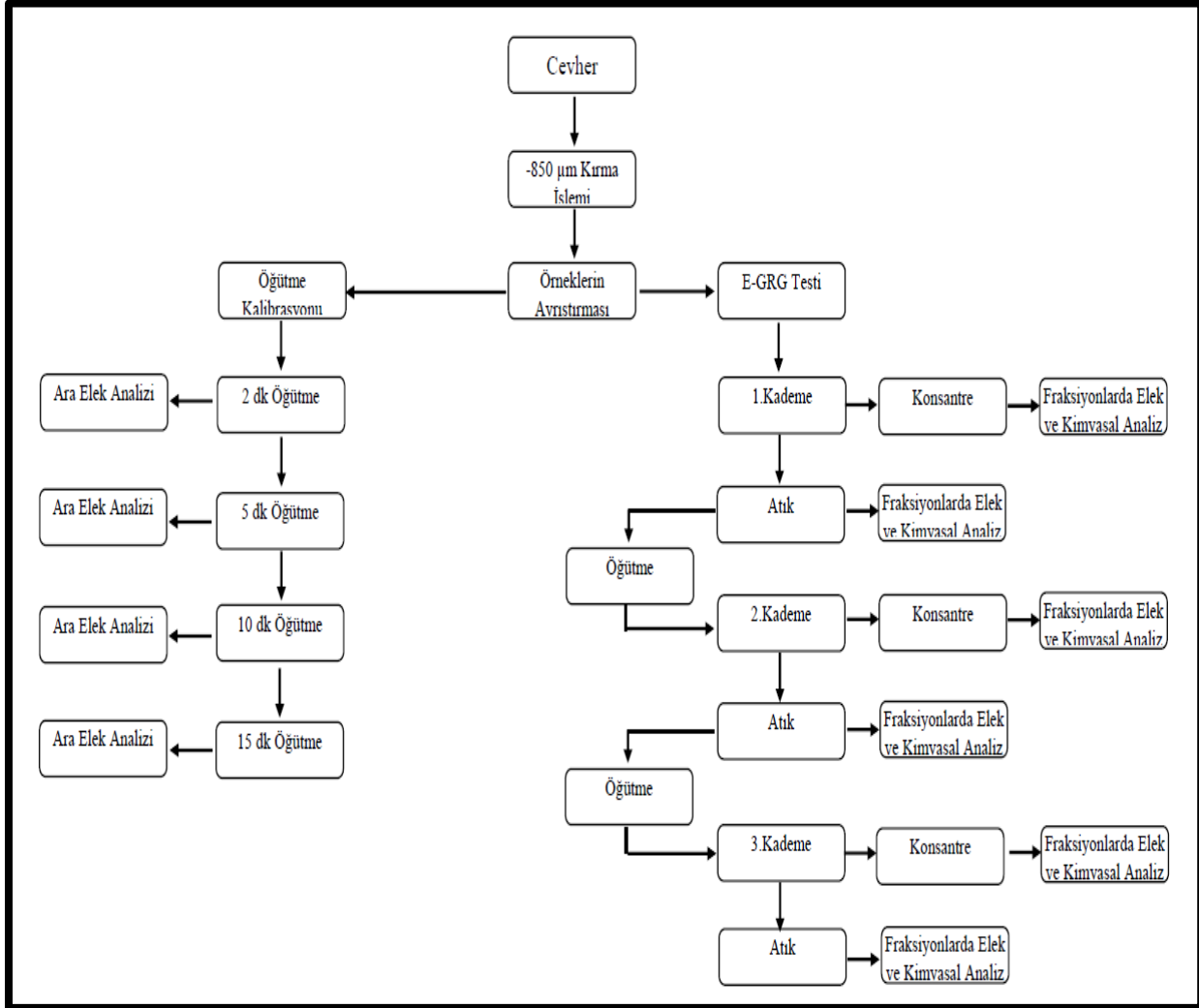


Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan Retsch PT100 model döner numune bölücü

Altın, gümüş ve demir içerikleri Agilent Technologies 240FS model atomik absorpsiyon spektroskopisi, bakır ve arsenik içeriği ise Agilent Technologies 5110 ICP-OES ve sülfür analizleri ise Agilent Technologies 5975C Leco cihazında yapılmıştır.

3.2.1. E-GRG (Extended Gravity Recoverable Gold) Test Programı

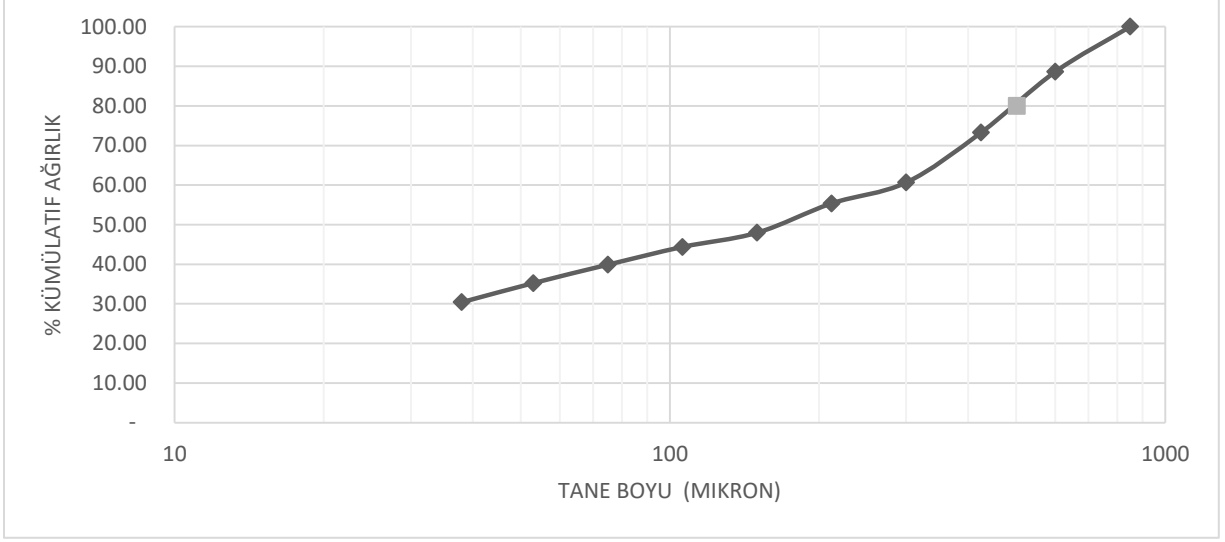
Cevher içerisindeki gravite ile zenginleştirilmesi muhtemel altın miktarını belirleyebilmek için çalışmanın ilk aşamasında E-GRG testi yapılmıştır. [78] E-GRG testi için uygulanan iş akış şeması Şekil 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3.6. E-GRG testi programı

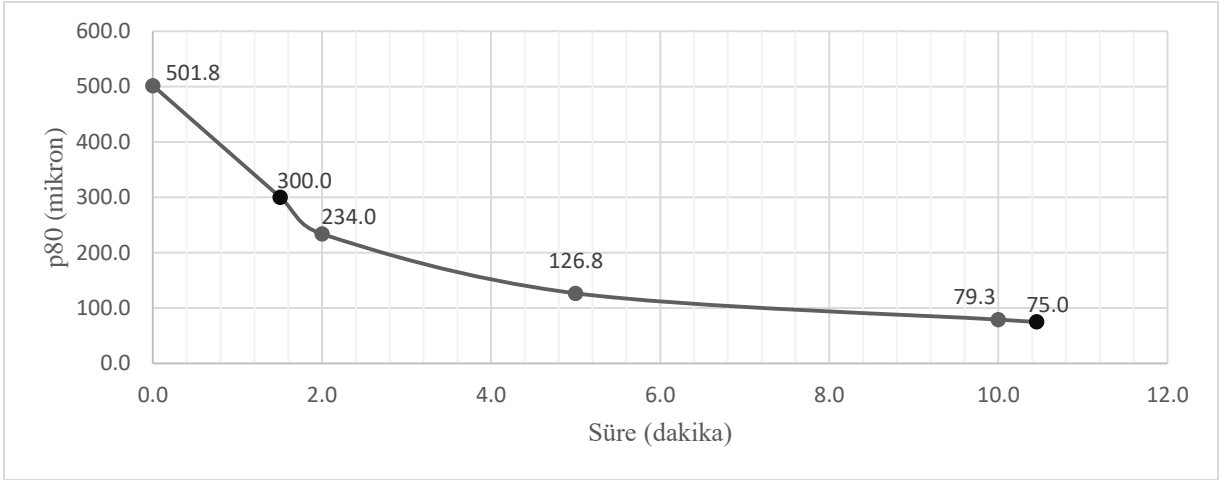
Cevherin içindeki serbest veya serbestleşmiş altın tanelerini kazanabilmek için Knelson MD-3 modeli kullanılmıştır. -2mm'ye kırılan malzemeden homojen numune alınıp çeneli kırıcı ile cevherin tamamı -850 mikrona kadar kırılmıştır. Flsmith ve SGS firmalarının E-GRG prosedürü

izlenmiştir. [79] Test prosedürü izleyebilmek için E-GRG testine başlamadan önce öğütme kalibrasyonu yapılmıştır. Öğütme kalibrasyonu için çubuklu değirmen kullanılmıştır. E-GRG testi besleme tane boyu dağılımı Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. E-GRG testi besleme tane boyu dağılımı

Yaklaşık 10kg cevher sadece öğütme kalibrasyonu için kullanılmıştır. Cevher kademeli bir şekilde 2, 5, 10 ve 15 dakikalık sürelerde öğütülmüştür. Her öğütme işlemi sonrasında örnek alınıp elek analizi yapılmıştır. E-GRG testinin ikinci ve üçüncü basamaklarında hedeflenen sırasıyla p80 300 ve 75 mikron boyutlarını ulaşmak için öğütme süreleri belirlenmiştir. Öğütme süresine karşılık elde edilen p80 tane boyu Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. E-GRG testi öğütme kalibrasyonu

Bu prosedüre göre 3 farklı öğütme boyunda kademeli bir şekilde konsantreler elde edilmeye çalışılmıştır. 20kg malzeme sabit besleme olacak şekilde 60G santrifüj kuvveti ve %35 katıda test edilmiştir. Başlangıç olarak -850 mikrona kırılmıştır ve içinde besleme analizi için numune alınmıştır. Birinci basamakta elde edilen konsantre ağırlığı tartıp elek analizi yapılmıştır. Elde edilen elek analizindeki her bir fraksiyona altın ve sülfür analizi yapılmıştır. Birinci basamaktaki atık malzeme içinden homojen bir şekilde numune alınıp elek analizi ve fraksiyonlarda altın ve sülfür analizi yapılmıştır. Sonrasında birinci basamak atık malzeme önceden belirlenen öğütme süresi kadar öğütülüp p80 300 mikron civarına öğütülmüştür. Elde edilen öğütülmüş malzeme E-GRG testinin ikinci basamağında kullanılmıştır. Aynı şekilde kesintisiz bir şekilde Knelson Md-3 cihazından geçirilen numunenin konsantresine elek analizi ve fraksiyonlarında altın ve sülfür analizi yapılmıştır. İkinci basamak atıktan homojen bir şekilde numune alınıp elek analizi ve elek fraksiyonlarında altın ve sülfür analizi yapılmıştır. İkinci basamak atıktan numune alındıktan sonra kalan malzeme önceden belirlenmiş sürede öğütülerek p80 75 mikron civarına öğütülmeye çalışılmıştır. Elde edilen malzeme E-GRG testinin üçüncü ve son basamağında kullanılmıştır. Elde edilen konsantre ve atığa elek analizi ve elek fraksiyonlarında altın ve sülfür analizi yapılmıştır. Böylelikle E-GRG testi için kademeli olarak 3 farklı tane boyu dağılımında altın ve sülfür verimi belirlenmeye çalışılmıştır.

Elde edilen E-GRG testinin atığına kalan altın ve sülfürün verimini belirleyebilmek için kaba flotasyon testi yapılmıştır. Kaba flotasyon testi koşulları için 2018 yılında SGS Lakefield’da yapılan testin en uygun koşulları seçilmiştir. Bundan dolayı cevherin doğal pH’ın da testler gerçekleştirilmiş olup pH taraması yapılmamıştır. Elek analizi ve fraksiyonlarda altın ve sülfür analizine yetecek kadar malzeme elde etmek için paralel şekilde 5 kere yapılmıştır. E-GRG atıklarından 5 adet 2000 gramlık paketler döner numune alıcı ile ayrılmıştır. Kaba flotasyon işlemi için 2000 gram cevher ve %35 katı oranında yapılmıştır. 2 litrelik denver tipi flotasyon hücresinde gerçekleştirilen kaba flotasyon koşulları Çizelge 3.6.’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kaba flotasyon koşulları – E-GRG atığı

İşlem	Koşullar						
	Na ₂ SiO ₃ (g/t)	CuSO ₄ (g/t)	PAX (g/t)	F549 (g/t)	Kondüsyon (dakika)	Süre (dakika)	Kümülatif Süre (dakika)
Koşullandırma 1	500				5		
Koşullandırma 2		100			2		
Kaba Flotasyon 1			30	16,60	1	3	3
Kaba Flotasyon 2			15	12,60	1	4	7
Kaba Flotasyon 3			15	12,60	1	5	12
Kaba Flotasyon 4			10	12,60	1	8	20
Kaba Flotasyon 5			10	12,60	1	8	28
Kaba Flotasyon 6			10	12,60	1	8	36

Cevherin içerisindeki karbonatların bastırılması 500g/t Sodyum silikat ile 5 dakika boyunca koşullandırılma yapılmıştır. Daha sonrasında pirit mineralinin canlandırılması için 2 dakika boyunca 100gr/ton bakır sülfat ile koşullandırılmıştır. Daha sonrasında azalan miktarda toplayıcı olarak toplamda 90 g/t olarak Potasyum Amil Ksantant ve köpürtücü olarak da 80 g/t F549 (alkol ve poliglitol bazlı) kullanılmıştır.

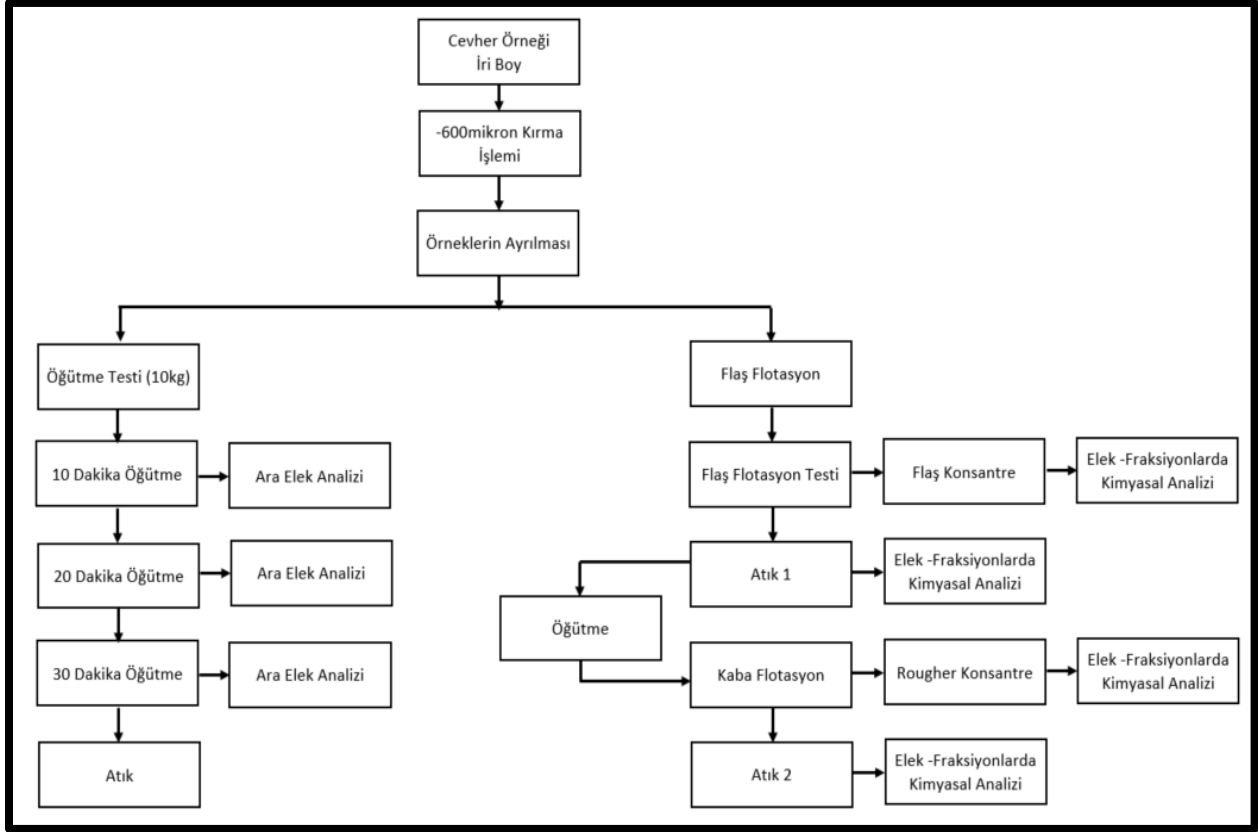
Kaba flotasyon işlemi sonucunda elde edilen atık fırında kurutulduktan sonra döner numune ayırıştırıcı ile siyanürleme testi (şişe çevirme) için 450 g temsili malzeme alınmıştır. Yatay şekilde yerleştirilen şişenin içerisine %45 katı olacak şekilde ve 500 ppm siyanür konsantrasyonunda liç edilmiştir. 48 saat boyunca şişe yavaş bir şekilde döndürülerek karıştırma işlemi yapılmıştır. Test sonunda katı ve sıvı filtre işlemi ile ayırıştırılıp analize gönderilmiştir. Test düzeneği Şekil 3.9.’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Siyanürleme Testi (Şişe Çevirme) düzeneği

3.2.2. Flaş Flotasyon Test Programı

Test programının ikinci bölümünde serbest ve iri taneli altın miktarını belirleyebilmek için flaş flotasyon ve kaba flotasyon testleri yapılmıştır. Flaş flotasyon test programı Şekil 3.10.'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Flaş flotasyon test programı

Kırma işlemi sonrasında elde edilen cevhere flaş flotasyon testi yapılmıştır. 2 litrelik denver tipi flotasyon hücresinde 2000 gram kullanılarak 2 dakika yapılmıştır. 30 saniyede bir konsantre alınmıştır. Elek analizi ve fraksiyonlarda altın ve sülfür analizine yetecek kadar malzeme elde etmek için paralel şekilde 6 kere yapılmıştır. Elde edilen konsantreler ve atık birleştirilip tek bir flaş flotasyon testi gibi değerlendirilmiştir. Daha önce yapılan kaba flotasyon testlerinin aksine herhangi bir bastırıcı kullanılmamıştır. Canlandırıcı olarak bakır sülfat, toplayıcı olarak potasyum amil ksantat (PAX), PAX ile beraber seçicilik etkisini artırmak için Aero 5100 ve son olarak köpürtücü olarak da poliglikol bazlı F549 kullanılmıştır. Testler %45 katı da gerçekleştirilmiştir. -600 mikrona kırılan cevhere yapılan flaş flotasyon koşulları Çizelge 3.7.'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Flaş flotasyon koşulları

Flaş Flotasyon Koşulları								
İşlem	Na ₂ SiO ₃ (g/t)	CuSO ₄ (g/t)	PAX (g/t)	5100 (g/t)	F549 (g/t)	Kondüsyon (dakika)	Flotasyon Süresi (dakika)	Kümülatif Süre (dakika)
Koşullandırma	-	50	-	-	-	5 dakika		
Flaş Flotasyon 1	-	-	10	10	20	10 saniye*	0.5	0.5
Flaş Flotasyon 2	-	-	-	-	-		0.5	1
Flaş Flotasyon 3	-	-	-	-	-		0.5	1.5
Flaş Flotasyon 4	-	-	-	-	-		0.5	2

*Flaş flotasyon için sadece 10 saniyelik koşullandırma yapılmıştır.

Elde edilen atığın -600 mikrondan p80 75 mikrona öğütülebilmesi için öğütme kalibrasyonu yapılmıştır. Flaş flotasyon atığı çubuklu değirmende 10, 20 ve 30 dakika öğütülerek hedeflenen tane boyu için gerekli öğütme süresi bulunmaya çalışılmıştır. Elde edilen flaş flotasyon atığı öğütülerek p80 75 mikrona öğütülerek kaba flotasyon testi yapılmıştır. Test koşulları Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

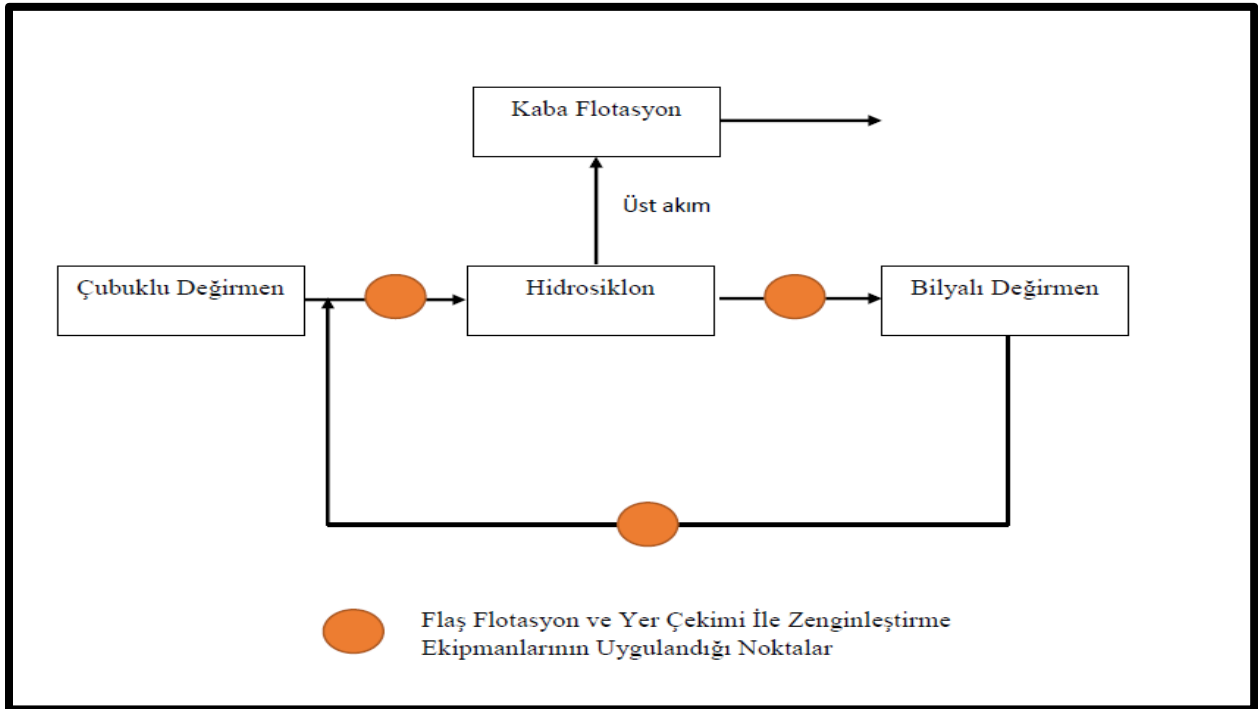
Çizelge 3.8. Kaba flotasyon koşulları – Flaş flotasyon atığı

Kaba Flotasyon Koşulları							
İşlem	Na ₂ SiO ₃ (g/t)	CuSO ₄ (g/t)	PAX (g/t)	F549 (g/t)	Kondüsyon (g/t)	Uygulama (dakika)	Kümülatif Süre (dakika)
Koşullandırma 1	500				5		
Koşullandırma 2		100			2		
Kaba Flotasyon 1			30	16,60	1	3	3
Kaba Flotasyon 2			15	12,60	1	4	7
Kaba Flotasyon 3			15	12,60	1	5	12
Kaba Flotasyon 4			10	12,60	1	8	20
Kaba Flotasyon 5			10	12,60	1	8	28
Kaba Flotasyon 6			10	12,60	1	8	36

E-GRG atığı kaba flotasyonunda olduğu gibi cevherin içerisindeki karbonatların için bastırılması 500gr/ton sodyum silikat ile 5 dakika boyunca koşullandırılma yapılmıştır. Daha sonrasında pirit mineralinin canlandırılması için 2 dakika boyunca 100gr/ton bakır sülfat ile koşullandırılmıştır. Daha sonrasında azalan miktarda toplayıcı olarak toplamda 90 g/t olarak Potasyum Amil Ksantant ve köpürtücü olarak da 80 g/t F549 kullanılmıştır. Flaş flotasyon atığına yapılan kaba flotasyondan elde edilen atık cevhere liç testi yapılmıştır. 500 ppm NaCN konsantrasyonunda %45 katı ile 48 saat liç testi yapılmıştır.

3.3. Simülasyon Çalışmaları

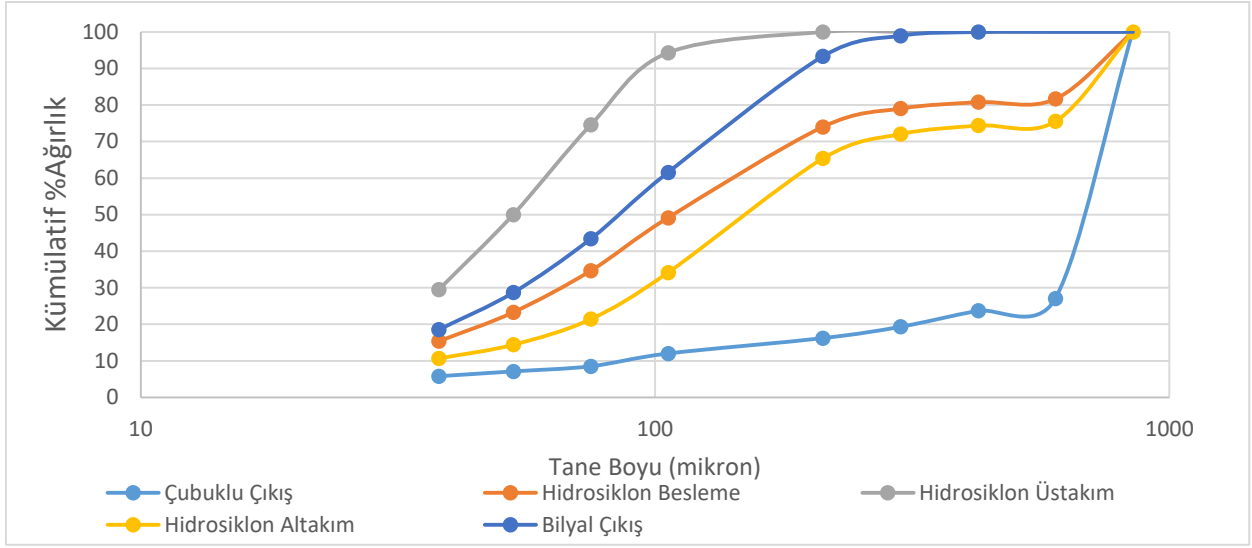
Cevher karakterizasyonu bilinen ve metalürjik açıdan verimleri tanımlanmış cevherin tesis koşullarındaki kazanımını tahmin edebilmek ve tahmini gerçekleştirecek yöntemleri geliştirmek için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında iki kademeli bir değirmen devresi baz alınmıştır. Çubuklu değirmen çıkışından hidrosiklon üst akışına kadar olan akım şemasında farklı noktalara gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon ekipmanı konularak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ekipmanların konulduğu bölgeler basit blok diagramı Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Simülasyon Çalışmalarında Kullanılan Akım Şeması

Laboratuvar ölçekli yapılan testlerde elde edilen veriler Metso Outotec® şirketinin geliştirdiği Hsc Chemistry 10 programı kullanılarak farklı senaryolarda değerlendirilmeye çalışılmıştır. İki kademeli öğütme devresinde primer çubuklu ya da bilyalı değirmen çıkışından hidrosiklon üst akımına kadar olan kısım üzerinde çalışılmıştır. Birincil öğütme devresinden çıkan malzemenin p80 782 mikron olarak belirlenmiştir. Simülasyon çalışmalarında Kaymaz altın madenindeki

değirmen devresi etrafında yapılan araştırma (survey) sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları kullanılmıştır. Hidrosiklon ve değirmen boyutlandırılması yapılmamıştır. Lambert'in (2016) yaptığı çalışmadakine benzer bir kabullenme yapılarak hidrosiklonda altın ve pirit minerallerinin %80'inin alt akıma geçeceği kabul edilmiştir. Devreden yük %300 olarak baz alınmıştır. Bilyalı değirmende Bond bilyalı modeli seçilip değirmen çıkışı sabit p80 150 mikron olacak şekilde hesaplama yapılmıştır. Kullanılan tane boyu dağılımları Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Simülasyon çalışmasında kullanılan tane boyu dağılımı

Birinci senaryoda hidrosiklon alt akışının %50'si gravite ile zenginleştirme ekipmanına verilmiştir. İkinci senaryoda ise hidrosiklon alt akışının %50'si flaş flotasyon ünitesine verilmiştir. Her iki devrede hidrosiklon üst akışı kaba flotasyona verilmiştir. Bu senaryolara ek olarak bu ekipmanlar paralel, seri kullanım ve temizleme devresi eklenerek de değerlendirilmeye çalışılmıştır. Hidrosiklon alt akışında yapılan çalışmalardan sonra gravite ve flaş flotasyon ekipmanları bilyalı değirmen çıkışına yerleştirilmiştir. Son olarak da hidrosiklon beslemesine yerleştirilerek hesaplamalar yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında kullanılan cevherin kimyasal analizi yapılmıştır. Altın tenörü 15.5 g/t olan bu yüksek tenörlü altın cevherinin sülfür tenörü %3.17 olarak belirlenmiştir. Mineralojik analiz ve tanımlayıcı liç testi sonuçlarına göre altının ciddi miktarı sülfürlü mineraller ile birlikte dir. Bundan dolayı tüm testlerde altın tenörü ile sülfür tenörü de takip edilmiştir. Ayrıca flaş ve kaba flotasyon koşulları bilindiğinden dolayı doğal pH'da testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Teste kullanılan cevherin analiz yöntemleri ve sonuçları

Analiz	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu (g/t)	As (g/t)	Fe ppm	%S
CihazYöntem	FA	AAS	ICP	ICP	AAS	Leco
Saptama	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.01
Besleme 1	14.85	2,25	147	1265	66.539	3,21
Besleme 2	15.33	2,23	297	1215	64.409	3,44
Besleme 3	16.32	2,22	137	1273	68.676	2,86
Ortalama	15.50	2,23	194	1251	66.541	3,17

4.1. E-GRG Test Programı Sonuçları

Elek analizine göre E-GRG testinin beslemesindeki malzemenin p80'i 543 mikron olarak belirlenmiştir. Flsmith ve SGS'in test prosedürüne göre yapılan E-GRG testinin besleme analizi Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Altın analizleri için Ateş Analizi (Fire Assay) yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. E-GRG testi besleme analizi

E-GRGS Testi Besleme Analizi			
Tane boyu (µm)	%Ağırlık	Au g/t	%S
850	15.22	18.50	2.80
600	14.72	14.35	3.08
425	12.33	13.84	2.94
300	6.44	15.36	3.97
212	13.55	13.80	4.27
106	5.70	15.02	4.17
75	5.21	19.97	2.75
53	2.12	35.74	5.08
38	24.71	21.57	1.91
Toplam	100.00	17.48	3.04

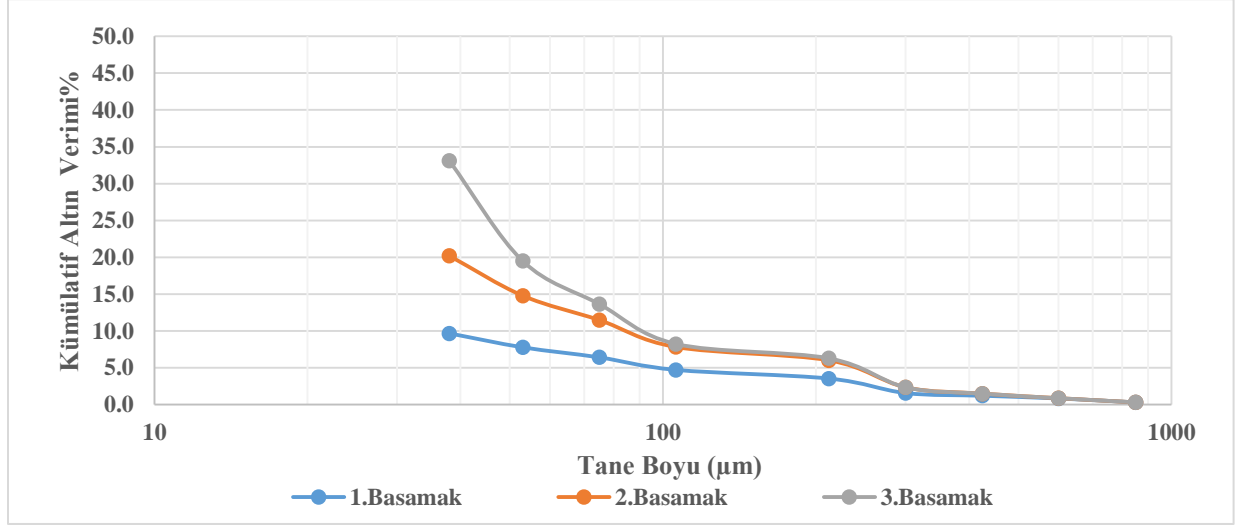
E-GRG testi 3 kademedede gerçekleştirilmiştir. Her basamakta elde edilen konsantreler ve her bir basamakta elde edilen atığın içinden alınan örneklerin sonuçları Çizelge 4.3.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. E-GRG testi özet sonuçları

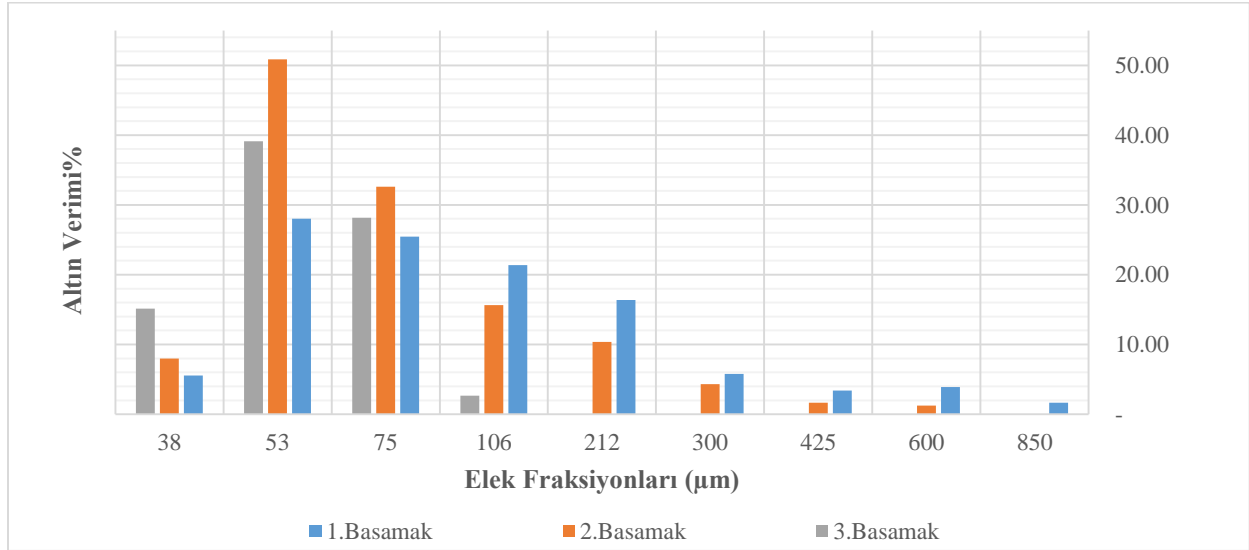
Öğütme Boyu	Ürün	%Ağırlık	Analiz	Dağılım	Analiz	Dağılım
			Au (g/t)	%	%S	%
P ₈₀ =	1. Basamak Konsantre	0.73	205.7	9.67	12.59	2.91
543 µm	1. Basamak Atık Örnekleme	3.44	16.1	3.57	2.97	3.23
P ₈₀ =	2. Basamak Konsantre	0.56	293.0	10.53	16.11	2.85
313 µm	2. Basamak Atık Örnekleme	2.91	15.1	2.84	3.18	2.94
P ₈₀ =	3. Basamak Konsantre	0.73	273.7	12.92	35.78	8.30
72 µm	Nihai Atık	91.63	10.2	60.46	3.03	79.77
	Hesaplanan Tenör	100.00	15.5	100.00	3.15	100.00
	Birleştirilmiş Konsantre	2.02	254.5	33.13	21.97	14.06

-850 mikrona kırılan cevherin birinci basamağında p₈₀'i 543 mikron olarak belirlenmiştir. Bu basamakta altının verimi %9.67 ve sülfürün verimi %2.91 olarak gerçekleşmiştir. Birinci basamağın atığı 1.50 dakika öğütülmüş ve p₈₀'i 313 mikron olmuştur. Öğütülen malzeme testin ikinci basamağında kullanılmıştır. Bu basamakta altın verimi %10.53 iken sülfürün verimi %2.85 olmuştur. İkinci basamakta elde edilen atık 8.50 dakika daha öğütülerek p₈₀'i 72 olarak elde edilmiştir. Üçüncü basamakta ise altın verimi %12.92 ve sülfür verimi %8.30 olarak gerçekleşmiştir. Birleştirilmiş konsantre %2.02 kütle kazanımı, %33.13 altın verimi ve %14.06 sülfür verimine sahiptir. E-GRG testinde geri hesaplanan altın tenörü 15.5 g/t ve sülfür tenörü %3.15 olarak belirlenmiştir. Beslemedeki toplam altın miktarına göre hesaplanan fraksiyonlardaki

kümülatif altın verimleri Şekil 4.1.'de ve her bir elek fraksiyonundaki altın miktarına göre hesaplanan altın verimleri de Şekil 4.2.'de verilmiştir.



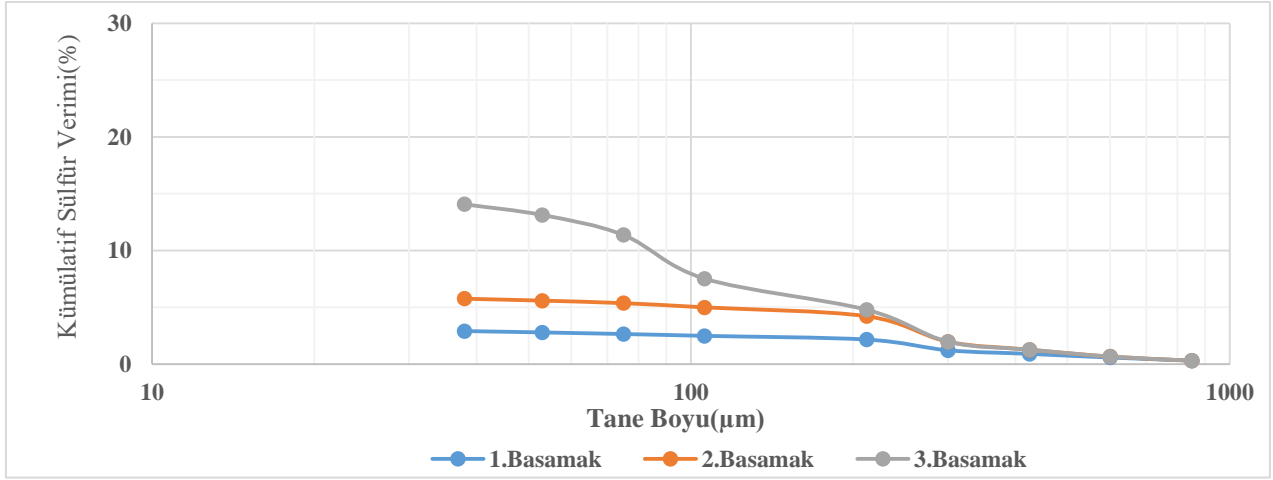
Şekil 4.1. E-GRG testi kümülatif altın verimleri % - Nihai kazanıma göre



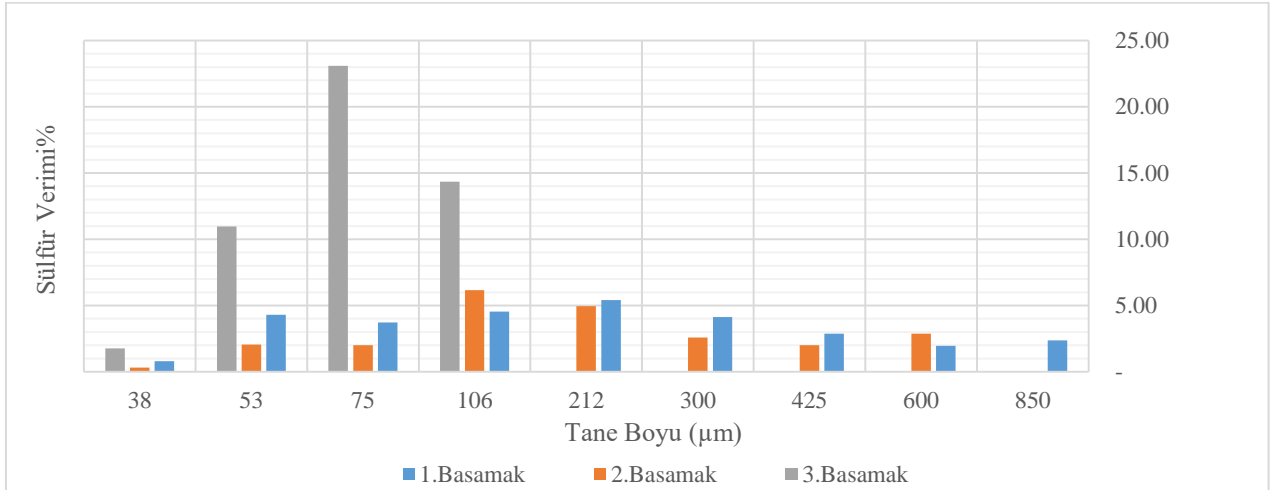
Şekil 4.2. E-GRG testi fraksiyonlardaki altın verimleri %

Fraksiyondaki altın miktarlarına göre altın verimi incelendiğinde tüm basamaklarda tane boyu inceldikçe gravite ile zenginleştirme yönteminde altın veriminin -38mikron fraksiyonuna kadar arttığı gözlenmemiştir. En ince fraksiyon olan -38 mikron fraksiyonunda ise altın verimi azalmıştır.

Birinci basamakta en yüksek altın verimi %21.90 ile -75+53 mikron fraksiyonunda gerçekleşmiştir. İkinci basamakta da aynı fraksiyonda en yüksek altın verimi %33.70 olarak gerçekleşmiştir. Son basamakta ise altın verimi tane boyu inceldikçe -106+75 mikron fraksiyonu hariç artmaya devam etmiştir. En yüksek altın verimi -38mikron fraksiyonunda %8.21 olarak gerçekleşmiştir. Beslemedeki toplam sülfür miktarına göre sülfür verimi Şekil 4.3.'te ve her bir elek fraksiyonundaki sülfür miktarına göre sülfür verimi Şekil 4.4.'de verilmiştir.



Şekil 4.3. E-GRG testi kümülatif verimler % - Nihai kazanıma göre



Şekil 4.4. E-GRG testi fraksiyonların sülfür verimleri %

Birinci basamaktaki fraksiyon verimlerine bakıldığında en yüksek sülfür verimi %5.42 olarak -212+106 fraksiyonunda gerçekleşmiştir. İkinci basamakta ise en yüksek sülfür verimi -212+106 fraksiyonunda %6.16 olarak gerçekleşmiştir. Üçüncü basamaktaki fraksiyondaki verimler serbestleşmeden dolayı ilk iki basamakta daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. En yüksek sülfür verimi -106+75 fraksiyonunda %23.08 olarak gerçekleşmiştir.

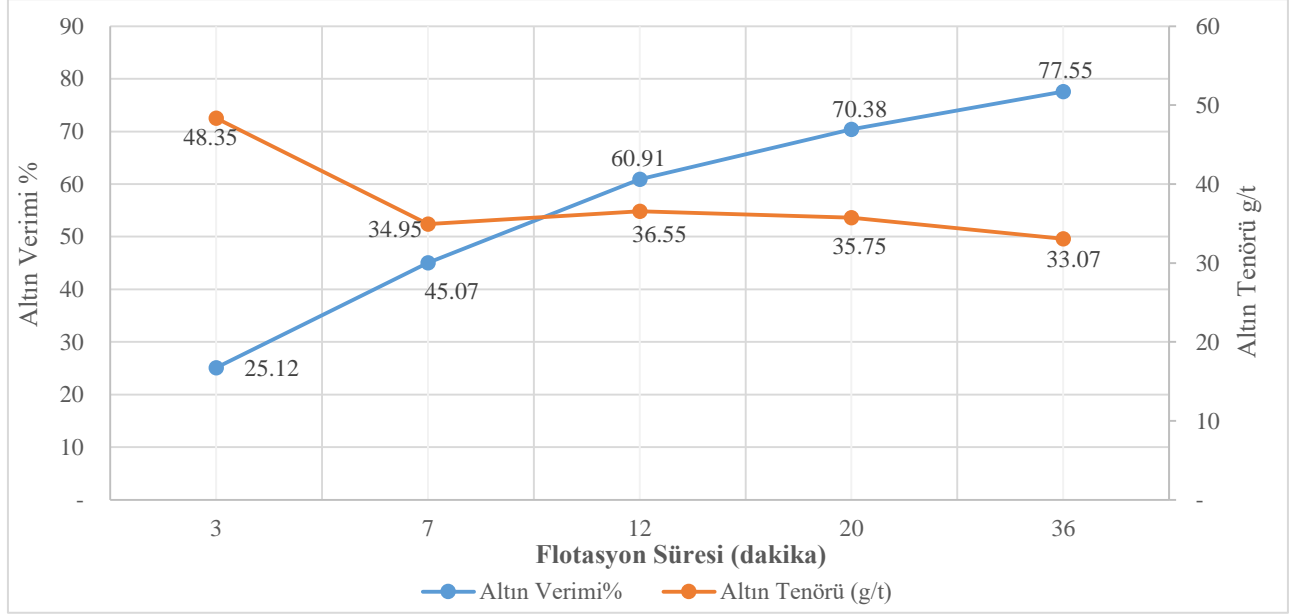
Elde edilen sonuçlara göre altın ve sülfür verimleri 300 mikrondan büyük taneler için düşük gerçekleşmiştir. Özellikle 3. basamakta ince öğütme ile birlikte verimler de artmıştır. Sülfür ve altın verimi arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Altın verimi sülfür mineraline göre yüksek gerçekleşmiştir. Altın ve sülfür minerallerinin içindeki altın tanelerinin serbestleşme potansiyelinin daha yüksek olduğu göstermektedir. Yani öğütme işlemi altın tanelerinin serbestleşmesi üzerinde daha olumlu etkisi olmuştur. Fakat özellikle 3. basamakta sülfür minerallerinin de serbestleşmeye başladığı görülmüştür. E-GRG testine göre bu cevherin içerisinde gravite ile kazanılabilecek altının ciddi miktarı ince fraksiyonlarda bulunmaktadır. E-GRG atığına elek fraksiyonlarında altın ve sülfür analizine yeterli malzeme üretebilmek için aynı koşullarda paralel şekilde 5 adet kaba flotasyon testi yapılmıştır. Her bir kaba flotasyon testinden 5 kademe konsantr alınmıştır. Her bir konsantr ve atıklar birleştirilip tek bir flotasyon testi olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen birleştirilmiş kaba flotasyon testi sonuçları Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon sonuçları

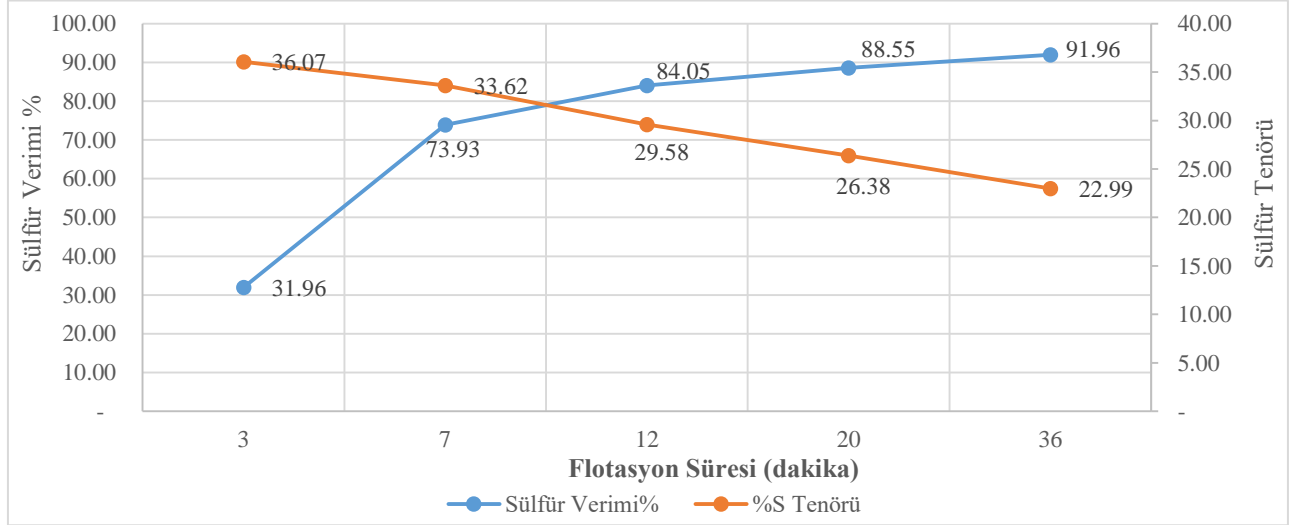
	%Ağırlık	Au g/t	Au Dağılım %	%S Tenör	Sülfür Dağılım %
Kaba Konsantr 1	3.43	48.35	25.12	36.07	31.96
Kaba Konsantr 2	5.09	25.91	19.95	31.96	41.97
Kaba Konsantr 3	2.49	42.04	15.84	15.75	10.12
Kaba Konsantr 4	2.00	31.34	9.48	8.74	4.51
Kaba Konsantr 5	2.49	19.04	7.17	5.31	3.41
Atık	84.50	1.76	22.45	0.37	8.04
Besleme	100.00	6.61	100.00	3.87	100.00
Birleştirilmiş Konsantr	15.50	33.07	77.55	22.99	91.96

Kaba flotasyon testine göre altın kazanımı %77.55 ve sülfür kazanımı %91.96 olarak gerçekleşmiştir. Testteki kütle kazanımı ise %15.50 olarak belirlenmiştir. E-GRG atığına yapılan

kaba flotasyon testi altın ve sülfür verimi ve tenörün kütle kazanım ile ilişkisi Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir.

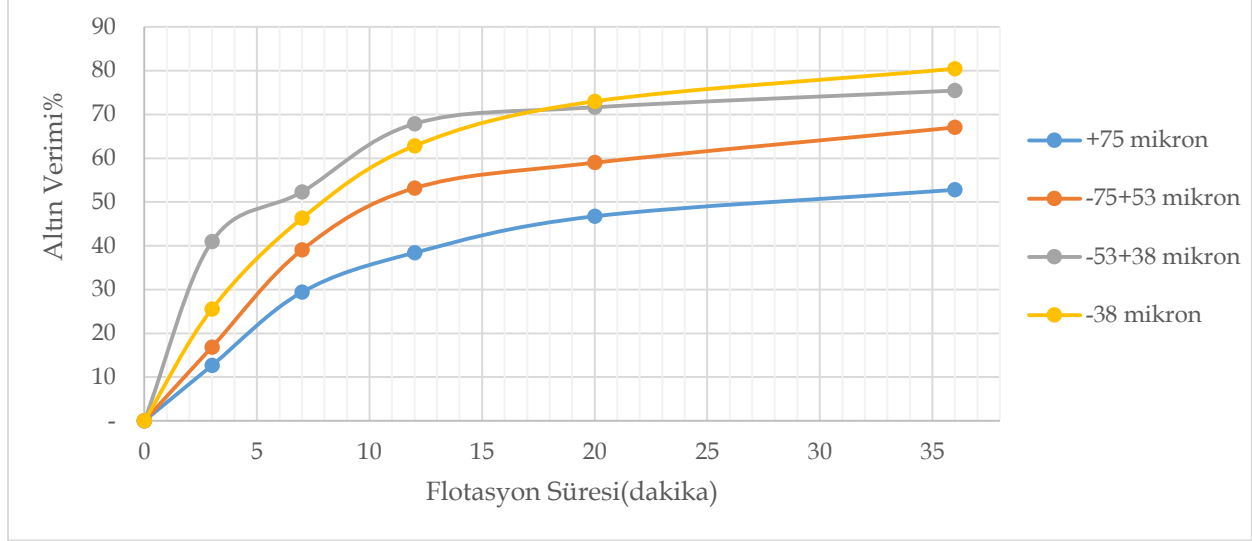


Şekil 4.5. E-GRG atığı kaba flotasyon testi tenör-verim ilişkisi - Altın

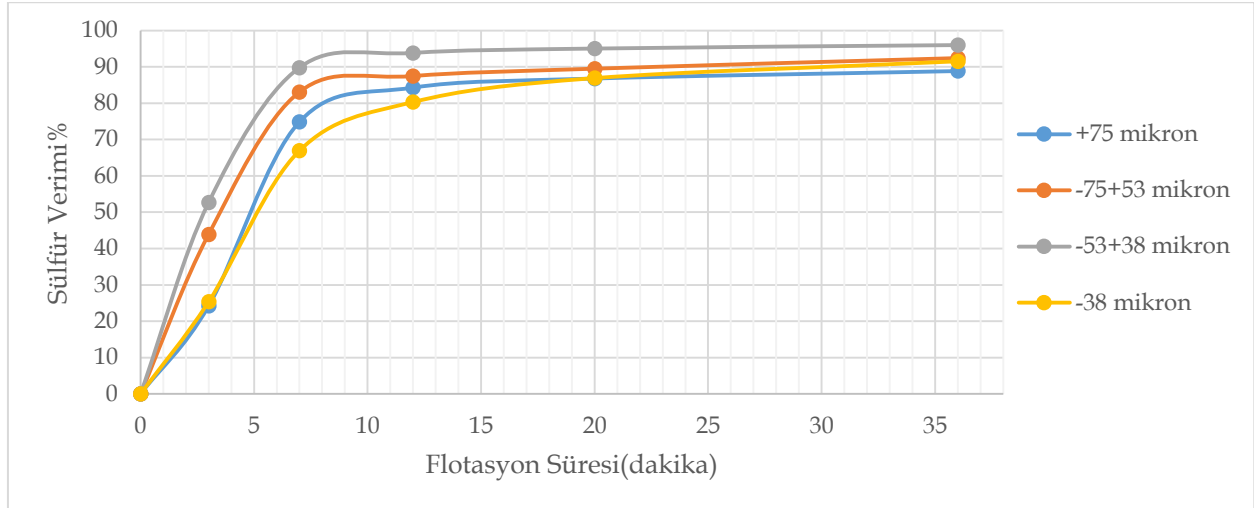


Şekil 4.6. E-GRG atığı kaba flotasyon testi tenör-verim ilişkisi -Sülfür

E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon testi toplamda 36 dakika yapılmıştır. Fraksiyonlardaki altın ve sülfür kazanımları Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Fraksiyonlarda kümülatif altın verimleri % - E-GRG atığına yapılan kaba fotasyon testi



Şekil 4.8. Fraksiyonlarda kümülatif sülfür verimleri % - E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon testi

Flotasyon süresi incelendiğinde sülfür minerallerini flotasyon işleminin tamamlandığı görülmektedir. Fakat altın tanelerinin daha fazla flotasyon süresine ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Bunun sebebi bir miktar altının sülfüre bağlı olmayan gang mineralleri ile birlikte olduğunu göstermektedir. Tane boyu küçüldükçe altın veriminin arttığı görülmüştür. Fakat sülfür minerallerinin en yüksek verim -53+38 mikron fraksiyonunda %96.0 olarak gerçekleşmiştir. En ince fraksiyon olan -38 mikron fraksiyonunda ise verim %91.53 olmuştur. Bu fraksiyondaki sülfür kinetiğinin ve verimin düşük olma sebebi ince sülfür tanelerinin flotasyondaki zorlukları olarak açıklanabilir. Kaba flotasyon atığından 450 gram temsili numune alınarak liç testi yapılmıştır. E-GRG ve kaba flotasyon testi atığına yapılan siyanürleme testine göre altının %63.65 geri kazanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kaba flotasyon atığı liç testi

Altın Kazanımı %	63,65
Atık Au Değeri (g/t)	0,76
Atık %S Değeri (%S)	0,37
Hesaplanan Besleme Au (g/t)	2,14
Besleme Tenörü Au (g/t)	2,29
NaCN tüketimi (kg/t)	0,76
Kireç ilavesi (kg/t)	1,35
Liç Süresi (saat)	48

Elde edilen kaba flotasyon testi atığının altın tenörü 2.29 g/t olmuştur. Bu atığa siyanür liç işlemi yapıldığında ise altın verimi %63.65 olarak gerçekleşmiştir. Siyanür tüketimi 0.76 g/t olmuştur. Bu test ile birlikte kaba flotasyon atığında ciddi miktarda serbestleşmiş altın olduğu görülmektedir.

4.2. Flaş Flotasyon Test Programı Sonuçları

-600 mikrona laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı ile kırılan cevher 2000 g paketler halinde hazırlanmış numuneye flaş flotasyon testleri yapılmıştır. 2 litrelik denver tipi flotasyon hücresi kullanılmıştır. Flaş flotasyon besleme malzemesinin elek analizi ve altın-sülfür analizleri Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Flaş flotasyon beslemesi fraksiyonlardaki altın ve sülfür dağılımı

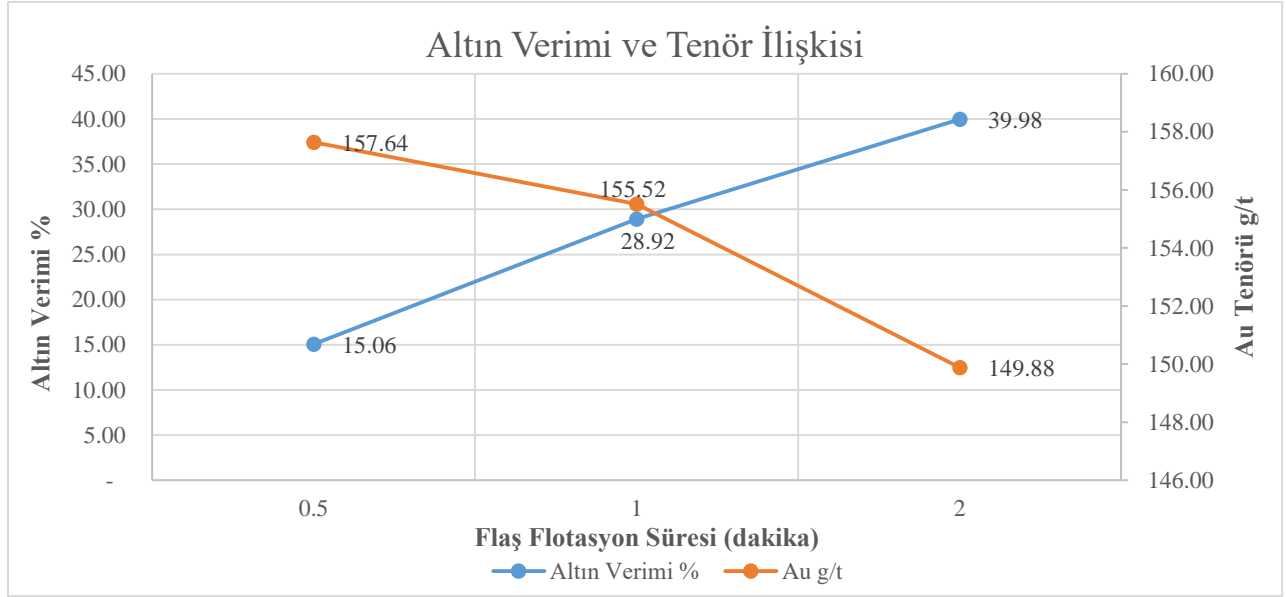
Flaş Flotasyon Besleme				
Tane Boyu	Ağırlık (gr)	% Ağırlık	Au g/t	%S
212	3.788,5	28,39	14,01	4,04
106	2.022,1	15,15	13,16	4,70
75	985,0	7,38	11,68	3,70
53	685,0	5,13	16,99	5,09
38	651,7	4,88	25,02	5,71
-38	5.212,1	39,06	15,87	3,23
Toplam	13.344,38	100,00	15,13	3,94

Flaş flotasyon beslemesinin p80 308 mikron olarak hesaplanmıştır. Besleme altın tenörü 15.13 g/t ve sülfür tenörü %3.94 olarak hesaplanmıştır. Fraksiyonlarda altın ve sülfür analizlerine yetecek kadar malzeme olması için 6 adet flaş flotasyon testi yapılmış olup her bir basamak ve atık birleştirilerek tek bir flaş flotasyon testi yapılmış gibi değerlendirilmiştir. %45 katıda yapılan flaş flotasyonunda C1, C2, C3 ve C4 olmak üzere 4 adet konsantre alınmıştır. Toplam flaş flotasyon süresi 2 dakika olup her bir konsantre 30 saniyede bir toplanmıştır. Fakat C4 konsantresinde elde edilen kütle kazanımı çok düşük olduğu için C3 konsantresi ile birleştirilmiştir. Tüm flaş flotasyon testlerinden elde edilen C1, C2, C3 ve atıklar birleştirilerek tek bir flaş flotasyon testi gibi değerlendirilmiştir. Birleştirilmiş flaş flotasyon testinin kütle kazanımı %4.03 olarak hesaplanmıştır. Flaş flotasyonun testinin özet sonuçları Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Flaş flotasyon testi sonuçları – Özet tablo

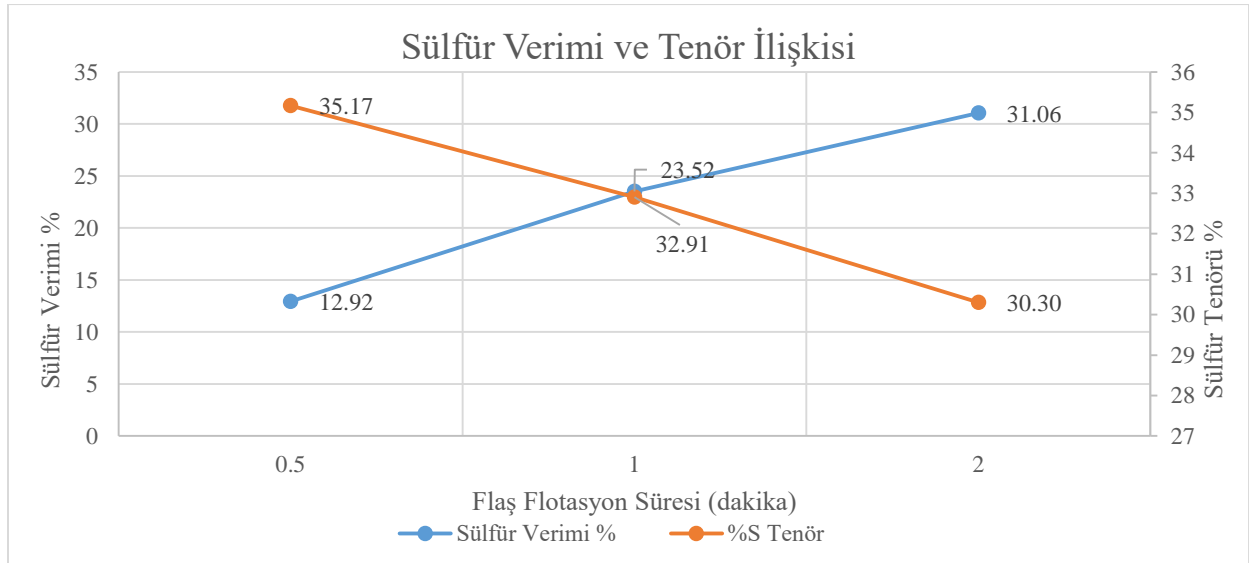
	%Ağırlık	Au g/t	%Au Dağılım	%S Tenör	%S Dağılım
Flaş Konsantre 1	1.45	157.64	15.06	35.17	12.92
Flaş Konsantre 2	1.37	153.27	13.85	30.51	10.60
Flaş Konsantre 3	1.22	136.91	11.06	24.30	7.54
Flaş Atık	95.97	9.46	60.02	2.00	48.71
Flaş Besleme	100.00	15.13	100.00	3.94	100.00
Birleştirilmiş Konsantre	4.03	149.88	39.98	30.3	31.06

Flaş flotasyon altın kazanımı %39.98 ve sülfür kazanımı %31.10 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen konsantrenin altın tenörü 149.88 ppm iken sülfür tenörü %30.30 olarak gerçekleşmiştir. Altın verimi ve tenör ilişkisi Şekil 4.9.'da verilmiştir.



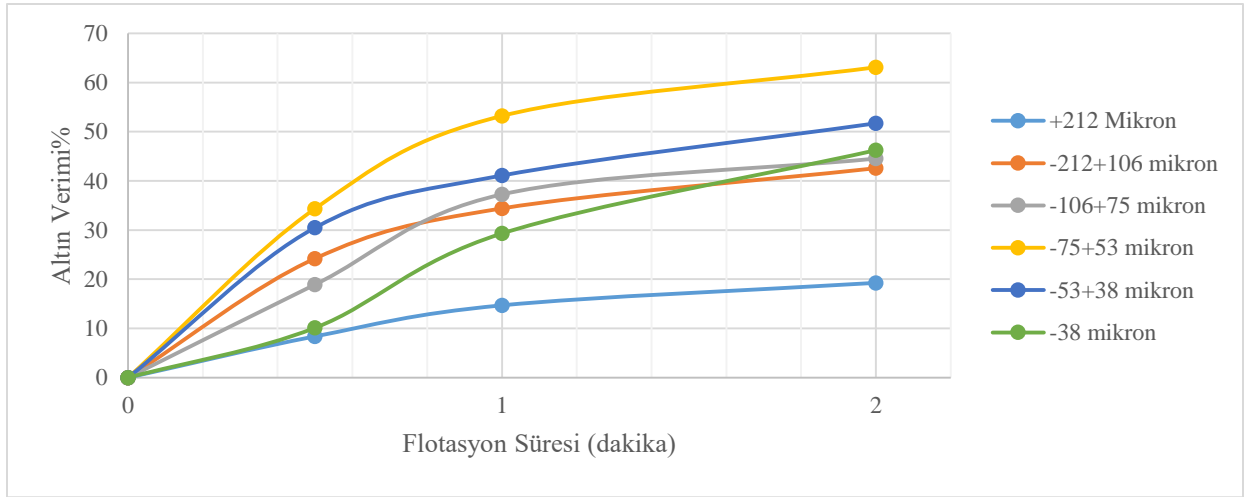
Şekil 4.9. Flaş flotasyon altın verim - tenör ilişkisi

Flaş flotasyon testinde 30 saniyede alınan ilk konsantresinin kütle kazanımı %1.45 olarak gerçekleşmiştir. Bu konsantrenin altın tenörü 157.64 g/t olup altın verimi %15.06 olmuştur. Flaş flotasyon testinde sülfür verimi ve tenör ilişkisi Şekil 4.10.'da verilmiştir.

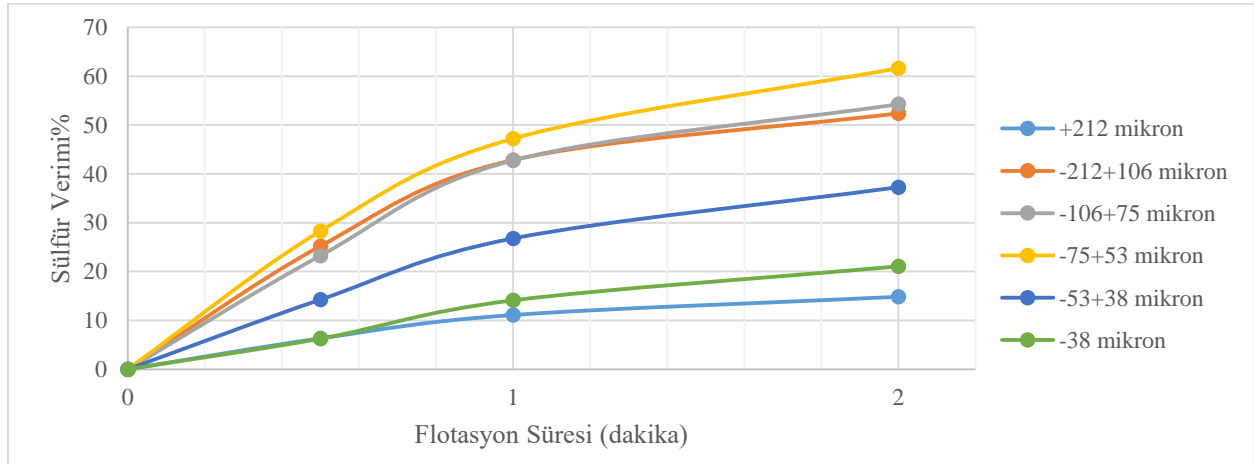


Şekil 4.10. Flaş flotasyon sülfür verim - tenör ilişkisi

Flaş flotasyon testinin ilk 30 saniyede alınan konsantresinin kütle kazanımı %1.45 olarak gerçekleşmiştir. İlk konsantrenin sülfür verimi %12.92 ve sülfür tenörü ise %35.17 olarak elde edilmiştir. 2 dakika sonunda elde edilen nihai konsantrenin kütle kazanımı %4.03 olmuştur. Sülfür tenörü ise %30.3'a gerilerken sülfür kazanımı %31.06 olarak gerçekleşmiştir. Flaş flotasyon testi toplam 2 dakika yapılmıştır. Elek fraksiyonlarındaki altın ve sülfür flaş flotasyon kinetiği Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Fraksiyonlardaki altın tanelerinin flaş flotasyon kinetiği – Flaş flotasyon



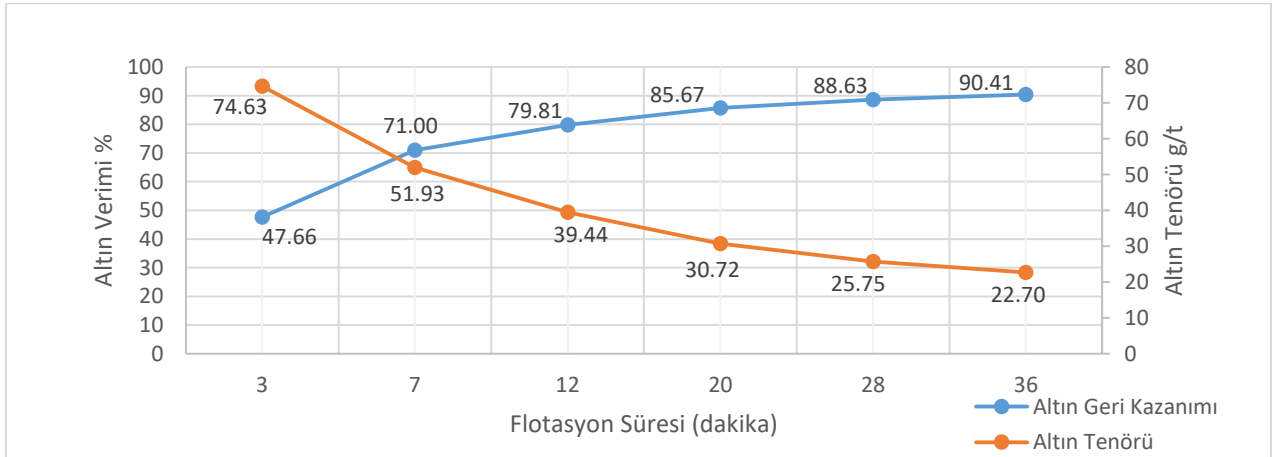
Şekil 4.12. Fraksiyonlardaki sülfür tanelerinin flaş flotasyon kinetiği – Flaş flotasyon

En yavaş flaş flotasyon kinetiği altın ve sülfür mineralleri için en iri fraksiyon olan +212 mikronda gerçekleşmiştir. Bu fraksiyondaki altın ve sülfür verimi sırasıyla %19.27 ve %14.84 olarak gerçekleşmiştir. -38 mikron fraksiyonunda altın verimi %46.2 olarak gerçekleşirken sülfür verimi %21.05 olarak gerçekleşmiştir. Flaş flotasyon atığına kaba flotasyon testi yapılmıştır. Kaba flotasyon özet sonuçları Çizelge 4.8.'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Flaş flotasyon atığına yapılan kaba flotasyon test sonucu

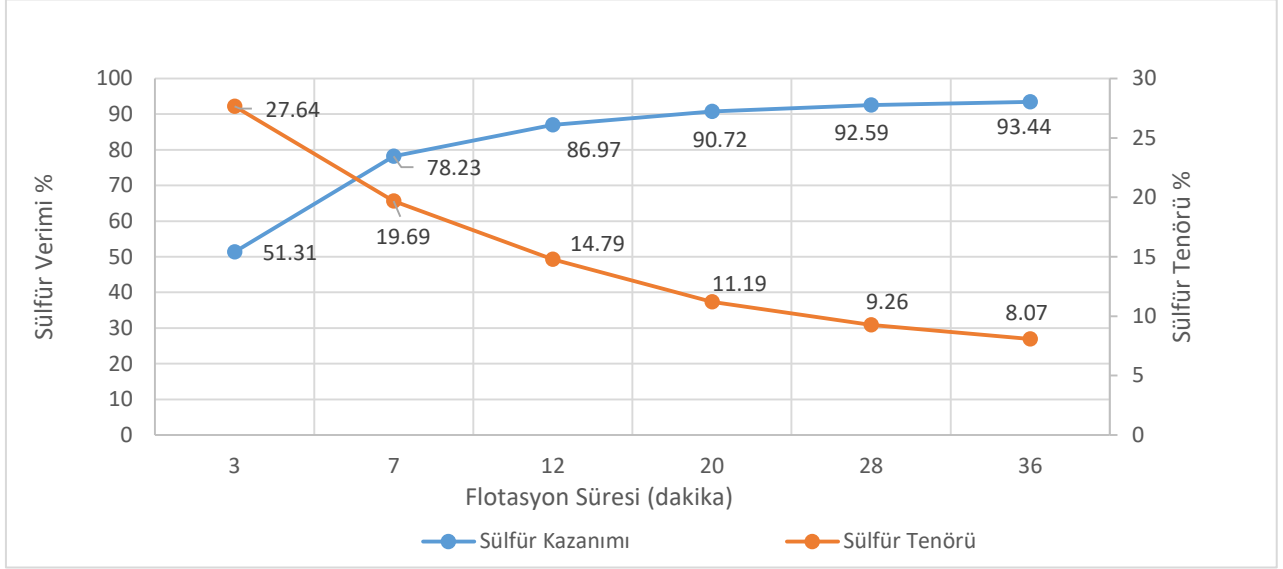
	%Ağırlık	Au ppm	Au Dağılım%	%S Tenör	%S Dağılım %
Kaba Konsantre 1	3.71	74.63	47.66	27.64	51.31
Kaba Konsantre 2	4.23	32.03	23.34	12.71	26.92
Kaba Konsantre 3	3.81	13.41	8.81	4.58	8.74
Kaba Konsantre 4	4.44	7.66	5.87	1.69	3.76
Kaba Konsantre 5	3.79	4.53	2.96	0.98	1.86
Kaba Konsantre 6	3.14	3.29	1.78	0.54	0.85
Atık	76.88	0.72	9.59	0.17	6.56
Besleme	100.00	5.81	100.00	2.00	100.00
Birleştirilmiş Konsantre	23.12	22.70	90.41	8.07	93.44

Flaş flotasyon atığına yapılan kaba flotasyon testi sonucunda altın kazanımı %90.41 ve sülfür kazanımı %93.44 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen konsantrenin altın tenörü 22.70 g/t ve sülfür tenörü %8.07 olarak belirlenmiştir. Kütle kazanımı ise %23.21 olmuştur. Flaş flotasyon atığı kaba flotasyon testlerinde altın tenör ve verim ilişkisi Şekil 4.13'de verilmiştir.



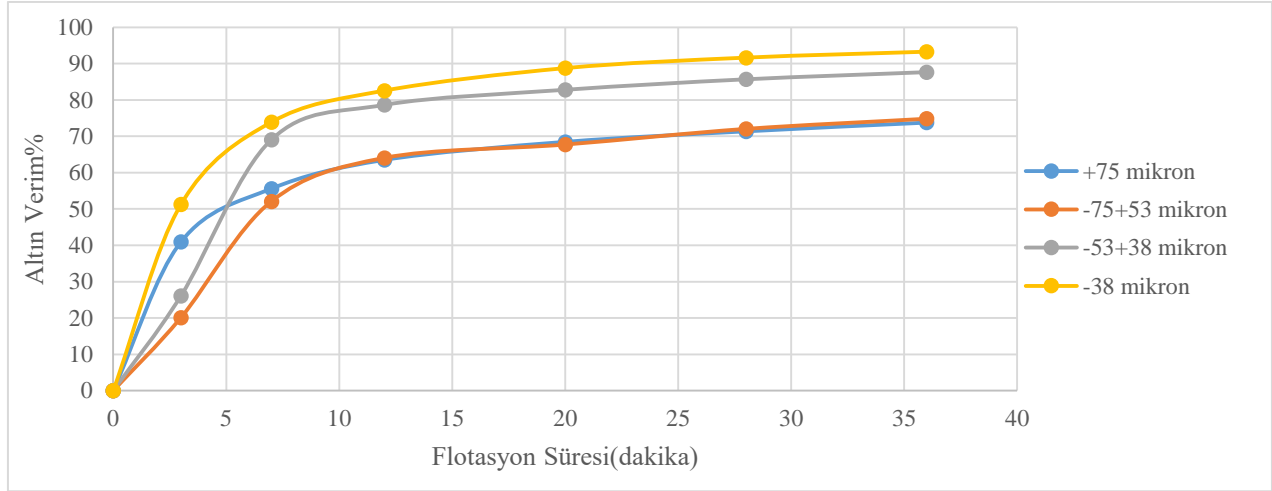
Şekil 4.13. Flaş flotasyon atığı kaba flotasyon verim - tenör ilişkisi (Altın)

Kaba flotasyon testi toplamda 36 dakika yapılmıştır. Toplam kütle kazanımı %23.12 olarak gerçekleşmiştir. Konsantrenin altın tenörü 22.7 g/t ve altın verimi %90.41 olmuştur. Bu testte elde edilen sülfür verimi ve tenör ilişkisi Şekil 4.14’de verilmiştir.

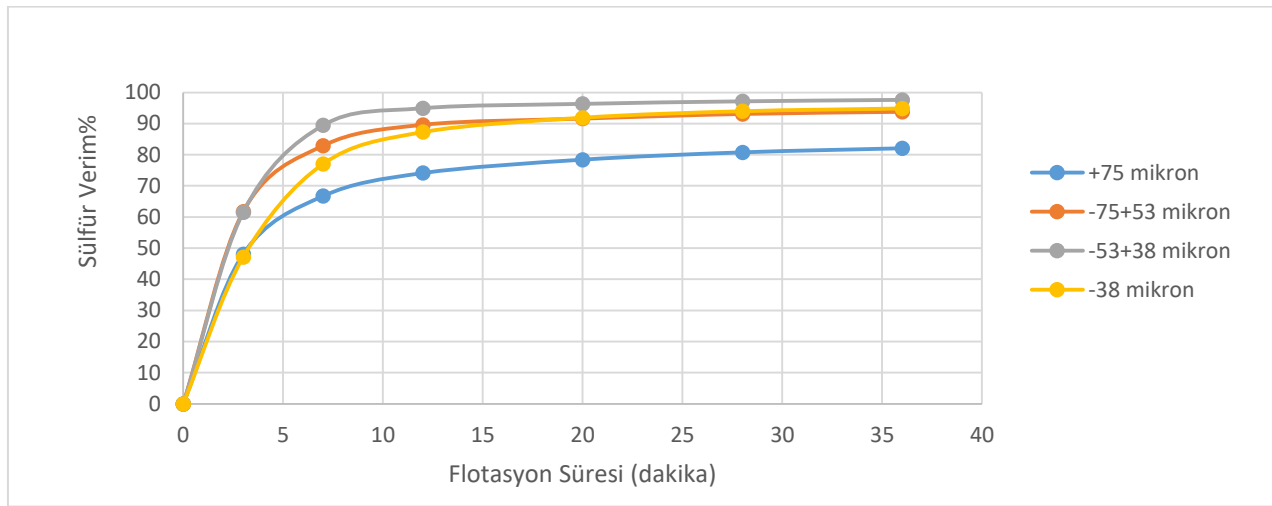


Şekil 4.14. Flaş flotasyon atığı kaba flotasyon verim - tenör ilişkisi (Sülfür)

Kaba flotasyon testinde elde edilen konsantrenin sülfür verimi %93.44 ve tenörü 8.07 olarak gerçekleşmiştir. Kaba flotasyon kinetiği Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.15. Fraksiyonlardaki altın tanelerinin flotasyon kinetiği – Flaş atığı kaba flotasyon



Şekil 4.16. Fraksiyonlardaki sülfür tanelerinin flotasyon kinetiği - Flaş atığı kaba flotasyon

Sülfür mineralleri için flotasyon süresi yeterli olmasına rağmen altın taneleri için ilave süreye ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Kaba flotasyon kinetiğine bakıldığında altın ve sülfür verimlerinin benzer bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Kaba flotasyon atığına siyanürleme testi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.9.'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Flaş ve kaba flotasyon atığı liç testi sonucu

Liç Testi Özeti	
Altın Verimi %	46.46
Atıktaki Altın Tenörü (g/t)	0.53
Hesaplanan Besleme Tenörü (g/t)	0.99
Besleme Tenörü (g/t)	1.07
NaCN tüketimi (kg/t)	0.93
Kireç İlavesi, (kg/t)	0.89
Beslemedeki Sülfür Tenörü(%)	0.15
Atıktaki Sülfür Tenörü (%)	0.13

Kaba flotasyon atığının altın tenörü 1.07 g/t olarak elde edilmiştir. Bu atığa yapılan siyanür liç işlemi testine göre altının %46.46'ı geri kazanılabilmektedir. Siyanür tüketimine bakıldığında ise yaklaşık 1 kg/t'a yakın bir tüketime sahiptir. Böylelikle E-GRG ve kaba flotasyon testi atığından daha az serbestleşmiş altın tanesi atıkta kaldığı düşünülmektedir.

4.3. Kütle Denkliği

E-GRG ve kaba flotasyon ile flaş flotasyon ve kaba flotasyon testlerine karşılaştırma yapmak için kütle denkliği yapılmıştır. E-GRG ve flaş flotasyon test programlarının kütle balansı yapılmış sonuçları Çizelge 4.10.'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. E-GRG test programı kütle denkliği

Ürün	Ağırlık%	Au g/t	Au %Dağılım	%S	%S %Dağılım
E-GRG Besleme	100	15.5	100	3.15	100
E-GRG Konsantre	2.02	253.99	33.1	22.92	14.7
E-GRG Atık	97.98	10.58	66.9	2.74	85.3
Kaba F. Konsantre	15.19	52.92	51.85	16.27	78.44
Kaba F. Atık	82.79	2.82	15.05	0.26	6.86
Birleştirilmiş Konsantre	17.21	76.52	84.95	17.05	93.14

Yapılan kütle denkliğine göre kütle kazanımı %2.02 olan E-GRG konsantresinde altın verimi %33.1 ve sülfür verimi %14.7 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen konsantrenin altın ve sülfür tenörü sırasıyla 254 g/t ve %23 olmuştur. E-GRG atığına yapılan kaba flotasyon işleminde ise toplam altının %51.85'i ve sülfürün %78.44'ü geri kazanılmıştır. Böylelikle toplam altın ve sülfür

verimleri sırasıyla %84.95 ve %93.14 olmuştur. Flaş ve kaba flotasyon testleri sonucunda da kütle denklığı yapılmış sonuçları Çizelge 4.11.'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Flaş flotasyon test programı kütle denklığı

Ürün	Ağırlık%	Au g/t	Au %Dağılım	%S	%S %Dağılım
Flaş Flotasyon Besleme	100	15.13	100	3.93	100
Flaş Flotasyon Konsantre	4.03	150.1	39.98	30.37	31.06
Flaş Flotasyon Atık	95.97	9.46	60.02	2.83	68.94
Kaba F. Konsantre	22.19	37	54.26	11.44	64.42
Kaba F. Atık	73.78	1.18	5.76	0.24	4.52
Birleştirilmiş Konsantre	26.22	54.39	94.24	14.35	95.48

Flaş flotasyon konsantresinin kütle kazanımı E-GRG testinden elde edilen kütle kazanımının 2 katı olarak belirlenmiştir. %4.06 kütle kazanımına sahip olan flaş flotasyon konsantresinin altın ve sülfür verimleri %39.98 ve %31.06 olmuştur. Bu konsantrenin altın tenörü 150.1 g/t iken sülfür tenörü ise %30.37 olmuştur. Flaş flotasyon atığına yapılan kaba flotasyon sonucunda toplam altın ve sülfürün sırasıyla %54.26 ve %64.42'i geri kazanılmıştır. Nihai altın kazanımı %94.24 ve sülfür kazanımı %95.48 olarak gerçekleşmiştir.

Elde edilen E-GRG konsantresinin altın tenörü 254 g/t iken flaş flotasyon konsantresinde elde edilen fazla kütle kazanımı sayesinde 150 g/t olmuştur. Sülfür tenörlerine bakıldığında ise E-GRG konsantresinin tenörü %22.92 iken flaş flotasyonda %30.37 olarak gerçekleşmiştir. Flaş flotasyonda altın verimleri E-GRG testine göre %7 daha fazla gerçekleşmiştir. Sülfür veriminde bu fark %17'ye kadar çıkmıştır.

4.4. Simülasyon Çalışmaları

Serbest altın ve altın içeren sülfürlü minerallerin öğütme devresinde kazanılması tüm sistemin verimini artırmaktadır. Genellikle bu amaç için gravite ve flaş flotasyon kullanılmaktadır. Ekipman seçimi çok kritiktir ve laboratuvar ölçekli test çalışmasının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları genellikle çeşitli akım şeması seçeneklerini test

etmek için faydalı araçlardır. Güvenilir simülasyon çalışmaları için gravite, flaş ve kaba flotasyon, öğütme ve sınıflandırma gibi her birimdeki fraksiyon bazında minerallerin verilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Simülasyon çalışmaları için yapılan testlerde elde edilen fraksiyonlardaki verim değerleri kullanılmıştır. Laboratuvar ölçekli testlerden elde edilen gravite ile zenginleştirme için kullanılan verim değerleri Çizelge 4.12.'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Gravite ile zenginleştirmeye tanımlı verim değerleri %

Gravite Modele Tanımlı Verim Değerleri			
(µm)	Au verim%	Pirit verim %	Gang verim %
600	0.30	0.31	0.17
425	0.57	0.36	0.17
300	0.62	0.61	0.21
212	0.86	0.70	0.13
106	3.93	2.81	0.19
75	1.95	2.74	0.12
53	5.41	3.84	0.11
38	5.86	1.76	0.07
-38	13.63	0.94	0.08
Nihai	33.13	14.07	1.26

Flaş flotasyon için tanımlanmış altın, pirit ve gang minerallerinin laboratuvar testlerinden elde edilen fraksiyonlarındaki tanımlı altın verimleri flaş flotasyon baz alınarak yapılmıştır. Fraksiyona tanımlı verim değerleri Çizelge 4.13.'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Flaş flotasyon tanımlı verim değerleri %

Flaş Flotasyon Modele Tanımlı Verim Değerleri			
(µm)	Au verim%	Pirit verim %	Gang verim %
212	19.27	14.84	1.05
106	42.58	52.40	1.99
75	44.53	54.26	0.18
53	63.10	61.65	0.70
38	51.70	37.28	0.63
-38	46.23	21.06	2.20
Nihai	39.98	31.06	1.54

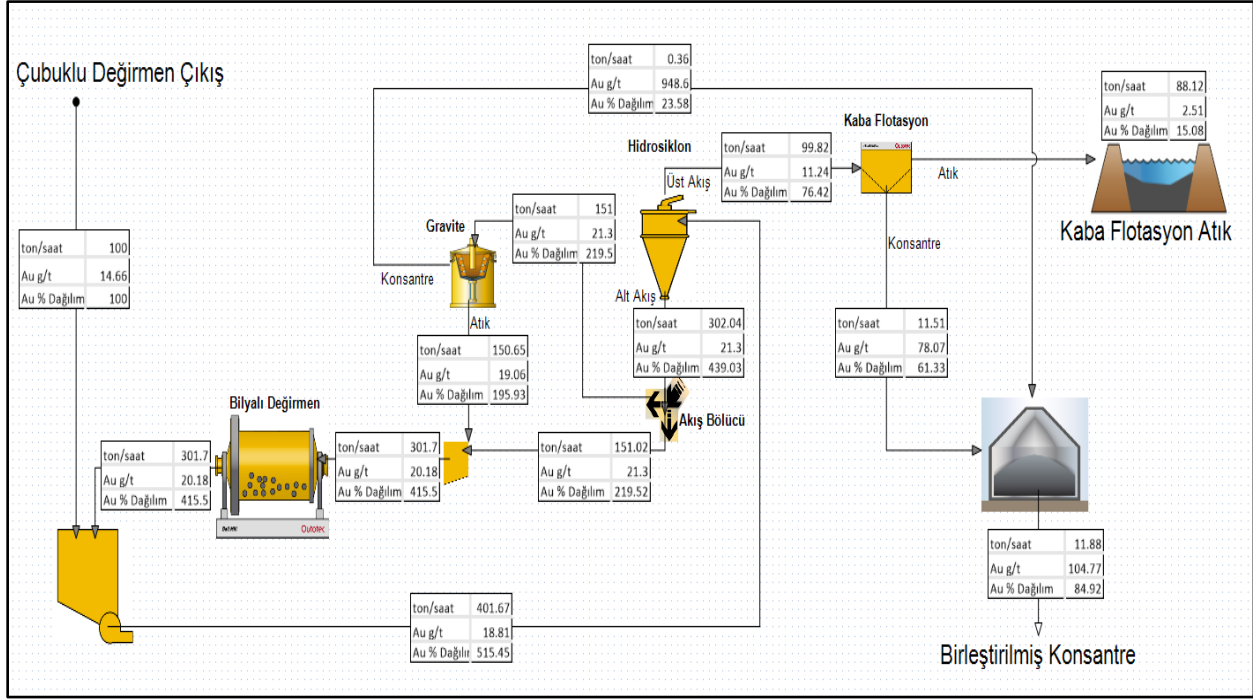
Öğütme devresinden sonra gelen kaba flotasyon işlemi için gravite ve flaş flotasyon atıklarına yapılan kaba flotasyon testlerinde laboratuvar testlerinden elde edilen verim değerleri tanımlanmıştır. Tanımlı verim değerleri Çizelge 4.14.'de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Kaba flotasyon tanımlı verim değerleri%

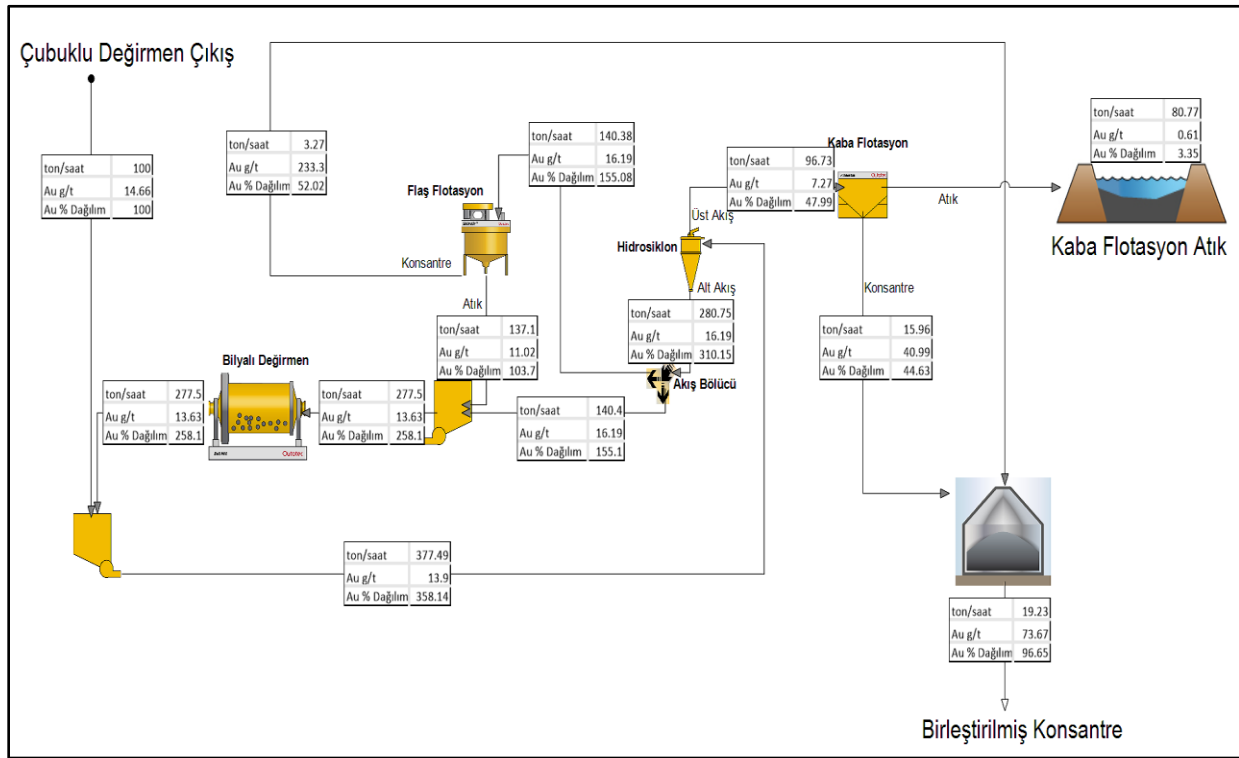
(µm)	EGRG Atığı Kaba Flotasyon Verim Değerleri %			Flaş Flotasyon Atığı Kaba Flotasyon Verim Değerleri %		
	Altın	Pirit	Gang	Altın	Pirit	Gang
-106+75	52.79	88.85	5.32	73.78	82.08	5.87
-75+53	67.05	92.42	5.93	74.83	93.78	6.09
-53+38	75.48	96.00	4.49	87.66	97.62	14.09
-38	80.47	91.53	12.52	93.28	94.85	26.42
Nihai Verim	77.55	91.96	9.51	90.41	93.44	19.98

4.4.1. Senaryo #1 Hidrosiklon Alt Akımına Gravite İle Zenginleştirme ve Flaş Flotasyonu Ekipmanı Konulması

En yaygın kullanımlardan biri olan hidrosiklon alt akışına gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon ekipmanları kullanılarak farklı koşullarda sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Hidrosiklon alt akımına gravite ile zenginleştirme ekipmanı konulmuştur. Hidrosiklon alt akışının %50'sinin gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyona verildiği akım şeması Şekil 4.17 ve Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Hidrosiklon alt akışına (%50) gravite ile zenginleştirme ekipmanı konulması

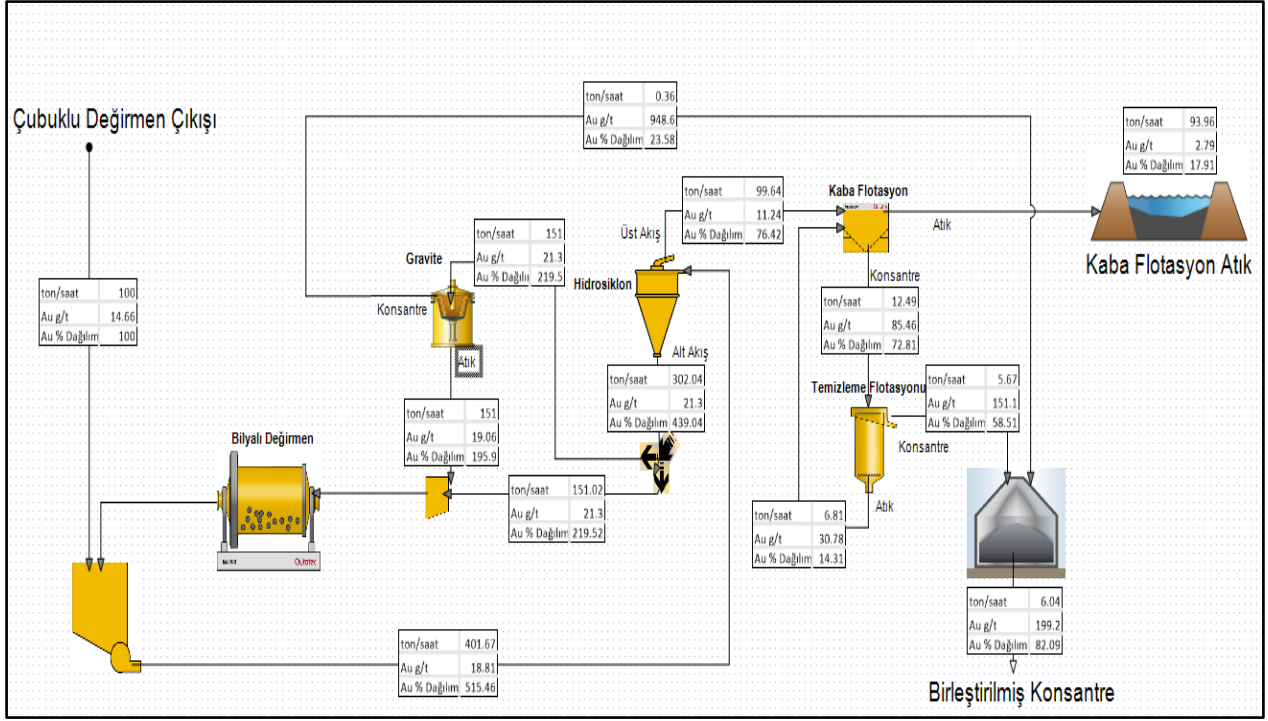


Şekil 4.18. Hidrosiklon alt akışına (%50) flaş flotasyon konulması

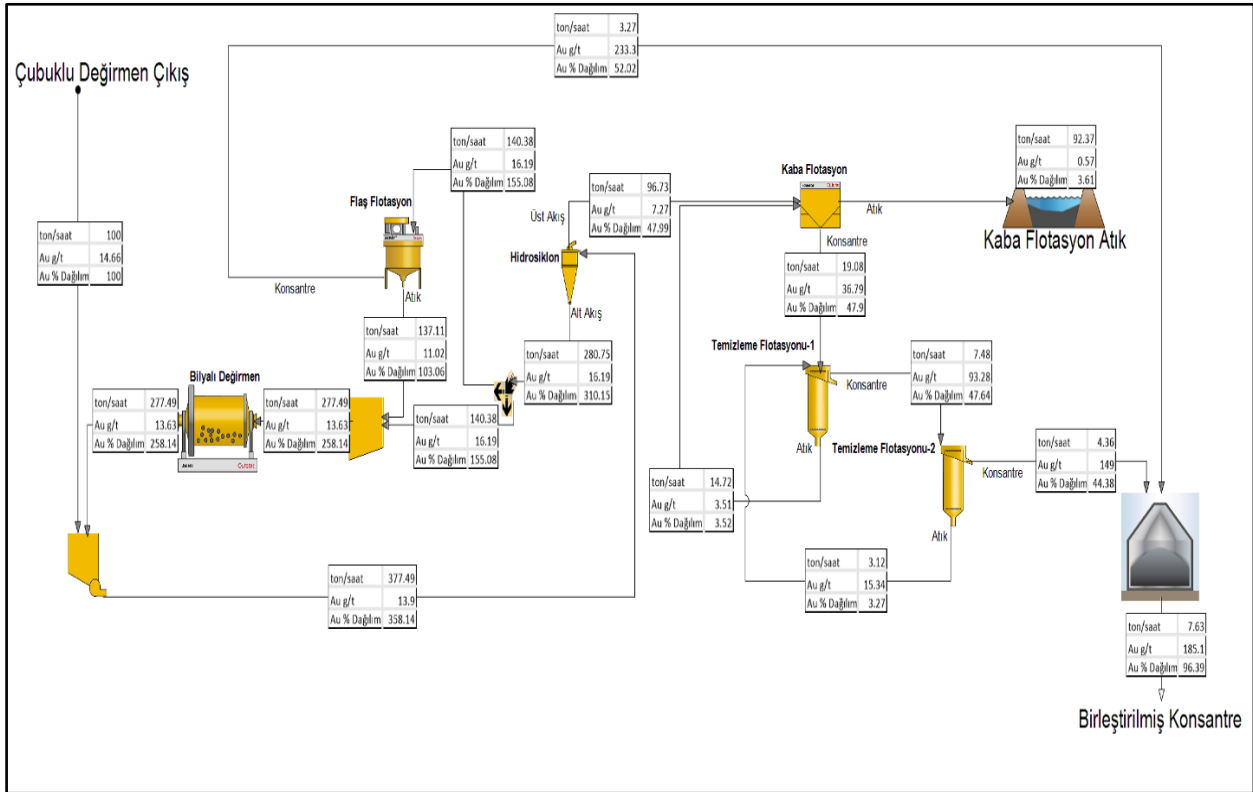
Hidrosiklon alt akışının %50'sinin gravite ile zenginleştirme ekipmanına verilmesi durumunda %0.36 kütle kazanımı ile altın tenörü 948.57 g/t ve sülfür tenörü %22.93 olan konsantre elde edilmiştir. Bu konsantrenin altın ve sülfür verimleri sırasıyla %23.58 ve %2.63 olarak hesaplanmıştır. Hidrosiklon üst akışı kaba flotasyona verilmiştir. Kaba flotasyonda sistemdeki altının ve sülfürün %61.33 ve %89.20'si kazanılmıştır. Nihai altın ve sülfür kazanımı %84.92 ve %91.82 olarak hesaplanmıştır.

Hidrosiklon alt akışının %50'sinin flaş flotasyona verilmesi durumunda %3.27 kütle kazanımı ile altın tenörü 233.3 g/t ve sülfür tenörü %33.75 olan konsantre elde edilmiştir. Bu konsantrenin altın ve sülfür verimleri sırasıyla %52.02 ve %36.19 olarak hesaplanmıştır. Kaba flotasyonda sistemdeki altının ve sülfürün %44.63 ve %60.42'si kazanılmıştır. Nihai altın ve sülfür kazanımı %96.65 ve %96.61 olarak hesaplanmıştır.

Flaş flotasyon seçeneğinde kütle kazanımı 9 kat daha fazla gerçekleşmiştir. Yüksek kütle kazanımı ile birlikte altın kazanımı 2 kat ve sülfür kazanımı 14 kat fazla gerçekleşmiştir. Fakat elde edilen konsantrenin tenörü (233.3 g/t) gravite ile zenginleştirmeden (948.57 g/t) daha düşük gerçekleşmiştir. Bu akım şeması seçeneklerine elde edilen nihai altın ve sülfür tenörlerini artırmak için kaba flotasyon devresine ek olarak temizleme devresi konulmuştur. Temizleme devreleri için kaba flotasyon verim değerleri kullanılmıştır. Akım şemaları Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Gravite ile zenginleştirme seçeneğine temizleme devresi eklenmesi

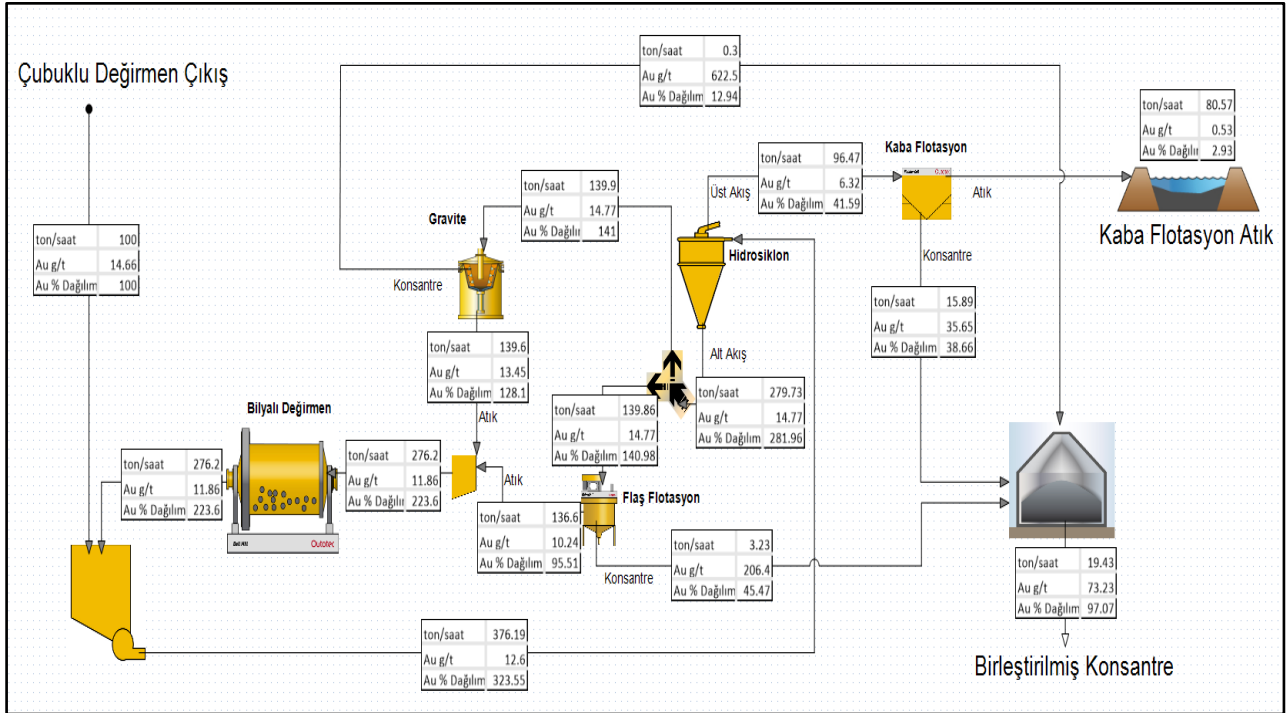


Şekil 4.20. Flaş flotasyon seçeneğine temizleme devresi eklenmesi

Gravite ile zenginleştirme seçeneğine bir kademe temizleme devresi eklendiğinde altın verimi %84.92'den %82.09'a ve sülfür verimi %91.82'den %91.15'e kadar düşmüştür. Fakat nihai konsantrenin altın tenörü 104.77 g/t'dan 199.2 g/t'a ve sülfür tenörü %23.55'ten %45.99'a yükselmiştir. Ayrıca bu konsantrenin kütle kazanımı %11.88'den %6.04'e düşmüştür.

Flaş flotasyon seçeneğine iki kademe temizleme devresi eklendiğinde altın verimi %96.55'ten %96.39'a ve sülfür verimi %96.61'den %96.41'e düşmüştür. Fakat nihai konsantrenin altın tenörü 73.67 g/t'dan 185.1 g/t'a ve sülfür tenörü %15.31'den %38.49'a yükselmiştir. Nihai konsantrenin kütle kazanımı %19.23'ten %7.63'e düşmüştür.

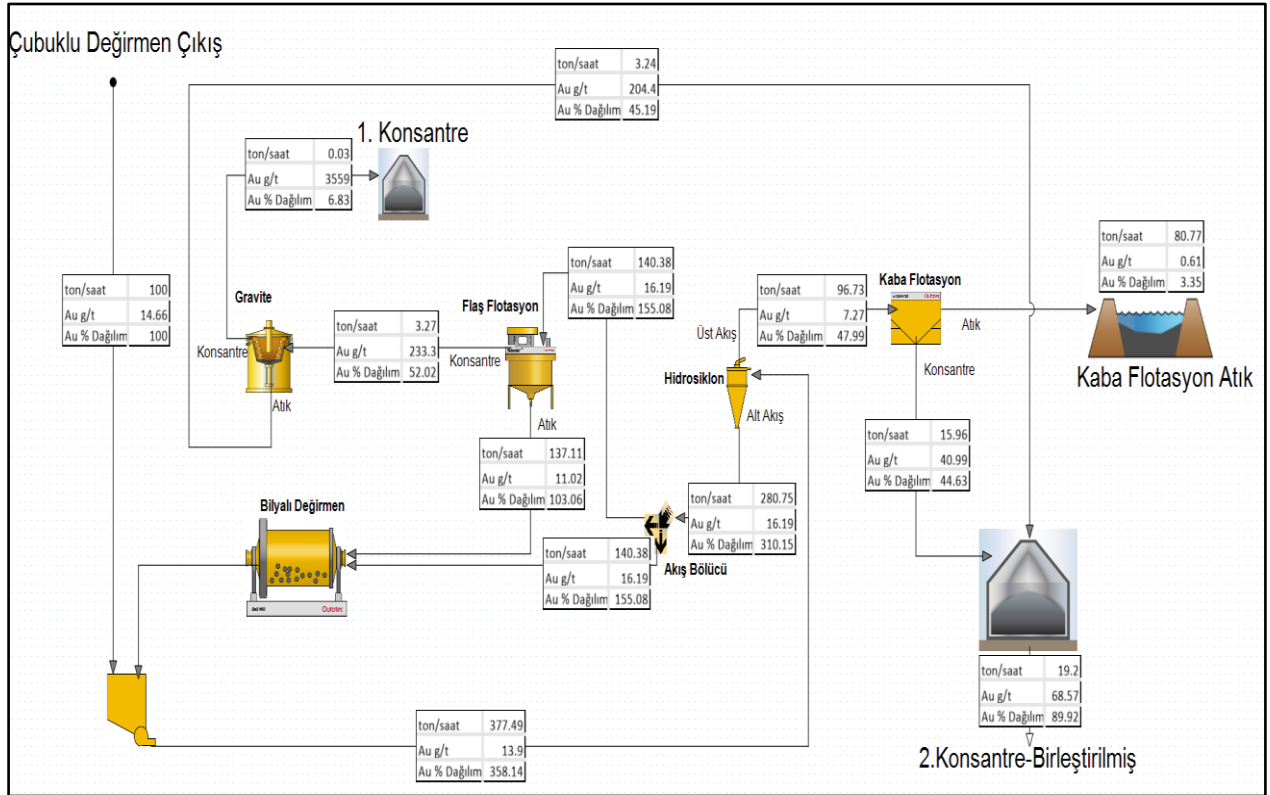
Diğer bir seçenek olarak hidrosiklon alt akımına paralel olacak şekilde gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon konularak simülasyon yapılmıştır. Bu seçeneğin akım şeması Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Hidrosiklon alt akıma gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon paralel şekilde konumlandırılması

Bu akım şemasında her iki ekipmanada saatte 139.6 ton cevher gelmektedir. Gravite ile zenginleştirme işleminde %0.3 kütle kazanımı ile altın ve sülfür tenörü 622.46 g/t ve %17.74 olan konsantre elde edilmiştir. Bu konsantrenin altın ve sülfür verimleri ise %12.94 ve %1.77 olmuştur. Diğer bir akışta olan flaş flotasyon işleminde %14.77 kütle kazanımı ile altın ve sülfür tenörü 206.39 g/t ve %34.57 olan konsantre elde edilmiştir. Flaş konsantresinin altın ve sülfür verimi ise %45.47 ve %35.57 olarak hesaplanmıştır. Kaba flotasyon işlemi ile toplam %19.43 kütle kazanımına sahip ve altın ve sülfür tenörü sırasıyla 73.23 g/t ve %15.16 olan konsantre elde edilmiştir. Toplam altın ve sülfür verimi %97.07 ve %96.67 olarak hesaplanmıştır.

Hidrosiklon alt akışına uygulanan ve elde edilen gravite konsantresinin direk döküme gönderilebilmesi için uygulanabilen diğer bir yöntem ise flaş flotasyon konsantresinin gravite ile zenginleştirme ekipmanına gönderilmesidir. Akım şeması Şekil 4.22’de verilmiştir.

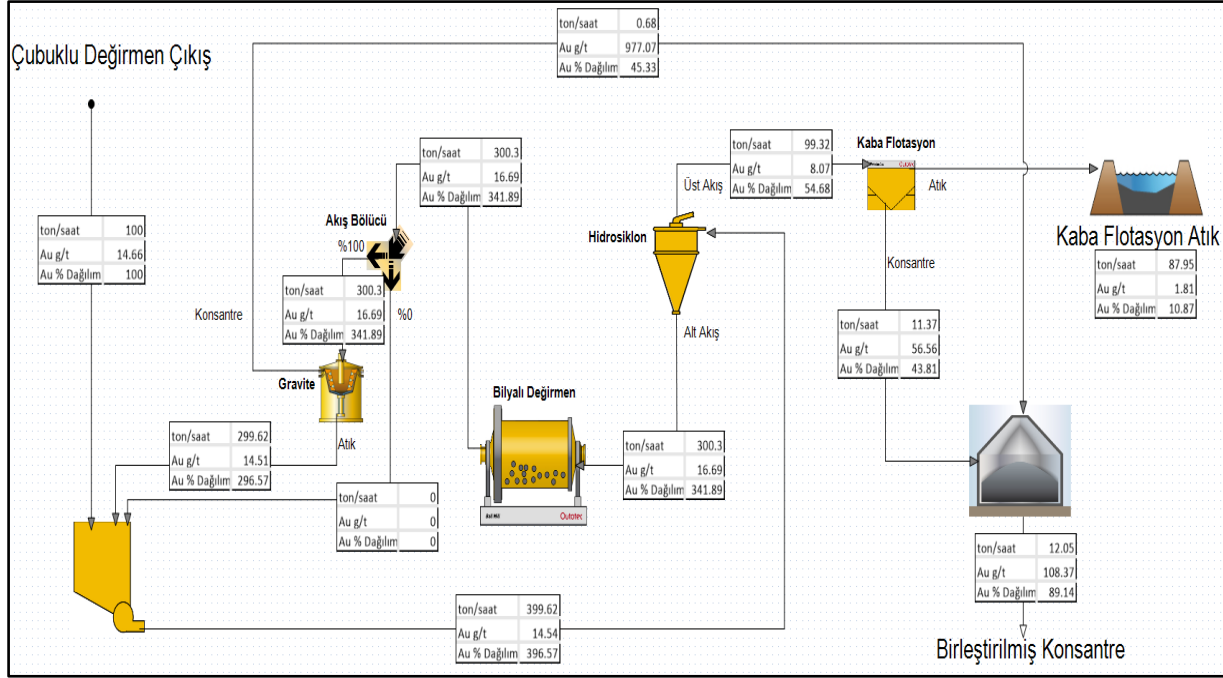


Şekil 4.22. Flaş konsantresinin gravite ile zenginleştirmeye verilmesi

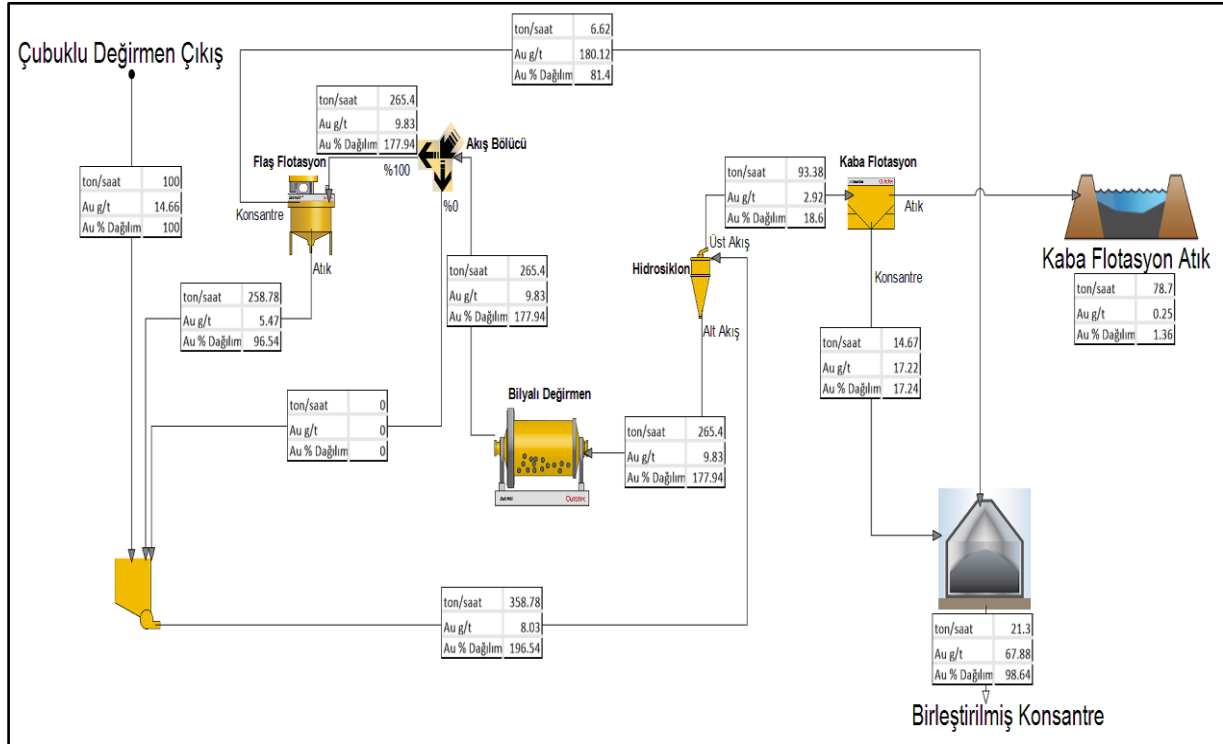
Bu seçenekte flaş flotasyon konsantresi gravite ile zenginleştirme ekipmanına verilirken yüksek konsantreli ürün elde edilmektedir. Gravite ile zenginleştirmenin atığı ise kaba flotasyon konsantresi ile birleştirilip ikinci konsantreye gönderilmiştir. Flaş konsantresinin kütle kazanımı %3.27 iken gravite ile zenginleştirme işlemi sayesinde kütle kazanımı %0.03'e kadar düşmektedir. Fakat flaş konsantresinin altın ve sülfür tenörü sırasıyla 233.30 g/t ve %33.75 iken gravite ile zenginleştirme işlemi birlikte 3559,01 g/t ve %49.31'e kadar yükselmiştir. Burada elde edilen altın ve sülfür verimi %6.83 ve %0.45 gibi düşük olmasına yüksek konsantreli ürün elde edilmiştir. Kaba flotasyon konsantresi ve gravite ile zenginleştirme işleminin atığı ise birleştirilmiş konsantreyi oluşturmaktadır. Bu konsantrenin altın ve sülfür tenörü sırasıyla 68.57 g/t ve %15.26 olup altın ve sülfür verimleri %88.82 ve %96.15 olarak hesaplanmıştır. Yüksek tenörlü konsantre ile birlikte altının %96.65 ve sülfürün %96.61'i kazanılmaktadır.

4.4.2. Senaryo #2 Değirmen Çıkışına Gravite ile Zenginleştirme ve Flaş Flotasyon Konulması

Diğer bir yaygın uygulama ise bilyalı değirmen çıkışına konulmasıdır. Bu seçeneğin avantajlı yanı öğütme devresinin katı/su oranını kontrolünün daha kolay olmasıdır. Bundan dolayı akışın tamamı zenginleştirme ekipmanına verilebilmektedir. Değirmen çıkışına gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon ekipmanının konulduğu akım şemaları Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de verilmektedir.



Şekil 4.23. Değirmen çıkışına gravite ile zenginleştirme ekipmanı konulması



Şekil 4.24. Değirmen çıkışına flaş flotasyon konulması

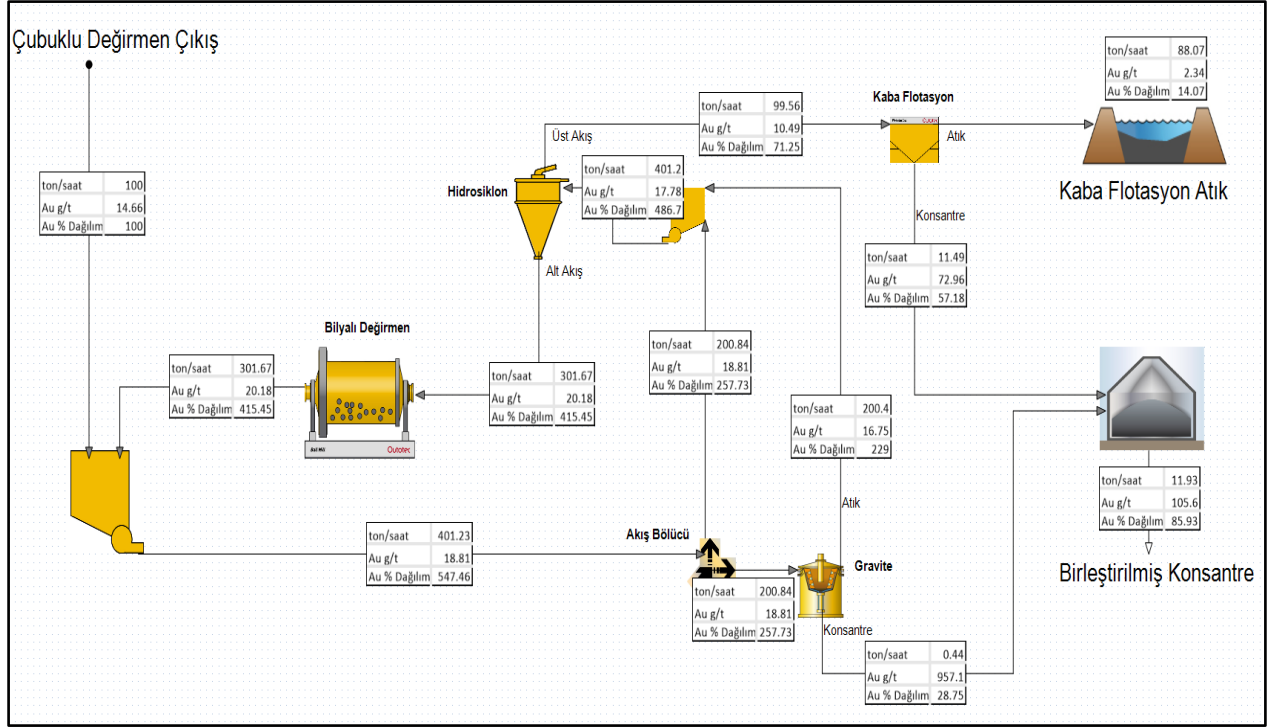
Bilyalı değirmen çıkışına gravite ile zenginleştirme ekipmanı yerleştirildiğinde ve akışın tamamı bu prosese verildiğinde ekipmana saatte 300.30 ton cevher gelmektedir. Ekipmanın ürettiği konsantre saatte 0.68 ton olmakla beraber altın ve sülfür tenörü 977.07 g/t ve %24.27 olarak hesaplanmıştır. Altın ve sülfür verimleri ise %45.33 ve %5.52 olmuştur. Sistemin toplam altın ve sülfür verimleri ise %89.12 ve %92.05 olmuştur.

Aynı akım şemasında gravite ile zenginleştirme ekipmanı yerine flaş flotasyona verildiğinde flaş flotasyona prosesine saatte 265.4 ton cevher gelmektedir. Elde edilen flaş konsantresi saatte 6.62 ton olup altın ve sülfür tenörleri sırasıyla 180.12 g/t ve %28.20 olarak hesaplanmıştır. Altın ve sülfür verimleri ise %81.40 ve %61.30 olmuştur. Sistemin toplam altın ve sülfür verimleri ise %98.64 ve %97.91 olarak hesaplanmıştır.

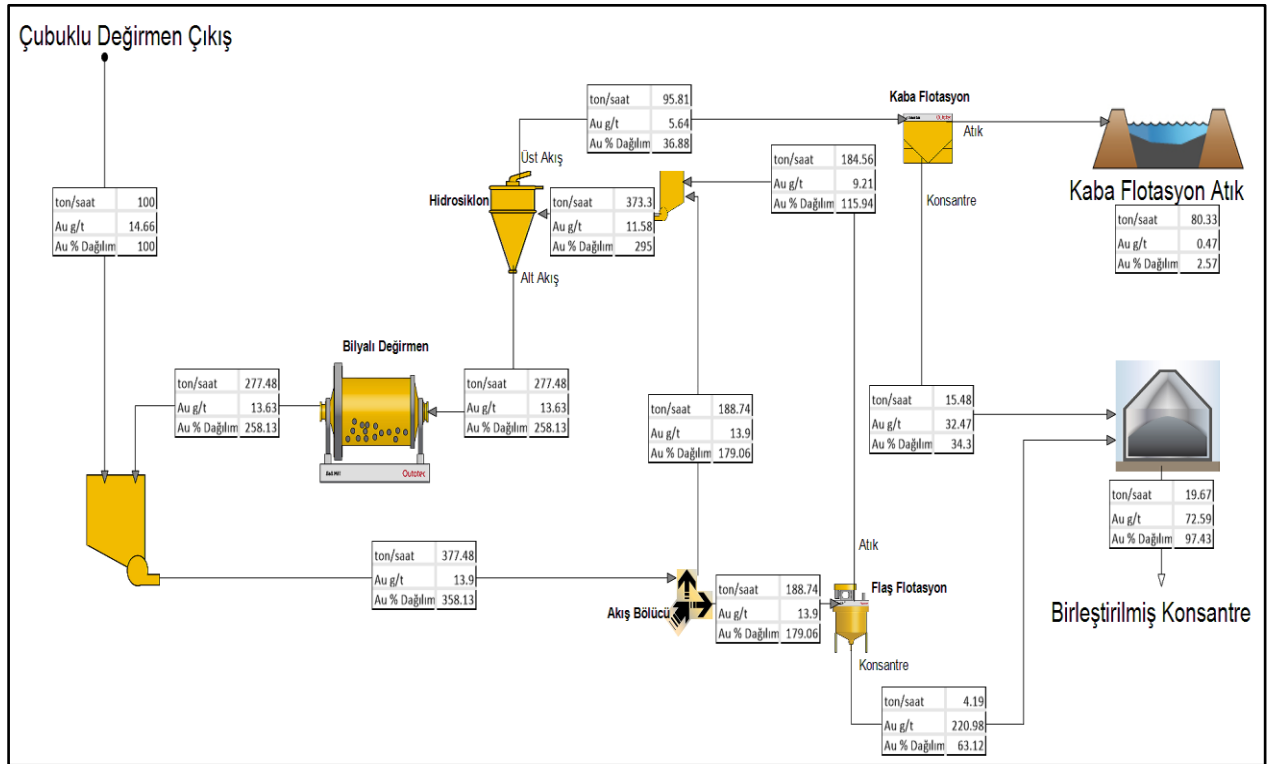
Değirmen çıkışına yerleştirilen bu iki proseste artan tonaj ile birlikte altın ve sülfür verimleri artmıştır. Flaş flotasyon seçeneğinde elde edilen konsantrenin miktarı gravite ile zenginleştirmeye göre yaklaşık 10 kat fazla olmuştur. Yüksek kütle kazanımı sayesinde altın kazanımı 1.8 kat ve sülfür kazanımı %11 daha fazla gerçekleşmiştir. Fakat gravite ile zenginleştirme işlemi ile elde edilen konsantrenin tenörü flaş flotasyona göre 5 katı kadar olmuştur. Akım şemalarının toplam altın ve sülfür verimlerine bakıldığında flaş flotasyon seçeneği altın veriminde yaklaşık %10 ve sülfür veriminde %6 kadar fazla gerçekleşmiştir.

4.4.3. Senaryo #3 Hidrosiklon Beslemesine Gravite ile Zenginleştirme ve Flaş Flotasyon Konulması

Uygulanan diğer bir senaryo da hidrosiklon beslemesine gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyon konulmasıdır. Buradaki akışında yüksek oluşu ve katı/sıvı dengesi gözetilerek genellikle akışın bir miktarı zenginleştirme ekipmanına verilir. Çalışan simülasyonlarda akışın %50'si gravite ile zenginleştirme ve flaş flotasyona verilmiştir. Akım şemaları Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.25. Hidrosiklon beslemesine gravite ile zenginleştirme konulması



Şekil 4.26. Hidrosiklon beslemesine flaş flotasyon konulması

Hidrosiklon besleme akışının %50'sinin gravite ile zenginleştirme ekipmanına verildiği koşulda zenginleştirme ekipmanına saatte 200.84 ton cevher gelmektedir. Gravite ile zenginleştirme ekipmanı altın ve sülfür tenörü sırasıyla 957.14 g/t ve %21.57 olan saatte 0.44 ton konsantre üretmektedir. Bu konsantrenin altın ve sülfür verimi ise %28.75 ve %3.12 olarak hesaplanmıştır. Kaba flotasyon kazanımları ile birlikte sistemin altın ve sülfür verimi %85.93 ve %91.86 olarak hesaplanmıştır.

Aynı koşullarda gravite ile zenginleştirme ekipmanı yerine flaş flotasyon işlemi konulduğunda flaş flotasyona saatte 188.74 ton cevher gelmektedir. Flaş flotasyonda altın ve sülfür tenörü 220.98 g/t ve %31.46 saatte 4.19 ton konsantre üretilmektedir. Altın ve sülfür verimleri ise %63.12 ve %43.22 olarak hesaplanmıştır. Kaba flotasyon kazanımları ile birlikte altın ve sülfür verimleri %97.43 ve %97 olarak hesaplanmıştır.

Bu senaryoda da flaş flotasyonun altın ve sülfür kazanımları daha yüksek gerçekleşmiştir. Altın verimi 2 kattan daha fazla iken sülfür verimi 14 kat daha fazla olmuştur. Nihai kazanımlarında altın verimi %12 ve sülfür verimi %5 daha fazla gerçekleşmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma ile E-GRG, flaş ve kaba flotasyon testleri ile altın ve sülfür verimleri ve bu proseslerin etkili olduğu tane boyu aralıkları belirlenmeye çalışılmış olup elde edilen veriler ışığında tesis performansını iki ayrı proses için tahmin edebilmeyi sağlayacak yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Altının yanı sıra cevherin içerisindeki sülfür ve gang verimleri de değerlendirilmiştir. Yapılan laboratuvar ölçekli çalışmalara elde edilen bilgiler ışığında aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- MacKinnon (2002) ve Newcombe'in (2012) yaptığı çalışmada elde ettiği sonuca göre flaş flotasyonda +212 mikron fraksiyonunun altın verimi ve kinetiğinin diğer fraksiyonlara göre düşük olduğu bu çalışmada da görülmüştür. Tez kapsamında yapılan flaş flotasyon çalışmalarında en düşük altın verimi +212 mikron fraksiyonunda %19.3 olarak gerçekleşmiştir. En yüksek altın verimi +75-53 mikron fraksiyonunda %63.1 olarak gerçekleşmiştir.
- Laplante ve Dunne (2002) sülfüre bağlı altın tanelerinin olduğu cevherlerde flaş flotasyonun altın verimi gravite ile zenginleştirmeye göre %3 ile %12 arasında genel olarak arttırdığı gözlemlenmiştir. Tez kapsamında yapılan laboratuvar çalışmalarında altın veriminde yaklaşık %7 fazla elde edilmiştir. Bu çalışmaya ek olarak sülfür verimi de %17 fazla gerçekleşmiştir.
- E-GRG ve kaba flotasyon atığına yapılan siyanürleme testinin altın kazanımı (%64) flaş flotasyon ve kaba flotasyon atığına (%46) yapılan siyanürleme testinden daha yüksek gerçekleşmiştir. E-GRG test programındaki kaba flotasyon atığında daha fazla serbestleşmiş altın bulunduğunu göstermektedir.

Simülasyon çalışmalarında elde edilen bilgiler doğrultusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

- Gravite ve flaş flotasyon ekipmanının farklı konumlarda denenmiştir. İki ekipmanın en yüksek altın verimleri değirmen çıkışına konulması senaryosunda elde edilmiştir. Nihai

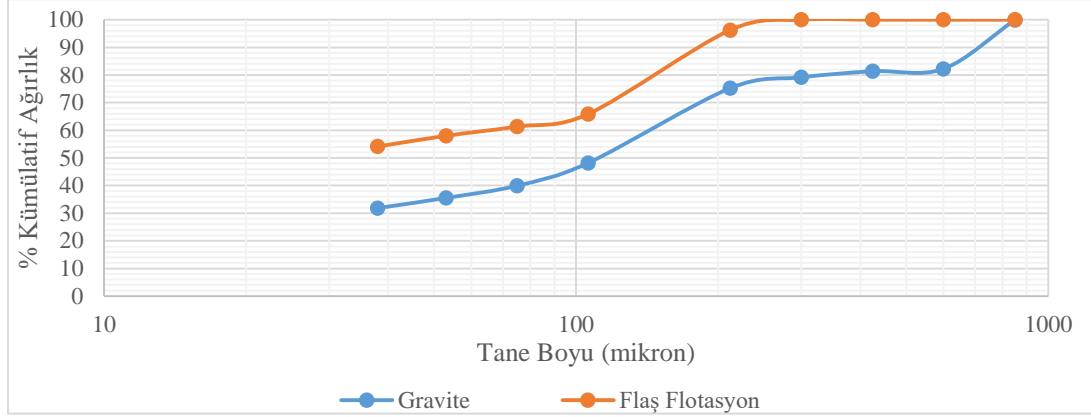
kazanımlara bakıldığında ise flaş flotasyon gravite ile kazanıma göre %9 ila %12 daha fazla gerçekleşmiştir. Özet sonuçlar Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Tüm Senaryolar Özet Tablo

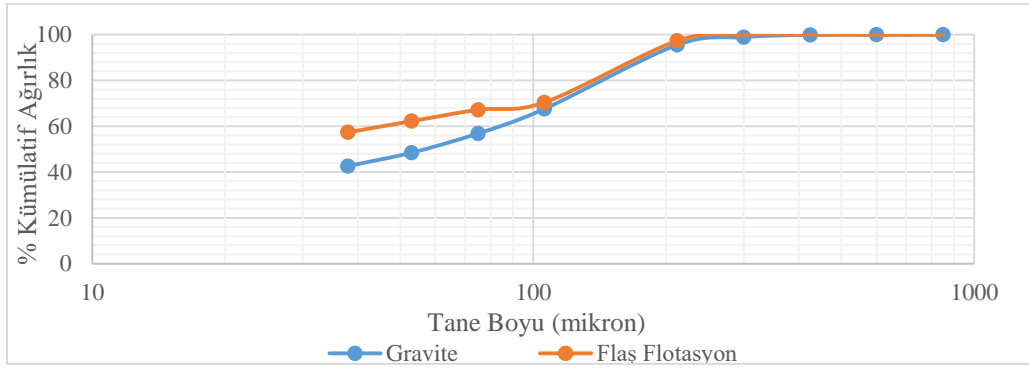
Ekipman Konumu	Proses	Proses Saatlik Tonaj	Gravite Konsantre				Flaş Konsantre				Flotasyon Konsantre				Birleştirilmiş Konsantre							
			Saatlik		Tenörler		Dağılım %		Saatlik		Tenörler		Dağılım %		Saatlik		Tenörler		Dağılım %			
			Tonaj	Au g/t	%S	Au %	%S	Tonaj	Au g/t	%S	Au %	%S	Tonaj	Au g/t	%S	Au %	%S	Tonaj	Au g/t	%S	Au %	%S
Hidrosiklon Alt Akış	Gravite	151	0.36	948.57	21.96	23.58	2.63	-	-	-	-	11.51	78.07	23.60	61.33	89.20	11.88	104.77	23.55	84.92	91.82	
	Flaş Flotasyon	140	-	-	-	-	-	3.27	233.30	33.75	52.02	36.19	15.36	40.99	11.53	44.63	60.42	18.23	73.67	15.31	96.65	96.61
	Gravite + Temizleme	151	0.36	948.56	21.96	23.58	2.63	-	-	-	-	12.49	151.12	47.53	58.51	88.52	6.04	199.24	45.99	82.09	91.15	
	Flaş Flotasyon Temizleme	137	-	-	-	-	-	3.27	233.30	33.75	52.02	36.19	4.36	149.00	42.04	44.38	60.22	7.63	185.09	38.49	96.39	96.41
	Gravite - Flaş (Paralel)	140	0.30	622.46	17.74	12.94	1.77	3.23	622.46	206.39	45.47	35.57	15.89	35.65	11.37	38.66	59.32	19.43	73.23	15.16	97.07	96.67
	Flaş Atık>Gravite Besleme*	140	0.03	3.559.01	49.31	6.83	0.45	3.24	204.44	33.61	45.19	35.74	15.96	40.99	11.53	44.63	60.42	19.20	68.57	15.26	89.82 (96.65)	96.15 (96.61)
Bilyalı Değirmen Çıkış	Gravite	300	0.68	977.07	24.27	45.33	5.42	-	-	-	-	11.37	56.45	23.21	43.81	86.64	12.05	108.37	23.27	89.14	92.05	
	Flaş Flotasyon	265	-	-	-	-	-	6.62	180.12	28.20	81.40	61.30	14.67	17.22	7.60	17.24	36.61	21.29	67.88	14.01	98.64	97.91
Hidrosiklon Besleme	Gravite	201	0.44	957.14	21.57	28.75	1.66	-	-	-	-	11.49	72.96	23.54	57.18	88.75	11.93	105.60	23.47	85.93	91.86	
	Flaş Flotasyon	189	-	-	-	-	-	4.19	220.98	31.46	63.12	43.22	15.48	32.47	10.58	34.30	53.78	19.67	72.59	15.03	97.43	97.00

*Bu senaryoda döküm için elde edilen gravite konsantresi, birleştirilmiş konsantrenin altın kazanımını %89.82'den %96.65'e çıkarmıştır.

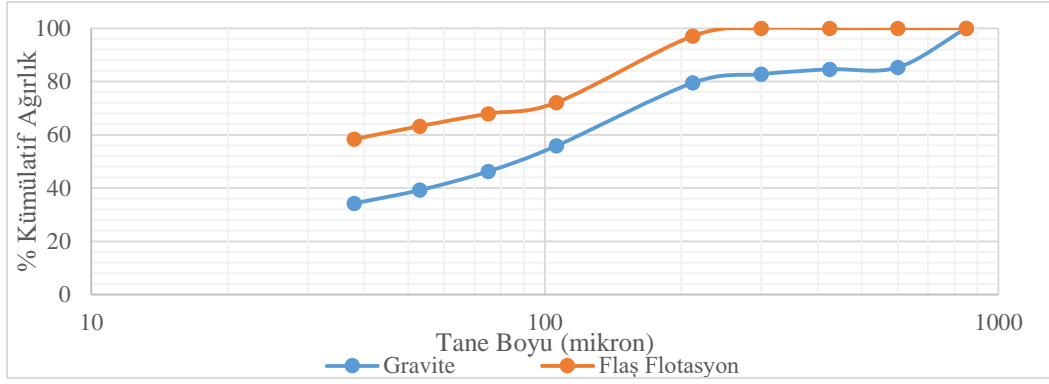
- McGrath'ın 2014 yılında yaptığı çalışmada Telfer tesisindeki flaş flotasyon konsantresinin -212+38 mikron aralığında gravite konsantresine göre daha ince tane boyu dağılımına sahip olduğu yapılan bu çalışmanın simülasyon çalışmalarında da görülmüştür. Gravite ve flaş konsantrelerinin tane boyu dağılımı Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.1. Hidrosiklon alt akımına konulan gravite/flaş konsantreleri tane boyu dağılımı



Şekil 5.2. Bilyalı değirmen çıkışına konulan gravite/flaş konsantreleri tane boyu dağılımı



Şekil 5.3. Hidrosiklon beslemesine konulan gravite/flaş konsantrelerinin tane boyu dağılımı

- Pertti Lamberg (2009) laboratuvar testlerinden elde ettiği verilerle simülasyon çalışması yapmıştır. Sülfürlü altın cevherinde yapılan çalışmanın simülasyonunda hidrosiklon alt akımına yerleştirilen flaş flotasyon yüksek kapasitesi ve ince taneleri daha iyi kazanabildiği için gravite ile zenginleştirmeden daha yüksek altın kazanımına sahip olduğunu belirtmiştir. Tez çalışması kapsamında yapılan tüm senaryolarda da altın verimi flaş flotasyon senaryolarında daha yüksek gerçekleşmiştir.
- E-GRG test sonuçları Sepro® firması ile paylaşılmış ve hidrosiklon alt akımınının %50'sine gravite ile zenginleştirme ekipmanı konulduğu zaman altın veriminin %24.5 olarak Sepro tarafından belirlenmiştir. Tez kapsamında yapılan aynı senaryoda bu değer %23.2 olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen bilgiler ışığında tesis tasarım aşamasında flaş flotasyon ve gravite ile zenginleştirme proseslerinin altın ve sülfür kazanımlarını tahmin edebilecek bir yöntem araştırılmıştır. Bu yöntem çalışan tesislerde yapılacak örnekleme çalışmaları ile desteklenebilir ve daha geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü , Türkiye ve Dünyada Altın, Sayfa 20, 2016
- [2] Fathi Habashi, Handbook of Extractive Metallurgy, Sayfa 1191 – 1193, 1997
- [3] J.C. Yannopoulos, The Extractive Metallurgy of Gold, Sayfa 44, 1991
- [4] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, Sayfa 147, 2006
- [5] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, , Sayfa 19, 2006
- [6] S.L.Chrssoulis ve J.McMullen, Mineral Investigation of Gold Ores, , Advances in Gold Ore Processing, Sayfa 31, 2005
- [7] Fathi Habashi, Handbook of Extractive Metallurgy, Sayfa 1187, 1997
- [8] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, , Sayfa 26, 2006
- [9] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, , Sayfa 30-37, 2006
- [10] Fathi Habashi, Handbook of Extractive Metallurgy, Sayfa 1219, 1997
- [11] Fathi Habashi, Handbook of Extractive Metallurgy, Sayfa 1225, 1997
- [12]D. Perkins, Mineralogy, Sayfa 360, 1998,
- [13] K.G. Thomas, Pressure oxidation overview, Developments in Mineral Processing, Vol 15, 2005 Elsevier, Sayfa 361
- [14] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, , 2006, Sayfa 43
- [15] Altın Cevherlerinin Zenginleştirilmesi ve Altının Ekstraksiyonu, İrfan Bayraktar ve Baki Yarar, www.maden.org.tr, ziyaret tarihi 01.09.2021
- [16] R. Dunne, Flotation of Gold and Gold-bearing Ores, 2005, Elsevier, Saha 323
- [17] R. Dunne, Flotation Of Gold And Gold-bearing Ores, 2005, Elsevier, Sayfa 322

- [18] J. Zhang, Y. Zhang, W. Richmond ve H.Wang, Processing Technologies for Gold-telluride Ores, , International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Volume 17, Number 1, , DOI: 10.1007/s12613-010-0101-6, 2010
- [19] , K.L. Rees and J.S.J. Van Deventer, Gold Process Modelling I. Batch Modelling of the Process of Leaching, Preg-Robbing and Adsorption Onto Activated Carbon, 2001
- [20] N. Katsikaros, Commissioning of the Intensive Cyanidation Plant to Treat Concentrate from the Selene Mine at the Ares Mill, 2010
- [21] S. Bulatovic, and D.M. Wyslouzil, Gold Recovery Flotation, , Lakefield Research, 2000
- [22] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, Sayfa 50-51, 2006
- [23] P. Breuer, Mobile Processing Plant to Reinvigorate Small Capital Gold Mining, MetFest 2017
- [24] John O. Marsden and C. Iain House, Chemistry of Gold Extraction, Sayfa 234-235, 2006
- [25] C.E. Fivaz, How the MacArthur-Forest Cyanidation Process ensured South Africa's Golden Future, , J.S. African Institute Mining and Metal, Vol 88, no 9, Page 309-318, 1988
- [26] P.A. Laxen, G.S.M.Becker ve R. Rubin, Developments In the Application of Carbon-In-Pulp to Recovery of Gold from South African Ores, , Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Page 315-326, 1979
- [27] J.C. Yanopoulos, The Extractive Metallurgy of Gold, Sayfa 81, 1991
- [28] La Brooy S.R., Linge H.G Ve Walker G.S., Review of Gold Extraction from Ores, Min. Engineering Vol.7 No.10 Sayfa 1213-1241, 1994
- [29] J.N. Greaves, G.R. Palmer ve W.W. White, Refractory Ores by the Use of Carbon in Chlorine Leaching, Journal of Metals, Sayfa 12-14, 1990
- [30] F.D. Pooley, Mineral leaching with bacteria. Environmental Biotechnology. Ellish Horwood Ltd. Publishers, , 1987
- [31] Tran T., Lee, K., Fernando, K., Halide as an alternative lixiviant for gold processing – an update, , Page 501-508, 2001

- [32] Importance of solution chemistry for thiosulfate leaching of gold, Proceedings World Gold '97, The Society For Mining, Metallurgy and Exploration, Sayfa 159-152, 1997
- [33] D.M. Muir and M.G. Aylmore, Thiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores, , Elsevier, 2005
- [34] M.D, Adams , Advances in Gold Ore Processing, , Developments in Mineral Processing, Page 509, 2005
- [35] John O. Marsden ve C. Iain House Chemistry of Gold Extraction, Sayfa 439-440, 2006
- [36] CJ Mitchell, EJ Evans & M T Styles, A Review of Gold Particle-Size and Recovery Methods, Technical report, Natural Environment Research Council, Nottingham, **1997**.
- [37] Burt R.O., Gravity Concentration Technology, Developments in Mineral Processing, , , Sayfa 5, 1984
- [38] Wills' Mineral Processing Technology, Sayfa 242-244, 2006
- [39] Laplante, A., Staunton, W.P., Gravity recovery of gold- An overview of recent developments, In Treatment of gold ores: The proceedings of the International Symposium on the Treatment of Gold Ores, eds. Deschenes, G., Hodouin, D., Lorenzen, L., Calgary, Alberta, Canada, 2005.
- [40] Laplante, A., Gray, S., Advances in gravity gold technology, In Developments in mineral processing: Advances in gold ore processing, ed. Adams, M.D. Elsevier B.V., Amsterdam, The Netherlands, sayfa 280-307, 2005
- [41] M.M. Vegia, A.J. Gunson, Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining, 2020
- [42] Koppalkar, S., The effect of operating variable in Knelson concentrators: A pilot-scale study, In Department of Mining and Materials Engineering. McGill University, Montreal, sayfa 167., 2009
- [43] Taggart, A.F., Handbook of mineral dressing., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1945
- [44] Wills' Mineral Processing Technology, Sayfa 267-268, 2006,

- [45] Dunne, R.. Flotation of gold and gold-bearing ores, In *Developments in mineral processing: Advances in gold ore processing*, ed. Adams, M.D. Elsevier B.V., Amsterdam, The Netherlands, sayfa 309-343., 2005
- [46] Woods, R., Kim, D.S., Basilio, C.I., Yoon, R.H., A spectroelectrochemical study of chemisorption of ethyl xanthate on gold. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 94(1), sayfa 67-74., 1995
- [47] Chryssoulis, S.L., Dimov, S.S., Optimized conditions for selective gold flotation by ToF-SIMS and ToF-LIMS. *Applied Surface Science*, 231–232(0), sayfa 265-268, 2004
- [48] O'Connor, C.T., Dunne, R.C., The flotation of gold bearing ores - A review. *Minerals Engineering*, 7(7), sayfa 839-849, 1994
- [49] Teague, A.J., Van Deventer, J.S.J., Swaminathan, C., The effect of galvanic interaction on the behaviour of free and refractory gold during froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 57(4), sayfa 243-263, 1999
- [50] Klimpel, R.R., Industrial experiences in the evaluation of various flotation reagents schemes for the recovery of gold. *Minerals and Metallurgical Processing*, 16(1), sayfa 1-11., 1999
- [51] Newcombe, B., Bradshaw, D., Wightman, E., Development of a laboratory method to predict plant flash flotation performance. *Minerals Engineering* , 39(0), sayfa 228-238., 2012
- [52] *Will's Mineral Processing Technology, An Introductio to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recover*, Finch, James A. Wills, Barry Alan, Sayfa 270, 2015
- [53] T. D. H. McGrath, A study of the behaviour of free gold in flash flotation and gravity recovery, , Curtin University, Sayfa 58, 2014
- [54] Klimpel, R.R., Isherwood, S., Some industrial implications of changing frother chemical structure. *International Journal of Mineral Processing*, 33(1–4), sayfa 369- 381., 1991
- [55] Teague, A.J., Van Deventer, J.S.J., Swaminathan, C., A conceptual model for gold flotation. *Minerals Engineering*, 12(9), 1001-1019, 1999

- [56] Monte, M.B.M., Dutra, A.J.B., Albuquerque Jr, C.R.F., Tondo, L.A., Lins, F.F., The influence of the oxidation state of pyrite and arsenopyrite on the flotation of an auriferous sulphide ore. *Minerals Engineering*, 15(12), sayfa 1113-1120., 2002
- [57] Woodcock, F., Sparrow, G.J., Bruckard, W.J., Flotation of precious metals and their minerals, In *Froth flotation : A century of innovation*, eds. Feurstenau, M.C., Jameson, G., Yoon, R., 2007
- [58]Allan, G.C., Woodcock, J.T., A review of the flotation of native gold and electrum. *Minerals Engineering*, 14(9), sayfa 931-961, 2001
- [59] Marsden J., House, I., *The Chemistry of gold extraction*. 2nd edn. Society for Mining, Metallurgy , and Exploration (SME), Littleton, Colo, 2006
- [60] Chryssoulis, S.L., Venter, D., Dimov, S.S., On the flotability of gold grains, In *35th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa, Sayfa 455-472, 2003
- [61] Leaver. E.S, Woolf, J.A.,. *Depressing Primary sime during the flotation of gold in milling ores*, In *Progress report- Metallurgical Division* sayfa 9-17, 1934
- [62] Z. Deng, W. Cheng, Y. Tang, X. Tong, Z. Liu, Adsorption mechanism of copper xanthate on pyrite surfaces, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, sayfa 46-60, 2021
- [63] E.T. Pecina, A. Uribe, F.Nava, J.A. Finch, The role of copper and lead in the activation of pyrite in xanthate and non-xanthate systems, , *Minerals Engineering* 19 , , sayfa 172-179, 2006
- [64] A.P. Chandra, A.R. Gerson, A review of the fundamentals studies of the copper activation mechanism for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite, , *Advances in Colloid and Interface Science* 145, sayfa 97-110, 2009
- [65] Lynch, A.J., Harbort, G.J., Nelson., M.G.,*History of flotation*, In *Spectrum series*. AusIMM, Carlton, Victoria sayfa 65-91, 2010
- [66] Coleman, R., *Maximise your recoveries in a flash*, In *Output Australia Outotec*, Sayfa 4-7, 2010
- [67] Bourke, P., *Flash flotaation of copper and gold*, In *Output*. Outokumpu, Sayfa 7-11, 2002.

- [68] Newcombe, B., Bradshaw, D., Wightman, E.,. Into the belly of the flash..Insights into mechanism at work within a flash flotation cell, In 11th Mill Operator's Conference, Hobart, Tasmania, Avustralya Sayfa 163-170, 2012
- [69] Outotec, Skimair reduces nickel overgrinding at Leinster Nickel Operation, In Case Study: Mineral processing solutions, 2009
- [70] MacKinnon, S., The interaction of flash flotation with closed circuit grinding, In Minerals Engineering and Extractive Metallurgy. Western Avustralian School of Mines, Kalgoorlie, 2002
- [71] Laplante, A., Dunne, R., The gravity recoverable gold test and flash flotation presentation, In annual meeting of the CMP. McGill University ve Newcrest Mining Limited, Ottawa, 2002
- [72] Newcombe, B., Wightman, E., Bradshaw, D., The role of a flash flotation circuit in an industrial refractory gold concentrator. Minerals Engineering, 53(0), sayfa 57-73, 2013
- [73] Colin S., Steve M., Enhanced Gravity Concentration for Precious Metal Recovery, , Ziyaret tarihi 14.03.2022 <https://minerals.seprosystems.com/wp-content/uploads/2019/09/Enhanced-Gravity-Concentration-for-Precious-Metal-Recovery-Cyclone-Feed-and-Base-Metal-Circuits-1.pdf>,
- [74] P. Lamberg, P.Bourke ve C. Kujawa, Impact of Flash Flotation on Grinding and Main Flotation Circuits – Design by Simulation and Case Studies, Recent Advances in Mineral Processing Design, SME, Sayfa 396-405, 2009
- [75] I. Grewal, M. V. Kleek ve S. McAlister, Gravity Recovery of Gold From within Grinding Circuits, Recent Advances in Mineral Processing Plant Design, SME, , Sayfa 499-506, 2009
- [76] SGS Lakefield, Project Report 13714-001 Au Department Study, 2012
- [77] SGS Lakefield, Project Report 13714-005 Met Report#1, 2018
- [78] Laplante, Andre R. A, Standardized Test to Determine Gravity Recoverable Gold, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, **1994**
- [79] Knelson, Knelson ve Jones, 1994

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Erkan, E., Ekmekçi, Z., Altun, E. (2022). Comparison of flash flotation and gravity separation performance in a greenfield gold project. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 58(3), 146979. <https://doi.org/10.37190/ppmp/146979>

Physicochem. Probl. Miner. Process., 58(3), 2022, 146979

Physicochemical Problems of Mineral Processing

<http://www.journalssystem.com/ppmp>

ISSN 1643-1049

© Wrocław University of Science and Technology

Comparison of flash flotation and gravity separation performance in a greenfield gold project

Emre Erkan ¹, Zafir Ekmekci ², Emre Altun ³

¹ Hacettepe University, Institute of Science, Beytepe, Ankara, Turkey

² Hacettepe University, Department of Mining Engineering, Beytepe, Ankara, Turkey

³ Middle East Technical University, Mining Engineering, Çankaya, Turkey

Corresponding author: emrerkan85@gmail.com (Emre Erkan)

Abstract: Recovery of gold and gold-containing sulfide mineral particles requires multiple-stage recovery processes starting from the grinding circuits to avoid over-grinding of the liberated gold particles. Due to high density, these gold grains tend to follow the hydrocyclone underflow, and a significant amount of metal increases in the circulating load. Therefore, in recent years the grinding circuits have been designed to improve the recovery of free gold/gold-containing particles in the grinding circuit. Gravity separation (centrifugal gravity separators) and flash flotation processes are commonly used for gold recovery in the grinding circuit. This study used a methodology based on modeling-simulation studies to assess various flowsheet configurations involving flash flotation, gravity separation, and the conventional sulfide mineral flotation process. The standard GRG, flash flotation, and rougher kinetic tests were used for the model development of each process. The laboratory tests and simulation studies showed that gold and sulfur recoveries in flash flotation were approximately 7% and 17% higher than that of the gravity separation process. However, the grade of the gravity concentrate was considerably higher. Therefore, one of these unit processes or their combinations can be selected depending on the ore characteristics and the aim of the recovery process. Simulation studies were performed to illustrate the gold recovery performance of various flowsheet configurations. This methodology could be used effectively for flowsheet development, particularly for greenfield projects.

Keywords: gold recovery, flash flotation, gravity separation, modelling, and simulation

1. Introduction

The mining industry widely uses cyanidation and carbon adsorption processes for gold ore. Gravity separation has been utilized in gold plants as the primary recovery mechanism or ahead of other downstream processes such as flotation and cyanidation for decades (Laplante and Gray, 2005). Coarse-free gold and gold associated with complex sulfide minerals tend to complicate the cyanidation process. Besides, coarse free gold may need more residence time for leaching and quickly report to hydrocyclone underflow and can be locked in the mill. Various separation methods are widely used to overcome these problems.

After the 1980s, the development of centrifugal gravity separators boosts the use of gravity separation for gold recovery in the grinding circuits. (Burt, 1999; Das and Sarkar 2018; Falconer, 2003) In the Golden Giant mine in Ontario, 25% of the gold is recovered by gravity ahead of the cyanidation process, and reduced the operation cost in the cyanidation stage (Banisi et al., 1991; Hendriks and Chevalier, 1994)

Nowadays, centrifugal, continuous, or batch gravity concentrators manufactured by Falcon® and Knelson® are used to recover free gold at relatively low capital and operating costs. A centrifugal concentrator can reach 200G and capture high-density particles (Will's, 2006). Hence, a standard test procedure was developed to characterize the gravity recoverable gold (GRG) potential of gold ores and provide design data for equipment sizing (Laplante, 1995). However, the confidence in equipment

DOI: 10.37190/ppmp/146979