



Orijinal Araştırma / Original Research

KUYUMCULUK KÖKENLİ ARTIKLARDAN ALTIN VE GÜMÜŞÜN GERİ KAZANIMI

RECOVERY OF GOLD AND SILVER FROM WASTES GENERATED IN JEWELRY PRODUCTION

Tülin Ulucan^{a,*}, Mustafa Özer^{a,**}, Hüseyin Baştürkcü^{b,***}, Fırat Burat^{a,****}

^a İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, Geri Kazanım, Ayırma ve Zenginleştirme Çalışma Grubu, 34469, İstanbul, TÜRKİYE

^b Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş., Cevher Hazırlama Birimi, 34852, İstanbul, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 28 Temmuz / July 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 14 Ekim / October 2020

Anahtar Sözcükler:

Geri kazanım,
Değerli metaller,
Artık,
Gravite ayırması.

ÖZ

Bu çalışmada, kuyumcu atölyelerindeki çeşitli faaliyetler sonucunda açığa çıkan, yüksek altın ve gümüş içeriklerine sahip zemin süpürme artıklarından metalik değerlerin gravite yöntemleri ile geri kazanılması amaçlanmıştır. Ayrıca, bu artıklardaki değerli metalleri kazanmak için uygulanan ısı işlemler sonucunda oluşan cüruf içerisinde kalan altın ve gümüşü konsantre etmek amacıyla santrifüj ayırıcılar kullanılarak zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Yüksek metal içeriklerine sahip zemin süpürme artığı ile sarsıntılı masa, MGS (multi gravite separator) ve Knelson konsantratörü kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemleri sonucunda, ağırlıkça %24,2 oranında bir ağır ürün 638 g/t Au ve 6227 g/t Ag içerikleri ile üretilmiş, metal kazanma verimleri ise sırasıyla %84,4 ve %82,2 olarak bulunmuştur. Cüruf içerisinde ince boyutlarda hapsolmuş altın ve gümüş'ün kazanılması amacıyla malzeme ilk olarak 100 µm altına öğütülmüş ve daha sonra santrifüjlü ayırıcılara beslenmiştir. Knelson konsantratörü ile yapılan zenginleştirme çalışmalarının sonucunda, ağırlıkça %13,8 oranında bir ağır ürün 30 g/t Au ve 52 g/t Ag içerikleri ile elde edilmiş olup, metal kazanma verimleri sırasıyla % 64,6 ve % 44,4 olarak bulunmuştur.

ABSTRACT

In this study, it was aimed to recover metallic values by gravity methods from the floor sweeping waste with high gold and silver contents, which are produced as a result of various activities in the jewelry workshops. In addition, the metallic values that remains in the slag phase after thermal process of the floor sweeping wastes were concentrated by centrifugal separators. As a result of gravity separation tests in which the floor sweeping waste subjected to shaking table, MGS (multi gravity separator) and Knelson concentrator, a heavy product (24.2% wt.) was produced with 638 g/t Au and 6227 g/t Ag grades and the metal recovery rates were calculated as 84.4% and 82.2%, respectively. The slag was first ground below 100 µm and then fed to the centrifugal separators in order to obtain fine size gold and silver particles that were trapped in the glassy phase. As a result of enrichment studies with Knelson concentrator, a concentrate (13.8% wt.) was obtained with 30 g/t Au and 52 g/t Ag grades, and the metal recoveries were found as 64.6% and 44.4%, respectively.

Keywords:

Recovery,
Precious metals,
Waste,
Gravity separation.

* ulucant@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8076-5120>

** ozermust@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-2642-6782>

*** huseyin.basturkc@esan.com.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7301-9317>

**** Sorumlu yazar / Corresponding author: buratf@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7051-0063>

GİRİŞ

Doğada az olarak bulunmaları, işlenebilirliklerinin kolay olması, dayanıklılıklarının ve doğal parlaklıklarının yüksek olması nedeniyle soy metaller uzun yıllardır önemli bir yatırım aracı olarak kullanılmaktadır. Korozyona karşı dayanıklılık, dövülebilirlik ve süneklik özelliklerinden dolayı kuyumculuk, elektrik-elektronik, iletişim, havacılık ve dişçilik gibi birçok önemli endüstri alanında altın vazgeçilmez bir metal olmuştur. Gümüş ise özellikle yüksek elektrik ve termal iletkenlik özellikleri nedeniyle çok çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir (Burat ve Ozer, 2018; Loewen, 1989). Nüfusun artışı ve ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan yüksek saflıktaki değerli metallere olan talebin yükselmesi nedeniyle geri kazanım, geri dönüşüm ve rafinasyon alanındaki çalışmalar son zamanlarda, özellikle düşük tenörlü cevherlere ve ikincil kaynaklara yoğunlaşmıştır. Altın ve gümüş, kuyumculuk ve elektronik endüstrilerinde kullanılan en popüler soy metallere dendir. Kuyumculuk endüstrisi yaklaşık 2117 t ile 2019 yılındaki küresel altın talebinin yüzde 48,5'ini oluşturmaktadır. İstatistiklere göre, dünyadaki toplam altın arzı yaklaşık 4365 t iken, birincil kaynaklardan üretilen altın miktarı 3300 t olmuştur. Aradaki 1065 t fark ise ikincil kaynaklardan karşılanmıştır (Garside, 2020). İkincil kaynaklar kendi aralarında metalik olanlar ve olmayanlar olarak iki gruba ayrılır. Metalik olan kaynaklar; kuyumculuk hurdaları, eski takılar, elektronik hurdalar, dişçilik hurdaları, saat kayışları ve mahfazaları, gözlük çerçeveleri, saat pilleri, altın kaplı hurdalar, telefon hurdaları vb.'lerini içermektedir. Geri dönüşüm için en büyük kaynağı oluşturan kuyumculuk hurdaları kirlenme miktarına göre yüksek ve düşük kaliteli hurdalar olarak sınıflandırılabilir (Canda vd., 2016; Corti, 1997a; Corti, 1997b; Corti, 2002). Genellikle %20'nin üzerinde altın içeren yüksek kaliteli hurda üretime geri gönderilir ve doğrudan geri kazanılabilir. Düşük kaliteli hurdaların ise kalitesi yükseltilmeli ya da saf olarak yeniden rafine edilmelidir.

Hurdaların yeniden değerlendirilmesinde bileşimi bilinen temiz ve yüksek kaliteli hurda kullanılmasına, hurdanın oksitli olmamasına, yağ veya alçı gibi yüzeydeki yabancı maddelerden

iyice temizlenmiş olmasına dikkat edilmelidir. Metalik olmayan kaynakların başında değerli metal içeren karmaşık yapıdaki toz (atölye çöpleri, havalandırma tozları, cila ramatları, mekanik işlem tozları), lavabo suları ve izabe artıkları (cüruf) diğer bir deyişle ramatlar yer almaktadır. Kuyumculuk işlemleri sonucu ortaya çıkan altın kayıpları, üretilen ürünün maliyetini arttırmakta ve bu durum sektördeki rekabeti doğrudan etkilemektedir (Kaspin ve Mohamad, 2015).

Çizelge 1. Çeşitli artıklarda bulunan altın içerikleri (Corti, 1997; Loewen, 1989)

Malzemeler	Altın İçeriği, %
Eski takılar	39-73
Dişçilikten gelen altın hurdaları	50-90
Kuyumcu tezgâh hurdaları	19-52
Lavabo çamurları	6-8
Halılar ve ahşap yer kaplamaları	0,1-9
Eski ergitme potaları	0,8-5
Cila ve yer ramatı	0,5-5
Saat kayışları ve çeşitli altın kaplı hurdalar	0,25-5
Zımpara kağıdı, yer çöpleri, fırçalar ve diğer atölye çöpleri	0,01-4

Altın ramatları üretimin her evresinde çıkabilmektedir (Çizelge 1). Düşük kaliteli artık olan ramatlar genellikle %0,01-4 arasındaki miktarlarda altın içerirler. Kesme, öğütme, dolgu ve perdelama tekerlekleri üzerinde elle cilalama işlemleri, testere talaşları ve asılı toz partikülleri oluşturur. Bu talaş ve asılı toz partikülleri tezgâhlara ve yere düşerek çalışma yüzeylerine, borulara ve işçilerin giysilerine toz olarak yerleşir. Altın, temizleme ve makineyle yapılan son işlemler kademesinde yıkanıp kaybolabilir. Bu asılı tozların toplanması için tezgâhların, motorlu öğütme, cilalama ve perdelama tekerleklerinin etrafına emici vantilatörler ve filtrelerle birlikte uygun başlıklar yerleştirilmelidir. Sıkışıp kalan altın tozlarının toplanması için işçilere koruyucu giysiler sağlanması ve bu giysilerin filtrelerle birlikte makinede yıkanabilir olması altın kayıplarını azaltıcı bir önlem olabilir (Ammen, 1997). Ramatlar dışında; lavabo çamurları, çapak ve

cila makinelerinden dökülen çamurlar, kullanılmış harcanabilen kalıplar, halılar, paspaslar, eski önlükler, temizlik bezleri, süpürgeler, kumlama makinelerinden gelen kumlar, eski potalar vb. birçok malzeme yanabilenler ve yanamayanlar olarak sınıflandırılır ve ona göre piroliz işlemine tabi tutulurlar. Daha sonra her malzeme uygun bir prosesle rafinasyon işlemine gönderilir. Kaplama çözeltileri, parlatma çözeltileri, çeşitli atölye ve laboratuvar çözeltileri de çeşitli oranlarda altın içermektedir ve bunlar da rafine edilmeye değer miktarlardadır (Manni vd., 2001; Potgieter vd., 2004).

Literatürde ramatlardan metal geri kazanımı konusunda yapılan zenginleştirme çalışmaları fiziksel, fizikokimyasal ve kimyasal olarak üçe ayrılmaktadır. Fiziksel ve fizikokimyasal işlemlerin sonucunda uç ürün elde edebilmek için mutlaka kimyasal yöntemlere başvurmak zorunludur (Akcil vd., 2015; Burat vd., 2019; Burat vd., 2020; Ferrini vd., 1998; Kaya, 2016; Mbaya, 2004; Yazıcı ve Deveci, 2014). Ön zenginleştirme işlemleri ile bu soy metallerin içerisinde bulunduğu karmaşık yapı en basite indirgenmekte, elde edilen konsantre ile istenmeyen bileşenlerin büyük bir çoğunluğu sistemden uzaklaştırılmakta ve bir sonraki kademe için gerekli olan reaktif miktarı, enerji kullanımı ve bu işlemlerin getirdiği çevresel yük azaltılabilmektedir (Spiller, 1983). Ramat işlemleri sonucunda oluşan altın ve gümüş içerikli artıklardan, bu metallerin geri kazanımı için sıklıkla kullanılan yöntemlerin başında küpelasyon gelmektedir. Ayrıca, cevher veya herhangi bir alaşım içindeki altın ve gümüş gibi değerli metallerin içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan kantitatif bir analiz yöntemidir. Öncelikle, ramat artıklarında bulunan organik maddeler kontrollü olarak yakılıp kül haline getirilmektedir. Ergitme-redüksiyon esaslı olan bir sonraki aşamada ise belli oranlarda kurşun, soda-boraks, baryum nitrat ve kalsiyum florit ilavesiyle 1000-1100°C'deki ergitme işlemi tamamlanmaktadır. Birbiri içerisinde çözünürlüğü olmayan ve özgül ağırlık farkıyla kolaylıkla ayrılan metalleri ve metal olmayan elementleri içeren (cüruf) iki sıvı faz oluşturulmaktadır. Son olarak ise kurşun fazı 800-850°C arasındaki ergitme fırınına alınmakta ve kurşun buharlaştırılıp külçe (dore) altın/gümüş elde edilmektedir (Sabah ve Şapçı, 2020). Ancak, küpelasyon yöntemi ile altın, gümüş ve platin grubu

metaller birbirlerinden ayırlamadığı için gerçek bir rafinasyon yöntemi sayılmamaktadır. Özellikle, sıcaklık değerinin nispeten düşük olmasından ve viskozite problemlerinden dolayı altın ve gümüş taneciklerinin birkısmı cüruf yapısındakalmaktadır. İlk ergitme işlemi ile altının yüksek verim ile kazanımının mümkün olmadığı durumlarda, yine soda boraks ile ergitme işlemi yapılarak altın ve gümüş'ün kazanımı sağlanır. Ancak, bütün bu işlemlerin sonucunda pirometalurjik işlemler ile kazanılamayan ve halen cüruf içerisinde kalmış soy metaller bulunmaktadır. Cüruf içerisinde bulunan düşük içerikli altının kazanma verimini arttırmak için hidrometalurjik bir yöntem olan siyanür liçi kullanılabilir (Chmielewski vd., 1997). Kuyumculuk faaliyetlerinin gerçekleştirildiği, sayıları 5000'i aşan ve tümü de şehir merkezlerinde bulunan atölyelerden bir yıl içerisinde yüzlerce kilogram siyanür herhangi bir iyileştirme çalışması yapılmadan kanalizasyona atılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, kimyasal yöntemlerin çevreye olan etkilerini azaltacak, daha ekonomik yöntemlerin araştırılması zorunlu hale gelmiştir. Ramatçılık kökenli artıkların karışık yapısı ve çok farklı malzeme bileşenleri ihtiva etmesinden dolayı, uygun, basit ve ucuz olan gravite yöntemleri ile ön konsantre üretimi gerçekleştirilebilir. Bu sebeplerden dolayı, özgül ağırlık farkına göre ayırma işlemlerinin yapıldığı ve cevher hazırlama endüstrinde oldukça sık olarak tercih edilen sarsıntılı masa ve santrifüj ayırıcılar bu çalışma kapsamında kullanılmış olup, ramat artıklarının içeriğinde bulunan altın ve gümüş'ün ön konsantre olarak kazanım olanakları araştırılmıştır.

1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Malzeme

Deneyisel çalışmalarda iki farklı artık kullanılmıştır. Bu numunelerden ilki dünyanın en modern mücevher üretimi entegre tesisi olan ve İstanbul'da bulunan Kuyumcukent'teki mücevharat atölyelerinden temin edilen zemin temizleme artıklarıdır (Şekil 1a). Diğer numune ise bu artıklardan Au ve Ag'nin kazanılması için uygulanan küpelasyon yöntemi sonucu ortaya çıkan ve daha düşük miktarlarda değerli metaller içeren cüruftur (Şekil 1b).



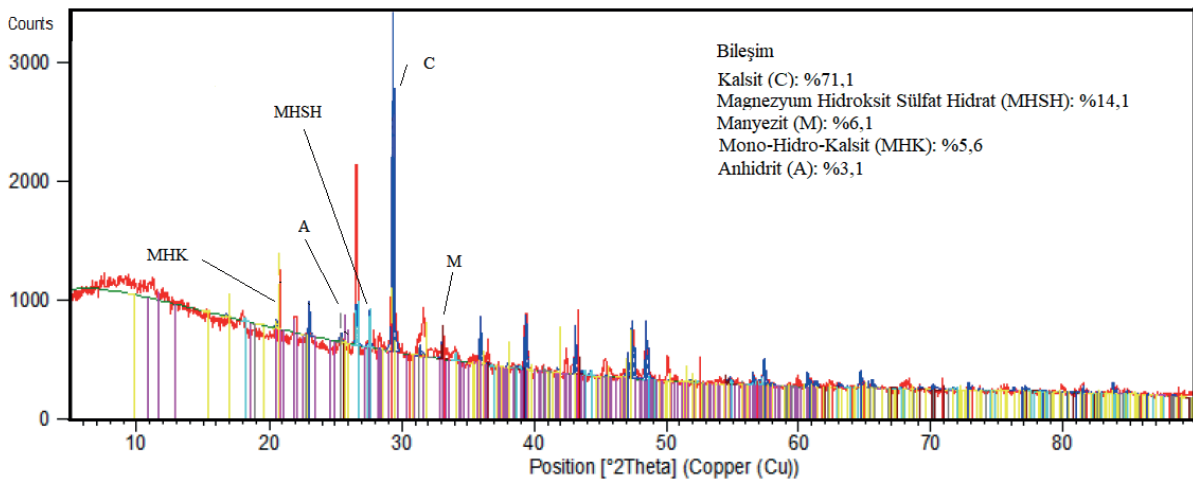
Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan zemin temizleme artığı (a) ve cürufun (b) görüntüsü

Periyodik olarak kuyumcu atölyelerinden toplanan 200 kg ağırlığındaki zemin temizleme artığının bünyesinde bulunan ve zenginleştirme işlemlerinde problem yaratabilecek olan yanabilir kısmın (kağıt, plastik, odun, vb.) yakılarak uzaklaştırılması gerekmektedir. Küllerle birlikte atmosfere kaçma ihtimali olan ince boyutlu Au ve Ag taneciklerini yakalamak amacıyla üst haznesi 2 mm açıklığa sahip elek ile kapatılan bir kap içerisinde 12 saat boyunca yakma işlemi yapılmıştır. Gravite ayırma işlemlerinde malzemeyi oluşturan bileşenler, özgül ağırlık farkı ve boyut gibi fiziksel özellikler oldukça önem teşkil etmektedir (Wills ve Napier-Munn, 2006). Bu sebepten dolayı, zemin temizleme artığının bileşiminin belirlenmesi amacıyla X-ışını difraksiyon (XRD) analizi yapılmış ve sonuçları Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2’de görüldüğü üzere, malzemenin büyük bir çoğunluğu kalsiyumlu bileşiklerden

(%71,1 CaCO_3 -Kalsit ve %6,1 CaSO_4 -Anhidrit) ve manyezit/magnezyum hidro-oksit gibi magnezyumlu bileşiklerden oluşmaktadır. Bu bileşikler malzemenin sulu ortam içerisindeki doğal pH değerinin 13 olmasına ve yüksek bazik yapı kazanmasına sebep olmaktadır. Au ve Ag gibi değerli metallerin içeriklerinin tayin sınırının altında olmasından dolayı XRD analizinde görüntülenememiştir.

Yaklaşık olarak 10 mm altında bulunan numunenin boyut dağılımının belirlenmesi amacıyla elek analizi yapılmış, fraksiyonlardaki Au ve Ag içerikleri küpelyasyon yöntemi ile tayin edilmiştir. Çizelge 2’de görüldüğü üzere zemin temizleme artığı 143 g/t Au ve 1489 g/t Ag içermektedir. Elek analiz sonuçlarına göre +6 mm boyut grubunun esas olarak; bakır kablo, demir hurdaları, cam, seramik, pota, tahta parçaları vb. gibi kirleticilerden oluştuğu ve beslenene göre oldukça düşük Au ve Ag içeriklerine sahip olduğu



Şekil 2. Zemin temizleme artığının XRD analiz sonucu

anlaşılmıştır. Zenginleştirme çalışmalarında sorun yaratabilecek bu fraksiyon, eleme vasıtasıyla uzaklaştırılmış ve gravite ayırmasına beslenen numunenin Au ve Ag içeriği sırasıyla, 183 g/t ve 1835 g/t'a yükseltilmiştir.

Kuyumcukent'teki atölyelerin artıklarını işleyen bir ramat firmasından temin edilen yaklaşık 100 kg ağırlığındaki cüruf numunesi sırasıyla çeneli, konili ve merdaneli kırıcılardan geçirilerek sarsıntılı masa için gerekli olan 0,5 mm tane boyutunun altına indirilmiştir. Toplam elek altı

eğrisine göre cüruf numunesinin d_{80} boyutunun 330 μm , d_{50} boyutunun ise 220 μm olduğu tespit edilmiştir. Cüruf'un yapısında yanabilir fraksiyon olmamasından dolayı yakma işlemine ihtiyaç duyulmamıştır. Numunenin boyut dağılımının belirlenmesi amacıyla yaş elek analizi yapılmıştır. +0,5 mm, -0,5+0,3 mm, -0,3+0,074 mm ve -0,074 mm boyut gruplarına sınıflandırılan cüruf numunesinin Au ve Ag içeriklerinin belirlenmesi amacıyla kimyasal analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 2. Zemin temizleme artığı numunesinin boyut dağılımı ve Au&Ag içerikleri

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	Au		Ag	
		İçerik, g/t	Dağılım, %	İçerik, g/t	Dağılım, %
+6	19,0	10	1,3	26	0,3
-6+2	11,1	24	1,8	1501	11,1
-2+1	7,1	225	11,3	1813	8,8
-1+0,5	10,9	194	14,8	2032	14,9
-0,5+0,212	10,3	196	14,1	2065	14,3
-0,212+0,100	6,5	228	10,4	2449	10,7
-0,100+0,053	6,0	302	12,9	2888	11,8
-0,053	29,1	164	33,4	1449	28,1
Toplam	100,0	143	100,0	1489	100,0

Çizelge 3. Cüruf numunesinin boyut dağılımı ve Au&Ag içerikleri

Boyut Aralığı, mm	Miktar, %	Au		Ag	
		İçerik, g/t	Dağılım, %	İçerik, g/t	Dağılım, %
+0,5	0,4	124	8,0	412	8,3
-0,5+0,3	24,2	6	21,8	16	20,1
-0,3+0,074	67,2	5	54,5	17	61,1
-0,074	8,2	7	9,7	24	10,5
Toplam	100,0	6	100,0	19	100,0

Çizelge 3'te görüldüğü üzere, cüruf 6 g/t Au ve 19 g/t Ag içermektedir. Bu metallerin haricinde numunede %7,0 Fe, %31,3 SiO₂, %6,8 Al, %11,5 Ca, %13,6 Na, %5,9 Pb ve %1,3 Mg bulunmaktadır. Bu içerikler ramat yapısında bulunan gang mineralleri ile asidik/bazik cüruflaştırıcılar olan sodyum karbonat (Na₂CO₃), kalsiyum karbonat (CaCO₃), kurşun oksit (PbO), silika (SiO₂) ve boraks pentahidrat (Na₂BO₃·5H₂O)'tan meydana gelen flakstan kaynaklanmaktadır. Beslenen malzemenin yalnızca %0,4'ünü oluşturan +0,5

mm boyut grubunda Au içeriği 124 g/t'a, Ag içeriği ise 412 g/t'a çıkmaktadır. Aynı gruptaki Pb içeriği ise ortalamanın yaklaşık 3 katına yükselmiş ve %15,3 olarak bulunmuştur.

Küpelasyon işlemi metalik fazı oluşturmak için kullanılan kurşun, altın ve gümüşü bünyesine hapsetmiş, sınıflandırma işlemleri sonucunda elek üzerinde kalarak iri boyutta yoğunlaşmıştır. Diğer boyut gruplarındaki Au ve Ag içerikleri birbirlerine oldukça yakındır. Aydın ve Gül (2020) tarafından ramat artıkları kullanılarak yapılan

çalışmada cüruf içerisindeki metalik kurşunun amorf silis içerisinde saçınım halinde bulunduğu saptanmış, metalik bakır ve demir oluşumları gözlemlenmiştir. Tane serbestleşmesini arttırmak ve santrifüjli ayırma cihazlarının etkin olarak çalıştığı boyuta uygun numune hazırlamak için kırıcılar vasıtasıyla 0,5 mm altına kırılan cüruf numunesi bilyalı değirmen kullanılarak 100 µm altına indirilmiştir. Malvern Mastersizer 2000 cihazı ile tane boyut dağılımı tespit edilen numunenin d_{90} boyutu 130 µm, d_{50} boyutu ise 60 µm olarak ölçülmüştür.

1.2. Yöntem

Numune hazırlama ve karakterizasyon çalışmalarını takiben zenginleştirme çalışmalarında kullanılmak üzere, -6+2 mm boyut grubundaki zemin temizleme artığı merdaneli kırıcı yardımıyla 2 mm'nin altına indirilmiş ve diğer fraksiyonlara dağıtılmıştır. Ayırma etkinliğini arttırmak amacıyla; -2+1 mm, -1+0,5 mm, -0,5+0,212 ve -0,212+0,053 mm boyut aralıklarına sınıflandırılan malzeme yatay tabaka halinde akan akışkan ortamda özgül ağırlık farkına göre ayırma yapan sarsıntılı masaya beslenmiştir. Sarsıntılı masa ile yapılan deneylerde uygulanan koşullar aşağıda verilmektedir:

- Pülpte Katı Oranı (PKO): %20
- Besleme Hızı: 2 l/min
- Yıkama Suyu: 3 l/min
- Frekans: 300 ileri-geri/min
- Genlik: 15 mm
- Eğim: 4°

Bilindiği üzere, gravite ayırmasında yüksek metal kazanma verimi ile konsantre kazanımı ve düşük metal içerikli bir artığın üretimi hedeflenmektedir. Bu işlemin en büyük zorluğu, ince boyuttaki metalik değerlerin yüksek içerik ve verim ile artıktan ayrılmasıdır. Genellikle, 50 µm'dan daha küçük parçacıklar öğütme işlemi sonucunda, tane şekillerinde meydana gelen yassılaşıma, porozite ve hidrophobite (yüzebilirlik) gibi diğer özelliklerinden dolayı suyun sürüklenme kuvveti ile hafif fraksiyona karışmakta ve sarsıntılı masa/spiral gibi nispeten daha iri boyutlarda yapılan zenginleştirme işlemlerinde çok büyük kayıplar ortaya çıkabilmektedir.

Bu ince boyutlu metalik değerleri kazanmak için son zamanlarda yüksek G (yerçekimi) kuvvetlerine çıkabilen santrifüj kuvvet esasına dayanan ayırıcılar tercih edilmeye başlanmıştır (Delfini vd., 2000). Soy metallerin santrifüjli ayırıcılar ile geri kazanımı, çözündürme ve ısıtma işlemleri öncesinde ön konsantre üretimi esasına dayanmaktadır (Houseley vd., 1998). İnce boyuttaki malzemelerdeki metalik değerleri yüksek verimlerle kazanmak amacıyla santrifüjli ayırıcılardan MGS ve Knelson konsantratörü tercih edilmiştir.

MGS farklı hızlarda (90-280 dev/min) dönmekte ve tambur yüzeylerinde 5 ila 15 G kuvveti üretilmesini sağlamaktadır. Deneylerde tambur dönüş hızı ilk basamakta 280 dev/min, ikinci basamakta ise 200 dev/min olarak ayarlanmış olup, PKO %20, yıkama suyu miktarı 3 l/min, besleme miktarı 2 l/min, tambur titreşim genliği 15 mm ve tambur eğimi 4° olarak seçilmiştir. Akışkan yatak kullanarak düşey ekseninde yüksek hızla dönen oluklu bir konik kısımdan oluşan ve 80 G'ye kadar çıkabilen Knelson ayırıcısı kullanılarak yüksek metal içerikli bir ağır ürün eldesi hedeflenmiştir. Bu deneylerde PKO %10, akışkanlaştırma suyu basıncı ise 5 psi olarak seçilmiştir.

Cüruf numunesi ise boyut küçültme ve sınıflandırma işlemleri sonucu +0,5 mm, -0,5+0,3 mm, -0,3+0,074 mm ve -0,074 mm boyut gruplarına ayrılmıştır. Cüruf bünyesindeki altın ve gümüş'ün serbestleşme boyutunun oldukça düşük olmasından dolayı tamamı 100 µm altına öğütülen cüruf numunesi santrifüj ayırıcılara (MGS ve Knelson konsantratörü) beslenmiştir. MGS kullanılarak yapılan zenginleştirme deneylerinde, PKO %10 olarak ayarlanmış, tambur dönüş hızı ilk basamakta 280 dev/min, ikinci basamakta ise 260 dev/min'ya düşürülmüştür. Yıkama suyu miktarı ilk basamakta 1 l/min, ikinci basamakta ise 1.5 l/min olarak ayarlanmış olup, tambur titreşim genliği 15 mm ve tambur eğimi 2° olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, ağır, araürün ve hafif olmak üzere üç ürün elde edilmiştir. Zemin süpürme artığına uygulanan Knelson konsantratörü çalışma koşulları sabit tutularak cüruf numunesine tatbik edilmiştir.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

-2+1 mm, -1+0,5 mm, -0,5+0,212 ve -0,212+0,053

mm boyut gruplarına sınıflandırılan zemin süpürme artığı numuneleri sarsıntılı masaya beslenmiş, hafif ürünler ile birlikte kaybedilen metalik değerleri yakalamak ve metal kazanma verimini arttırmak amacıyla iki kademeli temizleme işlemi uygulanmıştır. 0,053 mm altındaki fraksiyonda bulunan ince boyutlu ve öğütme işlemleri sonucunda yassılaştırmış olan metalik değerleri kazanmak için MGS tercih edilmiştir. Gravite ayırma deneyleri sonucunda elde edilen ürünler Au&Ag içerik ve kazanma verimlerine göre değerlendirilmiş olup, ayrıntılı sonuçlar Çizelge 4'te, birleştirilmiş sonuçlar ise Çizelge 5'te verilmektedir.

Çizelge 4'te görüldüğü üzere, sarsıntılı masa kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemlerinde, yaklaşık 400 g/t Au ve 4500 g/t Ag içeren ağır ürün -2+1 mm boyut grubunda elde edilmiştir. Daha ince boyut gruplarında yapılan deneylerde ise Au

ve Ag içeriklerinin arttığı, özellikle -0,212+ 0,053 mm boyut grubunda sırasıyla, 1335 g/t ve 10000 g/t'a yükseldiği anlaşılmıştır. MGS deneylerinde ise yaklaşık 800 g/t Au ve 6000 g/t Ag içeren bir konsantrenin üretebileceği, ağırlıkça %33,2 oranında bir hafif ürünün ise 62 g/t Au ve 929 g/t Ag içerikleriyle uzaklaştırılabileceği görülmüştür.

Birleştirilmiş sonuçların gösterildiği Çizelge 5'te yer alan veriler, beslenen malzemenin ağırlıkça %14,2'si kadar bir konsantrenin yaklaşık 700 g/t Au ve 6000 g/t Ag içerikleri ile üretebileceğini işaret etmektedir. Soy metallerin sünek ve dövülebilir özelliklerinden dolayı mücevher işçiliği neticesinde ince boyutlu ve yassı şekilli Au ve Ag taneciklerinin oluştuğu ve bunların akışkan ortam vasıtasıyla hafif ürüne karıştığı tespit edilmiştir. Böylelikle hafif ürünün metal içeriği artmakta ve buna paralel olarak metal kayıpları yükselmektedir.

Çizelge 4. Zemin süpürme artığına uygulanan gravite ayırması sonucunda elde edilen ürünlerin Au&Ag içerik ve verimleri

Besleme Boyutu, mm	Ürünler	Miktar, %	İçerik, g/t		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
-2+1 Sarsıntılı Masa	Ağır	3,1	422	4500	7,2	7.6
	Ara ürün	1,4	223	1230	1,7	0.9
	Hafif	8,0	57	897	2,4	3.9
	Toplam	12,5	166	1828	11,3	12.4
-1+0,5 Sarsıntılı Masa	Ağır	2,8	465	5000	7,1	7.6
	Ara ürün	4,5	151	1500	3,7	3.7
	Hafif	4,7	68	736	1,7	1.9
	Toplam	12,0	192	2017	12,6	13.2
-0,5+0,212 Sarsıntılı Masa	Ağır	1,9	636	6000	6,6	6.2
	Ara ürün	4,6	232	2300	5,8	5.8
	Hafif	7,0	51	725	2,0	2.8
	Toplam	13,5	195	2004	14,4	14.8
-0,212+0,053 Sarsıntılı Masa	Ağır	2,0	1335	10000	14,6	10.8
	Ara ürün	10,8	174	1743	10,3	10.1
	Hafif	5,2	65	1090	1,9	3.1
	Toplam	18,0	272	2462	26,8	24.0
-0,053 MGS	Ağır	4,4	795	6008	19,2	14.4
	Ara ürün	6,4	125	1250	4,4	4.4
	Hafif	33,2	62	929	11,3	16.8
	Toplam	44,0	144	1483	34,9	35.6
Toplam		100,0	183	1835	100,0	100,0

Çizelge 5. Zemin süpürme artığına uygulanan gravite ayırma deneylerinin birleştirilmiş sonuçları

Ürünler	Miktar, %	İçerik, g/t		Verim, %	
		Au	Ag	Au	Ag
Ağır	14,2	701	6017	54,4	46,6
Ara ürün	27,7	171	1658	25,9	25,0
Hafif	58,1	61	899	19,7	28,4
Toplam	100,0	183	1835	100,0	100,0

Metal kayıplarını azaltmak ve daha yüksek metal içerikli bir ağır ürün üretmek amacıyla sarsıntılı masa ve MGS deneyleri sonucunda elde edilen ara ürün ve hafif ürünler birleştirilmiş, 100 µm altına öğütülmüş ve Knelson konsantratörüne daha önceden belirtilen çalışma koşullarında yaklaşık 100 g/t Au ve 1150 g/t Ag içerikleri ile beslenmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen ürünlere ait Au&Ag içerik ve kazanma verimleri Çizelge 6'da gösterilmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, zemin artığı numunesi ile yapılan gravite ayırma işlemleri (sarsıntılı masa, MGS ve Knelson konsantratörü) neticesinde, ağırlıkça %24,2 oranında bir nihai ağır ürün 638 g/t Au ve 6227 g/t Ag içerikleri ile üretilmiş, metal kazanma verimleri sırasıyla, %84,4 ve %82,2 olarak bulunmuştur. 38 g/t Au ve 432 g/t Ag içerikli hafif ürün ise %15,8 Au ve %17,8 Ag metal kayıpları ile uzaklaştırılmıştır. Hafif ürünle birlikte kaybedilen bu değerlerin mutlaka başka bir zenginleştirme yöntemi ile kazanılması gerekmektedir. Bu kapsamda,

cevher hazırlama endüstrisinde sıklıkla kullanılan ve ince boyutlu cevherlere uygulanan flotasyon yöntemine başvurulabilir. Flotasyon yöntemi ile köpük zonu ile birlikte yüzdürülemeyecek kadar iri olan Au ve Ag taneleri gravite ayırması ile kazanılıp, hafif üründe kalan yassı ve ince taneler uygun reaktifler yardımıyla konsantre edilebilir.

+0,5 mm, -0,5+0,3 mm, -0,3+0,074 mm ve -0,074 mm boyut gruplarına sınıflandırılan cürufların numunesinin +0,5 mm fraksiyonunun toplam beslenen malzemeye göre oranının %0,4 olması ve yüksek oranlarda Au&Ag içermesinden dolayı zenginleştirme işlemleri dışında bırakılmıştır. Benzer olarak toplam beslenen malzemenin %8,2'sine tekabül eden 74 µm altı malzeme ise sarsıntılı masa kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemlerine uygun olmadığından ve yıkama suyu ile birlikte hafif ürüne karışacağından kullanılmamıştır. Sarsıntılı masa kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemleri sonucunda elde edilen ürünlerin Au&Ag içerik ve verimleri Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 6. Knelson konsantratörü kullanılarak yapılan deneyde elde edilen ürünlerin Au&Ag içerik ve verimleri

Ürünler	Miktar, %	İçerik, g/t		Verim, %	
		Au	Ag	Au	Ag
Ağır	11,7	549	6523	65,7	66,7
Hafif	88,3	38	432	34,3	33,3
Toplam	100,0	98	1145	100,0	100,0

Çizelge 7'de görüldüğü üzere, -0,5+0,3 mm boyut aralığında yapılan zenginleştirme deneylerinin sonucunda 13 g/t Au ve 26 g/t Ag içerikleri ile bir ağır ürün elde edilirken, beslenen malzemenin metal içeriklerine benzer olan bir hafif ürün alınmıştır. Au ve Ag tanelerinin özgül ağırlıklarının yüksek olmasına rağmen, kuyumculuk faaliyetleri ve boyut küçültme işlemleri esnasında aldıkları yassı şekilden dolayı hafif ürüne kaçması metal

kazanma verimlerini önemli ölçüde düşürmektedir. -0,3+0,074 mm boyut aralığında elde edilen ağır ürünün Au (33 g/t) ve Ag (83 g/t) içerikleri dikkat çekicidir. Bir önceki fraksiyona benzer olarak ara ürünün Au ve Ag içerikleri hafif üründen daha düşüktür. Cüruflar içerisinde bulunan değerli metallerin daha verimli olarak ayrılması amacıyla geleneksel gravite ayırma cihazı olan sarsıntılı masa yerine çok daha ince tane boyutlarında

zenginleştirme yapabilen santrifuj esaslı ayırıcılar kullanılarak zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaca uygun olarak numunenin tamamı 100 µm altına indirilmiş, MGS ve Knelson konsantratörü kullanılarak zenginleştirme çalışmaları tamamlanmıştır. Santrifuj ayırıcılar kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen ürünler Au&Ag içerik ve kazanma verimlerine göre değerlendirilmiş olup, sonuçlar Çizelge 8'de verilmektedir.

MGS kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, ağırlıkça %17,8 oranında bir ağır ürün 17 g/t Au ve 44 g/t Ag içerikleri ile elde edilmiş, metal kazanma verimleri sırasıyla, %49,2 ve %47,5 olarak bulunmuştur. Beslenen malzemenin %70,6'sı ara ürün olarak alınmış olup, Au ve Ag içerikleri sırasıyla, 2 g/t ve 7 g/t'dur. İnce boyutlu metallerin yıkama suyu ve cihazın

eğimi ile birlikte sürüklenmesi nedeniyle hafif ürünün Au ve Ag içerikleri artmaktadır. Knelson deneyleri sonucunda ise ağırlıkça %13,8 oranında bir ağır ürün 30 g/t Au ve 52 g/t Ag içerikleri ile üretilmiş, metal kazanma verimleri sırasıyla %64,6 ve %44,4 olarak bulunmuştur. Beslenen malzemenin % 54,5'i ara ürün olarak elde edilmiş olup, Au ve Ag içerikleri sırasıyla 3 g/t ve 13 g/t'dur. Hafif üründeki metal kaybı MGS'nin yaklaşık yarısı kadar olmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Knelson konsantratörünün hem metal içerikleri hem de metal kazanma verimleri açısından MGS'ye göre çok daha etkili olduğunu göstermiştir. Knelson konsantratörü'ne beslenen pülp içerisinde bulunan ağır taneler 80 G'ye kadar çıkabilen santrifuj kuvvetinin etkisiyle konik haznenin dışına doğru hareket etmekte ve eşiklere takılmaktadır.

Çizelge 7. Cüruf numunesi ile yapılan sarsıntılı masa deneylerinin sonuçları

Besleme Boyutu, mm	Ürünler	Miktar, %	İçerik, g/t		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
+0,5	-	0,4	124	412	8,6	8,3
	Ağır	6,3	13	26	14,8	8,7
	Ara ürün	15,4	2	11	6,5	9,2
-0,5+0,3	Hafif	2,6	5	16	2,2	2,2
	Toplam	24,3	5	16	23,5	20,1
	Ağır	3,4	33	83	20,7	14,9
	Ara ürün	38,8	3	13	19,6	26,4
-0,3+0,074	Hafif	24,9	4	15	18,2	19,8
	Toplam	67,1	5	17	58,5	61,1
	-	8,2	6	24	9,4	10,4
-0,074	-	8,2	6	24	9,4	10,4
Toplam		100,0	5	18	100,0	100,0

Çizelge 8. Cüruf numunesi ile yapılan santrifuj ayırma deneylerinin sonuçları

Santrifuj Cihazı	Ürünler	Miktar, %	İçerik, g/t		Verim, %	
			Au	Ag	Au	Ag
MGS	Ağır	17,8	17	44	54,1	47,5
	Ara ürün	70,6	2	7	25,2	30,0
	Hafif	11,6	10	32	20,7	22,5
	Toplam	100,0	6	16	100,0	100,0
Knelson Konsantratörü	Ağır	13,8	30	52	64,6	44,4
	Ara ürün	54,5	3	13	25,5	43,8
	Hafif	31,7	2	6	9,9	11,0
	Toplam	100,0	6	16	100,0	100,0

Akışkanlaştırıcı suyun vasıtasıyla eşiklere takılan malzeme yıkanmakta, hafif olan tanecikler atık olarak pülpün üst akımıyla birlikte dışarıya atılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, özellikle hafif ürün içerisindeki değerli metal içerikleri ve kayıpları MGS'ye göre çok daha düşük olmaktadır. Geniş tane boyut aralığında çalışabilmesi, kullanımının ve yapısının basit oluşu, yüksek kapasitesi ve yüksek zenginleştirme oranlarına çıkabilmesi, gravite ayırıcıları arasında Knelson konsantratörüne önemli bir avantaj sağlamaktadır. Fakat, iki farklı numune ile yapılan deneylerin sonuçları dikkate alındığında, tek kademede yapılacak Knelson zenginleştirme işlemi ile Au ve Ag tenörü çok yüksek bir konsantrasyon alınamayacağı görülmektedir. Özellikle, araürün ve hafif ürünler ile birlikte kaybedilen metalik değerleri kazanmak ve zenginleştirme verimini arttırmak amacıyla bu ürünlerin daha ince boyutlara öğütülmesi, yeterli serbestleşmenin sağlanması ve süpürme işlemlerinin uygulanması gereklidir. Çok daha yüksek metal içerikli bir ön konsantrasyon üretimi için ise benzer olarak ilk kademede elde edilen kaba konsantrasyon doğrudan veya öğütülüp temizleme işlemlerine gönderilmelidir. Sonuç olarak, üretilen ön konsantrasyonlardan siyanür işlemi değerli metallerin geri kazanımının çok daha ekonomik ve basit hale gelebileceği ifade edilebilir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kuyumculuk ve ramat işlemleri sonucunda açığa çıkan, yüksek altın ve gümüş içeriklerine sahip zemin süpürme artığı ve cüruf numunelerinden gravite yöntemleri ile ön konsantrasyon üretimi amaçlanmıştır.

Farklı boyut gruplarına sınıflandırılan zemin süpürme artığı ile sarsıntılı masa kullanılarak yapılan gravite ayırması deneylerinde -0,212+ 0,053 mm boyut grubunda 1335 g/t Au ve 10000 g/t Ag içeren bir ağır ürün elde edilebilmektedir. Özellikle, ince boyutlu ve yassı şekilli metaller yatay tabakada akan akışkan ortam içerisinde yeterli ölçüde çökme şansı bulamayıp, sürüklenerek hafif ürüne karışmakta ve böylece ciddi metal kayıpları ortaya çıkmaktadır. Tanecikler üzerinde yüksek G kuvveti oluşturan ve daha etkili ayırma yapan santrifüjlü ayırıcılar yardımıyla bu kaçaklar büyük ölçüde engellenebilmektedir.

Sarsıntılı masa, MGS ve Knelson konsantratörü ile yapılan gravite ayırma işlemleri neticesinde,

638 g/t Au ve 6227 g/t Ag içeren bir ağır ürün sırasıyla, %84,4 ve %82,2 kazanma verimleri üretilmektedir. Gravite ayırma işlemleri sonucunda artık olarak elde edilen hafif ürünün, 38 g/t Au ve 432 g/t Ag içerdiği görülmektedir.

Au ve Ag içerikleri sırasıyla 6 g/t ve 19 g/t olan cüruf numunesi ile yapılan gravite deneylerinde en iyi zenginleştirme sonuçlarına Knelson konsantratörünün kullanıldığı durumda ulaşılmaktadır. Ağırlıkça %13,8 oranında bir ağır ürün 30 g/t Au ve 52 g/t Ag içerikleri ile üretilmekte, metal kazanma verimleri ise sırasıyla %64,6 ve %44,4 olarak bulunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, zemin süpürme artığı ve cüruf ile yapılacak tek kademeli gravite deneylerinin sonucunda yüksek Au&Ag içerikleri ve kazanma verimleri ile bir konsantrasyon alınamayacağı, pirometalurjik veya hidrometalurjik işlemler öncesinde safsızlıklarından büyük ölçüde uzaklaştırılmış bir ön konsantrasyon üretilabileceği anlaşılmaktadır.

Tüketimin artması ile doğal kaynakların kullanımı yanı sıra, ikincil kaynakların değerlendirilmesinin ve ekonomiye kazandırılması çok önemlidir. Özellikle, altın ve gümüş gibi değerli metallerin üretim ve işlenmesi adımlarında oluşan kayıpların geri kazanılmasında cevher hazırlama ve zenginleştirme proseslerinin bir ön zenginleştirme işlemi olarak uygulanması ekonomik bir gerekliliktir. Ülkemiz özellikle Dünya mücevherat pazarında ilk 5 ülke arasında yer almakta ve son 20 yılda 400 t altın ve 200 t gümüşü işleyerek mücevherata dönüştürmektedir. Mevcut artıklardan metallerin en yüksek oranda geri dönüşüm teknolojileri ile kazanımı sağlamak ekonomik anlamda ülkemiz için büyük kazanımlar sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Numune temini konusunda yardımlarını esirgemeyen SAY Ramat Kuyumculuk Şti. Ltd.' ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akcil, A., Erust, C., Gahan, S., Ozgun, M., Sahin, M., Tuncuk, A., 2015. Precious Metal Recovery from Waste Printed Circuit Boards Using Cyanide and Non-Cyanide Lixiviants—A Review. Waste Management, 45, 258–271. doi:10.1016/j.wasman.2015.01.017.

- Ammen, C. W., 1997. Recovery and Refining of Precious Metals. 2nd ed. New York: Chapman & Hall.
- Aydın, Ş. B., Gül, A., 2020. Environmentally Friendly Process Instead of Cyanide Leaching on Recycling of Gold and Silver from Jewellery Scraps and Wastes. *Waste Management & Research*, <https://doi.org/10.1177/0734242X20931947>.
- Burat, F., Özer, M., 2018. Physical Separation Route for Printed Circuit Boards (PCBs). *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54, (2), 554-566.
- Burat, F., Baştürkücü, H., Özer, M., 2019. Gold&silver Recovery from Jewelry Waste with Combination of Physical and Physicochemical Methods. *Waste Management*, 89, 10-20, (2019).
- Burat, F., Demirağ, A., Şafak, M. C., 2020. Recovery of Noble Metals from Floor Sweeping Jewelry Waste by Flotation-Cyanide Leaching. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 907-915.
- Canda, L., Heput, T., Ardelean, E., 2016. Methods for Recovering Precious Metal from Industrial Waste. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 106.
- Chmielewski, A. G., Urbanski, T. S., Migdal, W., 1997. Separation Technologies for Metals Recovery from Industrial Wastes. *Hydrometallurgy*, 45, 333-344.
- Corti, C. W., 1997a. Recovery and Recycling In Gold Jewellery Production. *Gold Technology*, 21, 11.
- Corti, C. W., 1997b. In-House Gold Refining: The Options. *Gold Technology*, 21, 31.
- Corti, C. W., 2002. Recovery and Refining of Gold Jewellery Scraps and Wastes. *The Santa Fe Symposium on Jewellery Manufacturing Technology*, 1-20. London.
- Delfini, M., Manni, A., Massacci, P., 2000. Gold Recovery from Jewellery Waste. *Minerals Engineering*, 13 (6), 663-666.
- Ferrini, M., Manni, A., Massacci, P., 1998. Chemical Analyses by ICP-AES of Jewellery Waste in Italy. In *Proc. Biennial International Conference on Chemical Measurement and Monitoring of the Environment*. *Enviro Analysis* 98, Ottawa, 501-506.
- Garside, M., 2020. Gold Demand Worldwide, <https://www.statista.com/statistics/299609/gold-demand-by-industry-sector-share/>. Yayın tarihi 10 Temmuz. Erişim tarihi 26 Temmuz 2020.
- Houseley K., Apling A. C., Chapman R. J., 1998. 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.
- Kaya, M. 2016. Recovery of Metals and Nonmetals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes. *Waste Management*, 57, 64–90. doi:10.1016/j.wasman.2016.08.004.
- Kaspin, S., Mohamad, N., 2015. Investigating the Standard Process of Conventional Gold Refining Process In Kelantan. Malaysia, 2015 International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering.
- Loewen, R., 1989. Refining Jeweler's Wastes. *Proceedings, Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 331.
- Manni, A. İ, Saviano, G., Massacci, P., 2001. Technical Note: Characterization of Gold Particles in Recoverable Waste Matrix. *Minerals Engineering*, 14 (12), 1679-1684.
- Mbaya, R. K. K., 2004. Recovery of Noble Metals from Jewellery Wastes, Tshwane University of Technology, Doctorate Thesis.
- Potgieter, J. H., Potgieter, S. S, Mbaya, R. K. K., Teodorovic, A, 2004. Small-Scale Recovery of Noble Metals from Jewellery Wastes. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 563-572.
- Sabah, E, Şapçı, F. O., 2020. Ramat Geri Kazanım Prosesinde Açığa Çıkan Cürüflardan Gravite Ayırması ile Altın Kazanımı. *Politeknik Dergisi*, doi:10.2339/politeknik.742859.
- Spiller D. E., 1983. Gravity Separation of Gold Then and Now, *Mining Yearbook*, Colorado Mining Association, Colorado.
- Yazıcı, E. Y., Deveci, H., 2014. Ferric Sulphate Leaching of Metals from Waste Printed Circuit Boards. *International Journal of Mineral Processing*, 133, 39-45.
- Wills, B. A. and Napier-Munn, T., 2006. *Wills' Mineral Processing Technology*. 7th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.

