

**BİR ALTIN CEVHERİNDE BAŞLICA İŞLEM
PARAMETRELERİNİN LİÇ VERİMİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATIONS ON THE EFFECTS OF MAIN
OPERATING PARAMETERS ON THE LEACHING
RECOVERY FOR A GOLD ORE**

SERKAN SARIKAYA

DR. E. CANER ORHAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

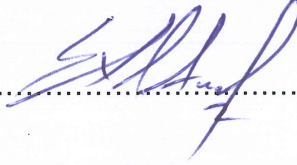
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

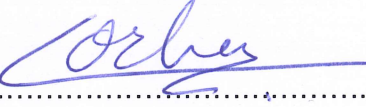
2018

SERKAN SARIKAYA' nın hazırladığı “**Bir Altın Cevherinde Başlıca İşlem Parametrelerinin Liç Verimine Etkilerinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

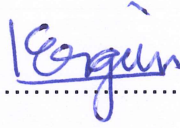
Prof. Dr. N. Emre ALTUN
Başkan



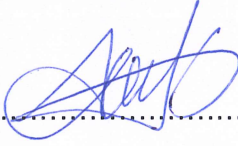
Dr. E. Caner ORHAN
Danışman



Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN
Üye



Prof. Dr. Abdullah OBUT
Üye



Dr. Öğr. Üyesi Ayşe ÜÇYILDIZ
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☐ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☒ **Tezimin/Raporumun 31/12/2019 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

23 / 07/ 2018



Serkan Sarıkaya

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

12/06/2018

SERKAN SARIKAYA

ÖZET

BİR ALTIN CEVHERİNDE BAŞLICA İŞLEM PARAMETRELERİNİN LİÇ VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan SARIKAYA

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. E. Caner ORHAN

Haziran 2018, 96 sayfa

Siyanür ile liç işlemi, uzun yıllardır altın üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda Türkiye’de altın üretimi yapan birçok tesiste siyanür liçi uygulaması yapılmaktadır.

Siyanür liç yöntemlerinden biri olan ve yaygın olarak kullanılan tank liçi işleminde, altının çözünme kinetiğini; cevherin tane boyu, mineralojisi, serbestleşme boyu, pülp katı içeriği, çözeltideki serbest siyanür derişimi, çözünmüş oksijen derişimi, cevher içerisindeki diğer çözünebilir metaller, sülfür mineralleri, vb. etkilemektedir.

Altın üretim tesislerinde verimin mümkün olan en üst düzeyde tutulabilmesi amacıyla, serbest siyanür derişimi ve oksijen derişimi, çoğunlukla, altının çözünme tepkimesinin gerektirdiğinden oldukça yüksek (aşırı) molar oranlarda tutulmaktadır. Diğer taraftan, cevher mineralojisi müdahale edilebilir bir parametre olmamakla

birlikte, rezervin farklı yerlerinde cevher özelliklerinin değişmesinden kaynaklanabilecek sıkıntıların en aza indirilmesi doğrultusunda belirli bir cevher harmanlama stratejisi kullanılabilmektedir. Dolayısıyla, çalışmakta olan bir tesiste, liç kinetiğini önemli ölçüde etkileyen cevher tane boyu ve pülp yüzde katısı parametreleri önemli işlem değişkenleri olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, bir altın madeninin liç devresi beslemesinden alınan numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, tane boyu dağılımı, pülp katı içeriği ve başlangıç serbest siyanür derişimi parametrelerinin liç kinetiği üzerine etkileri incelenmiştir.

Deney sonuçları, besleme katı içeriğinin %45'ten %50'ye çıkarılması ile durma zamanının 48 saate çıkarılabileceğini ve bu durumda metal kazanım veriminde %0,5-1,0 aralığında artış elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Mevcut öğütme devresinde, liç besleme inceliğinin 66 μm 'dan 37 μm 'a düşürülmesi, metal kazanım veriminde %1,12 artış sağlayabilecektir.

Anahtar Kelimeler: altın, liç, siyanür, siyanürleme, tank liçi, liç kinetiği

ABSTRACT

INVESTIGATIONS ON THE EFFECTS OF MAIN OPERATING PARAMETERS ON THE LEACHING RECOVERY FOR A GOLD ORE

Serkan SARIKAYA

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Dr. E. Caner ORHAN

June 2018, 96 pages

Cyanide leaching has been widely used in the recovery of gold for many years. In recent years, cyanide leaching has also been applied in many gold producing plants in Turkey.

In tank leaching, which is one of the widely used cyanidation methods, kinetics of gold dissolution is affected by; ore particle size, mineralogy, liberation size, percent solids of the slurry, free cyanide concentration, dissolved oxygen concentration, other soluble metals, sulfide minerals, etc.

In gold processing plants, in order to maintain as high gold recovery as possible, free cyanide concentration and dissolved oxygen concentration levels are kept at

much higher (excess) molar ratios than the required molar balances. On the other hand, although ore mineralogy is not an adjustable parameter, particular ore blending strategies could be applied in order to minimize the issues arising from the ore variability. Therefore, in an operating plant, ore grind size and pulp solids content stand out as important process variables as they significantly affect the leaching kinetics.

In this thesis, the effects of particle size distribution, pulp solids content and initial free cyanide concentration on leaching kinetics are investigated with the experimental studies carried out on samples taken from the slurry feed of the leaching circuit of a gold mine.

The experimental results show that, the retention time could be increased up to 48 hours by increasing the pulp solids content from 45% to 50%, and in this case 0,5-1,0% increase in metal recovery could be obtained. In the existing grinding circuit, decreasing the grind size of leach feed from 66 μm to 37 μm will provide 1,12% increase in metal recovery.

Keywords: gold, leaching, cyanide, cyanidation, tank leaching, leaching kinetics

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında değerli katkı ve eleştirileriyle yol gösteren, sonsuz sabırla beni her zaman çalışmaya teşvik eden ve güven veren danışmanım Sayın Dr. E. Caner ORHAN'a, önemli yorum ve değerlendirmeleri ile katkıda bulunan jüri üyelerime, zorlu tez sürecinde benden desteğini bir an için bile esirgemeyen değerli arkadaşlarım, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fırat ATALAY'a ve Sayın Sercan SEVGÜL'e, tüm hayatım boyunca olduğu gibi Yüksek Lisans sürecimde de benden desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili Anne ve Babama teşekkürlerimi bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER	ix
ŞEKİLLER	x
1. Giriş	1
2. Literatür Özeti	3
2.1 Altının Tarihçesi	3
2.2 Altının Özellikleri	3
2.2.1 Fiziksel	3
2.2.2 Kimyasal	4
2.3 Altının Doğada Bulunuşu	5
2.4 Altın Madenciliği	6
2.4.1 Dünya Altın Madenciliği	6
2.4.2 Türkiye’de Altın Madenciliği	7
2.5 Altın Üretim Yöntemleri	9
2.5.1 Gravite Yöntemleri	11
2.5.2 Flotasyon	13
2.5.3 Basınç Altında Oksitleme (POX)	14
2.5.4 Altın Liçi (Siyanürleme) ve Tarihçesi	14
2.5.5 Altın Liçi	19
2.6 Liç yöntemleri	22
2.6.1 Yığın Liçi	22
2.6.2 Yoğun (Şiddetli) Liç	23
2.6.3 Vat Liçi	23
2.6.4 Yerinde Liç	24

2.6.5	Karıştırırmalı Tank Liçi	24
2.7	Altının çözelti fazından kazanılması	27
2.7.1	Çinko Çöktürme	27
2.7.2	Pülpte reçine ve çözeltide reçine	28
2.7.3	Altın Siyanür Kompleksinin Aktif Karbon ile Kazanımı	30
2.7.4	Elektrolitik Kazanım	31
2.7.5	Rafinasyon.....	32
2.7.6	Tepkime Kinetiğinin Modellemesi	33
2.7.7	Altın Liçinde Tepkime Kinetiği.....	33
2.8	Kütle Transferi	40
2.9	Katı-Sıvı Sistemlerde Parçacık Faktörleri.....	41
2.9.1	Tane Boyu	41
2.9.2	Tane Şekli ve Yapısı	43
2.9.3	Mineralojik Faktörler	43
2.9.4	Gözeneklilik	43
2.9.5	Galvanik Etkiler	44
2.9.6	Diğer Minerallerin Etkileri	44
2.10	Siyanür	45
2.10.1	Siyanür Çözeltilerinin Kimyası	45
2.10.2	Siyanür ve Çevre	47
3.	Malzeme ve Yöntem	49
3.1	DeneySEL Çalışmalar	49
3.2	Şişe Çevirme (Bottle-roll) testi.....	55
3.3	Serbest siyanür ölçümü	55
3.4	Uygulanan diğer testler	56
3.5	Koza Altın İşletmeleri Kaymaz Altın Madeni.....	56
3.5.1	Kaymaz altın cevherinin özellikleri	56
3.5.2	Kırma-Eleme Ünitesi.....	57
3.5.3	Öğütme Ünitesi	58
3.5.4	Liç-Adsorpsiyon Ünitesi	59
3.5.5	Kimyasal Arıtma (Detox) Ünitesi	59
3.5.6	Sıyırma Ünitesi	60
4.	DeneySEL Sonuçlar.....	63
4.1	Altın İçeriğine Yönelik Hesaplamalar.....	63

4.1.1	Pülp katı içeriğinin ve siyanür derişiminin etkilerinin incelenmesi	63
4.1.2	Tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi	66
4.2	G�m��� içeriğine Yönelik Hesaplamalar	70
4.2.1	Pülp katı içeriğinin ve siyanür derişiminin etkilerinin incelenmesi	70
4.2.2	Tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi	73
5.	Sonuçlar.....	75
KAYNAKLAR.....		78
EKLER.....		83
�ZGE�M��		95



ÇİZELGELER

Çizelge 2.1 Altının fiziksel özellikleri	4
Çizelge 2.2 Dünya altın üretimi.....	7
Çizelge 2.3 Türkiye’de işletilen altın madenleri.....	8
Çizelge 2.4 Altın cevherlerinin kazanım oranlarına göre refrakterlik sınıflandırılması	10
Çizelge 2.5 Altın tane boyu ve kazanım yöntemleri	10
Çizelge 2.6 Altının liçlenmesi ve devamındaki kazanım işlemlerinin tarihsel gelişimi	18
Çizelge 2.7 Yaygın altın minerallerinin doğrudan siyanürlemeye tepkileri	22
Çizelge 2.8 Siyanür bileşiklerinin siyanür miktarları ve 25°C'deki suda çözünürlükleri	45
Çizelge 3.1 Kaymaz altın cevheri kimyasal analizi	56
Çizelge 3.2 Kaymaz cevherine ait tipik mineralojik analiz	57
Çizelge 4.1 Öğütme süresi tane boyu ilişkisi	67
Çizelge 5.1 Farklı tane boylarındaki cevherlerin siyanür tüketim değerleri	77

ŞEKİLLER

Şekil 2.1 Türkiye’de yıllara göre altın üretim miktarları	9
Şekil 2.2 Goldstrike Altın Madeni akım şeması	21
Şekil 2.3 Pülpte reçine yöntemi	29
Şekil 2.4 Çözünmüş oksijen ve serbest siyanür derişiminin altın çözünme hızına etkisi	35
Şekil 2.5 Serbest siyanür derişiminin altının çözünme hızına etkisi.....	36
Şekil 2.6 Sıcaklığın altının çözünme hızına etkisi.....	37
Şekil 2.7 Tane boyunun altının çözünme hızına etkisi.....	42
Şekil 2.8 HCN formundaki siyanürün pH’a göre değişimi	46
Şekil 3.1 Numune bölme aparatı	50
Şekil 3.2 Hassas tartı ile gerekli sodyum siyanür miktarının tartımı.....	51
Şekil 3.3 Hazırlığı tamamlanmış test şişeleri.....	51
Şekil 3.4 Şişe çevirme düzeneği.....	52
Şekil 3.5 Oksijen besleme sistemi dozaj panosu	52
Şekil 3.6 Gümüş nitrat titrasyonu yöntemi ile serbest siyanür ölçüm düzeneği	53
Şekil 3.7 Laboratuvar tipi bilyalı değirmen	54
Şekil 3.8 Koza Altın İşletmeleri Kaymaz Altın Madeni Akım Şeması	62
Şekil 4.1 Başlangıç serbest siyanür derişiminin farklı yüzde katı değerlerinde liç verimi üzerine etkisi.....	63
Şekil 4.2 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%45 Katı)	64
Şekil 4.3 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%50 Katı)	65
Şekil 4.4 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%55 Katı)	66
Şekil 4.5 Farklı öğütme sürelerinde elde edilen ürünlerin tane boyu dağılımı.....	67
Şekil 4.6 Laboratuvar değirmeninde öğütme süresinin ürün tane boyu (p80) üzerine etkisi	68
Şekil 4.7 Farklı tane boylarında liç süresinin liç verimi üzerine etkileri	68
Şekil 4.8 Farklı tane boylarında liç süresinin atıkta kalan altın içeriği üzerine etkileri	69
Şekil 4.9 Serbest siyanür derişiminin farklı yüzde katı değerlerinde liç verimi üzerine etkisi	70
Şekil 4.10 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%45 Katı)	71

Şekil 4.11 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%50 Katı)	71
Şekil 4.12 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%55 Katı)	72
Şekil 4.13 Farklı tane boylarında liç süresinin liç verimi üzerine etkileri	73
Şekil 4.14 Farklı tane boylarında liç süresinin atıkta kalan gümüş içeriğı üzerine etkileri	74



1. Giriş

Günümüzde altın üretiminde kullanılan yaygın yöntem hem ekonomik oluşu hem de yüksek metal verimi sağlaması nedeniyle siyanür ile liç işlemidir. Havalandırılmış, bazik pülpte siyanür ile liç işlemi cevherlerden altının kazanılmasında yüzyılı aşkındır temel yöntem olarak kullanılmaktadır [1]. Yıllar içerisinde daha temel bir zenginleştirme yöntemi olan gravite yöntemleri ile altın kazanımına imkân veren cevher kaynaklarının azalması ile oldukça geniş uygulama alanı bulan siyanür ile liç işleminde, elektrokimyasal tepkimeler neticesinde altın oksitlenerek daha kararlı ve kompleks bir iyon haline getirilmekte, oksijen indirgenmekte ve hidrojen peroksit açığa çıkmaktadır [2]. Bu işlem sıvı fazdaki siyanür moleküllerinin gaz fazı olan hidrojen siyanüre dönüşmesini önlemek amacıyla pH 10,5 seviyelerinde ve çözünmüş oksijen barındıran ortamda gerçekleştirilmektedir.

Altın solüsyon fazına alındıktan sonra, yaygın olarak, aktif karbon granülleri üzerine soğurulmakta, altın ile yüklenen karbon granülleri, yaklaşık 110°C'de sodyum hidroksit ve sodyum siyanür çözeltilerinin kullanıldığı sıyırma (elüsyon) işlemine tabi tutulmakta ve sonrasında elektro-kazanım yöntemi ile katotlara yapışması sağlanan altın tanecikeri, son olarak, potada ergitilerek dore halinde dökülmektedir. Cevher özelliklerine ve ekonomik tercihlere bağlı olarak tüvenan cevher veya kırılmış cevher üzerine sodyum siyanür çözeltisi eklenerek (yığın/dump liç) veya kırma-öğütme işlemlerinden sonra su ilavesi ile pülp haline getirilmiş ortama sodyum siyanür çözeltisi eklenerek (karıştırmalı tank liçi) uygulanabilir. Yine cevher özelliklerine bağlı olarak farklı ön veya son işlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir. Örneğin; altının sülfürlü cevherlerin kafes yapısı içerisinde hapsolmuş durumda bulunduğu mineral yapılarında, hem altın ile siyanür solüsyonu temas edemediği için liç verimi oldukça düşük olarak gerçekleşmekte hem de sülfürlü mineraller nedeni ile siyanür tüketim oranları oldukça yüksek gerçekleşmektedir. Bu durumlarda siyanürleme öncesinde kavurma, otoklavda basınç altında oksitleme, biyolojik veya kimyasal liç gibi ön işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulabilecek son işlem örneği olarak ise altın ile birlikte sıvı faza geçen diğer metallerin (örn. bakır) solüsyondan uzaklaştırılması için gerçekleştirilen soğuk sıyırma işleminden bahsedilebilir.

Son yıllarda yaygın uygulama alanı bulan siyanürleme işlemi konusunda yüzyılı aşkındır akademik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında tüm bu işlemlerin temel amacı olan siyanür ile liçleme adımının, azami metal kazanımı, asgari yatırım ve işletme maliyetleri ile gerçekleştirilebilmesi için tepkime kinetiğinin etkenleri ile ortaya koyulması ve ideal işletme koşullarının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Siyanür derişimi altının anodik çözünme hızını belirlerken çözünmüş oksijen derişimi de oksijenin katodik indirgenme hızını belirler. Bu yüzden altının çözünme hızı büyük oranda siyanür ve oksijen derişimleri, pH ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlıdır. Solüsyondaki diğer katalizör iyonların varlığı ve solüsyonun tuzluluk oranı da liç işleminin hızını etkilemektedir [3]. Özellikle karıştırıcılı tanklarda gerçekleştirilen altın liçi işleminde; sıvıda serbest siyanür derişimi, sıvıda çözünmüş oksijen derişimi, pülp katı içeriği, cevher tane boyu, sıcaklık, pH, karıştırma hızı ile diğer minerallerin ve metal iyonlarının etkileri liç işleminin hızı ve verimini önemli ölçüde belirlemektedir.

Her ne kadar karıştırmalı tank liçindeki işletme değişkenlerine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiş olsa da her cevher yatağının içeriği ve mineralojik karakteri farklı olabileceğinden söz konusu çalışmaların her cevhere özel olarak uygulanması önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında liç işlemini etkileyen bazı işletme değişkenleri konusunda incelemeler yapılmıştır. Tez kapsamındaki çalışmanın ilk aşamasında Koza Altın İşletmeleri bünyesindeki Kaymaz cevherinin liç değişkenlerinden bazıları olan siyanür derişiminin ve pülp katı içeriğinin liç işleme etkileri incelenmiştir. Bu kapsamdaki testler farklı zaman aralıklarında gerçekleştirilerek, değişkenlerin zaman içerisinde metal kazanım oranında ortaya çıkardığı değişkenlikler incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise ilk aşamada kullanılan cevher örnekleri farklı tane boylarına öğütülerek, öğütülmüş cevher, liç testlerine tabi tutulmuş ve tane boyundaki incelmenin katı fazda kalan altın içeriğindeki değişime dolayısıyla metal kazanımına etkileri incelenmiştir.

2. Literatür Özeti

2.1 Altının Tarihçesi

Altın, diğer metallere göre az bulunurluğu, kolaylıkla işlenebilmesi, günlenme etkisine dayanıklılığı ve doğal parlaklığı nedeniyle eski çağlardan beri değerli bir metal olarak kabul edilmiştir. Altının, kullanış biçimi ülkelerin politik ya da ekonomik duraylılığının göstergesi olarak da yorumlanmaktadır. Örneğin, tarih boyunca, işgal altındaki ülkelerin vatandaşları hemen her zaman para yerine altın kullanmayı tercih etmişlerdir.

Altın bilimi ve altının kullanılması neredeyse yazılı tarihin başlangıcına dayanır. Altından yapılmış süs eşyaları Neolitik çağa (M.Ö. 5-4 bin yıl) ait kültür katlarında bulunmuştur. Bu dönemlerde altın, rastlantısal olarak dere çakıllarından elde edilmiştir. Afrika, Asya ve Güney Avrupa'da M.Ö. 3-2 bin yıllarında gerek plaserlerden ve gerekse damarlardan sistemli altın madenciliği yapılmıştır. Madencilik tarihine ait ilk belge de Mısır'daki bir altın madeninin M.Ö. 3500 yıllarına ait krokisidir [4].

Tarih boyunca madencilik yoluyla 190,040 (2017 sonu) ton altının çıkarıldığı tahmin edilmektedir. Bu miktarın üçte ikisi ise 1950'den sonra üretilmiştir. Çıkarılan toplam altının 90.718 tonu mücevher, 40.035 tonu kişisel yatırımlar, 32.575 tonu resmî kurumlar, 26,711 tonu diğer şekillerde, 54.000 tonu ise yer altı rezervleri olarak bulunmaktadır [5].

2.2 Altının Özellikleri

Kıymetli metaller ile baz metallerin ayrımları birçok yönden rastgele ve genellikle pratik değerlendirme ve geleneklere göre yapılmıştır. Altın klasik bir kıymetli metaldir ve havaya karşı, nem ve doğal yıpranmaya direnç gibi, bu grubun tüm özelliklerine sahiptir. Kimyasal sembolü olan *Au* Latince'deki "aurum" kelimesinden gelmektedir [6].

2.2.1 Fiziksel

Altının, atom numarası 79 ve atom ağırlığı 196,96654 g/mol'dür. Doğal olarak bulunan tek izotopu ^{197}Au 'dır. En önemli izotopu tıp alanında kullanılan ^{195}Au ; ϵ ve γ ışınlarını yayar ve 183 günlük yarılanma ömrüne sahiptir. Altının elektriksel konfigürasyonu $[\text{Xe}] 4f^{14}5d^{10}6s^1$. Atom çapı 0,1439 nm'dir. Koordinasyon sayısı 6 olan Au^+ için iyon çapı 0.1379 nm, Au^{+3} için 0,085 nm'dir.

Altının bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Altının fiziksel özellikleri

Erime noktası	1064,43 °C
Kaynama noktası	2808 °C
Yoğunluk, 20°C’de	19,32 g/cm ³
Atomik hacim, 20°C’de	10,21 cm ³ /mol
Elektriksel direnç, 0°C’de	2,06 x 10 ⁻⁶ Ωcm
Termal iletkenlik 0°C’de	3,14 Wcm ⁻¹ K ⁻¹
Özgöl ısı	0,138 Jg ⁻¹ K ⁻¹
Füzyon entalpisi	12,77 kJ/mol
Buharlaştırma entalpisi	324,4 kJ/mol
Çekme direnci	127,5 N/mm ²

Mekanik ön işleme maruz kalmamış altın oldukça yumuşaktır. Mohr skalasındaki sertlik değeri 2,5 ve Brinel skalasındaki sertlik değeri ise 18 HB’dir. Altın tüm metallerin en sünek olanıdır. Soğuk olarak işlenerek 10 µm’dan daha ince tel elde edilebilir ve dövülerek 0,2 µm inceliğinde yaprak haline getirilebilmektedir [7].

2.2.2 Kimyasal

Altın; su, kuru veya rutubetli hava, oksijen (yüksek sıcaklıkta dahi), ozon, nitrojen, hidrojen, florin, iyodin, sülfür ve hidrojen sülfid ile normal koşullar altında tepkimeye girmemektedir.

Sülfürik asit, hidroklorik asit, hidroflorik asit, fosforik asit, halojenür içermeyen nitrik asit (çok yüksek derişimler istisna kabul edilir) ve pratik olarak tüm organik asitler, derişik ya da seyreltilmiş olarak ve kaynama noktasına kadar olan sıcaklıklarda altına etki etmezler. Diğer taraftan, hidrohalik asit ya da nitrik asit gibi bir oksitleyici, hidrojen peroksit gibi bir halojen veya kromik asit ile birlikte altını çözebilmektedir. Altın, ayrıca, su ve bir halojen ile (Plattner prosesi) selenik asitte çözünebilmektedir.

Alkali metal hidroksitlerin sulu çözeltileri, mineral asitlerinin alkali metal tuzları ve alkali metal sülfidler altın ile tepkimeye girmemektedir. Ancak, oksijen barındıran alkali metal siyanür çözeltilerinde ya da siyanojen bromür (Diehl prosesi), nitrobenzenesülfonik asit çözeltilerinde altın çözünmektedir. Altın ayrıca oksijen

barındıran sodyum tiyosülfat çözeltilerinde ve alkali metal polisülfid çözeltilerinde çözünür. Buna ek olarak, altın, katı klor ile belirgin şekilde tepkimeye girmektedir [7].

2.3 Altının Doğada Bulunuşu

Altın, normal koşullardaki basınç ve sıcaklıklarda çok ender şekilde bileşik olarak bulunmaktadır. Yerkabuğunda altının ortalama derişimi (0,005 g/t) diğer birçok metale göre oldukça düşüktür (Örneğin; gümüş 0,07 g/t ve bakır 50 g/t). Altının doğada bulunan hallerine aşağıda değinilmektedir.

Nabit altın: Nabit altın doğada %99,8 altın içeriğine sahip olacak şekilde bulunabilmekle beraber, genellikle %85-95 arasında altın içermekte ve safsızlık içeriği genellikle gümüş olmaktadır. Saf altının yoğunluğu 19.300 kg/m^3 olmasına rağmen nabit altının yoğunluğu genellikle 15.000 kg/m^3 civarındadır. Tipik yan kayaç minerallerine kıyasla oldukça yüksek yoğunluğa sahip olması sebebiyle, yerçekimine dayalı zenginleştirme yöntemleri, altın kazanımında, tarih boyunca olduğu gibi halen de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Elektrum: Altın genellikle bir miktar gümüş ile alaşım halinde bulunmakta, ancak, gümüş miktarı %25 ile %55 arasında ise bu alaşım elektrik olarak adlandırılmaktadır. Gümüş içeriğinden ötürü elektrümün rengi açık sarı ve yoğunluğu daha düşüktür ($13.000\text{-}16.000 \text{ kg/m}^3$).

Altın Tellüridleri: Altın tellüridleri oldukça karmaşık yapıdadırlar. Daha yaygın olarak bulunan altın içerikli telluridler; silvanit $((\text{Au}, \text{Ag})_2\text{Te}_4)$, kalaverit (AuTe_2) , petzit $(\text{Ag}_3\text{AuTe}_2)$ ve krennerit (AuTe_2) , daha ender olarak ise montbrayit (Au_2Te_3) ve kostovittir (CuAuTe_4) . Altın tellüritin bulunuşu genellikle bir miktar nabit altın ve sülfid mineralleri ile birlikte gerçekleşmektedir. Altın tellüridlerinin yoğunlukları nabit altından daha düşük ($8.000 - 10.000 \text{ kg/m}^3$) ve rengi daha az belirgin olan beyaz, gri ve siyah tonlarındadır. Bir gümüş minerali olan hessit (Ag_2Te) genellikle altın tellüridleri ile birlikte bulunmaktadır.

Sülfürlü cevherler: Altın çok ince tane boylarında sülfürlü cevherlerin tane yapıları içinde bulunabilmektedir. Sülfürlü mineral yapılarında ölçülen altın miktarlarının tipik aralıkları aşağıda verilmektedir taşımaktadır [8]:

- Arsenopirit: $<0,2 - 15\ 200 \text{ g/t}$

- Pirit: <0,2 – 132 g/t
- Tetrahedrit: <0,2-72 g/t
- Kalkopirit: <0,2-7,7 g/t

2.4 Altın Madenciliği

Günümüzde altın kazanımı için kullanılan yöntemlerin birçoğu yüzyıllardır bilinen tekniklere dayanır. Gravite ile zenginleştirme, amalgamasyon, siyanürleme, klorlama, çinko çöktürme, karbon/odun kömürü yüzeyine tutundurma işlemleri yüz yılı aşkındır kullanılmakta ve bu işlemlerin kombinasyonları birçok altın üretim tesisinin akım şemasının temelini oluşturmaktadır [8].

2.4.1 Dünya Altın Madenciliği

Altın madenciliği, Antartika dışındaki tüm kıtalarda farklı tip ve ölçeklerde gerçekleştirilmektedir. Cevher yapısına göre farklı yöntemler ile gerçekleştirilen bu üretimin %23'ü Asya Kıtası'nda, %19'u Afrika Kıtası'nda, %17'si Orta ve Güney Amerika'da, %16'sı Kuzey Amerika'da, %14'ü ise eski Sovyetler Birliği ülkelerinde gerçekleştirilmektedir. 2016 yılı verilerine göre, dünya toplam altın üretiminin %14'ünü tek başına gerçekleştiren Çin, dünyadaki en büyük altın üreticisi konumundadır. Dünya çapındaki altın üretim miktarları Çizelge 2.2'de verilmektedir [9].

Çizelge 2.2 Dünya altın üretimi

Dünya Altın Üretimi, 2016 yılı		
Sıralama	Ülke	Üretim Miktarı (ton)
1	Çin	453,5
2	Avustralya	290,5
3	Rusya	253,5
4	Amerika Birleşik Devletleri	236,0
5	Endonezya	168,2
6	Kanada	165,0
7	Peru	164,5
8	Güney Afrika	150,0
9	Meksika	120,5
10	Gana	95,0
11	Brezilya	83,3
12	Özbekistan	82, 9
13	Papua Yeni Gine	59,9
14	Arjantin	57,4
15	Mali	49,8
16	Tanzanya	48,7
17	Filipinler	48,5
18	Kolombiya	48,3
19	Kazakistan	48,0
20	Kongo Demokratik Cumhuriyeti	44,4
	Diğer Ülkeler	554,3
	Toplam	3.222,3

2.4.2 Türkiye’de Altın Madenciliği

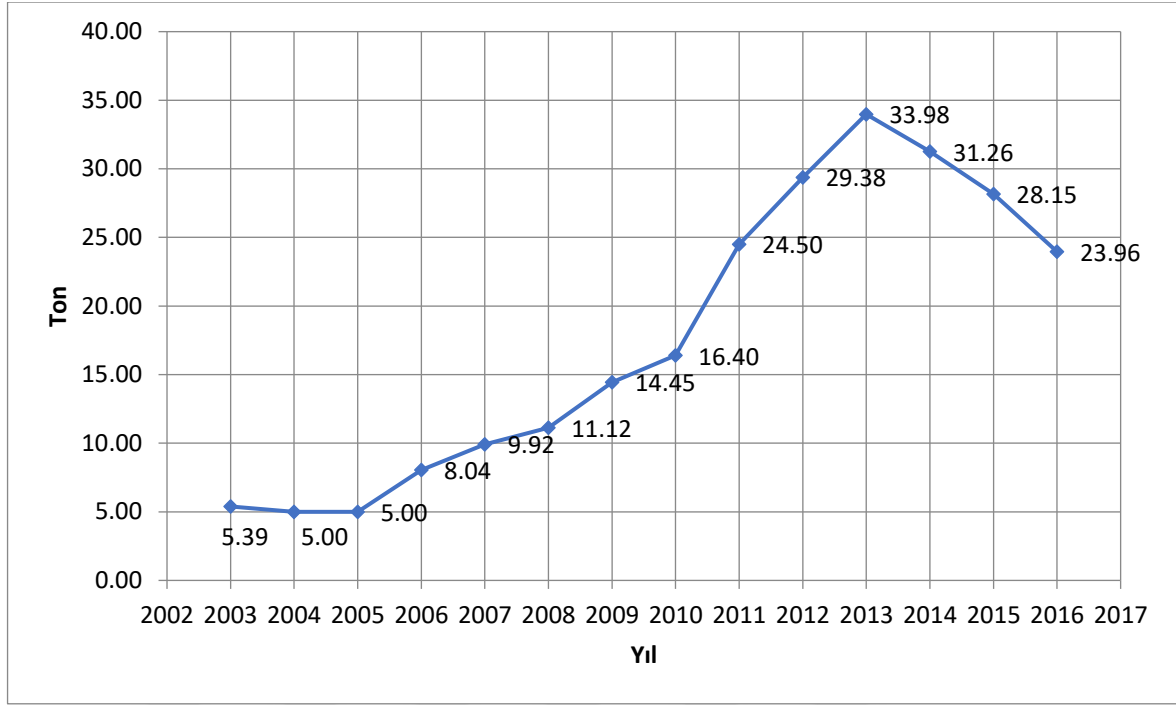
Türkiye’de bilinen ve arama çalışmaları süren altın yatakları Ege, Doğu Karadeniz, İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Halen üretime hazır olan altın yataklarında 1 tonda 1,2 gr ile 12,65 gram arasında değişen miktarlarda altın bulunmaktadır. Buna göre, Türkiye’nin işletilebilir altın rezervi metal bazında toplam 840 tondur. Jeolojik yapısı ve dünyadaki altın oluşum modellerine dayanılarak yapılan hesaplama göre Türkiye’nin altın potansiyelinin 6.000-7.000 ton olduğu tahmin edilmektedir [10].

Halen Türkiye’de, birçok işletmede farklı yöntemlerle altın üretimi yapılmaktadır, bu işletmeler Çizelge 2.3’te sıralanmaktadır [11].

Çizelge 2.3 Türkiye’de işletilen altın madenleri

Türkiye’de İşletilen Altın Madenleri	
1	İzmir, Bergama, Ovacık
2	Eskişehir, Sivrihisar, Kaymaz
3	Kayseri, Himmetdede
4	Gümüşhane, Mastra
5	Uşak, Kışladağ
6	İzmir, Efemçukuru
7	Erzincan, İliç
8	Niğde, Bolkar Dağı
9	Ordu, Fatsa, Altıntepe
10	Balıkesir, Sındırgı
11	Manisa, Salihli, Sart
12	Gümüşhane, Midi
13	Sivas, Bakırtepe
14	Çanakkale, Lâpseki, Şahinli
15	Konya, İnlice

Yıllara göre Türkiye’de gerçekleştirilen altın üretim miktarları Şekil 2.1’de verilmektedir [10]. Türkiye, Dünya altın talebinde beşinci sırada yer almaktadır. 2008 yılına kadar yılda 200 tondan fazla altın ithal edilmekte, bunun tahmini olarak yarısına yakın bir kısmı işlendikten sonra mücevherat biçiminde ihraç edilmektedir. Türkiye, altın takı üretiminde Hindistan’ın ardından ikinci sırada yer almaktadır. Türkiye’nin altın ithalatı 2007 yılında 231 ton, 2008 yılında 166 ton, 2009 yılında 37 ton ve 2010 yılında 42 ton, 2011 yılında 79,7 ton, 2012 yılında 157,63 ton, 2013 yılında 302 ton ve 2014 yılında 131 ton, geçmiş 20 yıl içerisinde toplam 3215 ton olarak gerçekleşmiştir [10].



Şekil 2.1 Türkiye’de yıllara göre altın üretim miktarları

2.5 Altın Üretim Yöntemleri

Altının üretim yönteminin belirlenmesi jeolojik, mineralojik, metalürjik, çevresel, coğrafi, ekonomik ve siyasi etmenlere bağlı olarak değişebilmektedir [8].

Altın cevherleri metalürjik açıdan genellikle serbest altın içeren, kompleks ve refrakter olmak üzere 3 ana grupta sınıflandırılırlar. Serbest altın içeren cevherlerden (%80 <75µm) siyanür liçiiyle Au >% 90 verimle kazanılabilmektedir. Yüksek siyanür ve oksijen tüketimine karşın, kabul edilebilir altın kazanımı elde edilen cevherlere ise kompleks altın cevherleri olarak değerlendirilmektedir. Aşırı miktarda reaktifle dahi kazanılamayan ve ekonomik olmayan cevherlere de refrakter cevherler denilmektedir. Refrakter cevherlerin altın kazanım oranlarına göre sınıflandırılması Çizelge 2.4’te gösterilmektedir [12].

Çizelge 2.4 Altın cevherlerinin kazanım oranlarına göre refrakterlik sınıflandırılması

Metal Kazanım Verimi (%)	Refrakterlik Derecesi
50	Yüksek refrakter
50-80	Orta refrakter
80-90	Düşük refrakter
90-100	Refrakter değil

Farklı tane boyuna sahip altın cevherlerinin kazanım yöntemlerine dair karşılaştırma ise Çizelge 2.5'te verilmektedir [13] [14].

Çizelge 2.5 Altın tane boyu ve kazanım yöntemleri

Yöntem	Etkin Boyut Aralığı	Tipik Kazanım Verim Değerleri
Yıkama Kutuları Reichert Konileri	2500 – 100 µm	%20 <100 µm altın %96 <1000 µm altın
Jigler	2500 – 75 µm	%50 100 µm altın %98 1000 µm altın
Sallantılı Masalar	3000 – 15 µm	%20 20-40 µm altın %90 >40 µm altın
Spiraller	3000 – 75 µm	%65 – 80
Knelson ve Falcon Konsantratörleri	6000 – 30 µm	%99'a kadar
Amalgamasyon	1500 – 70 µm	%65 <75 µm altın %98 <500 µm altın
Siyanürleme	200 µm'dan ince	En az %80'den %99'a kadar

Farklı altın kazanım yöntemlerinin ayrıntıları aşağıda verilmektedir.

2.5.1 Gravite Yöntemleri

Günümüzde altın cevherlerinin büyük kısmının siyanürleme yöntemi ile kazanılmasına rağmen, özellikle iri tane boyundaki altın (+75µm) gravite yöntemleri kullanılarak kazanılmaya devam edilmektedir. Oldukça düşük yatırım ve işletme maliyetleri ile gerçekleştirilebileceğinden bu yöntem cazibesini sürdürmektedir. Jig, sallantılı masa, Knelson ve Falcon konsantratörleri verimli şekilde altın kazanımını mümkün kılmaktadır. Elde edilen konsantreler eğer çok yüksek oranda altın içeriyorsa genellikle doğrudan rafinasyona tabii tutulmakta aksi takdirde ikincil konsantratörler veya yoğun ("intensive", şiddetli) liç işlemleri uygulanmaktadır [15].

Bu yöntemin ilkesi altın içeren minerallerin nispeten yüksek yoğunlukta olmalarına dayanır. Gravite yöntemleri ile zenginleştirmenin uygulandığı cevherlerde altının serbest ve görece iri taneli olması gerekir [16].

Tavada Yıkama (panning)

Altın, metalürjinin gelişiminde merkezi bir rol oynamıştır. Bununla birlikte, bir zamanlar, altını kazanmak için herhangi bir kimyasal veya metalürjik bilgiye ihtiyaç duyulmamaktaydı; doğada serbest halde bulunurdu ve parıldayan parçacıkları ve bazen de külçeleri toplamak için basit bir tavada yıkama işlemi yeterliydi. Altın 19,3 g/cm³ gibi yüksek bir yoğunluğa sahip olduğundan, altını, birlikte bulunduğu kum ve çakıldan kolayca ayırmak için tavada yıkama yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde malzeme sığ bir tavada suyla karıştırılır ve dikkatli bir şekilde döndürülerek yabancı maddelerin yikanarak uzaklaşması ve tavada altını bırakması sağlanır. Bununla birlikte, bu işlem büyük bir sabır ve sıkı çalışma gerektirir. Tavada yıkama yöntemi ile veya zengin damarlardan toplanan altın, altını nispeten daha saf bir metal olarak geri kazanmak için eritilmekteydi. İlk başlardaki bu ilkel yöntemlerle, yalnızca kolay erişilebilir, saf altın elde edilebiliyordu. Makineler geliştikçe ve ekstraksiyon işlemlerinin eksiklikleri giderildikçe madencilik daha düşük tenörlü maden yataklarına doğru genişletilmiştir [17].

Yıkama Kutuları

Altının alüvyal çakıllardan kazanımında kullanılan en yaygın yöntem yıkama kutularıdır. Genellikle imal edilmesi ucuz, işletmesi kolay ve bakımları için asgari düzeyde teknik bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Yıkama kutuları genellikle eğimli açık bir kanal üzerinde aralıklı olarak yerleştirilmiş oluklardan oluşur. Altın içeren cevher

beslendiğinde su ve alüvyal çakıllar kanaldan akıp giderken ağır olan altın mineralleri üst kısımdaki oluklarda kalır. Bu oluklar düzenli olarak sökülerek temizlenerek altın elde edilmektedir [13].

Jig

Jigler besleme cevherinden ağır mineralleri, engellenmiş çöktürme prensibi ile ayırmakta kullanılmaktadır. Su içindeki sıg, düz ve gözenekli bir tablayı aşağı yukarı sarsarak ağır minerallerin alt kısma çökmesini, nispeten hafif minerallerin ise üst kısımda kalmasını sağlamaktadır. Besleme cevherinin iri ve ince fraksiyonlara ayrılarak beslenmesi durumunda, dar tane boyu aralığı nedeniyle daha verimli çalışmaktadır. 25 mm ile 75 µm arasındaki tane boyu aralığında kullanılabilmekte, ancak, tane boyunun 100µm'un altına düştüğü durumlarda verim yüzde 50'nin altına düşebilmektedir [13].

Sallantılı Masa

Sallantılı masalar düz bir tabla üzerine ağır mineralleri yakalamak için yerleştirilmiş eşiklerden oluşmaktadır. Masa devrede iken uzunlamasına titreşir ve yanlamasına bir miktar eğimlidir. Masanın üst kısmından yıkama su beslemesi yapılır. Çamur haline getirilmiş cevher masanın üst köşesinden beslenir, mineraller ayrışır ve ağır olanlar oluklar içerisinde kalarak masanın diğer ucuna kadar ilerler, hafif mineraller ise suyla taşınarak eşikleri aşar ve atık kısmına gider. 3mm ile 15 µm arasındaki tane boylarında etkili ayırım yapabilmektedirler, 40 µm'un altındaki altın tane boylarında metal kazanım verimi belirgin şekilde düşmektedir [13].

Spiral Sınıflandırıcılar

Spiral sınıflandırıcılar, düşük besleme miktarı ve düşük besleme yoğunluğu ile işletilen akışkan film gravite ayırıcıları olarak tanımlanmaktadır. Genellikle 3 ile 5 tam tura sahip, yarı dairesel kesitte, sarmal bir kanaldan oluşmaktadır. Besleme cevheri ağırlıkça %25-30 oranındaki çamur halinde beslenir ve merkezci kuvvet etkisiyle ayrışır. Ağır mineraller merkeze yakın olarak ilerlerken hafif mineraller ise dış kenardan ilerler. Ayarlanabilir ayırma bıçakları sayesinde konsantre, ara ürün ve atık olarak ayrıştırmayı mümkün kılmaktadırlar. 3 mm ile 75 µm arasındaki tane boylarında verimli ayırım imkânı sağlayabilmektedir [13].

Knelson konsantratörü

Bu konsantratör, akışkan yataklı, merkezkaç prensibi ile ağır minerallerin kazanımını gerçekleştiren ve kesikli çalışan bir ekipmandır. Kapasitesi 1000 ton/saat'e kadar çıkan ticari modelleri bulunmaktadır. Tanelerin üzerine etki eden santrifüj kuvveti yerçekiminin 200 katına kadar çıkmaktadır, yakalanan ağır mineraller ekipman içindeki kanalların arasında kalır ve diğer mineraller su ile yıkanarak uzaklaşır. Knelson konsantratörü ile 10µm ile 6mm arasındaki tane boyundaki cevherler işlenebilir. Genellikle kazanılacak ağır minerallerin 500g/t (ağırlıkça %0,05) mertebesinde olduğu beslemeler için kullanılmaktadır [17].

Falcon konsantratörü

Bu konsantratör, diğer bir dönen akışkan yataklı, kesikli çalışma prensibine sahip zenginleştirme ekipmanıdır. Kapasiteleri 400ton/saat'e kadar çıkabilmektedir. Öncelikli olarak öğütme devrelerinin sınıflandırıcılarının alt akımlarında bulunan, çok az miktardaki ($\%<1$) serbest haldeki altın tanelerinin yakalanması amacıyla tasarlanmışlardır. Besleme, tanelerin yoğunluklarına göre katmanlaştığı koni şeklindeki teknenin kenarlarına akmaktadır. Altın gibi ağır taneler yarıklarda tutulurken, daha hafif olan yantaş mineralleri su ile uzaklaştırılmaktadır. Besleme düzenli olarak durdurulmakta ve elde edilen konsantre yıkanarak alınmaktadır. Yıkama işlemi otomatik olarak gerçekleşmekte ve tenör/verim gereksinimlerine göre bu yıkama aralığı ayarlanmaktadır [17] [18].

2.5.2 Flotasyon

Altın eldesinde flotasyon işlemi yaygın olarak altın içeren sülfürlü cevherlerde, baz metal cevherlerinde, bakır-nikel cevherlerinde, platin grubu cevherlerde ve diğer zenginleştirme yöntemlerinin uygun olmadığı cevherlerde kullanılmaktadır.

Ayrıca hidrometalürjik proseslere olumsuz etkileri olabilecek içeriklerin uzaklaştırılması (örn. karbon flotasyonu) için de ön işlem olarak flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Özellikle sülfürlü cevher yataklarında bulunan minerallerin bünyesinde hapsolmuş şekilde bulunan altının doğrudan siyanürleme gibi yöntemlerle eldesi hem ekonomik nedenlerle hem de düşük verim oranları nedeniyle tercih edilmemektedir. Cevher yataklarında bulunan diğer minerallerin kristal yapıları içerisine hapsolmuş altının boyutu küçükten büyüğe farklılık gösterebilir. Bu tip refrakter cevherlerden flotasyon yöntemiyle elde edilen

konsantrelerin, sonrasında kavurma, bakteri liçi veya otoklavda basınç altında oksitleme gibi işlemlere tabi tutularak altının siyanür liçi için hazır hale gelmesi sağlanmaktadır. Bu işlemler sayesinde hem altın taneleri serbestleşmekte hem de siyanür tüketen yantaş minerallerinin oksitlenmesi sağlanmaktadır. Özellikle kavurma ve basınç altında oksitleme gibi proseslerin işletme maliyetleri yüksek olduğundan tüm cevheri bu proseslerde işlemek yerine flotasyon sonucu elde edilen nispeten düşük miktardaki konsantrenin işlenmesi çok daha düşük maliyetle operasyonlara imkân verdiği için tercih edilmektedir [17] [19]. Refrakter tip altın cevherlerinin zenginleştirilmesi amacıyla, aşırı ince öğütme de alternatif olarak değerlendirilmektedir [20].

2.5.3 Basınç Altında Oksitleme (POX)

Özellikle refrakter yapıdaki cevherleri oluşturan sülfid mineralleri, oksijenin oksitleyici olarak kullanıldığı yüksek basınç ve sıcaklık altındaki asidik ortamda bileşenlerine ayrıştırılabilmektedir. Bu işlem genellikle otoklav olarak adlandırılan özel olarak üretilmiş reaktörlerde gerçekleştirilmektedir. İşlemin dışarıdan ısı ihtiyacı olmadan gerçekleşebilmesi için yaklaşık olarak %4 ve üzerinde sülfür içeriği ihtiyacı bulunmaktadır. Bu içeriğin altındaki değerlerde yeterli sıcaklığa ulaşabilmek için ilave buhar kullanılmaktadır. Bu işlem sayesinde kapanımlar içerisinde bulunan altın taneleri serbestleşmekte, sülfür mineralleri oksitlenmekte ve cevher siyanür liçine uygun hale getirilmektedir [8].

Uygulamaya göre farklılık göstermekle beraber işlem değişkenleri 190-230°C sıcaklık, 350-700 kPa oksijen basıncı ve 3500 kPa'ya kadar ulaşan toplam basınç değerleri altında gerçekleştirilebilmektedir. Yatırım ve işletme açısından oldukça maliyetli bir seçenek olduğundan bazı durumlarda cevherin tamamına değil ön zenginleştirme adımı olarak gerçekleştirilen flotasyon konsantrelerine uygulanmaktadır [21].

2.5.4 Altın Liçi (Siyanürleme) ve Tarihçesi

Siyanür ile çözündürme işlemi, seyreltik siyanür çözeltilerinin altını cevherlerden çözmesi ve çözeltilinin çinko ile temas ettirildiğinde altının çöktürülmesine dayanmaktadır. Örneğin, altının çok ince tane boylarında olduğu Witwatersrand altın madeninde, amalgamasyon ve klorlama ile sadece yüzde 55-65'lik bir kısmının

ekstraksiyonu yapılabilmekteyken, siyanür prosesi ile bu değer yüzde 95'e kadar yükseltilebilmiştir.

Siyanürleme prosesinin keşfedilmesine yol açan faktörleri anlamak için, 18. yüzyılda kimyagerlerin faaliyetlerine göz atmak oldukça önemlidir. Mavi Asit (Blue acid) isimli uygulama ve bunun bileşenlerinin kimyası ile ilgili kapsamlı araştırmalar sürdürülmüştür. O tarihlerde, kimyagerler, kurutulmuş kanı potas [K_2CO_3] ile ısıtarak ve ardından sulu özleri demir vitriyol [$FeSO_4$] ile işlemek suretiyle elde edilen çeşitli mavi renkli bileşikler ile uğraşıyordu. Bu yöntemle elde edilen çökelti, yoğun bir mavi pigment ürettiyordu. 1704 yılında Berlin'de, söz konusu pigmentin Alman simyager Johann Conrad Dippel (1673-1734) tarafından kazayla keşfedilmesi sonrasında, bu pigment Berlin mavisini olarak adlandırılmıştır. İngiliz literatüründe ise bu pigment, eskiden kuzey Almanya'nın bir eyaleti olan Prusya'ya ithafen Prusya mavisini olarak bilinmektedir. Bu yeni mavi pigment, oldukça ucuz olması sebebiyle, çok kısa sürede, doğal olarak oluşan ultramarin mavi pigmentin yerini almıştır. Yapay olarak üretilen ilk pigment olan Berlin mavisinin keşfi, siyanojen bileşiklerinin kimyası adı verilen yeni bir kimya alanının oluşmasına yol açmıştır.

Fransız kimyager Pierre Joseph Macquer (1718-1784), 1752 yılında Berlin mavisinin alkaliyle kaynatıldığında demir oksitini ayrıştırdığını ve kalan çözeltinin buharlaştırma ile konsantre edildiğinde, şimdi potasyum ferrosiyanür olarak bilinen, sarı kristaller ürettiğini keşfetmiştir. 1782'de Scheele, mavi pigmenti seyreltik sülfürik asit ile ısıtıp, su içinde çözünen ve asitli, litamöz kâğıdı ile asidik tepkimeye giren yanıcı bir gaz elde etmiştir ve bu gaza Berlin Mavisini Asiti veya basitçe mavi asit (blausaure) adını vermiştir. Bu gaz daha sonra İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya'da gaz odalarında kullanılmıştır. 1811'de Fransız kimyager Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), bu gazı (kaynama noktası: $26^{\circ}C$) sıvılaştırmış ve bileşiminin HCN olduğunu saptamıştır. Berlin mavisini nitrik asit ile ısıtıldığında, kırmızı / mor renkli bir bileşik elde edilmiş ve yine Prusya'ya atıfta bulunularak bu bileşik prussiatein adı ile bilinmeye başlanmıştır. 1822'de Almanya'daki Leopold Gmelin (1788-1853), kloru ferrosiyanür potasyum çözeltisine geçirerek derin kırmızı prizmalar biçiminde potasyum ferrosiyanür hazırlamıştır.

Bugün bildiğimiz üzere kan, porfirin yapısı içeren bir demir şelat olan kırmızı pigment hemini içerir. Bu yapının yapı birimleri alkilleştirilmiş pirol çekirdeğidir. Potasyum ile

ısıtıldığında potasyum ferrosiyanür oluşur; oluşan bu ferrosiyanür su ile ekstrakte edilir ve ferriferrosiyanür oluşturmak üzere demir tuzu ile tepkimeye sokulur. Mavi asidin çok çeşitli yeni bileşimleri ortaya çıktıkça bu bileşimleri adlandırmak için Yunanca terminoloji kullanılmaya başlanmıştır. Kyanos, Yunanca Mavi anlamına gelmektedir; bu nedenle mavi asitten türetilmiş bileşikler için modern terim olan siyanür terimi kullanılmıştır. Potasyum ferrosiyanür ($K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$), 1825 yılı civarında ticari bir ürün olmaya başlamıştır. Bu ürünü, birkaç sene sonra potasyum siyanür (KCN) üretimi takip etmiştir. Siyanür çözeltisinin metalik altın üzerindeki çözündürme etkisi, kendi keşfettiği hidrojen siyanür gazı ile deneyler yapan Scheele tarafından 1783 yılında bile biliniyordu. Siyanür çözeltisi içinde altını çözdürerek elde edilen çözelti, George Elkington (1801-1865) ve kuzeni Henry Elkington (1810-1852) tarafından, 1836 yılında İngiltere'de, altını elektrokaplama için gerekli banyonun hazırlanmasında kullanılmıştır.

1835 yılında, yüksek fırınlarda HCN oluşumu bilinmeye başlamış ve 1843 yılında kömür gazında siyanojen bileşiklerinin varlığı keşfedilmiştir (1950'lerde siyanürler de petrokimya kompleksi aracılığıyla farklı şekillerde ve farklı yerlerde tespit edilmiştir). Kömür gazı, ısıtma ve aydınlatma amaçlı olarak büyük miktarlarda üretiliyordu ve bugünkü elektriğin karşılığıydı. Zehirlenme etkisinden dolayı, siyanojenleri kömür gazından çıkarmak gerekiyordu; bu işlem de demir ve ferrik hidroksitlerin bir karışımı kullanılarak absorpsiyonla gerçekleştiriliyordu. Siyanürlerin, siyanojenlerin, tiyosiyanatların, siyanatların, siyanamidlerin, amidlerin, nitritlerin, guanidinlerin ve diğer ilgili bileşiklerin kimyasının anlaşılmasına önemli derecede katkıda bulunan diğer birçok işlem geliştirilmiştir.

Çözünme tepkimesi, söz konusu dönemin ünlü kimyagerleri, örn. Rusya'da Prens Bagration (1844), Almanya'da Franz Elsner (1846) ve İngiltere'de Micheal Faraday (1857) tarafından incelenmiştir. Ancak bu bilgiyi altın cevherlerine uygulamayı ilk kez 1887'de Glasgow'da John Stewart MacArthur (1856-1920) gerçekleştirmiştir. Proses, endüstriyel olarak uygulanmaya başladığında, birçok üniversitede araştırma başlatılmıştır. Bu çalışmalardan en önemlisi 1896 yılında Breslau Üniversitesi'nde (Wroclaw, Polonya) Alman kimyager Guido Bodlander'in (1855-1904) yaptığı çalışma olmuş ve çalışması iki husus açısından önemli katkı sağlamıştır. Her ne kadar MacArthur tarafından şüpheyle yaklaşılsa da, Guido Bodlander, Elsner ve Faraday tarafından öne sürüldüğü gibi, çözünme işlemi için

oksijenin gerekli olduğunu doğruladı ve hidrojen peroksitin, altının çözülmesi sırasında bir ara ürün olarak oluştuğunu keşfetti. Siyanür çözeltisinin altın üzerindeki etkisi üç nedenden ötürü uzun bir süre gizemli kalmıştır:

- Sıcak konsantre kral suyu hariç herhangi bir kuvvetli asit tarafından çözünemeyen altının, neden oda sıcaklığında oldukça seyreltik (%0,01-0,1) NaCN veya KCN çözeltisi ile çözünebildiğini anlamak oldukça zordu.
- Metallerin çözünmesinde bir asitin derişimi ne kadar yüksek olursa, çözünme o kadar hızlı gerçekleşmekte iken, güçlü bir NaCN çözeltisinin altını çözmede seyreltik bir çözeltiden daha iyi olmadığı görülmekteydi.
- Oksijenin siyanür ile altının çözünmesi mekanizmasındaki rolü anlaşılamıyordu.

Prosesin keşfinden yaklaşık 60 yıl sonra siyanür çözeltisinde altının çözünmesinin elektro-kimyasal bir işlem olduğu, yani galvanik bir hücre ile benzer olduğunun fark edilmesi ile söz konusu gizem çözülmüştür. Bu durum, içerisine havanın bir yönden verildiği bir KCN jeline küçük bir altın küre ilştirilerek gösterilmiştir. Altının hava akımından çok uzakta yüzeyde korozyona uğradığı, yani kürenin çevresinde bir oksijen derişim hücresinin oluştuğu tespit edilmiştir; oksijene daha az maruz kalan yüzey anot gibi davranırken oksijen ile doğrudan temas halinde olan yüzey ise katot davranışı göstermiştir. Bu sayede altın iyonları çözelti içine girerken oksijen, altın yüzeyinden elektronları toplamakta ve siyanür iyonlarıyla çok hızlı bir şekilde kompleksleşmektedir.

MacArthur, demirin bakıra 'dönüştürülmesi' ile kıyaslama yaparak, siyanür çözeltisinden altın çöktürmek için çinko talaşı kullanmıştır. 1904 yılında Charles W. Merrill (1869-1956) tarafından çinko tozu piyasaya sürüldüğünde proses daha verimli hale gelmiş ve Thomas B. Crowe, sisteme çinko beslemeden önce çözeltiyi bir vakum tankından geçirerek çözeltiden havayı ortamdan uzaklaştırdığında daha da geliştirilmiştir. ABD'de geliştirilen bu yeni teknik, daha sonra Merrill-Crowe süreci olarak bilinmeye başlamıştır.

Aktif odun kömürü, metalürjide ilk olarak altının klorlama işlemi ile geri kazanılmasında uygulanmıştır. Bu prosesin yerini siyanürleme aldığında bu yeni proses için kömür de kullanılmıştır. Karbon üzerine soğurulan altın, karbonun yakılması ile kazanıldığı için, bu proses oldukça israfa yol açan bir prosesti. Bu dezavantaj, o dönemde çinko tozu ile çöktürme yoluyla altın geri kazanım

teknolojisinde yapılan büyük ilerlemelerle birleştğinde, aktif karbonun kullanıldığı proseten vazgeçilmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, 1950'lerin başında, aktif karbonun metalürjide uygulanmasına olan ilgi, ABD Maden Ofisi'nde Jack B. Zadra tarafından karbon granüllerine adsorbe edilen altın ve gümüşün sıyırılması ve elektrolitik olarak kazanılmasına yönelik bir prosedür geliştirildiğinde tekrar canlanmıştır. Bu prosedür karbonun yeniden kullanılmasına ve prosesin bir saflaştırma adımı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. 1980'lerdeki pratik gelişmeler, pülpde karbon teknolojisinin yaygın bir şekilde uygulanmasına yol açmıştır. Aktive edilmiş karbonun metal iyonları için adsorpsiyon kapasitesi, iyon değişim reçinelerine kıyasla daha az olmasına rağmen düşük maliyeti ve daha seçimli olması, bu malzemenin kullanım alanı bulmasını sağlamıştır. Bu proses, aynı zamanda, pahalı bir filtrasyon işlemini ortadan kaldırma avantajına da sahiptir [22] [23] [17].

Altının liçlenmesi ve devamındaki kazanım işlemlerinin tarihsel gelişimi Çizelge 2.6'da gösterilmektedir [24].

Çizelge 2.6 Altının liçlenmesi ve devamındaki kazanım işlemlerinin tarihsel gelişimi

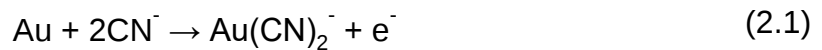
1890 öncesi	Klor / Klorid – Çinko sementasyonu.
1880	Davis'in, klorlu çözeltilerden altın elde etmek için odun kömürü kullanımının patentini alması
1891	Davis prosesinin Mount Morgan'da (Avustralya) kullanılması
1887	MacArthur ve Forrest Kardeşler'in altını çözündürmek için siyanür kullanması
1889	Siyanürün ilk ticari kullanımı, Crown Madeni (Yeni Zelanda)
1894	Johnson'ın, siyanür çözeltisinden altın elde etmek için odun kömürü kullanımının patentini alması
1916	Yuanmi Madeni'nde (Avustralya) karbon kullanarak altın ekstraksiyonu
1939	Chapman'ın, adsorpsiyon sonrası karbon flotasyonunun patentini alması

1950	Meyve çekirdeklerinden elde edilen karbonun Getchell Madeni'nde (Nevada, ABD) deneysel olarak kullanılması
1952	Zadra sıyırma(elüsyon) prosesinin geliştirilmesi
1973	Pülpte karbon (CIP) prosesinin Homestake Madeni'nde (Güney Dakota, ABD) ilk kez kullanılması

2.5.5 Altın Liçi

Altın ekstraksiyonu bağlamında liçleme işlemi, bir metalin veya mineralin bir sıvı içinde çözünmesidir. Burada dikkat edilmesi gereken temel tepkime, altınların sulu bir çözeltide çözünmesidir. Bu işlem kabul edilebilir liçleme oranlarını elde etmek için hem bir kompleks oluşturuucu hem de bir oksidan gerektirmektedir. Sadece sınırlı sayıda çözücü, altın ekstraksiyon işlemlerinde kullanılabilecek yeterlilikte kararlılığa sahip kompleksleri oluşturabilir. Siyanür nispeten düşük maliyeti, altın (ve gümüş) çözündürme konusundaki verimliliği ve diğer metallere kıyasla altın ve gümüş seçiciliği nedeniyle evrensel olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, siyanürün toksisitesi hakkında bazı kaygılar olmasına rağmen, sağlık ve çevre açısından çok az risk oluşturacak şekilde uygulanabilmektedir. Siyanür liçi işleminde en yaygın olarak kullanılan oksidan, havadan sağlanan oksijen olup, bu da söz konusu prosesin tercih edilmesine katkıda bulunmaktadır.

Genel olarak altının siyanür çözeltisinde oksijen ile çözünmesi elektrokimyasal bir işlem olarak kabul edilmektedir. Altın liçi için anodik yarı-tepkime Eşitlik 2.1'de verilmektedir [25];



Katodik yarı-tepkime ise Eşitlik 2.2'de verilmektedir;



En yüksek tepkime hızının Siyanür derişimi / Çözünmüş oksijen molar oranının 6 olduğunda gerçekleştiği Fathi Habashi tarafından 1967 yılında ortaya koyulmuştur. Eğer bahsedilen oran 6'dan büyük ise tepkime hızı siyanür derişiminden bağımsız hale gelmektedir [26].

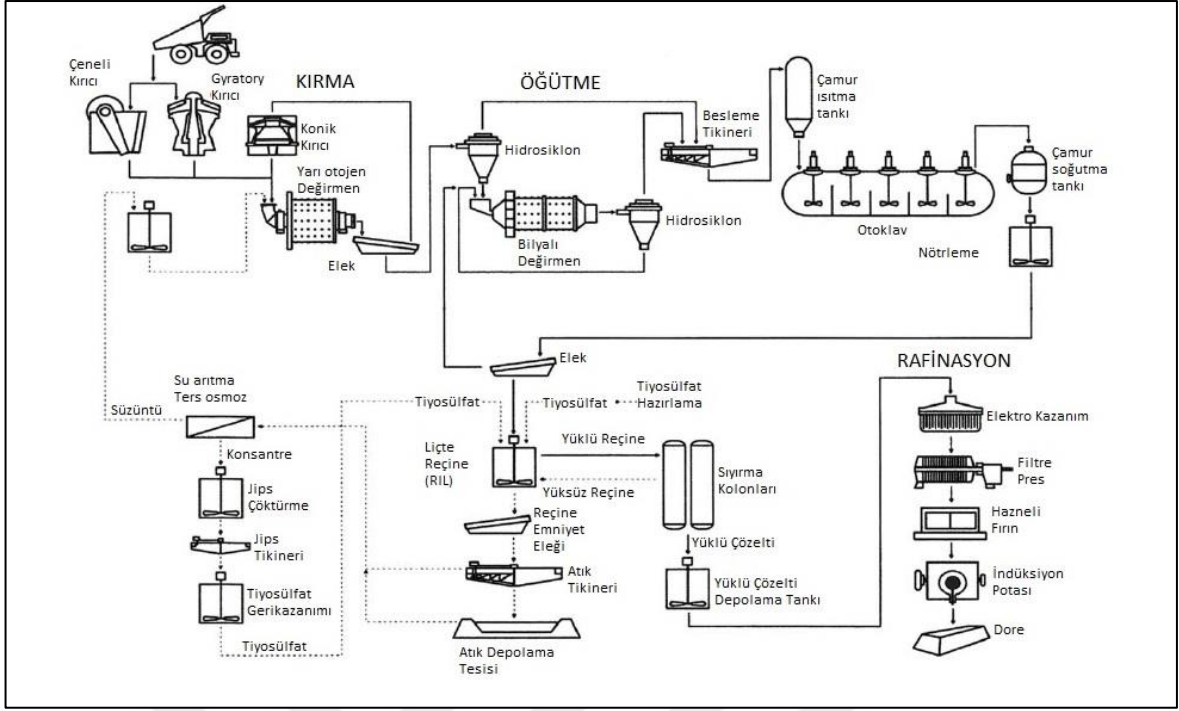
Karıştırıcı tank liçi, yığın liçi ve yoğun (şiddetli) liç de dahil olmak üzere siyanür ile liçleme için geliştirilen farklı yöntemler bulunmaktadır.

Siyanür dışındaki reaktiflerin kullanıldığı akım şemalarının siyanürlü uygulama karşısında aşağıdaki potansiyel avantajları bulunmaktadır;

- Çevresel baskılar ve hatta bazı durumlarda çevresel kısıtlamalar, bazı bölgelerde siyanür kullanılmasını zorlaştırabilmektedir.
- Siyanürsüz bazı yöntemler daha hızlı altın liçleme kinetiğine sahiptir.
- Bu şemalardan birçoğu refrakter cevherler için daha uygun olabilecek şekilde asitli ortamlarda uygulanabilir.
- Bu reaktiflerden bazıları, örneğin bakır gibi diğer metallere göre altın ve gümüş için siyanürden daha seçicidir.

Bununla birlikte, bazı önemli dezavantajlara da sahiptirler ve en azından daha önemli avantajlar sağlayamadıkları sürece şu an için kullanım alanları sınırlıdır.

Klor-klorür liçi ticari olarak 19. yüzyılda uygulanmıştır, ancak kullanımı 1889'da siyanür prosesinin başlatılmasından sonra azalmıştır. Tiyosülfat, tiyourea, tiyosiyanat, amonyak, alkalın sülfid ve diğer halid (örneğin bromür, iyodür) çözeltileri laboratuvarıda yoğun bir şekilde araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır [27] [28]. Ticari uygulaması henüz yaygınlaşmamış olmakla birlikte, tesis ölçekli kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır [8]. Buna örnek olarak, tiyosülfat liçinin uygulandığı Goldstrike Altın Madeni'nin akım şeması Şekil 2.2'de gösterilmektedir [29].



Şekil 2.2 Goldstrike Altın Madeni akım şeması

Altın minerallerinin Liçlenebilirliği

Altın minerallerinden sadece doğal altın, elektrik ve aurikuprit, kolaylıkla siyanürle çözünebilmektedir. Silvanit $[AuAgTe_4]$, kalaverit $[AuTe_2]$ ve maldonitin $[Au_2Bi]$, normal liçleme koşulları altında doğrudan siyanürlemeye dirençli olması sebebiyle, altın içeriğinin tamamını veya bir kısmını kazanabilmek için daha agresif ve işleme uygun hale getirilmiş özel koşullar gerekmektedir [30].

Ayrıca aurostibnit $[AuSb_2]$, bazik çözeltilerinde altın kazanımına imkân vermeyen $AuSbO_3$ 'e dönüşmektedir. Framboydel konfigürasyonda demir hidroksioksitler içeren kolloidal altın, genellikle zayıf çözünme kinetiği gösteren liç tesislerinin atıklarından zenginleştirilmektedir.

Yaygın altın minerallerinin doğrudan siyanürlemeye tepkileri Çizelge 2.7'de gösterilmektedir [17].

Çizelge 2.7 Yaygın altın minerallerinin doğrudan siyanürlemeye tepkileri

Altın Mineralleri	Hız	Çözünme (%)
Doğal altın [$\text{Au}_{>0,8} \text{Ag}_{<0,2}$]	En Hızlı	100
Elektrum [$\text{Au}_{<0,8} \text{Ag}_{>0,2}$]	Hızlı	100
Aurokuprit [AuCu]	Hızlı	100
Silvanit [AuAgTe_4]	Yavaş	100
Kalaverit [AuTe_2]	Yavaş	>80
Maldonit [Au_2Bi]	Yavaş	0-20
Aurostibnit [AuSb_2]	0	0
Auroantimonat [AuSbO_3]	0	0

2.6 Liç yöntemleri

Altın içeren malzemelerin siyanür liçinde kullanılabilecek çeşitli yöntemler bulunmaktadır.:

- Yığın liçi
- Yoğun (şiddetli) liç
- Vat liçi
- Yerinde liçleme
- Karıştırmalı tank liçi

Bu yöntemlerden hangisinin seçileceği, ağırlıklı olarak tane boyu ile kazanım arasındaki ilişki, sermaye ve işletme maliyeti ve her bir durumda çözünme hızına bağlı olmaktadır. Bazen diğer metallerin (örneğin; gümüş, platin grubu metalleri [PGM]) kazanımı, çevresel faktörler ve sermaye finansmanının kullanılabiliirliği gibi diğer faktörler bu seçimde önemli rol oynayabilmektedir [8].

2.6.1 Yığın Liçi

Yığın liçi, düşük tenörlü cevherlerin işlenmesi için, öğütme ve karıştırmalı tanklar gibi yüksek maliyetli uygulamaları içermeyen, görece düşük maliyetli bir yöntemdir. Altın kazanım oranı ve kırma maliyeti arasındaki ilişkiye göre ideal tane boyuna kırılmış olarak veya doğrudan tüvenan cevher beslenebilmektedir [8].

Proses ticari olarak ilk kez 1971 yılında Carlin Madeni'nde (Nevada) uygulanmış ve Salt Lake City'deki Birleşik Devletler Maden Dairesi'nin 1960'ların sonlarında ve 1968 yılında Carlin Madeni'nde yaptığı çalışmalar esas alınmıştır. Carlin'de kırılmış

cevher (nominal olarak <18 mm) yılın en sıcak 6 ayında günde 350 ton olarak yığına serilir. 0,05 ve 0,50 kg/t siyanür ve kireç tüketimleri ile yaklaşık %65 altın verimi elde edilmiştir [31].

2.6.2 Yoğun (Şiddetli) Liç

Yoğun siyanürleme prosesi, özellikle siyanür ve oksijen açısından yüksek reaktif derişimlerine ihtiyaç duymaktadır ve genellikle altın çözünme hızını artırmak için yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem yüksek işletme maliyetini karşılayabilmek için, yüksek verimde metal kazanımı gerçekleştirme amacı ile yüksek tenörlü cevherlere uygulanmaktadır. Genellikle, flotasyon ve gravite yöntemleri ile zenginleştirilmiş cevherlere uygulandığından, aşağıda verilen durumlarda, konvansiyonel liç işlemine üstünlükler sağlamaktadır:

- Malzemenin standart siyanürleme koşullarında kabul edilemeyecek uzunlukta durma zamanı gereksinimi duyulacak şekilde iri taneli altın içermesi,
- Yüksek siyanür ve oksijen derişiminde çözünme hızı artan, altının bir kısmının veya tamamının hapsolmuş şekilde bulunduğu siyanür ile çözünebilen mineraller (sülfidler) içermesi,
- Altının siyanürleme işlemine müdahil olan diğer mineraller ile birlikte bulunması, örneğin; tellür ve cıva.

Yoğun liç işlemi ile genellikle yüksek altın (ve gümüş) kazanımı (> %97) elde edilebilmektedir. Liç bekleme süresi genellikle 24 saat veya daha azdır [8].

2.6.3 Vat Liçi

Vat liçi genellikle büyük tahta veya çimento yapılarda (tank) ya da çelik tanklarda ya da bazı durumlarda yığın liçinin tamamen suyla kaplanabileceği vadilerde gerçekleştirilmektedir. Her durumda cevher tamamen liç solüsyonuna batırılmış olmaktadır. Bu durum kütle taşınımına yardımcı olacak şekilde, işlenecek cevherin tüm yüzeylerinin verimli şekilde ıslanmasını sağlamaktadır. En önemli avantajı cevherin tüm bölgelerine solüsyonun ulaşması ve yığın liçinde gerçekleşenin aksine ölü alanların ortadan kaldırılmasıdır. Proses, yüksek yatırım (vat inşaatı) ve işletme maliyetlerine karşın yığın liçine kıyasla sınırlı verim artışı sağlaması nedeniyle fazla uygulama alanına sahip değildir. Ancak, bu yöntem, Homestale Lead'de 2000 yılında işletme faaliyetleri durana kadar 100 yıl kadar uygulanmıştır [8].

2.6.4 Yerinde Liç

Yerinde liç, seyrek siyanür çözeltisinin cevhere bulunduğu yerde uygulanmasıdır [32]. Bu yöntemde, altın içeriğinin ekonomik olarak makul bir miktarına çözeltilerin ulaşabilmesi için cevherin gözenekli bir yapıda olması gerekmektedir. Bu gözeneklilik cevherin kendiliğinden sahip olduğu bir özellik olabileceği gibi patlatma yöntemi ile parçalanma sağlanabilmektedir.

Uygulama olarak aşağıda sıralanan sebepler nedeniyle bu yöntemden sakınılmaktadır:

- Çözeltilerin altın ile teması genellikle çok zayıftır ve düşük verim elde edilebilir.
- Yerinde liç uygulamasında çözeltilerin geri kazanımı oldukça sınırlıdır ve yüksek reaktif maliyetine ve düşük verimle sonuçlanmaktadır.
- Çevresel sınırlamalar ve yasal mevzuatlar bu yöntemin kullanılmasını engelleyebilmektedir [8].

2.6.5 Karıştırmalı Tank Liçi

Çok çeşitli cevher türlerine yaygın olarak uygulanan karıştırmalı tank liçi, 200 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. Liçleme işlemi tipik olarak çelik tanklarda yapılmakta ve katılar hava veya mekanik karıştırma yardımıyla askıda tutulmaktadır. Konik tabanlı liçleme tanklarında (Browns ve Pachuca tankları) hava ile karıştırma siyanürleme işleminin ilk yıllarında yaygın bir şekilde uygulanmıştır; ancak daha az enerji ihtiyacı gerektiren ve daha iyi karıştırma verimi sağlayan bir uygulama olan mekanik karıştırma büyük oranda bu uygulamanın yerini almıştır. İyi tasarlanmış sistemlerde, tek bir reaktör içinde mükemmel karışım koşullarına yaklaşılabilmektedir. Bu koşullar tepkime kinetiğini optimize etmeye ve mevcut liçleme ekipmanlarından en iyi şekilde yararlanmaya yardımcı olmaktadır [8].

150-1500 m³ arasında hacim değerlerine sahip bu tanklarda, yüksek miktardaki çamur ve karıştırma yöntemine bağlı olarak ölü bölgeler oluşabilmekte ve akışın kısa devre (bypass) yapması söz konusu olabilmektedir. Metal kazanımını azami seviyeye çıkarmak için tanklardaki çalışma koşullarının optimize edilmesi önem arz etmektedir [33].

Tank liçi işleminde metal kazanımını etkileyen faktörlere aşağıda değinilmektedir.

Tane boyu: Liçlenecek olan malzeme, altın kazanımını ve boyut küçültme maliyetlerini optimize eden bir tane boyuna, tipik olarak $80 < 45-150 \mu\text{m}$ arasında bir tane boyuna öğütülmektedir. Bazı ender durumlarda oksidatif ön işlem ve/veya liçleme yoluyla optimum işletme şartları için tüm cevher 80 oranında $< 20-25 \mu\text{m}$ aralığında bir boyuta öğütülmektedir. Karıştırıcılı tank liçi, yaklaşık $150 \mu\text{m}$ 'dan daha iri boyutlarda, taneleri askıda tutmanın zorlaşması ve ekipmanlardaki aşınma oranlarının artması sebebiyle nadiren uygulanmaktadır.

Çok ince öğütme ekipmanlarındaki gelişmeler (örn. Xstrata IsaMill ve Metso SMD) ile birlikte karıştırıcılı tank liçi, çok ince öğütülmüş malzemeleri işlemede giderek artan bir oranda kullanılmaktadır. Karıştırıcılı tank liçi ve/veya oksidatif ön-işlem uygulaması öncesinde, refrakter ve refrakter olmayan sülfid mineral kafes yapılarında bulunan altının daha da serbestleştirilebilmesi amacıyla konsantreler, 80 oranında 7 ile $10 \mu\text{m}$ arasında bir boyuta kadar öğütülebilmektedir [8]. Bu seviyedeki tane boylarına öğütüldüğü ilk ticari işletmelerden biri Avusturalya'daki Kalgoorlie altın madenidir. Bu tesiste, 2001 yılında kurulan 2 adet Isamill değirmeni ile sülfür konsantresinin $-10 \mu\text{m}$ 'a öğütülmesinin ardından, öğütülmüş malzeme kavurma işlemine beslenmektedir [34].

Çamur yoğunluğu: Liçleme, katı maddenin özgül ağırlığına, tane boyuna ve çamur viskozitesini etkileyen minerallerin (örn. kil mineralleri) varlığına bağlı olarak genellikle 35 ila 50 arası katı madde oranında çamur yoğunluklarında yapılır. Kütle transferi olgusu, düşük çamur yoğunluklarında en üst düzeye çıkmakta; diğer taraftan, yoğunluk arttıkça sabit hacimli bir liç ekipmanında katının durma zamanı da artmaktadır. Ayrıca çamur yoğunluğu yükseldikçe reaktif tüketimleri de azalmakta ve malzemenin birim kütlesi başına düşen hacim azaldığı için daha düşük dozlarda optimum derişimler elde edilmektedir [8].

pH: Çamur pH modifikasyonu ve kontrolü için gerekli alkaliler, hidroliz sonucu siyanürün aşırı düzeyde gaz fazına geçerek sistemden uzaklaşmasını önlemek ve koruyucu alkaliniteyi sağlamak için daima siyanür ilavesinden önce eklenmektedir. Çoğu liç sistemleri, pH 10 ile 11 arasında çalışmaktadır. Özellikle pH'ı düşüren bileşenler içeren cevherlerin işlenmesi sırasında istenen çalışma pH değerinin korunması için liç devresi boyunca aşamalı baz eklenmesi gerekebilmektedir [8].

Siyanür Derişimi: Siyanür, liç devresinden önce, yani öğütme sırasında veya liçleme işleminin ilk aşamasında karıştırılmalı liç sistemlerine eklenebilir. Altının çözünmesini en üst düzeye çıkarmak amacıyla, liçlemenin ilerleyen aşamalarında da siyanür ilavesi yapılabilir. Liçlenecek olan cevher veya konsantre içinde siyanürü tüketen mineraller yoksa; pratikte kullanılan siyanür derişimleri, 0,05 ila 0,5 g/L NaCN arasında değişir ve tipik olarak 0,15-0,30 g/L NaCN değerlerinde gerçekleşmektedir. Kolay işlenebilen cevherler için karıştırılmalı tank liç sistemlerinde gerçekleşen tipik siyanür tüketimleri yaklaşık 0,25 ila 0,75 kg/t arasında değişmektedir. Besleme cevherinin önemli miktarda siyanür tüketici mineral ve/veya yüksek gümüş içeriği (yani, >20 g/t) içerdiği durumlarda, daha yüksek siyanür derişimleri, yani 2-10 g/L NaCN arasında, uygulanabilmektedir. Bu gibi durumlarda siyanür tüketimi, siyanürü tüketen minerallerin niteliğine ve miktarına bağlı olarak 1-2 kg/t arasında değişebilmektedir. Siyanür derişimleri genellikle manuel titrasyon teknikleri ile izlenmekte veya daha az yaygın olarak titrimetrik, kolorimetrik, potansiyometrik ve iyonla özgü elektrot tekniklerine dayanan çevrimiçi siyanür analizörleri ile takip edilmektedir [8].

Oksijen: Liç işlemi için gereken oksijen ihtiyacı genellikle tanklara hava beslemesi ile karşılanır. Bu besleme bazen birincil karıştırma yöntemi olarak uygulandığı gibi bazen de mekanik olarak karıştırılan tanklarda saf oksijen beslemesi olarak gerçekleştirilmektedir. Her iki durumda da kaba besleme sistemleri, genellikle tatmin edici kabarcık dağılımı sağlamak ve yeterli çözünmüş oksijen derişiminin sürdürülmesini sağlamak için yeterlidir. Genelde çözünmüş oksijen derişimi, hava besleme işlemi uygulayarak hesaplanan doyma seviyelerinde (yani, 25°C'de deniz seviyesinde 8,2 mg/L O₂) veya bu seviyelerin biraz üzerinde tutulmaktadır [35].

Kalma süresi: Kalma süresi gereksinimleri, işlenen malzemenin liçleme özelliklerine bağlı olarak değişmekte ve bu süre test çalışmaları ile belirlenmektedir. Pratikte uygulanan liçleme süreleri birkaç saatten birkaç güne kadar değişiklik göstermektedir. Liçleme, genelde 4-10 aşamada gerçekleştirilmekte; burada her bir aşamanın hacmi ve aşama sayısı, çamur akış hızına, gerekli kalma süresine ve kullanılan karıştırma ekipmanının verimliliğine bağlı olmaktadır [8].

Ters Akımlı Liçleme:

Liçleme verimliliği “Le Chatelier” ilkesinin uygulanmasıyla yükseltilebilmektedir. Bu ilkeye göre, çözeltide altın derişimi ne kadar düşük olursa, altın çözünümü için sürükleyici kuvvet o kadar yüksek olacaktır. Bu olguya alternatif bir açıklama, altın-siyanür kompleksinin cevher bileşenleri üzerine geri çevrilebilir şekilde adsorpsiyonudur. Çözelti daha düşük tenörlü bir çözelti ile değiştirildiğinde veya çamur içerisinde altın-siyanür bileşikleri için aktif olarak rekabet eden bir malzeme (aktif karbon veya uygun iyon değiştirici reçine gibi) dahil edildiğinde, altın adsorpsiyonu tersine çevrilmiş olur. Bu etkiden pratikte faydalanmak için, liç işlemi sırasında ara katı-sıvı ayırma basamakları gerçekleştirerek yüksek tenörlü altın çözeltisi ayrıştırılmakta ve kalan çamurdaki katılar daha düşük tenörlü liç çözeltisi ve/veya taze su ve reaktif ile yeniden liçlenmektedir [8].

2.7 Altının çözelti fazından kazanılması

2.7.1 Çinko Çöktürme

1888 yılından beri yüklü çözeltiilerden altın ve gümüşü kazanmak için toz veya talaş şeklinde çinko kullanımı Merrill-Crowe prosesi olarak adlandırılmaktadır. Bu proses, oksidasyon ve indirgemeyi içeren klasik bir sementasyon tepkimesidir. Normalde bir öğütme ve liç işleminin sonrasındaki katı-sıvı ayırma adımından elde edilen veya yığın liçinden gelen çözeltilere uygulanan bu proses, ayrıca karbon sıyırmadan üretilen solüsyonlarda ve yoğun liç işleminden gelen çözeltiilerde de kullanılmaktadır. Merrill-Crowe prosesi için gerekli olan öğütme işlemlerini takiben pahalı katı-sıvı ayırma adımı gereksinimi nedeniyle, pülpte karbon (CIP) yöntemi bu işlemin yerini almıştır. Belirli metalürjik uygulamalarda kullanımı hala devam etmektedir. Çözeltideki gümüş/altın oranı yüksek olduğunda, yüklü çözeltinin cıva içeriği yüksek olduğunda, çok yüksek oranda flotasyon reaktifleri veya diğer organik bileşikler mevcut olduğunda ya da operasyonun ölçeği küçük olduğu durumlarda bu proses tercih edilmektedir.

Siyanürleme tepkimelerinin çoğunda olduğu gibi HCN gazı oluşumunu engellemek için pH değeri 10,5'in üzerinde tutulmalıdır. İdeal serbest siyanür derişimi, liç işleminden sonra tipik atık seviyelerine karşılık gelen 150-200 mg/L'lik NaCN seviyesindedir. Düşük siyanür derişimi seviyeleri, tepkimeyi pasifleştiren veya engelleyen çinko hidroksit oluşumuna uygun ortam oluşturmaktadır; daha yüksek

siyanür seviyeleri ise metalik çinkoyu çözebilir, bu nedenle çinko tüketimini artırabilir. Aşırı çinko eklenmesi halinde, çinko hidroksit oluşumuna yardım edilmiş olmaktadır.

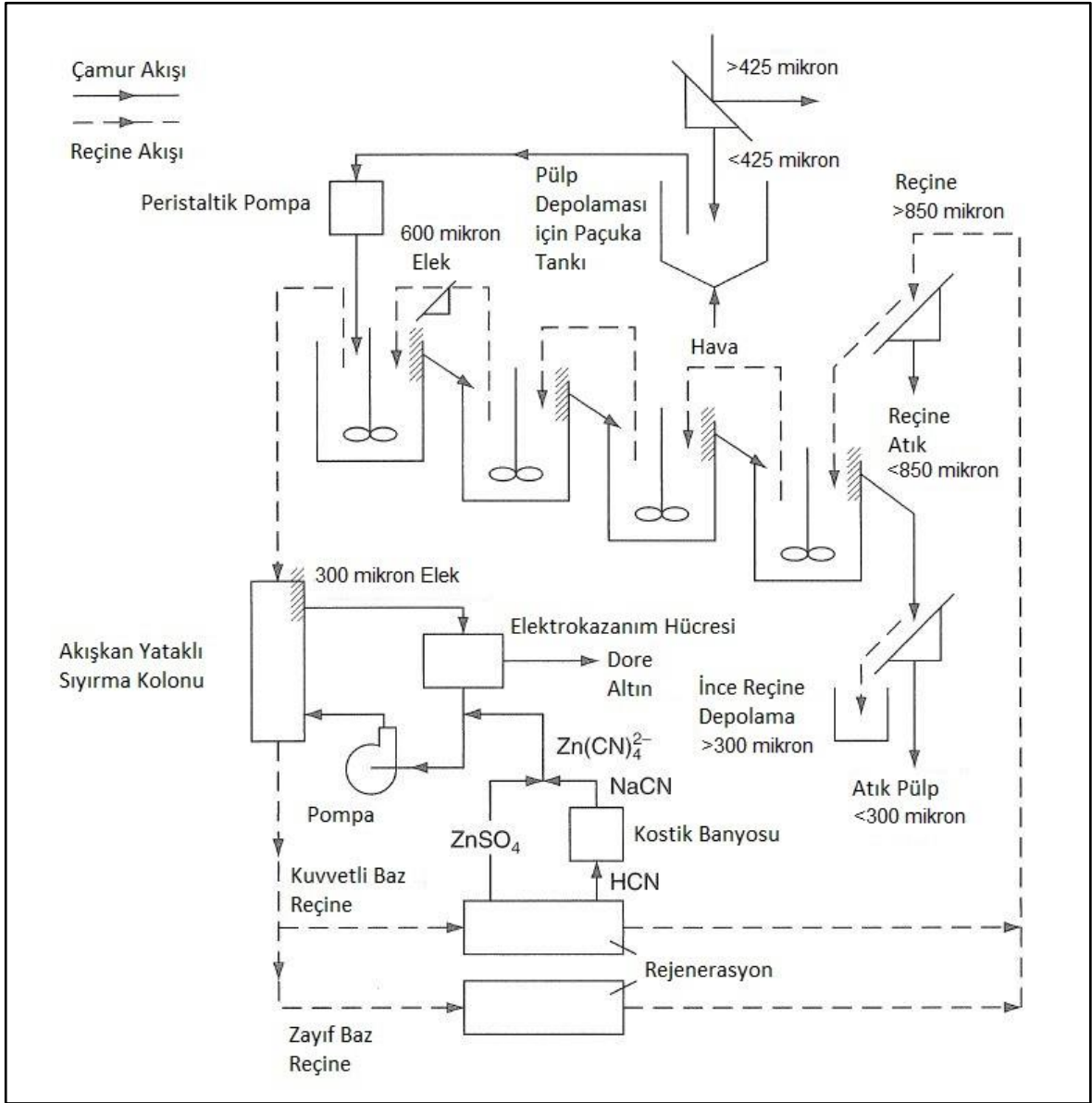
Her ne kadar sıcaklık tepkime hızını arttırsa da tepkime, donma sıcaklığının hemen üzerindeki düşük sıcaklıklarda bile çok hızlıdır. Yüksek sıcaklık ve artan yükseklik, oksijen çözünürlüğü denge noktasını aşağıya doğru çekmektedir. 1 ppm'den düşük çözülmüş oksijen seviyeleri, tepkime için ideal seviyelerdir; daha yüksek değerler tepkime kinetiğini düşürmektedir, çünkü oksijen azalması altının azalması ile rekabet eder. Oksijenin varlığı aynı zamanda altının siyanür ile yeniden çözünmesini de mümkün kılabilir.

Uygulamada, altın, gümüş ve cıva %99,5'in üzerinde yüksek verimlilikle çöktürülebilmektedir. Bazı baz metaller, özellikle demir, bakır, nikel ve kobalt da çöktürülmekte ancak verimlilik düşük olmaktadır. Bakırın çöktürülmesi, siyanür derişiminin artırılmasıyla engellenebilmekte, yüksek bakır seviyelerinin olduğu durumlarda etkili bir altın çöktürme işlemi için daha yüksek siyanür derişimleri gerekli olmaktadır [17].

2.7.2 Pülpte reçine ve çözeltide reçine

Altına seçimli anyon değıştirici reçineler konusunda yaşanan önemli gelişmeler ve bu ürünlerin bazılarının (Minix ve Aurix) ticarileştirilmesi, özellikle batı ülkelerinde, siyanürlenmiş pülplerden altının kazanılmasında pülpte reçine (RIP) uygulamasını, pülpte karbona (CIP) alternatif bir yöntem haline getirmiştir. Siyanür liçi çözeltilerinden altın elde etmek amacıyla, altın seçici reçinelerin aktif karbona kıyasla belirgin avantajları bulunmaktadır.

Reçineler potansiyel olarak daha yüksek yükleme kapasitesine ve daha yüksek yükleme hızlarına sahip olup, organik maddeler tarafından olumsuz etkilenme ihtimalleri daha düşük olmakta ve termal rejenerasyona ihtiyaç duymamaktadır. Altına seçimli reçinelerin en büyük dezavantajı, aktif karbondan daha yüksek maliyetli olmalarıdır. Bununla birlikte, maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, öncelikle adsorbanın rejenerasyonuna gerek duyulmaması ve dolayısıyla sermaye ve işletme maliyetlerinde tasarruf sağlaması sayesinde, aktif karbondan daha uygun maliyetli olabilmektedir [36]. Pülpte reçine yönteminin kullanıldığı örnek bir akım şeması Şekil 2.3'te verilmektedir [8].



Şekil 2.3 Pülpde reçine yöntemi

Altın seçici reçineler ticari olarak yıllardır mevcut olmasına ve uygulandığı tesisler bulunmasına rağmen, altın üretiminde pülpde karbon yöntemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durumun temel nedeninin, pülpde karbon yönteminin (CIP) otuz yıldan uzun süredir kullanılmakta olan yerleşik bir teknoloji olması ve dolayısıyla bu teknolojiyi kullanmanın risklerinin düşük olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Yine de son zamanlarda, pülpde reçine ve liçte reçine yöntemleri, başta reçinenin karbona göre daha yüksek altın kazanımları sağlaması, solüsyondaki altını bünyesine alarak kayıplara neden olan cevherlerden (preg-robbing) altının

kazanılması ve elektriğin pahalı olduğu yerlerde altın kazanımı gibi uygulama alanlarının olduğu açıkça görülmeye başlanmıştır [37] [17].

2.7.3 Altın Siyanür Kompleksinin Aktif Karbon ile Kazanımı

Altın cevherlerini liçlemek için siyanür kullanılması, 20. yüzyılın başında altın endüstrisinde devrim yaratmış ve verimli, uygun maliyetli ve yaygın olarak uygulanabilen yeni bir proses sağlamıştır. 20. yüzyılın son çeyreğinde siyanürlü liç çözeltilerinden altın kazanımı için aktif karbonun kullanılmaya başlanması, altın cevheri işleme ekonomisi üzerinde benzer bir etki yaratmıştır. Merrill-Crowe çinko sementasyon aşamasının yerini alan pülpte karbon (CIP) ve liçte karbon (CIL) kazanım yöntemleri, düşük tenörlü ve kompleks cevherlerin (örneğin, yüksek killi cevherler) daha düşük sermaye ve işletme maliyetleri ve daha yüksek metal kazanımları ile işlenmesine olanak veren bir proses sağlamaktadır [17].

Aktif karbon ile altın-siyanür kompleksinin kazanımı temel olarak pülpte karbon (CIP), liçte karbon (CIL) ve kolonda karbon (CIC) olarak adlandırılan üç yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Bir pülpte karbon tesisinde, liç işlemi ilk adsorpsiyon tankından önceki liç tanklarında önemli ölçüde tamamlanmakta ve altın siyanür kompleksi tipik olarak 4-10 adet bulunan adsorpsiyon tanklarında aktif karbon yüzeyine soğurulmaktadır. Bir liçte karbon tesisinde ise, aktif karbon direk olarak liç işleminin gerçekleştiği tanklara eklenmekte ve adsorpsiyon tankları için gereken yatırım maliyeti bir miktar düşürülmektedir. Bu yöntem genellikle siyanür-altın kompleksini bünyesinde tutan nitelikte karbon içeren cevherlerde kullanılmaktadır [38]. Kolonda karbon yönteminde ise temiz ve berrak liç çözeltisi karbon yüklenmiş kolonlardan geçirilerek altın siyanür kompleksinin karbonların üzerine absorbe edilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem özellikle yığın liçi tesislerinde kullanılmaktadır.

Temel iyon değişimi işleminin aksine, aktif karbon ile altın-siyanür kompleksinin kazanılması nispeten yavaş gerçekleşmektedir. Bu yüzden adsorpsiyon devresinde ideal işletme koşullarının belirlenmesi konusu önemli bir faktör olmaktadır. Aktif karbonun altın-siyanür kompleksini soğurma hızı, çözeltideki altın derişimine, serbest siyanür derişimine, çözeltideki organik solventlere, pH değerine, iyon şiddetine, çözelti sıcaklığına, karbonun tane boyutuna ve karıştırma verimine bağlı olarak değişmektedir [39].

Aktif karbon üzerine alınan altın, adsorpsiyon işleminin tersi olan sıyırma (elüsyon) yöntemi ile ayrıştırılarak altınca zengin ve temiz bir çözelti elde edilmektedir [40].

2.7.4 Elektrolitik Kazanım

Elektrolitik kazanım, çoğunlukla, aktif karbonun sıyırılması ile üretilen çözeltiden altın ve gümüşü kazanmak için kullanılmaktadır. Elektrolitik kazanım işleminin çalışma şekli, kullanılan sıyırma prosedürüne bağlı olarak değişmektedir. Zadra sıyırma işleminde, elektroliz hücreleri sıyırma kolonu ile seri halde bağlı olmakta, kolon ve elektroliz hücreleri karbonların reaktivasyon ve sonrasında adsorpsiyon ünitesine gönderilmeden önce yeterince düşük altın içeriğine (<100 g/t) ulaştırılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır.

Anglo Amerikan Araştırma Laboratuvarları'nın (AARL) sıyırma prosesinde elektroliz işlemi, sıyırma kolonundan tek bir geçişte elde edilen sıyırma çözeltisinin tamamında uygulanmaktadır. Yüklü sıyırma çözeltisi hücre boyunca sirküle edilir ve bu sirkülasyon, altın derişimi atılabilecek düzeye gelen kadar veya adsorpsiyon devresine geri döndürülebilecek kadar düşük olana kadar devam ettirilmektedir. Elektroliz işlemi, sıyırma prosesinden bağımsız olarak çalıştırılmaktadır.

Siyanür ve/veya alkali içeren sıyırma çözeltilerinden altının kazanılmasını sağlayan bir hücrenin elektrotlarında meydana gelen tepkimeler Eşitlik 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6'da gösterilmektedir [17].

Katot:



Anot:



2.7.5 Rafinasyon

Rafine etme prosesleri, genelde %10'dan daha yüksek miktarda altın içeren, başta çinko çöktürme çamurları, yüklü katotlar, elektroliz çamurları ve cıva-altın amalgamı olmak üzere ilk aşama zenginleştirme proseslerinin ürünlerinin altın açısından zenginleştirilmesi için kullanılmaktadır. Buna ek olarak, altın ekstraksiyonu ve rafine etme prosesleri ile, yüklenmiş karbon tozları, rafineri cürufları, yüksek tenörlü tozlar, eski potalar ve fırın astarları ile rafineri zeminlerinden temizlenen tozlardan altının kazanılması için daha ileri işlemlere tabi tutulmaktadır. Uygulanan yöntemler malzemenin niteliğine ve mevcut safsızlıkların türüne ve miktarına bağlı olmaktadır.

Rafinasyon işlemi genellikle iki aşamada gerçekleştirilmektedir:

1. Ham külçenin üretilmesi için üretim noktasında (örneğin maden sahasında) işleme tabi tutulması (tipik olarak %90-99 oranında toplam kıymetli metal)
2. Satış için yüksek saflıkta altın ve gümüş üretmek amacıyla ilk aşamadaki ham külçenin rafine edilmesi.

Birinci aşama, küçük miktarlarda kıymetli maden üretimi için bile maden sahasında nispeten düşük maliyetle uygulanabilir. Bu işlem, taşınması kolay ve doğru hesaplama yapabilmek için erimiş halde veya homojen katı külçe olarak temsili olarak örneklendirilebilen düşük hacimli bir ürün vermektedir. Alternatif olarak, kazanım proseslerinin daha düşük tenörlü ürünleri (örneğin; çökeltirler, katotlar, elektroliz çamurları), çok nadiren yapılsa da bağımsız bir rafineriye nakledilebilmektedir.

İkinci aşama, çoğunlukla büyük ölçekli altın (ve diğer metal) üreten bölgelerin yakınında bulunan ve dore külçeyi daha büyük ölçekte daha ekonomik bir şekilde işleyebilen rafineriler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bazıları; İstanbul Altın Rafinerisi (İstanbul, Türkiye), Johnson Matthey (Utah, Amerika Birleşik Devletleri), Perth Darphanesi (Perth, Batı Avustralya) ve Rand Rafinerisi'dir (Johannesburg, Güney Afrika). Nihai ürünün saflığı nihai kullanım amacına bağlıdır. Genellikle mücevher ve külçe için saflık %99,6 ve madeni paraların üretimi için %99,99'dur [8].

2.7.6 Tepkime Kinetiğinin Modellemesi

Herhangi bir tepkime için hız sabiti, Eşitlik 2.7'de gösterildiği gibi Arrhenius denklemi ile ifade edilebilir;

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (2.7)$$

Burada;

k = tepkime hızı

A = Çözelti türlerinin çarpışma frekansı ile bağlantılı sabit

E_a = tepkime için gereken aktivasyon enerjisi

R = gaz sabiti

T = mutlak sıcaklık

Görüleceği üzere, tepkime hızı sıcaklığa bağlı olarak üssel olarak artmaktadır. Bir tepkime için E_a 'nın değeri $\log k$ 'yi $1/T$ 'ye göre çizerek ve doğrunun eğimini (E_a/R) hesaplayarak bulunabilir. E_a terimi, Eşitlik 2.8'de gösterildiği şekilde tanımlanabilir [8].

$$E_a = RT^2 \frac{d \ln k}{dT} \quad (2.8)$$

2.7.7 Altın Liçinde Tepkime Kinetiği

Bir altın liç tesisinde, tepkime kinetiği oldukça yüksek önem arz etmektedir. Çoğu cevher hazırlama tesislerinde olduğu gibi, altın liç tesislerinin de pek çoğu mümkün olan en yüksek besleme tonajı ile çalışmaktadır. Bu durumda, katının tanklarda durma zamanı da azalmaktadır. Altın-liçleme kinetiğini etkileyen diğer önemli faktörler, tane boyu, galvanik etkiler, karıştırma hızı, sıcaklık, yabancı iyonlar, siyanür tüketen mineraller ve sıvıdaki altını bünyesine alarak verim kaybına neden olan yapılardır. Kaba altın genellikle liçleme öncesinde gravite yöntemleri ile kazanılmaktadır.

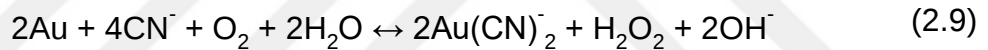
Kurşun, cıva tuzları, bizmut ve talyum iyonları altının çözünme hızını artırmaktadır. Kurşun tuzlarının siyanür çözeltilerine ilavesi, sülfidlerin zararlı etkisine karşı koymanın amaçlandığı yaygın bir uygulama olup 60 yılı aşkın bir süredir

kullanılmaktadır. Diğer taraftan, cıva, bizmut ve talyum ise toksisiteleri son derece yüksek olduğu için kullanılmamaktadır.

Altının çözünme oranını etkileyen başlıca faktörler, siyanür ve oksijen derişimleri, sıcaklık, pH, altının yüzey alanı, karıştırma derecesi ve kütle transferi, altının saflığı ve çözeltideki diğer iyonların varlığı aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak tartışılmaktadır [8].

Siyanür ve Çözünmüş Oksijen Derişimi:

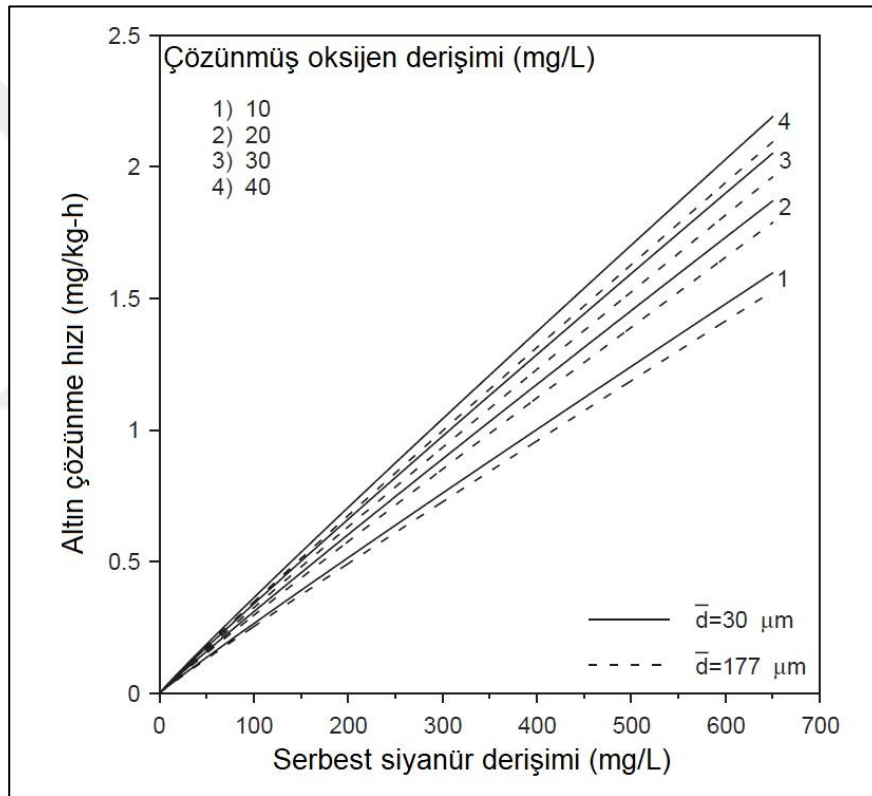
Eşitlik 2.9'daki genel altın çözünme tepkimesi göz önüne alındığında, hidrojen peroksit indirgenmesinin etkililiğine bağlı olarak, bir mol altının çözünmesi için bir mol oksijen ve iki mol siyanür gerektiğini ve ana tepkimenin iki-elektronlu bir proses olduğu görülmektedir. Hızı sınırlayan durum, siyanür ve oksijen difüzyon oranları birbirine eşit olduğunda ortaya çıkmakta; diğer bir deyişle türlerden hangisi daha yavaş difüzyon katsayısına sahipse bu tür, hız sınırlayıcı faktör olmaktadır. Karma potansiyelde (E_m) katodik tepkimelerden (i_c) kaynaklanan akım, anodik akıma (i_a) eşit olup, bu akımın tersi yönündedir.



Siyanür derişimini kontrol etmek amacıyla, derişik siyanür çözeltisi veya katı siyanür bileşiği kullanılmaktadır. Oksidan derişiminin (çözünmüş oksijen) kontrolü ise, atmosferik koşullar altında oksijenin suda çözünürlüğü düşük olduğu için kolay bir şekilde sağlanamamaktadır. Sonuç olarak, çözeltiye oksijen sağlamak için hava beslemesi kullanan tesislerde maksimum altın çözünme hızı, prosesin çalıştırıldığı sıcaklık ve basınç şartlarına göre belirlenir. Deniz seviyesinde ve 25°C sıcaklıkta, çözeltideki çözünmüş oksijenin doymuş derişimi 8,2 mg/L'dir. Bu değer, yükseklik arttıkça ve sıcaklık arttıkça azalır. Bu oksijen derişiminde altının maksimum çözündürme hızını veren ilgili siyanür derişimi yaklaşık %0,005 veya 0,002 M CN^- civarındadır ve bu da %0,01 veya 0,05 g/L NaCN'ye eşdeğerdir. Bu durum, maksimum altın çözünme hızına (yani, 0,47 mg/cm²/saat) yakın değerlere %0,02 veya 0,10 g/L NaCN'de ulaşıldığı pratik gözlemler ile desteklenmektedir [8].

De Andrade Lima ve Hodouin (41), -210+149 μm , -149+105 μm , -105+74 μm , -74+53 μm , -53+37 μm ve -37 μm boy aralıklarında çözünmüş oksijen derişimi ve serbest siyanür derişiminin altın çözünme hızına etkisini incelemiştir. Bu

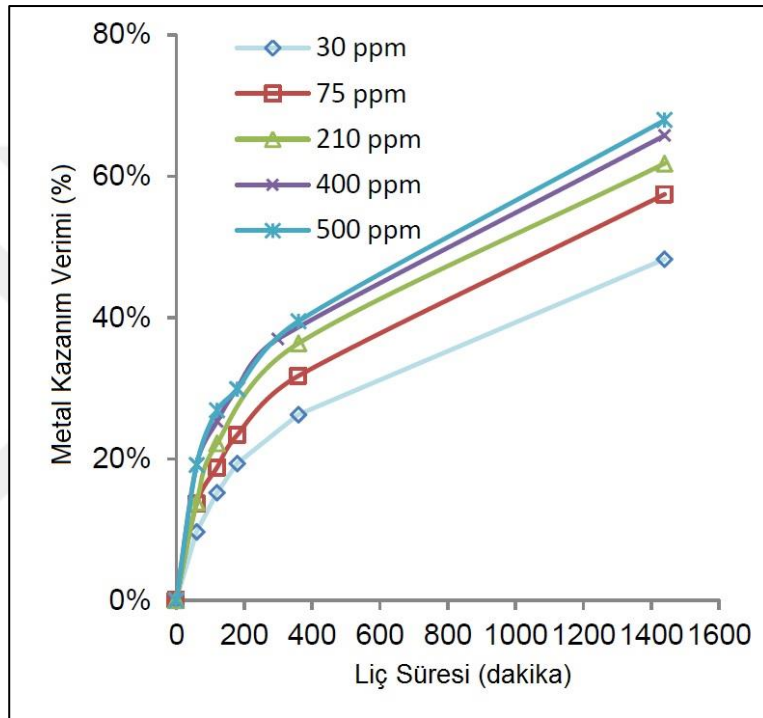
fraksiyonlardan en iri (-210+149 μm , ort. 177 μm) ve en ince (-37 μm , ort. 30 μm) boyut fraksiyonlarında elde edilen altın çözünme hızının, farklı çözünmüş oksijen derişimlerinde, serbest siyanür derişimine bağılı değışimi Şekil 2.4'te verilmektedir. Görüleceğı üzere, gerek çözünmüş oksijen derişiminin gerekse serbest siyanür derişiminin artmasına paralel olarak, altının çözünme hızı her iki tane boyu aralığı için de artmaktadır. Diğer taraftan, 30 μm 'luk tanelerde altının çözünme hızı, bütün çözünmüş oksijen ve serbest siyanür derişimi değıerleri için, 170 μm 'luk tanelerde elde edilen altın çözünme hızından kaydadeğer oranda yüksek olmaktadır. Bu da tanelerin yüzey alanının artmasıyla beraber altın çözünme hızının da arttığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.4 Çözünmüş oksijen ve serbest siyanür derişiminin altın çözünme hızına etkisi

Diğer taraftan 20 mg/L'den daha yüksek çözünmüş oksijen derişimlerinin, oksit tabakası oluşumuna bağılı olarak altın yüzeyinin pasivasyonuna neden olabileceğı de öne sürölmektedir [42]. Bazı koşullarda, pasivasyonun, etkin karıştırmanın yapılmadığı sistemlerde 7 mg/L kadar düşük çözünmüş oksijen derişimlerinde bile oluşabileceğı gösterilmektedir [43].

Hlabangana vd. [44], 150-75 μm tane boyu aralığındaki cevher ile 30, 75, 210, 400, 500 ppm değerleri için serbest siyanür derişiminin liç verimine etkisini incelemiştir. Nihai olarak 1600 dakikaya kadar sürdürülen liç testlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 2.5'te verilmektedir. Görüldüğü üzere artan serbest siyanür derişimi ile birlikte metal kazanım verimlerinde de artış gerçekleşmekte, 30 ppm'den 210 ve 400 ppm siyanür derişimlerine çıkıldığında verimde belirgin artış kaydedilirken, 400 ppm'den 500 ppm serbest siyanür derişimine çıkıldığında verimde nispeten düşük bir artış gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 2.5 Serbest siyanür derişiminin altının çözünme hızına etkisi

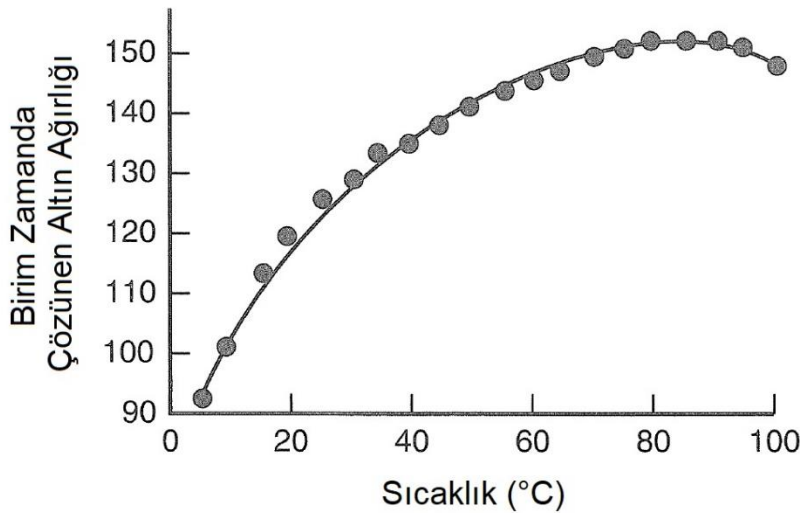
Ayrıca farklı serbest siyanür derişimlerdeki siyanür tüketimleri ile ilgili olarak Kondos, Deschenes ve Morrison [45] tarafından yapılan çalışmada, düşük serbest siyanür derişiminde (50 ppm) yapılan testlerde 100 g/ton siyanür tüketimi gerçekleşirken, tesis koşullarında yüksek serbest siyanür konsantrasyonu (400-500 ppm) altında gerçekleştirilen çalışmalarda 350 g/ton siyanür tüketimi gerçekleştiği ortaya koyulmuştur. Bu durumun, yüksek siyanür konsantrasyonlarında oluşan HCN'den kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Alkali siyanür çözeltisinde altın çözünme kinetiğini artırmak amacıyla baryum, sodyum, potasyum, kalsiyum ve manganezin peroksitleri (her biri farklı çözünürlük

ve oksijen içeriğine sahip), potasyum klorat, potasyum permanganat, potasyum bikromat ve potasyum ferrisiyanür peroksitleri gibi katı oksidanlar da dahil olmak üzere çeşitli alternatif oksidanlar önerilmiştir. Genel olarak, reaktiflerin yüksek maliyeti bu reaktiflerin kullanımlarını engellemektedir ve bunların hiçbirisi ticari açıdan büyük ölçekte uygulanmamaktadır [8].

Sıcaklık:

Tepkimeye giren türlerin artan aktiviteleri ve difüzyon hızlarının bir sonucu olarak, altın çözünme hızı sıcaklık ile birlikte 85°C'ye kadar artmaktadır. Bu sıcaklık değerinin üzerinde, oksijen çözünürlüğündeki azalma, artmış iyonik aktivitenin ve difüzyon hızlarının sağladığı avantajların önüne geçmektedir. Altın çözünme hızının sıcaklık ile değişimi Şekil 2.6'da gösterilmektedir [46].



Şekil 2.6 Sıcaklığın altının çözünme hızına etkisi

Sıcaklığın 25°C'den 85°C'ye yükseltilmesi ile çözünme hızında yalnızca %20-25 arasında bir artış sağlandığı görülmektedir. Bu tür bir sıcaklık artışı için yapılacak yüksek maliyet, düşük tenörlü malzemelerin işlenmesi için yeterli bir gerekçe oluşturmamakta, bu yüzden genellikle mevcut ortam sıcaklıkları uygulanmaktadır. Bununla birlikte, yüksek tenörlü malzemeleri (örn. gravite konsantreleri) işleme işleminde yüksek sıcaklıklar uygulanmaktadır. Bu uygulama, genellikle basınçlı sistemlerde ilave serbest siyanür ve oksijen beslemesini gerektirmektedir [8].

pH:

pH değerinin 9,5'in üstünde olduğu durumlarda pH değerinin altın çözünme hızı üzerindeki etkisi düşük olmakta ve bu etki, diğ er çözelti türlerinin ve cevher bileş enlerinin varlığı na, ayrıca pH modifikasyonu için kullanılan baz türüne bağı lı olmaktadır. Bazı durumlarda, sülfürlerin ve diğ er reaktif türlerinin çözünmesi gibi yan tepkimelerin hızındaki artış nedeniyle, pH değ eri arttıkça hız belirgin bir şekilde azalabilmektedir. Bu etkiler genellikle, oluşturulan tuzların birçoğunun daha düşük çözünürlüğü nedeniyle sodyum ya da potasyum hidroksite kıyasla kalsiyum hidroksit kullanıldığında daha ciddi gerçekleşmektedir.

Uygulamada, gerç ek pH koş ullarını genellikle diğ er proses faktörleri belirlemektedir. Örneğ in;

- Altın liç ini olumsuz yönde etkileyebilecek mineraller, örneğ in bakır, demir, tellür, antimuan ve arsenik gibi diğ er cevher bileş enlerinin çözünme oranı,
- Ç amurun ç ökelme özellikleri
- Ç amur viskozitesi
- pH modifikasyonunun maliyeti
- Kalsiyum ve demir gibi çözelti türlerinin ç öktürölmesi

Sonuç olarak, liç leme için optimum pH, pek çok faktöre bağı lı olup, her bir cevher tipi ve liç leme sistemi için deneysel ç alış malarla belirlenmelidir [8].

Yüzey Alanı:

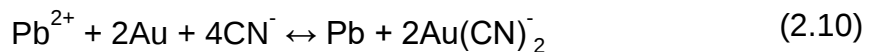
Ç özünme oranı, altının yüzey alanı ve diğ er tane faktörleri ile doğ rudan orantılıdır. Yüzey alanı, besleme malzemesinin tane boyu dağı lımı ve serbestleş me özellikleri ile ilişkili olup, liç leme öncesinde yapılan öğ ütme aş amasında belirlenmektedir. Hız, altının serbestleş mesindeki artış ve/veya altın tanelerinin yüzey alanının artması (öğ ütme esnasında düzleş me veya fiziksel kırılmaya bağı lı olarak) nedeniyle azalan tane boyuyla birlikte genellikle artar. Diğ er taraftan, siyanür tüketen mineralleri içeren cevherlerde çözünme hızı, reaktif tüketen yan tepkimelerin oranının artması nedeniyle tane boyutu azaldıkça, azalabilmektedir. Bu gibi durumlarda optimum tane boyutu, altın ekstraksiyonu ile siyanür tüketimi arasında ideal bir nokta bulunarak belirlenmektedir. Alternatif olarak, oksidatif ön iş lem, bu malzemeler için en cazip iş letme yöntemi olabilmektedir [8].

Karıştırma:

Altının çözünmesinde, normal koşullarda yapılan siyanür liç işleminde, kütle transferi belirleyici rol oynamaktadır. Dolayısıyla burada hız, yığın çözeltisinin difüzyon tabakası kalınlığına ve karıştırma karakteristiğine bağlı olmaktadır. Karıştırma arttıkça, çözünme hızı da bir tepe noktasına ulaşmakta, bu seviyenin üzerinde karıştırma işleminin kaydadeğer ilave bir katkısı bulunmamaktadır. Difüzyon tabakası kalınlığı, katı tanelerin yüzeyinden geçen çözelti akış oranlarını maksimize ederek en aza indirilir. Çamur liç sistemlerinde bu işlem, katıları ve çözeltiyi hava ile veya mekanik karıştırma ile karıştırarak gerçekleştirilir. Zayıf karıştırılmış sistemlerde karıştırma derecesinin artırılması, difüzyon tabakası kalınlığının incilmesi ve yığın çözeltide homojenliğin geliştirilmesinin bir sonucu olarak altın çözünme hızını önemli ölçüde artırabilmektedir. İyi karıştırılmış sistemlerde ise bunun etkisi daha az önemli hale gelir çünkü yığın çözelti veya çamur daha homojendir. Bu durumda sadece karıştırma yoluyla difüzyon tabakasının inceltilmesi giderek zorlaşmakta ve karıştırmanın artırılması gereksiz olmaktadır. Bu durum, modern mekanik karıştırma teknolojisinin kullanıldığı tesislerin çoğu için geçerlidir [8].

Kurşun ve Diğer Metal İyonlarının Etkisi:

Bilindiği gibi saf altın, gümüş ile alaşımlanmış altından veya az miktarda diğer metalleri içeren altından çok daha yavaş çözünür. Bazı iki değerlikli katyonlar, altın çözünme hızı üzerinde önemli bir faydalı etkiye sahiptir. Eser miktarlarda kurşun, cıva, talyum ve bizmut'un altın yüzeylerini depolarize ettiği ve altın polarizasyon eğrisinde -0,4V'da gözlenen pasivasyonu önlediği veya azalttığı ve böylece altın liç hızını artırdığı bilinmektedir. Cıva ve kurşun iyonları için bu etkinin, Eşitlik 2.10'da gösterildiği gibi altın yüzeyinin bir kısmına az miktarda metalik cıva veya kurşun birikmesi nedeniyle olduğu düşünülmektedir [8] [47]:



Sülfid Mineralleri ile Galvanik Etkileşimler:

Birçok sülfür minerali, yüzeylerinde elektron transfer tepkimelerine izin verecek yeterlikte iletkenliğe sahiptir. Bu tür sülfid mineralleri altın veya altın alaşımları ile doğrudan elektriksel temas halindeyken, liçleme sırasında galvanik etkileşim

meydana gelmekte ve bu da altın liçleme hızını etkileyebilmektedir [8]. Aghmarian ve Yen (2005), bu etkiyi inceledikleri çalışmada, altının aşağıdaki minerallerle elektriksel olarak temas halinde olduğunda, bu tür galvanik etkileşimin altın liçleme oranını arttırdığını göstermektedir:

Pirotin = galen>pirit>> altın

Diğer yandan altın, kalkopiritle elektriksel olarak temas ettiğinde, galvanik etkileşim çözünme hızını önemli ölçüde düşürmekte, kalkosit minerali anot gibi davranmakta ve çözünmeyi tamamen durdurmaktadır [48].

2.8 Kütle Transferi

Heterojen sistemlerde, katı yüzeyinde çözelti hızının sıfır olması şartıyla, yüzeyde bir sınır tabakası oluşmaktadır. Çözelti hızının, katı yüzeye olan uzaklığın artmasına paralel olarak arttığı, azami bir seviyeye ulaştığı ve yığın çözeltide bir noktada kararlı hale geldiği bir hız profili geliştirilmiştir.

İyonik ve moleküler türlerin bir sınır tabakasından kütle transferi, difüzyon ile gerçekleşmektedir. Bu taşımada, sürükleyici kuvvet derişim gradyanı olup, yığın çözelti içindeki bir reaktif ile tepkimeye giren katı yüzeydeki daha düşük bir derişim arasındaki doğal derişim farkından kaynaklanmaktadır.

Yüzeydeki bir reaktantın derişimi sıfır olduğunda kimyasal tepkime hızı, tepkimeye giren tüm türlerin tüketilmesi için yeterli olmaktadır. Tepkimede kütle transferi belirleyici rol oynamakta, başka bir deyişle tepkime hızı, türlerin yüzeye olan kütle transfer hızına bağlı olmaktadır. Reaktifin yüzeyde tam olarak tüketilmemesi durumunda tepkime, tepkime hızı ile sınırlanmakta ve kimyasal olarak kontrol edilmektedir [8].

Yaygın olarak kabul gören difüzyon-adsorpsiyon-oksidasyon modeline göre altının siyanürle çözündürülmesi beş adımda gerçekleşmektedir [49].

1. Yığın çözeltiden siyanürün ara yüzeye difüzyonu
2. Yüzey adsorpsiyon dengesi
3. Anodik oksidasyon
4. Yüzey ürününün stabilizasyonu/desorpsiyonu
5. Ürünlerin yığın çözeltiye difüzyonu

Karıştırma işleminin iyi yapıldığı liçleme sistemlerinde yığın çözeltisindeki kütle transferi, genellikle çok etkili olmakta ve tepkime hızını sınırlamamaktadır. Bununla birlikte bu tür kütle transferi, özünde bulunan tane ve/veya ekipman faktörleri nedeni ile karıştırma kalitesinin zayıf olduğu çözelti ve proses çamuru sistemlerinde önemlidir [8].

2.9 Katı-Sıvı Sistemlerde Parçacık Faktörleri

Tane boyu, şekli ve porozite gibi tane özellikleri, liçleme tepkimelerinin hem kinetiğinde hem de tamamlanma derecesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu özellikler, bir çözelti fazı reaktifi ile tepkime için mevcut olan yüzey alanını kontrol etmektedir. Bu faktörler karbon adsorpsiyonu, karbon sıyrılması ve kimyasal çöktürme süreçlerinde özellikle önemli olmaktadır [8].

2.9.1 Tane Boyu

Sulu çözelti içinde katı yüzeydeki tepkime hızı, tepkimeye giren türlerin yüzey alanı ile orantılıdır. Bu durum, Eşitlik 2.11'deki genel birinci dereceden denklem ile ifade edilebilmektedir:

$$dn/dt = -A C k_0 k' \quad (2.11)$$

Burada;

dn/dt = Tepkime hızının zamana göre türevi

A = katı yüzey alanı

C = çözelti derişimi

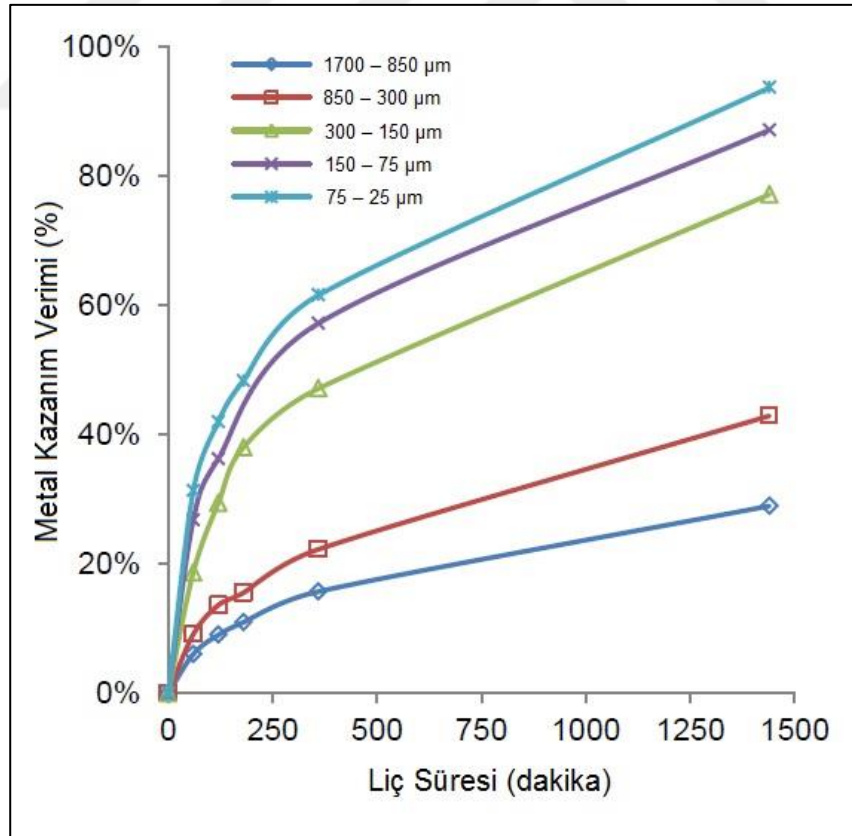
k_0 = potansiyel reaktif yüzey alanlarının derişimi ($\text{mol}/\text{cm}^{-2}$)

k' = hız sabiti

Tane boyu ve şekli, bir mineral tane yüzey alanını etkileyen başlıca faktörlerdir. Altın liçi durumunda her ne kadar öğütme esnasında altın tanelerini düzleştirmenin bir etkisi olsa da ana kayaçtan altının optimum şekilde serbestleşmesini sağlamak dışında çözünme için mevcut olan altın yüzey alanını değiştirme konusunda çok az şey yapılabilir. Boyut küçültme işlemleri sonucunda, yantaş mineralleri içinde hapsolmuş durumda bulunan altınların serbestleşmesi altın liçi işleminde önemli bir faktördür.

Sülfür minerallerinde hapsedilmiş halde bulunan altının serbestleşmesi amacıyla oksidasyon işlemleri söz konusu olduğunda ana mineral çözündüğü ve tepkime sırasında tane boyutu azaldığı için, tane büyüklüğü önemli bir tepkime değişkeni haline gelebilmektedir. Küresel tanelerin çözünme hızı, yukarıdaki denklem ile elde edilen küçülen tane ve çekirdek modelleri ile tanımlanabilmektedir [8].

Hlabangana vd. [44] ve Hlabangana vd. [50] farklı tane boyu fraksiyonlarındaki (25-75, 75-150, 150-300, 300-850, 850-1700 μm) cevherler ile liç testleri gerçekleştirilmiş ve tane boyunun liç verimine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar Şekil 2.7’de verilmektedir. Görüldüğü üzere tane boyundaki azalmayla birlikte artan yüzey alanı sayesinde liç veriminde artış gerçekleşmektedir. Özellikle 300-850 ve 850-1700 μm fraksiyonlarında verim oldukça düşük olarak gerçekleşmekte, 300 μm ’un altındaki diğer 3 tane boyu fraksiyonunda ise belirgin şekilde verim artışı görülmektedir. Diğer yandan tane boyunun azaltılması liç verimini artırmakla birlikte öğütme işlemi için gereken enerji maliyeti ve siyanür tüketimi de artacaktır.



Şekil 2.7 Tane boyunun altının çözünme hızına etkisi

2.9.2 Tane Şekli ve Yapısı

Düzensiz tane şekilleri ve pürüzlü yüzeyler, tanelerin etrafındaki akışkan akışının bozulmasına neden olmakta ve difüzyonun belirleyici olduğu tepkimelerde tepkime hızı etkilenebilmekte ise de bu etki genellikle küçüktür. Mineral sistemlerin büyük çoğunluğu çok çeşitli şekillerden oluştuğu için şekillerin neden olduğu etkileri tanımlama çabaları genelde oldukça karmaşıktır ve endüstriyel sistemlerde sınırlı bir değere sahiptir. Tane şekli ayrıca yüzey alanını da etkilemekle beraber, mineral sistemlerinin çoğunda tepkime kinetikleri üzerindeki etkisi göz ardı edilecek kadar önemsizdir. Bununla birlikte, ince öğütme sırasında altın tanelerinin sıvanması yüzey alanını arttırabilmekte ve liçleme süresini önemli ölçüde azaltabilmektedir [8].

2.9.3 Mineralojik Faktörler

Mineral tanelerin reaktifliği, kristal yönelimi, çoklu kristallilik ve kapanımlar, kaymalar ve safsızlıkların varlığı gibi bir dizi faktörden etkilenmektedir. Genel olarak, bir mineral tanesi içerisinde kusurlar ve daha küçük kristaller olması durumunda söz konusu mineral daha hızlı bir şekilde tepkimeye girmektedir.

Maruz kalan bir kristal yüzeyin yönelimi, mineralin kristal yapısına ve dilimlenme gibi kırılma özelliklerine bağlıdır. Farklı kristal yüzlerin varlığı, anizotropik çözünmeye veya elektrokimyasal bozunmaya neden olabilmektedir. Kristal sınırlar yüksek reaktifliğe sahip bölgeler olduğu için bu bölgelerde, gözenekliliği artıracak şekilde ve muhtemelen bir mineral tanesi parçalanmasına neden olabilecek şekilde tercihli bir çözünme olabilmektedir.

Bir mineral kafes yapısında, özellikle de yarı iletken sülfid mineralleri içindeki safsızlıkların (örneğin sfaleritteki Fe, kalkopiritteki As gibi) varlığı, elektriksel dirençliliği ve mineral bant aralığını değiştirerek ve dolayısıyla elektrokimyasal tepkimelerin kinetiğini etkileyerek performansı büyük ölçüde etkilemektedir. Bu faktörler, sülfid minerallerinin oksidasyonu sırasında özellikle önemli olmaktadır [8].

2.9.4 Gözeneklilik

Heterojen sistemlerde tepkime hızı, çözeltinin mineral yüzeyine (sınır tabakası veya gözenek difüzyonu kontrollü) ulaşabilmesine veya kimyasal tepkime hızına (mevcut yüzey alanına bağlı olarak) bağlıdır. Her iki durumda da tepkime hızı, kaya veya mineralin gözenekli olması durumunda artacaktır. Gözeneklilik, aşağıdaki altın ekstraksiyon süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır:

- Yığın liçinde altının tam olarak serbestleşmediği gözenekli cevherlerde
- Kırıklar, çatlaklar ve kafes yapısındaki kusurlar boyunca sülfür minerallerinin oksitlenmiş olması
- Aktif karbonun adsorpsiyon kinetiği ve yüklenme kapasitesini belirleyen gözenek yapısı

Kimyasal tepkime yavaş olduğunda, tepkimeye giren bazı reaktantların tepkime başlamadan önce gözeneklerin içine doğru nüfuz etmesi mümkündür ve bu nedenle aktif yüzey alanı, dış yüzey ve yararlanılan iç gözeneklerden oluşmaktadır ve burada gözenekler genelde toplam yüzey alanının daha büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu koşullar altında tepkime hızlarının çoğunlukla tane boyundan bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. Tepkime hızı yüksek olduğunda reaktif parçacığa nüfuz etmeden önce tüketilebilir. Bu koşullar altında iç yüzey alanı daha az önemlidir ve tepkime hızı partikül boyutuna daha fazla bağımlı hale gelir [8].

2.9.5 Galvanik Etkiler

İki iletken mineral bir çamur sisteminde elektriksel olarak birbirine temas ettiğinde, tercihen daha fazla negatif durgunluk potansiyeline sahip olan mineral çözünecektir. Katodik indirgeme tepkimesi, daha fazla pozitif durgunluk potansiyeline sahip mineralin yüzeyinde gerçekleşir ve mineraller arasında net bir elektron akışı vardır. Bu durum galvanik korozyon olarak ifade edilir veya çözünmeyen mineral için galvanik koruma olarak anılmaktadır. Altın ekstraksiyon sistemlerinde, galvanik etkileşimler metal ve sülfür çözünme oranlarını etkileyebilmektedir. Örneğin oksidatif ön işlem proseslerinde, arsenopiritin hızlandırılmış oksidasyonu, katodik olarak işlev gören pirit ile temas ettiği zaman meydana gelmektedir [8].

2.9.6 Diğer Minerallerin Etkileri

Cevher ve konsantrelerdeki değerli mineral(ler) dışındaki mineraller kimyasal bir sistemde reaktiflerle tepkimeye girebilmektedir. Bu durum, tepkimeye giren reaktiflerin derişimini azaltmakta ve ana tepkime hızını düşürebilmektedir. Örneğin:

- Siyanür ve çözünmüş oksijen tüketen pirit ve markasit gibi altın liçi sırasında mevcut olan reaktif sülfidler.
- Sülfid oksidasyonu esnasında mevcut olan ve oksijen tüketen, değerli mineral barındırmayan sülfidler.

Bu tür istenmeyen yan tepkimeler, sistem koşullarını ayarlayarak ve/veya rekabet eden mineral türlerini pasifleştirerek veya ortamdan uzaklaştırarak çoğunlukla önlenebilmekte veya olumsuz etkisi azaltılabilmektedir [8].

2.10 Siyanür

Siyanür nitril, naylon ve akrilik plastikler gibi organik kimyasalların üretilmesinde kullanılmaktadır. Siyanürün kullanıldığı diğer endüstriyel faaliyetler elektro-kaplama, metal işleme, çelik sertleştirme, fotoğrafik uygulamalar ve sentetik kauçuk üretimidir.

Altın madenciliği uygulamalarında genellikle sodyum siyanür ile hazırlanan seyreltik siyanür çözeltisi (100-500 ppm) kullanılmaktadır [51].

2.10.1 Siyanür Çözeltilerinin Kimyası

Sodyum, potasyum ve kalsiyum siyanür gibi basit siyanür tuzları suda çözünmekte ve iyonlaşmaktadır. Eşitlik 2.12'de gösterildiği gibi ilgili metal katyonu ve serbest siyanür iyonlarını oluşturmaktadır:



Farklı siyanür tuzlarının çözünürlükleri ve karşılaştırmalı siyanür içerikleri Çizelge 2.8'de verilmiştir [8]. Bu üç tuzun hepsi, işleme için siyanür kaynağı olarak ticari bir ölçekte etkili bir şekilde kullanılmıştır. Sodyum ve potasyum siyanür, kalsiyum siyanüre oranla daha kolay çözünmekte ve genel olarak daha saf halde bulunmaktadır. Bu sayede işleme sistemlerinde reaktifin taşınması ve dağıtımı açısından avantajlara sahiptir. Dünyadaki bazı bölgelerde yaygın olarak bulunan sıvı sodyum siyanür (yani sulu çözelti halinde), tesiste hazırlama ihtiyacını ortadan kaldırarak proses gereksinimlerini azaltmaktadır. Bu nedenle, siyanür türünün seçimi, uygulama yöntemine, maliyet ve bulunabilirliğine bağlıdır.

Çizelge 2.8 Siyanür bileşiklerinin siyanür miktarları ve 25°C'deki suda çözünürlükleri

Bileşik	Siyanür İçeriği (%)	25°C'de suda çözünürlük (g/100 cc)
NaCN	53,1	48
KCN	40,0	50
Ca(CN) ₂	56,5	Ayrışır

Siyanür iyonları, Eşitlik 2.13'te gösterildiği şekilde, hidrojen siyanür (HCN) ve hidroksil (OH⁻) iyonları oluşturacak şekilde suda hidrolize olur; buna karşılık da pH değerinde bir artış gerçekleşir:



Hidrojen siyanür, suda Eşitlik 2.14'te gösterildiği gibi ayrılan zayıf bir asittir [8]:

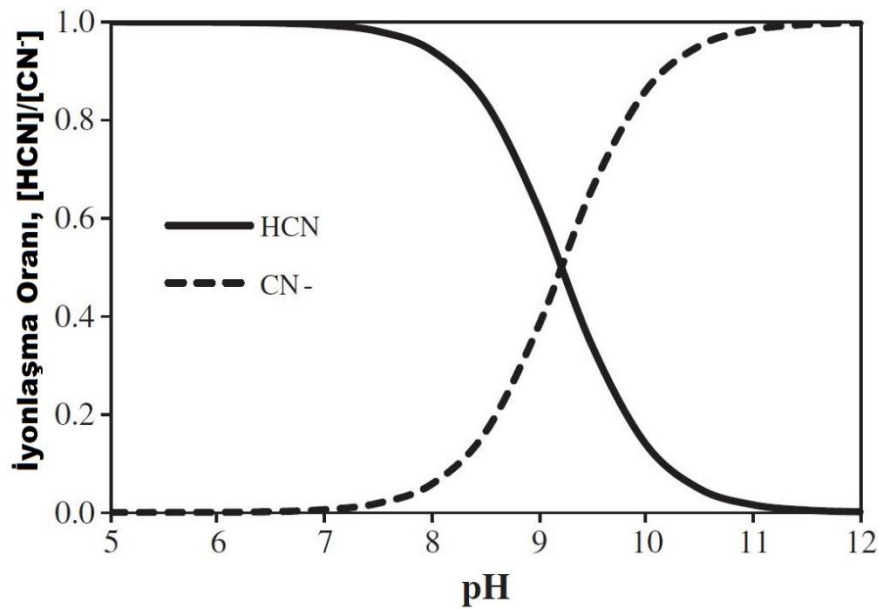


Burada

$$K_a(25^\circ\text{C}) = 6,2 \times 10^{-10}$$

$$\text{p}K_a = 9,31$$

Siyanürün suda çözünmesi aşağıdaki Şekil 2.8'de pH'ın fonksiyonu olarak verilmektedir [52].



Şekil 2.8 HCN formundaki siyanürün pH'a göre değişimi

Yaklaşık olarak pH 9,3 değerinde toplam siyanürün yarısı hidrojen siyanür olarak diğer yarısı ise serbest siyanür iyonları olarak bulunmaktadır. pH 10,2'de, toplam siyanürün >%90'ı serbest siyanür (CN⁻) olarak bulunurken, pH 8,4 değerinde ise

>%90'ının hidrojen siyanür olarak bulunduğu görülmektedir. Bu değer önemlidir çünkü hidrojen siyanür nispeten yüksek bir buhar basıncına (26 °C'de 100 kPa) sahiptir ve dolayısıyla ortam koşullarında sıvı yüzeyde kolayca buharlaşır; bu da çözeltiden siyanür kaybına neden olmaktadır. Buharlaşma oranı, hidrojen siyanür derişimine (toplam siyanür derişiminin ve pH değerinin bir fonksiyonuna), sıvının yüzey alanı ve derinliğine, sıcaklığa ve transfer olgusunu belirleyen karıştırmaya bağlıdır. Sonuç olarak, önceki bölümlerde açıklandığı gibi, aşırı yüksek pH değerleri olumsuz etkilere yol açabilmekle beraber, siyanür liçi sistemlerinin çoğu, siyanür kaybını asgari düzeye indiren, tipik olarak pH 10'un üstünde olan pH seviyelerinde çalıştırılmaktadır [8].

2.10.2 Siyanür ve Çevre

Değirmen atıklarından ve proses çözeltilerinden siyanürün bozundurulması ve geri kazanılması için birçok kanıtlanmış ve etkili kimyasal, fiziksel ve biyolojik bozundurma yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler çok iyi anlaşılmış durumdadır ve dünya genelinde maden sahalarında uzun yıllardır kullanılmaktadır.

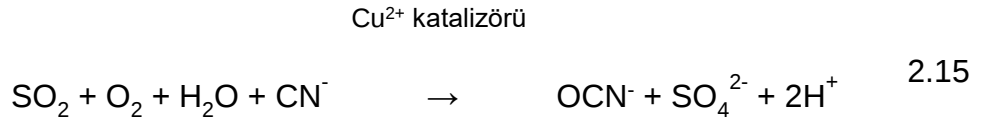
Madencilik endüstrisinde, siyanür esas olarak cevherlerden altın ve gümüşün liçlenmesinde kullanılmaktadır, ancak bakır, kurşun ve çinko gibi baz metallerin kazanımı için bir flotasyon reaktifi olarak düşük derişimlerde de kullanılabilir. Bu operasyonların birçoğunda, insan sağlığı, vahşi yaşam, su kuşları veya su yaşamı ile ilgili potansiyel toksisite sorunlarını çözebilmek için siyanür arıtma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu, siyanürün aşağıdakilerin bir veya daha fazlasından uzaklaştırılmasını kapsayabilmektedir:

- Siyanürleme işlemlerinden çıkan çamur atıkları
- Merrill-Crowe operasyonlarından çıkan fazla çözelti
- Yığın ya da tank liçi işlemlerinden çıkan fazla çözelti
- Atık depolama tesislerinden çıkan suyun üstünde kalan çözelti
- Havuzlardan veya atık depolama tesislerinden toplanan sızıntılar

Siyanür arıtımı genellikle bozundurma veya geri kazanım temelli bir proses olarak sınıflandırılmaktadır. Bir siyanür bozundurma prosesinde, siyanürü daha az toksik bir bileşiğe (genellikle siyanat haline) dönüştürmek amacıyla kimyasal veya biyolojik tepkimeler kullanılmaktadır [17].

Siyanür, altın madenlerinin yaklaşık olarak %90'ında kullanılmaktadır ve toksik özelliklere sahip bir kimyasaldır. Doğada, zamanla toksik olmayan daha kararlı bileşiklere oksitlenir. Altın madenlerinde ise genellikle INCO SO₂/Hava yöntemi kullanılarak bozundurulur.

Bu yöntem 1980'li yıllarda geliştirilmiştir. SO₂ gazı, hava ve çözünmüş bakır katalizörü yardımıyla, tepkime 2.15'te gösterilen şekilde siyanür, daha az toksik olan siyanata (OCN⁻) dönüştürülür.



INCO yönteminin en büyük avantajı solüsyonların işlenmesinde kullanılmasının yanı sıra tesis atık çamurlarında da uygulanabilmesidir [51].

3. Malzeme ve Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında, tank liçi yöntemiyle zenginleştirilmekte olan bir altın cevherinde, serbest siyanür derişimi, pülp katı içeriğı (yüzde katı) ve öğütme tane boyunun liç kinetiğine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ayrıntıları bu bölümde verilmektedir.

3.1 Deneysel Çalışmalar

Çalışma kapsamında, Koza Altın İşletmeleri bünyesinde bulunan Kaymaz İşletmesi'nin liç devresi beslemesinden alınan numune kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, serbest siyanür derişimi ve pülp katı içeriğinin liç kinetiğine etkisi; ikinci aşamada ise aynı numunenin farklı tane boylarına öğütülmesi durumunda elde edilecek liç kinetiğı incelenmiştir. Tüm deneysel çalışmalar Kaymaz Altın Madeni Metalurji Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sırasında şişe çevirme test düzeneğı kullanılmıştır. Şişe çevirme testleri sırasında, test edilecek serbest siyanür derişimi ve pH ölçümleri ile ihtiyaca göre sodyum siyanür ve sönmüş kireç ilavesi yapılmış ve deney koşulları belirlenen esaslarda tutulmuştur. Bu testler süresince liç işlemine tabi tutulan çamurdan belirli zaman aralılarında katı ve sıvı numuneleri alınmış, bu numunelerdeki katı ve sıvı için altın ve gümüş içerikleri belirlenmiş ve zamana göre, çamur yüzde katısı ve serbest siyanür derişiminin liç işlemine etkisi incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, öğütme devresi ürünü olan ve liç tanklarındaki hedef işletme değeri olan %45 katı oranına getirilen pülpten yaklaşık 800 litre kadar numune alınması planlanmıştır. 16.02.2013 tarihinde, tesis öğütme devresinin ve tikinerin işletme koşulları yakından takip edilerek sistem parametrelerinin son 2 saattir kararlı durumda olduğu teyit edilmiş ve liç ünitesinin beslemesi olan, tikiner alt akım çıkış hattı üzerinden numune alımı gerçekleştirilmiştir.

Alınan çamur numunesinin yaklaşık 200 litrelik kısmı planlanan deneysel çalışmalarda kullanılacağından basınçlı filtre yardımıyla susuzlandırılmış, sonrasında ise ısıtıcı tablalar vasıtasıyla 90°C'de kurutulmuştur. Elde edilen kuru numune, konileme dörtlleme ve Şekil 3.1'de gösterilen numune bölücü yardımı ile analizlerde kullanılacak 450-550 gramlık miktarlara indirgenerek deney numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 3.1 Numune bölme aparatı

Numune hazırlama çalışmalarının tamamlanmasının ardından liç testlerine başlanmıştır. Liç testleri için, her bir testin gerçekleştirileceği şişe tartılarak kaydedilmiştir. İlgili deney kapsamında belirlenen yüzde katı oranına ulaşabilecek miktarda su, önceden hazırlanan cevher numuneleri ile birlikte 2,5 litrelik test şişesine içine boşaltılmıştır. Şişe dairesel hareketler ile döndürülerek süspansiyon oluşumu sağlanmış ve karıştırma işleminin gerçekleştiğine emin olunduktan sonra çözünmüş oksijen ve pH ölçümleri yapılarak not edilmiştir. pH ölçümü sonrası, pH değerini 10,50-11,00 aralığına getirecek şekilde sönmüş kireç ilavesi yapılarak eklenen sönmüş kireç miktarı not edilmiştir.

Deney kapsamında belirlenen serbest siyanür konsantrasyonuna ulaşacak miktarda sodyum siyanür Şekil 3.2’de gösterildiği şekilde tartılarak şişe içerisine eklenmiş ve şişe karıştırılarak çözünmesi sağlanmıştır. Şekil 3.3’te gösterildiği üzere test şişeleri hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.2 Hassas tartı ile gerekli sodyum siyanür miktarının tartımı



Şekil 3.3 Hazırlığı tamamlanmış test şişeleri

Liç işleminin gerçekleşeceği şişeler hazır hale getirildikten sonra şişeler Şekil 3.4'te gösterilen şişe çevirme düzeneğine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Şişe çevirme düzeneği

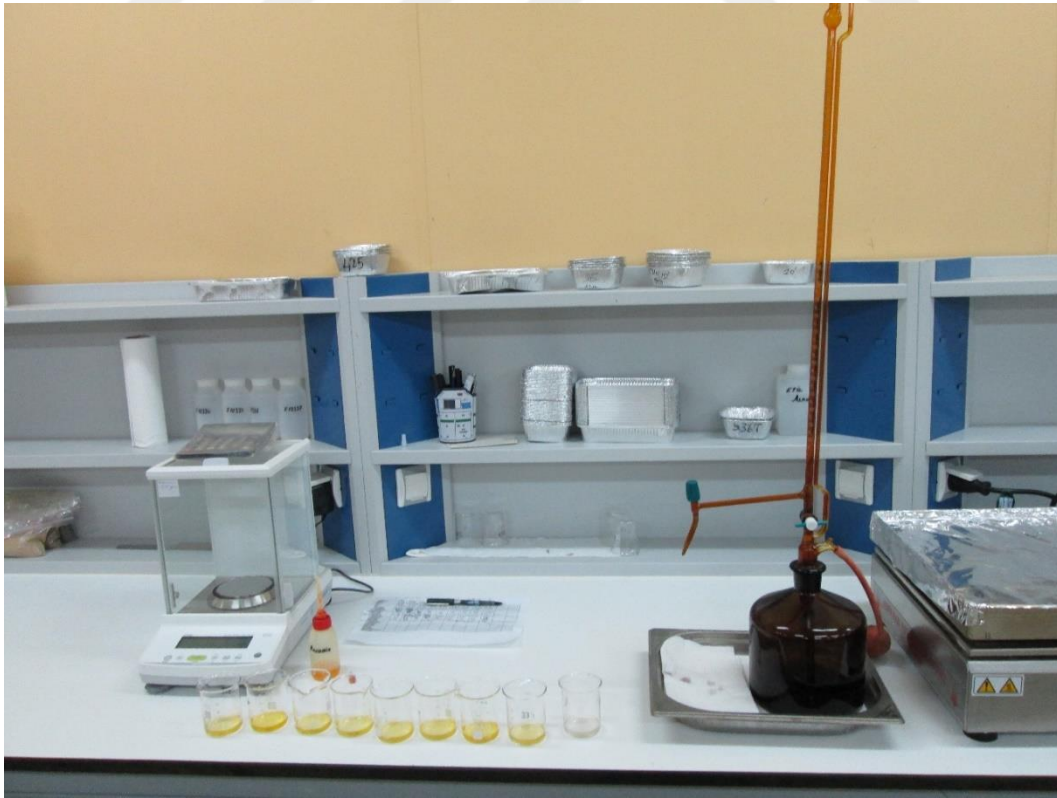
Liç işlemi süresince oksijen beslemesinin gerçekleştirilebilmesi için oksijen besleme hortumları şişelerin içine yerleştirilmiş ve Şekil 3.5'te gösterilen dozaj vanaları ile oksijen akışları ayarlanmıştır.



Şekil 3.5 Oksijen besleme sistemi dozaj panosu

Oksijen akışının çamur içinde sağlıklı bir şekilde gerçekleştiği teyit edildikten sonra 30 devir/dakika hızda test düzeneği çalıştırılarak düzeneğe takip edilmiştir.

İlgili deney kapsamında belirlenen süre (1 veya 2 saat) geçtikten sonra düzeneğe durdurulmuş, şişeler alınarak çözünmüş oksijen ve pH ölçümleri yapılmış, eğer pH 10,50 değerinin altında ise miktarı not edilerek gerektiği kadar sönmüş kireç ilavesi sonrasında, deneyin devam edeceği nihai pH değeri not edilmiştir. Şişe içerisinden solüsyon numunesi alabilmek için katının çökmesi 10-15 dakika kadar beklenmiş sonrasında çöken çamurun üzerindeki berrak solüsyondan 30 mL solüsyon pipet yardımı ile çekilerek alınmıştır. Alınan solüsyon numunesinin 10 mL'lik kısmı ile Şekil 3.6'da düzeneği gösterilen gümüş nitrat titrasyonu yöntemi ile serbest siyanür ölçümü yapılmış ve analiz koşullarındaki serbest siyanür derişimine ulaşacak kadar sodyum siyanür tartılarak şişeye ilave edilmiştir. Kalan 20 mL solüsyon numunesi sıvıda altın analizi için ağzı kapalı numune kabına koyulmuş ve kimyasal analiz numunesi elde edilmiştir. Kontrollerin yapılmasının ardından deney şişesi tekrar şişe çevirme düzeneğine yerleştirilerek oksijen hortumu şişeye sokulmuş ve düzeneğe çalıştırılarak sistem takip edilmiştir.



Şekil 3.6 Gümüş nitrat titrasyonu yöntemi ile serbest siyanür ölçüm düzeneği

Belirlenen deney koşullarına göre farklı sıklıklarda bu kontroller tekrarlanarak liç koşullarının uygunluğu kontrol edilmiş ve gereken müdahaleler yapılmıştır. Belirlenen toplam liç süresinin sonuna ulaşıldığında deney şişesi düzenekten alınarak nihai çözünmüş oksijen, pH ve serbest siyanür derişimi kontrolleri yapılmıştır. Sonrasında şişenin son tartımı alınarak içerisindeki çamur filtrelenmiş ve elde edilen sıvı numuneleri altın analizi için laboratuvara gönderilmiş; katı numunesi ise kurutularak tartılmış, tartım değerleri not edilmiş ve altın analizi için laboratuvara gönderilmiştir.

Yukarıda belirtilen kapsamda farklı başlangıç serbest siyanür derişimleri (50, 100, 200, 400 ppm), farklı pülp te katı oranları (%45, 50, 55) ve üç farklı deney süresi (4, 24, 48 saat) için toplam 36 şişe çevirme deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yukarıda belirtilen testlerin uygulandığı numune kümesindeki cevherler farklı sürelerde öğütülerek daha küçük tane boyuna sahip numuneler ile testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Laboratuvar tipi bilyalı değirmen

Bu kapsamda 4 farklı süre boyunca (45, 120, 180, 600 saniye) Şekil 3.7’de gösterilen bond tip bilyalı değirmende numuneler öğütülmüş, test elekleri ve Master Sizer yardımı ile tane boyu dağılımları belirlenmiş ve %45 pülp te katı oranında, 200

ppm başlangıç serbest siyanür derişiminde 3 farklı deney süresi için toplamda 12 şişe çevirme deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.2 Şişe Çevirme (Bottle-roll) testi

Şişe çevirme testi, cevherden altının siyanür liçi ile kazanım imkânının belirlenmesi adına kullanılan, endüstri standartı haline gelmiş bir yöntemdir.

Bu yöntemde, tenörü bilinen, kırılmış, öğütölmüş (genellikle 150µ'un altına) 0,5-2 kg cevher, testin yapılacağı şişe içerisinde su ile karıştırılarak çamur haline getirilir. Sönmüş kireç ilavesi ile pH 10,5, sodyum siyanür ilavesi ile de 500 ppm serbest siyanür derişiminde toplam 48-72 saat boyunca, karıştırma ve oksijen/hava besleme imkânı sağlayan özel düzeneğinde test gerçekleştirilir. pH ve serbest siyanür parametreleri ihtiyaca göre farklılık gösterebilmektedir. Test sırasında belirlenen zaman aralıklarında pH, çözönmüş oksijen ve serbest siyanür seviyeleri kontrol edilerek gerekli müdahaleler yapılır ve isteniyorsa sıvıda altın analizi için numuneler alınır. Test sonunda sıvı ve katı fazındaki altın analizleri yapılır ve elde edilen sonuçlar ışığında;

- Altın ve gümüş kazanım verimleri
- Cevherin liçlenebilirliği ve zamana göre verim davranışı
- Alkali kimyasal ve siyanür tüketim miktarları
- Cevherdeki safsızlıkların altın kazanım verimine ve kimyasal tüketimlerine etkileri

konularında bilgi sağlanmaktadır. Test sonuçlarına göre farklı tane boyu ve sürelerde test tekralanarak ideal tasarım ve işletme koşulları hakkında daha detaylı sonuçlar ortaya konabilmektedir.

3.3 Serbest siyanür ölçümü

Çözeltideki serbest siyanür ölçömleri gümüş nitrat titrasyonu yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemde, öncelikle analiz için ihtiyaç duyulan 10 mL solösyon eldesine imkân verecek miktarda çamur filtrelenmektedir. Süzöntüden dereceli pipet yardımı ile 10 mL sıvı alınarak 100 mL'lik behere aktarılır ve üstüne indikatör olarak 2-3 damla rodanin ilave edilir. Titrasyon işlemine başlanmadan önce gümüş nitrat içeren büretteki seviye kaydedilir ve büret musluğu açılarak beher içerisine gümüş nitrat

damlatılmaya başlanır. İşlem sırasında beher karıştırılarak renk değişimi gözlenir, renk değişimi gerçekleştiğinde işlem durdurularak eklenen gümüş nitrat miktarı ölçülür. Harcanan gümüş nitrat miktarının mL cinsinden rakamsal karşılığının 10 ile çarpılması sonucunda ppm cinsinden serbest siyanür miktarı hesaplanmaktadır.

3.4 Uygulanan diğer testler

Çalışmalar kapsamındaki katı ve sıvı numunelerinde yapılan altın ve gümüş analizleri, atomik adsorpsiyon spektrometresi (AAS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Elek analizleri, titreşimli yaş elek analiz cihazı ve Tyler elekleri kullanılarak yapılmıştır. 38 µm'dan ince boyut dağılımları lazer kırınımı yöntemiyle ve Master Sizer Hydro2000MU kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Testler sırasındaki çözünmüş oksijen ölçümleri WTW Oxi 3205 cihazı, pH ölçümleri ise WTW pH 3110 ile gerçekleştirilmiştir.

3.5 Koza Altın İşletmeleri Kaymaz Altın Madeni

Bu bölümde numune alma ve deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Koza Altın İşletmeleri bünyesindeki Kaymaz Altın Üretim Tesisi genel hatlarıyla anlatılmaktadır.

3.5.1 Kaymaz altın cevherinin özellikleri

Kaymaz bölgesindeki cevherleşme genel olarak lisvenit tipi, sedimanter kayalar ile Karakaya granitinin kontağında gelişmiş olan silisleşmiş serpantin damarları şeklindedir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen testlerde kullanılan cevhere ait kimyasal analiz Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Ayrıca Bond iş indeksi değeri 18,64 kWs/t'dur.

Çizelge 3.1 Kaymaz altın cevheri kimyasal analizi

Au (ppm)	Ag (ppm)	S (%)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	As (ppm)	Sb (ppm)	Fe (ppm)
15,25	11,34	0,30	523,45	10,69	3302	51,79	31476

Kaymaz altın cevheri, genel olarak düşük ve yüksek sülfür içerikli bölgelerden oluşmaktadır. Bu cevher türlerinin tipik mineralojik bileşimi Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Kaymaz cevherine ait tipik mineralojik analiz

Bileşen		Düşük Sulfür	Yüksek Sulfür
Mineral Kütlesi (%)	Cu-Sülfidler	0,02	0,00
	Pirit	0,42	10,73
	Ni-Sülfidler	0,02	0,07
	Arsenopirit	0,04	0,10
	Feldispatlar	0,47	0,25
	Fe-Sülfatlar	0,08	0,29
	Kuars	91,87	83,51
	Mika/Killer	1,45	0,65
	Kloritler	0,28	0,13
	Kalsit/Dolomit	0,05	0,03
	Fe-Karbonatlar	0,01	0,02
	Fe-Oksitler	5,02	3,80
	Ti-Mineralleri	0,07	0,04
	Barit	0,16	0,36
	Diğer	0,02	0,03
	Toplam	100	100

Çizelge 3.2’de görüleceği üzere, her iki tip cevherleşme de benzer minerallerden oluşmakta ancak minerallerin oranları değişmektedir. Ana mineral olan kuarsa, düşük oranlarda (%0,65-1,45) mika ve kil mineralleri, ayrıca demir oksit mineralleri (%3,8-5,0) eşlik etmektedir. Bu iki tip oluşum arasındaki en önemli farklılık ise piritten kaynaklanmakta, düşük sülfürlü cevherde %0,42 olan pirit içeriği, yüksek sülfürlü cevherde %10’un üzerine çıkmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan cevher numunesi düşük sülfürlü cevher tipine aittir.

3.5.2 Kırma-Eleme Ünitesi

Açık ocaktan gelen cevher öncelikle 100 tonluk kaba cevher bunkerine, sonrasında ise kırıcıya bir paletli besleyici ile aktarılmaktadır. Bunker içinde aşağı doğru sarkan büyük zincirler sayesinde cevherin besleyici üzerine dengeli ve kontrollü akması sağlanmaktadır. Birincil kırma ekipmanı olan çeneli kırıcı vasıtasıyla kırılan cevher 50 ve 22 mm’lik iki katlı eleğe beslenir ve elek üstü malzeme (22 mm üstü) ikincil kırma ekipmanı olan konik kırıcıya geri beslenirken, elek altı (22 mm altı) malzeme ise ince cevher silosunda depolanacaktır. Cevher ayırım tane boyu killi ve ıslak

cevher koşullarının daha fazla meydana geldiği kış aylarında biraz daha yüksek olabilecektir.

Çeneli kırıcı tek mafsallı olup motor gücü 200 HP'dir. Çene genişliği 1.100 mm ve maksimum besleme tane boyu 800 mm olarak belirlenmiştir. İkinci konik kırıcı ise 2,5 x 3 m ebatlarında ve 300 HP bir motorla çalışmaktadır. Kırıcı ünitesinde cevher transferleri bant konveyörler ile yapılmaktadır. Kırılan cevher ise yine bantlı taşıyıcılar ile 1.400 ton kapasiteli ince cevher silosuna taşınmaktadır.

Açık ocaktan gelen cevher, tüvenan cevher bunkerine boşaltılırken oluşabilecek tozların bastırılması ve silodan çeneli kırıcıya malzeme beslenirken ortaya çıkabilecek tozları bastırmak amacıyla ilgili noktalara su spreylenecektir. Çeneli ve konik kırıcıdan bant konveyörlere aktarım noktaları, bant üstü ve yanları, bant geçiş noktaları, konik kırıcı üstü, elek üzeri ve çevresi ile elekten bantlara boşaltım noktaları tamamen kapalıdır ve buradaki tozlu hava emilerek iki adet toz tutma ünitesinden geçirilmektedir. Hava içindeki toz alınarak, temiz hava atmosfere verilmektedir. Toz tutma ünitelerindeki cevher, öğütme ünitesine beslenmektedir.

3.5.3 Öğütme Ünitesi

Liç işleminde gerekli cevher yüzey alanını sağlayabilmek için kırıcılardan çıkan cevherin yaklaşık 75 µm boyutuna kadar öğütülmesi gerekmektedir. Bu sebeple çubuklu değirmen ve hidrosiklonlarla kapalı devre çalışan bir bilyalı değirmen kullanılmaktadır.

Çubuklu değirmen 2,7 x 4,5 m ebatlarında olacak olup, motor gücü 315 kW'dır. Değirmende 90 mm çapında çubuklar kullanılmaktadır. Bilyalı değirmen 3,6 x 5,7 m ebatlarında olup motor gücü 1300 kW'dır. 40 ve 50 mm çaplı çelik bilyalar kullanılmaktadır. Hidrosiklon grubu ise 8 adet 250 mm çaplı hidrosiklondan oluşmaktadır.

Öğütme ünitesinde pülp yüzde katı oranları saatlik ölçümlerle kontrol edilmektedir. Ayrıca değirmen güç tüketimleri ve hidrosiklon besleme basıncı gibi pek çok diğer işletme parametreleri de bilgisayar sisteminden izlenip takip edilmektedir. Değirmenler, proses suyu tankından gelecek proses suyu ilave edilerek yaş çalışacağından herhangi bir toz oluşumu riski bulunmamaktadır.

3.5.4 Liç-Adsorpsiyon Ünitesi

Değirmen ünitesinden gelen düşük katı içeriğine sahip pülp 10 m çapındaki yüksek hızlı (high rate) tikiere gönderilerek liç işlemi için hedeflenen yaklaşık %45 katı yoğunluğuna getirilmektedir. Fazla su ise tikilerin üst akımından tekrar proses suyu tankına alınacaktır.

Liç ve adsorpsiyon ünitesi 3 adet liç ve sekiz adet adsorpsiyon tankından oluşmaktadır. Liç tanklarının hacmi 690 m³, adsorbsiyon tanklarının hacmi ise 210 m³tür. Birinci tanka yüksek miktarda hava ve oksijen verilerek cevherin ön oksidasyonu sağlanacaktır. İkinci liç tankına NaCN çözeltisi (%20 NaCN) ilave edilerek altın ve gümüş çözündürülecek, adsorpsiyon tanklarında bulunan karbon ile çözünen altın ve gümüş pulptan alınmaktadır.

Bütün tanklardaki mekanik karıştırıcılar sayesinde pülpün çökmesi önlenmektedir. Ayrıca adsorpsiyon tanklarının çıkışlarında aktif karbon geçisini önlemek için tank içi elekler ve aktif karbonun diğer tanka transfer edilmesi için özel tasarım karbon pompaları yerleştirilmiştir. Bu bölümde çamur, kendi cazibesiyle diğer tanka kendisi geçmektedir.

Siyanür içeren tüm pülp ve solüsyonların pH'ı en az 10,5'e ayarlanmaktadır. pH kireç ilavesi ile bilgisayar kontrolünde otomatik olarak ayarlanmaktadır.

Kireç ilavesi çubuklu değirmen besleme bandına yapılacaktır. Değirmenden çıkan malzeme liç ünitesine gitmeden önce yoğunlaştırma tankında (tikiner) yoğunlaştırılacak ve pH ölçümü bu tankta yapılacaktır. Bilgisayara istenen pH değeri girilerek, yoğunlaştırma tankında ölçülüp bilgisayara gelen pH değerine göre bilgisayar kireç ilavesini ayarlamaktadır.

3.5.5 Kimyasal Arıtma (Detox) Ünitesi

Bu ünite 5 adedi reaktör olmak üzere 6 tank bulunmaktadır. Bu tankların 2 tanesi birincil kimyasal arıtma 2 tanesi de ağır metal duraylama işlemi yapmaktadır. Dekant reaktör ise havuz geri dönüş suyu ve döküntülerin arıtılması için ihtiyaç halinde kullanılmaktadır. Atık tankı ise işlemde geçmiş çamurun ADT ye gönderilmesi için çıkışında 2 adet santrifüj pompa bulunan, devrenin son tankıdır. Atık tankı hariç bütün tankların karıştırıcıları mevcuttur. Birincil arıtma tanklarına kimyasal arıtma işleminde önemi büyük olan hava, düşük basınçlı kompresörler yardımıyla sürekli olarak verilmektedir.

Kimyasal bozundurma ünitesinde üç temel işlem gerçekleştirilmektedir:

- Siyanür bozundurma,
- Ağır metal duraylama ve
- Atık havuzu geri dönüş suyu duraylama ve döküntülerin bozundurulması.

Liç ve adsorpsiyon ünitesinden çıkan, siyanür içeren atık pülp atık depolama tesisine gönderilmeden önce yasal limitleri sağlamak için kimyasal bozundurma ünitesinde bozundurulmaktadır.

Siyanür Bozundurma: Bu aşamada serbest ve metal siyanür bileşikleri (demir siyanür bileşikleri hariç) sodyum meta bisülfid ile siyanata dönüştürülmektedir. Siyanatlar daha sonra hidrolize uğrayarak karbonat ve amonyuma dönüşmektedir. Demir siyanür bileşikleri ise bakır ile çöktürülerek duraylı hale getirilmektedir. Belirlenen ideal pH değeri otomatik olarak hidroklorik asit ya da sodyum hidroksit ile sağlanmaktadır. Bu pH değeri beslenen cevherin içeriğine göre değişiklik gösterebilmektedir.

Ağır Metal Duraylama: Bu aşamada arsenik ve antimon gibi ağır metaller ferrik sülfat ile çöktürülerek duraylı hale getirilmektedir. Belirlenen pH değeri otomatik olarak hidroklorik asit ya da sodyum hidroksit ile ayarlanmaktadır. Bu pH değeri beslenen cevherin içeriğine göre değişiklik gösterebilmektedir.

Geri Dönüş Suyu ve Döküntülerin Bozundurulması: Sistemde bulunan üçüncü bağımsız bir tank sayesinde gerektiği takdirde atık havuzu geri dönüş suyunda ağır metallerin ferrik sülfat ile tekrar duraylanması veya siyanatların hipoklorit ile parçalanması veya siyanür hazırlama ve sıyırma/altın odası ünitelerinde siyanür içeren dökümlerin hipoklorit ile parçalanması amacıyla kullanılmaktadır.

3.5.6 Sıyırma Ünitesi

Sıyırma devresi ve altın odası, 4 ton yüklü karbon kapasitesine sahip sıyırma kolonu, 250 kg/saat kapasiteli karbon aktifleştirme fırını, seri çalışan 2 adet elektro kazanım hücresi, kalsine fırını ve 125 kW gücünde indüksiyon potası ile solüsyon tanklarından oluşmaktadır.

Sıyırma işlemi, 1 numaralı adsorpsiyon tankından karbon kolonuna pompalar vasıtası ile aktarılan yüklü karbonun üzerinden altın ve gümüşün sıyırılmasıyla

sonuçlanan 6 aşamadan oluşmaktadır. Bu işlem sonrasında altın ve gümüş karbonlan sıyırılarak solüsyon halinde elektroliz tankına gönderilir.

Elektroliz tankında altın ve gümüşle yüklenmiş olan solüsyon elektro kazanım hücrelerinden geçirilmektedir. Solüsyonda bulunan altın ve gümüş yüksek elektrik akımı altında katı halde hücrelerdeki katotlara yapışır. İşlem sonunda elektroliz hücrelerindeki katotların üzerinde toplanan katı haldeki altın ve gümüş ise basınçlı su ile yıkandıktan sonra pres filtrede filtrelenir, kurutma fırınında kurutulur ve indüksiyon potasında dökülerek nihani ürün olan dore elde edilir.

Koza Altın İşletmeleri Kaymaz Altın Madeni'ne ait akım şeması Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



4. Deneysel Sonuçlar

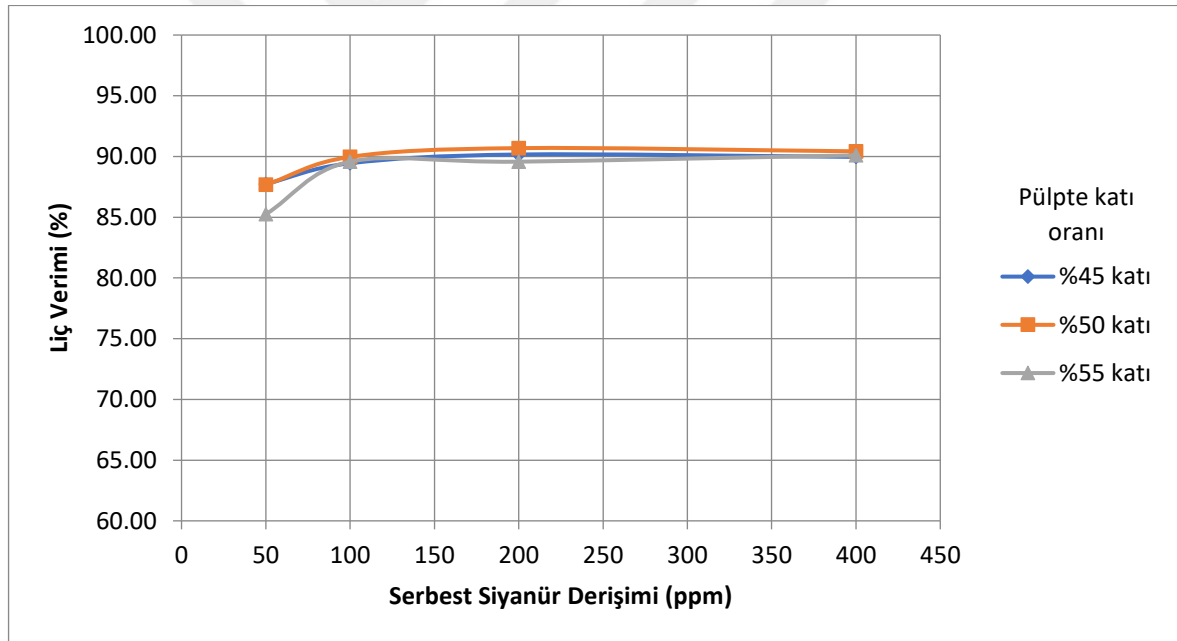
4.1 Altın İçeriğine Yönelik Hesaplamalar

Yapılan şişe çevirme testleri kapsamında alınan sıvı ve katı numunelerdeki altın analiz ölçümleri kullanılarak yapılan metal verimi hesaplamaları sonrasında elde edilen sonuçlar bu bölümde ele alınmıştır.

4.1.1 Pülp katı içeriğinin ve siyanür derişiminin etkilerinin incelenmesi

Çalışma kapsamında alınan numunelerin, farklı serbest siyanür derişimleri ve farklı pülp te yüzde katı değerleri ile farklı sürelerde liç testleri bu aşamada gerçekleştirilmiştir.

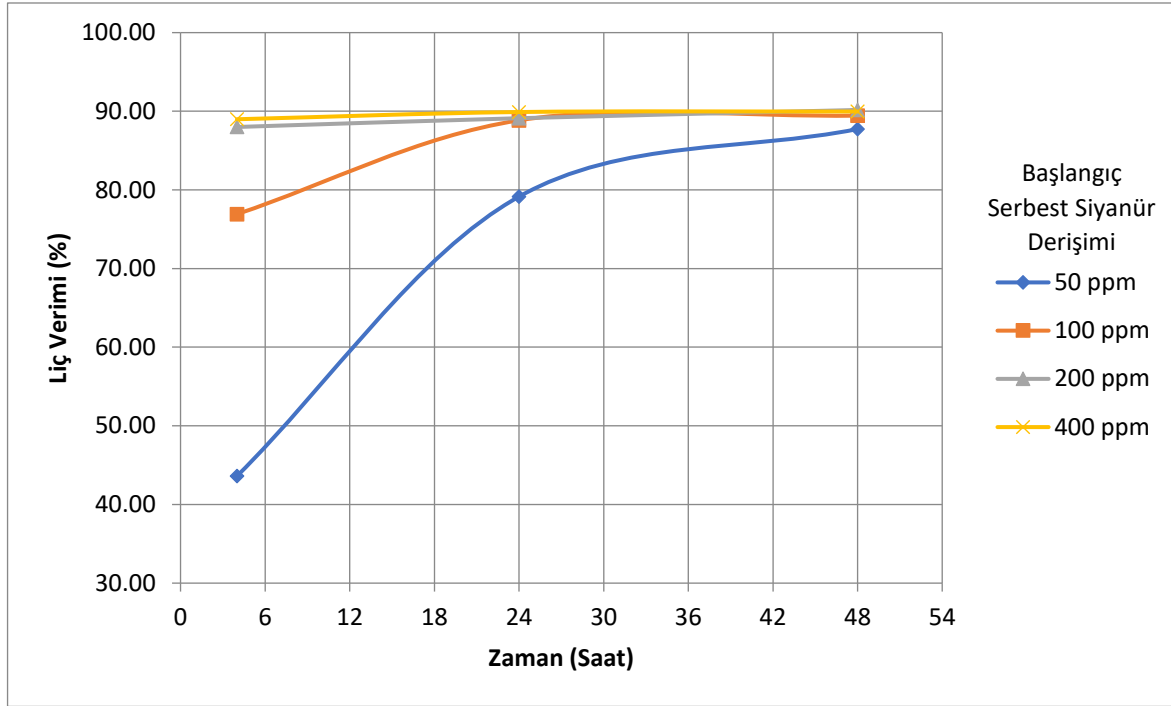
Yüzde 45, 50 ve 55'lik pülp te katı oranlarındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde yapılan 48 saatlik testler sonucu elde edilen nihai metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Başlangıç serbest siyanür derişiminin farklı yüzde katı değerlerinde liç verimi üzerine etkisi

Şekil 4.1'de görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişiminin artmasına paralel olarak %45, %50 ve %55 katı içeriklerinde liç veriminin arttığı görülmektedir ve 100 ppm'den yüksek serbest siyanür konsantrasyonlarında metal kazanım verim değerleri yüzde 90-90,5 aralığında bir azami seviyeye ulaşmaktadır.

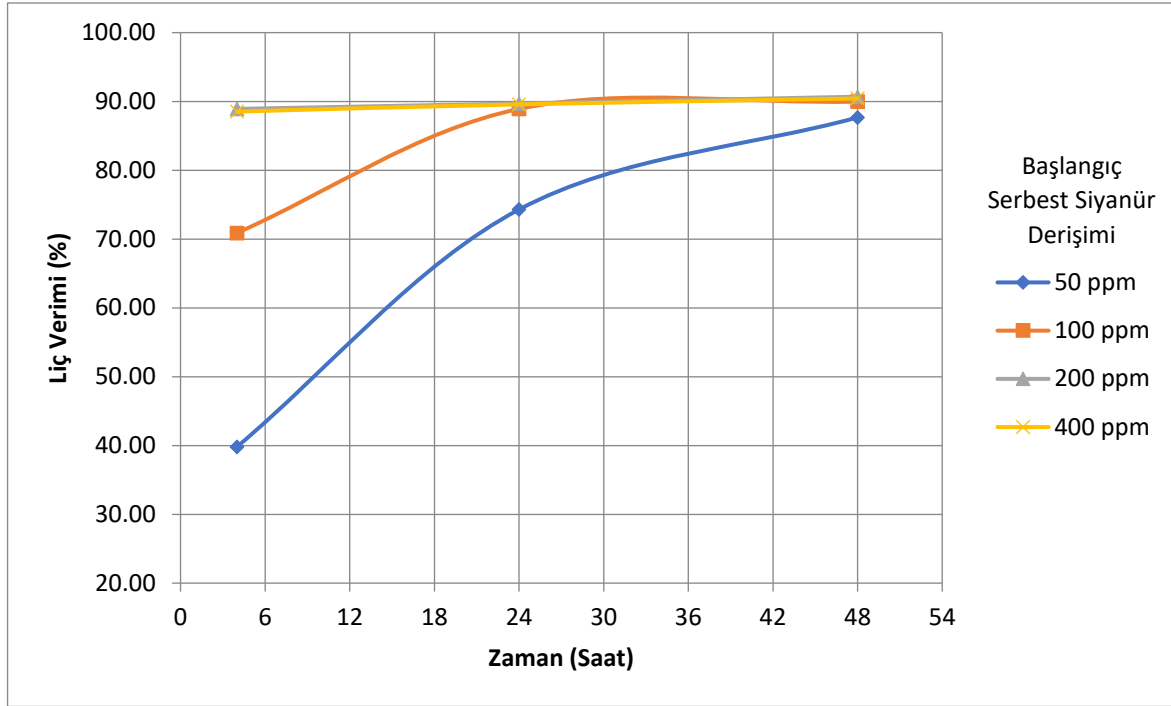
Yüzde 45'lik katı oranındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde farklı liç sürelerinde yapılan testler sonucu elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%45 Katı)

Şekil 4.2'de görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişimindeki artışın liç hızını artırdığı ve 50 ppm'in üzerindeki serbest siyanür derişimlerinde 24 saat sonunda nihai verime ulaşıldığı görülmektedir. Diğer taraftan, 50 ppm siyanür derişiminde yapılan liç testinin oldukça yavaş gerçekleştiği, 24 saat sonucunda diğer siyanür derişimlerinde yapılan testlerden %10 civarında daha düşük verim değerlerine ulaşılabildiği gözlenmektedir.

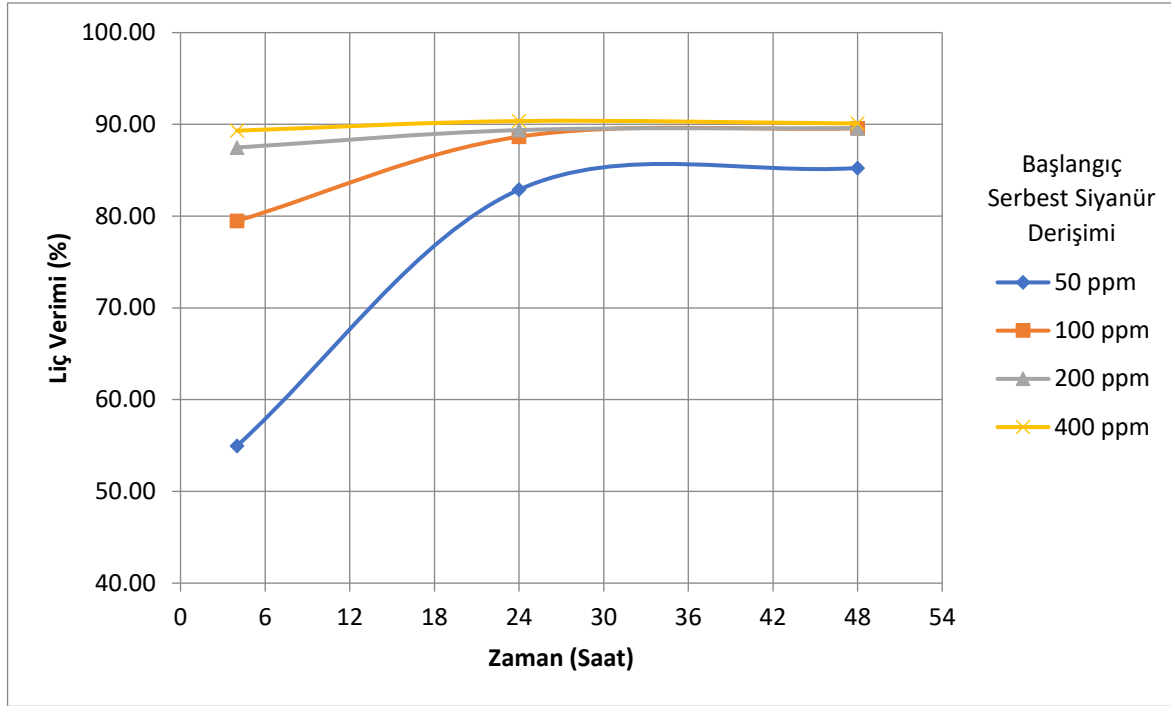
Yüzde 50'lik katı oranındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde farklı liç sürelerinde yapılan testler sonucu elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%50 Katı)

Şekil 4.3'te görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişimindeki artışın liç hızını artırdığı ve 50 ppm'in üzerindeki serbest siyanür derişimlerinde 24 saat sonunda nihai verime ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca 50 ppm serbest siyanür derişiminde yapılan testte 48 saat sonunda dahi diğer derişimlerde elde edilen nihai liç verimine ulaşamadığı görülmektedir.

Yüzde 55'lik katı oranındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde farklı liç sürelerinde yapılan testler sonucu elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

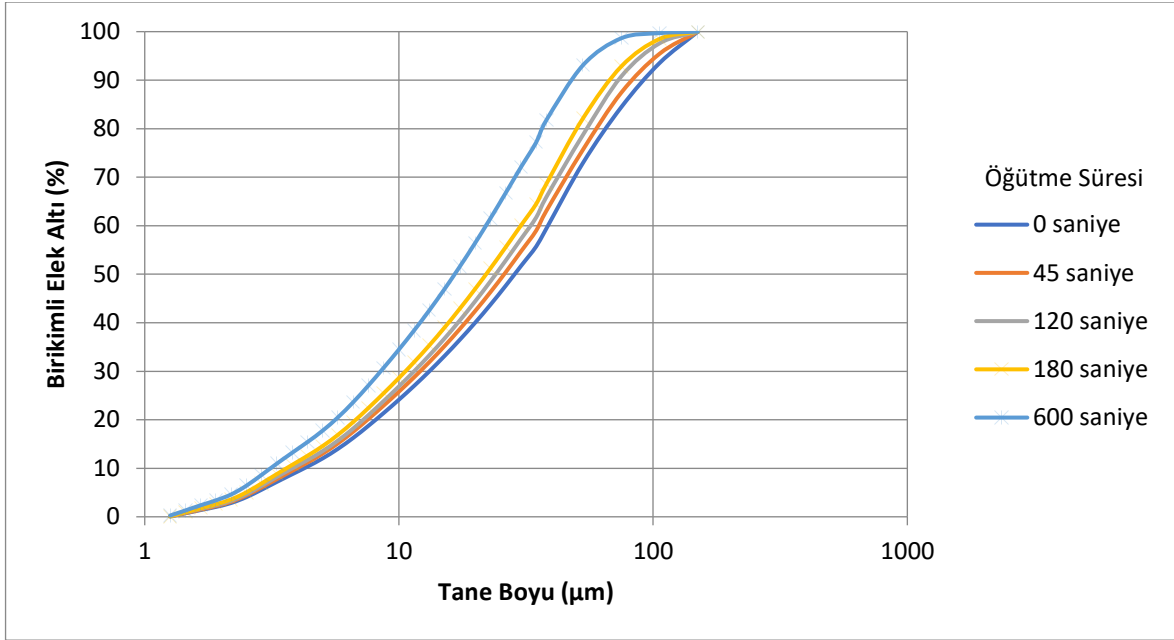


Şekil 4.4 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%55 Katı)

Şekil 4.4'te görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişimindeki artışın liç hızını artırdığı görülmektedir. 50 ppm serbest siyanür derişiminde nihai verim değerinin diğer derişim değerlerine göre oldukça düşük olarak %85,25 değerinde gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, serbest siyanür derişiminin zamana karşı liç veriminde oluşturduğu değişim %55 pülpte katı oranında gerçekleştirilen bu testlerde daha belirgin hale gelmektedir.

4.1.2 Tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi

Çalışma kapsamında alınan numunelerin, farklı sürelerde öğütülerek farklı tane boylarına indirgenmesi sonucu elde edilen numunelerin %45 katı içeriği ve 200 ppm serbest siyanür derişiminde farklı sürelerde liç testleri bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Farklı sürelerde öğütülen numunelerin elek analizi ve Master Sizer yardımıyla elde edilen tane boyu ölçümleri sonucu oluşturulan dağılım Şekil 4.5'te verilmektedir.

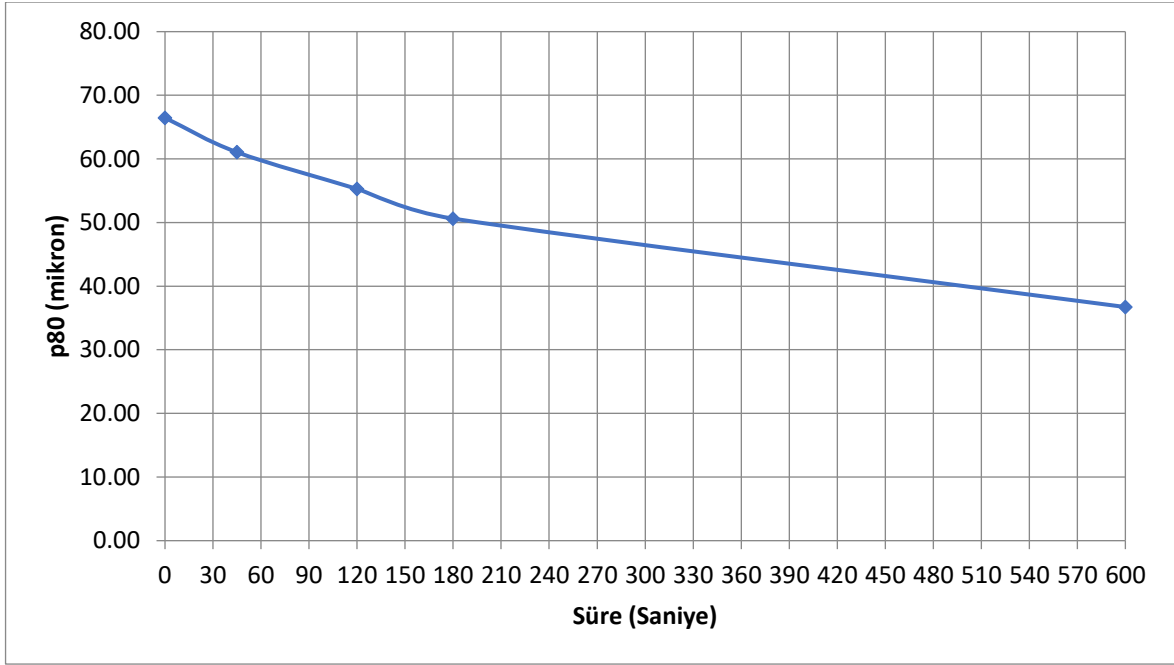


Şekil 4.5 Farklı öğütme sürelerinde elde edilen ürünlerin tane boyu dağılımı

Farklı sürelerde öğütülen cevherin tane boyundaki değişim Çizelge 4.1 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

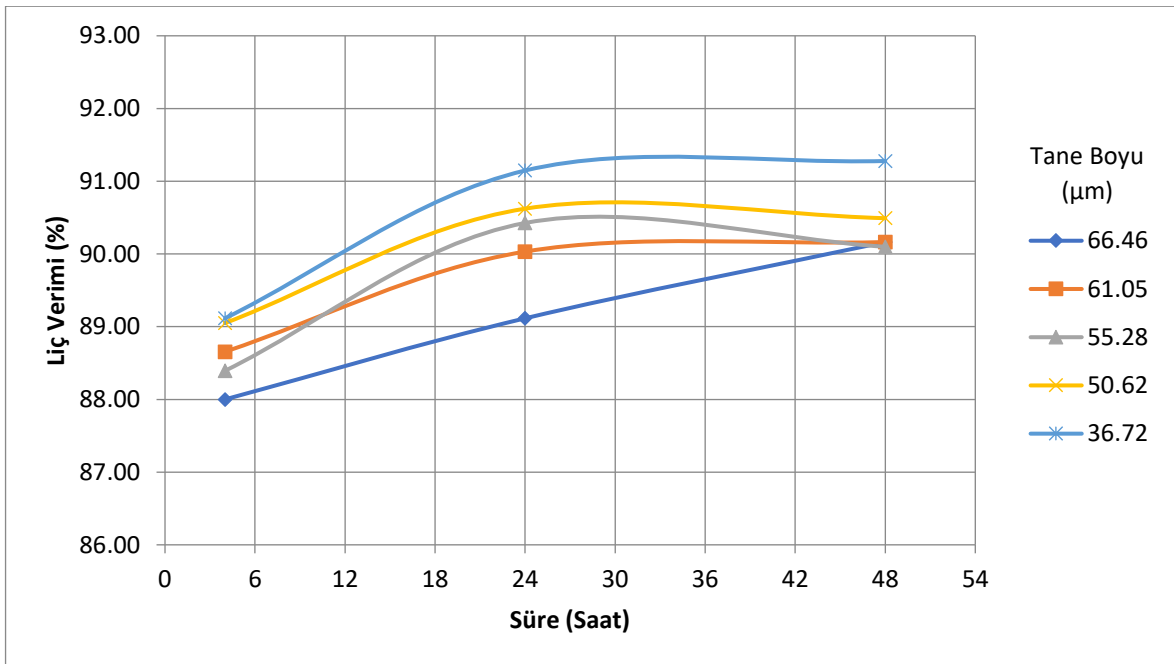
Çizelge 4.1 Öğütme süresi tane boyu ilişkisi

Öğütme Süresi (s)	P80 (µm)
0	66,46
45	61,05
120	55,28
180	50,62
600	36,72



Şekil 4.6 Laboratuvar değirmeninde öğütme süresinin ürün tane boyu (p80) üzerine etkisi

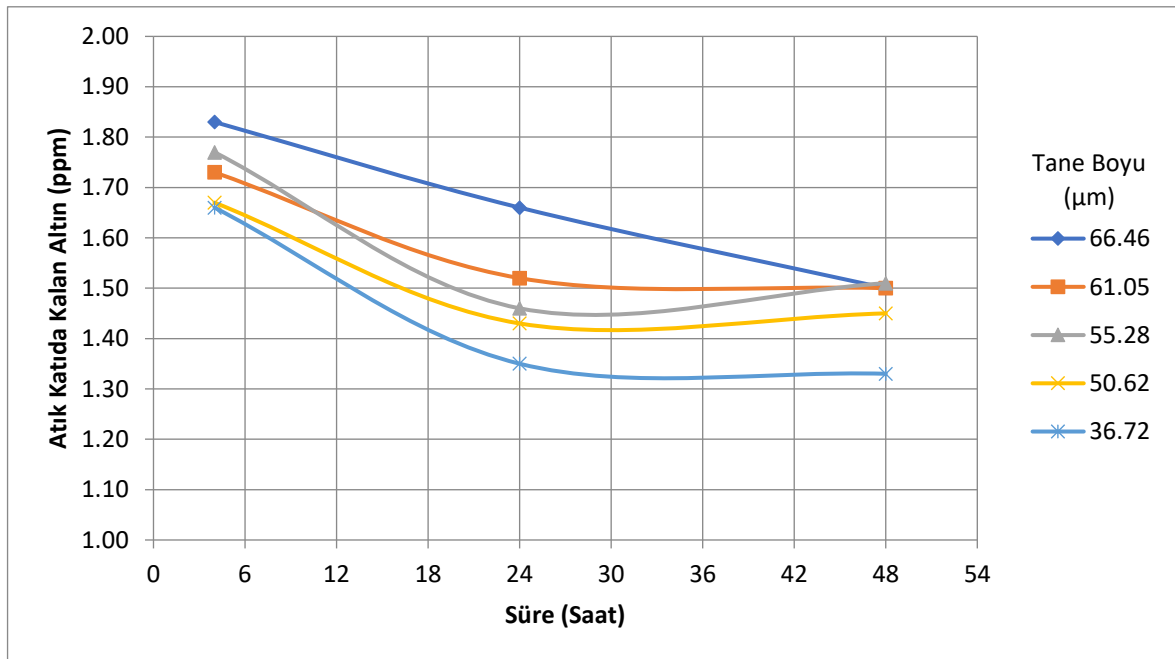
Farklı tane boylarındaki cevherlerden oluşan numunelerin %45'lik katı içeriği ve 200 ppm'lik serbest siyanür derişiminde gerçekleştirilen testleri sonucunda 4, 24 ve 48'nci saatlerde elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Farklı tane boylarında liç süresinin liç verimi üzerine etkileri

Şekil 4.7’de görüleceği üzere, öğütme işlemine tabi tutulmayan ilk numune ile 45 ve 120 saniye öğütme işlemine tabi tutulan numunelerin nihai verim değerlerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir. Ancak 180 ve 600 saniye öğütmeye tabi tutulmuş numunelerin metal kazanım verimlerinde artış gerçekleşmiş ve azami kazanım verimine 36,72 μm p80 değerine sahip numunede ulaşılmıştır. Yüzde 91,28 nihai verime ulaşılan bu örneğin öğütülmemiş numune ile arasındaki metal kazanım farkı yüzde 1,12 olarak gerçekleşmiştir.

Farklı tane boylarındaki cevherlerden oluşan numunelerin yüzde 45’lik pülp te katı oranı ile 200 ppm’lik serbest siyanür derişiminde gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen katıda (atıkta) kalan metal sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Farklı tane boylarında liç süresinin atıkta kalan altın içeriği üzerine etkileri

Şekil 4.8’de görüleceği üzere, 66,46, 61,05 ve 55,28 μm p80 tane boyuna sahip numunelerin 48 saat sonunda atıkta kalan altın içerikleri neredeyse aynı gerçekleşmiştir. Nihai verimde farklılık görülmesede 24 saat sonuçları incelendiğinde tane boyu azaldıkça katıda kalan metal oranının azaldığı görülmektedir.

50,62 ve 36,72 μm p80 tane boyuna sahip numunelerde de tane boyu azaldıkça katıda kalan metal içeriğinin azaldığı ve en düşük metal konsantrasyonuna en küçük tane boyuna sahip cevher numunesinde ulaşıldığı görülmektedir.

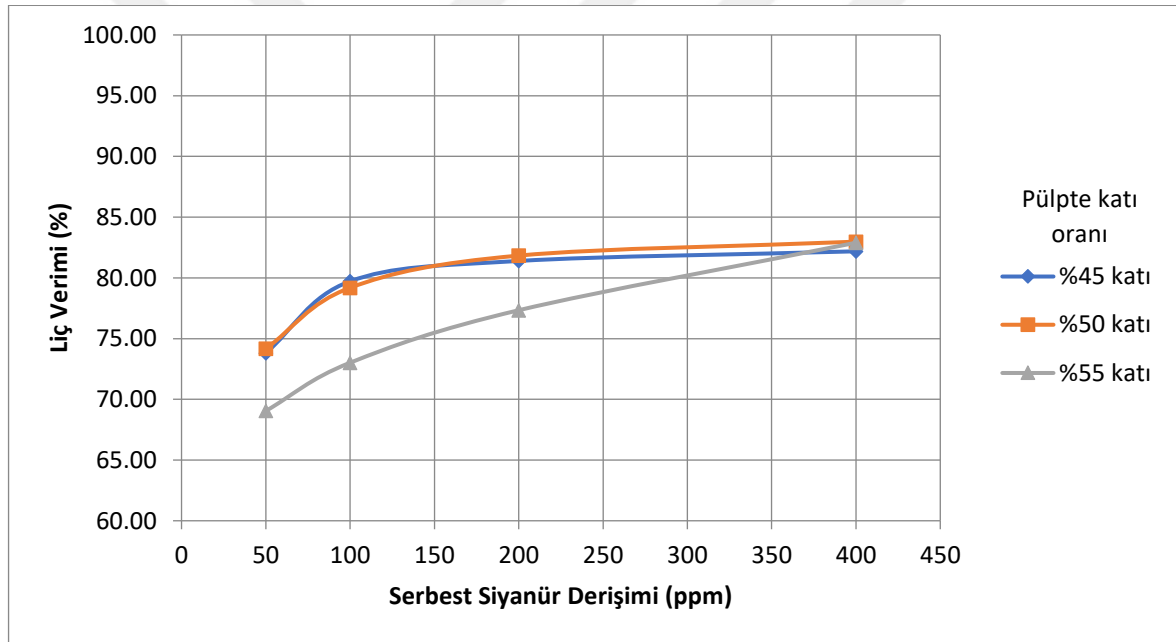
4.2 Gümüş İçeriğine Yönelik Hesaplamalar

Yapılan testler kapsamında alınan sıvı ve katı numunelerdeki gümüş analiz ölçümleri kullanılarak yapılan metal verimi hesaplamaları sonrasında elde edilen sonuçlar bu bölümde ele alınmıştır.

4.2.1 Pülpte katı içeriğinin ve siyanür derişiminin etkilerinin incelenmesi

Çalışma kapsamında alınan numunelerin, farklı serbest siyanür derişimleri ve farklı pülpte yüzde katı değerleri ile farklı sürelerde liç testleri bu aşamda gerçekleştirilmiştir.

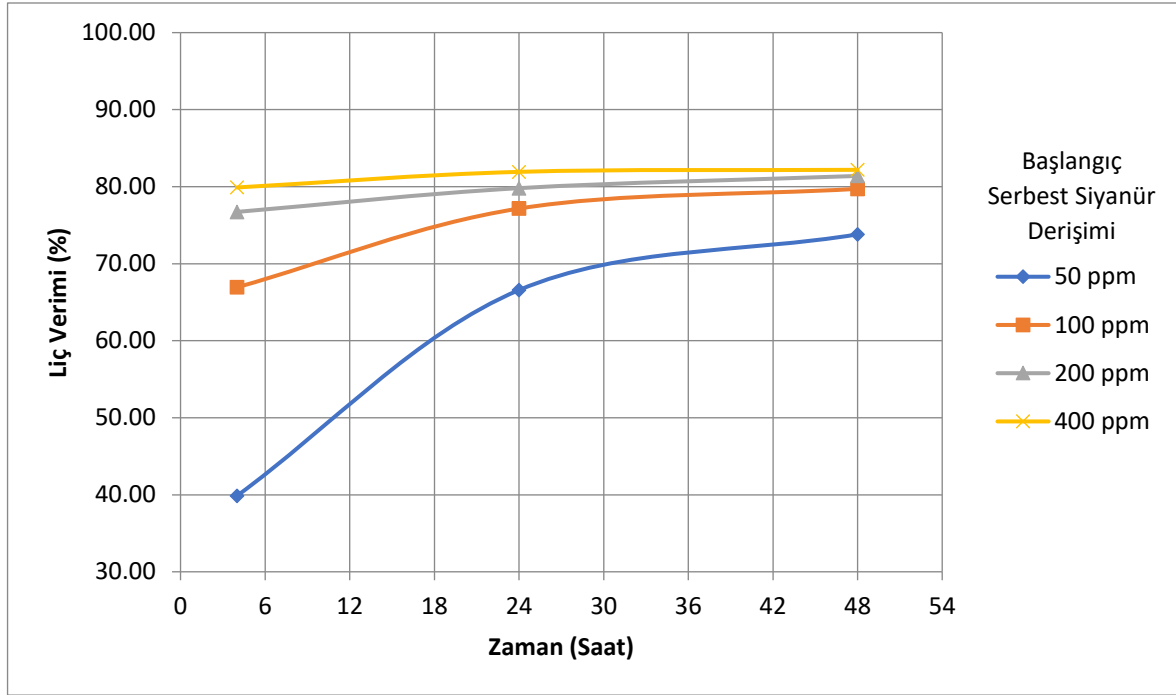
Yüzde 45, 50 ve 55'lik pülpte katı oranlarındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde yapılan 48 saatlik testler sonucu elde edilen nihai metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



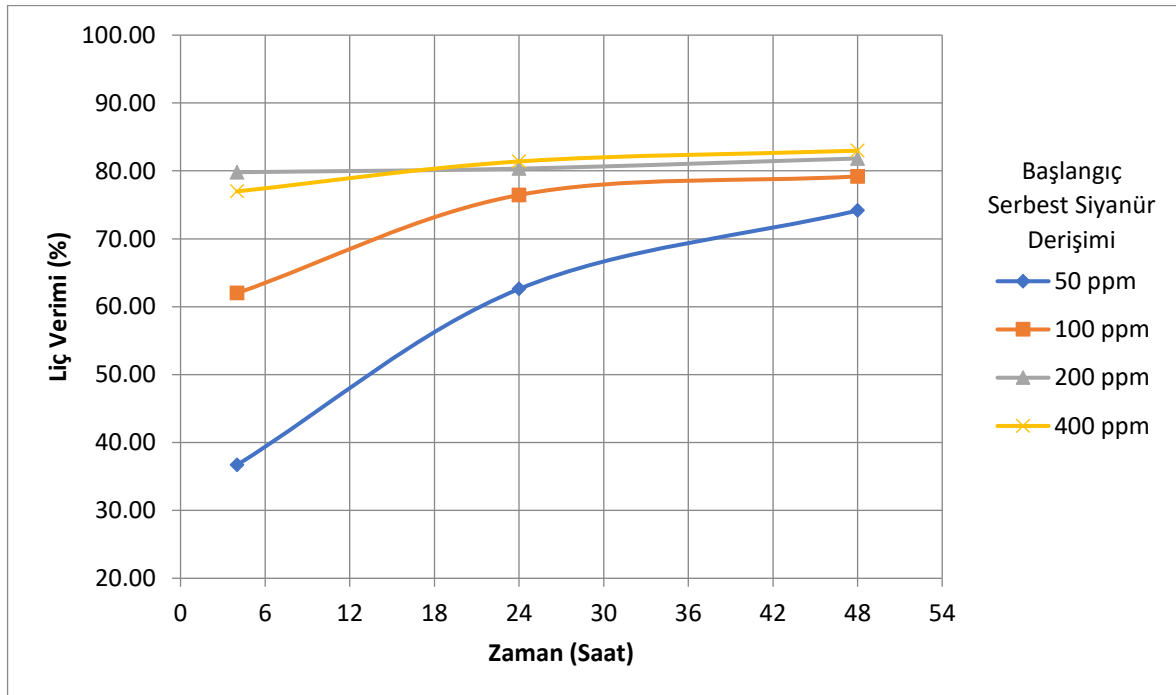
Şekil 4.9 Serbest siyanür derişiminin farklı yüzde katı değerlerinde liç verimi üzerine etkisi

Şekil 4.9'da görüleceği üzere, serbest siyanür derişiminin artmasına paralel olarak yüzde 45, 50, 55 pülpte katı içeriklerinde liç veriminin arttığı görülmektedir. Yüzde 45 ve 50 pülpte katı oranına sahip numunelerine ait testlerin oldukça benzer sonuçlar ortaya çıkardığı ancak yüzde 55'lik pülpte katı içeriğindeki numunenin 400 ppm'in altındaki serbest siyanür derişimlerinde liç veriminde ciddi düşüş gerçekleştiği görülmektedir.

Yüzde 45'lik katı oranındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde farklı liç sürelerinde yapılan testler sonucu elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%45 Katı)



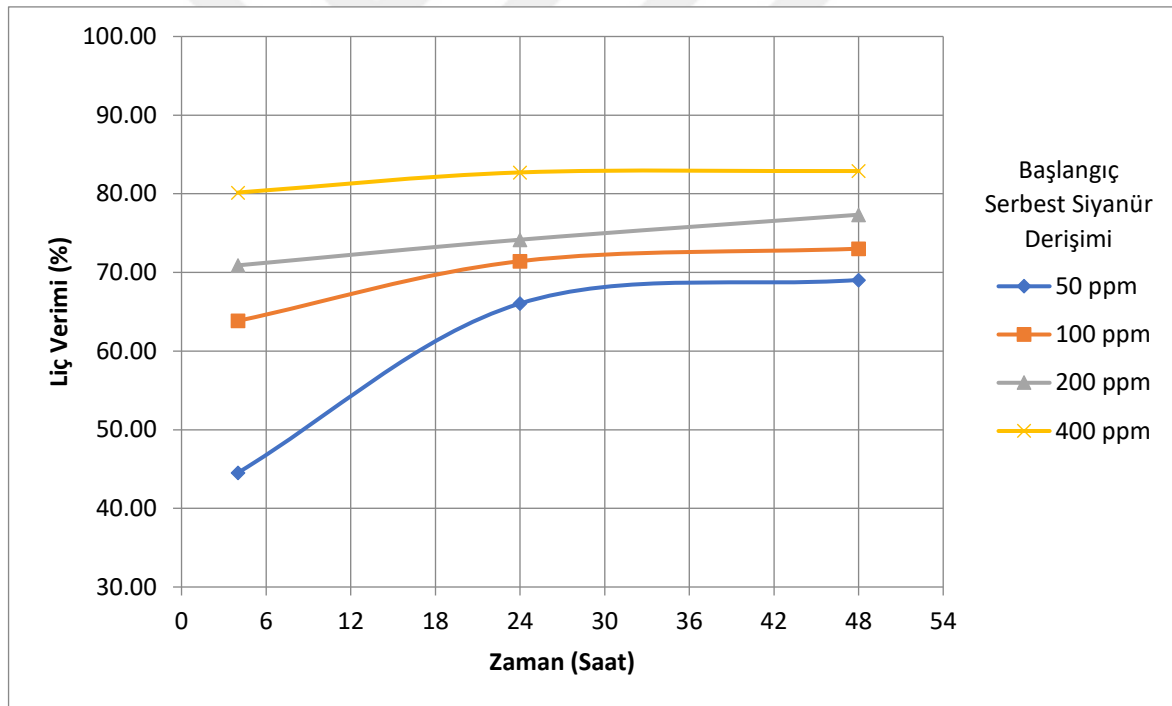
Şekil 4.11 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%50 Katı)

Şekil 4.10'da görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişimindeki artışın liç hızını ve nihai metal kazanım verimini artırdığı görülmektedir. 400 ppm serbest siyanür derişiminde yapılan testte nihai verim değerine 24 saatte ulaşıldığı görülmektedir.

Yüzde 50'lik katı oranındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde farklı liç sürelerinde yapılan testler sonucu elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Şekil 4.11'de görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişimindeki artışın liç hızını ve nihai metal kazanım verimini artırdığı görülmektedir.

Yüzde 55'lik katı oranındaki çamur numuneleri ile 50, 100, 200, 400 ppm'lik serbest siyanür derişimlerinde farklı liç sürelerinde yapılan testler sonucu elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Liç süresinin farklı başlangıç serbest siyanür derişimlerinde metal kazanım verimine etkisi (%55 Katı)

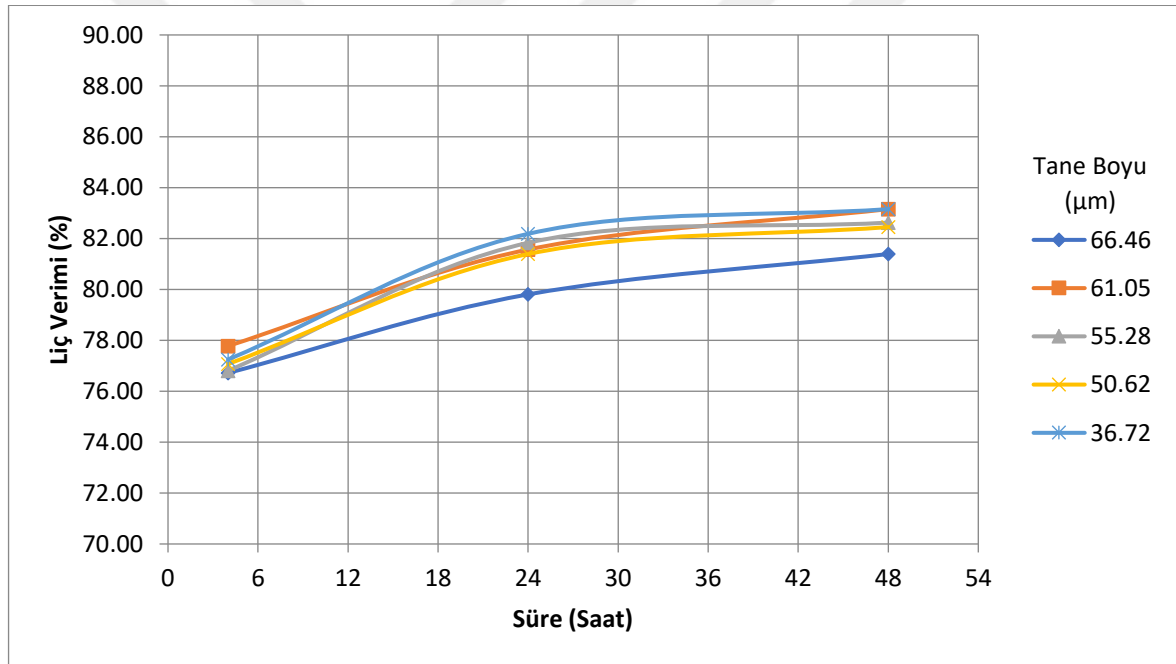
Şekil 4.12'de görüleceği üzere, başlangıç serbest siyanür derişimindeki artışın liç hızını ve nihai metal kazanım verimini artırdığı görülmektedir. Ayrıca %55 pülp katı oranına sahip numune test sonuçlarına ait bu eğrilerde serbest siyanür derişimindeki değişiminden kaynaklı verim farklılıklarının daha belirginleştiği ve 50

ppm serbest siyanür derişimindeki nihai metal kazanım verim değerinin %70'in altına kadar düştüğü görölmektedir.

4.2.2 Tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi

Çalışma kapsamında alınan numunelerin, farklı sürelerde öğütölerek farklı tane boylarına indirgenmesi sonucu elde edilen numunelerin %45 pölpde katı oranı ve 200 ppm serbest siyanür derişiminde farklı sürelerde liç testleri bu aşamda gerçekleştirilmiştir.

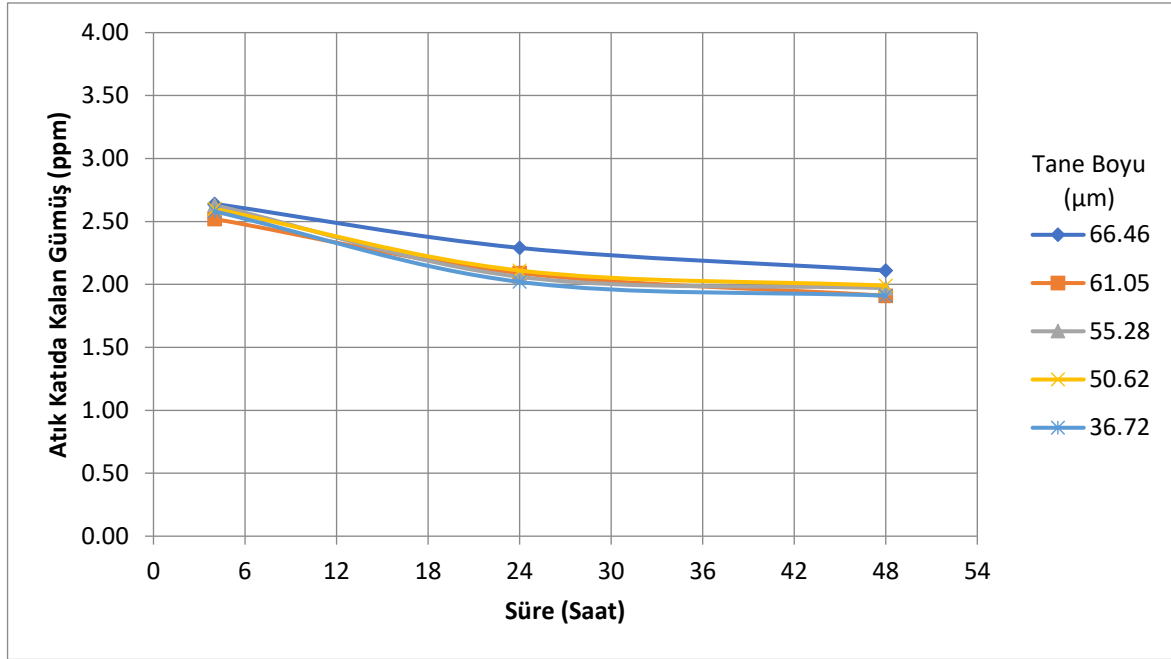
Farklı tane boylarındaki cevherlerden oluşan numunelerin %45 pölpde katı oranı ile 200 ppm'lik serbest siyanür derişiminde gerçekleştirilen testler sonucu 4, 24 ve 48'nci saatlerde elde edilen metal kazanımı verim sonuçları Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Farklı tane boylarında liç süresinin liç verimi üzerine etkileri

Şekil 4.13'te göröleceği üzere, 61,05 µm tane boyuna sahip numune haricindeki numunelerde, tane boyunun azalması ile nihai metal kazanım veriminin arttığı görölmektedir. Bahsedilen farklılığın laboratuvar katıda gümüş tayininden kaynaklandığı düşünölmektedir.

Farklı tane boylarındaki cevherlerden oluşan numunelerin %45'lik katı oranı ile 200 ppm'lik serbest siyanür derişiminde gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen katıda (atıkta) kalan metal sonuçları Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Farklı tane boylarında liç süresinin atıkta kalan gümüş içeriği üzerine etkileri

5. Sonuçlar

Koza Altın İşletmeleri Kaymaz Altın Madeni cevherinde gerçekleştirilen testler sonucunda aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır.

Farklı pülp katı içeriklerinde gerçekleştirilen testlerin sonuçları doğrultusunda ulaşılan metal kazanım verim değerlerinin özellikle %45 ve %50 pülp katı oranları için neredeyse aynı olduğu, bu nedenle aynı tank hacimlerinde daha fazla durma süresi sağlaması açısından %50 pülp katı içeriğinde çalışma yapılmasının değerlendirilebileceği ortaya çıkmaktadır. Böyle bir çalışma yapmadan önce tikiner alt akım pompaları, tank karıştırıcıları ve adsorpsiyon tanklarındaki tank içi eleklerin performansları konusunda değerlendirme yapılmalı ve aktif karbon üzerine adsorpsiyon işleminin performansı da önceden yapılacak testlerle değerlendirilmelidir. Mevcut tesisteki pülp katı içeriği değerinin %45'ten %50'ye çıkarılması durumunda durma zamanı, 40,98 saatten 47,62 saate çıkacak ve bu sayede durma zamanında 6,64 saat, diğer bir deyişle, %16,20 oranında artış sağlanacaktır.

Farklı serbest siyanür deşişimlerinde gerçekleştirilen testlerin sonuçları incelendiğinde 24 ve 48 saatlik metal kazanım verileri işığında 50 ppm siyanür deşişiminin yetersiz olabileceği, 400 ppm siyanür deşişiminin ise belirgin verim artışı sağlamadığı görülmektedir. İdeal başlangıç serbest siyanür deşişiminin 100-200 ppm arasında olduğu değerlendirildiğinde, 125, 150, 175 ppm gibi serbest siyanür deşişimlerinde yapılacak testlerle ideal siyanür konsantrasyonuna yönelik benzer çalışmaların tekrarlanması sayesinde, çalışmanın yapıldığı dönemdeki hedef işletme değerşeni olan 200-220 ppm serbest siyanür deşişiminin daha düşük değerlere çekilebileceği, bu sayede hem sodyum siyanür tüketiminin düşürüleceği hem de kimyasal bozundurma ünitesindeki sodyum metabisülfit tüketiminin azaltılabileceği değerlendirilmektedir.

Liç süresi ile metal kazanım verimleri arasındaki ilişki incelendiğinde farklı serbest siyanür deşişimleri ve farklı katı içeriklerinde 24 ve 48 saat sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu, ancak 48 saatlik liç işlemleri sonucunda yaklaşık %0,5-1 verim artışı sağlandığı görülmektedir. Özellikle mevcut işletme koşulları olan yüzde 45 pülp katı içeriği ve 200 ppm serbest siyanür deşişiminde gerçekleştirilen testlerde bu fark %1,05 olarak ölçülmüştür. Mevcut tesiste rneklemme çalışmasının yapıldığı döneme

dair işletme koşulları ışığında hesaplama yapıldığında 23,33 saati liç tanklarında, 18,93 saati adsorpsiyon olmak üzere toplam 42,26 saat durma zamanı olduğu görülmektedir. 48 saatlik testlerde elde edilen metal kazanım verim değeri nedeniyle tesis koşullarındaki durma zamanının yetersiz olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu konuda kesin bir kanıya varılabilmesi için 24 ve 48 saatleri arasında daha sık süre aralıklarında gerçekleştirilecek testlerle optimum durma zamanı ortaya konabilecektir. Alınacak sonuçlara göre durma zamanının yetersiz olduğu sonucuna varılırsa, sisteme liç tankı eklenerek verim artışına ulaşılması değerlendirilebilecektir.

Farklı tane boylarında gerçekleştirilen liç testlerinde elde edilen metal kazanım verimleri incelendiğinde orijinal numune tane boyu p80 değeri olan 66,46 µm ile fazladan öğütme işlemine tabi tutulmuş 61,05 ve 55,28 µm tane boyu değerine sahip numuneler arasında verim farkı gözlenmemiştir. Yalnızca orijinal numune ile 48 saatte ulaşılan verim değerine bahsedilen iki numune ile 24 saatte ulaşıldığı görülmüştür. Fazladan öğütme işlemine tabi tutulan diğer iki numune olan 50,62 mikron ve 36,72 mikron p80 değerine sahip olan numunelerin test sonuçları ile elde edilen metal kazanım verimleri, orijinal numune verim sonuçlarına göre sırasıyla %0,33 ve %1,12 artış göstermiştir.

Bahsedilen tane boyu değişimini elde edebilmek için gereken güç Eşitlik 5.1'deki Bond eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$W = 10 W_i * (P_{80})^{-0,5} - 10 W_i * (F_{80})^{-0,5} \quad 5.1$$

Burada;

W : Öğütmede harcanan güç, kW/s/t

W_i : İş indeksi, kW/s/t

P_{80} : Öğütülmüş cevherin %80'inin geçtiği tane boyu, µm

F_{80} : Öğütülecek cevherin %80'inin geçtiği tane boyu, µm

İş indeksi değeri olan 18,64 kW/s/t ve 57,46 ton/saat besleme kuru tonajı verileri ile yapılan hesaplama sonucunda, çalışmaların yapıldığı dönemdeki çalışma koşullarında, nihai öğütme inceliğini 66,46 µm'dan 36,72 µm'a düşürmek için fazladan 453,71 kWsaat enerji gerekesinimi olduğu ortaya çıkmaktadır. Test

sonuçlarına göre verimde beklenen %1,12'lik artış ile fazladan 9,81 gram/saat altın kazanımı gerçekleştirilebilecektir. Güncel enerji maliyeti olan 0,403 TL/kWs dikkate alındığında fazladan enerji maliyeti 186 TL/saat olarak hesaplanmaktadır.

Diğer taraftan, tane boyunun düşürülmesi ile siyanür tüketiminde artış gerçekleşmektedir. Bu çalışma kapsamında, farklı tane boylarında yapılan liç testlerinde elde edilen sonuçlar ışığında yapılan siyanür tüketim hesaplamaları Çizelge 5.1'de gösterilmektedir. Tane boyundaki azalma ile birlikte siyanür tüketimlerinde artış görülmektedir.

Çizelge 5.1 Farklı tane boylarındaki cevherlerin siyanür tüketim değerleri

Cevher tane boyu (p80, μm)	Siyanür tüketimi (kg/ton)
66,46	0,14
61,05	0,20
55,28	0,21
50,62	0,21
36,72	0,23

Dolayısıyla, öğütme inceliğinin artmasıyla beraber, gereken ilave siyanür tüketimi, ton maliyeti olan 1870 €'luk maliyet ile hesaplandığında, üretim maliyetlerinde 54,92 TL/saat'lik bir artışa sebep olacaktır.

Bu maliyetlere rağmen, tane boyunun inceltilmesi ile kazanılabilecek ilave altının ticari değeri ise 1270 \$/ons fiyatı ile 1847 TL/saat olarak hesaplanmaktadır. Sonuç olarak, bahsedilen öğütme işleminin gerçekleştirileceği ünitenin, yatırım ve enerji dışındaki işletme giderleri dikkate alınarak cevherin öğütülmesinde ekonomik getiri potansiyeli ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] L. R. P. de Andrade Lima, D. Hodouin, Simulation Study of the Optimal distribution of Cyanide in a Gold Leaching Circuit, *Minerals Engineering*, 19, 1319-1327, **2006**.
- [2] L.R.P. de Andrade Lima, D. Hodouin, Optimisation of Reactor Volumes for Gold Cyanidation, *Minerals Engineering*, 18, 671-679, **2005**.
- [3] Ellis, S., Senanayake G., *The Effects of Dissolved Oxygen and Cyanide Dosage on Gold Extraction from a Pyrrhotite-rich Ore*, Perth, **2001**.
- [4] OYGÜR, V., Altın Madenciliğinin Yeniden Doğuşu, *Jeoloji Mühendisliği*, 37, 17-22, **1990**.
- [5] World Gold Council, How much gold, <https://www.gold.org/about-gold/gold-supply/gold-mining/how-much-gold-has-been-mined> (Nisan **2018**).
- [6] Kirkemo, H., William L. Newman, Roger P. Ashley, *Gold*, Denver, U.S. Geological Survey Information Services, **2001**.
- [7] Habashi, Fathi, *Handbook of Extractive Metallurgy*, Volume 3. Wiley-VCH, **1997**.
- [8] House, John O. Marsden and C. Iain, *The Chemistry of Gold Extraction*. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., **2006**.
- [9] Reuters, Thomson, *GFMS Gold Survey*, London, **2017**.
- [10] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Altin> (Nisan **2018**).
- [11] Altın Madencileri Derneği, <http://altinmadencileri.org.tr/aktif-olan-altin-madenleri/> (Nisan **2018**).
- [12] Celep, O., *Mastra ve Kaletaş(Gümüşhane) Cevherlerinden Altın Kazanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, **2005**.

- [13] CJ Mitchell, EJ Evans & M T Styles, *A Review of Gold Particle-Size and Recovery Methods*, Technical report, Natural Environment Research Council, Nottingham, **1997**.
- [14] S. R. La Brooy, H.G. Linge, G.S. Walker, Review of gold extraction from ores, *Minerals Engineering*, 7, 1213-1241, **1994**.
- [15] Laplante, Andre R. A, *Standardized Test to Determine Gravity Recoverable Gold*, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, **1994**.
- [16] Bayraktar, İ., Yarar, B., *Altın Cevherlerinin Zenginleştirilmesi ve Altının Ekstraksiyonu*.
- [17] Adams, M.D, *Advances in Gold Ore Processing*, Elsevier, **2005**.
- [18] B.A. Wills, T.J. Napier-Munn, *Wills' Mineral Processing Technology*, Seventy edition, Elsevier Science & Technology Books, **2006**.
- [19] S. Bulatovic, D.M. Wyslouzil, *Gold Recovery: Flotation*, Lakefield Research, Ontario, **2000**.
- [20] Celep, O., Alp, İ., Karıştırmalı Değirmenler ile İnce Öğütmenin Refrakter Altın Cevherlerine Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, *Madencilik*, 47, 15-26 , **2008**.
- [21] L. Rusanen, J. Aromaa, O. Forsen. Espoo, Pressure oxidation of pyrite-arsenopyrite refractory gold concentrate, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49, 101-109, **2013**.
- [22] Wise, Edmund M., *Gold. Recovery, Properties, and Applications*, Princeton, **1964**.
- [23] Habashi, Fathi, *A Textbook of Hydrometallurgy*, Quebec, Laval University, **1993**.
- [24] Browner, Richard E., *Chemistry of the CIP Process*, Gold Chemistry Leaching Processes.
- [25] Frank K. Crundwell, Sven A. Godorr, A Mathematical Model of the Leaching of Gold in Cyanide Solutions, *Hydrometallurgy*, 44, 147-162, **1997**.

- [26] Habashi, Fathi, Kinetics and Mechanism of Gold and Silver Dissolution in Cyanide Solution, *Montana Bureau of Mines and Geology*, 59, **1967**.
- [27] S. Örgül, Ü. Atalay, Reaction chemistry of gold leaching in thiourea solution for a Turkish gold ore, *Hydrometallurgy*, 67, 71-77, **2002**.
- [28] M. Tanrıverdi, H. Mordoğan, Ü. İpekoğlu, Leaching of Ovacık gold ore with cyanide, thiourea and thiosulphate, *Minerals Engineering*, 18, 363-365, **2005**.
- [29] L. Evans, S. E. Collins, J. J. Cox, H. Krutzelmann, *Technical report on the Goldstrike mine*, Nevada, Barrick Gold Corporation, **2017**.
- [30] Paul G. Spry, Stephen Chryssoulis, and Christopher G. Ryan, Process Mineralogy of Gold: Gold from Telluride, *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 56, 60-62, **2004**.
- [31] Pizarro R., J.D. McBeth, G.M Potter, Heap Leaching Practice At the Carlin Gold Mining Company, *Annual American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Meeting*, Nevada, Texas, **1974**.
- [32] Chamberlain, P.D., Status of heap, dump, and in-situ leaching of gold and silver. Nevada, *Proceedings of World Gold '89: 1st Joint Meeting of Society of Mining Engineers and Australasian Institute of Mining & Metallurgy*, **1989**.
- [33] L.R.P. de Andrade Lima, D. Hodouin, Residence Time Distribution of an Industrial Mechanically Agitated Cyanidation Tank, *Minerals Engineering*, 18, 613-621, **2005**.
- [34] S. Ellis, M. Gao, Development of ultrafine grinding at Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, *Society of Mining Engineers 2002 Annual Meeting*, Arizona, **2002**.
- [35] Vivienne L., Peter R., Fred M., Peroxide addition improves gold recovery and saves reagents at Pine Creek Gold Mine, *Randol Gold Conference*, Colorado, **1989**.
- [36] B.R. Green, M.H. Kotze, and J.P. Wyethe, Developments in Ion Exchange: The Mintek Perspective, *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 54, 37-43, **2002**.

- [37] K.L. Rees, J.S.J. van Deventer, The Mechanism of Enhanced Gold Extraction from Ores in the Presence of Activated Carbon, *Hydrometallurgy*, 58, 151-167, **2000**.
- [38] C.A. Fleming, A. Mezei, E. Bourricaudy, M. Canizares, M. Ashbury, 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, 484-494, **2011**.
- [39] C. A. FLEMING, and M.J. NICOL, The Adsorption of Gold Cyanide onto Activated Carbon. III. Factors Influencing the Rate of Loading and the Equilibrium Capacity, *Journal - South African Institute of Mining and Metallurgy*, **1984**.
- [40] Stange, W., The Process Design of Gold Leaching and Carbon in Pulp Circuits, *Journal - South African Institute of Mining and Metallurgy*, **1999**.
- [41] L.R.P. de Andrade Lima, D. Hodouin, A lumped kinetic model for gold ore cyanidation, *Hydrometallurgy*, 79, 121-137, **2005**.
- [42] Walkey, Cathro K.J. and A., The Cyanidation of Gold, *CSIRO*, Melbourne, **1961**.
- [43] Cathro, K.J., The Effect of Oxygen in the Cyanide Process for Gold Recovery, *Australasian Institute of Mining & Metallurgy*, **1963**.
- [44] Nkosikhona Hlabangana, Siboniwe Bhebe, Nonhlanhla G. Mguni, Gwiranai Danha, Joel Tshuma, Optimisation of the leaching Parameters of a gold ore in sodium cyanide solution, *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 6, 1-10, **2018**.
- [45] P.D. Kondos, G. Deschenes, R.M. Morrison, Process optimization studies in gold cyanidation, *Hydrometallurgy*, 39, 235-250, **1995**.
- [46] Caruso, S.G., The Chemistry of Cyanide Compounds and Their Behaviour in the Aquatic Environment, *Carnegie Mellon Institute of Research*, Pittsburgh, **1975**.
- [47] Habashi, Fathi, Recent Advances in Gold Metallurgy, *Department of Mining & Metallurgy*, Quebec, **1997**.

- [48] M.M. Aghamirian, W.T. Yen, Mechanisms of galvanic interactions between gold and sulfide minerals in cyanide solution, *Minerals Engineering*, 18, 393-407, **2005**.
- [49] Senanayake, G., Kinetics and Reaction Mechanism of Gold Cyanidation: Surface Reaction Model via Au(I)-OH-CN Complexes, *Hydrometallurgy*, 80, 1-12, **2005**.
- [50] N. Hlabangana, G. Danh, M.M. Bwalya, D. Hildebrandt, D. Glasser, Application of the attainable region method to determine optimal conditions for milling and leaching, *Powder Technology*, 317, 400-407, **2017**.
- [51] Akçil A., Destruction of Cyanide in Gold Mill Effluents: Biological versus Chemical treatments, *Biotechnology Advances*, 21, 501-511, **2003**.
- [52] Becker J., Carvajal P., Estay H., Predicting HCN Gas Generation in the Sart Process, *Hydrometallurgy*, 113-114, 131-142, **2012**.
- [53] Luyben, William L., *Chemical Reactor Design and Control*, Wiley-Interscience, **2007**.
- [54] Coker, A. Kayode, *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design*, Gulf Professional Publishing, **2001**.
- [55] Fogler, H. Scott, *Essentials of Chemical Reaction Engineering*, Pearson Education Inc., **2011**.
- [56] A. R. Heath, J. A. Rumball, Optimising Cyanide:Oxygen Ratios in Gold CIP/CIL Circuits, *Minerals Engineering*, 11, 999-1010, **1998**.

EKLER

Şişe Çevirme Test Sonuçları

	%45											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
Boş Şişe Ağırlığı (g)	1233.66	1339.02	1340.56	1234.23	1347.86	1345.55	1335.78	1235.45	1235.22	1347.75	1313.98	1313.91
İlk pH	8.21	8.29	8.31	8.23	8.30	8.29	8.20	8.28	8.29	8.15	8.30	8.28
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	0.53	0.51	0.54	0.50	0.51	0.50	0.50	0.52	0.50	0.54	0.52	0.50
pH	10.76	10.67	10.84	10.92	10.66	10.73	10.79	10.71	10.75	10.71	10.71	10.79
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.030	0.030	0.030	0.060	0.060	0.060	0.110	0.110	0.110	0.220	0.220	0.220
Çözünmüş Oksijen (ppm)	6.40	6.60	8.40	6.30	6.50	7.60	6.20	6.50	7.70	6.40	6.60	7.40
Dolu Şişe (g)	2249.31	2369.51	2361.95	2255.34	2373.01	2364.06	2364.60	2264.60	2252.24	2376.91	2232.02	2331.32
1 Saatlik pH	10.64	10.64		10.67	10.57		10.76	10.69		10.67	10.71	
1 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	30.00	25.00		80.00	70.00		155.00	155.00		320.00	315.00	
1 Çözünmüş Oksijen (ppm)	24.00	26.00		26.00	25.00		24.00	27.00		24.00	27.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-	-		0.05	-		0.05	-		-	-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.015	0.015		0.015	0.020		0.030	0.030		0.040	0.040	
2 Saatlik pH	10.59	10.59	10.69	10.63	10.57	10.67	10.70	10.63	10.68	10.63	10.64	10.69
2 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	50.00	50.00	30.00	95.00	85.00	70.00	185.00	190.00	140.00	360.00	360.00	310.00
2 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	22.00	24.00	26.00	22.00	27.00	26.00	24.00	28.00	26.00	24.00	28.00	27.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-	-	-	-	0.02	0.03	-	-	0.03	-	-	0.01
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-	-	0.010	-	0.010	0.020	0.015	0.010	0.030	0.040	0.030	0.040
4 Saatlik pH	10.51			10.57			10.65			10.65		
4 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	40.00			80.00			190.00			365.00		
4 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	23.00			24.00			27.00			28.00		
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-			-			-			-		
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-			-			-			-		

	%45											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
8 Saatlik pH		10.70			10.67			10.64			10.66	
8 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		35.00			85.00			155.00			345.00	
8 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		29.00			29.00			29.00			27.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		0.10			0.09			0.07			0.07	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		0.010			0.010			0.025			0.030	
16 Saatlik pH			10.69			10.64			10.63			10.62
16 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			25.00			65.00			145.00			285.00
16 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			24.00			23.00			23.00			25.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.11			0.10			0.08			0.06
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.015			0.020			0.030			0.060
21 Saatlik pH			10.65			10.59			10.59			10.60
21 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			40.00			90.00			165.00			335.00
21 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			23.00			23.00			23.00			23.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			-			-			-			-
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			-			-			0.020			0.030
24 Saatlik pH		10.49			10.52			10.58			10.69	
24 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		30.00			65.00			150.00			300.00	
24 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		28.00			30.00			31.00			30.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		-			-			-			-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		-			-			-			-	
30 Saatlik pH			10.69			10.66			10.69			10.63
30 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			30.00			70.00			175.00			345.00

	%45											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
30 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			28.00			30.00			29.00			30.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.05			0.05			0.05			0.01
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.015			0.020			0.020			0.030
48 Saatlik pH			10.42			10.49			10.58			10.50
48 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			35.00			70.00			140.00			280.00
48 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			26.00			26.00			26.00			27.00
Nihai pH	10.51	10.49	10.42	10.57	10.52	10.49	10.65	10.58	10.58	10.65	10.69	10.50
Nihai Serbest Siyanür (ppm)	40.00	30.00	35.00	80.00	65.00	70.00	190.00	150.00	140.00	365.00	300.00	280.00
Nihai Çözünmüş Oksijen (ppm)	23.00	28.00	26.00	24.00	30.00	26.00	27.00	31.00	26.00	28.00	30.00	27.00
Dolu Şişe (g)	2249.94	2357.40	2433.84	2253.40	2359.98	2418.52	2370.08	2248.16	2282.75	2398.18	2313.26	2363.04
Atık Katı (g)	445.20	445.79	443.28	445.81	446.66	446.57	445.04	447.05	446.48	446.66	446.89	446.93
Nihai Katıda Altın (ppm)	8.60	3.18	1.87	3.52	1.70	1.61	1.83	1.66	1.50	1.68	1.54	1.53
Nihai Katıda Gümüş (ppm)	6.82	3.79	2.97	3.75	2.59	2.30	2.64	2.29	2.11	2.28	2.05	2.02
Liç Verimi, Altın (%)	43.61	79.15	87.74	76.92	88.85	89.44	88.00	89.11	90.16	88.98	89.90	89.97
Liç Verimi, Gümüş (%)	39.86	66.58	73.81	66.93	77.16	79.72	76.72	79.81	81.39	79.89	81.92	82.19

	%50											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
Boş Şişe Ağırlığı (g)	1233.50	1241.29	1148.63	1234.01	1235.36	1338.54	1335.28	1338.66	1241.19	1347.37	1343.93	1341.45
İlk pH	8.26	8.30	8.27	8.30	8.27	8.24	8.32	8.26	8.23	8.30	8.32	8.23
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	0.60	0.58	0.54	0.55	0.57	0.52	0.56	0.57	0.51	0.57	0.53	0.50
pH	10.83	10.68	10.75	10.75	10.67	10.72	10.75	10.67	10.69	10.78	10.69	10.67
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.030	0.030	0.030	0.060	0.060	0.060	0.110	0.110	0.110	0.220	0.220	0.220
Çözünmüş Oksijen (ppm)	6.20	6.00	7.40	6.40	6.20	7.60	6.20	5.90	7.80	6.20	6.20	7.80
Dolu Şişe (g)	2261.74	2274.35	2164.49	2262.22	2267.86	2354.89	2364.40	2370.23	2263.18	2374.35	2373.00	2358.84
1 Saatlik pH	10.85	10.67		10.72	10.59		10.59	10.60		10.67	10.61	
1 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	25.00	30.00		75.00	75.00		155.00	165.00		340.00	320.00	
1 Çözünmüş Oksijen (ppm)	21.00	26.00		22.00	27.00		23.00	27.00		23.00	25.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	0.10	-		0.10	-		-	-		0.05	-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.015	0.015		0.020	0.020		0.030	0.025		0.030	0.040	
2 Saatlik pH	10.84	10.55	10.64	10.77	10.56	10.70	10.55	10.60	10.64	10.72	10.57	10.70
2 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	50.00	50.00	35.00	100.00	95.00	70.00	100.00	180.00	150.00	375.00	340.00	350.00
2 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	24.00	30.00	26.00	23.00	30.00	27.00	24.00	26.00	30.00	24.00	26.00	17.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-	-	0.01	-	-	0.06	-	-	0.04	-	-	0.08
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-	-	0.010	-	-	0.020	0.050	0.015	0.030	0.015	0.040	0.030
4 Saatlik pH	10.80			10.74			10.55			10.70		
4 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	45.00			80.00			250.00			360.00		
4 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	24.00			27.00			27.00			25.00		
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-			-			-			-		
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-			-			-			-		
8 Saatlik pH		10.63			10.65			10.65			10.60	
8 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		40.00			65.00			150.00			360.00	

	%50											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
8 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		29.00			28.00			26.00			25.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		0.09			0.07			0.06			0.05	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		0.010			0.020			0.025			0.025	
16 Saatlik pH			10.68			10.61			10.62			10.60
16 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			30.00			65.00			135.00			265.00
16 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			25.00			25.00			22.00			22.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.11			0.08			0.07			0.03
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.015			0.020			0.030			0.070
21 Saatlik pH			10.59			10.53			10.54			10.55
21 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			45.00			90.00			180.00			380.00
21 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			23.00			23.00			21.00			22.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			-			-			-			-
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			-			-			0.015			0.015
24 Saatlik pH		10.46			10.48			10.55			10.61	
24 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		30.00			65.00			140.00			300.00	
24 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		29.00			31.00			31.00			30.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		-			-			-			-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		-			-			-			-	
30 Saatlik pH			10.64			10.66			10.69			10.69
30 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			35.00			65.00			150.00			345.00
30 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			28.00			29.00			30.00			19.00

	%50											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.05			0.07			0.07			0.05
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.015			0.020			0.030			0.030
48 Saatlik pH			10.42			10.45			10.58			10.62
48 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			40.00			70.00			140.00			275.00
48 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			26.00			27.00			27.00			27.00
Nihai pH	10.80	10.46	10.42	10.74	10.48	10.45	10.55	10.55	10.58	10.70	10.61	10.62
Nihai Serbest Siyanür (ppm)	45.00	30.00	40.00	80.00	65.00	70.00	250.00	140.00	140.00	360.00	300.00	275.00
Nihai Çözünmüş Oksijen (ppm)	24.00	29.00	26.00	27.00	31.00	27.00	27.00	31.00	27.00	25.00	30.00	27.00
Dolu Şişe (g)	2276.51	2258.90	2198.96	2290.68	2258.67	2402.19	2362.00	2355.15	2316.16	2394.49	2359.99	2408.42
Atık Katı (g)	495.58	495.97	497.14	495.54	494.89	497.83	496.88	496.20	496.41	495.50	496.86	497.26
Nihai Katıda Altın (ppm)	9.18	3.92	1.88	4.44	1.69	1.53	1.69	1.57	1.42	1.75	1.59	1.46
Nihai Katıda Gümüş (ppm)	7.18	4.24	2.93	4.31	2.67	2.36	2.29	2.23	2.06	2.61	2.11	1.93
Liç Verimi, Altın (%)	39.80	74.30	87.67	70.89	88.92	89.97	88.92	89.70	90.69	88.52	89.57	90.43
Liç Verimi, Gümüş (%)	36.68	62.61	74.16	61.99	76.46	79.19	79.81	80.34	81.83	76.98	81.39	82.98

	%55											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
Boş Şişe Ağırlığı (g)	1338.96	1342.05	1237.66	1339.23	1152.65	1236.73	1316.17	1146.60	1243.60	1241.03	1148.73	1338.96
İlk pH	8.14	8.21	8.32	8.15	8.13	8.40	8.21	8.21	8.47	8.36	8.36	8.23
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	0.66	0.63	0.58	0.68	0.64	0.59	0.54	0.58	0.67	0.59	0.65	0.52
pH	10.64	10.59	10.70	10.64	10.67	10.76	10.65	10.71	10.78	10.73	10.72	10.68
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.030	0.030	0.030	0.050	0.050	0.050	0.100	0.100	0.100	0.220	0.220	0.220
Çözünmüş Oksijen (ppm)	6.20	6.70	5.30	5.80	5.70	5.30	6.60	6.70	5.20	6.10	6.00	7.50
Dolu Şişe (g)	2357.70	2357.55	2248.60	2348.25	2174.96	2250.07	2344.56	2175.99	2276.07	2274.76	2173.89	2360.31
1 Saatlik pH	10.78	10.70		10.79	10.77		10.59	10.66		10.59	10.72	
1 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	25.00	25.00		65.00	60.00		150.00	150.00		350.00	320.00	
1 Çözünmüş Oksijen (ppm)	29.00	29.00		30.00	28.00		30.00	29.00		24.00	24.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-	-		-	-		-	-		-	-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.020	0.020		0.025	0.025		0.030	0.030		0.030	0.040	
2 Saatlik pH	10.70	10.63	10.64	10.71	10.72	10.65	10.61	10.55	10.85	10.54	10.64	10.67
2 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	70.00	60.00	25.00	105.00	100.00	70.00	180.00	170.00	145.00	375.00	420.00	340.00
2 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	29.00	30.00	25.00	30.00	29.00	26.00	29.00	30.00	22.00	23.00	25.00	28.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-	-	0.020	-	-	0.025	0.010	0.015	0.040	0.015	-	0.030
4 Saatlik pH	10.55			10.55			10.43			10.54		
4 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	45.00			85.00			165.00			355.00		
4 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	31.00			32.00			30.00			23.00		
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-			-			-			-		
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-			-			-			-		
8 Saatlik pH		10.50			10.58			10.55			10.67	
8 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		40.00			28.00			180.00			330.00	
8 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		26.00			75.00			29.00			23.00	

	%55											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		-			-			-			0.05	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		0.010			0.020			0.020			0.040	
16 Saatlik pH			10.48			10.50			10.74			10.60
16 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			30.00			60.00			160.00			245.00
16 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			27.00			26.00			23.00			23.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			-			-			-			0.04
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.010			0.024			0.024			0.080
21 Saatlik pH			10.23			10.29			10.52			10.54
21 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			50.00			95.00			170.00			390.00
21 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			31.00			29.00			31.00			21.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.14			0.10			0.06			-
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			-			-			0.015			0.010
24 Saatlik pH		10.36			10.48			10.49			10.59	
24 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		30.00			90.00			170.00			315.00	
24 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		30.00			32.00			31.00			26.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		-			-			-			-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		-			-			-			-	
30 Saatlik pH			10.59			10.53			10.68			10.67
30 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			40.00			70.00			145.00			345.00
30 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			23.00			24.00			27.00			28.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			-			-			-			0.05
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.010			0.020			0.030			0.030

	%55											
	50 ppm			100 ppm			200 ppm			400 ppm		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
48 Saatlik pH			10.42			10.44			10.58			10.56
48 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			30.00			50.00			130.00			275.00
48 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			29.00			28.00			30.00			27.00
Nihai pH	10.55	10.36	10.42	10.55	10.48	10.44	10.43	10.49	10.58	10.54	10.59	10.56
Nihai Serbest Siyanür (ppm)	45.00	30.00	30.00	85.00	90.00	50.00	165.00	170.00	130.00	355.00	315.00	275.00
Nihai Çözünmüş Oksijen (ppm)	31.00	30.00	29.00	32.00	32.00	28.00	30.00	31.00	30.00	23.00	26.00	27.00
Dolu Şişe (g)	2349.06	2351.30	2239.75	2344.83	2189.13	2263.08	2334.19	2180.32	2290.00	2304.84	2154.83	2422.07
Atık Katı (g)	548.00	547.47	545.80	546.77	547.42	545.69	548.70	548.23	546.34	546.75	545.84	547.44
Nihai Katıda Altın (ppm)	6.87	2.61	2.25	3.13	1.73	1.59	1.91	1.62	1.59	1.63	1.47	1.51
Nihai Katıda Gümüş (ppm)	6.29	3.85	3.51	4.10	3.24	3.06	3.30	2.93	2.57	2.25	1.96	1.94
Liç Verimi, Altın (%)	54.95	82.89	85.25	79.48	88.66	89.57	87.48	89.38	89.57	89.31	90.36	90.10
Liç Verimi, Gümüş (%)	44.53	66.05	69.05	63.84	71.43	73.02	70.90	74.16	77.34	80.16	82.72	82.89

	Farklı tane boyları, Serbest Siyanür: 200 ppm, % katı: 45														
	0			45 saniye			120 saniye			180 saniye			600 saniye		
Numune Adı	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat	2 - 4 saat	8 - 24 saat	16 - 48 saat
Boş Şişe Ağırlığı (g)	1335.78	1235.45	1235.22	1314.81	1342.00	1242.00	1346.19	1342.00	1345.00	1147.40	1235.00	1235.00	1235.15	1234.00	1314.00
İlk pH	8.20	8.28	8.29	8.11	8.14	8.18	8.06	8.08	8.17	8.04	8.09	8.17	7.94	7.98	8.09
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	0.50	0.52	0.50	0.47	0.44	0.47	0.45	0.40	0.46	0.47	0.45	0.58	0.47	0.50	0.58
pH	10.79	10.71	10.75	10.65	10.65	10.57	10.61	10.58	10.63	10.64	10.53	10.84	10.56	10.57	10.62
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.110	0.110	0.110	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Çözünmüş Oksijen (ppm)	6.20	6.50	7.70	7.10	7.10	7.40	7.20	7.90	6.90	7.10	7.40	7.20	6.50	7.60	6.80
Dolu Şişe (g)	2364.60	2264.60	2252.24	2252.72	2343.00	2244.00	2366.34	2342.00	2348.00	2162.80	2235.00	2238.00	2252.61	2234.00	2317.00
1 Saatlik pH	10.76	10.69		10.87	10.80		10.79	10.65		10.66	10.79		10.58	10.67	
1 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	155.00	155.00		130.00	150.00		140.00	140.00		140.00	140.00		130.00	140.00	
1 Çözünmüş Oksijen (ppm)	24.00	27.00		25.00	30.00		29.00	29.00		32.00	31.00		30.00	32.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	0.05	-		-	-		-	-		-	-		-	-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.030	0.030		0.025	0.020		0.020	0.030		0.020	0.030		0.025	0.030	
2 Saatlik pH	10.70	10.63	10.68	10.75	10.58	10.84	10.69	10.42	10.83	10.63	10.47	11.00	10.51	10.39	10.87
2 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	185.00	190.00	140.00	140.00	170.00	140.00	160.00	180.00	140.00	160.00	180.00	140.00	130.00	170.00	140.00
2 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	24.00	28.00	26.00	24.00	30.00	30.00	29.00	29.00	33.00	31.00	27.00	28.00	30.00	28.00	32.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	0.015	0.010	0.030	0.030	0.015	0.030	0.020	0.010	0.030	0.020	0.010	0.030	0.035	0.015	0.030
4 Saatlik pH	10.65			10.77			10.73			10.76			10.58		
4 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)	190.00			160.00			160.00			29.00			160.00		
4 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)	27.00			27.00			31.00						28.00		
Eklenen Sönmüş Kireç (g)	-			-			-			-			-		
Eklenen Sodyum Siyanür (g)	-			-			-			-			-		
8 Saatlik pH		10.64			10.67			10.58			10.60			10.55	
8 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		155.00			170.00			170.00			160.00			145.00	
8 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		29.00			24.00			22.00			22.00			24.00	

	Farklı tane boyları, Serbest Siyanür: 200 ppm, % katı: 45														
	0			45 saniye			120 saniye			180 saniye			600 saniye		
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		0.07			0.10			0.10			0.10			0.12	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		0.025			0.020			0.020			0.020			0.030	
16 Saatlik pH			10.63			10.54			10.54			10.58			10.52
16 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			145.00			125.00			120.00			180.00			115.00
16 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			23.00			25.00			23.00			27.00			28.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.08			0.02			0.04			-			0.04
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.030			0.040			0.040			0.010			0.040
21 Saatlik pH			10.59			10.60			10.62			10.71			10.61
21 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			165.00			150.00			140.00			150.00			140.00
21 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			23.00			32.00			34.00			27.00			31.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			-			-			-			-			-
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.020			0.020			0.030			0.020			0.030
24 Saatlik pH		10.58			10.62			10.56			10.51			10.55	
24 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)		150.00			140.00			130.00			140.00			130.00	
24 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)		31.00			30.00			32.00			24.00			29.00	
Eklenen Sönmüş Kireç (g)		-			-			-			-			-	
Eklenen Sodyum Siyanür (g)		-			-			-			-			-	
30 Saatlik pH			10.69			10.59			10.56			10.48			10.70
30 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			175.00			160.00			160.00			160.00			160.00
30 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			29.00			28.00			28.00			24.00			26.00
Eklenen Sönmüş Kireç (g)			0.05			0.04			0.04			-			0.09
Eklenen Sodyum Siyanür (g)			0.020			0.020			0.020			0.020			0.020
48 Saatlik pH			10.58			10.58			10.57			10.54			10.70
48 Saatlik Serbest Siyanür (ppm)			140.00			120.00			120.00			100.00			110.00
48 Saatlik Çözünmüş Oksijen (ppm)			26.00			28.00			29.00			29.00			28.00
Nihai pH	10.65	10.58	10.58	10.77	10.62	10.58	10.73	10.56	10.57	10.76	10.51	10.54	10.58	10.55	10.70

	Farklı tane boyları, Serbest Siyanür: 200 ppm, % katı: 45														
	0			45 saniye			120 saniye			180 saniye			600 saniye		
Nihai Serbest Siyanür (ppm)	190.00	150.00	140.00	160.00	140.00	120.00	160.00	130.00	120.00	160.00	140.00	100.00	160.00	130.00	110.00
Nihai Çözünmüş Oksijen (ppm)	27.00	31.00	26.00	27.00	30.00	28.00	31.00	32.00	29.00	29.00	24.00	29.00	28.00	29.00	28.00
Dolu Şişe (g)	2370.08	2248.16	2282.75	2320.00	2303.04	2295.00	2331.00	2278.31	2268.00	2136.00	2197.94	2190.00	2216.00	2193.19	2179.00
Atık Katı (g)	445.04	447.05	446.48	447.03	446.15	443.40	444.28	446.80	443.77	443.48	444.74	442.99	443.29	444.76	442.56
Nihai Katıda Altın (ppm)	1.83	1.66	1.50	1.73	1.52	1.50	1.77	1.46	1.51	1.67	1.43	1.45	1.66	1.35	1.33
Nihai Katıda Gümüş (ppm)	2.64	2.29	2.11	2.52	2.09	1.91	2.63	2.06	1.97	2.60	2.11	1.99	2.58	2.02	1.91
Liç Verimi, altın (%)	88.00	89.11	90.16	88.66	90.03	90.16	88.39	90.43	90.10	89.05	90.62	90.49	89.11	91.15	91.28
Liç Verimi, gümüş (%)	76.72	79.81	81.39	77.78	81.57	83.16	76.81	81.83	82.63	77.07	81.39	82.45	77.25	82.19	83.16

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Serkan Sarıkaya

Doğum Yeri: Ankara

Medeni Hali: Bekâr

E-posta: serkansarikaya@live.com

Adresi: İliç/Erzincan

Eğitim

Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 2009

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, İleri düzey

İş Deneyimi

- Tesis Mühendisi, Koza Altın İşletmeleri, Ovacık Altın Madeni/İZMİR, Kaymaz Altın Madeni/ESKİŞEHİR, 2011-2014
- Proses Mühendisi, Kıdemli Proses Mühendisi, Proses Şefi, Operasyon Müdürü, Meta Nikel Kobalt Madencilik A.Ş. Gördes/MANİSA, 2014-2017
- Proses Devreye Alma Mühendisi, Wood Group PLC, Çöpler Sülfür Genişletme Projesi, İliç/ERZİNCAN, 2017-devam ediyor.

Deneyim Alanları

Cevher hazırlama tesislerinin devreye alım ve işletme konularında aşağıdaki alanlarda deneyim sahibiyim;

- Yüksek basınçta asit liçi (Nikel lateritleri)
- Basınç altında oksitleme (Altın sülfürleri)
- Kırma, eleme
- Yarı otojen, çubuklu, bilyalı değirmenler ve sınıflandırma devreleri
- Tikinerler ve ters akışlı yıkama devreleri
- Tank liçi ve adsorpsiyonu

Bunların dışında; yıkama devreleri, kimyasal çöktürme, filtreleme, kimyasal bozundurma, aktif karbon üzerinden sıyırma ve elektrokazanım konularında ve bu işlemlerle ilgili ekipmanlar kapsamında tecrübem bulunmaktadır.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Yoktur.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Yoktur.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Yoktur.





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 23/07/2018

Tez Başlığı: BİR ALTIN CEVHERİNDE BAŞLICA İŞLEM PARAMETRELERİNİN LİÇ VERİMİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 75 sayfalık kısmına ilişkin, 22/07/2018 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5'tir.

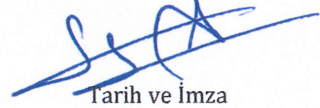
Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

23.07.18


Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Serkan SARIKAYA

Öğrenci No: N10228447

Anabilim Dalı: Maden Mühendisliği

Programı:

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.



Dr. E. Caner ORHAN