



Araştırma Makalesi

Gönderi  
14/12/2023

Kabul  
25/12/2023

Yayın  
31/12/2023

## Kromit Flotasyonunda Toplayıcı Karışımların Etkisi

 Savaş ÖZÜN<sup>a,\*</sup>,  Semih GİRGIN<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazar e-mail adresi: savasozun@sdu.edu.tr

### Özet

Kromit mineralleri birlikte buldukları yankayaç ve gang mineralleri ile fiziksel özelliği olan özgül ağırlık farkının yüksek olması sebebiyle çoğunlukla gravite zenginleştirme yöntemleri kullanılarak ayrılmaktadır. Ancak gerek teknolojik gelişmeler ve gerekse bu gelişmelere bağlı olarak birçok sanayi dalının temel bileşeni olan kromite olan talebin artması gravite, manyetik ayırma vb. konvansiyonel yöntemler ile zenginleştirilmesi ekonomik anlamda mümkün olmayan ince boyutta serbestleşen karmaşık yapıdaki cevherlerin işletilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen mikro-flotasyon testleri ile anyonik ve katyonik toplayıcı karışımlarının kromit flotasyon verimine olan etkileri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilere göre kromitin toplayıcısız ortamda % 10'dan daha düşük olan flotasyon verimi, artan toplayıcı derişimi ile birlikte artmakta ve 60 mg/lit toplayıcı karışımı varlığında nötr-bazik pH koşullarında yaklaşık % 80'e çıkmaktadır. 30 mg/lit toplayıcı karışımları varlığında ve pH 8.5-9.5 aralığında gerçekleştirilen testlerde ise gerek hava akış hızının gerekse pülpteki mineral miktarının flotasyon verimine olan etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuçlara göre toplayıcı derişiminin düşük olması, dolayısıyla kromit minerallerinin yeterli hidrofobik yüzey özellik kazanamaması sebebiyle mineral tanelerinin hava kabarcıklarından koparak tekrar pülpe karıştığı görülmüştür. Böylece artan hava akış hızı ve mineral miktarlarında sırasıyla % 20 ve % 30'un altında flotasyon verimleri elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kromit, Flotasyon, Toplayıcı karışımı, Flotasyon verimi

## Effect of Collector Mixtures on Chromite Flotation

### Abstract

Chromite minerals are mostly separated using gravity processing methods due to their high specific gravity difference with the coexisting rock and gangue minerals. However, depending on technological developments, demand for chromite, which is the basic component of many industries, is increasing. Thus, this requires the exploitation of ores with a complex structure, which is liberated in fine sizes, that are not economically possible to enrich with conventional methods like gravity, magnetic separation, etc. In this context, the effects of anionic and cationic collector mixtures on chromite flotation efficiency were determined through micro-flotation tests carried out within the scope of this study. According to the experimental results, the flotation efficiency of chromite, which is less than 10 % in a collector-free environment, increases with increasing collector concentration and reaches approximately 80 % in neutral-basic pH conditions in the presence of 60 mg/lit collector mixture. In the tests carried out in the presence of 30 mg/lit collector mixtures and a pH range 8.5-9.5, the effects of both the air flow rate and the amount of minerals in the pulp on the flotation efficiency were examined separately. According to the results, it was observed that the mineral particles detach from the air bubbles and turn back into the pulp because of the insufficiently hydrophobic surface properties formed by the low collector concentration. Thus, flotation efficiencies below 20 % and 30 % were obtained with increasing air flow rate and mineral amounts, respectively.

**Keywords:** Chromite, Flotation, Collector mixture, Flotation recovery

## 1. Giriş

Dünya krom yataklarının içinde bulunduğu ultrabazik-bazik kayaç litolojileri başlıca 3 ana başlık altında incelenmektedir. Bunlardan ilki ve krom rezervlerinin büyük bir çoğunluğunu (>%90) oluşturan düşük Cr/Fe ve yüksek demir içerikli stratiform (katmanlı oluşumlu) yatak tipleridir. Bu tip yataklardaki kromitit seviyeleri, kalınlığı birkaç mm ile 1-2 m arasında değişen katmanlar sunan, yanal olarak km'lerce takip edilebilen tek bir katmandan oluşabildiği gibi birbirlerine yaklaşık paralel olarak gelişmiş birden fazla sayıda katmanlardan da oluşabilmektedir [1-3, 5].

İkinci yataklanma podiform tipi yataklanmalardır. Bu tür yataklar ofiyolitlerle çok yakından ilişkili olup, orojenik kuşaklarda görülen Alp tipi düzensiz peridotit kütleleri veya peridotit-gabro kompleksleri içinde bulunmaktadır. Bu tür kayaçlar genellikle ofiyolitlerin ve okyanusal kabuğun orojenik hareketlerle taşınmış parçalarıdır. Ülkemizin de sahip olduğu kromit rezervleri yüksek Cr/Fe ve krom içerikli Alpin tip podiform yataklanmalarından oluşturmaktadır. Üçüncü tip ise çoğunlukla Alaska'da bulunan ve madenciligi en az yapılan eşmerkezli bir iç düzene sahip konsantrik ultrabazik kayaç topluluklarına bağlı krom yataklarıdır. Doğada uvarovit, krokoit, bellit vb. gibi farklı renk, yoğunluk, sertlik özellikleri gösteren ve farklı oranlarda krom içeren birçok mineral bulunmasına rağmen kromit; en yüksek Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% 68) içeriğine sahip ve ekonomik anlamda madenciligi yapılan tek mineraldir [1-6].

Çoğunlukla açık işletme yöntemi ile işletilmekte olan krom cevherleri, maden yatağının bulunduğu topoğrafya şartlarına ve maden yatağının boyutlarına bağlı olarak yeraltı işletme yöntemleri ile de işletilebilmektedir. Üretilen cevherin yüksek tenörlü olması durumunda (> % 32 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) doğrudan kullanım alanı bulabiliyorken, düşük tenörlü cevherler ise bir ya da birden çok zenginleştirme yönteminin ayrı ayrı/bir arada kullanımı ile sanayi kullanım şartlarına uygun hale getirilmektedir [7-10].

Krom cevherleri kazı işlemleri sonrası maden ocağında yığından veya zenginleştirme tesisinde hareketli bant konveyör üzerinden işçiler tarafından el ile ayıklama (tavuklama) yöntemi kullanılarak zenginleştirilebilmektedir. Ancak el ile ayıklama yöntemi düşük kapasitelerde (2-5 ton/saat/tecrübeli bir işçi) ve belirli bir boyutta (-30+3 cm) cevher için uygulanabilmektedir. Ortalama 4.5-4.8 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip olan kromit ile daha düşük yoğunluklara sahip gang mineralleri (yan kayaç) arasındaki yoğunluk farkı, yerçekimi ile ayırma yöntemini yaygın olarak benimsenen zenginleştirme yöntemi yapmaktadır. Kromit ile gang minerallerinin sulu ortamda çökeltme hız farklılıklarından yararlanılarak gerçekleştirilen yerçekimi ayırmasında cevherin yapısına ve tane serbestleşme boyutuna bağlı olarak jig, sallantılı masa, spiral vb. ekipmanlar kullanılmaktadır. Yerçekimi ayırması +0.1 mm boyutuna kadar zenginleştirme imkanı sunsa da, küçülen tane boyutu ile birlikte ayırma işlemi zorlaşmakta, dolayısıyla zenginleştirme verimi ve kapasite azalmaktadır. Zayıf manyetik özellik göstermesi nedeniyle kromit için uygulanan bir diğer zenginleştirme yöntemi ise manyetik ayırmadır. 3-0.1 mm serbestleşme tane boyutuna sahip kromit, yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıların kullanımı ile de manyetik olmayan gang minerallerinden ayrılarak zenginleştirilmektedir [9-12].

Günümüzde teknolojik gelişmeler ve artan endüstriyel faaliyetlerin etkisi ile metalürji, refrakter sanayisi ve kimya sanayisi başta olmak üzere birçok sanayi dalının temel bileşenlerinden birisi olan krom cevherine olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Artan bu talebin karşılanması konvansiyonel krom zenginleştirme yöntemleri ile zenginleştirilmesi ekonomik anlamda mümkün olmayan ve bu sebeple madenciligi yapılamayan ince tane boyutunda serbestleşen daha karmaşık yapıdaki krom cevherlerinin de işletilmesini de zorunlu kılmaktadır. Bu durum ince tane boyutlarında (-0,25 mm) serbestleşen cevherler için etkin zenginleştirme olanağı sağlayan ve minerallerin fiziko-kimyasal

yüzeysel özellikleri farkına dayalı olarak birbirlerinden ayrılmasını sağlayan bir zenginleştirme yöntemi olan flotasyonun önemi artmaktadır [9, 13, 14].

Katı (mineral), sıvı (sulu çözelti) ve gaz (hava kabarcığı) fazlarının etkin olduğu flotasyonla zenginleştirme işlemlerinde mineraller arası yüzeysel özellik farkı (hidrofob; suyu sevmeyen, hidrofil; suyu seven) doğal olarak bulunsa da, çoğu zaman toplayıcı, pH düzenleyici, bastırıcı vb. reaktiflerin kullanımı ile seçimli olarak oluşturulmaktadır. Böylece hidrofobik yüzeysel özelliği kazandırılan hedef mineral taneleri flotasyon selülüne beslenen hava kabarcıkları yardımıyla selül dışına taşınırken, hidrofilik yüzeysel özelliği gösteren diğer mineraller (çoğunlukla gang mineralleri) pülp içerisinde bırakılmaktadır. Kromitin flotasyonla zenginleştirilmesi üzerine gerçekleştirilen literatür araştırmalarına dair sonuçlar incelendiğinde gerek kromitin gang minerallerinden ayrılmasında gerekse kromit ve olivinin birbirinden ayrılması işlemlerinde toplayıcı olarak yağ asitleri, aminler ve sülfat/sülfonatların kullanıldığı belirlenmiştir. Farklı özellikteki (serbestleşme tane boyutu, stratiform ve podiform krom cevherleri vb.) cevherler üzerine gerçekleştirilen bu çalışmalarda satılabilir tenörlü konsantrasyon için optimum flotasyon değişkenlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir [3, 6, 9, 10, 15, 16].

Bu çalışma kapsamında ise kromitin flotasyonla zenginleştirilmesi işlemlerinde yaygın kullanılan toplayıcıların karışım halinde kullanılmasının kromit mineralinin flotasyon verimine olan etkileri toplayıcı derişimi, hava akış hızı (HAH) ve pülpdeki mineral miktarına bağlı olarak incelenmiştir.

## 2. Materyal Metot

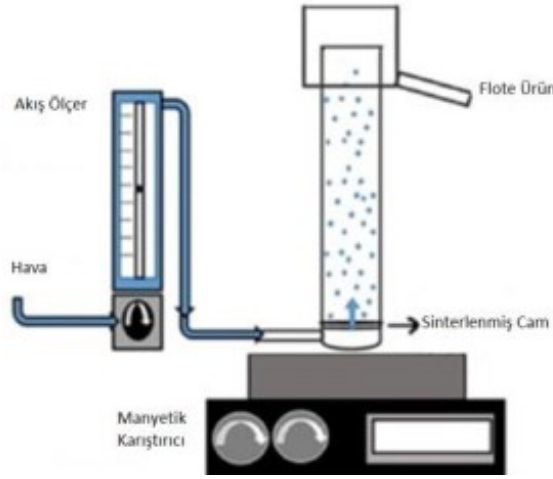
Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan kromit konsantrasyonu Eti Krom A.Ş. Elâzığ Maden İşletmesinden temin edilmiştir. Öncelikli olarak yaş eleme işlemi ile dar tane boyutunda sınıflandırılan numuneler, yüzeylerinin temizlenmesi amacıyla seyreltik HCl çözeltisi ile yıkama ve distile su ile durulama işlemleri sonrasında etüvde  $100\pm 5^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Mikro-flotasyon çalışmaları için  $-212+150$  mikron boyutlu fraksiyon kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan kromit numunesine ait X-ray fluorescence (XRF) analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kromit konsantrasyonu XRF analiz değerleri

| İçerik                         | (%)   |
|--------------------------------|-------|
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 39,32 |
| SiO <sub>2</sub>               | 7,72  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,85 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12,88 |
| MgO                            | 2073  |
| CaO                            | 0,11  |
| Diğer + ateş kaybı (LOI)       | 1,39  |

Deneysel çalışmalarda Cytec Solvay Grup'tan temin edilen katyonik tür toplayıcı olarak amin, anyonik tür toplayıcı olarak da sülfonat kullanılmıştır. Hazırlanan stok toplayıcı (2 g/l) çözeltileri uygun oranlarda distile su ilavesi ile seyreltilerek deneysel çalışmalarda tatbik edilmiştir. Seyreltik toplayıcı çözeltileri homojenliğin sağlanması amacıyla deneysel çalışmalar süresince manyetik karıştırıcıda karıştırılarak tutulmuştur.

Mikro-flotasyon testleri Şekil 1’de şematik görüntüsü verilen test düzeneği kullanılarak 18-22°C’de gerçekleştirilmiştir. Mikro-flotasyon testleri her bir değişken için 3 defa tekrarlanmış ve flotasyon verim hesaplamalarında bu deneylerin aritmetik ortalamaları deneysel sonuç olarak kabul edilmiştir. Toplayıcı çözeltilerinin hazırlanmasında ve mikro-flotasyon testlerinde distile su kullanılmış, pH düzenlemeleri seyreltik HCl ve NaOH çözeltileri kullanılarak yapılmıştır. Mikro-flotasyon testleri öncesinde mineral numunelerinin toplayıcı çözeltileri ile şartlandırılması için karıştırma süreleri ve karıştırma hızları ön-test çalışmaları ile belirlenen değerlerde sabit tutularak bu değişkenlerin minerallerin flotasyon verimlerine olan olası etkileri eşitlenmiştir. Toplayıcı çözeltileri ile gerçekleştirilen mikro-flotasyon testleri öncesinde kromit numunesinin doğal flotasyon karakteristiklerinin belirlenebilmesi için, benzer testler yalnızca distile su varlığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Mikro-flotasyon test ünitesi [17].

Numune şartlandırma işlemleri deneysel çalışmalarda kullanılan mikro-flotasyon hücresinin hacmine bağlı olarak 80 ml toplayıcı çözeltileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. pH düzenlemeleri ve şartlandırma işlemleri sonrasında mikro-flotasyon test ünitesinde belirlenen koşullar altında flotasyon işlemine tabi tutulmuştur. Mikro-flotasyon testleri sonrası flote ve pülpte kalan ürünler ayrı ayrı, darası önceden belirlenmiş beherlere aktararak etüvde 100±5°C’de kurutulmuştur. Flotasyon verimleri (%); flote ürün ağırlığının flotasyon işlemine tabi tutulan toplam besleme ağırlığına bölünmesi ile elde edilen değerlerin %’lik birime dönüştürülmesi ile belirlenmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Toplayıcı karışımları varlığında gerçekleştirilen mikro-flotasyon testleri öncesinde flotasyon verim değişimlerinin yorumlanmasında karşılaştırma kolaylığı amacıyla kromit numunesinin distile su içerisinde ortam pH’sına bağlı olarak flotasyon verimleri incelenmiştir. Toplayıcı kullanılmadan gerçekleştirilen bu testlerde kromitin flotasyon verim değerlerinin %10’un altında olduğu ve mikro-flotasyon testlerinin uygulandığı tüm pH değerleri için değişmediği belirlenmiştir.

#### 3.1. Toplayıcı miktarı-pH değişiminin flotasyon verimine etkisi

Çalışmanın bu aşamasında anyonik-katyonik tür toplayıcı karışımlarının toplayıcı derişimi ve ortam pH’sına bağlı olarak kromit flotasyon verimine olan etkileri mikro-flotasyon testleri gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Mikro-flotasyon testleri öncesinde stok çözeltiler kullanılarak hazırlanan seyreltik toplayıcı çözeltileri (15-60 mg/l) homojenliğin sağlanması amacıyla analizler

süresince manyetik karıştırıcıda karışır durumda bırakılmıştır. Mikro-flotasyon uygulamaları öncesinde hazırlanan seyreltik toplayıcı çözeltilerinin her ikisinden de dereceli mezür kullanılarak ayrı ayrı 40±1 ml toplayıcı çözeltileri alınmış ve pH ayarlamalarından sonra kromit numunesi beher içerisinde şartlandırma işlemine tabi tutulmuştur.

Belirlenen pH koşullarında şartlandırma işlemlerine tabi tutulan kromit numuneleri, şartlandırma işlemleri sonrasında mikro-flotasyon test düzeneğine aktarılmış ve 2 dakika flotasyon işlemine tabi tutulmuştur. Flotasyon işlemleri sonrasında her bir parametre için yüzen ve batan ürün darası belirlenerek beherlere ayrı ayrı alınıp, etüvde 100±5°C'de 24 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutma işlemleri sonrasında etüvden çıkarılan beherler desikatör içerisine alınarak ortamdan nem almadan soğuması için en az 120 dakika bekletilmiştir. Daha sonrasında yüzen ve batan ürünler ayrı ayrı tartılarak her bir parametre için flotasyon verimleri hesaplanmıştır. Testlerde uygulanan değişkenler Tablo 2'de, elde edilen sonuçlar ise grafiksel olarak Şekil 2'de verilmiştir.

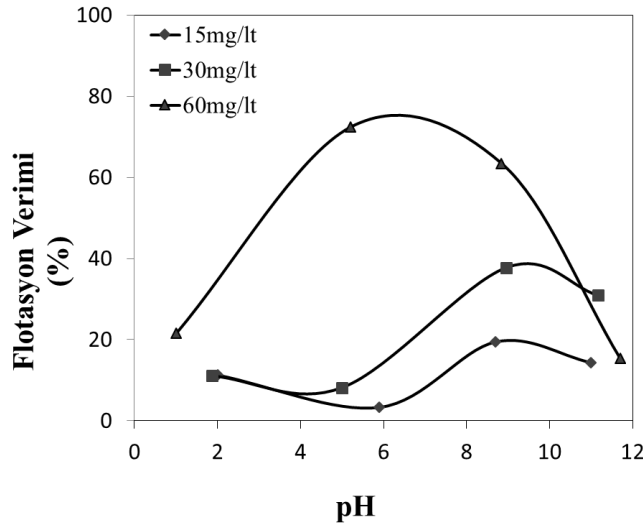
**Tablo 2.** Toplayıcı miktarına bağlı flotasyon işlemlerinde uygulanan değişkenler

| Değişkenler                           | Değerler    |
|---------------------------------------|-------------|
| Numune Miktarı                        | 1 gr        |
| Karıştırıcı Dönüş Hızı (şartlandırma) | 1000 dv/dk  |
| Karıştırıcı Dönüş Hızı (flotasyon)    | 400 dv/dk   |
| Hava Akış Hızı                        | 1,6 lt/saat |
| Flotasyon Süresi                      | 2 dk        |
| Şartlandırma Süresi                   | 5 dk        |
| Toplayıcı Miktarı                     | 15 mg/lt    |
|                                       | 30 mg/lt    |
|                                       | 60 mg/lt    |

Deneysel çalışmalarda kullanılan en düşük toplayıcı miktarı olan 15 mg/lt'de elde edilen sonuçlar incelendiğinde kromitin flotasyon veriminin deneysel çalışmaların yapıldığı tüm pH değerlerinde benzer bir sonuç verdiği ve %10'nun altında kaldığı belirlenmiştir. Artan toplayıcı miktarı ile birlikte kromit-toplayıcı etkileşimi artmış ve dolayısıyla mineral yüzeylerinin hidrofobiklik derecesinde artışlar izlenmiştir. Böylece 30 mg/lt toplayıcı karışımı varlığında pH 5 koşullarından daha bazik pH koşullarında kromitin flotasyon verimi artarak  $\approx$  pH 9'da en yüksek değeri olan yaklaşık %40'a ulaşmıştır. pH değerinin daha bazik koşullarında ise flotasyon veriminin düşüş eğiliminde bir seyir gösterdiği tespit edilmiştir.

Amin türü katyonik tür toplayıcılar asidik pH değerlerinde flotasyonla zenginleştirmede etkin rol oynayan ve zıt yüklü mineral yüzeyine çoğunlukla elektrostatik olan tutunan pozitif yüklü monomerlerden ( $\text{RNH}_3^+$ ) oluşmaktadır. Pozitif yüklü monomer derişimleri ve etkinleri artan pH ile birlikte ( $>$ pH 8) hızla azalmaktadır. Deneysel çalışmalarda anyonik tür toplayıcı olarak kullanılan sülfonat türü toplayıcı negatif yüklü monomer ( $\text{R}^-$ ) derişiminin ise hemen hemen bütün pH koşullarında benzer olduğu bilinmektedir [18]. Bu durumda bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde yüksek asidik pH koşullarında pozitif yüklü amin monomerleri ile benzer yüklü kromit tanelerinin birbirlerini elektrostatik olarak itmesi sonucu toplayıcı/mineral etkileşiminin gerçekleşmediği ve bu sebeple flotasyon verimlerinin düşük olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Bu duruma ek olarak yine asidik pH koşullarında aminin pozitif yüklü monomerce baskın olduğu ve sülfonatın negatif yüklü monomerler halinde bulunduğu dikkate alındığında, toplayıcı monomerlerinin elektrostatik olarak birbiri ile etkileşime geçtiği, sonuç olarak pülp içerisinde toplayıcı monomer derişiminin düşmesi ile birlikte kromit tanelerinin yeterince hidrofobik

yüzey özelliği kazanamadığı ve düşük flotasyon verimleri elde edildiği sonucu da ortaya çıkmaktadır. Toplayıcı derişimi 60 mg/l'te artırıldığında ise kromitin flotasyon verimi pH 2'den daha düşük pH koşullarında yaklaşık % 20 iken, bu değer > pH 5'de % 70'in üzerine çıkmıştır. Bu durum kromitin artan pH ile birlikte artan şiddette negatif zeta potansiyele sahip olması ve pozitif yüklü amin monomerlerinin kromit minerallerinin yüzeyine elektrostatik olarak soğurulması şeklinde açıklanabilmektedir. Bu duruma ek olarak dikkate alınması gereken bir diğer mekanizma ise; kromit yüzeylerine soğurulan amin monomerleri ile pülpte bulunan sülfonat monomerlerinin C-H zincirleri arasında hidrofobik çekimin gerçekleştiği (co-adsorption) ve bunu bir sonucu olarak mineral yüzeylerinin hidrofobiklik derecelerinin arttığıdır. Ortam koşullarının daha bazik olması durumunda ise azalan amin monomer derişimine bağılı olarak flotasyon verimi kademeli olarak pH 9'da yaklaşık % 60'a ve > pH 11.5'da ise %10'nun altına düşmektedir.



Şekil 2. Kromitin toplayıcı derişimi ve pH'a bağılı flotasyon verimi değışimi

### 3.2. Hava Akış Hızı Değışiminin Flotasyon Verimine Etkisi

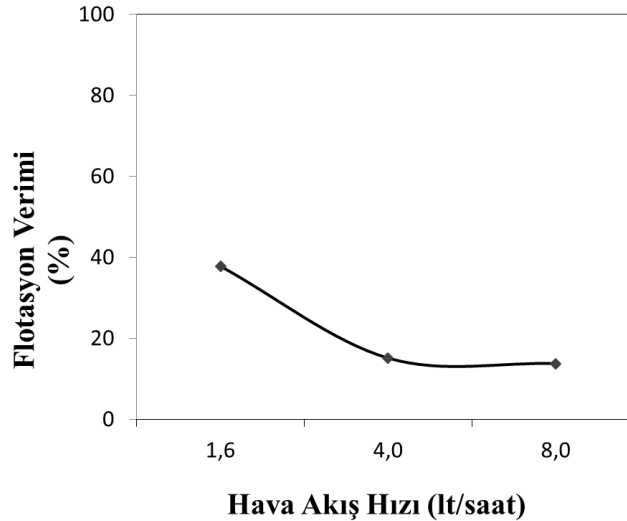
Çalışmanın bu aşamasında hava miktarında oluşturulacak değışikliğin kromit numunesinin flotasyon verimine olan etkileri 1.6 - 8 lt/saat arasında 3 farklı hava akış hızında test edilmiştir. Gerçekleştirilen mikro-flotasyon testleri için kullanılan değışkenler Tablo 3'de elde edilen sonuçlar ise grafiksel olarak Şekil 3'de verilmiştir. Testlerde kullanılan toplayıcı derişimi önceki bölümde gerçekleştirilen test sonuçları dikkate alınarak 30 mg/l olarak belirlenmiştir. Böylece; mineral taneleri ile hava kabarcıklarının karşılaşma olasılığının artırılması amacıyla birim zamanda flotasyon hücresine beslenen farklı hava miktarlarının kromitin flotasyon verimine olan etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu aşamada pülp hazırlama, şartlandırma ve flotasyon süreçleri önceki çalışmalara benzer şekilde yürütülmüştür. Hazırlanan 30 mg/l toplayıcı çözeltilerinin her ikisinden de dereceli mezür kullanılarak ayrı ayrı 40±1 ml toplayıcı çözeltileri olarak karıştırılmış, kromit numunesi pH ayarlamaları (pH 8.5-9.5) sonrası beher içerisinde şartlandırma işlemine tabi tutulmuş ve sonrasında farklı hava akış hızlarında flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'deki verilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek flotasyon veriminin 1.6 lt/saat hava akış hızında elde edildiği görülmektedir. Toplayıcı karışımları kullanılarak hidrofobik yüzey özelliği kazandırılan kromit mineral tanelerinin hava kabarcıkları ile karşılaşma olasılıklarının artırılması, dolayısıyla flotasyon verimlerinin artırılması [19] amacıyla hava akış hızının artırılması beklenenin aksine flotasyon verimlerinin azalmasına neden olmuştur. Bu azalmaya; kullanılan toplayıcı miktarı (30 mg/l) ile mineral tanelerine yeterince hidrofobik yüzey özelliği niteliğinin kazandırılmadığı, bu

sebeple zayıf bir şekilde hava kabarcıklarına tutunan mineral tanelerinin artan hava akış hızı ile oluşan türbülansa vb. dinamik değişkenlere bağlı olarak hava kabarcıklarından ayrılarak tekrar pülpe karışmasının sebep olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

**Tablo 3.** Hava akış hızına bağlı flotasyon işlemlerinde uygulanan değişkenler

| Değişkenler                           | Değerler    |
|---------------------------------------|-------------|
| Numune Miktarı                        | 1 gr        |
| pH                                    | 8.5-9.5     |
| Karıştırıcı Dönüş Hızı (şartlandırma) | 1000 dv/dk  |
| Karıştırıcı Dönüş Hızı (flotasyon)    | 400 dv/dk   |
| Toplayıcı Miktarı                     | 30 mg/lt    |
| Flotasyon Süresi                      | 2 dk        |
| Şartlandırma Süresi                   | 5 dk        |
| Hava Akış Hızı                        | 1.6 lt/saat |
|                                       | 4.0 lt/saat |
|                                       | 8.0 lt/saat |



**Şekil 3.** Kromitin hava akış hızına bağlı flotasyon verimi değişimi

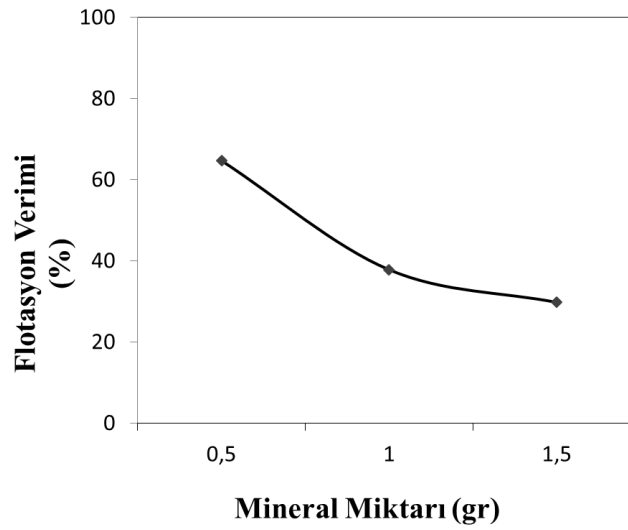
### 3.3. Pülpteki Mineral Miktarının Flotasyon Verimine Etkisi

Mikro-flotasyon çalışmaları çoğunlukla düşük pülp yoğunluklarında ve tek mineralli sistemler olarak uygulanmaktadır. Çalışmanın bu aşamasında Tablo 4'deki değişkenler sabit tutularak mineral miktarındaki değişimin flotasyon verimine olan etkileri incelenmiştir. pH 8.5-9.5 aralığında gerçekleştirilen ve Şekil 4'de grafikleri verilen sonuçlara göre 30 mg/lt toplayıcı derişimi karışımlarının kromit numunesinin flotasyon verimine olan etkileri mineral miktarı ile değişkenlik göstermektedir. 0.5 gr mineral miktarı varlığında yaklaşık % 70 flotasyon verimine ulaşılırken, artan mineral miktarı ile birlikte flotasyon verimleri de kademeli olarak 1 gr mineral miktarında yaklaşık % 40'a ve 1.5 gr mineral miktarı varlığında ise % 30'un altına düşmektedir. Bu durum artan mineral madde miktarı ile birlikte pülpte mineral yüzey alanının arttığı ve sonuç olarak 30 mg/lt toplayıcı derişiminin yüksek pülp yoğunlukları için yetersiz olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Böylece pülpte artan mineral miktarı ile 30 mg/lt toplayıcı varlığında mineral yüzeylerine yeterince hidrofobik yüzey özelliğinin kazandırılmadığı ve bu sebeple düşük flotasyon verimlerinin elde edildiği belirlenmiştir.

Azalan flotasyon verimlerinin bir diğer sebebi olarak da, artan mineral miktarı ile birlikte mineral taneleri ile toplayıcı monomerleri arasındaki etkileşimin kurulabilmesinde etkin rol oynayan şartlandırma süresi gösterilebilir. Şartlandırma süresi artan pülp yoğunluğu için yetersiz gelmekte, böylece mineral yüzeyleri yeterince hidrofobik yüzey özelliği kazanamamaktadır. Dolayısıyla bu mineral taneleri hava kabarcıklarına tutunabilseler bile, kolaylıkla hava kabarcıklarından kopup tekrar pülpe karışmakta ve daha düşük flotasyon verimleri elde edilmektedir.

**Tablo 4.** Mineral miktarına bağlı flotasyon işlemlerinde uygulanan değişkenler

| Değişkenler                           | Değerler    |
|---------------------------------------|-------------|
| Toplayıcı Miktarı                     | 30 mg/lt    |
| pH                                    | 8.5-9.5     |
| Karıştırıcı Dönüş Hızı (şartlandırma) | 1000 dv/dk  |
| Karıştırıcı Dönüş Hızı (flotasyon)    | 400 dv/dk   |
| Hava Akış Hızı                        | 1.6 lt/saat |
| Flotasyon Süresi                      | 2 dk        |
| Şartlandırma Süresi                   | 5 dk        |
| Numune Miktarı                        | 0.5 gr      |
|                                       | 1.0 gr      |
|                                       | 1.5 gr      |



**Şekil 4.** Kromitin mineral miktarına bağlı flotasyon verimi değişimi

#### 4. Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler değerlendirildiğinde anyonik ve katyonik toplayıcı karışımlarının kromitin flotasyon verimine olan etkisinin toplayıcı derişimi ve ortam pH'sına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Gerçekleştirilen mikro-flotasyon test sonuçlarına göre en yüksek flotasyon verimleri nötr-bazik pH koşullarında elde edilmiştir.

Flotasyonla zenginleştirme işlemlerinde flotasyon verimini etkileyen önemli değişkenlerde olan hava akış hızı ve şartlandırma süresinin etkileri değerlendirildiğinde;

Mineral taneleri ile hava kabarcıklarının karşılaşma olasılığını, sonuç olarak flotasyon verimini artırmak amacı ile hava akış hızı 4 lt/saat ve 8 lt/saate çıkarıldığında beklenenin aksine daha düşük



flotasyon verimleri elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak da; 30 mg/lit toplayıcı derişimde yetersiz hidrofobik yüzey özelliği kazandırılmış mineral tanelerinin düşük hava akış hızlarında hava kabarcığı ile hareket edebildiği ancak artan hava akış hızına bağlı olarak flotasyon selülünde oluşan türbülanslı rejim nedeniyle hava kabarcıklarından ayrılarak tekrar pülpe karıştığı sonucu çıkarılmaktadır.

Benzer şekilde 30 mg/lit toplayıcı karışımı varlığında mineral yüzeylerinin artan mineral miktarına bağlı olarak pülpteki minerallere ait yüzey alanın artması, sonuç olarak yeterince hidrofobik yüzey özelliği kazandırılmış mineral tanelerinin 1.6 lt/saat gibi düşük hava akış hızında bile hava kabarcıklarından koparak pülpe karıştığı sonucuna varılmıştır.

### **Teşekkür ve Anma**

Bu çalışma akademik danışmanlığını yürütmüş olan Savaş ÖZÜN tarafından, aramızdan amansız bir hastalık neticesi ile çok erken ayrılan Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü öğrencisi Semih GİRGIN anısına tamamlanmış ve sonuçlandırılmıştır. Ruhu şad olsun.

### **Teşekkür ve Finansman**

Yazarlar 1139B412200699 No'lu Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı (2209-B) kapsamında finansal olarak destekte bulunan TÜBİTAK'a teşekkür ederler. Ayrıca bu projenin gerçekleşmesinde desteklerini esirgemeyen Eti Krom yetkilileri Dr. C. Acar, G. Basman ve maden mühendisi M. Köksoy'a teşekkür ederler.

### **Deklarasyon ve Etik Standartlar**

Yazarlar bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanmasıyla ilgili olarak herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan etmemiştir. Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

### **Yazar Katkısı**

Yazar 1 fikri tasarladı, teoriyi geliştirdi, hesaplamaları yaptı ve deneyleri gerçekleştirdi. çalışmanın bulgularını denetledi, sonuçları tartıştı ve makaleyi son haline getirdi.

Yazar 2 fikri tasarladı.

### **Kaynaklar**

- [1] Sueker J.K., "Chromium" Environmental Forensics, Contaminant Specific Guide, (1964) 81-95.
- [2] Glastonbury R.I., Beukes J., Van Zyl P., Sadikit L., Jordaan A., Campbell Q., Stewart H., Dawson N., "Comparison of physical properties of oxidative sintered pellets produced with UG2 or metallurgical-grade South African chromite: A case study". J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 115 (2015) 699–706. Doi: 10.17159/2411-9717/2015/V115N8A6
- [3] Murthy Y.R., Tripathy S.K., Kumar C.R., "Chrome ore beneficiation challenges and opportunities—A review" Miner. Eng. 24 (2011) 375–380. Doi: 10.1016/j.mineng.2010.12.001
- [4] Çakmak İ., "Elazığ–Guleman Yöresi Kromit Cevheri Yataklarının Analizi ve Analiz Sonuçlarına Göre Kullanım Alanlarının Araştırılması", Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları 4:2 (2006) 20-24.

- [5] Liu C., Hystad G., Golden J.J., Hummer D.R., Downs R.T., Morrison, S.M., Ralph J.P., Hazen R.M., "Chromium mineral ecology" *American Mineralogist*, 102:3 (2017) 612-619. Doi: 10.2138/am-2017-5900
- [6] Köleli N., Aydeniz D., "Chromite", In book: *Environmental Materials and Waste* (2016). Doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00011-1
- [7] Kleynhans E.L.J., Beukes J.P., Van Zyl P.G., Kestens P.H.I., Langa J.M., "Unique Challenges of Clay Binders in s Pelletised Chromite Pre-Reduction Process", *Minerals Engineering* 34 (2012) 55-62. Doi: 10.1016/j.mineng.2012.03.021
- [8] Aratoğlu M., Bilfer Eskiköy Krom Konsantre Tesisi Atıklarının Flotasyon ile Zenginleştirilmesi. Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 90s, (2017) Ankara.
- [9] Özün S., Raimov R., "Kromit Cevherleri ve Zenginleştirilmesi", Karadeniz 11. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, 978-605-72197-6-3, 2022, 1-10.
- [10] Raimov R., "Kromit ve Olivinin Flotasyon Özelliklerinin Belirlenmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 56s (2023) Isparta.
- [11] Cicek T., Cocen I., "Applicability of Mozley gravity separator (MGS) to fine chromite tailings of Turkish chromite concentrating plants" *Minerals Engineering* 15 (2002) 91–93. Doi: 10.1016/S0892-6875(01)00195-9
- [12] Yıldız N., "Zenginleştirme" *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*, Editör Necati Yıldız, Ankara, Türkiye: Ertem Basım, 2014, 293-380.
- [13] Feng D., Aldrich C., "Recovery of chromite fines from wastewater streams by column flotation", *Hydrometallurgy* 72:3–4 (2004) 319–325. Doi: 10.1016/S0304-386X(03)00186-5
- [14] Atak, S., "Beneficiation of chromite by flotation", *Doga* 6 (1982) 1–6.
- [15] Guney A., Onal G., Dogan M.Z., Çelik M.S., "Mechanism of anionic collector adsorption in chromite flotation" In *Proceedings of XVIII International Mineral Congress*, vol. 4. Sydney, Australia, 1993, 937–940.
- [16] Sobieraj S., Laskowski L., "Flotation of Chromite", *Trans. Inst. Min. Metall. Section C.*, 82:805 (1973) 207-213.
- [17] Ozun S., Hassas B.V., Miller J.D., "Collectorless flotation of oxidized pyrite", *Colloids and Surfaces: A-Physicochemical and Engineering Aspects* 561 (2019) 349-356. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.10.064
- [18] Somasundaran P., Wang D., "Solution equilibria of surfactants" In book: *Solution Chemistry. Minerals and Reagents*, Editörler P. Somasundaran ve Dianzuo Wang, Amsterdam, Nederland: Elsevier, 2006, 5-43.
- [19] Özün S., Ergen G., "Determination of Optimum Parameters for Flotation of Galena: Effect of Chain Length and Chain Structure of Xanthates on Flotation Recovery" *ACS Omega* 4:1 (2019) 1516–1524. Doi: 10.1021/acsomega.8b02841

## Yazar Biyografileri

|   |  |
|---|--|
|  | <p><b>Savaş ÖZÜN</b><br/>Lisans: Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, 1997-2001.<br/>Doktora: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, 2002-2012.<br/>Doktora Araştırma: University of Illinois at Urbana Champaign, Kimya, 2010-2010.<br/>Yrd.Doç.Dr.: Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, 2013-2019.<br/>Post-Doc.: University of Utah, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2017-2018.<br/>Doç.Dr.: Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği, 2019--.</p> |
|  | <p><b>Semih GİRĞİN</b><br/>Lisans: Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik 2010-2015.<br/>Sertifika: Pedagojik Formasyon Sertifikası, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2015.<br/>Lisans: Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği 2020--.</p>   |