

**İNCE ÖĞÜTMENİN KARIŞTIRMALI TANK LİÇİ
ATIĞINDAN ALTIN GERİ KAZANIMI ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATING THE EFFECTS OF FINE GRINDING
ON THE RECOVERY OF GOLD FROM AGITATED
TANK LEACH RESIDUE**

BERİL BIYIKLI

DOÇ. DR. HAKAN DÜNDAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

İNCE ÖĞÜTMENİN KARIŞTIRMALI TANK LIÇİ ATIĞINDAN ALTIN GERİ KAZANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Beril BIYIKLI

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan DÜNDAR

Temmuz 2022, 60 sayfa

Günümüzde giderek azalan cevher tenörleri ve daha ince boylarda saçınan mineral tanelerine bağlı olarak ince öğütme uygulamalarının madencilik endüstrisinde giderek yaygınlaştığı, öğütme boyunun giderek azaldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra altın madenciliği özelinde, cevherin yüzey alanının artırılması suretiyle çözünme kinetiğinin artırılması veya çok ince boylarda kapanım halinde bulunan altın tanelerinin serbest hale getirilerek siyanürle temas etmesinin sağlanması amacıyla çok ince öğütme teknikleri tüm prosesin ekonomikliği açısından bir alternatif olarak yerini almıştır.

Bu tez çalışması kapsamında, hâlihazırda işletilen bir altın madeni tesis atığının farklı tane boylarına öğütülmesi sonrası siyanür ile liç edilerek Au çözünme verimindeki değişim gözlemlenmiştir. Mevcut tesis koşullarında $P_{80} \sim 75$ mikrona öğütülen cevherden ortalama %87 verim ile altın kazanılmakta ve ortaya çıkan atık detox sonrası atık barajına gönderilmektedir. Çalışma kapsamında, atığa giden akıştan alınan atık numunesi $P_{80} = 38$ μm , 31 μm , 21 μm , 13 μm ve 6 μm olacak şekilde karıştırmalı değirmende öğütülmüş ve farklı sürelerde siyanür liçi testlerine tabi tutulmuştur. Atık numunesinin liç kinetiğindeki farklılığı gözlemlenmek adına, aynı zamanda, aynı madenden temin edilen yüksek ve düşük tenörlü tüvenan cevherlere de benzer incelik değerlerinde siyanür liçi testleri yapılmıştır.

Laboratuvar ölçekte gerçekleştirilen şişe çevirme testleri sırasında 2, 4, 8, 24 ve 48 saatlik süreler için Au çözünme verimi hesaplanmış ve kimyasal (NaCN ve CaOH₂) tüketimleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, tane boyu incelidikçe atık numunesinden altın kazanımının belirgin bir şekilde yükseldiği, 75 mikron boyunda 24 saatlik liç süresi sonunda %12,1 olan Au çözünme veriminin 6 mikron boyunda %85,4'e yükseldiği, 48 saat sonunda ise bu değer %91,5'e ulaştığı görülmüştür. Yüksek ve düşük tenörlü tüvenan cevhere kıyasla atık numunesinin tane boyuna bağlı Au çözünme verimindeki artış hızı daha fazla olmuştur.

İnce öğütme uygulamasıyla altın madeni atığından altın kazanımının mümkün olduğu, bu sayede ortalama %87 olan mevcut tesis veriminin atığın yeniden işlenmesi ile %98'lere kadar çıkabileceği laboratuvar testleri sonucunda belirlenmiştir. Ancak yürütülen çalışma kapsamında herhangi bir maliyet analizi yapılmamış olup ilave öğütme ve liç maliyetinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: ince öğütme, altın liçi, atık, altın çözünme verimi, karıştırma değirmen

ABSTRACT

INVESTIGATING THE EFFECTS OF FINE GRINDING ON THE RECOVERY OF GOLD FROM AGITATED TANK LEACH RESIDUE

Beril BIYIKLI

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Hakan DÜNDAR

June 2022, 60 pages

Today, it is seen that fine grinding applications are becoming increasingly common in the mining industry due to the decreasing ore grades and the finely disseminated mineral grains in the ore, and the grinding size is gradually reduced. In addition, ultrafine grinding techniques have been used as an alternative for the economy of the gold process in order to increase the dissolution kinetics by increasing the surface area of the ore or to expose the gold particles in ultra fine size inclusions and bring them into contact with cyanide.

Within the scope of this thesis, the change in Au recovery after cyanide leaching was observed for a gold mine tailing ground in different particle sizes. Under the current plant conditions, gold is recovered at an average of 87% from the ore which is ground to $P_{80} \sim 75$ microns and the tailing is sent to the tailings dam after detox unit. The tailing taken from the detox unit was ground in a stirred mill in order to achieve $P_{80} = 38 \mu\text{m}$, $31 \mu\text{m}$, $21 \mu\text{m}$, $13 \mu\text{m}$ and $6 \mu\text{m}$, and cyanide leaching tests were carried out for different time intervals. In order to observe the difference in the leaching kinetics of the tailing, cyanide leaching tests with similar particle sizes were also carried out on high and low Au grade run-of-mine ores obtained from the same gold mine.

During the bottle roll tests carried out at laboratory scale, Au recoveries were calculated for 2, 4, 8, 24, 48 hours, and chemical consumptions were also recorded. When the results were evaluated, it was observed that the Au recovery, which was 12,1% at the end of the 24-hour leaching period for 75 μm size, increased to 85,4% at 6 μm size, and this value reached up to 91% at the end of 48 hours. Compared to the high and low grade ROM ore, the rate of increase in the Au recovery of the tailing was relatively higher depending on the grind size.

According to the laboratory scale tests, it was observed that fine grinding of tailing increases total Au recovery up to 98%, roughly from current 87% Au recovery in the plant. However, there is no cost analysis conducted during the study. Therefore, feasibility analysis of the additional grinding and leaching circuit should also be considered.

Keywords: fine grinding, gold leaching, tailing, gold recovery, stirred mill

TEŞEKKÜR

Tüm yüksek lisans eğitimim süresince beni her konuda destekleyen ve yardımcı olan, sevgili hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Hakan DÜNDAR'a gönülden teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında, teorik ve pratik yardımda bulunan bölüm yöneticim Sercan SEVGÜL'e, mesai arkadaşım Mustafa Kadir GÜNER'e, tüm Koza Altın İşletmeleri Metalurji Laboratuvarı ve Kimya Laboratuvarı çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim. Tezimdeki minerolojik analiz çalışmaları için bana büyük imkân sağlayan Emre ERKAN'a ve tezimin yazım aşamasındaki yardımları için de kuzenim Emine ÇINAR'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Son olarak, tüm bu süreç boyunca yanımda olup bana fiziksel ve psikolojik olarak her türlü desteği sağlayan başta ablam Burçin DİNÇER olmak üzere tüm aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1. Altın Cevheri	2
2.1.1. Altının Fiziksel Özellikleri	2
2.1.2. Altının Kimyasal Özellikleri	3
2.1.3. Altının İşlenilebilirliği	3
2.2. Siyanürle Altın Kazanımı	5
2.2.1. Çözünme Tepkimeleri	8
2.2.2. Tepkime Kinetikleri	9
2.2.2.1. Siyanür ve Çözünmüş Oksijen Değişimi	10
2.2.2.2. Sıcaklık	11
2.2.2.3. pH	12
2.2.2.4. Yüzey Alanı	13
2.2.3. Liç Metotları	13
2.2.3.1. Yığın (Heap) Liçi	14
2.2.3.2. Yoğun (Intensive) Liç	15
2.2.3.3. Tekne (Vat) Liçi	15
2.2.3.4. Yerinde (In-Situ) Liç	15
2.2.3.5. Karıştırmalı Liç	16
2.2.4. Karıştırmalı Liç Yönteminde CIP/CIL Yöntemi ile Altının Geri Kazanımı	19
2.3. Boyut Küçültme ve Serbestleşme	21
2.3.1. Karıştırmalı Değirmenler	24

2.3.1.1. Öğütme Parametleri.....	25
2.4. İnce ve Ultra İnce Öğütmenin Liç Verimine Etkileri	28
2.5. Mekanik Aktivasyon.....	32
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	34
3.1. Malzeme ve Karakterizasyon	34
3.2. Öğütme Testleri.....	40
3.3. Siyanür Liçi Deneyleri	44
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	47
5. YORUM.....	53
6. KAYNAKLAR	55
EKLER	61
EK 1 – Tezden Türetilmiş Bildiriler.....	61
EK 2 - Şişe Çevirme Test Veri Tablosu ve Hesaplama.....	62
EK 3 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu.....	64
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Altın Cevherinin Sınıflandırılması	3
Şekil 2.2. pH'a Bağlı Olarak Sulu Çözelti İçinde Siyanür ve Hidrojen Siyanürün Türleşmesi	7
Şekil 2.3. Altının Siyanür ve Oksijen ile Gerçekleştirdiği Tepkime Şeması.....	8
Şekil 2.4. Siyanür Konsantrasyonunun Altın ve Gümüş Çözünürlüğündeki Etkileri	10
Şekil 2.5. Sıcaklığın % 0.25'lik KCN Çözeltisindeki Altının Çözünme Hızına Etkisi ..	11
Şekil 2.6. Sıcaklığın Altın Çözünme Verimi Üzerindeki Etkisi	12
Şekil 2.7. Oksijen Derişimi ve Karıştırma Hızının Altının Çözünmesine Etkisi.....	18
Şekil 2.8. Altın Çözünmesindeki Artışın Şematik Gösterimi	19
Şekil 2.9. Boyut Küçültme Mekanizmaları	23
Şekil 2.10. Farklı Karıştırıcılı ve Öğütme Hazneli Yatay Değirmenlerin Geometrisi ...	26
Şekil 2.11. Arsenopiritli ve Piritli Cevherdeki Altın Geri Kazanımı	29
Şekil 2.12. Öğütülmüş Cevherlerin Altın Kazanımları	30
Şekil 2.13. Au Verimi ve NaCN Tüketimi	31
Şekil 2.14. Tane Boyuna Bağlı Ag Verimi	32
Şekil 3.1. Kaymaz Altın Madeni Tesis Akım Şeması	35
Şekil 3.2. Fe-Ox Grubun İçinde Yer Alan Götüt Minerali	38
Şekil 3.3. Piritlerin Genel Görünümü	38
Şekil 3.4. SEM-EDS Analizi.....	38
Şekil 3.5. Atık Numunesi Tane Boyu Dağılım Grafiği	39
Şekil 3.6. Yüksek Tenörlü Cevher Numunesi Tane Boyu Dağılım Grafiği.....	39
Şekil 3.7. Düşük Tenörlü Cevher Numunesi Tane Boyu Dağılım Grafiği.....	40
Şekil 3.8. NETZSCH Laboratuvar Tipi Karıştırmalı Dik Değirmen	41
Şekil 3.9. Zirkon Bilyalar	41
Şekil 3.10. Öğütme Süresine Bağlı d_{80} Grafiği	42
Şekil 3.11. Malvern Master Sizer 2000	43
Şekil 3.12. Öğütmeler Sonucu Atık Tane Boyu Dağılım Grafiği	43
Şekil 3.13. Öğütmeler Sonucu Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Tane Boyu Dağılım Grafiği	44
Şekil 3.14. Öğütmeler Sonucu Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Tane Boyu Dağılım Grafiği	44
Şekil 3.15. Şişe Çevirme Test Düzenneği	45

Şekil 4.1. Atık Au Çözünme Grafiği.....	48
Şekil 4.2. Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Grafiği	48
Şekil 4.3. Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Grafiği	49
Şekil 4.4. Atık Ag Çözünme Grafiği.....	50
Şekil 4.5. Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Ag Çözünme Grafiği	50
Şekil 4.6. Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Ag Çözünme Grafiği	51
Şekil 4.7. Atık NaCN ve Ca(OH) ₂ Tüketimleri	51
Şekil 4.8. Düşük Tenörlü Tüvenan NaCN ve Ca(OH) ₂ Tüketimleri	52
Şekil 4.9. Yüksek Tenörlü Tüvenan NaCN ve Ca(OH) ₂ Tüketimleri	52
Şekil 5.1. Atıktan Altın Kazanımına İlişkin Akım Şeması.....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Cevher Refrakterliğinin Sınıflandırılması	5
Çizelge 3.1. Temmuz 2020 Aylık Bond Test Sonuçları.....	36
Çizelge 3.2. Numunelerin Kimyasal Analizi	36
Çizelge 3.3. Atık Numunesi Tane Boyuna Bağlı Au Dağılımı.....	40
Çizelge 3.4. Şişe Çevirme Test Koşulları	45
Çizelge 4.1. Atık Au Çözünme Verimleri (%).....	47
Çizelge 4.2. Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Verimleri (%).....	47
Çizelge 4.3. Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Verimleri (%)	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μm	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Derece (Celcius)

Kısaltmalar

ppm	Milyonda Bir Birim
CIP	Pülpde Karbonlu Zenginleştime
CIL	Liçte Karbonlu Zenginleştirme
KCGM	Kalgoorlie Consolidated Gold Mines
MTA	Maden Tetkik ve Arama
HCN	Hidrojen Siyanür
KCN	Potasyum Siyanür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı

1. GİRİŞ

Altın doğada, nabit veya esas olarak gümüş, bakır ya da platin grubu metalleri içeren çeşitli alaşımların ana bileşeni olarak bulunur. Tüm sıcaklıklarda, dövülebilirlik ve bükülebilirlik açısından diğer metallere göre en elverişli metaldir. Isı ve elektrik iletkenliği açısından da oldukça kullanışlıdır [1].

Altın, havada ve güçlü asitler dahil, sulu çözeltilerin çoğunda, oldukça kararlıdır. Altın yalnızca belirli kompleks yapıcı ajanlar, örneğin siyanür, halojenürler, tiyosülfat, tiyoüre ve tiyosiyandır içeren oksitleyici çözeltilerde çözünür. Bu davranış, altının diğer cevherlerden çok seçici bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar [2].

Altının üretim tekniğinin belirlenmesi, altının mineralojik özelliklerine, altın kaynağının yapısal özelliklerine ve altın tanelerinin cevher içerisindeki dağılımına göre değişmektedir.

Dünyada altının üretimi için başlıca siyanürleme, gravite ile ayırma ve flotasyon gibi zenginleştirme teknikleri kullanılmaktadır. İri taneli altın içeren cevherler için gravite ile ayırma, amalgasyon ve aglomerasyon gibi teknikler kullanılırken bu tekniklere ya da direkt siyanür liğine tabi tutulamayan ince taneli ve düşük tenörlü cevherler için flotasyon veya ultra ince öğütme teknikleri uygulanmaktadır [3].

Bu tez çalışmasında, karıştırılmalı tank liçi yöntemi ile üretim yapan bir altın madeni liçi atığından, altının, ince öğütme teknikleri uygulanarak geri kazanımı amaçlanmıştır. Öğütme ve liçi koşullarının belirlenmesini takiben, atık numunesi farklı inceliklere öğütülerek laboratuvar ölçekli siyanür liçi testlerine (şişe çevirme) tabi tutulmuştur. Tüm bu işlemler aynı maden sahasından temin edilen yüksek ve düşük tenörlü cevherler için de uygulanmıştır. Bu sayede hem atık için tane boyuna bağlı verim değişimleri incelenmiş hem de farklı cevherler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, altının özellikleri ile birlikte kazanım yöntemlerine ilişkin detaylı literatür bilgileri yer almaktadır.

2.1. Altın Cevheri

Altının mineralojisi;

- Altının oluşum şekli
- Altının tane boyu dağılımı
- Altın içeren mineral ve gang mineralin çeşidi
- Altın içeren mineral ve gang mineralin tane boyu dağılımı
- Mineral birlikteliği
- Mineral başkalaşımı

gibi çeşitliliklerden dolayı özeldir [4].

Tüm bu parametrelerden bir ya da birden fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan çeşitlilik, zenginleştirme tekniğinin belirlenmesinde ve buna bağlı olarak altın cevherinin ekonomik değerinin ortaya koyulmasında önemli rol oynamaktadır [4]. Altın üretimine geçilmeden önce ilgili bütün parametrelerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.1.1. Altının Fiziksel Özellikleri

Altın, tüm metaller arasında en kolay işlenebilirliğe sahip yumuşak, parlak sarı renkte bir metaldir. Altın kristalleri kübik yapıda ve çok nadirdir. Altının elektriksel ve ısı iletkenliği oldukça yüksektir. Saf altın ve farklı altın alaşımları genellikle manyetik değildir. Altının manganez ile yapmış olduğu alaşım biraz manyetik iken demir, nikel ve kobaltla yapmış olduğu alaşımlar ferromanyetiktir.

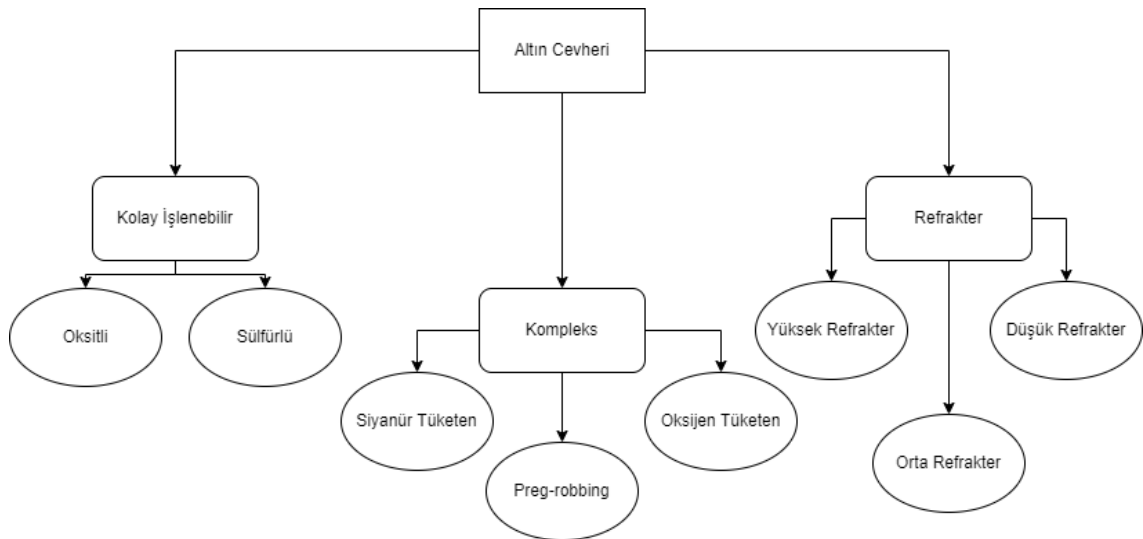
Altın, bir dizi metalle alaşım oluşturur. Civa bunlardan biri olup altın parçacıkları ile amalgam oluşturur. Altın çıkarma işlemlerinde, altını, öğütülmüş cevherlerden seçimli olarak almak için kullanılır. Altın, civa içinde çok küçük bir çözünürlüğe (%0,13) sahiptir. Civa, yaklaşık %16 Hg'ye kadar altınla katı bir çözelti oluşturur. Daha büyük civa içerikleri, Au₃Hg ve Au₂Hg gibi intermetalik bileşikler oluşturur. Erimiş kurşun ise altını çözmekte çok etkili olup bu özellik ateş analizi (fire assay) ve bazı ikincil eritme işlemlerinde kullanılmaktadır [5].

2.1.2. Altının Kimyasal Özellikleri

Altın, bakır ve gümüş ile periyodik cetvelin 1B grubunda sınıflandırılır. Bu metallerin elektronik yapı ve iyonlaşma potansiyelindeki benzerliğine rağmen, redoks kimyasında birçok önemli fark vardır. Altının kimyasının ve bileşiklerinin çoğu, özellikle sulu çözeltideki davranışı, nispeten yüksek elektronegatifliği, yani bağ elektronlarını çekme eğilimiyle ilişkili olabilir. Altın bileşikleri ve çözelti türleri neredeyse yalnızca Au(I) ve Au(III) oksidasyon durumlarında bulunur [2,4].

2.1.3. Altının İşlenebilirliği

Altın cevheri, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi genellikle “kolay işlenebilir (zenginleşen)”, “refrakter ve “kompleks” olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Altın Cevherinin Sınıflandırılması

Kolay zenginleşen cevherler $d_{80} < 75 \mu\text{m}$ tane boyuna öğütülerek 20-30 saatlik standart siyanür liğine tabi tutulduklarında %90 ve üzerinde bir verim ile altın kazanım imkanı sunabilmektedir. Kolay zenginleşen cevherlere aynı zamanda refrakter olmayan cevherler ismi de verilmiştir. Bu cevherler, sülfürlü ve oksitli cevher çeşitlerinde gözlemlenebilmektedir. Oksidasyon ve diğer hidrotermal başkalaşım süreçleri kaya yapısının bozulmasına yol açarak geçirgenliğin artmasına neden olur. Bu nedenle oksitli cevherler tane boyu çok büyük olsa bile yığın liçi yöntemi ile yüksek liç verimi elde edilmesine izin verir. Sülfürlü yapılar ise aşırı ince boylarda altın bulundurabilmektedir. Bu tip cevherlerde de uygun tane boyuna öğütmenin ardından altının serbestleşmesi ile direkt siyanür liçiyle yüksek liç verimi elde edilebilir [6,7,8].

Yüksek siyanür ve oksijen takviyesi ile ekonomik olarak kazanılabilen cevherlere kompleks cevherler denir [6]. Ayrıca preg-robbing olayına sebep olan cevherler de kompleks cevher olarak değerlendirilir. Preg-robbing, altın siyanür kompleksinin cevher bileşenleri tarafından çözüldükten uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Preg-robbing'e sebep olan cevherlerin ana özelliği karbonlu ve/veya killi bileşenler içermeleridir [9]. Söz konusu karbonlu ve killi bileşenler siyanür sayesinde çözültüye geçen altının, verim kaybına neden olur [10]. Bu durum kadar sık rastlanmasa da sülfürlü mineraller düşük siyanür derişimindeki liç işlemlerinde preg-robbing olayına sebep olabilmektedir. Fakat bu durum siyanür ve çözülmüş oksijen derişiminin artırılması ile çözülebilmektedir [6, 11].

Direkt siyanür liçi ile ekonomik olarak kazanılamayan cevherlere refrakter cevher denilmektedir [6].

Cevherler, üç temel nedenden ötürü geleneksel siyanürlemeye yanıt veremeyebilir.

- Yüksek derecede refrakter cevherlerde altın, kapanım halde bulunduğundan dolayı liç reaktifleri ona ulaşamaz.
- Kompleks cevherlerde, cevherdeki reaktif mineraller yan tepkimelerde liç reaktiflerini tüketebilir. Bu nedenle pülpte kalan oksijen ve/veya siyanür altını çözmek için yetersiz kalabilir.

- Cevherin bileşenleri, çözülmüş altın siyanür kompleksini adsorbe edebilir (preg-robbing).

Cevher mineralojisi, refrakterlik derecesini belirlemekte ve Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir [6].

Çizelge 2.1. Cevher Refrakterliğinin Sınıflandırılması

<i>% Verim</i>	<i>Refrakterlik Derecesi</i>
<i><%50 kazanım</i>	Yüksek Derecede Refrakter
<i>%50-80 kazanım</i>	Orta Derecede Refrakter
<i>%80-90 kazanım</i>	Düşük Derecede Refrakter
<i>%90-100 kazanım</i>	Refrakter Olmayan (Kolay İşlenebilir)

2.2. Siyanürle Altın Kazanımı

Altın ve gümüş gibi değerli metallerin kazanımı diğer madencilik yöntemleri ile benzerlik göstermekle birlikte, “siyanür” kullanımı ile özel bir nitelik kazanmıştır. Altının siyanür çözeltilerindeki çözünürlüğü, ilk defa 1783’te Scheele (İsveç) tarafından bulunmuş ve 1840’larda ve 50’lerde Elkington ve Bagration (Rusya), Elsner (Almanya) ve Faraday (İngiltere) tarafından incelenmiştir [12,13].

Değerli metal iyonlarının veya karışımlarının sulu çözeltilerden aktif karbona adsorpsiyonu ise, 19. yüzyılın başlarında ilk kez gerçekleştirilmiştir. 1890’larda aktif karbon, çinko ile çöktürme olası bir alternatif olarak kabul edilmiştir. Aktif karbon ticari olarak ilk kez 1952’de kullanılmıştır. Etkili karbon rejenerasyonu karbon adsorpsiyon yöntemlerini Merrill Crowe süreciyle (çinko sementasyonu) daha rekabetçi bir hale getirmiş ve 1980’lerde pülpte karbon yönteminin (CIP) yaygınlaşmasının öncüsü olmuştur. 1970’lerde yeni teknoloji alanında birçok iyi araştırma, geliştirme ve endüstriyel uygulama meydana gelmesine rağmen, 1980’lerde altın kazanımında siyanürlemenin gelişmesi diğer dönemlerden daha hızlı olmuştur. İlk altın tesislerinin

akım şeması tipik olarak eleme, kırma, atık kayanın elle ayrıştırılması, öğütme, siyanür liçi, katı-sıvı ayırma ve çinko ile altın çökeltisinin kazanılmasını içermekteydi [14].

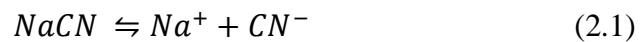
Günümüzde, endüstri tarafından kabul edilen başlıca zenginleştirme yöntemleri,

- Pülpte karbonlu zenginleştirme (CIP)
- Liçte karbonlu zenginleştirme (CIL)
- Düşük tenörlü cevherlere uygulanan yığın liçi,
- Sülfürlü cevherlerin basınçlı oksidasyonu,
- Biyolojik oksidasyon,
- Yoğun siyanürleme

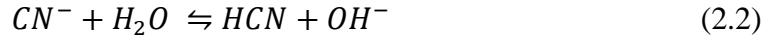
gibi yöntemlerdir [15].

Liç işlemi, temel olarak bir metalin veya mineralin uygun bir çözelti içerisinde çözünmesi olarak tanımlanır. Altının liç işlemi ile eldesi için uygun bir çözücü ve oksitleyici gerekmektedir. Siyanür, özellikle, diğer metallerle göre altın seçiciliği, diğer liç kimyasallarına göre nispeten düşük maliyeti ve tepkime verimi sayesinde başlıca liç kimyasalı olarak kullanılmaktadır. Gerekli önlemler alındığında yüksek zehirliliğine rağmen çevre ve sağlık açısından düşük risk ile uygulanabilmektedir. Siyanür liçinin gerçekleşmesi için gerekli olan oksitleyici havadaki çözünmüş oksijenden de sağlanabildiği için bu işlem hem pratik hem ekonomik anlamda en yaygın olan liç yöntemidir.

Sodyum, potasyum ve kalsiyum siyanür gibi basit siyanür tuzları, Eşitlik 2.1'de gösterildiği gibi ilgili metal katyonlarını ve serbest siyanür iyonlarını oluşturmak için suda çözünür.



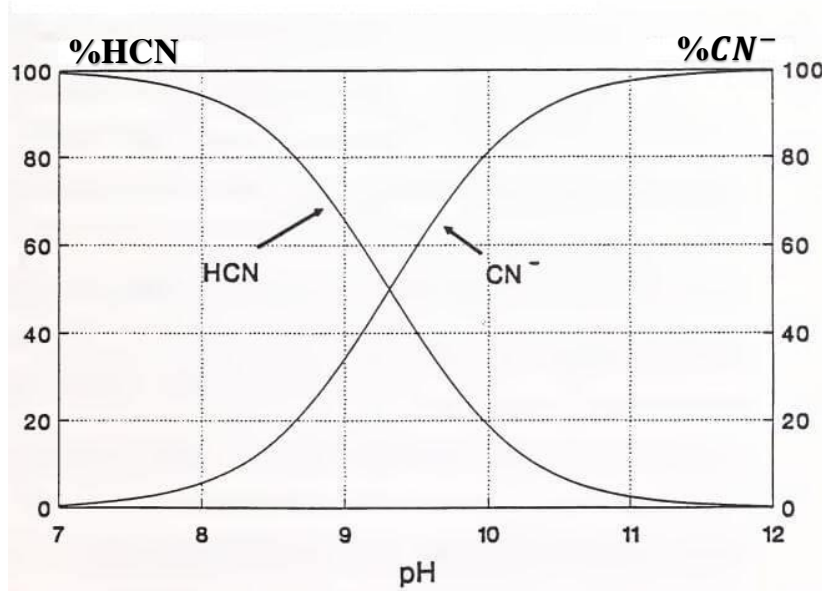
Siyanür iyonları suda hidrolize olarak hidrojen siyanür (HCN) ve hidroksil (OH^-) iyonlarını oluşturur. Buna karşılık gelen pH artışı da Eşitlik 2.2'deki gibi gerçekleşir;



Hidrojen siyanür, suda Eşitlik 2.3'te gösterildiği gibi ayrışan zayıf bir asittir;



Şekil 2.2'de pH'a bağlı olarak sulu çözelti içerisindeki siyanür ve hidrojen siyanür oluşumu verilmektedir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, pH yaklaşık 9,3'te, toplam siyanürün yarısı hidrojen siyanür ve yarısı da serbest siyanür iyonları olarak bulunur. pH 10,2'de, toplam siyanürün <% 90'ı serbest siyanür olarak bulunurken, pH 8,4'te <% 90'ı hidrojen siyanür olarak bulunur. Bunun önemi, hidrojen siyanür gazının nispeten yüksek bir buhar basıncına sahip olması ve sonuç olarak uygun ortam koşulları altında sıvı yüzeyde kolayca uçucu hale gelerek çözülden siyanür kaybına neden olmasıdır [16].

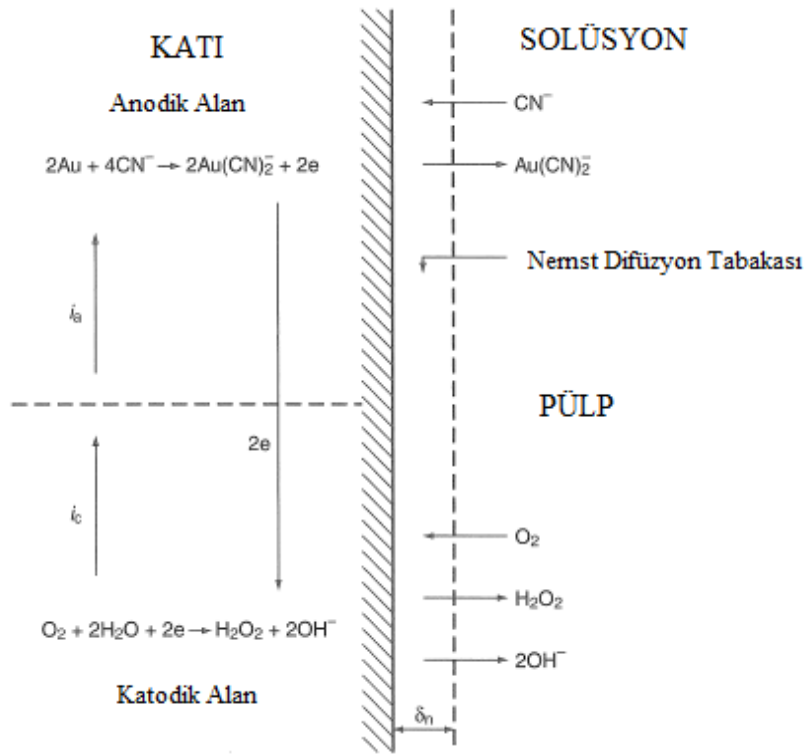


Şekil 2.2. pH'a Bağlı Olarak Sulu Çözelti İçinde Siyanür ve Hidrojen Siyanürün Türleşmesi

Ayrıca hidrojen siyanür, özellikle solunum yolları ile maruz kalındığında öldürücü düzeyde zehirli bir gazdır dolayısıyla siyanür liçi işleminde iş, işçi sağlığı ve güvenliği açısından gerekli önlemlerin alınması ciddi bir önem taşımaktadır.

2.2.1. Çözünme Tepkimeleri

Altın ve gümüşün siyanür ve oksijen ile tepkime şeması Şekil 2.3'te gösterildiği gibidir [17].

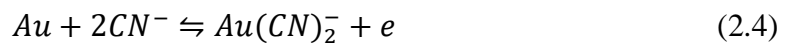


Şekil 2.3. Altının Siyanür ve Oksijen ile Gerçekleştirdiği Tepkime Şeması

Anodik Tepkime

Sulu, alkali siyanür çözeltisinde altın oksitlenmekte ve Au(I) siyanür kompleksini oluşturmak için çözülme tepkimesi gerçekleşmektedir [18].

Bu çözünme tepkimesi genel olarak Eşitlik 2.4'teki gibi gerçekleşir;



Katodik Tepkime

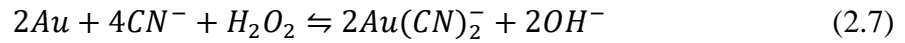
Havalandırılmış, alkali siyanür çözeltilerinde anodik çözünme tepkimesine, katodik oksijen azalması eşlik eder. Bu tepkimenin mekanizması birkaç paralel ve seri katodik tepkime içerir [19].

Bu katodik tepkime genel olarak Eşitlik 2.5'teki gibi gerçekleşir;

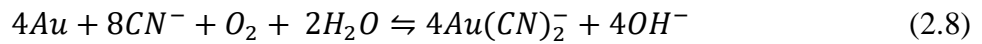


Genel Çözünme Tepkimesi

Altının havalandırılmış, alkali siyanür çözeltilerindeki toplam çözünmesi hem anodik hem de katodik yarı tepkimeler dikkate alınarak, paralel olarak ilerleyen Eşitlik 2.6 ve 2.7'deki tepkime ile açıklanmaktadır;



Elsner tarafından önerilen Eşitlik 2.8, stokiyometrik olarak doğru olup ve çözünmeyle ilişkili katodik tepkimelerin temelini oluşturur [20];



2.2.2. Tepkime Kinetikleri

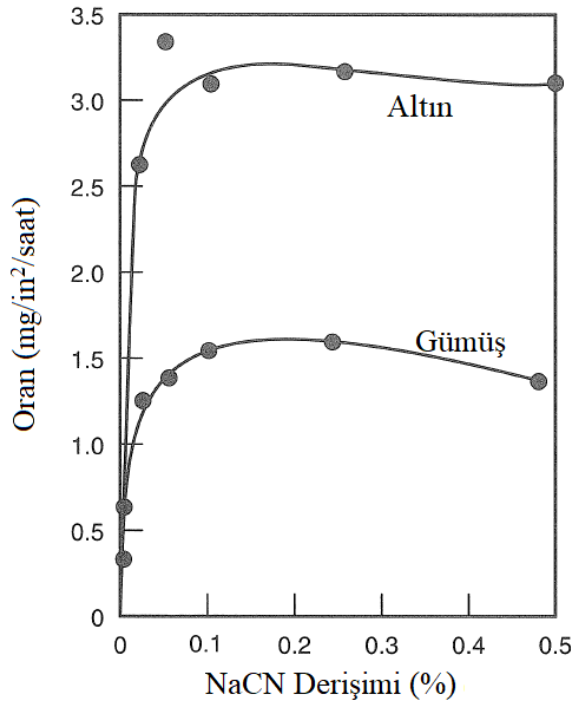
Altının çözünme oranını ve hızını belirleyen başlıca faktörler, siyanür ve oksijen derişimi, sıcaklık, pH ve altının yüzey alanıdır. Bunlara ek olarak, karıştırma şiddeti, kütle transferi, çözelti içerisindeki diğer iyonların varlığı ve davranışları gibi faktörler de mevcuttur.

2.2.2.1. Siyanür ve Çözünmüş Oksijen Derişimi

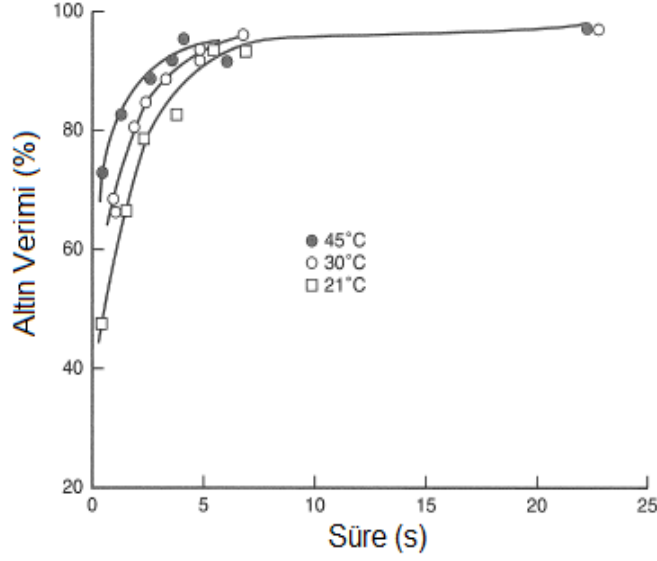
Genel altın çözülme tepkimesi göz önüne alındığında, bir mol altının çözünmesi için yarım mol oksijen ve iki mol siyanüre ihtiyaç duyulmaktadır.

Tepkimedeki çözünmüş oksijen kontrolünün sağlanması, atmosferik koşullar altında oksijenin sudaki çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle görece kolay değildir fakat siyanür derişiminin kontrolü, yoğunlaştırılmış bir siyanür çözeltisi ya da katı bir siyanür bileşği ilavesi ile kolayca sağlanabilir. Dolayısıyla, çözelti içinde oksijen sağlamak için hava kullanılan işlemlerde maksimum altın çözünme hızı, işlemin çalıştığı sıcaklık ve basınç gibi koşullar tarafından belirlenir.

Siyanür konsantresinin, altın ve gümüş çözünmesi üzerindeki etkileri Şekil 2.4'te verilmektedir [21].



Şekil 2.4. Siyanür Konsantresinin Altın ve Gümüş Çözünürlüğündeki Etkileri



Şekil 2.6. Sıcaklığın Altın Çözünme Verimi Üzerindeki Etkisi

Sıcaklık artışı maliyet artışına da neden olacağı için, özellikle düşük tenörlü cevherlerde genellikle ortam sıcaklığı yeterli kabul edilmektedir [4].

2.2.2.3. pH

Altın liçi sırasında ortaya çıkan siyanür bileşiklerinin pH değişimi ile ilişkisi Logsdon ve ark. (1999) tarafından incelenmiş olup HCN ve CN^- derişimlerinin sulu siyanür çözeltisinin pH'sına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. HCN gazının çıkışını engellemek için siyanür çözeltisinin bazik halde tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. Şekil 2.2'de de gösterildiği gibi ortam asidikleştikçe HCN miktarı artarken CN^- iyonlarının miktarı azalmaktadır. Fakat ortam pH'sı artmaya başladıkça HCN miktarı azalırken CN^- iyonlarının miktarı artmaktadır. Böylelikle, hem siyanürün gaz formundaki zehirli etkisi ortadan kalkmış olmakta hem de liç veriminde bir artış olmaktadır. Logsdon ve arkadaşları liç işleminde siyanür kaybının önüne geçilebilmesi için en düşük pH değerinin 10 olması gerektiğini belirtmişlerdir [26].

pH'nın altın çözünme hızı üzerindeki etkisi, diğer çözelti türlerinin ve cevher bileşenlerinin varlığına ve ayrıca pH ayarlaması için kullanılan alkali türüne bağlıdır.

2.2.2.4. Yüzey Alanı

Sulu çözelti içinde katı bir yüzeydeki tepkime hızı, tepkimeye giren türlerin yüzey alanıyla orantılıdır. Parçacık boyutu ve şekli, bir mineral parçacığının yüzey alanını etkileyen ana faktörlerdir. Maruz kalan yüzey alanı, besleme malzemesinin tane boyu, dağılımı ve serbestleşme özellikleriyle doğrudan ilgili olup liç öncesi öğütme işlemlerinin verimliliğinden etkilenir. Verimlilik genellikle, altın serbestleşmesindeki ve/veya altın parçacıklarının yüzey alanındaki artışa bağlı olarak azalan tane boyu ile artmaktadır [4].

Tane boyu küçültme işlemleri kırma ve öğütmeden oluşmaktadır. Kırma, ham cevheri son ürüne dönüştüren tüm yöntemlerin ilk aşamasıdır [27]. Öğütme ise boyut küçültme prosesinin son aşamasıdır. Öğütme sonunda elde edilecek tane boyu sınırı teknik ve ekonomik duruma göre tayin edilmektedir [28].

2.2.3. Liç Metotları

Altın içerikli malzemelerin işlenmesi için birden fazla siyanür liç metodu mevcuttur. Bu metotlardan ticari önem taşıyan birkaçı aşağıdaki gibidir;

- Yığın Liç
- Yoğun Liç
- Tekne Liç
- Yerinde (In-situ) Liç
- Karıştırmalı Liç

Altının zenginleştirilmesi için kullanılan uygun metodun belirlenmesinde, tane boyu ve dağılımı, maliyetler ve altın kazanım oranı en önemli parametrelerdir.

Kolay işlenebilir cevherlerin kimyasal kazanımında, altının siyanürle temasını arttırmak için genellikle kırma ve öğütme yöntemleri kullanılır. Liç verimi ve nihai altın kazanımı, öğütme inceliğine göre bir dereceye kadar değişiklik gösterir. Düşük tenörlü cevherlerin ekonomik nedenlerden ötürü yığın liç ile işlenmesi daha olasıdır. Kolay işlenebilir

cevherler için ana işleme yolu, CIP (pülpte karbonlu zenginleştirme) / CIL (liçte karbonlu zenginleştirme) ile altın geri kazanımı ile karıştırmalı siyanür liçidir [29,30].

2.2.3.1. Yığın Liçi

Yığın liçi, yüksek öğütme maliyeti olmayan bir liç metodu olduğu için genellikle düşük tenörlü cevherler için tercih edilmektedir. Cevher ocaktan geldiği tane boyunda ya da düşük maliyetli kırma işlemi ardından işlenebilir hale gelmektedir [31].

Yığın liçi uygulaması, kırılmış cevherin geçirimsiz bir yüzeye yerleştirilip yığın haline getirildikten sonra siyanürlü liç çözeltisi ile beslenerek gerçekleştirilir. Bu noktada tanelerin oluşturduğu yığının gözenekliliği kritik öneme sahiptir. Eğer cevherin gözenekliliği yüksek ise kırma işlemi uygulanmayabilir. Ancak genelde 10 cm altına kırma işlemi uygulanır [32, 33]. Üst üste oluşturulmuş yığınlar, yığının yüksekliğine bağlı olarak yüksek basınçta sebep olmaktadır. Yüksek basınç, yığının alt kısımlarındaki tanelerin sıkışmasına sebep olup süzülen çözeltinin yığını terk etmesini zorlaştırır. Yüksekliğe bağlı olarak yığında oluşacak göllenme altın kazanımı önemli ölçüde etkiler. Bu yüzden yığının süzülme özellikleri son derece önemlidir.

Yığın liçi, cevherin tane boyu, içeriği, mineralojisi ve yığındaki kütlesine göre 30 ila 150 gün (genelde 30-60 gün) boyunca siyanürlü çözeltinin yığının üzerinden beslenmesi yoluyla devir daim ettirilir. Genel olarak, yığın liçi tekniği ile altının kazanımı yüzde 60 ila 80 arasındadır [34]. İri taneli cevherler için verim %40'a kadar düşebilmektedir [33].

Yığın liçi işlemi genellikle, sadece altın yüklü liç çözeltisini değil, aynı zamanda liç yatağının altındaki ve çevresindeki yer altı suyunu da koruyan astarlı pedlerde gerçekleştirilir. Bazı nadir durumlarda, uygun düzenleyici onayı ile birlikte konumun belirli topografyası ve jeolojisi nedeniyle astarlı pedler gerekli olmayabilir. Günümüzde çeşitli etkili astarlı liç pedi sistemleri geliştirilmiştir [35, 36].

2.2.3.2. Yoğun (Intensive) Liç

Yüksek derişimde reaktif (siyanür, çözünmüş oksijen vb.) kullanılan liç işlemlerine yoğun liç adı verilir. Reaktif derişimlerindeki artışın altının çözünme oranını artırması beklenmektedir. Bunun yanı sıra yüksek basınç ve yüksek sıcaklığın da kullanıldığı durumlar vardır. Reaktif tüketiminin artışı ve ortam koşullarının uygunlaştırılması yüksek maliyetlere sebep olduğu için bu yöntem genellikle yüksek tenörlü malzemeler için kullanılır.

Yoğun siyanürlemenin, flotasyon konsantrelerine uygulanan oksidasyon ve siyanür liçi gibi diğer proseslere göre kullanımının çeşitli avantajları mevcuttur. Bu avantajlar arasında daha hızlı altın çözünmesi, düşük güvenlik riski ve sağlık tehlikesi bulunur [37]. Öte yandan, tüm siyanürde çözünebilen mineraller için çözünme oranı artarken siyanür ve diğer reaktif tüketimleri de karıştırmalı liç gibi yöntemlere kıyasla daha yüksektir [38]. Yoğun liç işlemi ile yüksek altın ve gümüş çözünme verimi beklenmektedir. Bu verim genel olarak %97'nin üzerinde olurken bazen %99'a kadar yükselebilmektedir. Liç süresi için ise genellikle 24 saat veya daha azı yeterli kabul edilmektedir [4].

2.2.3.3. Tekne (Vat) Liçi

Tekne liçi işlemi genellikle büyük ahşap veya beton yapılarda (tekne) veya çelik tanklarda gerçekleştirilir. Aynı zamanda yığın liçi benzeri bir uygulamayla da gerçekleştirilebilir. Tüm durumlarda cevher siyanürlü çözeltiliye tamamen maruz bırakılır. Yığın liçine göre çok az bir verim yüksekliği olmasına rağmen, özellikle tekne inşası ve bakımı için çıkan yüksek maliyetlerden dolayı günümüzde pek tercih edilmeyen bir liç yöntemidir [4].

2.2.3.4. YerindeLiç

Yerinde liç, seyreltik siyanür çözeltisinin, cevhere, bulunduğu yerde beslenmesi ile uygulanan bir liç yöntemidir [39]. Bu yöntemdeki en önemli parametre, cevherin geçirgenliğinin siyanür çözeltisinin, altın değerlerinin (ekonomik olarak) önemli bir kısmına erişim sağlayabileceği şekilde olmasıdır. Siyanür içeren besleme çözeltisi borularla doğrudan altın içeren kayanın içerisine pompalanır ve çözünme işlemi gerçekleşikten sonra elde edilen yüklü çözelti tekrar yeryüzüne pompalanmaktadır.

Gerekli geçirgenlik, cevher kütlesinin doğal bir özelliği olmasa bile bir patlatma yardımıyla yeterli parçalanma ile sağlanabilir. Yerinde liç altın cevheri için, çözelti ile altının yeterli şekilde teması geçememesinden dolayı düşük verim, düşük verime rağmen gereken yüksek reaktif maliyeti ve çevresel risklerin yüksekliğinden dolayı tercih edilmez [4].

2.2.3.5. Karıştırmalı Liç

Karıştırmalı liç yöntemi, 200 yılı aşkın bir süredir çeşitli cevherlerin işlenmesi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, genellikle, öğütülmüş (< 3 mm) cevherin siyanürlü çözelti ile silindirik ya da konik yapıda bir tank içerisinde karıştırılmasıyla uygulanmaktadır. Karıştırma işlemi hava yoluyla, mekanik bir pervane yardımıyla ya da ikisinin birleşimiyle yapılabilmektedir. Karıştırmalı liç yönteminde genellikle %80'in üzerinde bir verim elde edilmekte ve liç süresi 16-48 saat arasında (ortalama 24 saat) değişebilmektedir [40]. Öğütme, reaktif ve diğer maliyetlerin yüksekliğinden dolayı bu yöntem genellikle yüksek tenörlü cevherlerde tercih edilmektedir. Fakat günümüz koşullarında altının ekonomik değerindeki artıştan kaynaklı, nispeten düşük tenörlü altın cevherlerine uygulandığı da görülmektedir.

Karıştırmalı liç yönteminde verimi etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir;

Tane boyu: Karıştırmalı liç yöntemi öğütme gerektiren bir yöntemdir. Bu nedenle cevherin verim - öğütme maliyeti hesabına göre belirlenen optimum tane boyuna öğütülmesi gerekmektedir.

Liçte katı oranı: Cevher hem pratik hem de çevresel nedenlerden dolayı yaş öğütmeye tabi tutulur. Uygun tane boyu bir sınıflandırıcı tarafından sınıflandırıldıktan sonra liç için gerekli katı yoğunluğunun sağlanması amacıyla tükine (susuzlandırma ünitesi) gönderilir. Bu oranın belirlenmesi için, cevherin tane boyu, özgül ağırlığı ve pülp viskoziteye sebep olabilecek içeriklerin bilinmesi gerekmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda genellikle liçte katı oranı %30 ila %50 arasında uygulanmaktadır [32].

pH: Pülpün hidroliz yoluyla aşırı siyanür kaybına uğramaması için alkali bir ortamın olması gerekmektedir. Dolayısıyla, pH düzenlemesi ve kontrolü için sisteme uygulanacak

olan alkali, siyanürden önce eklenmelidir. Tepkime için en uygun pH değeri, pülpün çökelti oluşturma ihtimaline, cevherdeki diğer metallerin çözünmesi ihtimaline, çözültide çökeltiye neden olabilecek diğer yapılara (demir, kalsiyum gibi), pülpde katı oranında olduğu gibi pülpün viskozitesine ve kullanılacak alkalinin maliyetine bağlı olarak belirlenir. Genellikle endüstride uygulanan pH değeri 10-11 arasında olup bu düzenleme ve kontrol için NaOH'a göre daha az çözünür ve ekonomik açıdan daha avantajlı olduğu için Ca(OH)₂ tercih edilir [4].

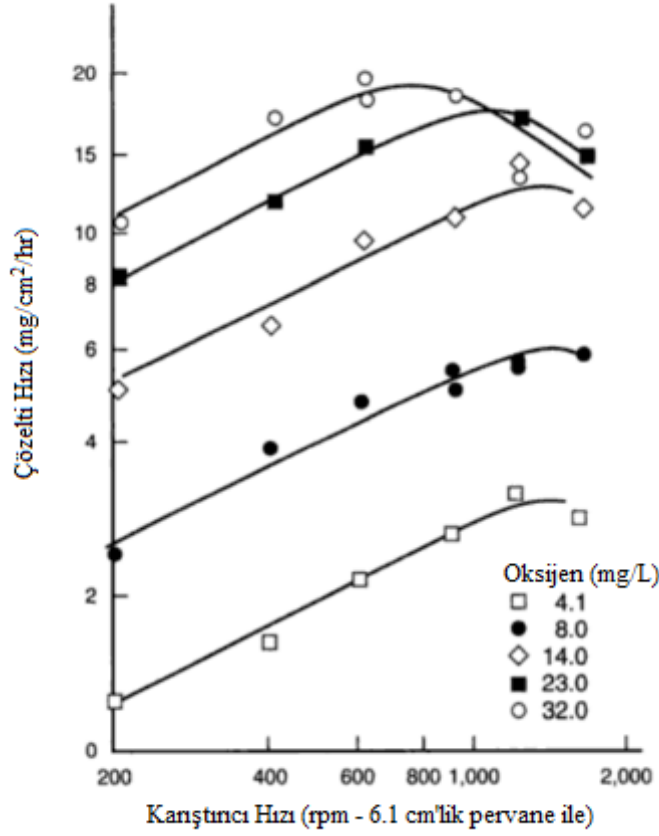
Siyanür Derişimi: Karıştırmalı liç sistemlerinde siyanür, öğütme sırasında veya liç işleminin ilk aşamasında eklenebilir. Karıştırmalı liç için endüstride kullanılan siyanür derişimi genellikle 0,15-0,5 g/L civarında tutulmaktadır. Siyanür derişimi genellikle manuel titrasyon teknikleriyle veya daha az yaygın olan çevrimiçi (on-line) siyanür analizörleri tarafından titrimetrik, kolorimetrik, potansiyometrik ve iyona özgü elektrot tekniklerine dayanarak takip edilir [4, 41].

Oksijen Derişimi: Altının çözünmesi için gerekli olan çözülmüş oksijen liç sistemlerine genellikle atmosferik hava olarak doğrudan ya da püskürtme yöntemi ile sağlanır. Basit püskürtme sistemleri genellikle yeterli kabarcık dağılımını ve yeterli çözülmüş oksijen derişimini sağlamak ve korumak için yeterlidir.

Liç tanklarına çözülmüş oksijen sağlama metotları aşağıdaki gibi olup liç tanklarının geometrik şekline bağlı olarak değişir.

- Tankın altından besleme (tekli ya da çoklu noktalardan),
- Havalandırma boruları yardımı ile tankın üzerinden besleme,
- Karıştırma şaftının aşağısından besleme [4].

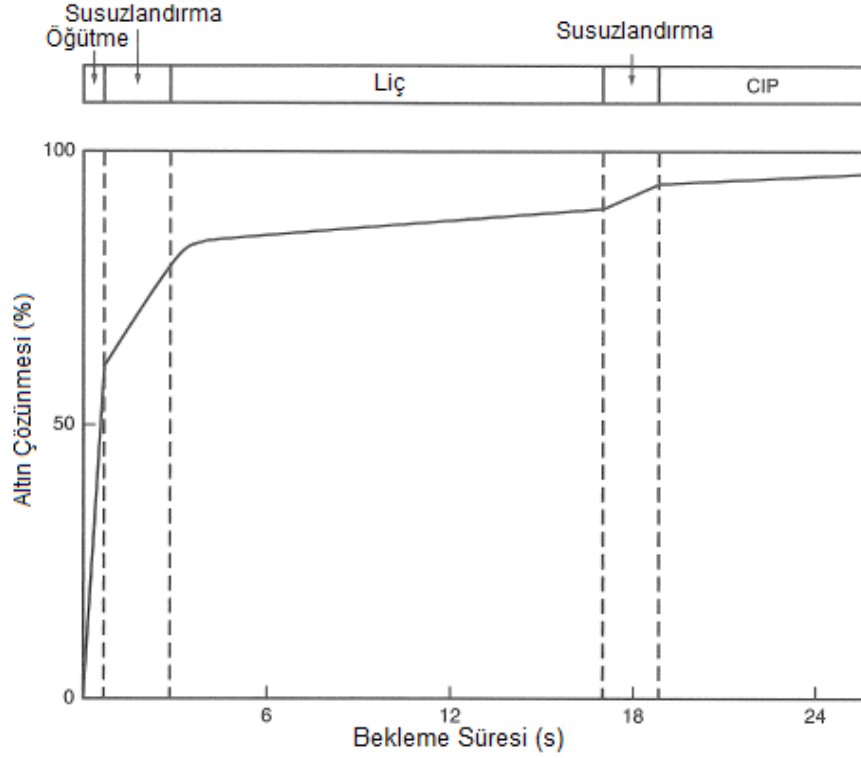
Oksijen tüketen mineraller içeren cevherlerin olduğu durumlarda oksijen derişimini artırmak için basit hava dağıtma sistemlerine ek olarak saf oksijen veya hidrojen peroksit takviyesi de yapılabilir [42,43]. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi liç sistemlerinde kullanılan çözülmüş oksijen miktarı en yüksek 32 mg/L olarak ölçülmüş ve bunun liç kinetiğini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir [4].



Şekil 2.7. Oksijen Derişimi ve Karıştırma Hızının Altının Çözünmesine Etkisi

Liç Süresi: Liç işleminin süresi uygulanan liç koşulları ve cevherin özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Bu süre, laboratuvar ölçekli, pilot ölçekli ve/veya üretim esnasında yapılan liç kinetiği testleri ile elde edilen çözünme eğrisine göre belirlenmektedir. Karıştırmalı liç yönteminde liç süresi, ortalama verimin %80 ve üzerinde olması beklendiğinden dolayı, genellikle 16-48 (çoğunlukla optimum 24 saat) saat olarak uygulanır [33,40].

Günümüzde faal halde olan birçok altın tesisinde, pülpün proses tesisindeki bir ekipmandan diğerine aktarılırken de (örneğin; süzme tankları, kıvam arttırıcılar, filtreler, pompalar ve boru hatları arasında) altın çözünmesinde bir artış olduğu gözlenir. Bu artış Chimney Creek, Nevada'da yapılmış bir çalışmada (1988) Şekil 2.8'de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir. [44].



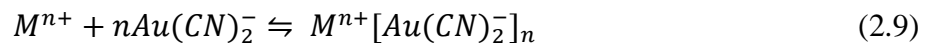
Şekil 2.8. Altın Çözünmesindeki Artışın Şematik Gösterimi

2.2.4. Karıştırmalı Liç Metodunda CIP/CIL Yöntemiyle Altının Kazanımı

Eskiden odun kömürü olarak fakat günümüzde aktif karbon olarak isimlendirilen malzeme grafitik yapıya sahip organik bir malzemedir. Altın geri kazanımı için gereken aktif karbon seçilirken dikkat edilmesi gereken özellikler;

- Karbonun adsorpsiyon kapasitesi,
- Karbonun adsorpsiyon hızı,
- Karbonun mekanik mukavemeti ve aşınma direnci
- Karbonun reaktivasyon özellikleri ve
- Karbonun tane boyu dağılımıdır [4].

Altının karbona adsorpsiyon mekanizmasının gösterimi Eşitlik 2.9'da verilmiştir.



Eşitlikteki M metal $M^{n+}[Au(CN)_2^-]_n$ ise adsorbe olan altın içeren türdür [45].

Dünya genelinde, kolay işlenebilir altın cevherleri için ana proses yöntemlerinden olan karıştırmalı liç metodu kapsamında, altının geri kazanımı için CIP (pülpde karbon) ya da CIL (liçte karbon) yöntemleri kullanılmaktadır. CIP ve CIL yöntemleri sıvı faza geçen altının katı sıvı ayırımına gerek kalmadan geri kazanılmasını sağlayan yöntemlerdir [33]. Dolayısıyla liç işlemi sonrası elde edilen yüklü çözeltinin çinko ile çöktürülmesi nedeniyle saflığını kaybetme ihtimali gibi problemlerin yaşanmaması bu yöntemlerin günümüzde daha popüler olmasını sağlamıştır [6]. Bu yöntemlerin diğer altın geri kazanım yöntemlerine göre önemli avantajlarına, atıktaki çözünmüş altını bile kazanma ihtimali ve kullanılan karbonların aktifleştirilerek tekrar sistemde kullanılabilmesi de örnek gösterilebilir. Bu yöntemlerde kullanılan karbonların ağaçtan, petrol kokundan, fındık kabuğundan ya da değişik petrol türevleri gibi malzemelerden elde edilebilir olması da yöntemin uygulanmasını yaygınlaştıran etkenlerdendir.

Liçte Karbon (CIL): Bu uygulama karıştırmalı liç tanklarına, pülp ile gerekli miktardaki aktif karbonun beraber beslenmesi ile gerçekleştirilir. Bu sayede liç süresi boyunca, katı fazdan sıvı faza geçen altının aynı zamanda karbona adsorpsiyonu da gerçekleşir. Eş zamanlı gelişen bu işlem zaman tasarrufu açısından oldukça avantajlıdır [45]. Aynı sebepten liç süresi kısa olan cevherler için tercih edilen bu yöntem, karbonun adsorpsiyon kapasitesinin genellikle cevherdeki karbon içerikli malzemelerden yüksek olması nedeniyle preg robbing özellik gösteren cevherlerde de kullanılmasını sağlar [46].

Karbon aşınmasının fazlalığından dolayı altın kayıpları ve karbon tüketiminin fazlalığı gibi nedenlerden ötürü operasyon maliyetleri görece yüksek bir yöntemdir [4].

Pülpde Karbon (CIP): Bu uygulamada ise pülpdeki altının çözünmesi liç tanklarında gerçekleşirken, çözünme süresinin tamamlanmasının ardından, pülp, karbon adsorpsiyonu için kullanılan tanklara aktarılmakta ve adsorpsiyon işlemi orada gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, CIP yönteminin, CIL yönteminden temel farkı liç ve adsorpsiyonun farklı ortamlarda gerçekleşmesidir. CIP genellikle, yüksek tenör ve/veya uzun liç süresine sahip cevherler için uygulanır.

CIP yönteminin temel aşamaları;

- Tane boyu kontrolü

- Karbon adsorpsiyonu
- Yüklü karbonun asitle yıkanması
- Elektroliz veya çöktürme ve
- Karbonun fırınlanarak tekrar aktifleştirilmesinden oluşmaktadır [47].

Karıştırmalı liç yöntemlerinde genellikle adsorpsiyon tankları liç tanklarının peşine gelecek şekilde konumlandırılmakta ve yüklü çözelti ile aktif karbonların akış yönü birbirine zıt istikamette olmaktadır. Bu yüzden, bu yöntem ters akışlı dekantasyon (counter-current decantation) olarak adlandırılır [48].

Siyanür liçini takiben veya liç sırasında karbona katılan pülp malzeme, karbon adsorpsiyonunun birkaç aşamasından geçer, bu aşama sayısı temel olarak tank boyutuna, karbon derişimine ve adsorbe edilecek altın miktarına bağlı olmakla beraber genellikle 5 - 8 aralığındadır (minimum 4 maksimum 10). Yüklü çözeltinin akış yönü adsorpsiyon karbonlarına ters şekilde olduğu için ilk aşamada temas eden karbon en yüksek altın içeriğine sahipken son kademedeki karbon en düşük altın içeriğine sahiptir [4].

2.3. Boyut Küçültme ve Serbestleşme

Cevher zenginleştirme yöntemlerinde en önemli parametlerden biri cevherin serbestleşmesidir. Dolayısıyla ideal tane boyutunun doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için gerçekleştirilen boyut küçültme işlemleri temel olarak kırma ve öğütme işlemlerinden oluşur. Kırma işlemi genellikle birincil boyut küçültme aşaması olup aynı zamanda cevherin istenilen tane boyutuna ulaşması için gerekli olan öğütme işlemine de ön hazırlık olarak kullanılır. Bunun yanı sıra yığın liçi gibi iri taneli cevherlere uygulanan zenginleştirme yöntemlerinde ise kırma aşaması genellikle boyut küçültme işlemi için yeterli olmaktadır.

Öğütme sonunda elde edilecek tane boyu, teknik ve ekonomik duruma göre belirlenir. Cevherin tane boyu inceldikçe öğütme maliyeti de artmakta ve belirli bir noktaya kadar, cevherin tane boyu inceldikçe minerallerin serbestleşmesi de artmaktadır. Bu nedenle

cevher içindeki değerli minerali optimum biçimde serbestleştirmek için belirlenen tane boyuna öğütme boyu denir [28].

Öğütme maliyeti, gerek ekipmanların ana ve bakım maliyetleri gerekse de harcanan enerji dolayısıyla işletme maliyetlerinin %70'ine kadar çıkabilmektedir. Bu denli yüksek gider kalemi, cevher zenginleştirilmesi için gerekli yöntemin seçiminde önemli bir rol oynamaktadır. Cevherin ince ya da ultra ince öğütme ile ideal tane boyunun belirlenmesi için altın kazanım verimi ve maliyet kıyasının optimum şekilde yapılması gerekmektedir [49].

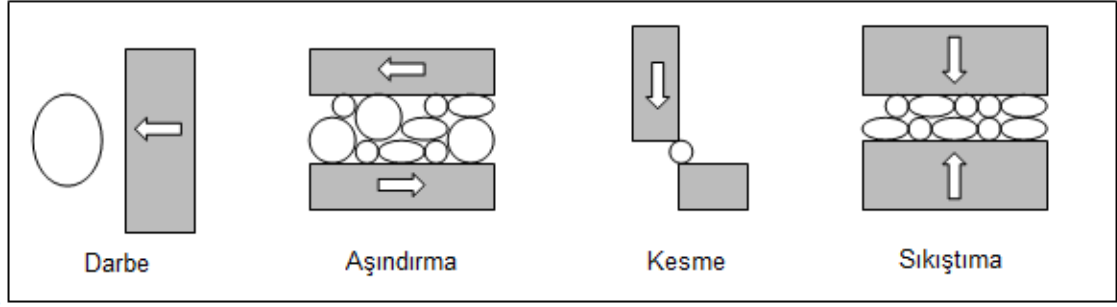
Optimum tane boyunun belirlenmesinde maliyet dışında, cevherin tane viskozitesi (karıştırmalı liç ve flotasyon gibi proses çeşitlerindeki davranışı için) cevherin geçirgenliği (yığın liçi gibi proses çeşitlerindeki davranışları için) ve katı-sıvı ayrımı verimi gibi parametler de önem arz eder.

Cevherin tane boyuna (P_{80}) bağlı olarak öğütme işlemleri 4 ana başlıkta incelenebilir;

1. Konvansiyonel Öğütme: 75 μm 'nin altına öğütülen cevherler için.
2. İnce (Fine) Öğütme: 30-10 μm nin altına öğütülen cevherler için.
3. Çok İnce (Ultra Fine) Öğütme: 10 μm nin altına öğütülen cevherler için [50].

Kolay işlenebilir yüksek tenörlü cevherlerin azalmasına bağlı olarak serbestleşme tane boyunun daha ince olduğu düşük tenörlü yatakların ekonomik değer kazanması, tesis atıklarının yeniden işlenmesi yönündeki arayış ve endüstriyel minerallerdeki ince ve çok ince tane boyutu talebindeki artış doğrultusunda ince ve ultra ince öğütmenin önemi artmıştır [50].

Tanelerde boyut küçültme başlıca dört farklı şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 2.9). Bu kuvvetlerin birinin veya birkaçının tane üzerine etki etmesi sonucunda tane, kendisinden daha ince boylara dağılmaktadır.



Şekil 2.9. Boyut Küçültme Mekanizmaları

Öğütme konusunda yapılan çalışmalar çoğunlukla enerji ile boyut küçültme arasındaki ilişkiyi esas alarak yapılmıştır. Böylece, en fazla boyut küçültmeyi en az enerji harcayarak gerçekleştirmenin yolları araştırılmıştır. Konvansiyonel değirmenlerde harcanan enerjinin çok küçük bir kısmı doğrudan boyut küçültmede kullanılmaktadır. Ayrıca, 100 mikronun altında enerji tüketiminin artışına bağlı olarak konvansiyonel değirmenlerin öğütme verimi düşmekte dolayısıyla, öğütme maliyetleri artmaktadır [56, 52, 62, 53]. Bu nedenle, öğütme verimini arttırmak suretiyle öğütme maliyetini düşüren farklı öğütme mekanizmalarına sahip değirmenler tasarlanmıştır [51]. Karıştırmalı bilyalı değirmenler bunlara bir örnektir [28]. Konvansiyonel değirmenlere kıyasla daha ince öğütücü ortam kullanan karıştırmalı değirmenler ince öğütme uygulamalarında enerji sarfiyatı yönünden daha verimli olmaktadır [53]. Düşük enerji tüketimi ve öğütmedeki yüksek verimliliği açısından, karıştırmalı değirmenler, genellikle ince ve çok ince öğütme uygulamalarında etkin ekipmanlar olarak kabul edilmektedir [54].

Refrakter altın cevherlerinin direkt siyanür liçi ile değerlendirilmesi için ön zenginleştirme proseslerinin uygulanması gereklidir. Ultra ince öğütme (<10 µm), özellikle sülfür mineral matrisinde kapanım halde bulunan altının açığa çıkarılması için uygulanan kavurma işlemi gibi işlemlerin aksine çevresel ve ekonomik açıdan daha avantajlı bir yöntem oluşuyla diğer ön işlemlere de bir alternatif olarak kullanılabilir [55].

Serbestleşme boyutundaki azalma özellikle flotasyon konsantrelerinin son ürün olarak üretildiği tesislerde, gang safsızlıkları ve daha düşük geri kazanımlar nedeniyle metalürjik performansın düşmesine neden olabilmektedir. Ultra ince öğütme, flotasyonda optimum

tenör/geri kazanımı sağlamak için ekonomik olması sebebiyle önemli ölçüde kabul görmektedir [56].

İnce ve ultra ince öğütme süreci, mekanik aktivasyon, serbestleşme etkisi ve taneler üzerinde oluşacak pasifleştirici film tabakasının uzaklaştırılmasından oluşan toplam 3 mekanizma ile gerçekleşmektedir [57].

2.3.1. Karıştırmalı Değirmenler

1990'da, metalik madenlerin zenginleştirilmesi işlemlerinde ekonomik olarak ultra ince boyutlara yeniden öğütme için kabul edilmiş bir teknoloji yok denecek kadar azdı. 1990 ve 1991'deki test çalışmaları, yüksek hızlı yatay değirmenlerin laboratuvar ölçeğinde %80'i 7 mikronun altına geçebilecek tane boyunda bir ürünü verimli bir şekilde öğütebildiğini ve bu sayede metalürjik performansta büyük bir artış sağlandığını göstermiştir [56].

Cevher hazırlamada kullanılan geleneksel öğütme teknikleri ile çok ince boylara öğütme yapmak ekonomik olmaktan çıkmakla birlikte belirli bir incelikten sonra yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, bu alanda farklı tiplerde karıştırmalı değirmenler kullanılmaktadır [62]. Karıştırmalı değirmenlerde, dönen bir mil üzerine yerleştirilmiş pinler veya diskler enerjii öğütücü ortama aktarmakta ve yüksek yoğunluklu çarpışmalar neticesinde ufalanma gerçekleşmektedir. Farklı üreticiler tarafından üretilen çeşitli karıştırmalı değirmenler bulunmaktadır. HIG Mill, Isamill, VertiMill bunlardan bazılarıdır.

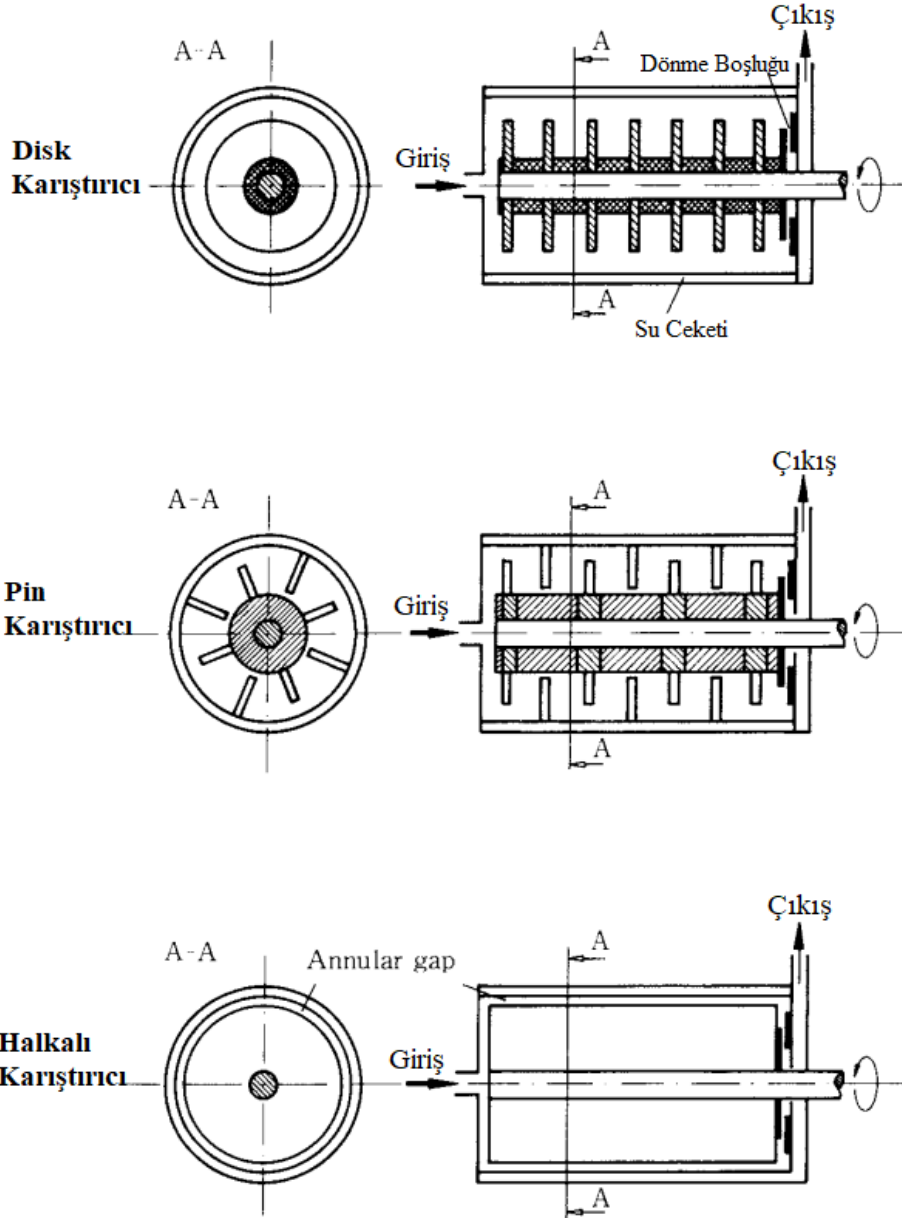
Karıştırmalı değirmenler, karıştırıcı (stirrer) tipine göre sınıflandırılıp, yine bu karıştırıcılara göre (diskli, pinli ve halkalı) adlandırılır. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak konumlandırılıp yaş veya kuru olarak öğütme yapabilir [63].

2.3.1.1. Öğütme Parametleri

Karıştırmalı değirmenlerin performansı; karıştırıcı tipi, pülp katı yoğunluğu, karıştırma hızı, bilya boyu, bilya yoğunluğu, bilya şarjı ve viskozite gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişmektedir [64, 65]. Söz konusu parametrelerinin optimizasyonu, maksimum kapasite ve minimum enerji tüketimi eldesi için önem arz etmektedir [66].

Tasarım Parametleri

Değirmenin boy/çap oranı, karıştırıcının tipi, konumu ve sayısı, şaftı üzerinde bulunan disk veya çubukların boyutları ve bunların şaft üzerindeki konumları gibi tasarım değişkenleri, değirmen içindeki akış rejimini değiştirmekte ve bu sayede bilya hareketini düzenlemektedir. Karıştırmalı değirmenlerin, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi diskli, pinli ve halkalı karıştırıcılı değirmen olmak üzere üç farklı tasarımı vardır [63, 67]. Diskli ve halkalı karıştırıcılı değirmenlerde enerji transferi, çekme kuvveti, pinli karıştırıcılı değirmenlerde ise yer değiştirme kuvveti kullanılarak, enerji, karıştırıcıdan bilya ya da ürün üzerine transfer edilmektedir. En büyük enerji yoğunluğu halkalı karıştırıcılı değirmenden elde edilirken, pinli karıştırıcılı değirmende oluşan enerji yoğunluğu diskli karıştırıcılı değirmenden daha fazladır [68].



Şekil 2.10. Farklı Karıştırıcı ve Öğütme Hazneli Yatay Değirmenlerin Geometrisi

Karıştırma Hızı

Karıştırmalı değirmenlerdeki öğütmeyi etkileyen işlem parametrelerinden en önemlisi değirmen hızı olarak kabul edilmektedir. Değirmen hızı artırıldığında ürün tane boyu azalırken enerji tüketimi artar. Bu da enerji verimliliğini etkiler. Belirli bir öğütme süresinde daha ince bir ürün elde etmek için daha yüksek hızla ihtiyaç vardır. Endüstriyel ölçekte, istenilen tane boyuna ulaşmak için gerekli hız seçimi, enerji tüketimi de göz önüne alınarak optimize edilmelidir [52,69].

Pülp Yoğunluğu

Yaş öğütme üzerine yapılan çalışmalar pülp yoğunluğundaki artışın ürün inceliğini artırdığı yönünde sonuçlanmıştır. Düşük katı derişiminin enerji tüketiminde neredeyse bağımsız bir rol oynadığı gözlemlenirken, katı oranının artmasının daha düşük enerji tüketimine sebep olduğu gözlenmiştir. Düşük özgül enerji girdisi (veya kısa öğütme süresi) tanecik sayısının artmasına ve gerilme koşullarının daha iyi hale gelmesine sebep olarak enerji verimliliği artar. Ancak, öğütölmüş tanelerin, süspansiyon viskozitesini, öğütme ortamı bilyasının hızının ve kinetik enerjisinin zayıflamasını sebep olacak kadar artırdığı bir nokta vardır. Pülpdeki katı miktarının ağırlıkça %75'in üzerine çıkması durumunda ince boydaki tanelerin pülp viskozitesini artırmasından dolayı tanelerin kırılma hızları düşmekte ve özellikle ince besleme boylarında bu durum daha belirgin hale gelmektedir [50, 71].

Bilya Boyu, Yoğunluğu ve Şarj Oranı

Bilya boyu öğütmedeki önemli işlem parametrelerinden biridir. Öğütmenin verimli bir biçimde gerçekleşebilmesi için kullanılan bilya boyu beslemedeki en iri tane boyunu kırabilecek düzeyde olmalıdır. Yapılan çalışmalarda, ince bilya kullanılmasının ürün tane boyunu incelttiği görölmüştür. Fakat belirli bir bilya boyundan daha ince bilya kullanılması besleme içinde bulunan iri taneler bilyalar tarafından yakalanamamaktadır. Bilya boyu ince ise yüksek karıştırma hızının, bilya boyu iri ise düşük karıştırma hızının öğütme verimini artırdığı gözlenmiştir [50, 71].

Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde enerji sarfiyatının önemli sebeplerinden birisi de öğütücü ortamın (bilya yükünün) hareket ettirilmesidir. Dolayısıyla, enerji tüketiminde azalma sağlamak için öğütme verimini etkilemeyecek şekilde bilya yoğunluğu düşürülebilir ya da daha düşük yoğunluğa sahip malzemeden bilyalar tercih edilebilir [52, 72, 73].

Bilya şarjının tane boyu üzerindeki etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, aynı enerji tüketiminde bilya şarjının tane boyunu değiştirmediği fakat değirmenin çektiği gücü doğrusal olarak arttırdığı belirlenmiştir [73]. İyi bir öğütme verimi için, konvansiyonel

değirmenlerde bilya şarjı %40 civarında kabul edilirken, karıştırmalı değirmenlerde bu oran %70-85'i bulabilmektedir. Bilya şarjındaki fazlalık, özellikle yatay değirmenlerde aşınmaya neden olabilirken dik değirmenlerde de taşmaya sebep olabilmektedir [66].

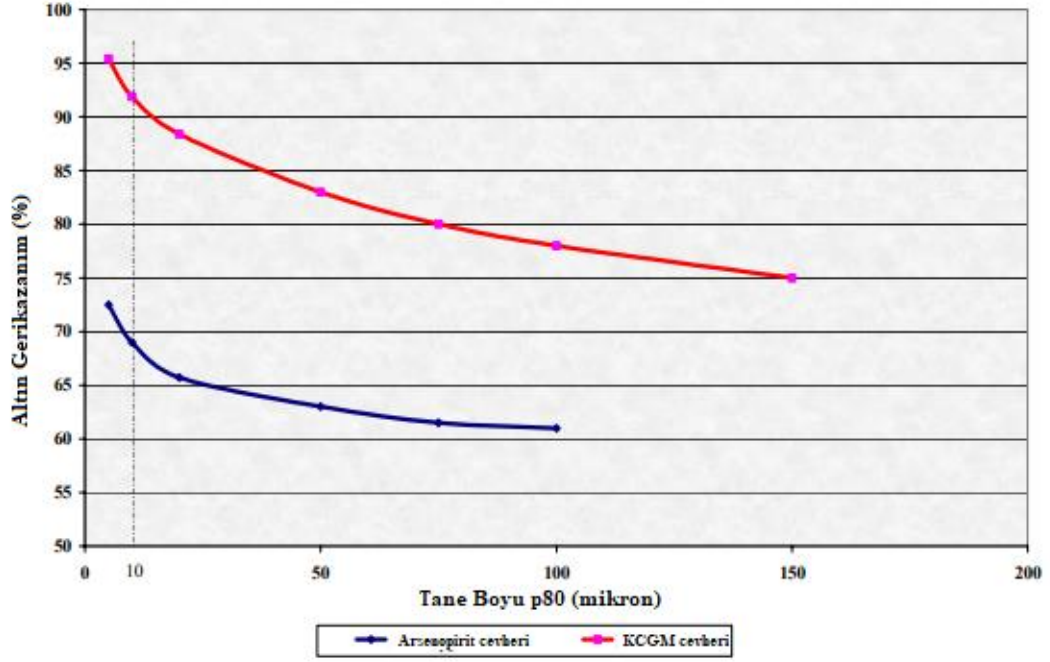
Öğütme Yardımcıları

Zeta potansiyel, taneler arasındaki itme ya da çekme değeri ölçümüdür. Bir süspansiyonun zeta potansiyeli de parçacıklar arasındaki itme kuvvetinin büyüklüğünün bir göstergesidir. Tanelerin içinde bulunduğu çözeltinin pH değerine bağlı olarak zeta potansiyel de değişir. Zeta potansiyel-pH grafiğindeki eğrinin 0 noktasını kestiği pH değeri izoelektrik nokta olarak adlandırılır [74]. Aynı polariteye sahip tanelerin zeta potansiyeli ne kadar yüksekse, tanecikler arasındaki elektrostatik itme o kadar baskındır. Tam tersi durumda, yani zeta potansiyeli izoelektrik noktaya ($f=0$) yakın olduğunda, taneler topaklanma eğilimindedir [70].

Öğütme sırasında incelen taneler buldukları pülpün viskozitesinin artmasına sebep olur. Öğütme veriminin düşmesine sebep olan bu durum için ortama, tanelerin zeta potansiyellerini ve viskozitelerini düşürecek kimyasal reaktifler verilebilir [75].

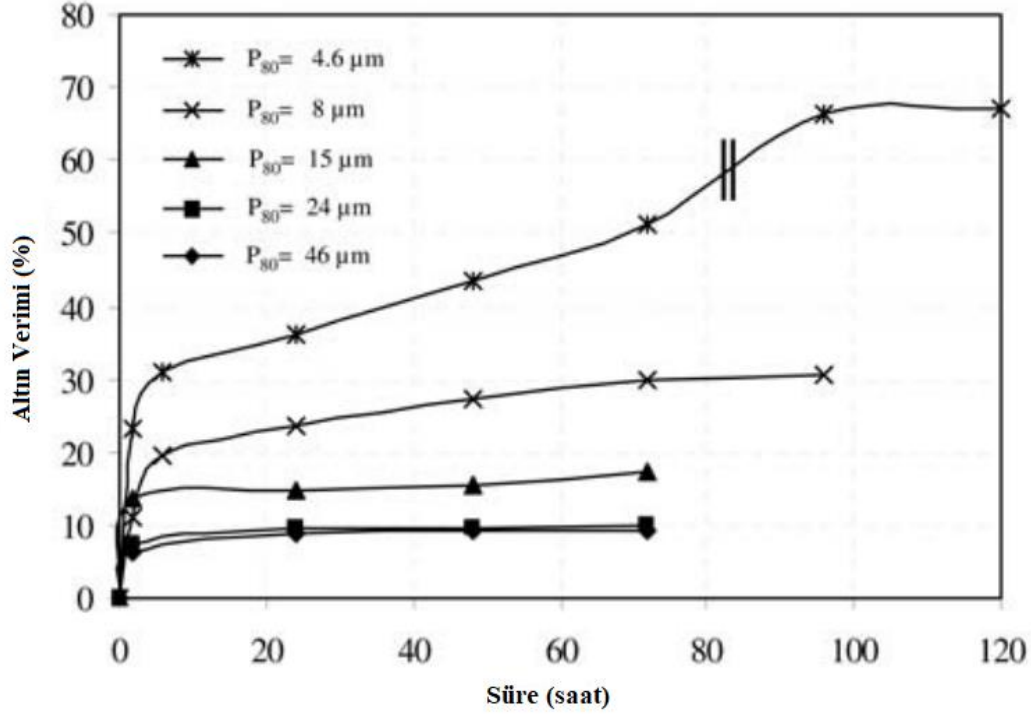
2.4. İnce ve Ultra İnce Öğütmenin Liç Verimine Etkileri

Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM) cevheri ve bir arsenopirit cevheri ile yapılan test çalışmasında, farklı inceliklere öğütülen numuneler siyanür liçi testine tabi tutulmuş ve incelen tane boyuna bağlı olarak Au çözünme veriminde bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 2.11). Ancak, bu artışın cevher tipine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve bütün refrakter altın cevherleri için ince öğütmenin efektif bir geri kazanım sağlayamayacağı belirtilmiştir [76]. Örneğin, pirit içinde saçınım halde bulunan altının geri kazanımı, arsenopirit içinde kapanım halde bulunan daha küçük parçacık boyuna sahip altından daha yüksek olacaktır.



Şekil 2.11. Arsenopiritli ve Piritli Cevherdeki Altın Geri Kazanımı

González-Anaya ve ark. tarafından ultra ince öğütme ile bir refrakter konsantresinin altın geri kazanım optimizasyonu amacıyla yürüttükleri laboratuvar çalışmasında; oda sıcaklığında, maksimum sönmüş kireç ilavesi (50 kg Ca(OH)₂/t, pH = 12,3) %25 S/L ve %1 NaCN'den oluşan liç koşullarında, 5 farklı incelikte (P₈₀ = 46, 24, 15, 8 ve 4,6 µm) testler gerçekleştirmişlerdir [77]. Şekil 2.12'de testlere ait zamana bağlı liç verimleri yer almaktadır.

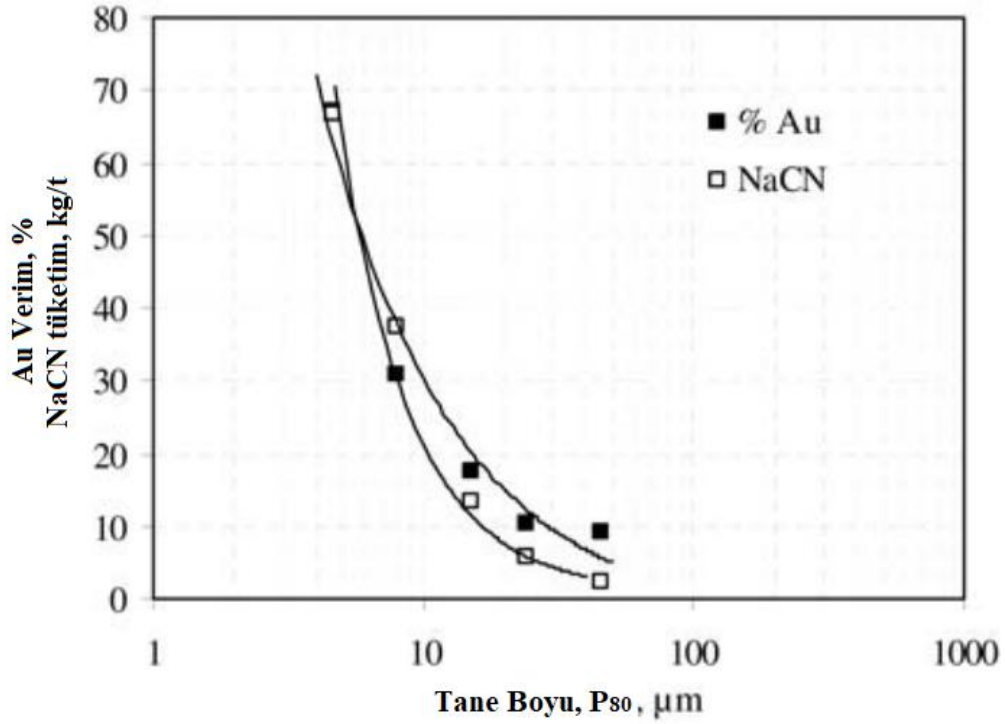


Şekil 2.12. Öğütülmüş Cevherlerin Altın Kazanımları

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde;

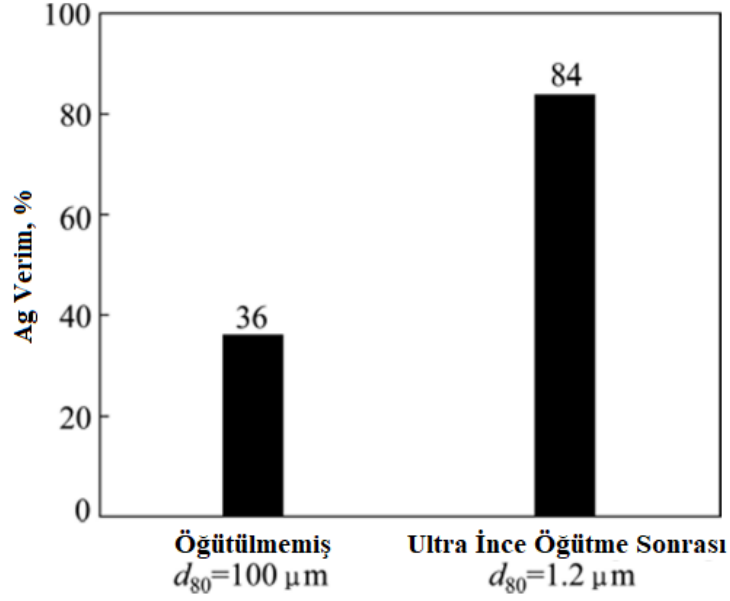
- Tüm tane boyları için, başlangıçtaki altın çözünmesinin hızlı olduğu, ancak muhtemelen kapanım haldeki altının küçük tane boyu nedeniyle bu hızın 12. saatten sonra azaldığı gözlenmiştir.
- 4.6 µm test, 48 ve 72 saatlik altın kazanım eğiminin, altın çözünmesinin devam edebileceğine işaret etmesinden dolayı 72. saatte durdurulmuş ve atık, altın çözünme eğrisinin sabitlendiği nokta olarak kabul edilen 120 saat tamamlanana kadar taze siyanür çözeltisi ile tekrar siyanürlemeye tabi tutulmuştur. Bu ekstra siyanürleme süresinin amacı maksimum altın geri kazanım değerine ulaşmak olup en iyi altın kazanımı (%67) bu tane boyunda elde edilmiştir [77].

Bu çalışmada, tane boyutundaki küçülmenin altın çözünmesi ile birlikte siyanür tüketiminin de artmasına sebep olduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 2.13). Siyanür tüketimindeki artış, tane boyundaki azalmaya bağlı olarak artan yüzey alanıyla ilişkilidir [77].



Şekil 2.13. Au Verimi ve NaCN Tüketimi

Celep ve Yazıcı (2013) tarafından yapılan çalışmada, siyanür liçi ile gümüşün geri kazanılması için bir refrakter gümüş tesisinin atığı farklı inceliklere öğütülmüştür [78]. 1,5 g/L NaCN, pH 10,5, sıcaklık: 25°C, hava: 0,3 L/min, pülp yoğunluğu ağırlıkça: %24, koşullarında gerçekleştirilen siyanür liçi sonucu; öğütülmemiş atık numunesindeki ($d_{80}=100 \mu\text{m}$) Ag kazanımı %36 iken ultra ince öğütme ($d_{80} = 1,2 \mu\text{m}$) sonrası %84 gümüş kazanım oranı elde edilmiştir (Şekil 2.14). Çalışmada atık numunesinin ultra ince öğütülmesinin, gümüşün siyanür liçini önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir.



Şekil 2.14. Tane Boyuna Bağlı Ag Verimi

2.5. Mekanik Aktivasyon

Mekanik aktivasyon, cevherin kimyasal yapısını değiştirmezken, tepkime yeteneğini değiştirmesinden kaynaklanan (aktivasyonun bileşimi veya yapısında bir değişiklik yaratması koşuluyla) mekanokimyasal bir tepkime olarak tanımlanabilir [58].

Mekanik aktivasyonun etkisi altındaki sũreçler, birincil ve ikincil olarak alt gruplara ayrılabilir. Birincil işlemler (örneğin, iç ve yüzey enerjisinin artması, yüzey alanının artması, katıların koherans enerjisinin azalması) genellikle mineralin reaktivitesini artırır. İkincil işlemler (örn. Agregasyon, adsorpsiyon, rekristalizasyon) aktive edilmiş sistemlerde kendiliğinden gerçekteşir ve öğütme sırasında veya öğütme tamamlandıktan sonra görülebilir [59].

Mekanik aktivasyonla minerallerde tetiklenen fizikokimyasal değişiklikler; mekanik aktivasyonun birincil etkisi, bir parçacık sistemin çok sayıda fizikokimyasal özelliklerinde değişikliklere neden olan mineral parçacıklarının bir araya gelmesidir. Yüksek enerjili öğütme ile bu parçalanmaya, parçacık sayısındaki artış ve taze, daha önce maruz kalmamış yüzey oluşumu eşlik eder [60].

Mekanik aktivasyona uğramış minerallerin kimyasal liçi; mekanik aktivasyon liç kinetiğini etkileyen en önemli ön işlem yöntemlerinden biridir. Liç, değerli minerallerin ekstraksiyonundaki kilit aşamadır. Dolayısıyla liçi etkileyen parametreler liç yönteminin seçimini ve eğer gerekli ise ön zenginleştirme yöntemlerinin seçimini de doğrudan etkiler [60]. Mekanik aktivasyon, minerallerin ayrışma sıcaklıklarını düşürmeyi mümkün kılar bu da termal aktivasyonu kolaylaştırır veya tamamen ihmal edilebilecek düzeye gelmesini sağlayabilir [61].

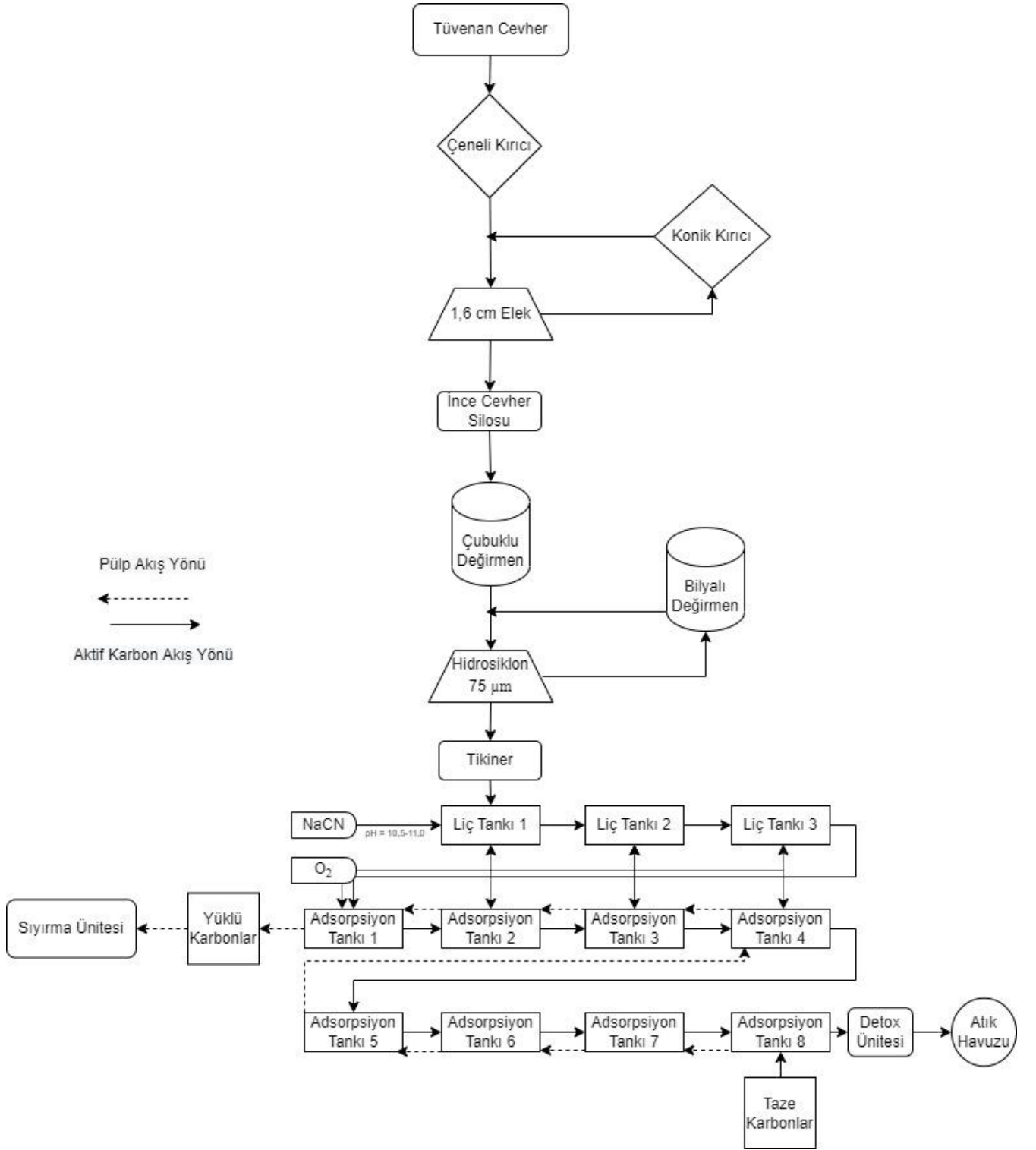
Hidrometalürjide mekanik aktivasyon; mekanik aktivasyon, yeni yüzey alanı oluşumu ve minerallerde kristal yapının bozulmasının bir kombinasyonu sayesinde hidrometalürjik süreçlerde bir iyileşmenin elde edilebildiği yenilikçi bir prosedürdür. Tepkime sıcaklığının düşürülmesi, çözünürlük oranının ve miktarının artması, suda çözünür bileşiklerin hazırlanması, daha basit ve daha ucuz reaktörler gerekliliği ve daha kısa tepkime süreleri mekanik aktivasyonun avantajlarından bazılarıdır [61].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzeme ve Karakterizasyon

Bu çalışmada, başlıca, Koza Altın İşletmeleri'ne ait, Eskişehir ili, Sivrihisar ilçesi, Kaymaz beldesinde bulunan Kaymaz Altın Madeni'nde işlenmekte olan cevherin liç sonrası oluşan atık kullanılmıştır. Kaymaz Altın Madeni'nde Main Zone ve Mermerlik olmak üzere 2 farklı bölgede faal olarak üretilen cevher yatağı bulunmaktadır.

Açık ocak yöntemi ile işletilen Kaymaz Altın Madeni'nde üretilen cevher tesis stok sahasında muhafaza edilmektedir. Stok sahasındaki cevher paralel iki hattan oluşan tesise saatlik yaklaşık 120 ton olacak şekilde beslenmektedir. İlk olarak kırıcı ünitesine gelen cevher birincil olarak çeneli ve ikincil olarak konik kırıcılara beslenir. Ardından sınıflandırma için eleklerle gönderilir. İstenilen tane boyundaki cevher ince cevher silosuna gönderilir. İnce cevher silosundan çıkan cevhere, birincil değirmen olarak kullanılan çubuklu değirmenlere gönderilirken, konveyör bantlar üzerinde pH ayarlaması amacıyla kireç beslenir. Çubuklu değirmenlerden çıkan cevher ikincil öğütme için bilyalı değirmenlere beslenir. Ardından boyutlandırma amacı ile hidrosiklonlara beslenir. Öğütme sonrası istenilen tane boyuna (~75 µm) ulaşan cevher, liç öncesi gerekli pülp katı oranının ayarlanması amacıyla tikinerlere ve ardından liç işlemi için bulunan 3 adet karıştırmalı liç tanklarına beslenir. Tanklardaki gerekli bekleme süresi (24 saat) tamamlanan cevher liç tanklarının devamına sıralanmış olan 8 adet karbon adsorpsiyon tankına beslenir. Bu tesiste CIP (pülp içinde karbon) yöntemi ile altın geri kazanımı yapılmaktadır. Pülpün akış yönü, aktif karbonların akış yönüne ters olacak şekilde uygulanmaktadır. Adsorpsiyon işleminin ardından yüklü karbonlar sıyırma ünitesine gönderilirken, atık, detox ünitesinde siyanür bozundurması ve ağır metal çöktürülmesi işlemlerinin ardından atık havuzuna gönderilir. Tesise ait akım şeması Şekil 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.1. Kaymaz Altın Madeni Tesis Akım Şeması

Bu tez çalışmasında Kaymaz Altın Madeni'ne ait tesis atığı ile birlikte, karşılaştırma amacıyla yüksek tenörlü ve düşük tenörlü tüvenan cevherler de kullanılmıştır. Bu

çalışmada kullanılan tesis atığının temin edildiği dönemde tesise beslenen cevherin bilyalı değirmen Bond iş indeksi test sonucu Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Piknometre yöntemi ile yapılan özgül ağırlık testi sonucu ise 2,78 g/cm³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1. Temmuz 2020 Aylık Bond Test Sonuçları

Öğütülebilirlik (g/dv):	0,99
Bilyalı Değirmen İş İndeksi (kWs/t):	17,9

Çalışılan atık numunesi 2 hafta boyunca düzenli aralıklarla Kaymaz Tesis Detox ünitesinden, tüvenan cevherler ise stok sahasından temin edilmiştir. Tüvenan cevherler liç koşullarına uygun olacak şekilde boyutlandırılma amacıyla laboratuvar ölçekli ESSA marka çubuklu değirmen kullanılarak ~75 µm’ye öğütülmüştür. Detox ünitesinden pülp halinde temin edilen atık numunesi ise içindeki kimyasallardan arınması amacı ile su ile yıkanmış ardından laboratuvar ölçekli basınçlı pres filtreler aracılığı ile katı sıvı ayırımına tabi tutulmuştur. Öğütülen tüvenan cevherler ve filtrelenip Memmert 500 Etüv kullanılarak 50°C’de kurutulan atık numunesi Retsch PT 100 otomatik numune bölücü kullanılarak, besleme analizi ve test aşamaları için homojen olarak örneklenmiştir. Numunelerin Koza Altın İşletmeleri Kaymaz Analiz Laboratuvarı tarafından yapılan kimyasal analizleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

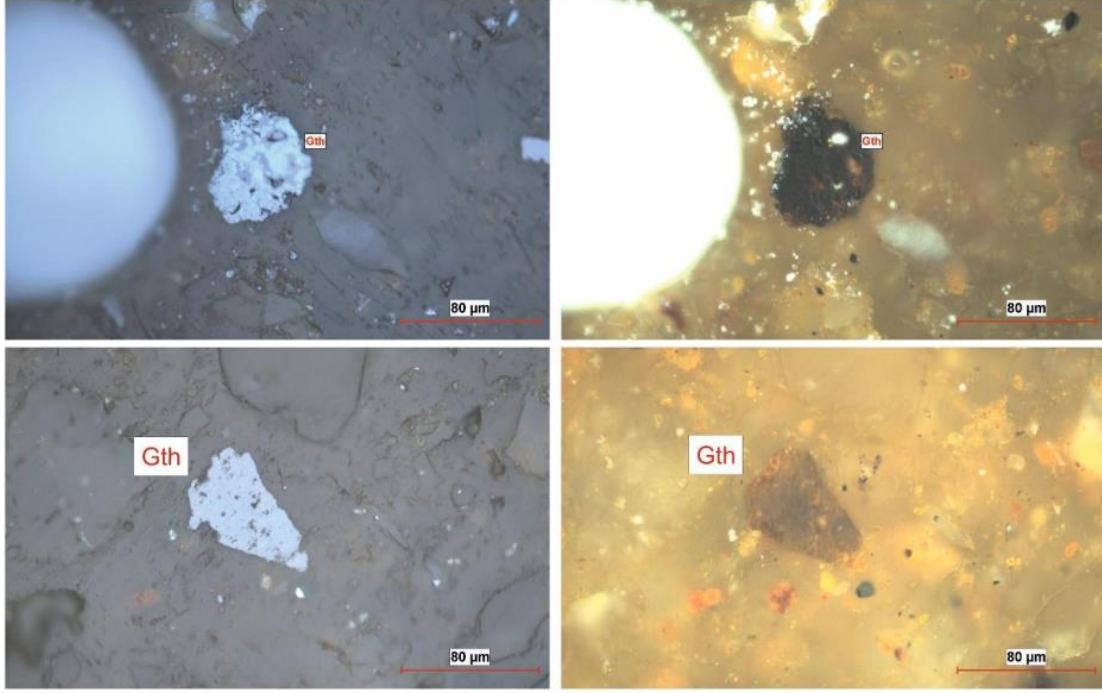
Çizelge 3.2. Numunelerin Kimyasal Analizi

Analiz	Au*	Ag*	Cu	Ni	As	Sb	Fe	S	C
Birim	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%
Cihaz	AAS	AAS	ICP-OES	ICP-OES	ICP-OES	ICP-OES	AAS	LECO	LECO
Saptama	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01
ATIK	0,52	2,11	71,76	1462,00	2687,00	49,32	64403	1,09	0,48
YÜKSEK TENÖR TÜVENAN	3,03	5,09	55,39	1520,88	3164,13	34,93	79646	6,67	0,07
DÜŞÜK TENÖR TÜVENAN	0,60	23,42	485,84	1297,83	1574,95	51,80	46915	0,36	0,37

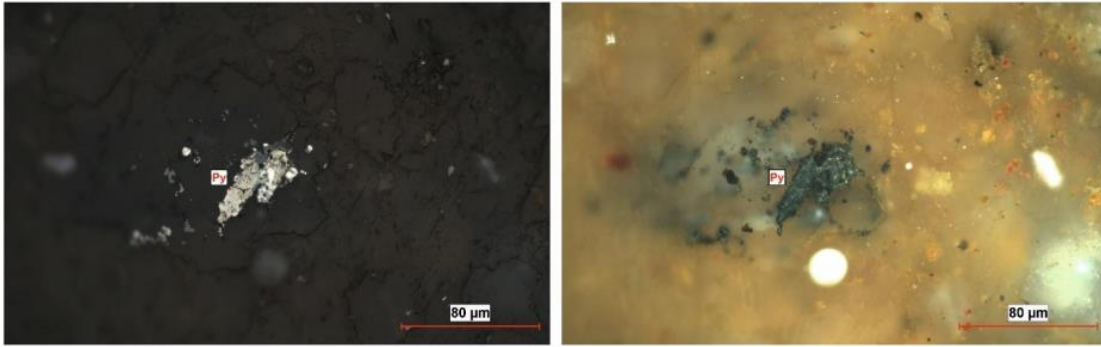
Bu analizlerde, Au, Ag ve Fe analizleri için PinAAcle 900f AAS (atomik absorpsiyon spektroskopisi) cihazı, S ve C analizlerinde LECO CS230SH cihazı ve Cu, Ni, Zn, Pb ve AS, için ise Agilent 5110 marka ICP-OES cihazı kullanılmıştır.

Kaymaz Altın Madeninden elde edilen atık numunesinin mineralojik ve petrografik analizleri ilk olarak Koza Altın İşletmelerinde hazırlanan parlak kesit örneklerinden optik mineraloji yöntemi ile yapılmıştır (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3). İkinci yöntem olarak MTA Elektron Mikroskobu Laboratuvarı'nda incelenmek üzere SEM-EDS analizine gönderilmiştir (Şekil 3.4). Yapılan analizlere göre;

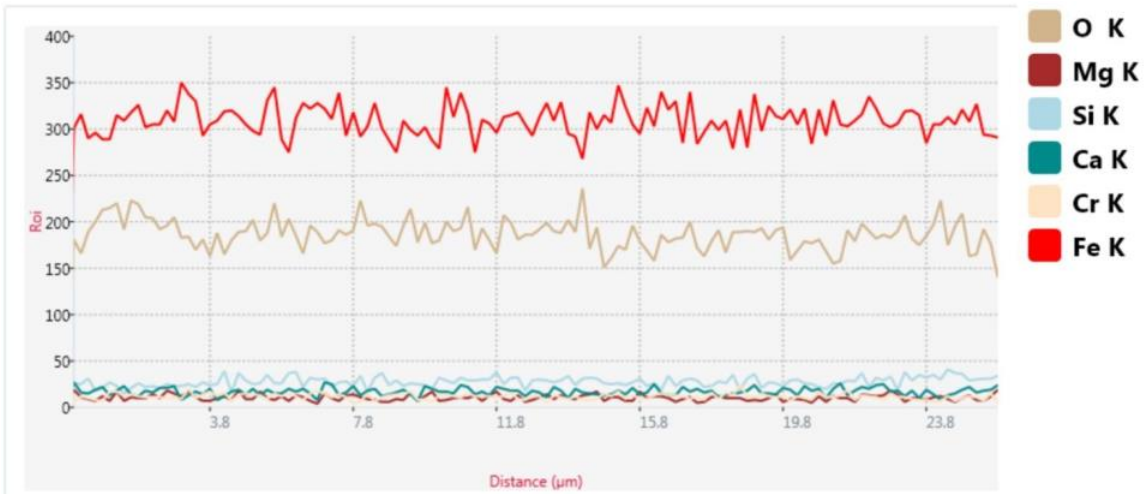
- Örnek başlıca pirit (FeS_2) ve Fe-Ox minerallerinden oluşmaktadır.
- Pirit ve Fe-Ox kristalleri 100 μm 'yi aşmayan kristaller halinde gözlenmektedir.
- Optik mineraloji yöntemi ile örnek içinde gözlenen sülfürlü mineral başlıca pirit olup oksidasyon zonunu temsil eden ise götit mineralidir. Yer yer serbest şekilde gözlenen piritler gözenekli bir yapıya sahiptir. Piritlerin gözenekli yapıda olması sıcaklığa bağlı gelişmiştir. Pirit kristalleri çok ince taneli ve genellikle tamamen ikincil götite dönüşmüş, nadir olarak da götit tarafından kısmen ornatılarak kalıntı piritler şeklinde kendini göstermiştir.
- SEM-EDS yöntemi ile MTA'da yapılan analizlerde, numunede yaklaşık 5 mikron boyunda barit ($BaSO_4$) minerali gözlemlenmiştir. Numunelerin geneli incelendiğinde Fe, O ve S elementlerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Pirit-arsenopirit birlikteliklerinin yer aldığı belirlenmiştir. Buna göre mineralojik ve petrografik analizler sonucunda belirlenen mineraller ile SEM-EDX analizinde gözlemlenen minerallerin birbirini destekler nitelikte olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerde optik ve elektron mikroskobu incelemelerinde herhangi bir Au varlığına rastlanmamıştır.



Şekil 3.2. Fe-Ox Grubun içinde Yer Alan Götite Mineralı

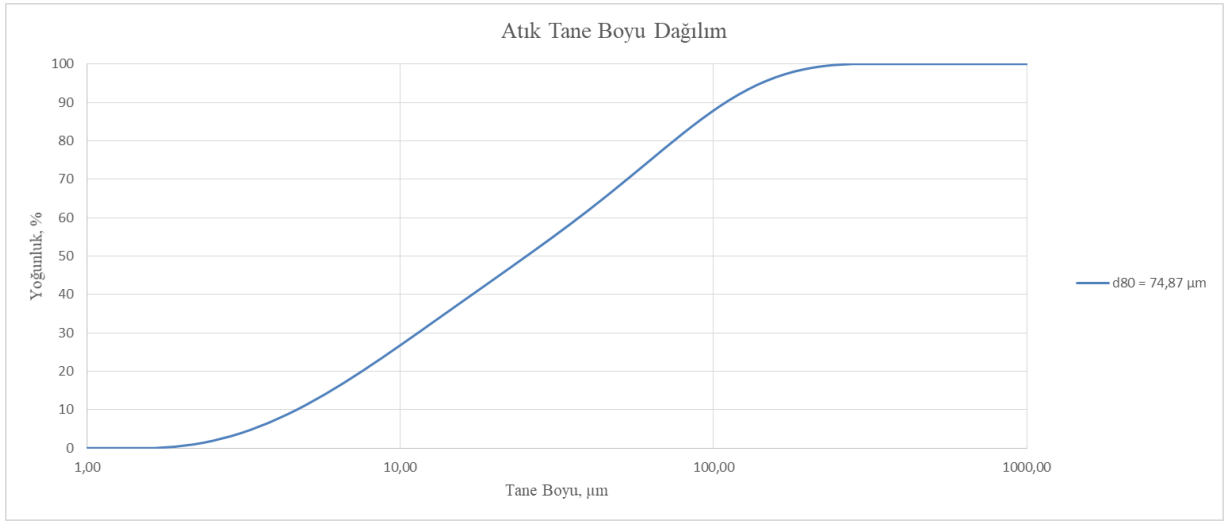


Şekil 3.3. Piritlerin Genel Görünümü

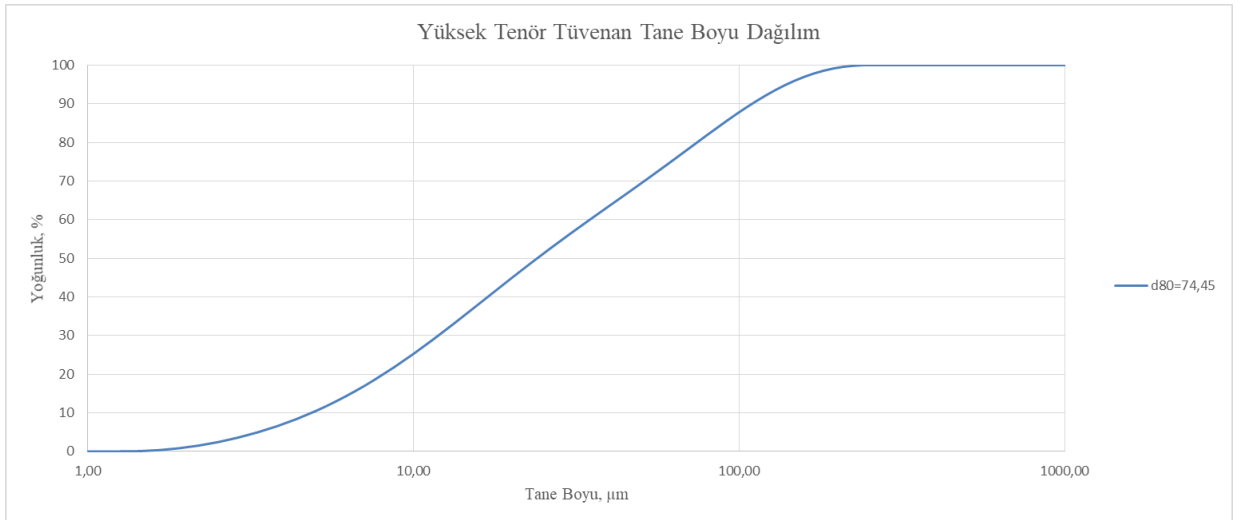


Şekil 3.4. SEM-EDS Analizi

Bu tez kapsamında, karıştırılmalı tank liçi ile üretim yapan Kaymaz Altın Madeni tesis atığındaki altının ince öğütme sonucu siyanür liçi ile özünme verimine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada yapılan tane boyu analizleri için Malvern Master Sizer 2000 cihazı kullanılmıştır. Başta atık olmak üzere yüksek ve düşük tenörlü tüvenan cevherlere yapılan tane boyu analizi sonucu d_{80} değerleri sırasıyla 74,87 μm , 74,45 μm ve 75,31 μm olarak ölçülmüştür. Malvern Master Sizer 2000 programından elde edilen veriler ile çizilmiş tane boyu dağılım grafikleri sırasıyla Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Atık Numunesi Tane Boyu Dağılım Grafiği



Şekil 3.6. Yüksek Tenörlü Cevher Numunesi Tane Boyu Dağılım Grafiği



Şekil 3.7. Düşük Tenörlü Cevher Numunesi Tane Boyu Dağılım Grafiği

Atık numunesi için tane boyu fraksiyonlarındaki Au miktarını tayin etmek amacıyla Retsch AS200 Basic yaş eleme cihazı kullanılarak ayrıca bir elek analizi yapılmış ve tane boyuna bağlı olarak Au içerikleri belirlenmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Atık Numunesi Tane Boyuna Bağlı Au Dağılımı

Tane Boyu (mm)	Miktar (%)	Au Miktar (ppm)	Au Miktar (%)
+0,106	9,11	0,54	10,22
-0,106,+0,075	5,81	0,55	6,65
-0,075+0,053	17,22	0,55	19,68
-0,053+0,038	9,60	0,53	10,57
-0,038+0,020	12,26	0,50	12,74
-0,020	46,00	0,42	40,15
Toplam			100,00

3.2. Öğütme Testleri

Numunelerin içerikleri ve tane boyu dağılımlarının tespit edilmesinin ardından öğütme koşullarının belirlenmesine geçilmiştir. İnce ve aşırı ince öğütme testleri için 0,25 kW motor gücüne, dakikada maksimum 1420 devir dönüş hızına ve 500 ml kapasiteli öğütme hücrelerine sahip laboratuvar tipi NETZSCH marka diskli karıştırılmalı bilyalı değirmen kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. NETZSCH Laboratuvar Tipi Karıştırma Dik Değirmen

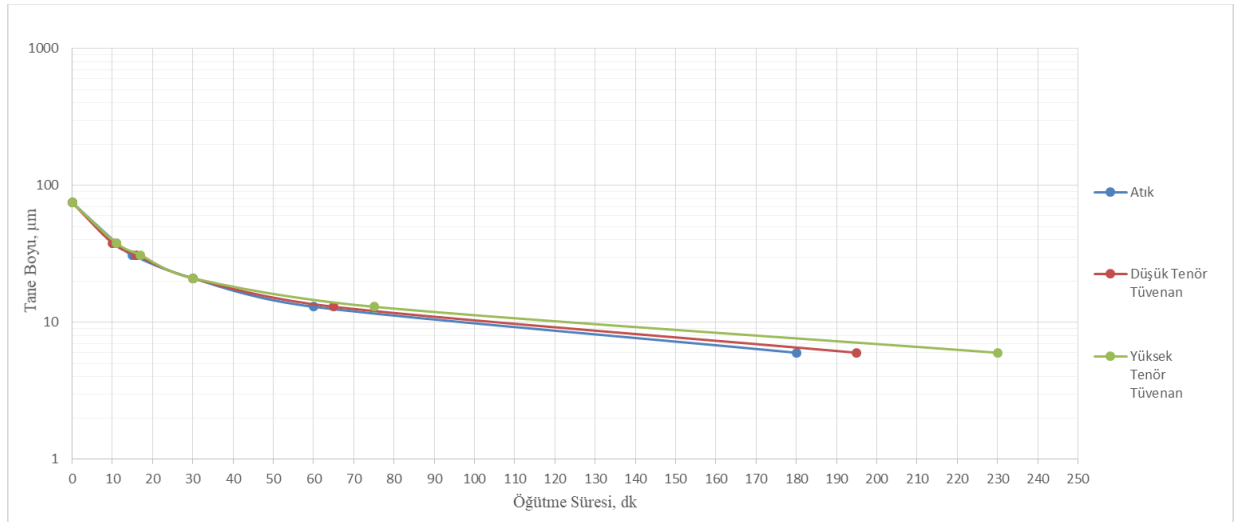
Öğütücü ortam olarak kullanılan zirkon bilyalar Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi 1,5 mm ve 3,5 mm olmak üzere 2 farklı boyda seçilmiştir. Testler, %80'i 1,5 mm %20'si ise 3,5 mm'lik bilyalardan oluşan %35 bilya şarjında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Zirkon Bilyalar

Öğütme testleri yaş olarak gerçekleştirilmiş olup pülp katı oranı %30 olacak şekilde ayarlanmıştır. Öğütme sonrası katı sıvı ayrımı laboratuvar ölçekli pres filtreler aracılığı ile yapılmış ardından öğütülmüş cevherler Memmert 500 Etüv kullanılarak 50°C’de kurutulmuştur.

Öğütme kalibrasyonu amacıyla, atık, yüksek tenörlü tüvenan ve düşük tenörlü tüvenan cevher olmak üzere her bir cevher için, 10, 15, 30, 60 ve 180 dakikalık öğütme süreleri belirlenmiştir. Öğütmeler tamamlandığında elde edilen tane boylarına bakılarak her bir cevher için yapılacak olan testlerin d_{80} tane boylarının ~75 μm , ~38 μm , ~31 μm , ~21 μm , ~13 μm ve ~6 μm olmasına karar verilmiştir. Bu tane boylarını elde etmek için, her bir cevher grubunun öğütme süreleri ilgili tane boylarına ulaşılacak şekilde ayarlanmıştır. Süreye bağlı öğütme eğrisi Şekil 3.10’da verilmiştir.



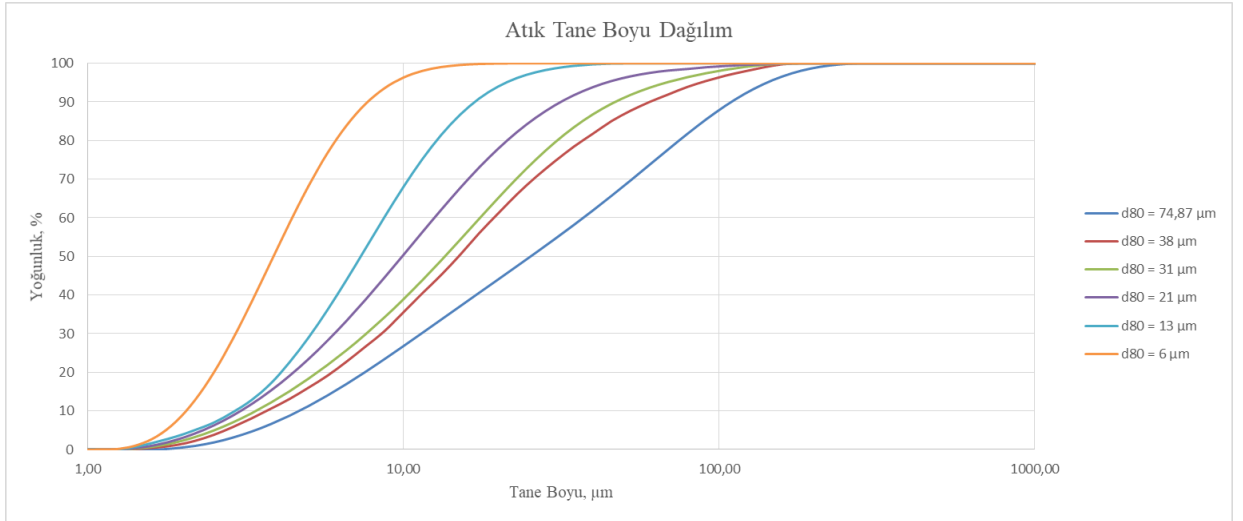
Şekil 3.10. Öğütme Süresine Bağlı d_{80} Grafiği

Atık, yüksek tenörlü ve düşük tenörlü tüvenan cevherler için, besleme de dahil olmak üzere yapılan, her öğütme sonucu elde edilen tane boyu dağılımları Malvern Master Sizer 2000 cihazı (Şekil 3.11) kullanılarak yapılmıştır.

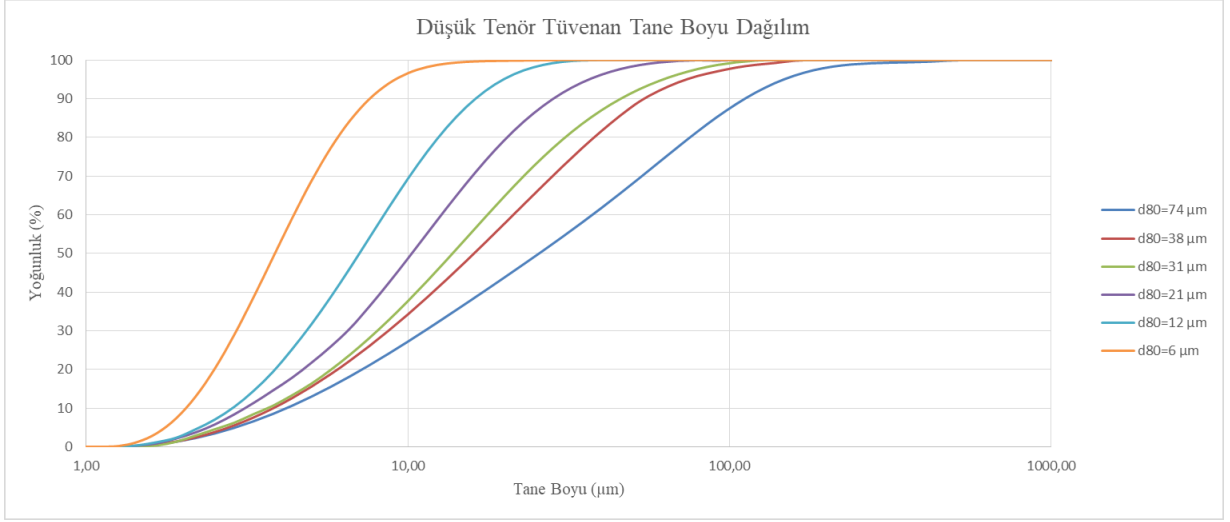


Şekil 3.11. Malvern Master Sizer 2000

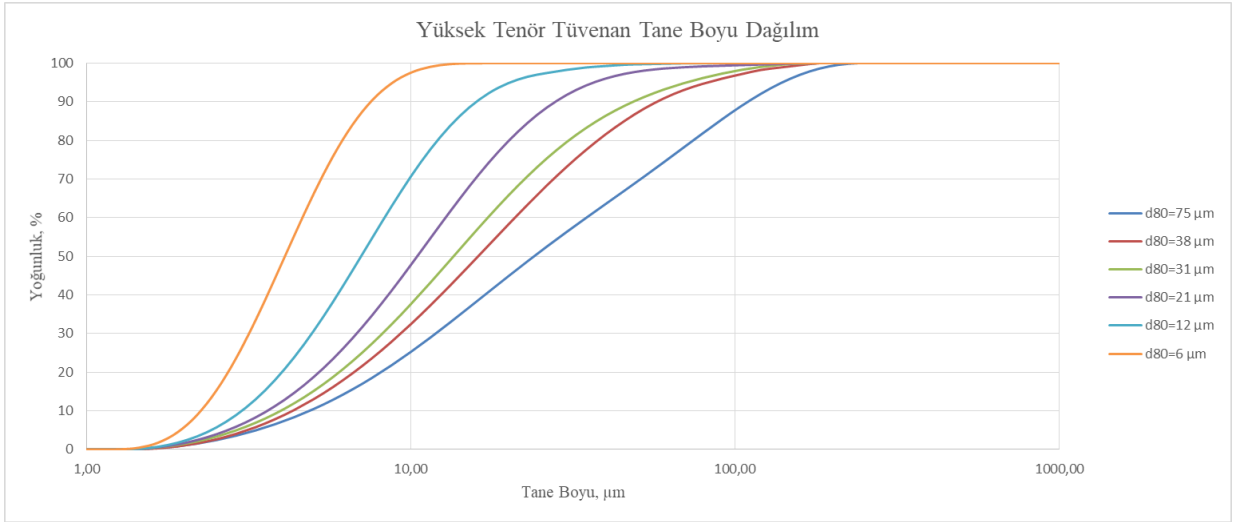
Tane boyu dağılım grafikleri, atık, yüksek tenörlü ve düşük tenörlü tüvenan cevherler sırasıyla Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.12. Öğütmeler Sonucu Atık Tane Boyu Dağılım Grafiği



Şekil 3.13. Öğütmeler Sonucu Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Tane Boyu Dağılım Grafiği



Şekil 3.14. Öğütmeler Sonucu Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Tane Boyu Dağılım Grafiği

3.3. Siyanür Liçi Deneyleri

Belirlenen tane boylarının eldesinin ardından her bir numune grubu için siyanür liçi deneyleri tasarlanmıştır. İlgili numuneler karıştırmalı tank liçi ile üretim yapan bir sahadan temin edildiğinden, laboratuvar ölçekli siyanür liçi zenginleştirme testlerinden biri olan şişe çevirme (bottle roll) testinin uygulanması uygun bulunmuştur. 3 farklı numune grubu için toplam 18 adet liç testi gerçekleştirilmiştir. Her bir testteki toplam liç süresi 48 saat olarak belirlenmiştir. Şişe çevirme test koşulları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Şişe Çevirme Test Koşulları

Pülp Katı Oranı	30%
Toplam NaCN (g/L)	2
Çözünmüş Oksijen Derişimi (ppm)	15-25
Liç Süresi (saat)	48
pH	10,5-11

Tüm şişe çevirme testleri için, Koza Kaymaz Metalürji Laboratuvarı tarafından optimum kabul edilen pH ve çözünmüş oksijen değerleri uygulanmıştır. Bu tezde kullanılan numunelerin tesisteki liç süreleri normal koşullar altında 24 saat olarak uygulanmaktadır. Fakat bu çalışmada liç süresindeki artışın etkisi de araştırılmak istenmiş, dolayısıyla liç süresi 48 saat olarak kararlaştırılmıştır. Numunelerin liç davranışının tespiti amacıyla 2, 4, 8 ve 24. saatlerde yüklü çözelti alınarak analize gönderilmiş ve bu saatlerdeki verimler hesaplanmıştır. Tesiste %43 olarak uygulanan pülp katı oranı, incelen tane boyunun viskozitede artışa sebep olma ihtimalinden dolayı şişe çevirme testlerinde %30 olarak uygulanmıştır. Testlerin 2, 4, 8 ve 24. saatlerinde pH ve serbest siyanür kontrolleri yapılmıştır. Bu kontroller doğrultusunda gözlenen NaCN tüketimleri sonucunda, tüm testler için, başlangıçta 1 g/L NaCN, 8. ve 24. saatlerde ise 0,5'er g/L NaCL eklemesiyle toplam 2 g/L NaCN kullanılması uygun bulunmuştur.

Tüm testler 3 litrelik cam şişelerde Şekil 3.15'te gösterilen test düzeneğinde 40 devir/dk dönüş hızında gerçekleştirilmiştir. Test koşullarında belirtilen oksijen miktarı, saf oksijen olarak düzenekte görülen akış ölçerler ile ayarlanarak yine Şekil 3.15'te görülen beyaz borular ile sisteme verilmiştir.



Şekil 3.15. Şişe Çevirme Test Düzeneği

Tüm testlerde siyanür ayarlaması için Merck marka NaCN, pH ayarlaması için ise yine Merck marka Ca(OH)₂ kullanılmıştır. pH ölçümlerinde WTW 315i marka pH metre, oksijen ölçümlerinde WTW Oxi 3205 oksimetre cihazları kullanılmış Bu ölçümler ilgili cihaz problemlerinin doğrudan pülp ile teması sağlanarak elde edilmiştir.

Serbest siyanür ölçümü için ise berrak (katı içermeyen) çözeltilere gerek duyulmaktadır, dolayısıyla ölçüm gereken koşullarda berrak çözelti, tane çöktürme yöntemi, vakum pompa ya da basınçlı pres filtre kullanımı ile katı sıvı ayrımı gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Çözeltideki serbest siyanür tayini için AgNO₃ titrasyonu yapılmış, gümüşe özgü bir renk indikatörü olan rodanin (p-Dimethylaminobenzalrhodanine) ve hassas ölçüm için manyetik karıştırıcı ile Bottle-Top Burette Titrette cihazı kullanılmıştır. Şişe çevirme testi örnek veri tablosu ve hesaplamalar EK 2'de verilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında kullanılan altın cevheri atığının, düşük tenörlü tüvenan ve yüksek tenörlü tüvenan cevherlerin besleme tane boyu dahil olacak şekilde her bir numune için 6 farklı tane boyu ($d_{80} = 75 \mu\text{m}$, $38 \mu\text{m}$, $31 \mu\text{m}$, $21 \mu\text{m}$, $13 \mu\text{m}$ ve $6 \mu\text{m}$) ile çalışılmıştır. Her bir numunenin her bir tane boyu için Çizelge 3.4'te verilen koşullar altında şişe çevirme tesleri yapılmış ve atık, düşük tenörlü tüvenan ve yüksek tenörlü tüvenan cevher için Au çözünme verimleri (%) sırasıyla Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Atık Au Çözünme Verimleri (%)

Liç Süresi (saat)	Verim, %					
	75 μm	38 μm	31 μm	21 μm	13 μm	6 μm
2	6,9	15,8	18,7	39,5	52,6	76,3
4	11,4	17,6	32,2	43,0	56,0	76,9
8	11,9	23,8	37,4	46,3	59,2	83,9
24	12,1	32,0	37,4	54,7	61,1	85,4
48	15,6	36,4	40,1	57,6	64,0	91,5

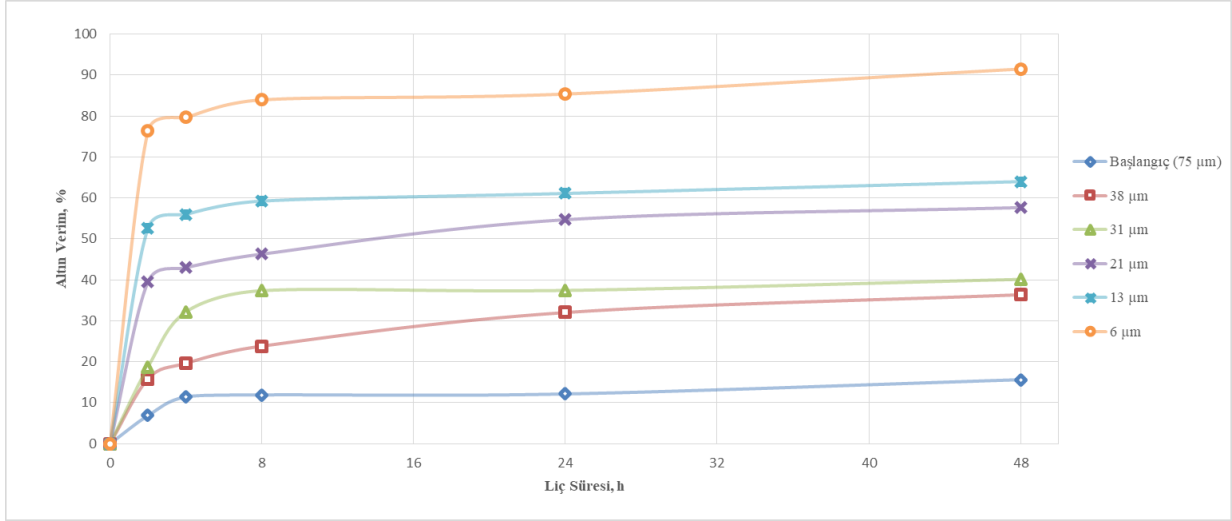
Çizelge 4.2. Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Verimleri (%)

Liç Süresi (saat)	Verim, %					
	75 μm	38 μm	31 μm	21 μm	13 μm	6 μm
2	80,8	81,0	81,2	83,4	87,2	87,6
4	83,5	84,0	84,1	85,4	88,8	89,0
8	84,5	84,6	85,6	86,8	89,6	89,8
24	85,6	86,0	87,0	89,8	94,3	95,0
48	86,3	88,3	90,4	91,9	96,1	97,4

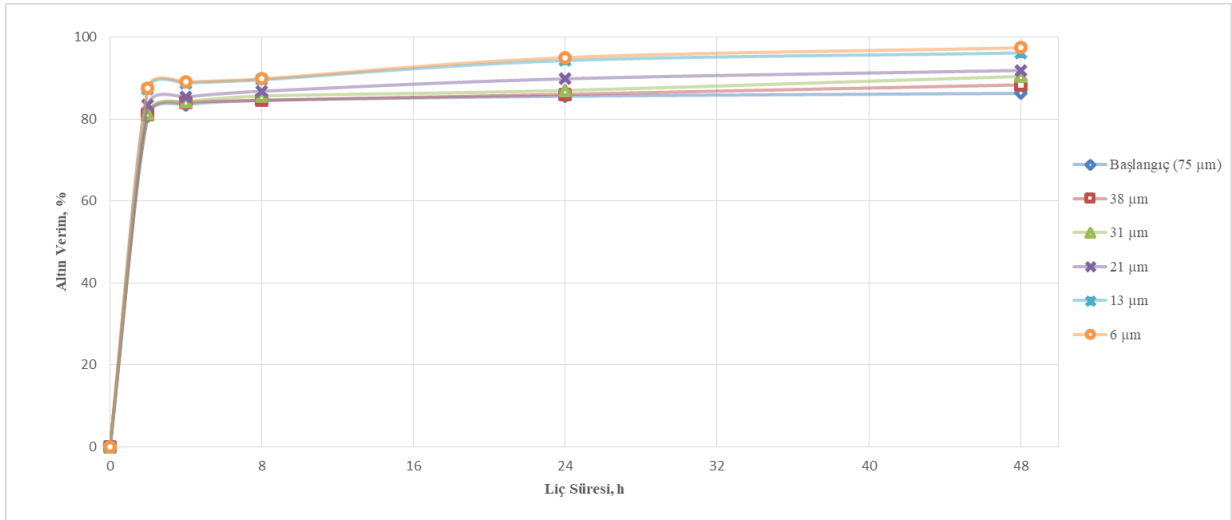
Çizelge 4.3. Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Verimleri (%)

Liç Süresi (saat)	Verim, %					
	75 μm	38 μm	31 μm	21 μm	13 μm	6 μm
2	73,2	75,8	77,4	86,2	86,7	87,7
4	76,2	76,9	78,6	86,4	91,2	91,9
8	77,2	77,8	78,8	87,3	91,5	92,5
24	78,5	81,0	81,6	88,3	93,4	96,1
48	86,3	88,9	90,8	92,5	96,1	98,2

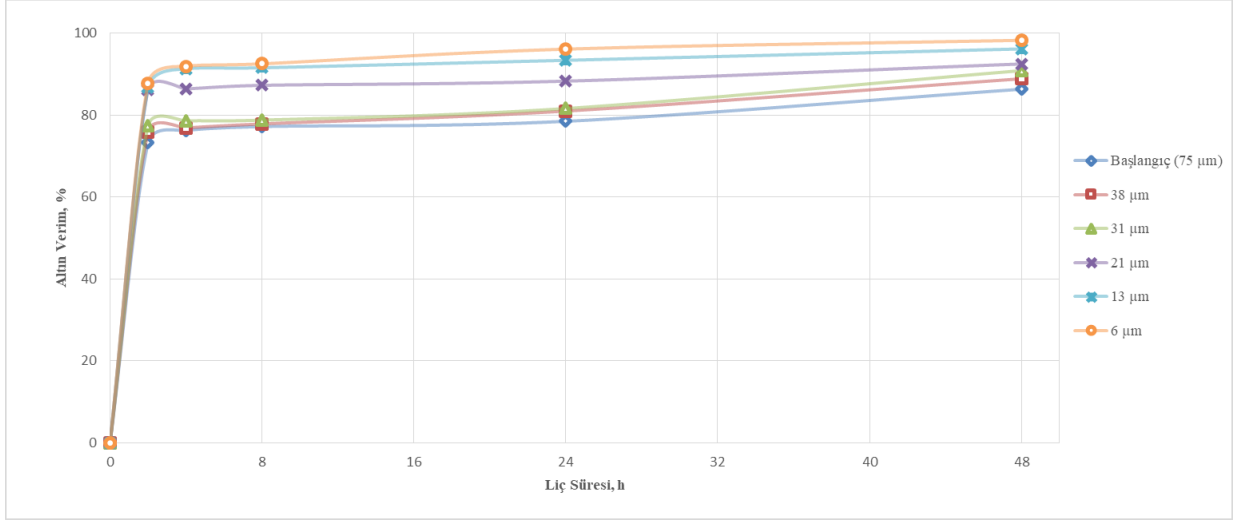
Atık, düşük tenörlü tüvenan ve yüksek tenörlü tüvenan cevherlerin, her bir tane boyu için yapılan şişe çevirme test sonuçlarına göre altın çözünme eğrileri sırasıyla Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1. Atık Au Çözünme Grafiği



Şekil 4.2. Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Grafiği



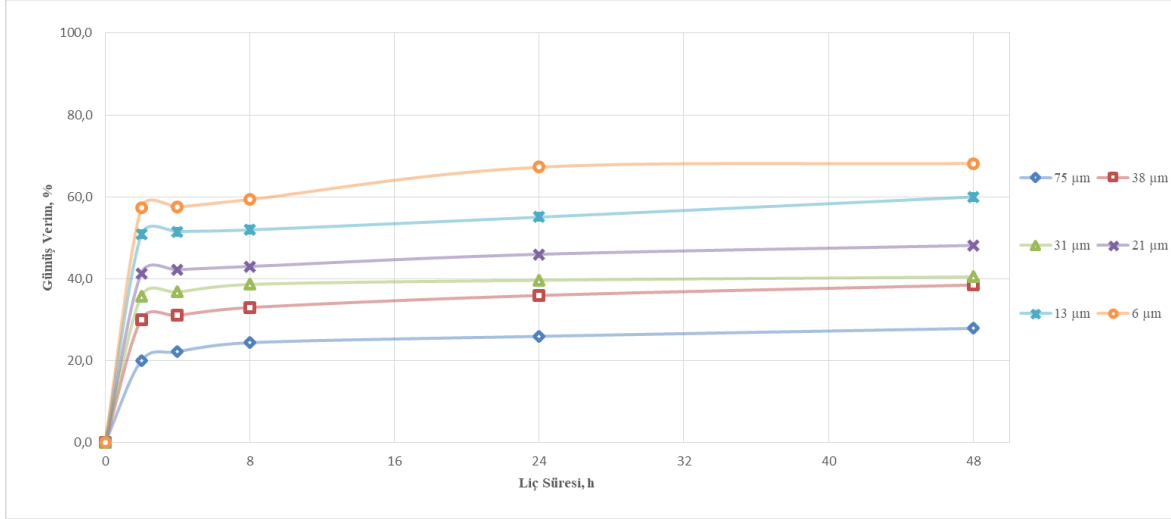
Şekil 4.3. Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Au Çözünme Grafiği

Yapılan tüm liç deneyleri sonucunda altın çözünme tepkime hızının ilk 2 saatte oldukça yüksek olduğu gözlenirken, sonrasında tepkime hızındaki artışın giderek yavaşladığı görülmektedir. Düşük ve yüksek tenörlü tüvenan cevherlerden, tesis hedef öğütme boyu olan $d_{80}=75 \mu\text{m}$ 'de 2 saatlik liç süresi sonunda, altın kazanımı sırasıyla %80,8 ve %73,2 olurken atık numunesinde bu değerlerin %6,9'da kaldığı görülmektedir. Ancak düşük ve yüksek tenörlü tüvenan cevherlerden farklı olarak atık numunesinde, tane boyu incelidikçe altın kazanımının belirgin bir biçimde arttığı görülmektedir.

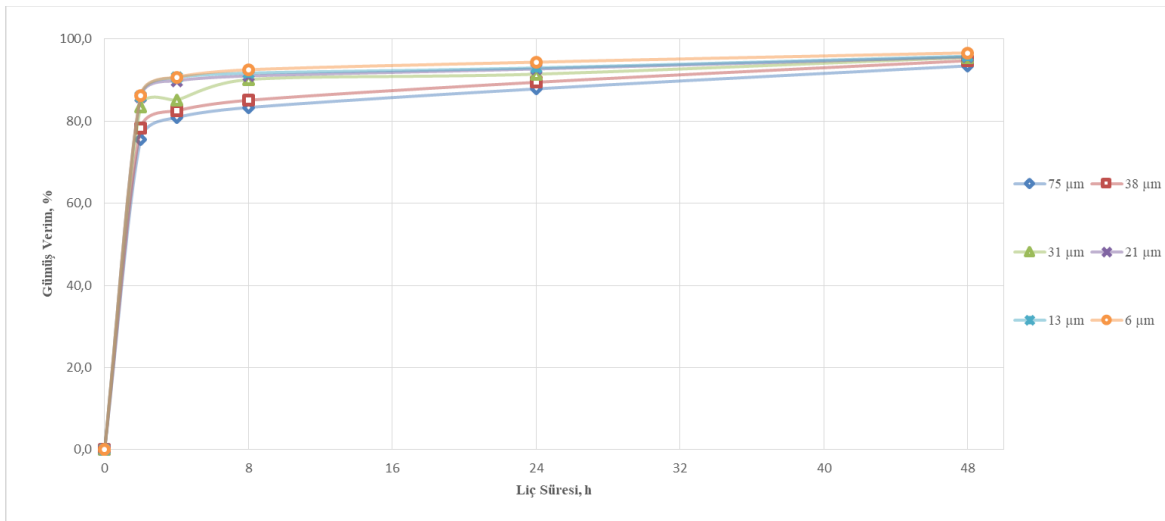
$d_{80}=6 \mu\text{m}$ 'de 2 saat sonunda %76,3'e çıkan altın verimi, 48 saat sonunda %91,5'e ulaşmıştır. Her ne kadar düşük ve yüksek tenörlü tüvenan cevherlerde inceliğe bağlı altın verimindeki artış sınırlı kalsa da atık numunesinde verim anlamında inceliğin büyük bir etkisi olduğu görülmektedir. Çok ince boylarda atık numunesinde bulunan altın taneleri öğütme sonucunda açığa çıkarak siyanürle temas etmekte ve çözeltilmeye geçmektedir.

Yüksek tenörlü tüvenan cevherde inceliğe bağlı verim artışı, düşük tenörlü tüvenan cevherdekine kıyasla daha belirgindir. Bu durumun, altın tanelerinin yüksek tenörlü tüvenan cevherde daha ince boylarda kapanım halde bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek tenörlü tüvenan cevherin As ve S içeriklerinin düşük tenörlü tüvenana göre daha yüksek olması (Çizelge 3.2) bu durumu destekler niteliktedir. Ancak, bu hipotezin ileri mineralojik analizlerle desteklenmesi gerekmektedir.

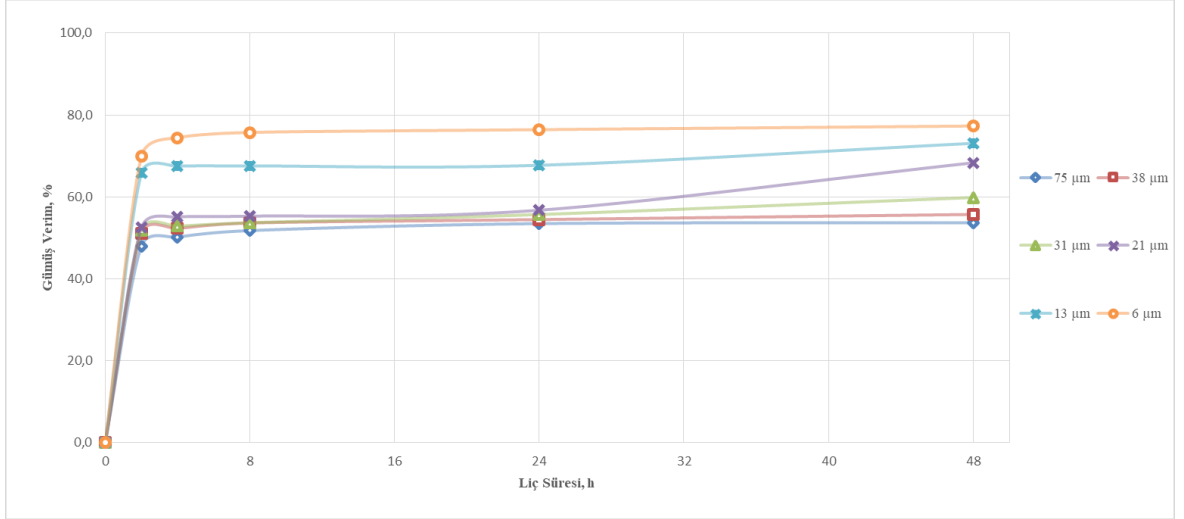
Atık, düşük tenörlü tüvenan ve yüksek tenörlü tüvenan cevherlerin aynı zamanda gümüş verimleri de hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Altın verimine ilişkin benzer sonuçlar gümüş verimi için de elde edilmiştir. Özellikle atık numunesinde inceliğe bağlı verim artışı belirgin bir biçimde görülmektedir.



Şekil 4.4. Atık Ag Çözünme Grafiği



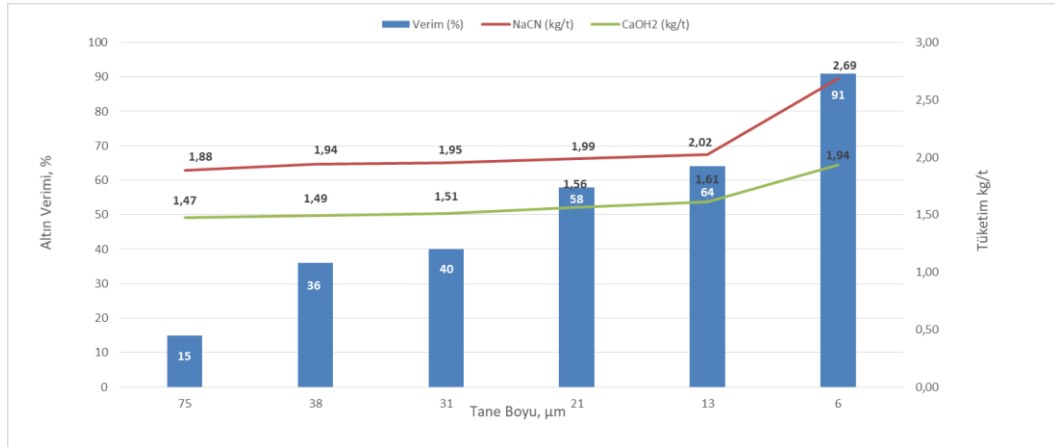
Şekil 4.5. Düşük Tenörlü Tüvenan Cevher Ag Çözünme Grafiği



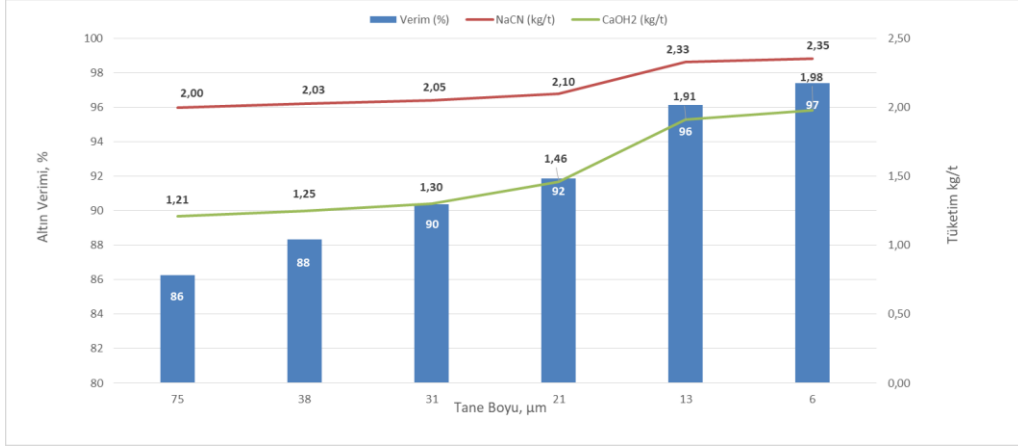
Şekil 4.6. Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher Ag Çözünme Grafiği

Şişe çevirme testleri sırasında başlangıç ve 48 saatlik (final) liç süresi için NaCN ve Ca(OH)₂ değerleri kaydedilmiş ve bu değerlere bağlı olarak tüketim hesabı yapılmıştır. Tane boyuna bağlı NaCN ve Ca(OH)₂ tüketimleri altın verimleriyle birlikte sırasıyla Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da verilmiştir. NaCN ve Ca(OH)₂ tüketimlerinin altın çözünme verimindeki artışla benzer eğilimde olduğu gözlenmiştir.

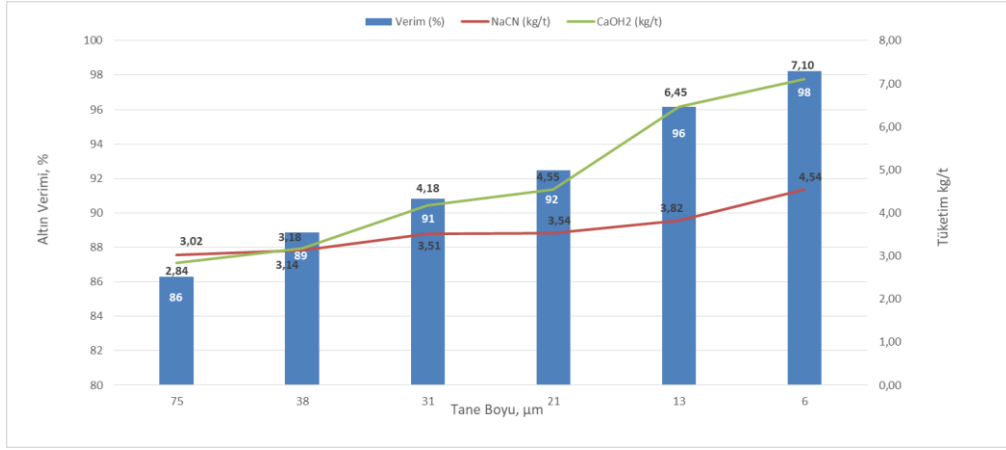
NaCN tüketimindeki tane inceliğine bağlı artış, altın çözünme verimindeki artış ile benzerliği göz önüne bulundurularak, artan yüzey alanının numuneler içerisindeki siyanür tüketen diğer metallerin de çözünmesi ile açıklanabilir. Numunelerin Çizelge 3.2’de verilen As ve S içeriklerinin bu görüşü destekler nitelikte olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Atık NaCN ve Ca(OH)₂ Tüketimleri



Şekil 4.8. Düşük Tenörlü Tüvenan NaCN ve Ca(OH)₂ Tüketimleri



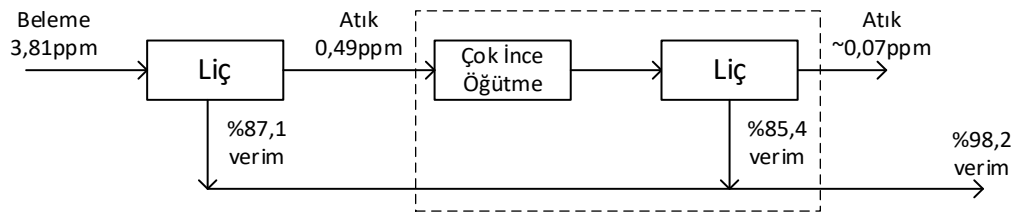
Şekil 4.9. Yüksek Tenörlü Tüvenan NaCN ve Ca(OH)₂ Tüketimleri

Tüm şişe çevirme testlerinde pH değeri 10,5-11,0 aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Liç testleri başlangıcında ölçülen pH değerlerinin incelen tane boyuna bağlı olarak düştüğü gözlenmiştir. pH değerini belirtilen aralıkta tutabilmek için Ca(OH)₂ ilavesi yapılmıştır. 48 saatlik liç süresi boyunca yapılan 2, 4, 8 ve 24 saatlik pH kontrollerinde, belirlenen optimum aralığın dışına çıkan bir pH değeri gözlenmemiştir. İncelen tane boyuna bağlı artan Ca(OH)₂ tüketimi, başlangıçta ayarlanan pH için kullanılan kireç miktarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Ca(OH)₂ tüketimindeki artışın, öğütme sonrası serbestleşen tanelerin artan zeta potansiyellerine bağlı olarak ortamın pH'ını düşürmesi ile açıklanabilir. Yüksek tenörlü tüvenan cevherdeki Ca(OH)₂ tüketiminin atık ve düşük tenörlü tüvenan cevhere göre oldukça yüksek olmasının, cevher içeriğindeki yüksek sülfür değerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. YORUM

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, altın madeni atığının ince ve ultra ince öğütülmesini takiben tekrardan liç edilmesi sonrasında altın çözünme verimindeki olası artışın değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın ana iskeleti altın madeni atığı etrafında şekillenmiş olsa da verim hızındaki artışı kıyaslayabilmek adına aynı zamanda tüvenan cevherler ile de farklı inceliklerde liç testleri yapılmıştır. Düşük ve yüksek tenörlü olarak sınıflandırılan iki farklı tüvenan cevher çalışmalar sırasında aynı madenden temin edilmiştir. Yapılan çalışmada atık tane boyu incelidikçe artan yüzey alanına bağlı olarak liç veriminde belirgin bir artışın sağlandığı gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında herhangi bir ekonomik değerlendirme yapılmamış olup, çok ince öğütme uygulamasının altın verimine olan etkisi incelenmiştir.

Atık numunesinin temin edildiği dönemde, ortalama 3,81 ppm Au içeriğine sahip tesis beslemesine yapılan şişe çevirme testleri sonucunda Au verimi ortalama %87,1, atık Au içeriği ise ortalama 0,49 ppm olarak kaydedilmiştir. Atığın tekrar öğütülerek liç edilmesi durumunda, Şekil 5.1’de gösterilen akım şeması ortaya çıkmaktadır. Atık numunesi için elde edilen şişe çevirme test sonuçları dikkate alındığında, atığın 6 mikron boyutuna öğütülerek 24 saat liç edilmesi sonucunda mevcut tesisteki nihai atık tenörünün yaklaşık 0,07 ppm’e kadar düşürülebileceği ve Au kazanımının toplamda %98,2’ye çıkabileceği öngörülmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Atıktan Altın Kazanımına İlişkin Akım Şeması

2011 yılında tesise beslenen tüvenan cevher üzerinde yapılan pilot ölçekli çok ince öğütme uygulaması sonrasında $P_{100} \sim 10 \mu\text{m}$ civarında liç veriminin %94’e kadar çıktığı rapor edilmiştir. Aynı dönemde, ortalama çalışma koşullarında mevcut tesis $P_{80} = 57,8$

um öğütme inceliğinde %88,2 Au verimi ile çalışmaktadır. Benzer bir sonucun atığın yeniden öğütülerek liç edilmesi ile elde edildiği görülmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan deneylere göre incelen tane boyunun kimyasal tüketiminde de önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Dolayısıyla, yapılacak bir maliyet hesabında öğütme maliyetlerinin yanı sıra kimyasal tüketim maliyetlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

İncelen tane boyuna bağlı olarak karşılaşılabilecek bir diğer problem ise pülpte katı oranının ayarlanmasıdır. Bu tez kapsamında yapılan deneylerde tane boyunun incelmesinin, susuzlandırma işlemlerini zorlaştırdığı gözlenmiştir. Literatürde yapılan araştırmalara göre bunun sebebi, artan yüzey alanının filtre kekinde daha fazla ince gözenek sunması ve kekin susuzlandırmaya karşı artan direnci dolayısıyla bu gözeneklerin daha fazla su ile dolması olabilir. Ayrıca filtre kekindeki kapiller basıncı, ince tane boyunda, iri tanelere göre oldukça yüksektir. Bu da filtrasyon işlemleri (vakum, basınç, santrifüj, elek, siklon) sonrası kekte kalan nem içeriğinin yüksek olmasına sebep olmaktadır [79, 80].

Bu sorunun önüne geçilebilmesi için alternatif susuzlandırma üniteleri üzerine durulabilir ya da mevcut susuzlandırma ünitelerinde çöktürme için kullanılan kimyasallarda dozaj arttırma gibi yöntemler denenebilir. Tüm bunların da maliyet hesabına dahil edilmesi gerekmektedir.

Atığın yeniden öğütülerek liç tabi tutulması durumunda ilave liç tankı kapasitesine ihtiyaç duyulacağı da unutulmamalıdır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Rose, Thomas Kirke. *The metallurgy of gold*. Vol. 2. C. Griffin, 1894.
- [2] Cotton, F. Albert, et al. *Advanced inorganic chemistry*. John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [3] Bhappu, Roshan B. "Hydrometallurgical processing of precious metal ores." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 6.1-4 (1990): 67-80.
- [4] Marsden, John, and Iain House. *The chemistry of gold extraction*. SME, 2006.
- [5] Yannopoulos, J. C. "Physical and chemical properties of gold." *The Extractive Metallurgy of Gold*. Springer, Boston, MA, 1991. 11-23.
- [6] La Brooy, S. R., H. G. Linge, and G. S. Walker. "Review of gold extraction from ores." *Minerals Engineering* 7.10 (1994): 1213-1241.
- [7] Deschenes, G., et al. "Investigation on the cyanide leaching optimization for the treatment of KCGM gold flotation concentrate—phase 1." *Minerals Engineering* 18.8 (2005): 832-838.
- [8] Pyke, B. L., R. F. Johnston, and P. Brooks. "The characterisation and behaviour of carbonaceous material in a refractory gold bearing ore." *Minerals Engineering* 12.8 (1999): 851-862.
- [9] Rees, K. L., and J. S. J. Van Deventer. "Preg-robbing phenomena in the cyanidation of sulphide gold ores." *Hydrometallurgy* 58.1 (2000): 61-80.
- [10] Afenya, P. M. "Treatment of carbonaceous refractory gold ores." *Minerals Engineering* 4.7-11 (1991): 1043-1055.
- [11] Dorr, John Van Nostrand, and Francis Lawrence Bosqui. *Cyanidation and concentration of gold and silver ores*. McGraw-Hill, 1950.
- [12] Acarkan, N., Altın, Gümüş Üretiminde Modern Yöntem: Siyanür Prosesi, Altın Madenciliği ve Çevre, Ed: A. E. Yüce, G. Önal, YMGV Yayınları, s:61-78, İstanbul, 1998.
- [13] McNulty, T. A *Metallurgical History of Gold*. Paper presented at American Mining Congress. San Francisco, CA, September 20, 1989.
- [14] Adamson, R. J_. "Gold Metallurgy in South Africa, Chamber of Mines of South Africa." (1972).
- [15] Gold Fields Mineral Services Ltd. Gold Survey Reports, London: Gold Fields Minerals Services Ltd, 1981-2004.
- [16] Huiatt, J. L., et al. "Cyanide from mineral processing." *Proceedings of Workshop*,

- Salt Lake City, UT, The National Science Foundation, Washington DC. 1983.*
- [17] Finkelstein, N. P. "Gold Metallurgy on the Witwatersrand." *Ed. R J. Adamson Cape Town: Cape and Transvaal Printers (1972): 295.*
- [18] Nicol, Michael J. "The anodic behaviour of gold." *Gold Bulletin* 13.2 (1980): 46-55.
- [19] Habashi, F. "The theory of cyanidation." *Transactions of the mineralogical society of AIME* 235 (1966): 236-239.
- [20] Elsner, L. "Beobachtungen über das Verhalten regulinischer Metalle in einer wässrigen Lösung von Cyankalium." *Journal für praktische Chemie* 37.1 (1846): 441-446.
- [21] Barsky, G., S. J. Swainson, and N. Hedley. "Dissolution of gold and silver in cyanide solutions." *Trans. AIME* 112 (1934): 660-77.
- [22] Cathro, K. J., and A. Walkley. "Cyanidation of gold." (1961) CSIRO Publication Melbourne, Australia: CSIRO, 1961.
- [23] Cathro, K. J. "Effect of oxygen in the cyanide process for gold recovery." (1963).
- [24] Caruso, S. C. "The Chemistry of Cyanide Compounds and Their Behavior in the Aquatic Environment." *Camige-Mellon Institute of Research, Division of Sponsored Research* 4400 (1975).
- [25] Cathro, K. J., and D. F. A. Koch. "The anodic dissolution of gold in cyanide solutions." *Journal of the Electrochemical Society* 111.12 (1964): 1416.
- [26] Logsdon, Mark J., Karen Hagelstein, and Terry Mudder. *The management of cyanide in gold extraction.* Ottawa: International Council on Metals and the Environment, 1999.
- [27] Akar, A., Cöcen, İ., and Malayoğlu, U. *Cevher Hazırlama El Kitabı Chapter 2, Kıрма, Yurt Madenciligi Geliştirme Vakfi, 2016.*
- [28] Demirel, H., *Cevher Hazırlama El Kitabı Chapter 3, Öğütme, Yurt Madenciligi Geliştirme Vakfi, 2016.*
- [29] Dorey, R., D. Van Zyl, and J. Kiel. "Overview of Heap Leaching Technology: Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects." *D. Van Zyl.* 1988.
- [30] McLean, E. J. "When is heap leaching the best choice." *Economics and Practice of Heap Leaching in Gold Mining, Aus.I.M.M., Melbourne, 5 1988.*
- [31] Arnold, J.R., J.M. Keane, V.G. Loftus, and J.K. Ahlness. Gold Heap Leach Information Exchange. Pages 283-311 in *Gold '90. Proceedings of Gold 1990*

Symposium. Edited by D.M. Hausen, D. N. Halbe, E.U. Petersen, and W.J. Tafuri. Littleton CO:SME. 1990.

- [32] Fleming, C. A. "Hydrometallurgy of precious metals recovery." *Hydrometallurgy* 30.1-3 (1992): 127-162.
- [33] Yüce, A E. (2014). Cevher hazırlama el kitabı. In G. Önal, G. Ateşok, & K. T. Perek (Eds.), *Cevher Hazırlama El Kitabı* (1st ed., pp. 425–450). Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı. 1995.
- [34] Prasad, M. S., R. Mensah-Biney, and R. S. Pizarro. "Modern trends in gold processing—overview." *Minerals Engineering* 4.12 (1991): 1257-1277.
- [35] East, D.R., J.P. Haile, and R.V. Beck. Optimization Technology for Leach Pad Liner Selection. Geotechnical Aspects of Heap Leach Design. Littleton, CO:SME 1987.
- [36] Strachan, Clint, and D. J. A. van Zyl. "Leach pads and liners. In van Zyl, DJA; Hutchison, IPG; Kiel, JE, editors, 1988, Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects: Society of Mining Engineers." (1988): 176-202.
- [37] Dewhirst, RF, Moulton, SP & Coetzee, J. A. "Intensive cyanidation for the recovery of coarse gold." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 84.6 (1984): 159-163.
- [38] Davidson, RJ, Brown, GA, Schmidt, CG, Hanf, NW, Duncanson, D. & Taylor, J. D. "The intensive cyanidation of gold-plant gravity concentrates." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 78.6 (1978): 146-165.
- [39] Chamberlin, Paul D. "Status of Heap, Dump, and in Situ Leaching of Gold and Silver." *World Gold*. 1989.
- [40] Subrahmanyam, T.V., Forsberg, K.S. Eric. Developments in Gold Processing Technology: A Comparison of Methods. *Gold Mining* 88, Chapter 19, pp:365-285, USA. 1988.
- [41] Aydin, Beste, Huseyin Basturkcu, and Alim Gul. "The influence of pre-aeration on cyanide leaching of a non-refractory sulphide gold and silver ore." *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 51.2 (2015): 647-660.
- [42] Lee, V., P. Robinson, and F. Merz. "Peroxide addition improves gold recovery and saves reagents at pine creek gold mine." *Randol Phase IV Gold Workshop, Sacramento, CA*. 1989.
- [43] Bosch, D. W. "Retreatment of residues and waste rock." *Extr. Metall. Gold South*

- Afr* 2 (1987): 707-743.
- [44] Mansanti, J. G., et al. "Double thickener circuit at Gold Fields' Chimney Creek." *Mining, Metallurgy & Exploration* 6.4 (1989): 179-185.
- [45] McDougal, G. J., and R. D. Hancock. "Gold complexes and activated carbon: A literature review." *Gold Bulletin* 14.4 (1981): 138-153.
- [46] Merme, D.M., Carbon-in-Leach. First International Symposium on Precious Metals Recovery June 10-14, Reno Nevada, USA (1984).
- [47] Laxen, Peter A. "Carbon-in-pulp processes in South Africa." *Hydrometallurgy* 13.2 (1984): 169-192.
- [48] Fleming, C. A., et al. "Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits." *Minerals Engineering* 24.6 (2011): 484-494.
- [49] Gao, Mingwei, and Ralph Holmes. "Developments in Fine and Ultrafine Grinding, Technologies for the Minerals Industry." *The Institute of Materials and Mining (IOM3) Mining, Feature, March* 1 (2008): 20078.
- [50] DİKMEN, Serkan, and Ş. Levent ERGÜN. "KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENLER." *Bilimsel Madencilik Dergisi* 43.4 (2004): 3-15.
- [51] HACIFAZLIOĞLU, Hasan. "İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin Tanıtılması." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9.1 (2009): 17-30.
- [52] Gao, Ming-Wei, and Eric Forssberg. "A study on the effect of parameters in stirred ball milling." *International Journal of Mineral Processing* 37.1-2 (1993): 45-59.
- [53] Jankovic, A. "Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills." *Minerals Engineering* 16.4 (2003): 337-345.
- [54] Wang, Yanmin, and Eric Forssberg. "Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution." *China Particuology* 5.3 (2007): 193-201.
- [55] Corrans, I. J., and J. E. Angove. "Ultra fine milling for the recovery of refractory gold." *Minerals Engineering* 4.7-11 (1991): 763-776.
- [56] Harbort, G., M. Hourn, and A. Murphy. "IsaMill ultrafine grinding for a sulphide leach process." *AJM* (1998): 1-6.
- [57] Celep, O., Alp, İ., 2008, Karıştırmalı Değirmenler İle İnce Öğütmenin Refrakter Altın Cevherlerine Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, *Madencilik*, 47 (3), 15-26.
- [58] Puchegger, Franz. "Zum mechanischen und chemischen Verhalten von

- Calcitspaltflächen." *Naturwissenschaften* 39.18 (1952): 428-429.
- [59] Juhász, A. Z. "Mechanochemical activation of silicate minerals by dry fine grinding." *Aufbereitungstechnik* 10 (1974): 558-562.
- [60] Baláz, P. "Mechanical activation in hydrometallurgy." *International journal of mineral processing* 72.1-4 (2003): 341-354.
- [61] Tkáčová, Klára. *Mechanical activation of minerals*. Veda, 1989.
- [62] AKÇIL, Ata, and Hasan ÇİFTÇİ. "REFRAKTER ALTIN CEVHERLERİNE UYGULANAN ÖN İŞLEMLER." *Bilimsel Madencilik Dergisi* 48.1: 17-30.
- [63] Kwade, A., 1999; "Wet Comminution in Stirred Media Mills – Research and Its Practical Application", *Powder Technology*, 105, 14-20.
- [64] Jankovic, A., 2001; "Media Stress Intensity Analysis for Vertical Stirred Mills", *Minerals Engineering*, (14)10, 337-345.
- [65] Zheng, J., Haris, C.C. ve Samasundaran, P., 1996; "A Study on Grinding and Energy Input in Stirred Media Mills", *Powder Technology*, 86(2), 171-178.
- [66] Toraman, Öner Yusuf, Serkan ÇAYIRLI, and Bilge Öksüzoğlu. "YATAY KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMEN: ISAMILL." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 4.2 (2015): 99-106.
- [67] Orumwense, Osawaru A., and Eric Forssberg. "Superfine and ultrafine grinding—a literature survey." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 11.1-2 (1992): 107-127.
- [68] www.isamill.com, "İsamill: Sınırları kırıyoruz" Tanıtım Kitapçığı, 12 s. (erişim tarihi 06.10.2021).
- [69] M.J. Mankosa, G.T. Adel, R.H. Yoon, Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal, *Powder Technology* 49 (1986) 75–82.
- [70] He, Mingzhao, Yanmin Wang, and Eric Forssberg. "Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review." *Powder technology* 147.1-3 (2004): 94-112.
- [71] Yue, J., and B. Klein. "Grinding in a Stirred Bead Mill." *Advances in comminution* (2006): 87.
- [72] Mankosa, M. J., G. T. Adel, and R. H. Yoon. "Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal." *Powder Technology* 59.4 (1989): 255-260.
- [73] Tuzun, Mustafa Asim. *A study of comminution in a vertical stirred ball mill*. Diss. 1993.
- [74] Mehmet, A. T. E. Ş. "Nanoparçacıkların ölçme ve inceleme teknikleri." *Türk*

- Bilimsel Derlemeler Dergisi 11.1 (2018): 63-69.
- [75] The Influence of Suspension Properties on Ultra-Fine Grinding in Stirred Ball Mills
- [76] Ellis, S., Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, and W. A. Kalgoorlie. "Ultra fine grinding—a practical alternative to oxidative treatment of refractory gold ores." *Eighth Mill Operators Conference*. Townsville QLD, Australia, 2003.
- [77] González-Anaya, J. A., F. Nava-Alonso, and E. T. Pecina-Treviño. "Gold recovery optimization of a refractory concentrate by ultrafine grinding—A laboratory study." *Mining, Metallurgy & Exploration* 28.2 (2011): 94-101.
- [78] CELEP, OKTAY, and E. Y. Yazici. "Ultra fine grinding of silver plant tailings of refractory ore using vertical stirred media mill." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23.11 (2013): 3412-3420.
- [79] Couch, Gordon R. "Advanced coal cleaning technology." (1991).
- [80] Lockhart, N. C., and C. J. Veal. "Coal dewatering: Australian R&D trends." *Coal Preparation* 17.1-2 (1996): 5-24

EKLER

EK 1 – Tezden Türetilmiş Bildiriler

B. Bıyıklı, S. Sevgül, H. Dünder, 2022, The Effect of Fine Grinding on Cyanide Leaching of Gold Mine Tailings, Proceedings of the 27th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 22-25 March 2022, pp.895-902.

EK 2 – Şişe Çevirme Test Veri Tablosu ve Hesaplama

Numune Adı	Yüksek Tenörlü Tüvenan Cevher					
Numune Alt Adı	75 µm	38 µm	31 µm	20 µm	12 µm	6 µm
BOŞ ŞİŞE (g.)	1218	1223	1222	1236	1148	1248
ilk pH	7,45	6,01	5,60	5,10	4,66	4,09
KİREÇ (g.)	0,29	0,35	0,46	0,50	0,71	1,35
pH	10,51	10,62	10,7	10,56	10,55	10,58
NaCN (g.)	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
O ₂	0,3	0,4	0,3	0,2	0,5	0,3
DOLU ŞİŞE (g.)	1606	1610	1609	1621	1537	1630
2 saatlik pH	10,62	10,5	10,61	10,5	10,6	10,45
2 saatlik O ₂	13	15	17	18	19	19
ilave Kireç (g.)	-	-	-	-	-	-
ilave NaCN (g.)	-	-	-	-	-	-
4 saatlik pH	10,5	10,3	10,5	10,4	10,4	10,25
4 saatlik O ₂	22	20	18	19	22	19
ilave Kireç (g.)	-	-	-	-	-	-
ilave NaCN (g.)	-	-	-	-	-	-
8 saatlik pH	10,33	10,21	10,4	10,3	10,3	10,04
8 saatlik O ₂						
ilave Kireç (g.)	-	-	-	-	-	0,11/pH-10,55
ilave NaCN (g.)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
24 saatlik pH	10,72	10,36	10,82	10,68	10,55	10,82
24 saatlik O ₂	19	11	19	24	24	22
ilave Kireç (g.)	-	-	-	-	-	-
ilave NaCN (g.)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
FİNAL pH	11,05	10,35	11,07	11,13	10,94	10,49
FİNAL O ₂	19	18	19	20	19	22
DOLU ŞİŞE (g.)	1525	1533	1532	1541	1457	1558
SERBEST SİYANÜR (ppm.)	790	740	580	570	450	140
Atık Katı (g.)	113,62	113,83	114,03	112,76	113,72	112,92
Solüsyon (g.)	193,38	196,17	195,97	192,24	195,28	197,08

ATIK (31 µm)

$$Bb = Ss + Aa$$

B: Besleme miktarı, gram
b: Beslemedeki Au içeriği, ppm

S: Yüklü solüsyon miktarı, gram
s: Yüklü solüsyondaki Au içeriği, ppm

A: Atık miktarı, gram
a: Atıktaki Au içeriği, ppm

$$V = Ss/Bb$$

Boş Şişe, g	1230
Dolu Şişe g	1532
Siyanür Miktarı g	0,51
Besleme Katı Miktarı, g	110
Su Miktarı, g	256
Atık Miktarı, g	108,75
Solüsyon Miktarı, g	193,25
Çekilen Solüsyon ml	10
Süreler, s	Başlangıç
Serbest Siyanür, ppm	1992,1875
pH	10,65
Serbest O ₂ ppm	0,6
Solüsyon Miktarı, g	256

BESLEME		Au, ppm
SOLÜSYON	2h	0,04
	4h	0,07
	8h	0,08
	24h	0,08
	48h	0,09
ATIK		0,315

Süreler, s	Başlangıç	2	4	8	24	48
Serbest Siyanür, ppm	1992,1875	-	-	-	790	1155
pH	10,65	10,6	10,44	10,35	10,37	10,14
Serbest O ₂ ppm	0,6	11	10	13	23	22
Solüsyon Miktarı, g	256	246	236	226	211	201

Solüsyona Göre Kümülatif Saatlik Verim

Süre, saat	Au, ppm	Solüsyon Miktarı g	Solüsyondaki Au Miktarı, mg	Çekilen Sol. Au Miktarı mg	Kümülatif Altın Miktarı, mg	Solüsyona Göre Saatlik Verim %
0	0	256	0,000	0	0	0
2	0,04	246	0,010	0,00040	0,010	18,71
4	0,07	236	0,017	0,00070	0,018	32,19
8	0,08	226	0,019	0,00082	0,020	37,36
24	0,08	211	0,018	0,00084	0,020	37,42
48	0,09	201	0,018	0,00091	0,022	40,12

Atığa Göre Nihai Verim

Besleme Au Tenörü, ppm	0,52
Besleme Miktarı, g	110
Besleme Altın Miktarı mg	0,06
Atık Au Tenörü, ppm	0,315
Atık Miktarı, g	108,75
Atık Au Miktarı mg	0,03
Final Sol. Au Tenörü ppm	0,09
Final Sol Miktarı, g	193
Final Sol. Au Miktarı, mg	0,02
Hesaplanan Besleme Au, ppm	0,50
Total Au, mg	0,05
Final Sol. Liç Verimi %	40,12
Atıktan Liç Verimi %	37,42
NaCN Tüketimi (kg/t)	1,95
Ca(OH) ₂ Tüketimi (kg/t)	1,51

