

Metalurjik Cürüflardan Altın ve Gümüşün Endüstriyel Ölçekli Sallantılı Masalar ile Geri Kazanımı

Mohamed Saleh Mohamed AITA¹, Hasan HACİFAZLIOĞLU^{2*}

^{1,2} Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

¹ mohamedsaleh2306@gmail.com, ^{2*} hasanh@iuc.edu.tr

(Geliş/Received: 01/02/2024;

Kabul/Accepted: 10/09/2024)

Öz: Bu çalışmada, metalurjik cüruf içerisinde kalan altın ve gümüşün çevre dostu bir yöntem olan gravite yöntemi ile geri kazanımı araştırılmıştır. Bu amaçla, endüstriyel ölçekli iki farklı gravite cihazı kullanılmıştır. Klasik sallantılı masa ile kaba zenginleştirme, Gemini masası ile konsantreye temizleme işlemi uygulanmıştır. Ayrıca, altın ve gümüşün optimum düzeyde geri kazanımı için klasik sallantılı masada çeşitli çalışma parametreleri optimize edilmiştir. En ideal koşullar; masa eğimi, masa hızı, besleme katı oranı ve yıkama suyu hızının uygun bir kombinasyonunu içermektedir. Deneyler, 7,80 ppm Au ve 131 ppm Ag içeren cüruf numunesi ile yapılmıştır. Cüruflar, bilyalı değirmende 150 µm tane boyutunun altına öğütülmüş ve ardından gravite cihazlarına beslenmiştir. Elde edilen nihai konsantrede Au tenörü 109,24 ppm, Ag tenörü ise 1692,71 ppm bulunmuştur. Nihai sonuçlara göre, cüruf içerisindeki altının %56,16'sı, gümüşün ise %51,82'si geri kazanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Cüruf, Sallantılı masa, Altın, Gümüş.

Recovery of Gold and Silver from Metallurgical Slags Using Industrial Scale Shaking Tables

Abstract: In this study, the recovery of gold and silver remaining in the metallurgical slag using the gravity method, which is an environmentally friendly method, was investigated. For this purpose, two different industrial-scale gravity devices were used. Coarse enrichment was applied with the classic shaking table, and the concentrate was cleaned with the Gemini table. Additionally, various operating parameters have been optimized in the classic shaking table for optimum recovery of gold and silver. The most ideal conditions include an appropriate combination of table inclination, table speed, feed solids rate and wash water speed. Experiments were carried out with slag sample containing 7.80 ppm Au and 131 ppm Ag. The slags were ground to below 150 µm grain size in the ball mill and then fed into the gravity devices. In the final concentrate obtained, the Au grade was found to be 109.24 ppm and the Ag grade was 1692.71 ppm. According to the final results, 56.16% of the gold and 51.82% of the silver in the slag were recovered.

Key words: Slag, Shaking table, Gold, Silver.

1. Giriş

Son yüzyılda, altın ve gümüş üretimi, doğal cevherlerden, yani birincil kaynaklardan hızla artmıştır. Bu metaller, elektronik sektöründe önemli bir rol oynamakta olup, bu paslanmaz metallerin talebi her geçen gün artmaktadır. Ayrıca, altın fiyatlarının son dönemdeki dramatik yükselişleri altını daha da değerli hale getirmiştir. Bu bağlamda, özellikle elektronik ve kuyumculuk faaliyetlerinden kaynaklanan altın ve gümüş artıkları büyük bir inceleme konusu haline gelmiştir. Bununla birlikte, yüksek kaliteli altın ve gümüş madenlerinin azalması ve üretim maliyetlerinin artması gibi nedenler, insanları altın ve gümüşü ikincil kaynaklardan (hurda, cüruf vb. gibi) üretmeye yönlendirmiştir [1-4]. Dünya genelinde, altın ve gümüşün birincil kaynaklardan üretiminde yaygın olarak siyanürle liç yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, kullanılan siyanürün zehirli olması nedeniyle çevreciler tarafından büyük eleştirilerine maruz kalmaktadır. Ancak, çok ince boyutta serbestleşen ve düşük tenörlü cevherler için siyanürle liç işlemi kaçınılmaz bir gereklilik olarak kabul edilmektedir, çünkü bu durumda en etkili yöntem budur. Diğer yandan, yüksek tenörlü (> 5 ppm) ve büyük boyutta (> 38 µm) serbestleşen altın ve gümüş cevherleri için çevre dostu yöntemler (örneğin sallantılı masa, spiral, santrifüjlü cihazlar) uygulanabilmektedir. Burada temel seçim kriteri, serbestleşme tane boyutunun mümkün olduğunca büyük ve tenörün yüksek olmasıdır. Aksi takdirde, siyanürle liç işlemi en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir. Siyanüre alternatif olarak bazı diğer kimyasallar bulunsa da (örneğin tiyoüre, tiyosülfat, iyot-iyodür, klor, amonyak vb.) bunların verimliliği henüz tam olarak kanıtlanmamış veya yüksek miktarlarda kullanılmaları çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır [1,3,5].

Kuyumculuk sektöründe, takı tasarımları, kolye, bilezik, yüzük ve gerdanlık üreten atölyelerde önemli miktarda toz artığı altın ve gümüş oluşmaktadır. Ülkemizde takı üretiminde tonlarca altın ve gümüş kullanılmakta ve bunun %1 ila %5'i arasında toz artık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu altın ve gümüş artıkları önce atölyenin

* Sorumlu yazar: hasanh@iuc.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹0009-0001-7706-3195, ² 0000-0003-1651-7779

zemini süpürülerek toplanır ve daha sonra ramatçılara gönderilir. Ramatçılar, bu tozları önce yakar, sonra kimyasal işlemlerden geçirir ve son olarak eritme fırınında eriterek dore altın olarak dökmektedirler. Artıklardan elde edilen külçedeki altın içeriği %90'lara kadar ulaşabilir. Eritme fırınında alınan artık tozun içeriğine bağlı olarak, altının içinde gümüş, bakır, demir, platin ve paladyum gibi diğer metaller de bulunabilir. Bu metalleri ayrı olarak uzaklaştırmak için altın cevheri rafinasyona gönderilir. Rafinasyon, en verimli koşullar altında altın ve gümüşün %99,99'unu geri kazanabilen bir pirometallurjik işlemdir. Ancak yine de cürufta az miktarda altın ve gümüş kalabilmektedir. Cüruflar, ergitme sırasında flaks maddesi olarak kullanılan kurşun, soda ve boraks artıklarını da içerebilir [6,7]. Bu makaleye konu olan metallurjik cüruflar flaks maddeleriyle kuru karıştırma işleminden geçirilmiş ve düşük seviyelerde altın ve gümüş içeren cüruflardır. Ortalama tane boyutları 20 cm ile birkaç mm arasında değişmektedir. Bu cüruflar içerisindeki altın ve gümüş, yoğunluk farkına dayalı bir yöntem olan sallantılı masalar ile geri kazanılmaya çalışılmıştır. Bu cüruflar içerisindeki altın ve gümüş, yoğunluk farkına dayalı bir yöntem olan sallantılı masalar ile geri kazanılmaya çalışılmıştır. Bu yöntemde herhangi bir kimyasal kullanılmamış ve sadece su kullanılarak tamamen çevre dostu bir yöntemle ayrıştırma sağlanmıştır.

2. Altın ve Gümüş Zenginleştirme Yöntemleri

Altının yoğunluğu çok yüksek olup, 18 gr/cm^3 'dür. Benzer şekilde gümüş de yoğun bir element olup, yoğunluğu $10,49 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Bu değerli metallerin yanında gang olarak bulunan mineraller (oksitler, silikatlar ve çeşitli sülfürlü mineraller) genellikle $1,5$ ile $6,5 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluklarındadır. Dolayısıyla, özgül ağırlık farkıyla altın ve gümüşü gang minerallerinden ayırmak oldukça kolay bir yöntemdir. Bu amaç için cevher zenginleştirmede kullanılan başlıca makineler; sallantılı masalar, spiraller, falkon ve knelson gravite konsantratörleridir. Jigler, daha çok iri ($>500 \mu\text{m}$) cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan makinelerdir. Gravite yöntemlerinde mineraller arasındaki yoğunluk farkı önemlidir ancak altının fiziksel şekli de ayırmada büyük rol oynar. Özellikle küresel tanecikli altınlar daha kolay ayrıştırılır. Ancak, plaka şekilli altın yüksek yüzey alanına sahiptir ve küçük boyutlarda su ile sürüklenerek atık gibi davranabilir [1,4,8-16].

Flotasyon yönteminde ise hidrofob ve hidrofil mineraller yüzdürülerek birbirinden ayrıştırılır. Gang ve altın hidrofil yapıda olduğu için altının ya da gangin yüzdürülmesi reaktif maliyetleri açısından zordur. Bu bakımdan altın cevherine direkt flotasyon (altını yüzdürme) ya da ters flotasyon (gangi yüzdürme) uygulamaları endüstriyel ölçekte yok denecek kadar azdır. Ancak sülfür bakımından zengin olan altın cevherleri için flotasyon uygulaması mevcuttur. Başka bir deyişle, sülfürlü minerale bağlı bulunan altın, sülfürlü mineralin yüzdürülmesiyle gangdan ayrıştırılır. Sülfürlü cevherler içerisinde altın bulunduğu toplayıcı olarak genellikle ksantatlar (KEX, PEX vb.) ve ditiyosülfatlar kullanılır. Köpürtücü olarak ise krezelik asit, çam yağı ve bazı alkoller kullanılabilir. Genel olarak, flotasyonla zenginleştirmede Au kazanım verimi %80'lere kadar çıkabilir. Ayrıca altının aglomerasyonla zenginleştirildiği çalışmalar da mevcuttur [4,6,7,17,18].

Birincil ve ikincil kaynaklardan altın üretiminde en yaygın kullanılan yöntem siyanürlemedir. Altın ve gümüş siyanür ile çok kolay bir şekilde çözündürülebilir. Siyanürleme işlemi genellikle tanklar içerisinde çevreye zarar vermeyecek şekilde yapılır. Bu işleme "tank liçi" ya da "karıştırma liçi" denir. İnce öğütülen cevher bu tanklar içerisinde siyanür ile karıştırılır ve altın çözündürülerek gangdan ayrılır. Siyanür kullanım oranı ton başına cevherin işlenmesi için genellikle 1 kg civarındadır. Kullanılan siyanür NaCN formundadır. Son yıllarda, siyanüre alternatif içerisinde az miktarda siyanür bulunan "Jin Chan" adlı ürün yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu ürünün çevreci olduğu iddia edilmektedir [2,4,19-22].

3. 3. Son Yıllarda Yapılmış Olan Çalışmalar

Sevgül ve ark. tarafından yapılan çalışmada, oksitlenmiş altın cevheri Knelson konsantratörü ile zenginleştirilmiştir. Knelson konsantratörü çalışma parametreleri olan santrifüj kuvvet, besleme hızı, yıkama suyu ve katı içeriğinin ayırma performansı üzerindeki etkileri bir dizi deneyle araştırılmıştır. Deney çalışmalarının sonucunda, besleme hızı ve yıkama suyunun Au geri kazanımı ve kalitesi için en etkili parametreler olduğu belirlenmiştir. Au kalitesini önceliklendirmek suretiyle, optimal parametrelerin sırasıyla g kuvveti, besleme hızı, yıkama suyu ve katı oranı için 60 g, 250 rpm, 3 L/dk ve %40 olduğu belirlenmiştir. Bu koşullarda, %70,8 geri kazanımla 44,4 g/t Au tenöre sahip bir konsantr elde edilmiştir [23].

Bıyıklı tarafından yapılan çalışmada, altın madeni atıklarından altının kazanımı araştırılmıştır. İnce ve ultra ince öğütülen atıklar liç işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada, atık tane boyutunun incelenmesiyle birlikte artan yüzey alanına bağlı olarak belirgin bir liç verimi artışı gözlemlenmiştir. Ekonomik bir değerlendirme yapılmamış olup, çalışma, altın verimine olan etkiyi incelemiştir. Atık numunesinin temin edildiği dönemde, tesis beslemesinin ortalama 3,81 ppm Au içeriğine sahip olduğu ve yapılan testler sonucunda Au veriminin ortalama %87,1, atık Au içeriğinin ise ortalama 0,49 ppm olduğu belirtilmiştir. Atık numunesinin 6 μm 'nin altına

öğütülmesinin ardından yapılan liç deneyleri sonucunda nihai atık tenörü 0,07 ppm'e düşmüştür. Böylelikle tesisin genel altın kazanımı toplamda %98,2'ye çıkarılmıştır [24].

Koizhanova ve ark. tarafından yapılan çalışmada, altının siyanür liçinde ön oksidasyonun etkisi araştırılmıştır. Ön oksidasyon işleminde trichloroisocyanuric acid ve sulfanol sürfaktan kullanılmıştır. Tüm deneyler hidrojen peroksit veya diğer reaktif oksijen bileşikleri kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Doğrudan siyanürleme ile -10 µm boyutundaki numuneden %77,12 Au verimine ulaşılmıştır. "Sulfanol" kullanıldığında altının %83,71'i (oksijensiz olarak) kazanılırken, doğrudan siyanürlemeye göre %6,59'luk bir artış görülmüştür. Trichloroisocyanuric asit (oksijensiz ortamda) ile ön işlem doğrudan siyanürlemeye göre %8,49'luk bir artışla %85,61 altın kazanımı gerçekleşmiştir [25].

Erkan tarafından yapılan çalışmada, gravite ve flaş flotasyonun birlikte kullanımının altın kazanımına etkisi araştırılmıştır. Flaş flotasyonun gravite işlemine göre altın kazanımında %7 daha yüksek performans gösterdiği saptanmıştır. Ancak gravite ile zenginleştirmede elde edilen konsantrenin tenörü daha yüksek bulunmuştur. Bu nedenle, cevherin karakterine bağlı olarak altın kazanımı için bu proseslerden biri veya birden fazlasının seçilmesi gerektiğine kanaat getirilmiştir [26].

Sabah ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kuyumcu ramatından altını geri kazanmak için gravite yöntemleri ile zenginleştirme yapılmıştır. Gravite ile zenginleştirme işlemlerde Knelson konsantratörü kullanılmıştır. Au tenörü 7 ppm olan soda-boraks esaslı ramatın bileşiminde yüksek oranda Fe₂O₃ (%13,25) ve PbO (%11,38) olduğu, boyuta göre yapılan sınıflandırma sonucu altının -500 +212 µm fraksiyonunda yoğunlaştığı görülmüştür. 7 ppm Au tenörüne sahip ramattan en uygun şartlarda %72,40 verimle 16 ppm Au içeren bir konsantre (artığın Au tenörü: 3 ppm) elde edilmiştir. Altının fraksiyonel bazda en yüksek dağılım gösterdiği -212 µm boyutunda besleme ile çalışıldığında, ağır metallerin Au tenörü kayda değer bir artış göstererek yaklaşık 30 ppm'e ulaşmıştır. Verim ise oldukça düşük olup %40 seviyelerinde kalmıştır [27].

Ulucan ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kuyumcu atölyelerinde yapılan işlemler sonucunda ortaya çıkan, yüksek miktarda Au ve Ag içeriklerine sahip zemin süpürme artıklarından altın ve gümüşün geri kazanılması için gravite yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca bu artıkların içerisinde bulunan değerli metalleri ısı işlemleri ile geri kazanırken açığa çıkan ve cüruf içerisinde kalan Au ve Ag'yi geri kazanma amacıyla santrifüjlü ayırıcı cihazı kullanılmıştır. Yüksek metal içeriğine sahip olan zemin süpürme artıkları ile sallantılı masa, MGS ve Knelson konsantratörü kullanılarak yapılan zenginleştirme işlemleri sonucunda, ağırlıkça %24,20 oranında bir ağır ürün 638 ppm Au ve 6227 ppm Ag içerikleri ile kazanılmış, metal kazanma verimleri ise sırasıyla %84,40 ve %82,20 bulunmuştur. Cüruf içerisinde ince boyutlarda hapsolmuş altın ve gümüşün kazanılması amacıyla numune ilk olarak 100 µm'nin altına öğütülmüş ve daha sonra Knelson cihazı ile zenginleştirilmiştir. Ağırlıkça %13,80 oranında bir ağır ürün, 30 ppm Au ve 52 ppm Ag içerikleri ile kazanılmıştır. Metal kazanma verimleri sırasıyla Au ve Ag için sırasıyla %64,60 ve %44,40 olarak bulunmuştur [28].

Burat ve ark. tarafından yapılan çalışmada, flotasyon ve ardından uygulanan liç yöntemi ile mücevher atölyelerindeki zemin süpürme artıklarından altın ve gümüşün geri kazanımı hedeflenmiştir. Flotasyon yönteminin artık fraksiyonunun büyük bir kısmını azaltmada çok başarılı olduğunu görülmüştür. 174 g/t Au ve 1834 g/t Ag içeren bir beslemede yaklaşık %87 Au ve %82 Ag kazanımı ile 280 g/t'den fazla Au ve 2800 g/t'den fazla Ag içeren bir flotasyon konsantresi elde edilmiştir. Altın ve gümüşün çözünme davranışlarını araştırmak için siyanür liçi testleri doğrudan besleme ve köpük üzerinde gerçekleştirilmiştir. 40°C'de ve 1/5 katı/sıvı oranında, 12 g/L NaCN ilavesinde 48 saatlik liçten sonra doğrudan besleme ile elde edilen %68 Au ve %75 Ag, flotasyon ürünü aynı koşullar altında liçi tabi tutulduğunda ise %79 Au ve %84 Ag kazanımı elde edilmiştir [6].

Burat ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kuyumculuk artıklarından (zemin süpürme, parlatmada kullanılan tüm zımpara türler vb.) Au ve Ag'nin geri kazanımı hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, sallantılı masa, MGS, Knelson ve Falcon gibi gravite cihazlarının yanında flotasyon yönteminden de faydalanılmıştır. Gravite yöntemleri ile 183 g/t Au ve 1835 g/t Ag içeren bir numuneden 701 g/t Au ve 6017 g/t Ag içeren bir konsantre elde edilmiştir. Santrifüjlü gravite ayırıcısı ile Ag tenörü 848 g/t'den 7812 g/t'a yükseltilmiştir. Gravite ve santrifüjlü ayırıcılardan gelen ara ürünlerdeki Au ve Ag fraksiyonları başarılı bir şekilde flotasyon ile geri kazanılmış ve her iki metal için toplamda yaklaşık %92'lik bir geri kazanım verimi elde edilmiştir [29].

Aydın ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kuyumcu cüruflarından liç ile altın ve gümüşün geri kazanımı için optimum koşullar araştırılmıştır. Cüruf 28,30 ppm Au ve 42,00 ppm Ag içermekte ve ayrıca yüksek miktarlarda Ca ve Na içermektedir. İncelenen parametreler liç süresi, siyanür konsantrasyonu, partikül boyutu ve katı oranıdır. Optimum koşullarda Au ve Ag geri kazanımları sırasıyla %87,80 ve %81,50 olarak bulunmuştur. Optimum koşullar; %10 katı oranı, 4 gr/L NaCN, -53 µm tane boyutu, 24 saat siyanürleme süresi ve atmosferik ortamda 450 rpm karıştırma hızıdır [30].

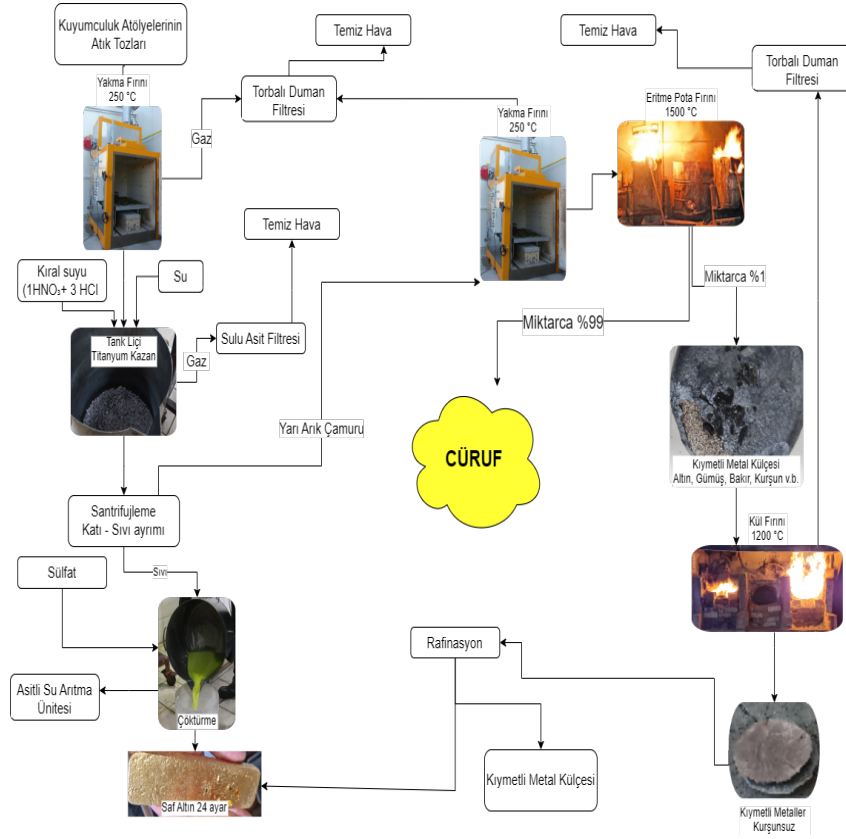
Aydın ve ark. tarafından yapılan çalışmada, birincil ve ikincil kaynaklardan altın ve gümüş kazanımı için flotasyon ve liç yöntemlerini araştırmıştır. Cürufunun flotasyonu ile ilgili çalışmalar sonucunda, -74 µm tane boyutunda, kaba devrede 600+600 ppm miktarında Aerophine 3418 A+Aerofloat 242 kullanımı ile malzemenin doğal pH'sı olan 10,8'de ve 4 kademeli temizleme devresi sonucunda %89 verim ile 614,60 ppm altın içeren ağır

metaller elde edilmiştir. Liç deneylerinde ise %10 pülp tane oranı, 450 devir/dk karıştırma hızında, -53 µm tane boyutunda, 4 gr/L NaCN konsantrasyonunda ve 24 saat liç süresinde %87,80 altın çözünme verimleri elde edilmiştir [31].

4. Materyal ve Metot

4.1. Deneyde kullanılan cürufun oluşumu ve yapısı

Deneyel çalışmalarda kullanılan cüruf numunesi, İstanbul İkitelli OSB’de faaliyet gösteren bir ramat firmasından tedarik edilmiştir. Tesiste cüruf oluşumu Şekil 1’de şematik olarak özetlenmiştir. Şekil 1’e göre, kuyumcu atıkları; yakma fırını, kral suyu işlemi ve ergitme fırınlarından geçerek oluşmaktadır. Cürufların tane boyutu 20 cm’ye kadar çıkabilmektedir. Ancak içinde birkaç milimetrelik parçalar da bulunabilmektedir. Yani, tane boyutlarının dağılımı homojen değildir ve farklı boyutlardadır. Tesis stoğundan konileme-dörtleme yöntemi ile alınan cüruf numunesi, kırma, öğütme ve eleme işlemlerinden geçirilerek homojen hale getirilmiş ve konileme-dörtleme yöntemi ile tekrar azaltılmıştır. Ardından, TS EN 15309:2008 standardına göre X-ışını floresans spektrometresi (XRF) ve Perkin Elmer tarafından üretilen İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi (ICP) cihazında kimyasal analize tabi tutulmuştur. Bu cihazlardan elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, cürufun içindeki altın miktarı 7,80 ppm, gümüş miktarı ise 131 ppm olarak saptanmıştır. Cüruflar, ergitme esnasında kullanılan flaks yapıcılar nedeniyle ağırlıklı olarak oksit ve silikatlardan oluşmaktadır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan cürufun ramatta oluşumunun şematik gösterimi.

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan Cürufun kimyasal analiz sonuçları.

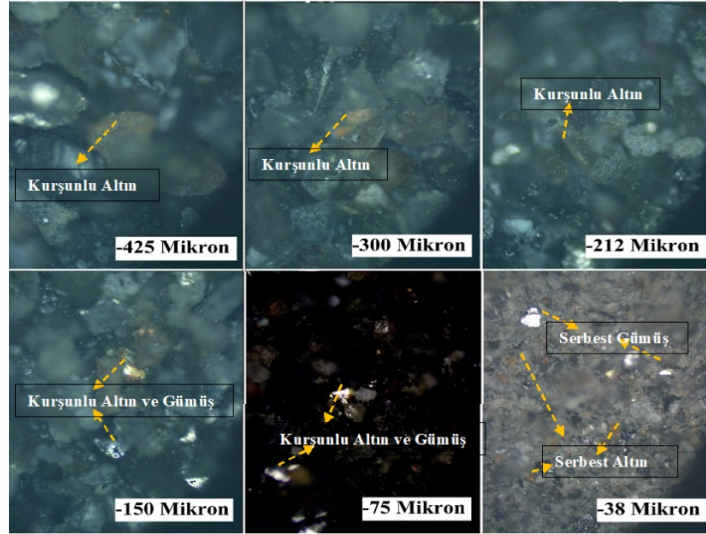
Element	İçerik (ppm)	Bileşik	İçerik %
Au	7,80	SiO ₂	28,85
Ag	131,00	PbO	21,41
As	135,50	Fe ₂ O ₃	15,25
Bi	509,00	Na ₂ O	11,90
Zn	77,00	CaO	9,93
Co	39,80	Al ₂ O ₃	5,03
Cu	179,00	CuO	3,78
Se	53,00	MgO	0,92
Si	39,00	TiO ₂	0,69
-	-	SO ₃	0,56
-	-	K ₂ O	0,34
-	-	Diğer	1,34

4.2. Serbestleşme boyutunun belirlenmesi

Cevher hazırlamada serbestleşme tane boyutunun belirlenmesi için başlıca 2 yöntem vardır. Bunlardan birincisi cevherin belirli boyutlara öğütülmesi ve seçilmiş olan bir zenginleştirme cihazında zenginleştirilmesidir. Hangi boyut grubunda en yüksek verim elde edilirse, o boyut grubu serbestleşme boyutu olarak kabul edilir. Diğer yöntem ise mikroskop altında tane sayımı yöntemidir. Bu yöntemde, değerli mineral, değersiz mineral ve bağlı taneler tek tek sayılarak serbestleşme derecesi yüzde olarak hesaplanır. Bu çalışmada her iki yöntemden de kısmen faydalanılmıştır. Endüstriyel ölçekli sallantılı masaların, altın kazanımı için etkin çalışma tane boyutları genellikle -500+38 µm aralığındadır. Daha ince boyutlarda, verimlilik önemli ölçüde azalır. Bu nedenle, cüruf numunesi -425+0 µm, -300+0 µm, -212+0 µm, -150+0 µm ve -75+0 µm boyutlarında öğütülerek ayrı ayrı ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda Tablo 2’de verilen sonuçlara ulaşılmıştır. Tablo 2’ye göre, kaba sallantılı masa deneyleri, en yüksek altın (Au) ve gümüş (Ag) kazanım verimini -150+0 µm tane boyutunda elde etmiştir. Bu boyut aralığında elde edilen altın kazanım verimi %48,90, gümüş kazanım verimi ise %56,80’dir. Bu nedenle, cüruf numunesinin sallantılı masa zenginleştirilmesi için serbestleşme boyutunun 150 µm tane boyutunun altında olduğu söylenebilir. Ayrıca, öğütülmüş cüruf numunesinin mikroskop altındaki görüntüleri incelendiğinde, özellikle 150 µm’in altındaki boyutlarda altın ve gümüş içeren parlak metalik parçacıkların bulunduğu görülmüştür (Şekil 2). Ancak, bu tanelerin sayısı toplam tane sayısının %5’ini bile geçmemektedir. Yani, altın ve gümüş içeren taneler çoğunlukla cüruf içerisinde görünmez bir halde bulunur ve tane sayımı sağlıklı sonuçlar vermez. Sadece nadiren görünen birkaç metalik parça mikroskop altında gözlemlenmiştir, ancak büyük çoğunluğu camsı homojen malzemeden oluşmaktadır. Dolayısıyla, cürufun 38 µm tane boyutunun daha da altında serbestleştiği tahmin edilmektedir. Ancak daha küçük boyutlarda sallantılı masa kullanmak mümkün olmadığı için, -150 µm tane boyutunun en uygun serbestleşme boyutu olduğu kabul edilmiş ve çalışmalara bu boyutta devam edilmiştir.

Tablo 2. Sallantılı masa ile ön zenginleştirme deney sonuçları.

Tane boyutu (µm)	Konsantre Miktarı (%)	Konsantre Au İçeriği (ppm)	Konsantre Ag İçeriği (ppm)	Au Kazanım Verimi (%)	Ag Kazanım Verimi (%)
-425 +300	7,55	26,04	610,89	25,20	35,20
-300 +212	9,21	32,35	571,76	38,20	40,20
-212 +150	8,60	50,34	765,48	55,50	50,25
-150 +75	4,29	125,20	1733,45	68,90	56,80
-75+0	3,92	55,00	1097,04	47,70	56,65
Besleme	100	7,80	131,00	-	-



Şekil 2. Farklı boyutlardaki cüruf numunelerinin mikroskop altındaki görüntüleri.

4.3. Deneylerde izlenen yöntem

Deneylerde 2x4 m boyutlarında endüstriyel ölçekli Çin yapımı dikdörtgen şekilli sallantılı masa kullanılmıştır. Bu masanın eşiklerinin yüksekliği 3 mm, eşikler arası mesafe ise 6 mm'dir. Optimum Au ve Ag kazanımının sağlanabilmesi için aşağıda verilen çalışma parametreleri ile sallantılı masada bir dizi deneyler yürütülmüştür. İncelenen sallantılı masa parametreleri:

- Masa eğimi (0,50, 2,00, 4,00, 7,00 derece).
- Masa hızı (200, 240, 280, 320, 360 dev./dk).
- Katı oranı (%15, %25, %35, %45).
- Yıkama suyu miktarı (10, 20, 30, 40 lt/dk).

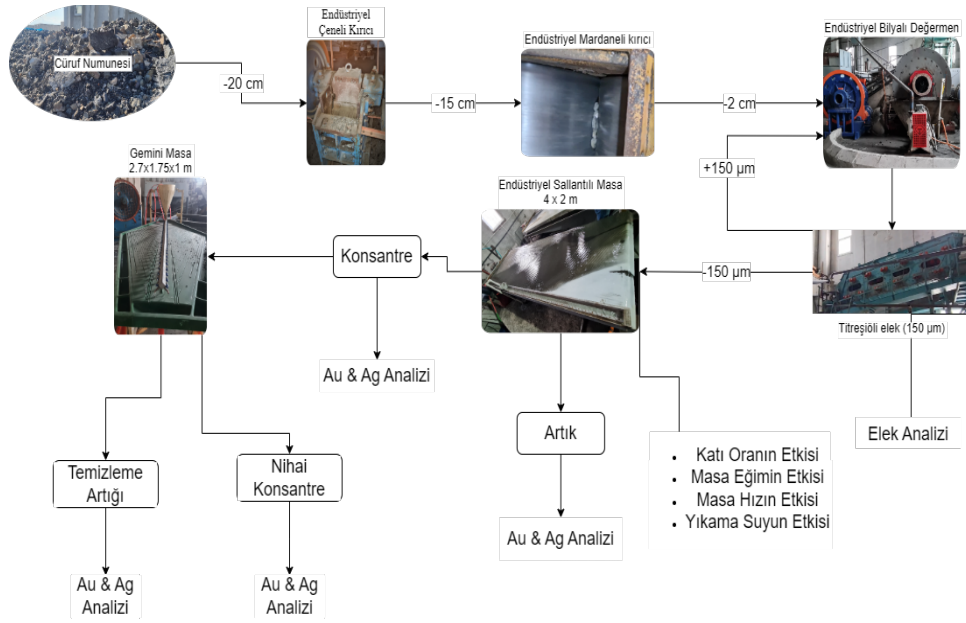
Yukarıdaki parametreler optimize edildikten sonra, elde edilen konsantre temizlenmek üzere 0,75 kW ile 1,1 kW arasında değişen güçlere sahip Gemini masasına verilmiştir. Gemini masası, 2,70x1,75x1,00 m ölçülerindedir ve saatlik zenginleştirme kapasitesi 0,120 tondur. Gemini masası, altın ayrışmasında daha hassas olduğu için temizleme aşamasında tercih edilmiştir. Gemini masası kullanılarak Au ve Ag kazanımını artırmak için 4 farklı temizleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılan parametreler aşağıdaki gibidir:

- Masa eğimi: 3 derece
- Masa hızı: 300 devir/dk
- Besleme katı oranı: %20
- Yıkama suyu miktarları: 16 lt/dk

Şekil 3'te deneylerde izlenen yöntemin akım şeması verilmiştir. Şekil 3'e göre, cüruf numunesi önce geleneksel endüstriyel ölçekli sallantılı masalarda zenginleştirilmekte ve ardından temizleme işlemi için Gemini masasına verilmekte ve bu işlemlerin sonucunda nihai konsantre elde edilmektedir. Au ve Ag kazanım verimleri Denklem 1 ile hesaplanmıştır.

Bu eşitlikte; V: Zenginleştirme verimi (%), B: Besleme miktarı (%), b: Besleme tenörü (ppm), K: Konsantre miktarı (%), k: Konsantre tenörü (ppm)'dür.

$$V = [(K \times k)/(B \times b)] \times 100 \quad (1)$$



Şekil 3. Deneylerde izlenen yöntemin özet akım şeması.

5. Bulgular ve Tartışma

5.1. Masa eğiminin verim üzerine etkisi

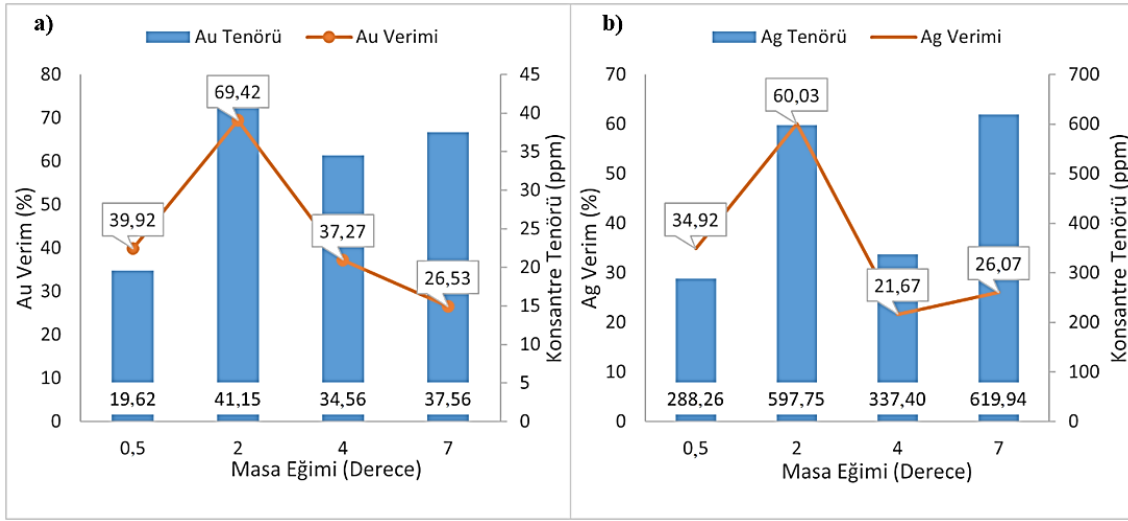
Sallantılı masalardaki eğim, cüruftan Au ve Ag'nin geri kazanımda önemli bir etkiye sahiptir ve zenginleştirmesinde önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Test edilen eğimler 0,50, 2,00, 4,00 ve 7,00 derecedir. Bu deneylerde, besleme tane boyutu -150 µm, besleme hızı 1 t/h, masa hızı 320 devir/dk, katı oranı %25 ve yıkama suyu miktarı 30 lt/dk olarak sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te ve grafiksel olarak Şekil 4a ve 4b'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, genel olarak eğim arttıkça Au ve Ag kazanım miktarlarının da arttığı görülmektedir. Ancak 2 derecelik eğimden sonraki denemelerde verim düşmüştür. Bu yüzden optimum eğim 2 derece olarak belirlenmiştir.

5.2. Masa hızının verim üzerine etkisi

Masa hızı ayırma verimini etkileyen önemli bir parametredir. Bu bağlamda; 200, 240, 280, 320 ve 360 devir/dk masa hızlarında ayrı ayrı deneyler yürütülmüştür. Bu deneylerde, besleme tane boyutu -150 µm, besleme hızı 1 t/h, eğim 2 derece, katı oranı %25 ve yıkama suyu miktarı 30 lt/dk'dır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4 ve grafiksel olarak Şekil 5a ve 5b'de gösterilmiştir. Masa hızı 320 devir/dk'dan sonra verimde düşmeler meydana gelmiştir.

Tablo 3. Masa eğimi etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

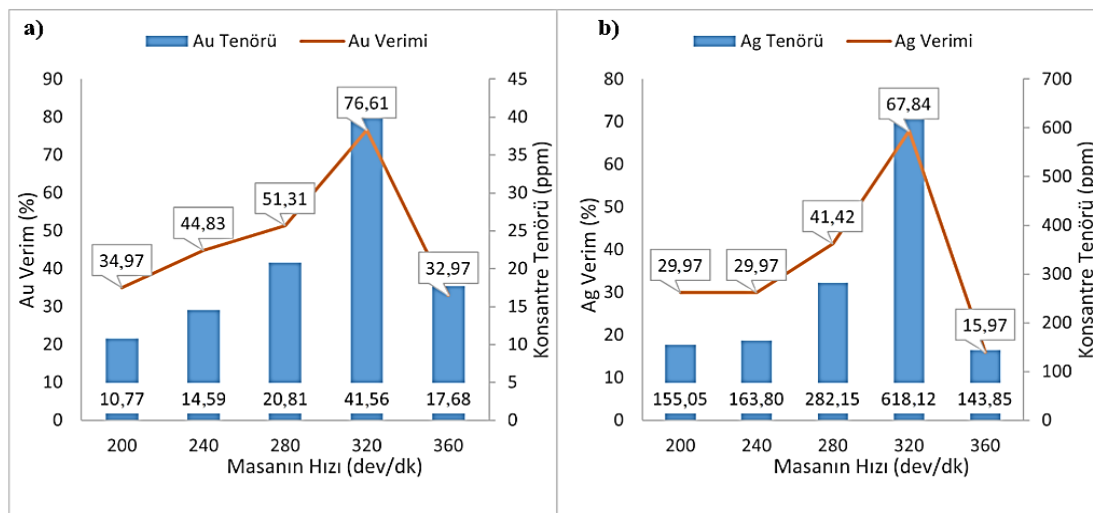
Masa Eğimi (°)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
0,50	Konsantre	15,87	19,62	288,26	39,92	34,92
	Artık	84,13	5,57	101,34	60,08	65,08
2,00	Konsantre	13,16	41,15	597,75	69,42	60,03
	Artık	86,84	3,47	66,32	38,58	43,97
4,00	Konsantre	8,41	34,56	337,40	37,27	21,67
	Artık	91,59	5,34	112,04	62,73	78,33
7,00	Konsantre	5,51	37,56	619,94	26,53	26,07
	Artık	94,49	6,06	102,49	73,47	73,93
	Besleme	100,00	7,80	131,00	100,00	100,00



Şekil 4. Masa eğimine bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

Tablo 4. Masa hızının etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

Masa Hızı (devir/dk)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
200	Konsantre	25,32	10,77	155,05	34,97	29,97
	Artık	74,68	6,79	122,85	65,03	70,03
240	Konsantre	23,97	14,59	163,80	44,83	29,97
	Artık	76,03	5,66	120,66	55,17	70,03
280	Konsantre	19,23	20,81	282,15	51,31	41,42
	Artık	80,77	4,70	95,01	48,69	58,58
320	Konsantre	14,38	41,56	618,12	76,61	67,84
	Artık	84,62	2,16	55,98	23,39	36,16
360	Konsantre	14,54	17,68	143,85	32,97	15,97
	Artık	85,46	6,12	128,81	67,03	84,03
	Besleme	100,00	7,80	131,00	100,00	100,00



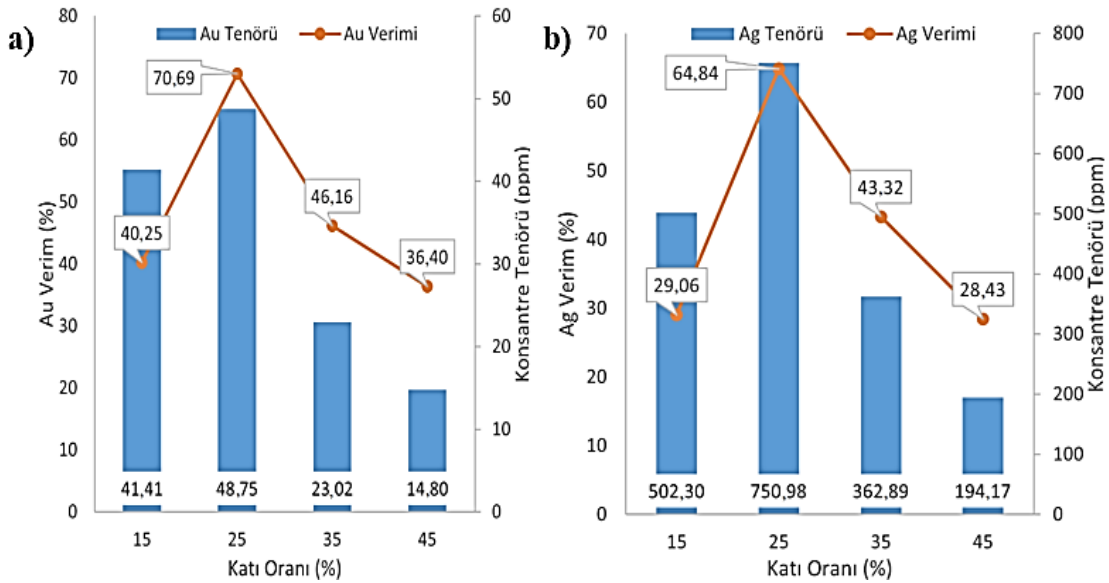
Şekil 5. Masa hızına bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

5.3. Katı oranın verim üzerine etkisi

Yoğunluğa dayalı zenginleştirme yöntemlerinde, suyun dengesini sağlayan en önemli faktörlerden biri de katı oranıdır. Besleme haznesinde hazırlanan katı oranı; %15, %25, %35 ve %45 olacak şekilde deneyler yürütülmüştür. Bu deneylerde; besleme tane boyutu -150+0 µm, besleme hızı 1 t/h, eğim 2 derece, masa hızı 320 devir/dk ve yıkama suyu miktarı 30 lt/dk'dır. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Tablo 5 ve grafiksel olarak Şekil 6a ve 6b'de verilmiştir. %25 katı oranı en yüksek verim ve tenör elde edildiği için seçilmiştir.

Tablo 5. Katı oranının etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

Katı Oranı (%)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
15	Konsantre	7,58	41,41	502,30	40,25	29,06
	Artık	90,42	5,15	102,77	59,75	70,94
25	Konsantre	11,31	48,75	750,98	70,69	64,84
	Artık	88,69	2,58	51,94	29,31	35,16
35	Konsantre	15,64	23,02	362,89	46,16	43,32
	Artık	84,36	4,98	88,02	53,84	56,68
45	Konsantre	19,18	14,80	194,17	36,40	28,43
	Artık	80,82	6,14	116,00	63,60	71,57
	Besleme	100,00	7,80	131,00	100,00	100,00



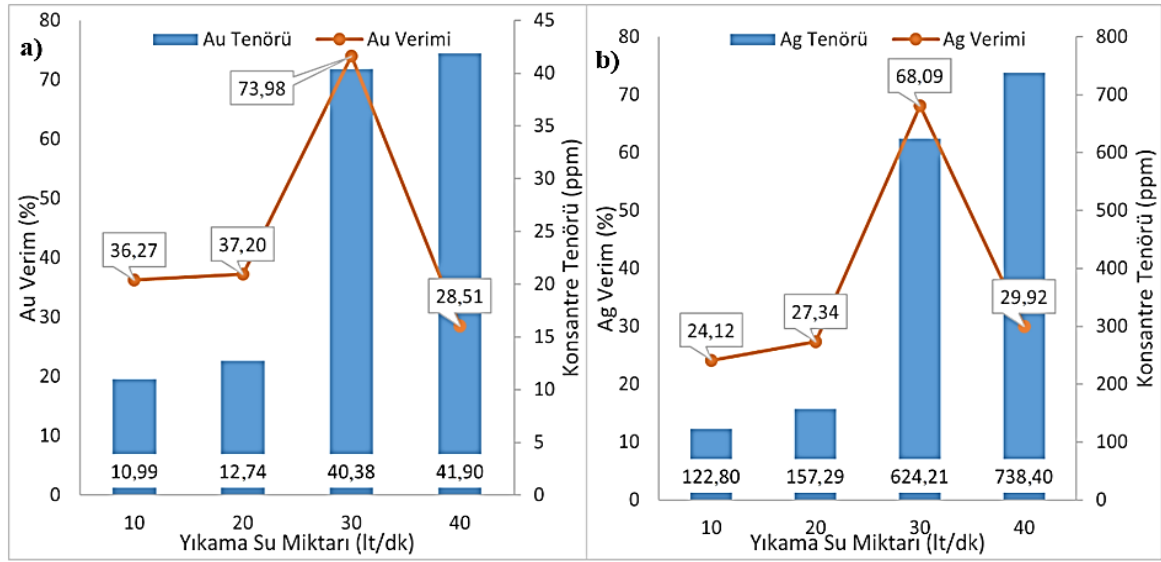
Şekil 6. Katı oranına bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

5.3. Yıkama suyunun verim üzerine etkisi

Sallantılı masalardaki bir diğer önemli parametre yıkama suyu miktarıdır. Eğer yıkama suyu gereğinden fazla kullanılırsa, yüksek yoğunluklu kıymetli metaller düşük yoğunluklu artığa doğru kayabilir ve bu kayıplara neden olabilir. Diğer yandan, yetersiz yıkama suyu kullanıldığında, yüksek yoğunluklu kıymetli mineraller düşük yoğunluklu minerallerle karışabilir ve konsantre bölgesinden uzaklaştırılması zorlaşabilir ve bu da konsantrenin tenörünün düşük olmasına yol açar. Deneylerde test edilen yıkama suyu miktarları 10, 20, 30 ve 40 L/dk.'dır. Diğer parametreler; besleme tane boyutu -150+0 µm, besleme hızı 1 t/h, masa eğimi 2 derece, masanın hızı 320 devir/dk ve katı oranı %25'tir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6 ve Şekil 7a ve 7b'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Su miktarı arttıkça konsantre Au tenöründe artış olmuştur. 30 L/dk en uygun yıkama suyu miktarı olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Yıkama suyu etkisinin incelendiği deneylerin sonuçları.

Yıkama Suyu Miktarı (L/dk)	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
10	Konsantre	25,73	10,99	122,80	36,27	24,12
	Artık	74,27	6,69	133,84	63,73	75,88
20	Konsantre	22,77	12,74	157,29	37,20	27,34
	Artık	77,23	6,34	123,25	62,80	72,66
30	Konsantre	14,29	40,38	624,21	73,98	68,09
	Artık	85,71	2,37	48,77	26,02	31,91
40	Konsantre	5,31	41,90	738,40	28,51	29,92
	Artık	94,69	5,89	96,95	71,49	70,08
	Besleme	100	7,80	131,00	100,00	100,00

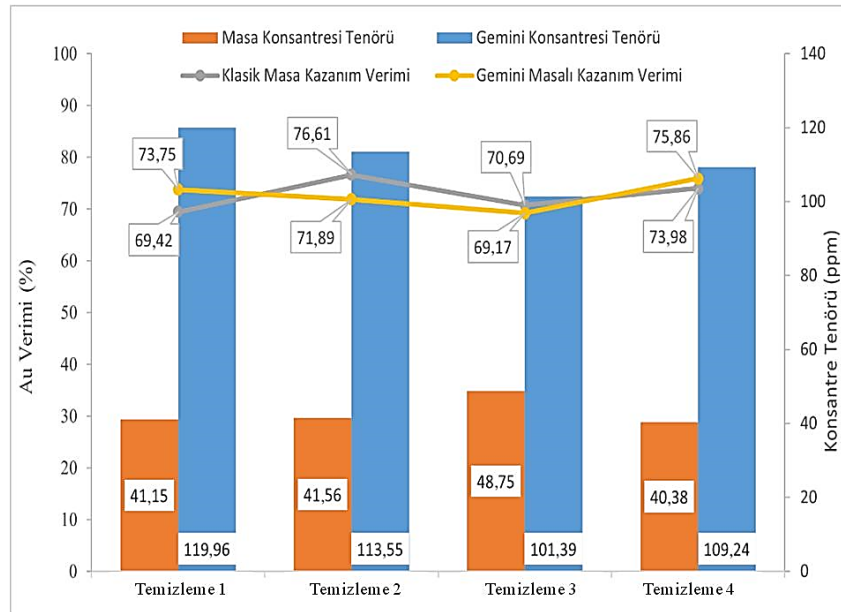
**Şekil 7.** Yıkama suyu miktarına bağlı olarak a) Au, b) Ag verimi ve tenörünün değişimi.

5.4. Gemini masası temizleme deney sonuçları

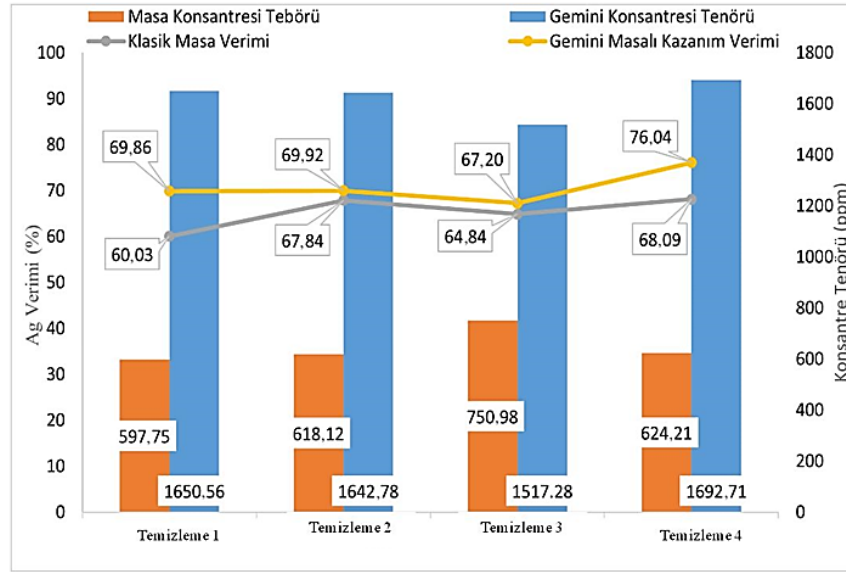
Gemini masası, kompakt bir yapıya sahiptir ve daha hassas bir ayırım yapabilme yeteneğine sahiptir. Genellikle literatür çalışmalarında temizleme aşamalarında kullanılmıştır ve etkin bir şekilde 45 mikrona kadar ayırım yapabildiği belirtilmiştir. Bu nedenle, klasik sallantılı masalardan elde edilen konsantrelerin kalitesini (**tenörünü**) artırmak amacıyla gemini masasına beslenmiş ve tekrar zenginleştirilmiştir. Gemini masası, 2,70x1,75x1,00 m ölçülerinde ve 0,120 ton kapasitelidir. Deneyler; masa eğimi 3 derece, masa hızı 300 devir/dk, besleme katı oranı %20 ve yıkama suyu hızı 16 L/dk olacak şekilde yapılmıştır. Gemini masasına beslenen klasik sallantılı masa ürünlerinin altın tenörleri sırasıyla; 41,15 ppm, 41,56 ppm, 48,75 ppm ve 40,38 ppm ve gümüş tenörleri ise sırasıyla; 597,75 ppm, 618,12 ppm, 750,98 ppm ve 624,21 ppm olarak bulunmuştur. Deney sonuçları Tablo 7'de sunulup, grafiklerle Au için Şekil 8 ve Ag için Şekil 9'da gösterilmiştir. Genel olarak, Gemini masası konsantredeki altın ve gümüşün tenörünü arttırmaktadır. Ancak, genel bir kazanım verim değeri hesaplandığında, Gemini masasından sonra bir miktar azalma gözlemlenmiştir, bu azalma %17 ile %22 arasındadır. Bu durumu daha iyi anlamak için, Au için Şekil 8 ve Ag için Şekil 9'daki lineer grafikler incelenebilir.

Tablo 7. Gemini masası ile temizleme deney sonuçları.

	Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
Temizleme Deneyi 1	Konsantre	25,30	119,96	1650,56	73,75	69,86
	Artık	74,70	14,46	241,18	26,25	30,14
	Besleme	100,00	41,15	597,75	100,00	100,00
Temizleme Deneyi 2	Konsantre	26,31	113,55	1642,78	71,89	69,92
	Artık	73,69	15,85	252,28	28,11	30,08
	Besleme	100,00	41,56	618,12	100,00	100,00
Temizleme Deneyi 3	Konsantre	33,26	101,39	1517,28	69,17	67,20
	Artık	66,74	22,52	369,10	30,83	32,80
	Besleme	100,00	48,75	750,98	100,00	100,00
Temizleme Deneyi 4	Konsantre	28,04	109,24	1692,71	75,86	76,04
	Artık	71,96	13,55	207,86	24,14	23,96
	Besleme	100,00	40,38	624,21	100,00	100,00



Şekil 8. Gemini masası ile temizleme sonucunda Au verimi ve tenörü.



Şekil 9. Gemini masası ile temizleme sonucunda Ag verimi ve tenörü.

6. Tartışma ve Sonuç

Cürüfların ilk halinin eriyik olduğu göz önünde bulundurulduğunda, tüm elementler birbiri içerisinde ergimiş ve yayılmış bir formda bulunur. Bu nedenle altın ve gümüşün tamamen serbest olduğu belli bir tane boyutu aralığı yoktur. Ayrıca bu metaller çok ince boyutlarda (<20 mikron) dahi diğer elementlere (flaks yapıcı maddelere) bağlı olarak bulunabilirler. Dolayısıyla, yeterince serbestleşmemiş tanelerin gravite yöntemiyle verimli bir şekilde zenginleştirilmesi oldukça zordur. Bu çalışmada, metalurjik cürüflar gravite yöntemi ile zenginleştirilmiş ve endüstriyel ölçekli masaların performansı ortaya konmuştur.

Klasik sallantılı masada eğim, masa hızı, katı oranı ve yıkama suyu miktarı gibi faktörler incelenmiştir. En uygun masa eğimi 2 derece olarak belirlenmiş ve yüksek eğimin verim üzerinde olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Masa hızı arttıkça, ağırlıkça kazanım azalırken, konsantrelerdeki altın ve gümüş içeriği artmıştır. Optimum masa hızı 320 devir/dk olarak bulunmuştur. Katı oranının artması ağırlıkça kazanımı artırmış ancak altın ve gümüş içeriği azalmıştır. Optimum katı oranı %25 olarak belirlenmiştir. Yıkama suyu miktarının artması ağırlıkça kazanımı azaltırken, altın ve gümüş içeriğini arttırmıştır. Optimum yıkama suyu miktarı 30 lt/dk olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda, cüruf numunesinin altın içeriği, klasik sallantılı masa ile 7,80 ppm seviyesinden 40,38 ppm seviyesine çıkarılmıştır. Benzer şekilde, konsantredeki gümüş içeriği de artmış ve 131 ppm seviyesinden 624,21 ppm seviyesine yükselmiştir. Ancak, bu konsantreler hala metalurjik fırına beslenip, ekonomik altın üretimi için, yeterince yüksek tenörde değildir. Bu nedenle, klasik sallantılı masalardan gelen cüruf konsantreleri, daha hassas bir ayırım yapabilen Gemini masasına beslenmiştir. Gemini masasında klasik masanın konsantresi temizlenmiş ve nihai sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de verilen nihai sonuçlara göre, konsantrede Au tenörü 109,24 ppm, Ag tenörü ise 1692,71 ppm bulunmuştur. Ayrıca, 2 kademeli zenginleştirme işlemi sonucunda 13,55 ppm Au ve 207,86 ppm Ag içeren bir ara ürün elde edilmiştir. Nihai konsantredeki altın kazanım oranı %56,16, Ag kazanım oranı ise %51,82 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ışığında, sallantılı masaların cürüflardan altın ve gümüşün yüksek verimlilikle kazanımında tek başına yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak, sallantılı masalar ile zenginleştirme çevre dostudur ve diğer yöntemlere (liç ve flotasyon) göre çok daha ekonomiktir. Bu bakımdan, cürüflardan değerli metallerin geri kazanımı amacıyla ön zenginleştirici olarak kullanılabilir. Sallantılı masalarla cüruftaki gangin önemli miktarı uzaklaştırılarak, akabinde uygulanacak olan liç ve flotasyon prosesleri rahatlatılabilir. Bu yolla hem işletim maliyetleri düşer hem de kimyasal tüketimi (siyanür ya da kral suyu) azaltılmış olur.

Tablo 8. Klasik sallantılı masa ve akabinde Gemini masası ile temizleme nihai verim sonuçları.

Ürünler	Miktar (%)	Au İçerik (ppm)	Ag İçerik (ppm)	Au Kazanma Verimi (%)	Ag Kazanma Verimi (%)
Nihai Konsantre	4,01	109,24	1692,71	56,16	51,82
Ara Ürün (Gemini Masanın Artığı)	10,28	13,55	207,86	17,80	16,29
Artık	85,71	2,37	48,77	26,04	31,89
Besleme	100	7,8	131	100	100

Teşekkür

Yazarlar, test ve analiz çalışmalarının yürütülmesinde kolaylık sağlayan İstanbul'daki Mısırlı Ramat firmasına ve İstanbul Üniversitesi Kimya Bölümünden Prof. Dr. Musa Şahin'e teşekkürü bir borç bilirler. Ayrıca, makalenin değerlendirilmesi aşamasında katkıda bulunan hakemlere çok teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Şahin E. Ramat işleme ve geri kazanım tesisleri için atık yönetimi uygulamalarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Bilimleri Anabilim Dalı, 2021.
- [2] Qin H, Guo X, Tian Q, Zhang L. Pyrite enhanced chlorination roasting and Its efficacy In gold and silver recovery from gold tailing. Sep Purif Technol, 2020; 250.
- [3] Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Madencilik Politikaları, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), 2018.
- [4] Ünal İH, Tuncel S, Yoleri B, Arslan M. Türkiye ve Dünyada Altın, Mta Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı, 2016; Erişme adresi: Altin.pdf (mta.gov.tr)
- [5] Syed S. Recovery of gold from secondary sources – a review. Hydrometallurgy. 2012; 115-116: 30-51.
- [6] Burat F, Demirağ A, Demirağ M C. Recovery of noble metals from foor sweeping jewelry waste by fotation-cyanide leaching. Mater Cycles Waste Manag, 2020; 22: 907-915.
- [7] Durmaz C. Kuyumculuk kökenli curuflardan fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile altın geri kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 2012.
- [8] Yıldız N. Altın Madenciliği. 2022, https://www.researchgate.net/publication/284186106_Altin_Madenciligi.
- [9] Al Sultan MSA. Development of a new centrifugal separator. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Technical University Department of Mineral Processing Engineering, 2021.
- [10] Osmanlı O. Knelson santrifüj ayırıcısı ile kop (Erzurum) kromit cevherinin zenginleştirilmesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019.
- [11] Tanrıverdi M, Uygun C. Cevher Zenginleştirmede son yıllarda geliştirilmiş gravite yöntemleri. Aydın'da Madencilik: Potansiyeli ve Değerlendirilmesi. TMMOB. 2019; 120 – 122.
- [12] İzerdem D. Yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında tane boyunun etkisinin incelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018.
- [13] Yamantaş A Y, Can N M. Yer çekimi ile zenginleştirme yöntemleri kullanılarak Cu-Au cevherinden altın kazanımı çalışmaları. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni. Yerbilimleri. 2018; 39 (1): 65-77.
- [14] Korkmaz AA. Zenginleştirme yöntemlerinin değişik linyitlerin piroliz ürün verimleri üzerine etkisi. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2017.
- [15] Güçbilmez D. Spiral zenginleştiricilerde tane boyunun performansa etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2013.
- [16] Önel Ö. Altın cevherinin zenginleştirilmesinde kullanılan yoğunluğa dayalı zenginleştirme yöntemleri ve örnek bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim Dalı, 2011.
- [17] Liu R, Qin W, Jiao F, Wang X, Gong M, Yang Y, Pei B, Lai C. Enhanced flotation of refractory gold ore by using sulfur-oil agglomeration with (NH₄)₂S₂O₃ as regulator in weak acidic pulp. Miner Eng, 2016; 93: 24-31.
- [18] Agorhom E, Skinner W, Zanin M. Influence of gold mineralogy on its flotation recovery inaporphyry copper-gold ore. Chem Eng Sci, 2013; 99: 127-138.
- [19] Li H, Yin S, Li S, Zhang L, Peng J, Yang K. Investigation on the recovery of gold from pretreated cyanide tailings using chlorination leaching process. Shep Sci Technol, 2019; 56 (1): 45-43.
- [20] Fu P, Li Z, Feng J, Bian Z. Recovery of gold and iron from cyanide tailings with a combined direct reduction roasting and leaching process. Metals. 2018.
- [21] Çelik H, Mordoğan H, İpekoğlu Ü. Siyanürlü altın üretim tesisi atıklarını arıtma yöntemleri. Madencilik. 1997; 1.

- [22] Yılmaz H. Jin chan ve sodyum siyanür kimyasallarının altın kazanımında liç verimlerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.
- [23] Sevgül S, Oluklulu S, Bozkurt V. Concentration of an oxidized gold ore by the knelson concentrator. 17'h Imps-2022; 15-17 December 2022 İstanbul-Türkiye.
- [24] Bıyıklı B. İnce öğütmenin karıştırılmalı tank liçi atığından altın geri kazanımı üzerindeki etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022.
- [25] Koizhanova AK, Berkinbayeva A N, Magomedov D R, Azlan M N, Atanova O V, Kamalov E M, Erdenova M B. Study of the technology for gold recovery from gravity flotation concentrate from ore beneficiation with the use of oxidizing reagents. J Inst Eng India: D, 2022; 103(2):663–672.
- [26] Erkan E, Altın kazanımında flaş flotasyon ve gravite ile zenginleştirme proseslerinin performanslarının karşılaştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022.
- [27] Sabah E, Oruç Şapçı F. Ramat geri kazanım prosesinde açığa çıkan cürüflardan gravite ayırması ile altın kazanımı. Politeknik Dergisi. 2021.
- [28] Ulucan T, Özer M, Baştürkçü H, Burat F. Kuyumculuk kökenli artıklardan altın ve gümüşün geri kazanımı. Bilimsel Madencilik Dergisi. 2021; 60(1): 51-61.
- [29] Burat F, Baştürkçü H, Özer M. Gold&Silver recovery from jewelry waste with combination of physical and physicochemical methods. Waste Management. 2019; 89: 10–20.
- [30] Aydın B, Gül A. Recycling of gold and silver by leaching from jewellery slags. 15th International Mineral Processing Symposium. İstanbul-Turkey, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
- [31] Aydın ŞB. Birincil ve ikincil kaynaklardan farklı yöntemlerle altın ve gümüş kazanımı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, 2015.