



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan cürüflardan gravite ayırması ile altın kazanımı

## *Recovery of gold from slags generated in the jewelry waste recycling process by gravity separation*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Eyüp SABAH<sup>1</sup>, Filiz ORUÇ ŞAPÇI<sup>2</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0002-5225-0891

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0003-1650-402X

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Sabah E. ve Oruç Şapçı F., “Ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan cürüflardan gravite ayırması ile altın kazanımı”, *Politeknik Dergisi*, 24(4):1453-1460,(2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.742859

# Ramat Geri Kazanım Prosesinde Açığa Çıkan Cüruflardan Gravite Ayırması ile Altın Kazanımı

## Recovery of Gold From Slags Generated in the Jewelry Waste Recycling Process by Gravity Separation

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Cüruftan altın kazanma / Recovery of gold from slag
- ❖ Knelson konsantratörü ile gravite ayırması / Gravity separation by Knelson Concentrator
- ❖ Yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet, besleme hızı, pülp katı oranı ve besleme tane boyutu optimizasyonu / Optimization of washing water pressure, centrifugal force, feed rate, pulp solids ratio, and particle size of the feed product

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu araştırmada, ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan cürufta hapsolan altının gravite ayırması ile uygun koşullarda geri kazanımı amaçlanmıştır. / In this research, it is aimed to recover the gold from slags generated in the jewelry waste recycling process under suitable conditions by gravity separation.

### Amaç (Aim)

Ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan cüruflardan altının ön konsantre olarak kazanılması araştırılmış ve yüksek tenörlü/verimli altın ön konsantresi üretimi için optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. / The gold recovery as pre-concentrate from slags generated in the jewelry waste recycling process was investigated and the optimal operation parameters were determined to produce high grade / efficient gold pre-concentrate.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Cürufun ve konsantre/atığın altın (Au) içerikleri, ateş analizi (küpelasyon) ile tayin edilmiştir. Au analizi atomik absorpsiyon spektrofotometresinde (AAS) gerçekleştirilmiştir. Gravite ayırması ile zenginleştirme çalışmalarında santrifüj esaslı Knelson konsantratörü kullanılmıştır. / Chemical analysis of the slag and concentrate/tailings were determined by fire analysis. Then, gold analysis was performed using atomic absorption spectrometry (AAS). The centrifugal Knelson concentrator was used in enrichment studies by gravity separation

### Özgünlük (Originality)

Cüruftan altın/gümüş kazanımı ile ilgili olarak ulusal/uluslararası ölçekte yayımlanmış bir araştırma makalesi bulunmamaktadır. / There is no research paper published on national/international scale regarding gold/silver recovery from slags generated in the jewelry waste recycling process.

### Bulgular (Findings)

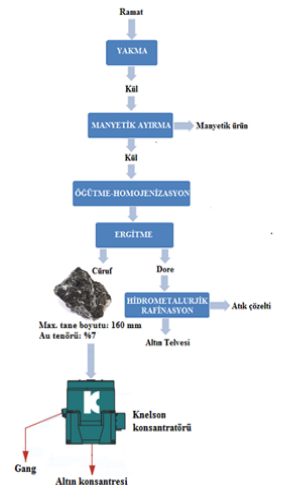
Altın kazanma verimi ve atığa kaçan altın miktarları dikkate alındığında yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet ve besleme hızının ayırma performansına etkisinin sınırlı olduğu, besleme tane boyutunun ise konsantre Au tenörü üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. / Considering the recovery rate of gold and the amount of gold escaping into tailings, it was determined that the effect of washing water pressure, centrifugal force and feed rate on the separation performance was limited, and the feed particle size was effective on concentrate Au grade.

### Sonuç (Conclusion)

7 g/t Au tenörüne sahip cüruftan optimum şartlarda %72,4 verimle 16 g/t Au içeren bir konsantre (atığın Au tenörü: 3 g/t) elde edilmiştir. / A final concentrate containing 16 g/t of Au (Au grade of tailing: 3 g/t) was obtained with 72.4% recovery rate from the slag with 7 g/t Au grade at optimized conditions.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.



Şekil A. Ramatdan altın geri kazanım prosesi akım şeması / Figure A. Process flow-sheet of gold recovery from jewelry waste recycling

# Ramat Geri Kazanım Prosesinde Açığa Çıkan Cüruflardan Gravite Ayırması ile Altın Kazanımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Eyüp SABAH\*, Filiz ORUÇ ŞAPCI**

Maden Mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye

(Geliş/Received : 26.05.2020 ; Kabul/Accepted : 07.07.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 09.07.2020)

## ÖZ

Bu araştırmada, ramatlardan altın/gümüş elde etmek için uygulanan ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan cürufta hapsolan altının gravite ayırması ile uygun koşullarda geri kazanımı amaçlanmış, maliyetleri azaltmak ve değerli metallere geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için yüksek tenörlü/verimli altın ön konsantrasi üretiminin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Gravite ayırması ile zenginleştirme çalışmalarında santrifüj esaslı Knelson konsantratörü kullanılmıştır. Au tenörü 7 g/t olan soda-boraks esaslı cürufun bileşiminde yüksek oranda Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13,25) ve PbO (%11,38) olduğu, boyuta göre yapılan sınıflandırma sonucu altının -0,5 + 0,212 mm fraksiyonunda yoğunlaştığı (~%34) belirlenmiştir. Knelson konsantratörünün işletme parametreleri (yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet, besleme hızı, pulp katı oranı vs.) ile besleme malı tane boyutunun konsantrte/artığın Au tenörü ve altın kazanma verimine etkisi incelenmiştir. Altın kazanma verimi ve artığa kaçan altın miktarları dikkate alındığında yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet ve besleme hızının ayırma performansına etkisinin sınırlı olduğu, besleme tane boyutunun ise konsantrte Au tenörü üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. 7 g/t Au tenörüne sahip cüruftan en uygun şartlarda %72,4 verimle 16 g/t Au içeren bir konsantrte (artığın Au tenörü: 3 g/t) elde edilmiştir. Altının fraksiyonel bazda en yüksek dağılım gösterdiği -0,212 mm boyutunda besleme malı ile çalışıldığında, konsantrtenin Au tenörü kayda değer bir artış göstererek ~30 g/ton'a ulaşmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ramat, cüruf, gravite ayırması, altın kazanımı.

# Recovery of Gold From Slags Generated in the Jewelry Waste Recycling Process by Gravity Separation

## ABSTRACT

In this research, it is aimed to recover the gold from slags generated in the jewelry waste **recycling** process applied to obtain gold / silver from jewelry waste under suitable conditions by gravity separation and it has been explored whether it is possible to produce high grade / efficient gold pre-concentrate to reduce costs and maximize the recovery of precious metals. The Knelson centrifugal concentrator was used in enrichment studies by gravity separation. It has been determined that the composition of soda-borate based slag with a Au grade 7 g/t consists of relatively high Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.25%) and PbO (11.38%), and the gold was concentrated in the fraction of -0.5 + 0.212 mm (~34%) as a result of the size classification. The influence of operating conditions parameters of Knelson concentrator (washing water pressure, centrifugal force, feed rate, pulp solids ratio, etc.) and feed product particle size on Au grade and gold recovery efficiency of concentrate / waste were investigated. Considering the recovery rate of gold and the amount of gold in the tailings, it was determined that the effect of washing water pressure, centrifugal force and feed rate on the separation performance was limited, and the feed product particle size was effective on concentrate Au grade. A final concentrate containing 16 g/t of Au (Au grade of tailing: 3 g/t) was obtained with 72.4% recovery rate from the slag with 7 g/t Au grade at optimized conditions. In case of applying with the feed product sized of -0,212 mm, where the gold shows the highest distribution by size fraction, the Au grade of the concentrate increased significantly to ~30 g/t.

**Keywords:** Jewelry waste, slag, gravity separation, gold recovery.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Altın; kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle sadece mücevher olarak ve yatırım için değil, kuyumculuk sektöründen elektronik ve iletişim sektörüne, havacılıktan dişçiliğe ve sağlık sektörüne kadar birçok endüstri dalında giderek artan oranda kullanılan değerli bir metaldir. Altın, her ne kadar birçok kayaç formasyonunda küçük miktarlarda dağılmış durumda bulunsa da, ekonomik miktardaki altın kaynakları birincil ve ikincil kaynaklar olarak iki gruba ayrılabilir. Birincil kaynaklardan olan altın cevherleri, en genel haliyle, serbest ve iri altın taneleri içeren plaser tipi cevherler,

genellikle okside olmuş, birincil yataklanma sonucu oluşan serbest halde ufalanmış cevherler ve altının prit/arsenoprit gibi sülfürlü minerallerin kafes yapılarında kapanım halinde bulunduğu çok ince taneli refrakter tip cevherler olarak nitelendirilirler. İkincil altın kaynakları ise; kuyumculuk, elektronik ve dişçilik hurdalarından ve değerli metal içeren karışık yapıdaki toz, cüruf ve izabe artıklarından oluşmaktadır. Kuyumcu atölyelerinde (bilezik atölyeleri, tamir atölyeleri v.b) altının işlenmesi sırasında yere dökülen ve parlatma/temizleme esnasında oluşan artık altın/gümüş tozları ramat olarak tanımlanmaktadır.

Altının birincil kullanım alanının kuyumculuk sektörü olduğu bilinen bir gerçektir. 2017 yılı verilerine göre dünyada tüketilen altın miktarı 4072 ton olup, bunun

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : esabah@aku.edu.tr

%52,4'ünü mücevherat/kuyumculuk sektörü oluştururken, bunu %9,1 ile elektronik, %6,5 ile diğer endüstriyel alanlar ve %1,2 ile dışılık izlemektedir [1]. Altın mücevherat pazar büyüklüğü açısından Hindistan, Çin, ABD ve Rusya ile birlikte en büyük beş pazar arasında, üretimde ise Hindistan ve İtalya ile birlikte ilk üç ülke arasında yer alan Türkiye, yıllık olarak 400 ton altın işleme kapasitesine sahiptir. 10 bini İstanbul'da olmak üzere, irili ufaklı 35 bin kuyumcu ve bunlara üretim yapan fason imalatçılar ile birlikte ülkemizde her yıl yaklaşık 250–300 ton altın mücevherat üretilmektedir [2]. Söz konusu üretim esnasında açığa çıkan ve %1,20 ile %5,34 arasında altın içeren bu ramatlardan altının/gümüşün geri kazanımı, hem parasal ve çevresel açıdan hem de ekonomik bir mücevherat üretimi için büyük/kritik önem arz etmektedir [3].

Altın cevherinin mineralojik özellikleri, bu soy metalin kazanılması için uygulanacak birim yöntemleri belirlediğinden, ikincil altın kaynaklarından altın/gümüş kazanımında kullanılan prosesler birincil altın kaynaklarından oldukça farklıdır. Bundan dolayı geri dönüşüm maliyetleri ve ramatların düşük altın/gümüş içerikleri dikkate alınarak, ramatlardan altın/gümüş elde etmek için ülkemizde küçük ölçekli ramatçı atölyelerinde genellikle piro-metalurjik yöntem tercih edilmektedir. Yöntemin esası; ramatların içindeki organik maddelerin önce bir tavada yakılıp kül haline getirilerek uzaklaştırılması ve erimeyi kolaylaştırması açısından ramatlara belirli oranlarda kurşun oksit, soda-boraks ve kurşun indirgeyici ilavesi yapılarak eritme ocaklarında (Kal ocakları) 1000-1100°C'de ergitilip, ramat içindeki altın/gümüşün indirgenen metalik kurşun bünyesinde toplanması işlemlerine dayanmaktadır. Ergitme ve redüksiyon esaslı bu aşamada, birbirleri içinde çözünmeyen ve özgül ağırlık farkıyla kolaylıkla ayrılan iki faz oluşmaktadır. Bunlardan birincisi altın/gümüş gibi değerli metal içeren metalik kurşun fazı, diğeri ise gang mineralleri ve flaksları içeren camsı cüruf fazıdır. Yöntemin son aşamasında, kurşun fazı kal ocağına alınarak 800-850°C arasında kurşun buharlaştırılıp külçe (dore) altın/gümüş elde edilmektedir. Ancak, bu yöntemle geri kazanılan altın; gümüş ve platin grubu metallere ayrılmadığı için dore'nin hidrometalurjik yöntemle rafine edilmesi gerekmektedir. Gang mineralleri ve flaksları içeren camsı cüruf ise, yapısına

göstermekte, cüruf kesinlikle bir atık olarak görülmemektedir. Halihazırda bu cüruflar, maksimum seviyede altın geri kazanımı için kurşun ilavesi ile tekrar ergitilmekte, ancak yüksek kurşun tüketimi AB ülkelerinde uygulanan çevresel normlara uygun olmadığından, ülkemizde de bazı işletmeler tarafından uygulanmaya devam eden bu yöntemin çok uzun zaman sürdürülmesi mümkün görünmemektedir.

Değişik geri kazanım yöntemleri ile ramatdan altın kazanımına yönelik yerli/yabancı olmak üzere günümüzde yapılmış/yayınlanmış bir çok çalışma olmasına rağmen [3-8], piro-metalurjik yöntemle ramat işleme sonucu açığa çıkan cüruftan altın/gümüş kazanımı ile ilgili detaylı verilerin yer aldığı yayımlanmış bilimsel araştırma sayısı son derece sınırlıdır. Hal böyleyken, bu cüruflarda kalan altın/gümüşü uygun/işletilebilir proses veya proses dizinleri ile geri kazanmak, atığı, bertaraf maliyetini ve enerji kullanımını azaltıp fırın ömrünü uzattığından hem ekonomik açıdan hem de atık bertarafı yönünden büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, cürufta kalan altının gravite ayırması ile uygun koşullarda geri kazanımı amaçlanmış, maliyetleri azaltmak ve değerli metallere geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için rafinasyon öncesi gerçekleştirilen bu zenginleştirme işlemi ile yüksek tenörlü/verimli altın ön konsantresi üretiminin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Deneysel çalışmalarda kullanılan cüruf numunesi, İstanbul'da ramatçılık yapan firmadan temin edilmiştir. Görüntüsü Şekil 1'de verilen cürufun TS EN 15309:2008 standardına göre X-ışını floresans spektrometresi (XRF) ile yapılan kimyasal analiz verileri Çizelge 1'de sunulmuştur. Cürufta düşük veya yüksek oranda Fe varlığı, ramatçı atölyelerinde gerçekleştirilen geri dönüşüm uygulamalarının etkinliği/başarısı ile doğrudan ilişkilidir. Numunede %13,25 oranında Fe bulunması, etkin bir demir uzaklaştırmasının yapılmadığına işaret etmektedir. Yüksek SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O ve PbO değerleri ise, ramatda bulunan gang mineralleri ile asidik/bazik cüruflaştırıcılar olan sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>), kurşun oksit (PbO), silika (SiO<sub>2</sub>) ve boraks pentahidrat

**Çizelge 1.** Cürufun kimyasal analizi (Chemical analysis of slag)

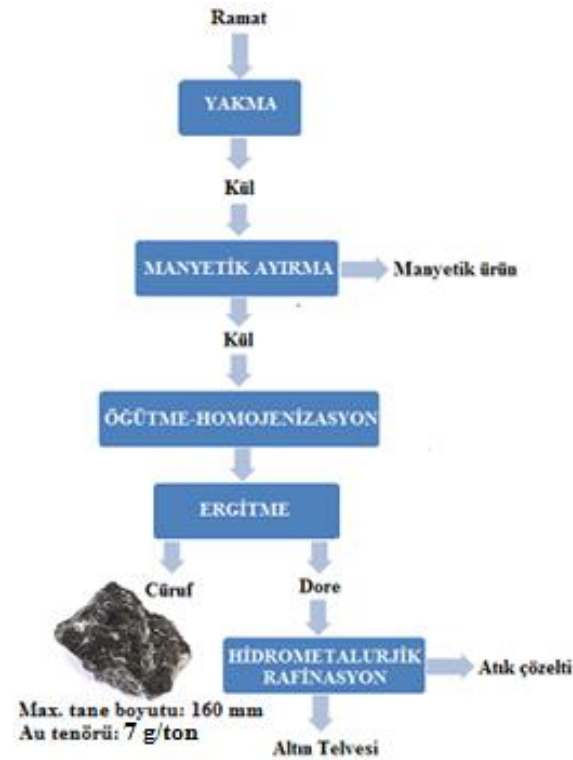
SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	PbO (%)	CuO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CdO (%)	SnO <sub>2</sub> (%)	NiO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	A.Z. (%)
27,85	11,03	13,25	13,83	1,90	16,35	0,42	11,38	0,94	0,60	0,31	0,29	0,38	0,15	0,08	0,22	0,05	0,14

hapsolan altın/gümüş zerrecikleri nedeniyle yeniden değerlendirmek üzere ayrılmaktadır (Şekil 1). Cüruf yapısında kalan altın/gümüş miktarı, ulaşılabilen ergitme sıcaklığı ve süresi, flaksın özellikleri ile soğuma hızına bağlı olarak işletmeden işletmeye değişkenlik

(Na<sub>2</sub>BO<sub>7</sub>·5H<sub>2</sub>O)'dan meydana gelen flaksdan kaynaklanmaktadır.

Cüruf ve gravite ayırması sonucu açığa çıkan ürünler (konsantre ve atık) halkalı değirmende 0,075 mm altına öğütüldükten sonra altın (Au) içerikleri ateş analizi

(küpelyasyon) ile tayin edilmiştir. Au analizi atomik absorpsiyon spektrofotometresinde (AAS) gerçekleştirilmiştir. Buna göre; deneylerde kullanılan cürufun Au tenörü 7 g/ton olup, camsı-homojen bir yapı ve simli siyah bir görünüm (Şekil 1) sergilemektedir. Her ne kadar cüruf rengi üzerinde demir mineralleri etkili olsa da, renge göre bazı sonuçlar çıkarmak da mümkündür. Örneğin; mavi renk, bakır minerallerinin belirtisidir. Lavanta rengi cüruf, manganez minerallerinin varlığına, yeşil renk cüruf ise demir minerallerinin varlığına işaret etmektedir. Cürufun çoğu bu yeşil rengi gösterir. Eğer demir mineralleri numunede çok önemli değilse, sarı renk kurşun olduğunu, beyaz renk ise cürufun kalsiyum veya magnezyum silikatlardan oluştuğunu göstermektedir [9].



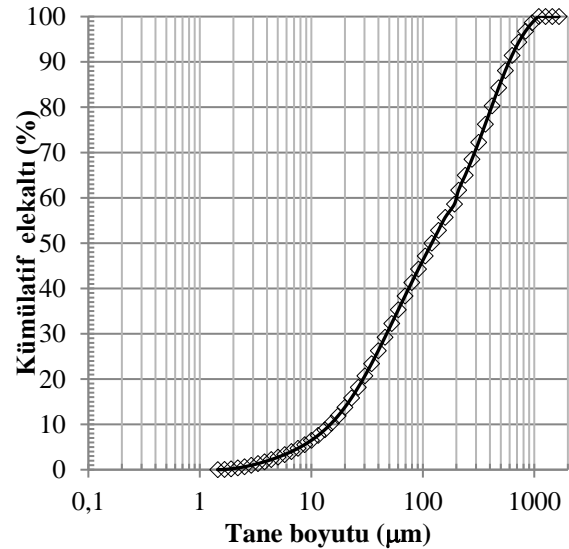
Şekil 1. Ramatdan altın geri kazanım prosesi akım şeması (Process flow-sheet of gold recovery from jewelry waste recycling)

Maksimum parça boyutu 160 mm olan cüruf, aşamalı olarak çeneli ve merdaneli kırıcıdan geçirilip 2 mm altına ufalandıktan sonra elek açıklığı 1 mm olan darbeli kırıcıdan geçirilmiştir. Böylelikle tane boyutu -1 mm'ye düşürülen cüruf, daha sonra ISO 3310-1 / ASTM standardına uygun Retch marka test elekleri ile yine Retsch marka elek sarsma cihazında 20 dakika süre ile kuru eleme işlemine tabi tutularak boyut dağılımı ve fraksiyonel bazda altın miktarı ve dağılımı belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Elek analizi ve fraksiyonel bazda altın dağılımı (Sieve analysis and gold distribution by fractions)

Fraksiyonlar (mm)	Miktar (%)	Au Tenörü (g/t)	Au Dağılımı (%)
-2 + 1	2,0	7,3	2,1
-1 + 0,5	16,7	6,8	15,7
-0,5 + 0,212	35,9	6,8	34,0
-0,212 + 0,150	11,5	7,0	11,2
-0,150 + 0,090	15,0	7,7	15,9
-0,090 + 0,038	11,7	7,7	12,4
-0,038	7,2	8,6	8,7
Beslenen malzeme	100,0	7,1	100,0

Çizelge 2'den de görüldüğü gibi, tüm fraksiyonların altın içeriği birbirine yakın olup, altın tenörleri 6,8 g/t ile 8,6 g/t arasında değişmektedir. İnce tane boyutlarına inildikçe altın oranındaki artış marjinal düzeyde kalmış, altının %82,3'ü 0,5 mm altı tane fraksiyonunda, geri kalan %17,7'si de 0,5 mm üstü fraksiyonda toplanmıştır. Cürufun tamamı, Knelson konsantratöründe gravite ayırması için gerekli olan 0,5 mm altı tane boyutuna ufalanmıştır. Elek açıklığı 0,5 mm olan darbeli kırıcıda öğütülen cürufun, Malvern Mastersizer 2000 cihazında lazer kırınım yöntemiyle elde edilen boyut dağılımı eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. Yaklaşık %86'sı 0,5 mm altına öğütülebilen cürufun ortalama tane boyutu 0,12 mm olup, şlam boyutunda (0,02 mm) malzeme oranı %14'dür.



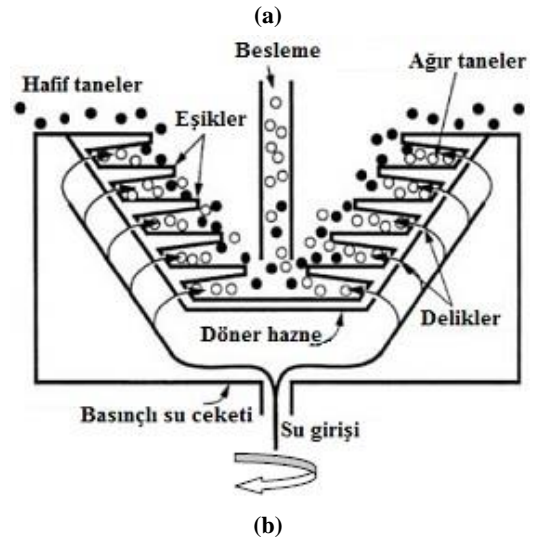
Şekil 2. Darbeli kırıcıda tane boyutu 0,5 mm öğütülen cürufun boyut dağılımı eğrisi (Particle size distribution of the slag ground to below 0.5 mm by means of a hammer crusher)

Altın, esnekliği/yumuşaklığı yüksek olan bir metal olup boyut küçültme (ufalama) işlemleri esnasında uygulanan kuvvetin tipine bağlı olarak şekil değişimine uğramak suretiyle yassı bir form alabilmektedir. Altın taneleri, yoğun olmalarına rağmen ufalama esnasında aldıkları bu yassı şekilden dolayı gravite ayırması uygulamalarında artığa kaçarak ayırma etkinliğini önemli ölçüde

düşürmektedir [10]. Genellikle bilyalı değirmenlerin kullanıldığı öğütme devrelerinde altın tanelerinin boyutla birlikte şekil değişimleri ve şeklin/boyutun ayırma süreçlerine etkisini ortaya koyan birçok araştırma bulunmaktadır [11-15]. Buna ilaveten, Ofori-Sarpong ve Amankwah [16] tarafından yapılan bir çalışmada, çeneli ve merdaneli kırıcıda iki aşamalı kırma işlemine tabi tutulan altın cevheri, diskli, çekiçli ve halkalı değirmenlerde öğütülerek altın tanelerinin morfolojik değişimleri ve bunun gravite ayırmasına etkileri araştırılmış, diskli değirmenin füziformda (iğimsi), çekiçli değirmenin küresel, halkalı değirmenin ise yassı formda parçalar ürettiği ve gravite ayırması sonucu altın zenginleştirme oranlarının çekiçliden diskli ve halkalı değirmen ürünlerine doğru azalma gösterdiği belirlenmiştir. Tüm bu araştırma sonuçları dikkate alınarak, cüruf numuneleri önce çeneli ve merdaneli kırıcıda iki aşamalı kırma işlemine tabi tutulmak suretiyle tane boyutu 2 mm altına indirilmiş, daha sonra halkalı değirmene 0,5 mm, 0,212 mm ve 0,106 mm elekler yerleştirilerek gravite ayırması deneylerinde kullanılacak üç farklı boyuttaki besleme malı bu değirmende hazırlanmış, bilyalı değirmen kullanılmamıştır.

Mineral tanelerinin, aralarındaki özgül ağırlık farkının neden olduğu, akışkan ortamlardaki hareket farklılığın dayanılarak birbirlerinden ayrılması esasına dayalı bir ayırma yöntemi olan gravite ayırması, mineral ve kömür zenginleştirmede yaygın olarak kullanılan en eski endüstriyel yöntemlerden biridir. Çalışma kolaylığı, çevresel ve insan sağlığı açısından daha az risk oluşturmasının yanında reaktif kullanımının olmaması nedeniyle flotasyon ve/veya liç yöntemlerine göre daha ekonomik yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Altının düşük yoğunluklu gang minerallerine ( $2,1 \text{ g/cm}^3$  ila  $5,0 \text{ g/cm}^3$ ) kıyasla sahip olduğu yüksek özgül ağırlığı ( $19,3 \text{ g/cm}^3$ ), onun gang minerallerinden özgül ağırlık farkına göre ayrılarak geri kazanımını cazip hale getirmektedir [17]. Ancak altının cevher ya da cüruf içinde ince/çok ince boyutlarda serbestleşmesi ve bunun için uygulanan öğütme işlemi sonucunda tane şekillerinde meydana gelen yassılaşıma, porozite ve hidrophobite (yüzebilirlik) gibi diğer özellikleri nedeniyle [18-19], verimli bir altın zenginleştirme için geleneksel gravite ayırma cihazlarından ziyade ince/çok ince tane boyutlarında ve geniş tane boyutu aralığında zenginleştirme yapan geliştirilmiş santrifüj esaslı gravite ayırma cihaz(lar)ı tercih edilmektedir. Bunlardan altın zenginleştirme için en uygun olanı ve yaygın kullanılanı Knelson konsantratörü'dür. Bundan dolayı, bu çalışmada cüruftan altın kazanımı için laboratuvar tipi KC-MD3 Knelson konsantratörü (Şekil 3) kullanılmış (Yapısal özellikleri Çizelge 3'de verilmiştir), konsantratöre besleme Retsch marka hız/zaman ayarlı titreşimli besleyici ile yapılmış, pülp katı oranı sabit (%25) tutularak yıkama suyu basıncı (1, 2, 3, 6, 9 ve 12 psi), santrifüj "G" kuvvet (40, 60, 90 ve 120 G), besleme hızı (100, 200, 250 ve 300 g/dak) ve besleme tane boyutunun (0,5, 0,212 ve 0,106 mm) ayırma

performansına etkisi incelenmiş, yüksek tenör ve verimle altın konsantresi elde etmek amacıyla söz konusu parametreler optimize edilmiştir.



Şekil 3. Knelson konsantratörü deney düzeneği (a) ve şematik görünümü (b) (Experimental set-up for the Knelson concentrator tests (a) and its schematic view(b)).

Çizelge 3. Deneylerde kullanılan Knelson konsantratörünün teknik özellikleri (The technical specifications for the Knelson concentrator used in the experiments)

Özellik	Değer
Kapasite (kg/saat katı)	0 – 45
Yıkama suyu miktarı (lt/dak)	0,7 – 4,0
Katı oranı (%)	0 – 75
Maksimum hacimsel verim (lt/dak)	8
Besleme boyutu (mm)	en yüksek 1,7
Konsantre hacmi (ml)	58
Konsantre ağırlığı (g)	80 – 150
Santrifüj kuvvet (G's)	40 – 120

Gravite ayırması ile ilgili geliştirilmiş teknolojilerinin çoğu altının zenginleştirilmesine yöneliktir. Byron Knelson tarafından 1988 yılında patenti (Patent: US #4,776,833) alınan [20] Knelson konsantratörü, akışkan yatak kullanarak düşey eksende yüksek hızla dönen oluklu bir konik kısımdan oluşan çanak tipli bir santrifüj ayırıcı olup, damar tipi ve alüvyal altın üretiminde yaygın bir uygulama alanına sahiptir. Altının gravite ayırması ile geri kazanımına yönelik uygulamaların son 20 yılda önemli ölçüde artmış göstermesi, büyük ölçüde Knelson konsantratörünün geliştirilmesi ile ilişkilidir [21]. Standart Knelson konsantratöründe besleme, döner konik hazne içine üstten düşey bir besleme borusu vasıtasıyla % 0-70 pülpte katı oranında yapılmaktadır. Konik haznenin içindeki paralel olukların (eşiklerin) içindeki küçük deliklerden hazneye su enjekte edilerek malzemenin hem yıkanması hem de ağır minerallerin bir yatak oluşturması sağlanır. Beslenen pülpte bulunan ağır taneler 200 G'ye kadar çıkabilen santrifüj kuvvetin etkisiyle konsantre olarak yatağın oluklarına (eşiklerine) takılırken, hafif olan gang mineralleri atık olarak pülpün üst akımıyla birlikte dışarıya atılır. Basit yapısı, yüksek kapasite, geniş tane boyutu aralığında (0,02-0,850 mm) çalışabilmesi [15] (Şekil 4) ve çok yüksek zenginleştirme oranına sahip olması Knelson konsantratörünün başlıca avantajlarıdır.

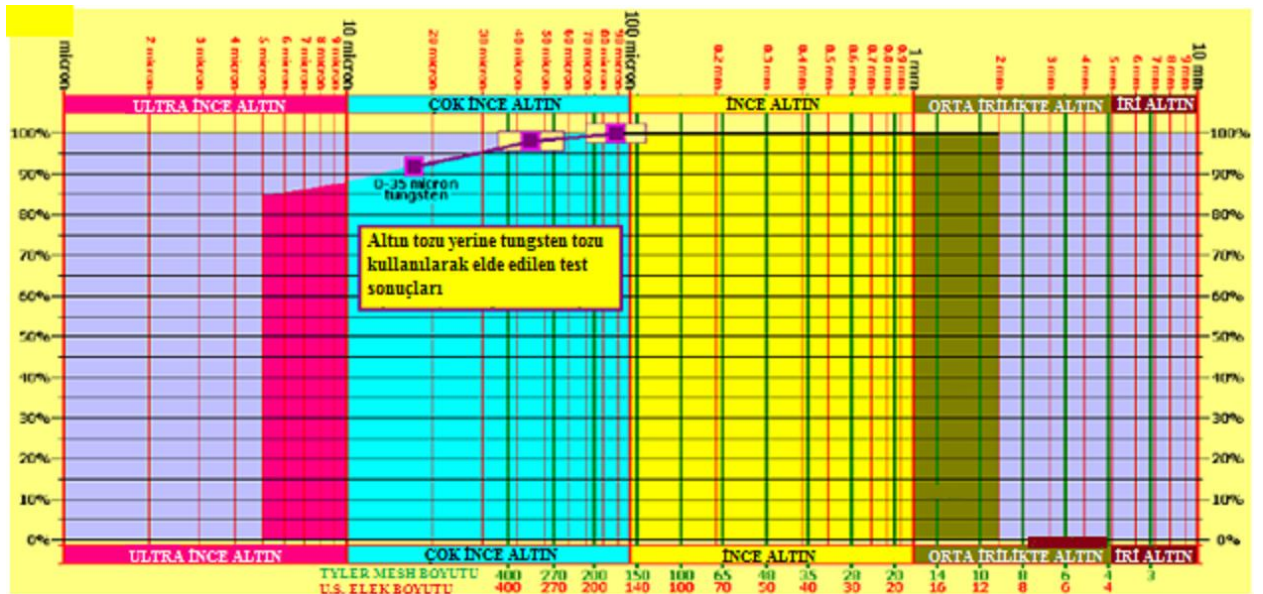
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### (RESULTS AND DISCUSSION)

Knelson konsantratörünün ayırma performansı, beslenen malzemenin özellikleri (yoğunluk, tane boyutu) ve işletme parametreleri (yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet, besleme hızı, pülp katı oranı vs.) gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu parametrelerin bazıları önemli

etkilere sahipken, bazılarının etkisi daha sınırlıdır. Laboratuvar tipi KC-MD3 Knelson konsantratöründe gerçekleştirilen tüm testlerde, zenginleştirme işleminin başarı ölçütü olarak konsantre ve atığın Au tenörü ile altın kazanma verimi esas alınmıştır.

Yıkama suyu basıncının zenginleştirme performansına etkisini belirlemek için yıkama suyu basıncının 1 ile 12 psi arasında kademeli olarak değiştirildiği deneylere ait sonuçlar Çizelge 4'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi, yıkama suyu basıncı artışına bağlı olarak konsantrenin Au tenöründe önemli bir değişim olmamış, buna karşın 9 ve 12 psi yıkama suyu basınçlarında atığın Au tenöründe önemli oranda düşme, altın kazanma veriminde ise belirgin bir artış meydana gelmiştir. 3 ve 6 psi yıkama suyu basınçlarında ise hem konsantre hem de atığın Au tenörleri yükselirken altın kazanma verimlerinde kayda değer bir düşme meydana gelmiştir. Knelson konsantratöründe konik hazne içerisindeki olukların dış yüzeyindeki deliklerden verilen basınçlı su, sistem içerisinde aşağıdan yukarı doğru hareket eden akışkan bir tabaka oluşturarak düşük yoğunluklu ürünlerin taşarak sistem dışına taşınmasını ve ayırma konisi içinde birikmiş olan yüksek yoğunluklu tanecikler arasında sıkışmış olan düşük yoğunluklu taneciklerin bulunduğu ortamdan çıkarak sistemi terk etmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, yüksek yıkama suyu basınçlarında konik hazne içerisindeki oluklarda kalan malzeme miktarı düşme eğilimindedir. Bu durum, en az altın kaçağı ile yüksek altın kazanma verimli bir Au konsantresi elde etmek için oldukça yüksek yıkama suyu basınçlarında çalışılması gerektiğine işaret etmektedir. 9-12 psi yıkama suyu basınçlarında altın kazanma verimi %78,6-%79,7 arasında değişirken, konsantre ve atıktaki Au tenörleri sırasıyla 10,9-11,2 ve 3,2-2,9 g/t arasında değişmektedir.



Şekil 4. Alüvyal altın zenginleştirmede kullanılan Knelson konsantratörünün etkin boyut aralığı (Effective size range for recovery of placer gold using Knelson concentrator) [20]

**Çizelge 4.** Yıkama suyu basıncının etkisi (The effect of fluidization water flow pressure)

<b>Sabit Parametreler</b>			
Besleme Tane Boyutu : -0,5 mm			
Cüruf Au Tenörü : 7 g/ton			
Besleme Katı Oranı : %25			
<b>Sabit Parametreler</b>			
Santrifüj kuvvet: 60 G			
Besleme hızı : 200 g/dak			
Yıkama Suyu Basıncı (psi)	Konsantre Au Tenörü (g/ton)	Atık Au Tenörü (g/ton)	Au Kazanma Verimi (%)
1	9,9	5,5	52,6
2	11,5	4,5	60,9
3	15,7	4,7	48,4
6	13,8	5,1	46,3
9	10,9	3,2	78,6
12	11,2	2,9	79,7

Knelson konsantratöründe yıkama suyu basıncının oluşturduğu güç, dönen konik haznenin oluşturduğu santrifüj kuvvete karşı bir kuvvettir. Bir sıvı, gevşek bir şekilde istiflenmiş taneciklerin oluşturduğu bir yataktan düşük akış hızlarında dikey olarak aktığında, sıvının sürüklenme kuvveti taneciklerin ağırlığını destekleyemediği sürece yatak hacmi sabit kalır. Sıvı akışı arttıkça yatak akışkanlaşır ve genişler, böylece yatak boşluğu artar. Konik hazne içinde yatak oluşumu için geçerli olan koşullar, yatay yönde de olsa, akışkan bir yatağına benzer olarak kabul edilebilir. Knelson konsantratöründe yıkama suyu basıncının oluşturduğu sürüklenme kuvveti, konik haznede yatak oluşumu için gerekli olan net santrifüj kuvveti aşarsa haznede oluşan yatak akışkanlaşır ve genişler. Bu durumda konsantre haznesinde tutulacak malzeme miktarı azalır, tersi durumda ise artar. Cüruftan altın geri kazanımı için santrifüj kuvvetin ayırma performansına etkisinin ortaya konduğu Çizelge 5'de yer alan veriler, 12 psi yıkama suyu basıncının, düşük G kuvvetinde akışkan bir yatak oluşumuna neden olduğuna, yüksek G (90 G) kuvvetinde ise özgül ağırlığı yüksek taneciklerin sıkı bir yatak oluşturduğuna işaret etmektedir. Altın kazanma verimi ve atığın Au tenörü dikkate alınarak, 40 G değeri en uygun santrifüj kuvvet olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 5.** Santrifüj kuvvetinin etkisi (The effect of the centrifugal force)

<b>Sabit Parametreler</b>			
Besleme Tane Boyutu : -0,5 mm			
Cüruf Au Tenörü : 7 g/ton			
Besleme Katı Oranı : %25			
<b>Sabit Parametreler</b>			
Yıkama suyu basıncı: 12 psi			
Besleme hızı : 200 g/dak			
Santrifüj Kuvvet (G)	Konsantre Au Tenörü (g/ton)	Atık Au Tenörü (g/ton)	Au Kazanma Verimi (%)
40	11,9	2,8	79,8
60	11,2	2,9	79,7
90	11,1	4,8	58,7

Çizelge 6, besleme hızındaki tedrici artışın (200'den 250 g/dak) –düşük santrifüj kuvvet (40 G) varlığında– ayırma performansına etkisinin marjinal olduğunu, 300 g/dak besleme hızında 200 g/dak besleme hızına kıyasla konsantre Au tenöründe yaklaşık %50 oranında bir artışın meydana geldiğini, ancak atık Au tenörünün yükselmesi ile birlikte altın kazanma veriminin de kayda değer biçimde azaldığını göstermektedir. Ling [22]'in doktora çalışmasında elde ettiği bulgular, sonuçları teyit eder mahiyettedir. Bu durum, besleme malının konik haznede kalma süresinin kısalığı ve yüksek besleme hızlarının ince taneler üzerinde yarattığı negatif etki ile izah edilebilir.

**Çizelge 6.** Besleme hızının etkisi (The effect of feed rate)

<b>Sabit Parametreler</b>			
Besleme Tane Boyutu : -0,5 mm			
Cüruf Au Tenörü : 7 g/ton			
Besleme Katı Oranı : %25			
<b>Sabit Parametreler</b>			
Yıkama suyu basıncı: 12 psi			
Santrifüj kuvvet : 40 G			
Besleme Hızı (g/dak)	Konsantre Au Tenörü (g/ton)	Atık Au Tenörü (g/ton)	Au Kazanma Verimi (%)
200	11,9	2,8	79,8
250	10,7	3,9	71,2
300	16,3	5,5	34,8

Gravite ayırması ile cüruftan altının geri kazanımı için Knelson konsantratöründe gerçekleştirilen zenginleştirme testlerinde en düşük Au tenörüne sahip atık dikkate alınarak ulaşılan optimum sonuçlara göre; 12 psi yıkama suyu basıncı, 40 G santrifüj kuvvet, 200 g/dak besleme hızı ile çalışıldığında, tenörü 11,9 g/t olan bir konsantre %79,8 verimle kazanılabilmektedir. Atığın Au tenörü ise 2,8 g/t'dur. Nihai sonuca ulaşmak amacıyla Knelson konsantratörü en uygun işletme şartlarında çalıştırılarak, besleme malı tane boyutunun altın kazanma verimine etkisi araştırılmış, Çizelge 2'de fraksiyonel bazda verilen altın dağılımları göz önünde bulundurularak 0,212 mm ve 0,106 mm altında tane boyutuna sahip besleme malları ile elde edilen sonuçlar Çizelge 7'de sunulmuştur. Çizelge 7'den de görüldüğü gibi, Knelson konsantratörüne iri (<0,5 mm) ve ince (<0,106 mm) boyutlarda cüruf beslendiğinde, yüksek altın kazanma verimlerine ulaşırlarken altın tenörlerinde kayda değer bir artış elde edilememiştir. Koppalkar [17], Knelson konsantratörüne geniş bir boyut aralığında besleme yapıldığında uygun bir akışkan yatak oluşumu sağlanmadığından konsantratörün ayırma etkinliğini zayıflattığını bildirmektedir. Çok ince boyutlara öğütme durumunda, serbestleşmede görülen artışa bağlı olarak altın kazanma veriminde bir yükselme elde edilirken, öğütmeye bağlı olarak altın tanelerin laminer bir şekil almasından dolayı atığa altın kaçağı olabilmektedir [23]. Knelson konsantratörüne -0,212 mm ara boyutunda cüruf beslendiğinde ise, az miktarda alınan konsantreden dolayı nispeten daha yüksek altın içeriklerine ulaşılmış (yaklaşık 30 g/t), ancak altın kazanma verimi %36'lar



civarında kalırken ve büyük miktarda altın atığa karışmıştır.

#### Çizelge 7. Tane boyutunun etkisi (The effect of particle size)

Sabit Parametreler			
Cüruf Au Tenörü : 7 g/ton			
Besleme Katı Oranı : %25			
Yıkama suyu basıncı: 12 psi			
Santrifüj kuvvet : 40 G			
Besleme hızı : 200 g/dak			
Tane Boyutu	Konsantr Au Tenörü	Atık Au Tenörü	Au Kazanma Verimi
(mm)	(g/ton)	(g/ton)	(%)
0,106	15,6	2,9	72,4
0,212	29,3	5,0	35,9
0,500	11,9	2,8	79,8

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Ramatlardan altın/gümüş elde etmek için ülkemizde küçük ölçekli ramatçı atölyelerinde genellikle pirometalurjik yöntem (ergitme) tercih edilmektedir. Geri kazanım için uygulanan pirometalurjik işlemler sonucunda soda-boraks esaslı cüruf açığa çıkmakta ve altın zerrecikleri cüruf yapısına hapsolmaktadırlar. Cürufun yapısı ve içerisine hapsolan altın miktarları; uygulanan ergitme sıcaklığı ve süresi, flakın özellikleri ile soğuma hızına bağlı olarak işletmeden işletmeye değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan ve Au tenörü 7 g/t olan cürufta altına/gümüşe eşlik eden diğer metaller Pb ve Fe olup, oranları oldukça yüksektir. Uygulanan geri kazanım yönteminin gereği olarak altın/gümüş zerrecikleri ağırlıklı olarak Pb içerisinde hapsolmuştur.

Cürufun fraksiyonel bazda altın dağılımı sonuçları, tüm fraksiyonlarda altın içeriğinin birbirine yakın olduğunu ve Au tenörlerinin 6 ile 8 g/t arasında değiştiğini, -0,5 + 0,212 mm fraksiyonunda kütlece bir yığılma olduğunu göstermiştir.

Gravite ayırması ile cüruftan altın geri kazanımı için ince/çok ince tane boyutlarında ve geniş bir boyut aralığında zenginleştirme yapan geliştirilmiş santrifüj esaslı bir gravite ayırıcısı olan Knelson konsantratörü kullanılmış, yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet ve besleme hızı gibi işletme parametreleri ile besleme boyutunun ayırmaya etkisi incelenmiştir. Buna göre; altın kazanma verimi ve atığa kaçan altın miktarları dikkate alındığında yıkama suyu basıncı, santrifüj kuvvet ve besleme hızının ayırma performansına etkisinin sınırlı olduğu, besleme tane boyutunun ise konsantr Au tenörü üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

En düşük Au tenörüne sahip atık dikkate alınarak 12 psi yıkama suyu basıncı, 40 G santrifüj kuvvet, 200 g/dak besleme hızı ve 0,106 mm besleme malı boyutu ile çalışıldığında optimum sonuçlara ulaşılmış, Au içeriği 7 g/t olan cüruftan Au tenörü 3 g/t olan atık ve tenörü 16 g/t olan bir altın konsantrasi %72,4 verimle elde edilmiştir. Altının dağılımının fraksiyonel bazda %48'e ulaştığı 0,212 mm boyutu altında besleme malı ile çalışıldığında ise; elde edilen altın konsantrisinin Au

tenörü ~30 g/t'lara ulaşmakta, ancak atığa kaçan altın miktarı önemli oranda artarken altın kazanma verimi dramatik bir düşüş göstermektedir.

Tüm bu sonuçlar dikkat alınarak bir kestirim ve önermede bulunmak gerekirse; cüruftan altın geri kazanımında sadece Knelson konsantratörü ile Au tenörü yüksek bir konsantr alınmayacağı, ancak siyanürleme veya liç işlemlerine geçişte by-pass olarak ön zenginleştirme amacıyla uygun olacağı, ön konsantrayı sallantılı veya Gemini masasına beslemek suretiyle tenörü çok daha yüksek altın konsantrasi alınabileceği, Knelson konsantratörü ve masa atığının ise daha ince boyutlara öğütülerek santrifüj kuvvetinin etkisi ile çalışan ayırıcılarda birçok temizleme ve süpürme işlemlerin geçirildikten sonra siyanürleme ile geri kazanmak suretiyle altın kazanma verimini yükselterek prosesin çok daha ekonomik hale getirilebileceği söylenebilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Eyüp SABAH:** Deney planlarını hazırlamış, numuneleri temin etmiş ve sonuçlarını analiz etmiştir.

**Filiz ORUÇ ŞAPÇI:** Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Garside M., "Distribution of Global Gold Demand by Industry in 2017", Statista, <https://www.statista.com/statistics/299609/gold-demand-by-industry-sector-share/> Yayın tarihi Ağustos 9, 2019. Erişim tarihi Nisan 17, (2020).
- [2] DOĞAKA, "TR63 Bölgesi Kuyumculuk Sektör Raporu", Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı (DOĞAKA), (2015).
- [3] Delfini M., Manni A., Massacci P., "Gold recovery from jewellery waste", *Minerals Engineering*, 13(6): 663–666, (2000).
- [4] Embleton F.T., "Refining of Gold from Jewellery Scrap", Johnson Matthey Chemicals Ltd., England, (1989).
- [5] Corti C.W., "Recovery and refining of gold jewellery scraps and wastes", *Proceedings of the Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, Albuquerque-A.B.D., 1–20, (2002).
- [6] Potgieter J.H., Potgieter S.S., Mbaya R.K.K., Teodorovic, A., "Small-scale recovery of noble metals from jewellery wastes", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(10): 563–572, (2004).

- [7] Burat F., Baştürkçü H., Özer M., "Gold&silver recovery from jewelry waste with combination of physical and physicochemical methods", *Waste Management*, 89: 10–20, (2019).
- [8] Burat F., Demirağ A., Şafak M.C., "Recovery of noble metals from floor sweeping jewelry waste by flotation-cyanide leaching", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22: 907–915, (2020).
- [9] Michaud D., "Gold Smelting & Refining Process", 911Metallurgist, <https://www.911metallurgist.com/blog/gold-smelting-refining-process>. Yayın tarihi Şubat 28, 2016. Erişim tarihi Nisan 17, (2020).
- [10] Wills B.A., "Mineral Processing Technology", Eighth ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, (2016).
- [11] Banisi S., Laplante A.R., Marois J., "The behaviour of gold in Hemlo Mines Ltd. grinding circuits", *CIM Bulletin*, 84 (955): 72–84, (1991).
- [12] Laplante A.R., Woodcock F., Noaparast M., "Predicting gravity separation gold recoveries", *Minerals and Metallurgical Processing*, 12 (2): 74–79, (1995).
- [13] Houseley K., Apling A.C., Chapman R.J., Watson R.P., "Use of homogeneous feed matrix for shape control during milling: Effect on gold gravity concentration", *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C*, 106: 142–144, (1997).
- [14] Houseley K., Apling A.C., Chapman R.J., "Effect of particle size and shape on recovery of gold by use of a Knelson Concentrator", Innovation in Physical Separation Technologies, *Richard Mozley Symposium*, 65–72, (1998).
- [15] Chen Q., Yang H., Tong L., Niu H., Zhang F., Chen G., "Research and application of a Knelson concentrator: A review", *Minerals Engineering*, 152: 1–15, (2020).
- [16] Ofori-Sarpong G., Amankwah R.K., "Comminution environment and gold particle morphology: Effects on gravity concentration", *Minerals Engineering*, 24: 590–592, (2011).
- [17] Koppalkar S., "Effect of operating variables in Knelson concentrators: A Pilot-scale study", *PhD Thesis*, McGill University, Montreal, (2009).
- [18] Spiller D.E., "Gravity Separation of Gold Then and Now", Mining Yearbook, Colorado Mining Association, Colorado, (1983).
- [19] Burt O.R., "Gravity Concentration Technology", Developments in Mineral Processing, Elsevier Science Publishers, Vol 5, (1984).
- [20] Grayson, R., "Fine gold recovery – Alternatives to mercury and cyanide", *World Placer Journal*, 7: 66–161, (2007).
- [21] Ghaffari A., Farzanegan A., "An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling", *Minerals Engineering*, 112: 57–67, (2017).
- [22] Ling J., "Variable speed knelson concentrator", *PhD Thesis*, McGill University, Montreal, (1998).
- [23] Chapman, R.J., Houseley, K., "The effect of particle geometry on the recovery of gold grains by gravity concentration methods", *28th Annual Conference of Canadian Mineral Processors*, 335–357, (1996).