



Orijinal Araştırma / Original Research

## Gine Cumhuriyeti Siguiri bölgesi altın cevherinin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle zenginleştirilmesi

### *Enrichment of gold ore from the Siguiri basin of Republic of Guinea by physical and chemical methods*

Yusuf Enes Pural<sup>a,\*</sup>, Cem Tekin<sup>b,\*\*</sup>, Mustafa Özer<sup>a,\*\*\*</sup><sup>a</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye<sup>b</sup> Director of Kocari Resources Malta, Lija LJA 9016, Malta

Geliş - Received: 05 Temmuz - July 2022 • Kabul - Accepted: 07 Eylül - September 2022

Ö Z

Afrika sahip olduğu önemli maden kaynakları nedeniyle, tüm Dünya ülkelerinin ve yatırımcıların dikkatini çekmektedir. Kıta, özellikle yüksek altın tenörüne sahip büyük miktarda plaser altın yataklarına sahiptir. Bu çalışmada, Gine Cumhuriyeti sınırları içerisinde bulunan Siguiri havzasından alınan altın cevheri numunesinin zenginleştirilmesi gerçekleştirilerek alternatif proses akım şemaları oluşturulmuştur. Bu kapsamda, özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme yapan Mozley masası ve Knelson ayırıcısı ile kimyasal zenginleştirme yöntemlerinden biri olan siyanür liçi deneyleri yapılarak cevher bileşimindeki altının kazanım olanakları ortaya koyulmuştur. Mozley masası ile üç kademe zenginleştirme sonucunda 186,91 g/t Au içeriğine sahip bir ağır ürün (konsantre) %89,1 kazanma verimi ile elde edilirken Knelson ayırıcısı ile üç kademe sonunda 149 g/t Au içeren bir konsantre %86,1 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Gerçekleştirilen siyanür liçi deneyleri sonucunda ise 2 g/L NaCN derişiminde 48 saatlik liç ile %94,9 Au kazanma verimine ulaşılırken 1 g/L NaCN derişimi ve daha düşük liç süresi (24 saat) ile bu değer %91,9 olmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Plaser Cevher, Altın, Fiziksel Zenginleştirme, Siyanür Liçi, Santrifüj Ayırıcı

## ABSTRACT

Since the Africa is endowed with important mineral reserves, it attracts the attention of all countries and investors. In particular, the continent has large deposits of placer gold ore with high gold content. In this study, the enrichment of gold ores samples collected from Siguiri basin within the borders of the Republic of Guinea was carried out and alternative process flowsheets were created. In this context, the recovery possibilities of gold in the ore were revealed using Mozley table and Knelson separator, which separate minerals according to the specific gravity difference, and cyanide leaching experiments, which is one of the chemical enrichment methods. As a result of three-stage enrichment with the Mozley table, a heavy product (concentrate) with 186.91 g/t Au grade was obtained with 89.1% recovery, while with the three-stage Knelson separator application, a concentrate assaying 149 g/t Au was obtained with 86.1% gold recovery. Furthermore, in the cyanide leaching experiment with 2 g/L NaCN concentration, 94.9% Au dissolution efficiency was achieved for 48 hours of leaching, yet this value was 91.9% with 1 g/L NaCN concentration and lower leaching time (24 hours).

**Keywords:** Placer Ore, Gold, Physical Enrichment, Cyanide Leaching, Centrifugal Separator.

## Giriş

Batı Afrika kıyı ülkesi olan Gine Cumhuriyeti yaklaşık 13 milyon nüfusa sahip olup yüzölçümü 245857 km<sup>2</sup>'dir. Başkenti Konakri olan ülkede ekonomi büyük ölçüde tarım ve madencilik

faaliyetlerine dayanmaktadır. Sahip olduğu önemli altın rezervleri, birçok madencilik şirketinin dikkatini bu ülkeye çekmekte, altın rezervleri ağırlıklı olarak ülkenin kuzey doğusundaki Siguiri bölgesindeki Yukarı Nijer havzasında bulunmaktadır. Ülke yılda

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: pural@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-0676-3805>\*\* cem@kocariresources.com • <https://orcid.org/0000-0001-8461-4904>\*\*\* ozermust@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7301-9317>

ortalama 8-10 ton altın üretmekte ve potansiyel rezervlerinin 700 ton olduğu tahmin edilmektedir (Punam vd., 2017; Signé, 2021). Birkaç şirket, Gine'de altın üretmek için endüstriyel olarak faaliyet göstermektedir (Vella, 2013; Veiga ve Gunson, 2020). Bunlar; AngloGold Ashanti'nin yan kuruluşu olan Guinea Gold Corporation, Dinguiraye Mining Corporation ve Avocet Madencilik'in bir yan kuruluşu olan Wega Madencilik'tir.

En önemli altın kaynağı olan Siguri havzasında (Şekil 1) meydana gelen esasen iki tür altın yatağı mevcuttur. Bunlar, laterit veya kalsiyum fosfat mineralizasyonu ve yerinde kuvars damarıyla ilgili mineralizasyonlardır (Erwann vd., 2017). Gine'de altın madenciliği, geçmişten bugüne aile bireylerinin bir araya gelerek açtıkları yaklaşık 0,8-1 metre çapında ve 10-15 m derinliğindeki kuyulardan herhangi zorunlu bir havalandırma olmadan oldukça ilkel ve riskli koşullar altında yapılmaktadır (Veiga vd., 2006; Veiga ve Gunson, 2020). Kuyu derinlikleri bazı bölgelerde 30 metre derinliğe kadar inebilmektedir. Fakat, yeraltı su seviyesinin yüksek olması nedeniyle su seviyesinin altına el yordamı ile inememektedirler. Bu şekilde Gine'deki 200000 ila 300000 madenci tarafından üretilen altın miktarı senede 6 ton civarında olmaktadır ve bu üretim miktarı ülke için oldukça önemlidir (Amwele ve Groot, 2018). Ülkede uygulanan bu ilkel yöntemler sonucunda altın kazanma verimleri %5-%10 değerlerinin üzerine çıkamamaktadır. Riskli madencilik uygulamaları hem çalışanlar için önemli sağlık ve güvenlik sorunları doğururken, üretim sırasında oldukça önemli miktarda altın kayıpları oluşmaktadır. Gerek mevcut kaynakların daha verimli kullanılması gerekse de insan sağlığının korunması ve çevresel olumsuzlukların azaltılması amacıyla bu kaynakların sistematik bir şekilde değerlendirilmesi ve üretimde belli zenginleştirme süreçlerinin kullanılması oldukça önemli bir konudur (Hylander vd., 2007).



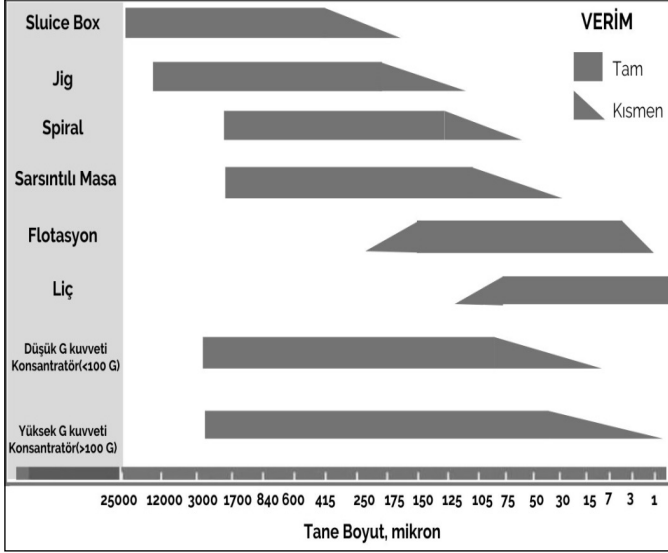
Şekil 1. Gine Cumhuriyeti, Siguri bölgesinin haritadaki yeri

Çizelge 1. Altın kazanımında uygulanan yöntemler (Andrew, 1984)

Yataklanma Tipi	Uygulanan Proses
Nabit Altın İçeren Serbest Halde Ufalanmış Damar Şeklindeki Cevher	Gravite ayırma + Amalgamasyon + Siyanür liçi
Nabit Altın İçeren Diğer Cevherler	Gravite ayırma + Amalgamasyon + Flotasyon + Siyanür liçi
Serbest Halde Ufalanmış Cevherler	Direkt siyanür liçi
Tellüridli Altın Cevherleri	Toplu flotasyon + Kimyasal oksidasyon + Siyanür liçi
Piritli Altın Cevherleri	Toplu flotasyon + Ergitme + Siyanür liçi
Bakırlı Kompleks Altın Cevherleri	Flotasyon + Siyanür liçi
Karbonatlı Altın Cevherleri	Kimyasal Oksidasyon + Siyanür liçi
Refrakter Altın Cevherleri	Kimyasal Oksidasyon veya mikronize öğütme + Siyanür liçi

Bilindiği üzere, yerkabuğunda farklı şekillerde ve oluşumlar halinde bulunan altının üretiminde kullanılacak zenginleştirme süreçlerinin ve teknolojinin seçimi; cevherin türüne, oluşum şartlarına, cevher bileşimindeki diğer minerallerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerine, cevher içindeki altının boyutu ve içeriğine bağlı olmaktadır (Şen, 2007; Alp vd., 2008; Bayoğlu, 2013). Çizelge 1'de farklı cevherleşme türleri için uygulanabilecek zenginleştirme yöntemleri verilmektedir.

120 yılı aşkın süredir siyanür liçi dünya altın üretiminin %84'ünde kullanılmakta olup geri kalan %10'u gravite zenginleştirme, %4'ü flotasyon ve %2'si amalgamlaştırma ve diğer yöntemlerle gerçekleştirilmektedir (Deschênes, 2005; Celep vd., 2006; Bayoğlu, 2013; Göknelma vd., 2016). Plaser yataklarda serbest halde bulunan ve nabit altın içeren cevherlerden altının kazanılmasında özgül ağırlık farklılığına göre zenginleştirme işlemleri kullanılmaktadır (Folinsbee ve Hewitt, 1997; Meza vd., 1994). Bu yöntem, dünyanın en eski yöntemlerinden biri olup nabit altının sahip olduğu 19,3 değerindeki yüksek özgül ağırlığına dayanılarak yapılan bir zenginleştirme işlemidir (Sarıkaya, 2018). İnsanoğlu yaklaşık 6000 yıldan fazla bir süredir plaser altın madenciliği yaparak değerli metali ilk olarak bu tür yataklardan elde etmiştir. Bugüne kadar plaser yataklar, toplam dünya altın arzının üçte ikisinden fazlasını karşılamıştır. Zanaatkar madenciler tarafından binlerce yıldan beri yapılan madencilik faaliyetinde kullanılan yöntem hep gravite esaslı olmuştur. Plaser altın yataklarında altın çoğunlukla granül, pul ve dal şeklinde (0,2-2 mm arası) serbest halde olabileceği gibi ana kayaç içerisinde bağlı olarak bulunabilmektedir. Özellikle serbest altın taneleri gravite ayırma yöntemleri ile direkt kazanılabileceği gibi bağlı taneler halinde bulunan altın ise gang adı verilen ana kayaçtan ayrılarak serbest hale getirilmek amacıyla bir öğütme işlemine tabii tutulmaktadır (Yüce vd., 2009). Bu tür cevherlerin bileşimindeki altın tanelerinin serbestleşme boyutuna bağlı olarak uygulanacak zenginleştirme yöntemi belirlenmektedir. Şekil 2'den görüldüğü üzere, zenginleştirme işlemlerinde daha iri boyutlarda jigler ve sluice kullanılırken daha küçük boyutlarda yarı merkezkaç kuvveti uygulanan spiral zenginleştiricilerin yanı sıra sarsıntılı masa, koni ve oluklar kullanılmaktadır. Bu boyutlarda elde edilen konsantrelerin temizlenerek daha yüksek Au içeriğine ulaşmak amacıyla Gemini masaları kullanılmaktadır. Ayrıca, daha küçük boyutlarda kullanılan Mozley masası ve gravite ile hidrodinamik kuvvetlerin yanı sıra merkezkaç kuvvetinden de yararlanan Multi Gravite ayırıcısı (MGS), Nelson ve Falcon ayırıcıları kullanılmaktadır (Celep, 2005; Yüce vd., 2009; Yaşar, 2017; Özcan, 2019; Veiga ve Gunson, 2020).



Şekil 2. Altının zenginleştirilmesinde kullanılan cihazlar (<https://seprosystems.com/wp-content/uploads/2019/05/Gravity-Concentration.jpeg>)

Özellikle plaser altın cevherlerine ön zenginleştirme amaçlı bu tür fiziksel zenginleştirme yöntemlerinin uygulanması ile yüksek altın içeriğine sahip ön konsantreler elde edilebilmektedir. Elde edilen miktarca daha az olan ve yüksek Au içeriğine sahip bu ürünler normal koşullarda liç işlemine tabii tutulmayıp bunun yerine Acacia reaktör gibi özel altın kazanım sistemlerinde hızlı

liç işlemine tabii tutulabilmektedir. Bu reaktörlerin kullanımı ile %98'in üzerinde toplam altın kazanımı değerlerine ulaşılabilmektedir (Celep vd., 2006).

Bu çalışma kapsamında kullanılan altın cevherinin temin edildiği, oldukça zengin maden kaynaklarına sahip Sigüiri havzasının jeolojisi hakkında birçok çalışma (Steyn, 2012; Rutherford, 2021) olmasına rağmen bu cevherin zenginleştirilmesine yönelik yeterli teknik veri bulunmamaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile Sigüiri havzasına ait altın cevherinin gravite ve siyanür liçi ile zenginleştirme olanakları araştırılmış ve alternatif proses akım şemaları oluşturulmuştur. Bu sayede hem bölge cevherlerinin hem de benzer plaser cevherlerin farklı yöntemlerle değerlendirilebilirliği ortaya koyulmuştur.

## 1. Malzeme ve yöntem

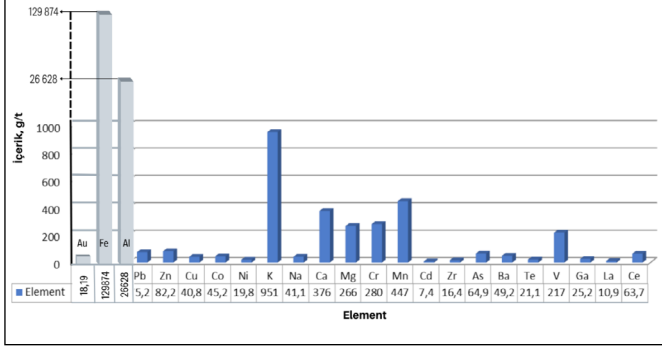
### 1.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numune

Deneysel çalışmalarda, Gine Cumhuriyeti'nin batısında bulunan dünyaca ünlü Sigüiri havzası cevher numuneleri kullanılmıştır. Numuneler, Sigüiri'ye bağlı Kouroussa şehrinin kuzey kısmında bulunan ve zengin altın yatakları ile tanınan bölgedeki altın cevheri alanından alınmıştır (Şekil 3). Geniş bir sahada yapılan çalışmalar kapsamında, 2-3 m derinliğinde ve belli aralıklarda açılan kuyulardan alınan numuneler toplanmış ve bu numuneler bir alanda stoklanmıştır. Büyük miktarda ve iri boyuttaki bu numunelerden temsili bir numune alma mümkün olmadığından, alınan cevherler mobil bir çeneli kırıcı ile boyutu küçültülerek numune azaltma işlemlerine tabii tutulmuştur. Cevher hazırlama numune azaltma kuralları dikkate alınarak azaltılan 100 kg'lık bir numune Türkiye'ye getirilmiştir.



Şekil 3. Çalışmalarda kullanılacak numunelerin alınması amacıyla yapılan saha çalışması

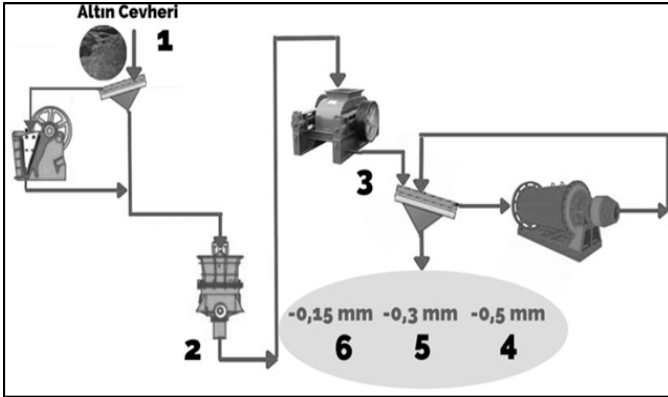
Gine Cumhuriyeti'nden alınan altın cevheri numunesi, ana kayaç türleri üzerinde tropikal ayrışma koşulları altında gelişen ancak bilinen ana kayaç altın yataklarının uzağında olan laterit ve saprolitler içerisinde homojen olmayan bir şekilde yayılmıştır. Yapılan mikroskobik çalışmalar ve kimyasal analizler sonucunda cevherin bileşiminde bulunan altın, demir oksitler ve kuvars ile kil mineralleri birlikte bulunmuştur (Veiga vd., 2006; Steyn, 2012; Siguiri Gold Mine, 2020). Şekil 4'te verilen kimyasal analiz sonuçlarına göre yüksek Fe içeriği (%12,99) demir oksitlerden, Al içeriği (%2,66) ise cevher bileşimindeki kil minerallerinden (Rutherford, 2021) kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Altın cevherinin kimyasal analiz sonucu

## 1.2. Yöntem

Bilindiği gibi altın üretim süreci; maden üretimi, cevher hazırlama ve zenginleştirme ile hidrometalurji gibi işlem adımlarından oluşmaktadır. Üretimi yapılan cevherin, öncelikle uygun bir tane boyutuna getirilmesi gerekmektedir. Bu işlemin amacı cevherin bileşimindeki altının serbest hale getirilmesi veya yüzey alanının artırılmasıdır. Bu amaçla, numune hazırlama süreci sonrasında boyut küçültme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, Şekil 5'te verilen akım şemasına göre yapılmıştır. Akım şemasında belirtilen her noktadan (1, 2, 3, 4, 5 ve 6) alınan ürünlerin elektrik analizleri yapılmış ve her bir boyut küçültme işleminden sonraki boyut dağılımları belirlenmiştir.



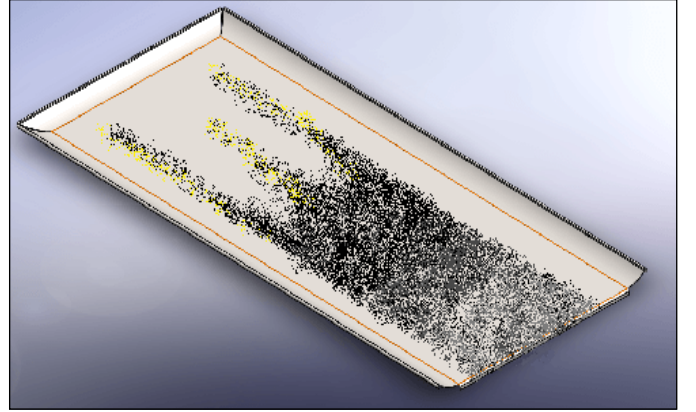
Şekil 5. Boyut küçültme işlemlerinin akım şeması

Burada, elek analizi yapılacak noktalarda 1) tüvenan cevheri, 2) konik kırıcı ürününü, 3) merdaneli kırıcı ürününü, 4) -0,5 mm boyutuna öğütülmüş cevheri, 5) -0,3 mm boyutuna öğütülmüş cevheri ve 6) -0,150 mm boyutuna öğütülmüş cevheri ifade etmektedir.

Cevherin karakterizasyon çalışmaları ve boyut küçültme çalışmaları yapıldıktan sonra gravite etkisi ile zenginleştirme yapan Mozley masası ve Knelson ayırıcısı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. En son aşamada ise cevherin siyanür liçi

deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm gravite ile zenginleştirme deneylerinde üç farklı boyutta hazırlanan numuneler (-0,5 mm; -0,3 mm ve -0,150 mm) kullanılmıştır. Çalışmalarda ilk olarak Mozley masası ile zenginleştirme işlemi yapılmıştır.

Bu deneylerde, düz yüzeyli Mozley masası kullanılmış (Şekil 6) ve ikinci aşamada ise santrifüj kuvveti ile çalışan Knelson ayırıcısıyla zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7).

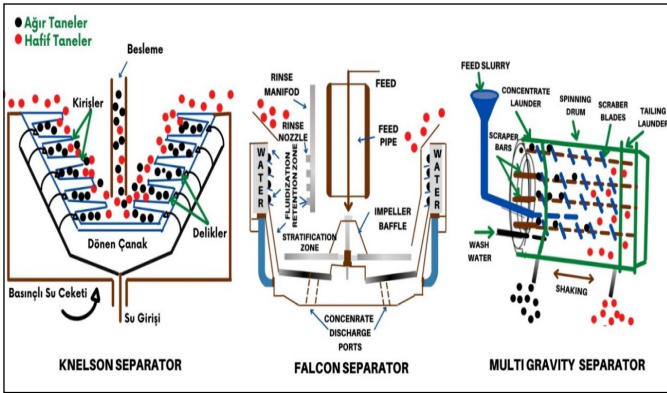


Şekil 6. Deneysel çalışmalarda kullanılan Mozley masası

Fiziksel zenginleştirme işlemleri sonrasında, tüvenan cevherin siyanür liçi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, 100 mikronun altında öğütülmüş orijinal numune ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle şişe döndürme (bottle roll) testi yapılmıştır. Bilindiği üzere bu test altının siyanür liçi ile kazanımında, altın çözünme verimi, asit tüketimi ve reaktif maliyetleri gibi hususlarda fikir vermektedir. Ayrıca, bu sonuçlar, pilot tesis ve ticari ölçekli liç devresinden elde edilecek sonuçların doğru bir göstergesi olabilmektedir. Şişe döndürme testi, ince öğütülmüş cevherin, plastik bir şişe içerisinde %30-50 pülp katı oranında ayarlanarak uygun bir çözücü ile çözündürülmesinden ibarettir. Altın için yapılan uygulamalarda genellikle pH 10,5 civarında tutulur. 1 g/L NaCN kullanılır ve işlem 24 saat devam ettirilir. Belirli zaman aralıklarında şişe durdurularak numune alınır. Alınan numunelerin altın içeriği analiz edilerek çözünme kinetiği tespit edilir (Dunne vd., 2019).

Gerçekleştirilen şişe döndürme testi sonrasında, cevher numunesi üzerinde laboratuvar ölçekli altın çözündürme (liç) deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, yine tamamı 100 mikronun altına indirilmiş numune ile 400 mL'lik beherlerde ve 400 d/dk karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. 100 g altın cevheri ve 233 mL su ilave edilerek istenen miktarlardaki liç reaktifleri (0,25; 0,5; 0,75; 1 ve 2 g/L NaCN) behere aktarılmıştır. Çözeltinin pH değeri kontrol edilmiş ve kireç ilavesi ile 10,5-11 arasına ayarlanmıştır. 24

saat liç süresi sonunda çözelti katı-sıvı ayırımı için filtre edilmiş, katı ve yüklü çözelti halinde iki ürün elde edilmiştir. Liç deneylerinden elde edilen yüklü çözeltideki Au analizleri indüktif olarak eşleştirilmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS, Perkin Elmer ELAN DRC-e 6000) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, fiziksel zenginleştirme işlemleri sonunda elde edilen katı ürünlerdeki altın içerikleri de altının çözeltiye alınması işleminden sonra yine aynı ICP-MS cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

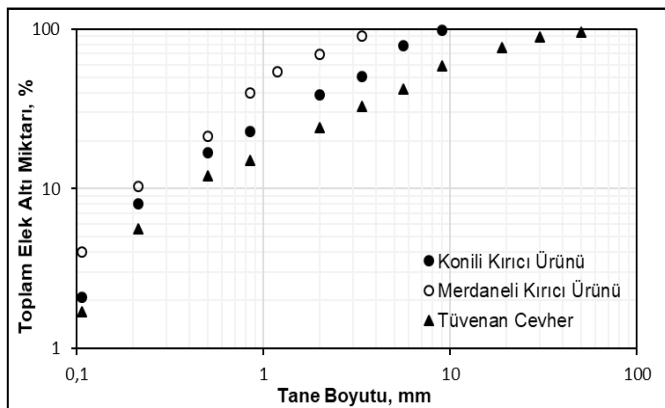


Şekil 7. Deneysel çalışmalarda kullanılan Knelson ayırıcısı

## 2. Deneysel çalışmaların sonuçları

### 2.1. Boyut küçültme deneylerinin sonuçları

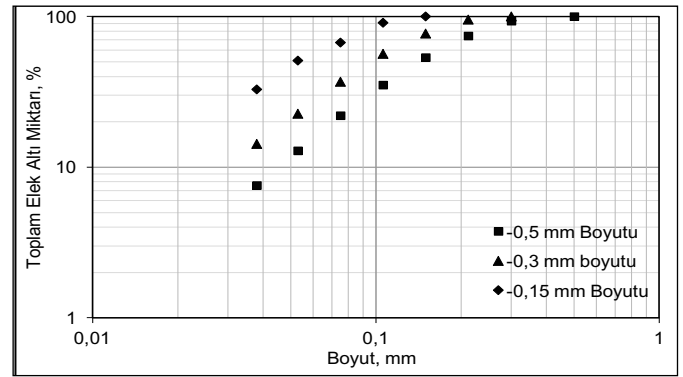
Kırma işlemleri sonrasında elde edilen ürünlerin boyut dağılımlarının belirlenmesi amacıyla kuru elek analizleri yapılırken, yaş öğütme sonrası elde edilen numunelerin elek analizleri yaş olarak yapılmıştır. Kuru olarak gerçekleştirilen boyut küçültme işlemlerinde sonra yapılan elek analizi sonuçları Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8. Kırma işlemleri sonrası ürünlerin elek analizi sonuçları

Yapılan elek analizleri sonuçlarından, tüvenan cevherin (No:1) maksimum tane boyutunun 60 mm olduğu görülmektedir. Bu malzemenin %85'i 30 mm'nin altında olduğundan, kalan %15'lik +30 mm boyutlu kısmı çeneli kırıcıdan geçirilmiştir. Buradan elde edilen ürün ile orijinal cevherin -30 mm boyutu konik kırıcıya beslenen malzemeyi oluşturmuştur. Konik kırıcıda yapılan kırma işlemi sonrası elde edilen ürünün (No:2) maksimum tane boyutu 9 mm iken,  $d_{80}$  boyutu 6 mm olarak elde edilmiştir. Konik kırıcıdan elde edilen bu ürün son kademe kırma olarak merdaneli kırıcıya beslenmiş ve kırma işlemi sonrası 3,8 mm maksimum tane boyutuna sahip bir ürün ( $d_{80}$ :2,8 mm) elde edilmiştir.

Kuru olarak yapılan bu işlemler sonrasında elde edilen merdaneli kırıcı ürününü 3 farklı boyuta (-0,5 mm; 0,3 mm ve 0,150 mm) indirmek için bilyalı değirmen ile yaş öğütme yapılmıştır. Bilyalı değirmende pülpte katı oranı %60, bilya şarjı ise %45 olarak ayarlanmıştır. Malzemeyi 0,5 mm boyutu altına indirmek için 10+10 dakika, 0,3 mm boyutu altına indirmek için 15+20 dakika ve son olarak 0,150 mm altına indirmek için ise 20+25 dakika öğütme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ürünlere yapılan elek analizi sonuçları Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'da, tamamı 0,5; 0,3 ve 0,150 mm boyutlarının altına öğütülen cevherin öğütme sonrası  $d_{80}$  boyutlarına bakıldığında; sırasıyla 0,28 mm; 0,19 mm ve 0,09 mm olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Öğütme işlemleri sonrası ürünlerin elek analizi sonuçları

### 2.2. Gravite ile zenginleştirme deney sonuçları

Bu tür cevher yataklarında altının özgül ağırlığının yüksek olması nedeniyle, yerçekimi etkisi ile zenginleştirme işlemleri kullanılarak daha düşük özgül ağırlığına sahip diğer minerallerden ayırmak mümkündür. Mozley masası ve Knelson ayırıcısı bu çalışmada kullanılan gravite ayırıcılarıdır.

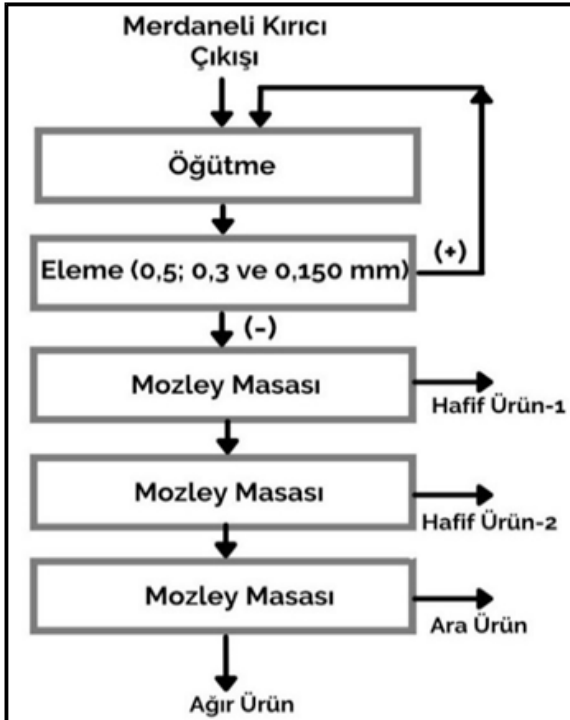
#### 2.2.1. Mozley masası ile yapılan zenginleştirme deneylerinin sonuçları

Üç farklı boyuta hazırlanan numuneler (-0,5 mm; -0,3 mm ve -0,150 mm) ile yapılan Mozley masası zenginleştirme deneylerinde (Şekil 10), masanın eğimi 2°, yıkama suyu ise sırasıyla 2, 4 ve 6 L/dk olarak alınmıştır. Gerçekleştirilen zenginleştirme deneyleri sonrasında elde edilen ürünlerin altın analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'den görüldüğü üzere; üç farklı boyutta gerçekleştirilen zenginleştirme deneyleri sonucunda altın serbestleşme boyutunun 0,150 mm'nin altında olduğu görülmektedir. Bu boyutta yapılan gravite ayırımı ile toplam cevherin %76,3'ü, 0,49 g/t Au tenörü ve %1,9 altın kaybı ile hafif ürün olarak elde edilmektedir. Bunun yanı sıra,  $d_{100}$  boyutları daha iri olan (-0,5 mm ve -0,3 mm) boyutlarda elde edilen hafif ürünlerin yüksek Au içerikleri (-0,3 mm için 3,1 g/t; -0,5 mm için 7,6 g/t) altının bu boyutlarda bağlı taneler halinde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Tamamı -0,150 mm boyutu altına öğütülmüş cevherin zenginleştirilmesi sonucu 186,91 g/t Au içeriğine sahip bir ağır ürün %89,1 altın kazanma verimi ile elde edilebilmektedir.

**Çizelge 2.** Mozley masası ile üç farklı boyutta yapılan zenginleştirme deney sonuçları

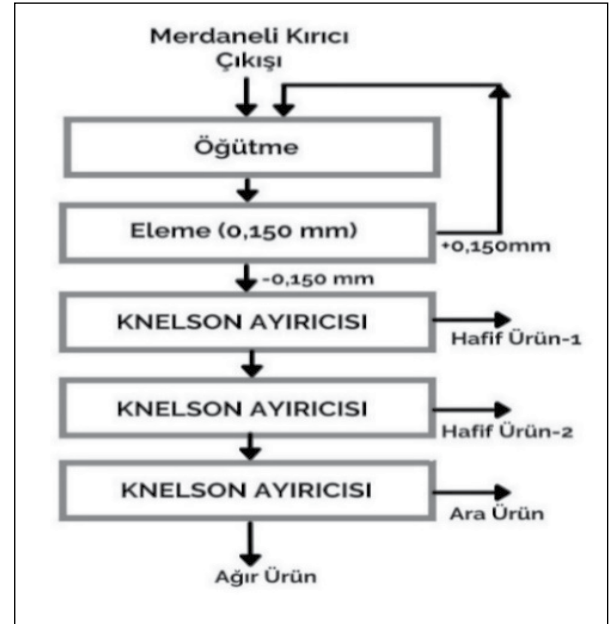
Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Au İçeriği, g/t	Au Kazanma Verimi, %
-0,500 mm	Ağır Ürün	14,70	63,1	46,2
	Ara Ürün	23,40	20,9	24,4
	Hafif Ürün-2	22,70	12,9	14,6
	Hafif Ürün-1	39,20	7,6	14,8
	BESLEME	100,00	20,07	100,0
-0,300 mm	Ağır Ürün	11,4	112,4	64,9
	Ara Ürün	16,5	16,9	14,1
	Hafif Ürün-2	28,1	9,9	14,1
	Hafif Ürün-1	44	3,1	6,9
	BESLEME	100	19,74	100,0
-0,150 mm	Ağır Ürün	9,5	186,91	89,1
	Ara Ürün	14,1	12,80	9,0
	Hafif Ürün-2	25,9	0,78	1,0
	Hafif Ürün-1	50,4	0,34	0,9
	BESLEME	100,0	19,95	100,0



**Şekil 10.** Mozley masası ile farklı boyutlarda yapılan zenginleştirme deney akım şeması

### 2.2.2. Knelson ayırıcısı ile yapılan zenginleştirme deneylerinin sonuçları

Knelson ayırıcısı ile gerçekleştirilen zenginleştirme deneyleri, tane serbestleşmesi nedeni ile daha iyi sonuçların alındığı -0,150 mm boyutunda yapılmıştır. Şekil 11'de verilen akım şemasına göre üç kademede gerçekleştirilen deneylerde, 1. ayırma kademesinde 1 L/d olan yıkama suyu, ikinci kademede 2 L/d ve son kademede ise 3 L/d olarak alınmıştır. Cihazın sabit G kuvveti değeri olan 60'da çalışılmıştır. Zenginleştirme deneyleri sonunda elde edilen ürünlere altın analizleri yapılarak sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.



**Şekil 11.** Knelson ayırıcısı ile yapılan zenginleştirme deney akım şeması

**Çizelge 3.** Knelson ayırıcısı ile yapılan zenginleştirme deney sonuçları

Ürünler	Miktar, %	Au İçeriği, g/t	Au Kazanma Verimi, %
Ağır Ürün	11,3	149,00	86,1
Araürün	7,0	24,65	8,8
Hafif Ürün-2	37,1	2,20	4,2
Hafif Ürün-1	44,7	0,42	1,0
BESLEME	100,0	19,57	100,0

0,150 mm boyutu altındaki cevherin Knelson ayırıcısı ile yapılan zenginleştirme deney sonuçları incelendiğinde; cevherin %44,7 miktarı hafif bir ürün olarak 0,42 g/t Au tenörü ile elde

edilebilmektedir. Ayrıca, bu işlemde 149 g/t içeriğinde bir konsantre %86,1 verimle elde edilmiştir.

Elde edilen hafif ürünler birleştirildiğinde, %81,8 miktarda bir hafif ürün, 1,22 g/t Au içeriğine ve %5,22 Au kaybına sahip olmaktadır.

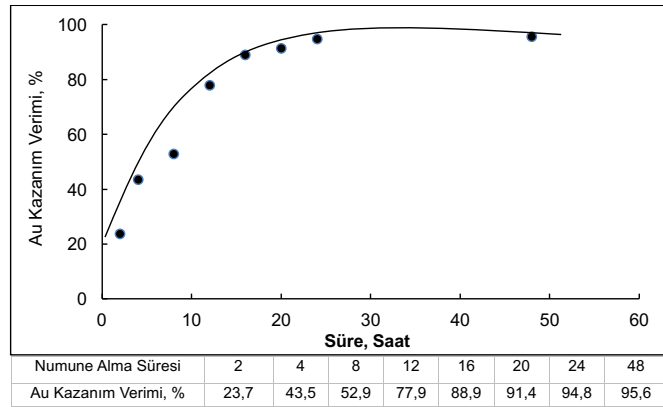
### 2.3. Kimyasal zenginleştirme (siyanür liçi)

Siyanür liçi, cevherlerden altın elde etmek için en yaygın kullanılan kimyasal yöntemlerden biridir. Altın kazanımı için siyanür liçinin kullanımı cevherin mineralojik yapısına (sülfürlü veya oksitli olmasına) ve cevherin diğer özelliklerine bağlıdır. Altın sülfürik, hidroklorik veya nitrik asitlerde çözünmez, ancak nitrik ve hidroklorik asitlerin bir karışımı (aqua regia) içinde ve seyreltik siyanür çözeltilerinde çözülebilir. Bu nedenle, siyanür hidrometalurjik proseste altın kazanımı amacıyla çözücü olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamındaki siyanür liçi çalışmaları, 100 mikronun altına öğütülmüş orijinal numune ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle Çizelge 4'te verilen koşullarda şişe döndürme testi yapılmıştır.

#### Çizelge 4. Şişe döndürme testi koşulları

Tane boyutu	-106 mikron
Pülpte katı oranı	%30
pH	Kireç ilavesi ile 10,5-11 değerleri arasında tutulmuştur.
Şişeden numune alma süreleri	2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 48 saat

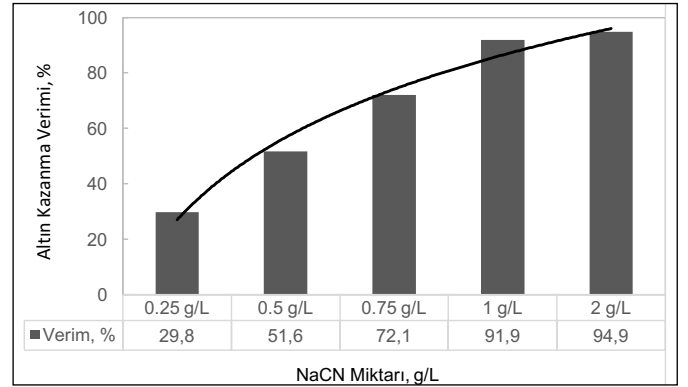


Şekil 12. Şişe döndürme test sonuçları

Gine Cumhuriyeti altın cevherinin şişe döndürme testi sonuçlarına göre (Şekil 12); cevherin siyanürlenmesi ile altının %95,6'sının çözeltilmeye alınabileceği ortaya koyulmuştur. Süre 24 saat olduğunda altın kazanma verimi %94,8 olmaktadır.

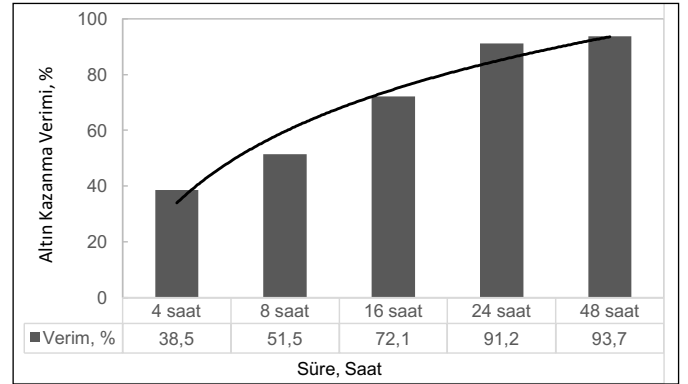
Altın cevherinin siyanür liçinde çözünme kinetiğinin ve mümkün olan en yüksek Au çözünme veriminin belirlendiği şişe döndürme testinin ardından laboratuvar ölçekli altın çözündürme (liç) deneyleri yapılmıştır. Liç deneyleri 400 mL'lik beherlerde ve 400 d/dk karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Behere 100 g altın cevheri ve 233 mL su ilave edilerek, istenen miktarlarda liç reaktifleri (0,25; 0,5; 0,75; 1 ve 2 g/L NaCN) behere aktarılmıştır. Çözeltinin pH değeri kontrol edilmiş ve kireç ilavesi ile 10,5-11 arasına ayarlanmıştır. 24 saat liç süresi sonunda çözelti katı-sıvı ayırımı için filtre edilmiş, katı ve yüklü çözeltili halinde iki ürün elde edilmiştir. Yüklü çözeltiliden Au analizi ICP-MS yöntemi ile yapılmış olup katı ürün üç kez yıkanmış ve kurutularak altın analizi için hazırlanmıştır. 24 saat boyunca gerçekleştirilen ilk liç

deneylerinde farklı NaCN derişimlerinde altın kazanma verimlerinin değişimi incelenmiş ve ulaşılan deney sonuçları Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Siyanür derişiminin altın kazanımına etkisi

Şekil 13'ten de görüldüğü gibi; 1 g/L'den düşük NaCN miktarlarında Au kazanma verimi yeterli seviyelerde olmayıp, 1 g/L NaCN ve 2 g/L NaCN miktarlarında bu değer sırasıyla %91,90 ve %94,90 olmaktadır. NaCN miktarı iki katına çıkarılmasına rağmen sadece %3'lük verim artışı nedeniyle 1 g/L NaCN derişimi dikkate alınarak farklı liç sürelerinde (4, 8, 16, 24, 48 saat) siyanür liçi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneylerin sonuçları ise Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Liç süresinin altın kazanımındaki etkisi (1 g/L NaCN)

Farklı sürelerde gerçekleştirilen liç deneyleri sonuçlarından görüldüğü üzere; 24 saatlik liç işlemi sonucunda %90 çözünme verimlerinin üzerinde Au kazanma verimlerinin elde edilebildiği ve %2,5 verim artışı için toplam 48 saat liç süresine ihtiyaç duyulacağı belirlenmiştir. Bu yüzden 24 saatlik liç süresinin optimum çözündürme süresi olarak alınması uygun olacaktır.

### Sonuçlar ve öneriler

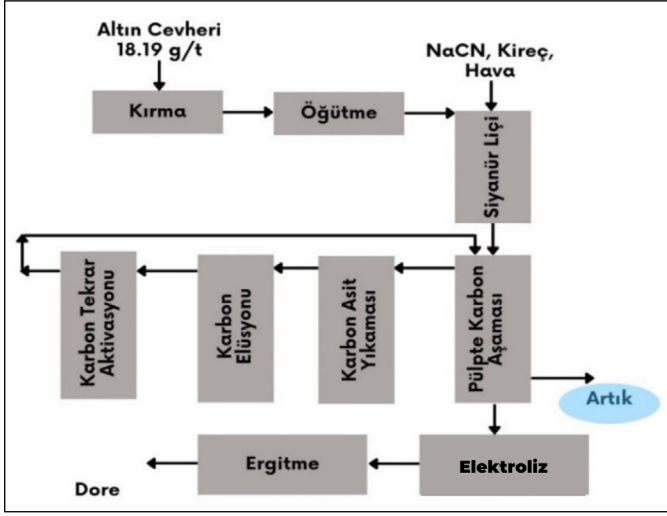
Demir oksitler, silikatlar ve kil mineralleri içeren Gine Cumhuriyeti altın cevheri 18,19 g/t Au içeriğine sahiptir. Farklı besleme boyutlarında yapılan gravite zenginleştirme deneyleri sonrasında 0,150 mm'nin altında yeterli tane serbestleşmesi olduğu belirlenmiştir. Mozley masası ile 0,150 mm boyutu altında yapılan zenginleştirme deneyi sonucunda toplam cevherin ~%76'sı Au içeriği 0,49 g/t ile hafif ürün (artık) olarak elde edilebilmektedir. Öte yandan 3. kademe sonunda 186,91 g/t Au içeriğine sahip bir ağır ürün (konsantre) %89,1 kazanma verimi ile elde edilebilmektedir.

Knelson ayırıcısı kullanılarak yapılan deneylerde benzer sonuçlar elde edilmesine rağmen, ürünün Mozley masası üze-

rinde daha kolay kontrol edilmesi nedeniyle Mozley masası daha iyi performans vermiştir. Buradaki zenginleştirme işlemi sonunda 0,42 g/t Au içeriğine sahip bir hafif ürün ile 149 g/t Au içeren bir konsantre %86,1 kazanma verimi ile elde edilebilmektedir.

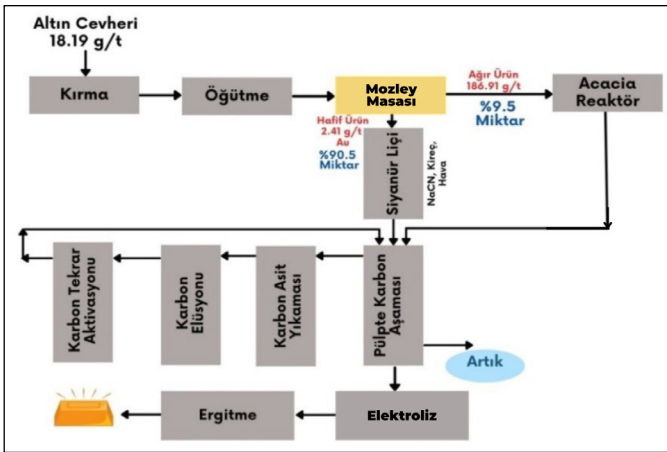
Bu çalışmalar sonucunda, cevherin doğası gereği siyanür liçi proseslerinde çok yüksek oranda altın kazanma verimleri elde edilmiştir. 2 g/L NaCN derişiminde, 48 saatlik liç ile %93,70 Au kazanma verimine ulaşılabilirken, daha düşük 1 g/L NaCN derişimi ve daha düşük liç süresi (24 saat) ile dahi altın kazanım verimi %91,2 olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ışığında, bu tür bir cevherin aşağıda açıklanan 3 alternatif proses ile değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır.

**Alternatif-1:** Siyanür liçi ile 18,19 g/t Au içeren cevherin doğrudan zenginleştirilmesi yapılabilir (Şekil 15).



Şekil 15. Alternatif-1 altın üretim proses akım şeması

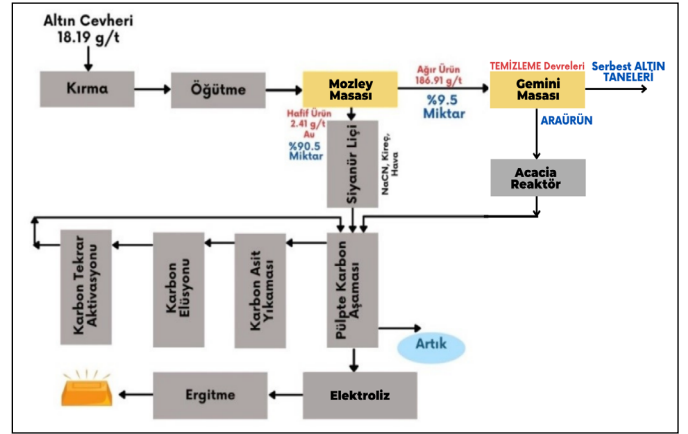
**Alternatif-2:** Ön zenginleştirme işleminde gravite ayırıcısı olarak kullanılan Mozley masasından elde edilen Au içeriği yüksek konsantre doğrudan Acacia reaktörüne gönderilirken, toplam beslenen cevherin %90,5'i olan 2,41 g/t ürün için siyanürleme işlemi yapılabilir (Şekil 16).



Şekil 16. Alternatif-2 altın üretim proses akım şeması

**Alternatif-3:** Ön zenginleştirme işleminde gravite ayırıcısı olarak kullanılan Mozley masasından elde edilen Au içeriği yüksek olan konsantreden, ayrıca Gemini masası kullanılarak birkaç kademe temizleme işlemi ile serbest altın kazanılabilir. Temizleme devresinde elde edilen ara ürün ise yüksek Au içeriği ile

doğrudan Acacia reaktörüne gönderilirken, 1. gravite ayırıcısından elde edilen artık siyanürleme işlemine tabi tutulabilecektir (Şekil 17).



Şekil 17. Alternatif-3 altın üretim proses akım şeması

## Kaynaklar

- Amwele, M.N., Groot D.R. 2018. Test work to examine the potential for improving gold leaching performance at Navachab Gold Mine, Namibia. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, V:118.
- Andrew, L. S. 1984. Gold Ore Processing Today Part 1 and Part 2, International Mining Magazine.
- Bayoğlu, Y. 2013. Eskişehir-Kaymaz epitermal altın cevherleri üzerinde çevreye duyarlı nitelikli ön zenginleştirme yöntemlerinin araştırılması. [Master Tezi]. [İstanbul]: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Celep O., Alp İ., Devci H., Vıçıl M., Yılmaz T., 2006. Knelson santrifüj gravite ayırıcısıyla Mastra cevherinin altın kazanımı. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 19(2), 175-182.
- Celep O., Alp İ., Devci H., Vıçıl M. 2008. Recovery of gold from a free milling ore by centrifugal gravity separator. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 32(B1), 67-71.
- Celep, O. 2005. Recovery of gold from Mastra and Kaletaş gold ores. [MSc Thesis]. [Trabzon]: Karadeniz Technical University.
- Deschênes, G. 2005. Advances in the cyanidation of gold, in advances in gold ore processing. Adams, M.D. (Ed.). Elsevier, 479-500.
- Dunne, R. Kawatra, S., Young C. 2019. SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Erwann, L., Nicolas, T., John, M., Malcolm, R., Noreen, E. 2017. Mineralisation footprints and regional timing of the world-class Sigüiri orogenic gold district (Guinea, West Africa). Mineralium Deposita. doi:10.1007/s00126-016-0684-6.
- Folinsbee, J.A., Hewitt, B. 1997. Gravity concentration at Placer Dome's Campbell mill. Mining Engineering, October, 44-47.
- Göknelma, M., Birich, A., Stopic, S., Friedrich, B. 2016. A review on alternative gold recovery reagents to cyanide. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 4, 8-17.
- <https://seprosystems.com/wp-content/uploads/2019/05/Gravity-Concentration.jpeg>.
- Hylander, L. D., Plath, D., Miranda, C. R., Lücke, S., Öhlander, J., Rivera, A.T. F. 2007. Comparison of different gold recovery methods with regard to pollution control and efficiency. Clean. 35(1), 52-61.
- Meza, S., Hartmann, W., Escobar, C.A. 1994. Recovery of placer gold using the Knelson Concentrator. Proceedings-Innovations in Mineral Processing, Sudbury, Canada, 339-347.



- Özcan, Ö. 2019. Investigation of gold recovery possibilities of a polymetallic ore by using Falcon centrifugal concentrator. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. 21(61), 1-14.
- Punam, C. P., Dabalén, A. L., Land, B. C. 2017. Mining in Africa: Are Local Communities Better Off. *Africa Development Forum series*. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0819-7.
- Rutherford, N. 2021. Independent geologist's report for the Guinea gold project, Sigüiri basin, Guinea, West Africa, presented to: Polymetals Resources Limited, submitted by Rutherford Mineral Resource Consultants, 21 April 2021.
- Sarıkaya, S. 2018. Bir altın cevherinde başlıca işlem parametrelerinin liç verimine etkilerinin incelenmesi. [Master Tezi]. [Ankara]: Hacettepe Üniversitesi.
- Signé, L. 2021. Africa's Mining Potential: Trends, Opportunities, Challenges and Strategies. *Policy Center for the New South*, 21/10.
- Sigüiri Gold Mine, Republic of Guinea, West Africa, 2020. [https://www.mining-technology.com/projects/gold\\_sigüiri](https://www.mining-technology.com/projects/gold_sigüiri) [Erişim tarihi: 1 Nisan 2022].
- Steyn, J. G. 2012. Structural geology and controls of gold mineralization in the Sigüiri mine, Guinea, West Africa. [MSc Thesis]. [South Africa]: University of Stellenbosch.
- Şen, S. 2007. Evaluation of coal-oil assisted gold flotation as a novel processing method for gold recovery. [Doktora Tezi]. [İzmir]. Dokuz Eylül Üniversitesi
- Veiga, M. M., Gunson, A. J. 2020. Gravity concentration in artisanal gold mining-review. *Minerals*, 10, 1026; doi:10.3390/min10111026.
- Veiga, M. M., Siegel, S., Schein, P., Camara, C. S., Dejean, J., Kamara, D. 2006. Technical Mission to the Artisanal Gold Mines in Upper Guinea, Global Mercury Project and Blacksmith Institute, May.
- Vella, H. 2013. Mining in Africa now is the time for change. <https://www.mining-technology.com/features/featuremining-in-africa-time-for-change/>.
- Yaşar, A. 2017. Gold recovery studies from Akarşen ore using gravity concentration methods. [Yüksek Lisans Tezi]. [Ankara]. Hacettepe Üniversitesi.
- Yüce, A. E., Kangal, M.O., Kökkılıç, O., Güney, A., Gürkan, V. 2009. Recovery of gold bearing ores by gravity and flotation techniques. XII Balkan Mineral Processing Congress, Bucharest, Romania, 14-17 June 2009, 438-444.

