

Atf İçin: Aydoğmuş, R., Uysal, T. ve Erdemoğlu, M. (2023). Pirofillit Cevherinden Alümina Üretimine Zenginleştirme Yöntemlerinin Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 1297-1305.

To Cite: Aydoğmuş, R., Uysal, T. & Erdemoğlu, M. (2023). The Effect of Beneficiation Methods on Alumina Production from Pyrophyllite Ore. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 1297-1305.

Pirofillit Cevherinden Alümina Üretimine Zenginleştirme Yöntemlerinin Etkisi

Ramazan AYDOĞMUŞ¹, Turan UYSAL^{2*}, Murat ERDEMOĞLU¹

Öne Çıkanlar:

- Pirofillit cevherinin flotasyon ve aşındırma yıkama yöntemiyle zenginleştirilmesi
- Zenginleştirilen konsantreden asit liçi ile Al kazanımı
- Zenginleştirme yöntemlerinin Al kazanımına etkisi

ÖZET:

Bu çalışmada, pirofillit cevherinden alüminyum (Al) kazanımı üzerine farklı zenginleştirme yöntemlerinin etkisi araştırılmıştır. Zenginleştirme yöntemleri pirofillitin doğal hidrofob yapısından dolayı flotasyon yöntemi, kırılabilirlik farklılığından dolayı ise Aşındırma Yıkama (AY) yöntemi kullanılmıştır. Zenginleştirme sonucu konsantre numunelere HCl ile liç işlemi yapılmış, liç sonucu çözültüye geçen Al miktarları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Pirofillit cevherinin AY yöntemi ile zenginleştirilmesi sonucu %54.79 verimle %27.44 Al₂O₃ tenörlü bir konsantre, flotasyon yöntemi ile ise %30.49 verimle %28.05 Al₂O₃ tenörlü bir konsantre elde edilmiştir. Buna göre zenginleştirme verimi açısından AY yöntemi daha verimli iken liç verimi açısından ise flotasyon yönteminin daha verimli olduğu belirlenmiştir. Tüvenan cevhere göre nihai alümina miktarı ve saflığı birlikte değerlendirildiğinde doğrudan liç ve AY konsantresi değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak pirofillit cevherinden alümina üretimi için ayrıntılı ekonomik analiz yapılarak uygun yöntemin belirlenmesinin daha doğru olacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler:

- Pirofillit
- Aşındırma yıkama
- Flotasyon
- Liç
- Alümina

The Effect of Beneficiation Methods on Alumina Production from Pyrophyllite Ore

Highlights:

- Beneficiation of pyrophyllite ore by flotation and attrition scrubbing method
- Al recovery from the enriched concentrate by acid leaching
- The effect of beneficiation methods on Al recovery

ABSTRACT:

In this study, the effect of different beneficiation methods on aluminum recovery from pyrophyllite ore was investigated. Flotation method was used due to the naturally hydrophobic structure of pyrophyllite, and Attrition Scrubbing (AS) methods was used due to the difference in fragility. As a result of the beneficiation, concentrated samples were leached with HCl, and the amount of Al transferred to the solution as a result of the leaching was compared and evaluated. As a result of the beneficiation of the pyrophyllite ore with the AY method, a concentrate with a grade of 27.44% Al₂O₃ with a recovery of 54.79%, and a concentrate with a grade of 28.05% Al₂O₃ with a recovery of 30.49% by the flotation method. Accordingly, it was determined that the attrition scrubbing method was more efficient in terms of beneficiation efficiency, while the flotation method was more efficient in terms of leaching efficiency. When the final alumina amount and purity according to the raw ore were evaluated together, it was determined that the values of direct leaching and AY concentrate were close to each other. As a result, it is considered that it would be more accurate to determine the appropriate method by performing detailed economic analysis for the production of alumina from pyrophyllite ore.

Keywords:

- Pyrophyllite
- Attrition scrubbing
- Flotation
- Leaching
- Alumina

¹ Ramazan AYDOĞMUŞ ([Orcid ID: 0000-0002-8127-6775](https://orcid.org/0000-0002-8127-6775)), Murat ERDEMOĞLU ([Orcid ID: 0000-0003-2922-7965](https://orcid.org/0000-0003-2922-7965)), İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü Malatya, Türkiye

^{2*} Turan UYSAL ([Orcid ID: 0000-0003-1643-6725](https://orcid.org/0000-0003-1643-6725)), Munzur Üniversitesi, Nadir Toprak Elementleri Araştırma ve Uygulama Merkezi, Tunceli, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Turan UYSAL, e-mail: turanuysal@munzur.edu.tr

Etik Kurul Onayı / Ethics Committee Approval: Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

GİRİŞ

Pirofillit ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$), teorik olarak %28.3 Al_2O_3 içeren fillosilikat yapıları bir kil mineralidir. Sahip olduğu bazı termal üstünlükler nedeniyle değişik seramik ve refrakter malzemeler üretiminde katkı olarak ve daha çok beyaz çimento üretimi için tüketilen bir kil mineralidir (Birinci, 2002). Dünyadaki bazı pirofillit yatakları özellikle demir içeriğinin yüksek olması nedeniyle kullanılmamaktadır. Ocaklarda sadece seramik için uygun cevherler işletilmekte, diğer kısımlar atıl olarak kalmaktadır. Bu tür cevherlerin kullanılması durumunda pirofillit için yeni bir tüketim alanı doğmuş olacaktır. Bunun yanında özellikle düşük kalitedeki pirofillit cevherlerinin katma değeri yüksek yeni bir ürüne dönüştürülmüş olmasıyla pirofillit çok daha kıymetli hammadde haline gelecektir (Erdemoğlu ve ark., 2018a). Kısaca, doğada bol bulunan ve madenciliği daha ekonomik olan yüksek alüminalı ve safsızlık sorunundan dolayı seramik ve çimento sektöründe kullanılmayan kil minerallerinin alümina üretimi için değerlendirilmesinin sürdürülebilir kaynak kullanımının sağlanacağı ve daha çevreci olacağı değerlendirilmektedir.

Dünyanın her bölgesinde bulunabilen şeyller (Miao ve ark., 2011), alunite (Li ve ark., 2018), nefelinli siyenit (Arlyuk vd., 1992; Jorjani ve Amirhosseini, 2007), uçucu küller (Shemi ve ark., 2014; Xu ve ark., 2016; Tripathy ve ark., 2019) ve özellikle kaolinit (ElDeeb vd., 2019) ve pirofillit (Erdemoğlu ve ark., 2017; Birinci ve ark., 2017; Erdemoğlu ve ark., 2018; Uysal, 2018) gibi yüksek alüminyum içerikli kil mineralleri boksit dışı kaynak olarak oldukça dikkat çekmektedir. Dünyada boksit dışı kaynaklardan alümina üretimine örnek olarak Rusya'da RusAl firmasının nefelin siyenitinden alümina üretimi, İran'da Sadrab Sanat firmasının nefelin siyenitten pilot ölçekli alümina üretimi ve Kanada'da AEM firmasının kaolinit ve uçucu külden yüksek saflıkta alümina üretimi verilebilir.

Erdemoğlu ve Sarıkaya (1999), Pütürge pirofillit cevherinin farklı köpürtücü reaktifler varlığında flotasyon yöntemiyle zenginleştirmede Dietil Hegzanol (DEH) kullanılarak, %26.55 Al_2O_3 ve %65.71 SiO_2 içerikli bir konsantre elde etmişlerdir. Birinci (2002), %13.90 Al_2O_3 içeriğine sahip Pütürge pirofillit cevherini AY yöntemiyle zenginleştirme sonucu %27.30 Al_2O_3 tenörlü bir konsantre elde etmiştir. Birinci ve Erdemoğlu (2016), Pütürge pirofillit cevherinin zenginleştirilmesinde -75 μm tane boyutunda Metil İzobütül Karbinol (MIBC) köpürtücü kullanarak yaptıkları flotasyon deneyleri sonucunda, saf pirofillitin Al_2O_3 içeriğine yakın ve düşük SiO_2 içerikli konsantreler elde etmişlerdir.

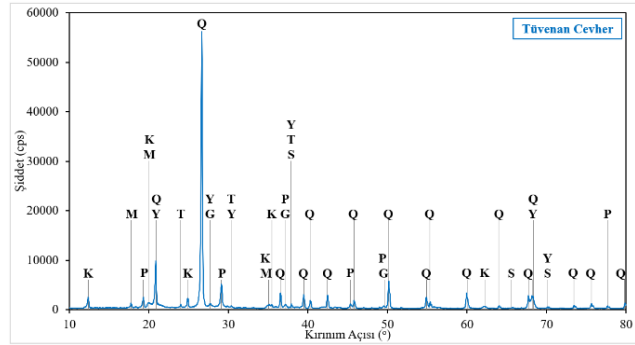
Bu çalışmada da kil minerali olan Pütürge pirofillit cevherinin zenginleştirilmesi çalışılmıştır. Çalışma kapsamında AY ve flotasyon yöntemleri ile zenginleştirme yapılmıştır. Bu yöntemlerle elde edilen konsantreler için HCl liçi yapılmış ve çözeltiye geçen Al miktarları belirlenerek zenginleştirme yöntemleri değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada kil minerali olarak Malatya ili Pütürge ilçesindeki Şahantepe pirofillit ocaklarından parça iriliğinde pirofillit cevheri alınmıştır. Cevheri oluşturan minerallerin tespit edilmesi amacıyla yapılan X-Işını Difraksiyonu (XRD) analizi sonucu Şekil 1'de verilmiştir. Pirofillit cevherinin element içeriği İndüktif Eşleşmiş Plazma (ICP-OES) analizi ile belirlenmiş ve analiz sonucu ise Çizelge 1'de verilmiştir.

Kimyasal analiz ve XRD verilerine göre yapılan mineralojik analiz sonucu cevher başlıca; kuvars (SiO_2), pirofillit ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$; PDF# 46-1308), kaolinit ($\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$; PDF# 29-1488), kyanit (Al_2OSiO_4 ; PDF# 46-1045), muskovit ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; PDF#07-0042), paragonit ($\text{NaAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; PDF# 12-165), diyaspör ($\text{AlO}(\text{OH})$; PDF# 11-46) ve topaz ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$; PDF# 12-765) minerallerinden oluşmaktadır.



Şekil 1. Pirofillit cevherinin XRD analizi (P: Pirofillit, Q: Kuvars, K: Kaolinit, M: Muskovit, Y: Kyanit, T: Topaz, G: Paragonit, S: Diyaspör)

Çizelge 1. Pirofillit cevherinin ICP-OES analizi sonucu

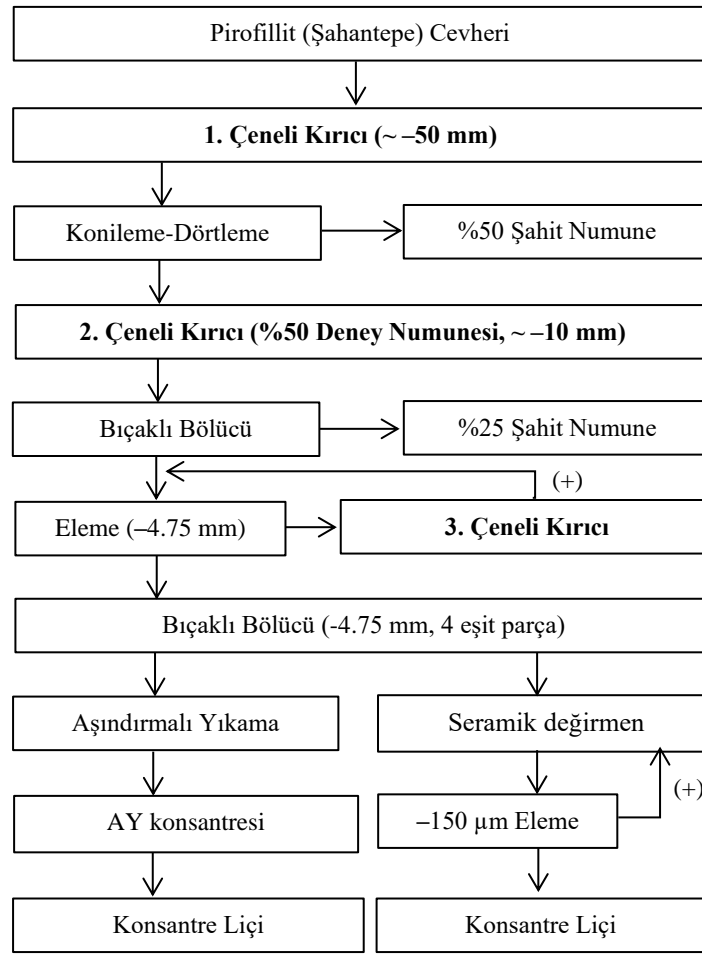
%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%MgO	%CaO	%TiO ₂	%K ₂ O	%Na ₂ O	%P ₂ O ₅	%MnO	A.K*
72.92	20.64	0.18	0.07	0.29	0.44	0.86	0.15	0.25	<0.01	4.10

A.K.: Ateşte Kayıp (1000 °C)

Yöntem

Pirofillit cevheri boyut küçültme amacıyla sistematik olarak kırılmıştır. Kırma işlemi çıkış açıklığı ayarlanabilen Pulverisette I model (Fritsch) çeneli kırıcı ile kademeli olarak -4,75 mm boyutuna kırılmıştır. Kırılan numunenin öğütülmesinde, değirmen iç çeperlerindeki aşınmanın numuneyi kirletmemesi için çelik yerine laboratuvar tipi seramik değirmen ve 10 mm çapında alümina bilyalar ile öğütme yapılmıştır. Öğütülmüş cevher ASTM E-11 tip test elekleriyle -0,5 mm boyutuna elenmiş sonra döner örnekleyici ile eşit parçalara bölünerek örnek alma işlemi yapılmıştır (Şekil 2).

AY deneyleri, IKA RW20 mekanik karıştırıcı ve cam hücre ile oluşturulmuş bir sistemde yapılmıştır. AY ile zenginleştirme parametreleri, Birinci (2002) ve Birinci, Erdemoğlu (2016) tarafından yapılan Pütürge pirofillit cevherinin zenginleştirilmesi çalışmasında ideal sonucu elde ettikleri parametreler temel alınarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Buna göre çalışma parametreleri; 500 g cevher, 214 ml orta sertlikte 60-120 TDS değerine sahip şebeke suyu, %70 ağırlıkça pülpte katı oranı, 1500 devir/dakika karıştırma hızı ve 60 dakika karıştırma süresinde çalışılmıştır. AY işleminden sonra 75 µm gözenek açıklığına sahip eleklerle yaş eleme yapılmış ve elek altı kısım "AY Konsantresi", elek üstü kısım ise "AY Artığı" olarak ayrılmış olup 105 °C sıcaklıkta 24 saat süre ile etüvde (Nüve FN120) kurutulmuştur. Elek boyutu seçiminde Birinci ve Sarıkaya (2004), Malatya-Pütürge pirofillit cevherinin AY yöntemiyle zenginleştirilmesini araştırdıkları çalışmadan yararlanılmıştır. Bu çalışmaya göre farklı tane boyutuna sahip besleme malzemeleriyle yapılan aşındırma yıkama işlemleri neticesinde tane boyu küçüldükçe Al₂O₃ tenörünün arttığı, SiO₂ tenörünün azaldığı belirlenmiştir. AY işleminden sonra en yüksek Al₂O₃ tenörüne en ince elek fraksiyonu olan -75 µm tane boyutunda ulaşılmış, pirofillit ve kaolinit bu boyutun altında kuvarstan büyük ölçüde ayrılmıştır.



Şekil 2. Pirofillit cevheri hazırlama, zenginleştirme ve liç deney akım şeması

Flotasyon deneyleri, Denver D-12 laboratuvar tipi flotasyon cihazı ile yapılmıştır. Zenginleştirme işleminde, Erdemoğlu ve Sarıkaya (1999) tarafından yapılan Pütürge pirofillit cevherinin flotasyonla zenginleştirme çalışmasından yararlanılmıştır. Flotasyon işlemi parametreleri şu şekildedir;

- Tane boyutu: -75 µm ve -150 µm
- Su miktarı: 1100 ml şebeke suyu
- Ağırlıkça katı oranı: %22.5 (310 g cevher)
- Karıştırma hızı: 1035 devir/dakika
- Koşullandırma süreleri: 10 dakika
- Köpürtücü miktarı: 100 g/ton PPG, DEH
- Köpük toplama süresi: 30 dakika

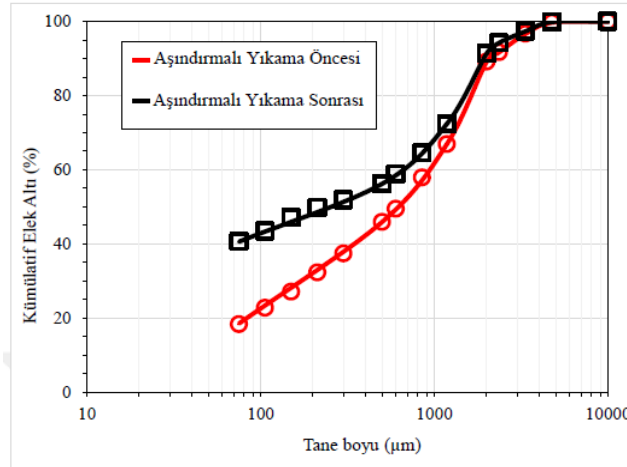
Her flotasyon işleminden sonra alınan konsantre ve artıklar etüvde 105 °C'de 24 saat süre ile kurutulmuştur. Liç işlemi, balon ısıtıcı cihazında 500 cm³ cam balonda, manyetik karıştırıcıyla karıştırılabilen geri soğutucu altında, çözelti sıcaklığının sürekli olarak gözetlendiği, çeker ocak içerisinde kurulmuş bir düzenele gerçekleştirilmiştir. Liç çalışmalarında Uysal (2018) Pütürge pirofillit cevherinden alümina üretimi üzerine yapmış olduğu doktora tez çalışmasında belirlenen ideal liç parametreleri temel alınarak yapılmıştır. Buna göre ideal liç koşulları; 4 M HCl, 108 °C, 24 saat, çözelti-cevher oranı 20 l/kg, -0.5 mm tane boyu, 600 devir/dakika karıştırma hızı olarak belirlenmiştir. Liç sonunda, ısıtma ve karıştırma işlemi durdurulmuş vakum süzme yoluyla katı-sıvı ayırımı yapılmıştır. Yüklü liç çözeltilerinin Al tayini iCE 3000 model Alevli Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi (FAAS) cihazı ile yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Aşındırmalı Yıkama Yöntemi ile Zenginleştirme

AY ile zenginleştirmede-4.75 mm boyutlu besleme malzemesi ve AY sonrası kümülatif elek altı eğrileri Şekil 3’de verilmiştir. Kümülatif elek altı eğrileri ile hesaplanan d_{90} kıyaslandığında, AY öncesi 2060 μm iken AY sonrası bu değer 1900 μm ’ye düştüğü, AY ile birlikte tane boyutunun azaldığı görülmektedir. Yani cevherde Al içeren pirofillit, kaolinit ve muskovit gibi kil minerallerinin AY yönteminin etkisiyle ince boyuta geçtiği çıkarımı yapılmıştır. AY ile zenginleştirme işlemleri sonunda, elde edilen konsantrenin ICP-OES analizi sonucu Çizelge 2’de verilmiştir. Buna göre %54.79 zenginleştirme verimi ile %27.44 Al_2O_3 tenörlü konsantre elde edilmiştir. Zenginleştirme oranı beslenen cevher ağırlığının, elde edilen konsantrenin ağırlığına oranıyla hesaplanmış ve 2.42 olarak bulunmuştur. ICP-OES analizi sonuçlarına göre, AY konsantresinin SiO_2 içeriği azalırken, Al_2O_3 , K_2O ve Na_2O içerikleri artmıştır. Konsantre ve artıkların XRD analiz sonucu Şekil 4’de verilmiştir.

AY ve flotasyon deneylerinde zenginleştirme tane boyutundan bağımsız olarak en iyi zenginleştirme verimlerinin elde edildiği parametrelerde çalışılmıştır.



Şekil 3. Zenginleştirme öncesi ve zenginleştirme sonrası elde edilen ürünün kümülatif elek altı eğrileri

Çizelge 1. Aşındırmalı yıkama konsantresinin (-75 μm) ve artığının (+75 μm) ICP-OES analizi sonucu

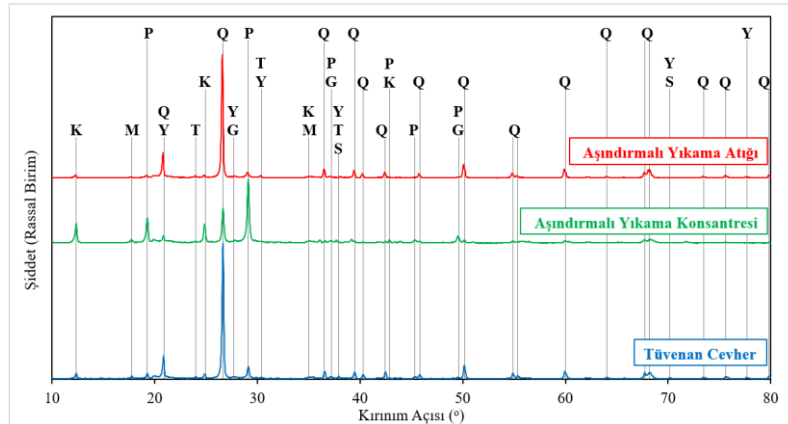
	% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3	% MgO	% CaO	% Na_2O	% K_2O	% TiO_2	% P_2O_5	A.K*
+75 μm	82.58	13.47	0.05	0.04	0.19	0.09	0.44	0.42	0.17	2.40
-75 μm	64.11	27.44	0.31	0.08	0.36	0.18	1.18	0.34	0.29	5.60

*A.K.: Ateşte Kayıp (1000 °C)

Cevherde bulunan ve Mohs sertlikleri 1-3 arasında değişen pirofillit, kaolinit, muskovit ve paragonit minerallerinin ince boyutlara ufalanarak konsantreye geçmesi, Mohs sertlikleri 5.5-7 arasında değişen kuvars, topaz, kyanit ve dijasporun ise ince boyutlara ufalanmayarak artıktaki kalması beklenmektedir. Şekil 4’deki AY konsantresi ve atığının XRD desenleri bu durumu desteklemektedir. Tüvenan cevhere kıyasla, sertliği yüksek olan minerallerin toz kırınım şiddetleri artıktaki artarken sertliği düşük olan kırılğan minerallerin toz kırınım şiddetleri konsantrede artmaktadır. Bu durum, aynı zamanda AY konsantresinin kimyasal analizinde görülen Al_2O_3 , K_2O ve Na_2O içeriklerinin artışı da açıklamaktadır. Sertliği düşük olup ufalanarak konsantreye geçen tüm mineraller Al içerirken, muskovit K ve paragonit ise Na içermektedir. Dolayısı ile konsantrede Al, K ve Na içerikleri artmıştır.

AY konsantresinde, tüvenan cevhere göre artan Fe_2O_3 içeriğinin sebebi, çelikten üretilmiş pervanelerin ince boyutlarda aşınarak konsantreye geçmesinden kaynaklanmaktadır. Böyle bir durumda konsantredeki Fe asit liçi ile çözünerek, elde edilecek alüminanın saflığını azaltacaktır. Bu nedenle çelik

yerine asitlere karşı dayanıklı olan teflon karıştırıcı kullanılması konsantrenin demir içeriğinin artmasını engelleyecektir (Aydoğmuş, 2020).



Şekil 4. Tüvenan cevher, AY konsantresi ve atığının XRD analizi

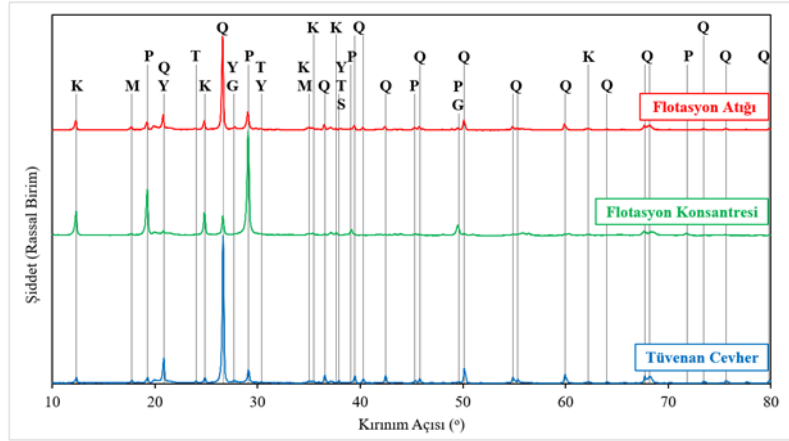
Flotasyon Yöntemi ile Zenginleştirme

Zenginleştirme işleminde Dietil Hegzanol (DEH) ve Polipropilen Glikol (PPG) köpürtücülerin farklı dozajlarda kullanıldığı bu çalışmada elde edilen veriler ile ön testler yapılmıştır. Oluşan pülp 1000 devir/dakika hızda 10 dakika karıştırılmış, 100 g/ton miktarında köpürtücü eklenerek, 10 dakika karıştırılmış ve hava verilerek 30 dakika süresince köpük alınmıştır. Bu çalışmada tane boyutunun flotasyon verimini etkisinin belirlenmesi amacıyla tane boyutu etkisi çalışılmıştır. Yöntem kısmında verilen parametreler temel alınarak yapılan flotasyon testleri sonucu konsantre ve artıkların ICP-OES analizi Çizelge 3'te verilmiştir. Flotasyon sonucu elde edilen konsantreden alınan temsili numunenin XRD analizi ise Şekil 5'de verilmiştir.

Çizelge 3'de, -150 µm boyutundaki konsantrelerin alümina içerikleri, -75 µm boyutundaki konsantrelere nispeten daha yüksek olduğu ve öğütme maliyeti de değerlendirildiğinde, çalışma tane boyutu -150 µm olarak belirlenmiştir. Bu tane boyutunda elde edilen konsantrelerin alümina içerikleri birbirlerine çok yakın olmasına rağmen PPG köpürtücünün zenginleştirme verimi daha yüksektir. Bu yüzden deneylerde PPG köpürtücü kullanılmıştır. Flotasyon işlemi için zenginleştirme oranı 5,13 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Flotasyon ile zenginleştirme sonucu konsantre ve artıkların kimyasal analizi

Tane Boyutu, µm	Köpürtücü	Ürünler	%Miktar	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	Al ₂ O ₃ Verimi, %
-75	PPG	Besleme	100	20.64	73.41	29.43
		Konsantre	24.21	25.09	68.15	
		Artık	75.79	19.24	74.37	
	DEH	Besleme	100	20.64	73.41	39.42
		Konsantre	33.76	24.10	68.99	
		Artık	66.24	18.92	74.80	
-150	PPG	Besleme	100	20.64	73.41	30.49
		Konsantre	22.44	28.05	64.37	
		Artık	77.56	18.47	75.45	
	DEH	Besleme	100	20.64	73.41	22.06
		Konsantre	16.07	28.35	64.21	
		Artık	83.93	19.12	74.77	

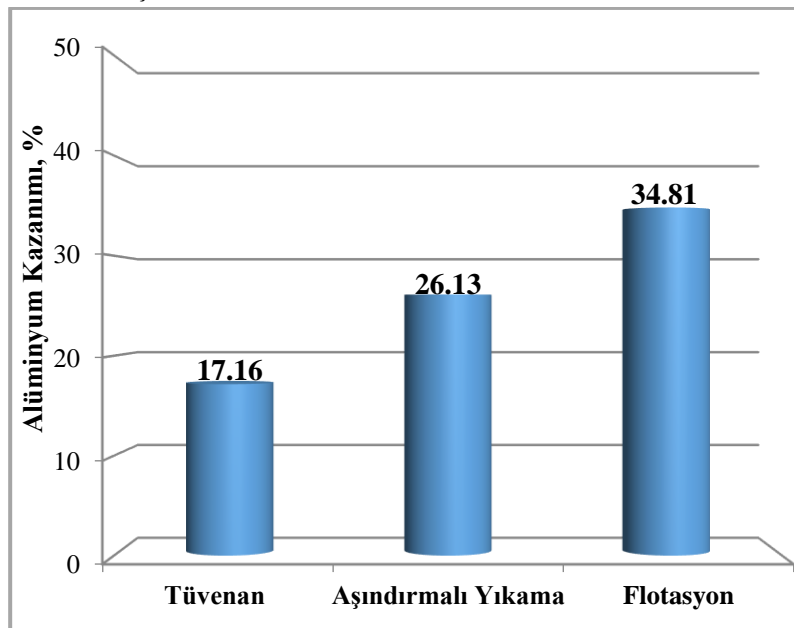


Şekil 5. Tüvenan pirofillit cevheri, flotasyon konsantresi ve atığının XRD analizi

Şekil 5'deki XRD desenleri ile ICP-OES sonuçları birbirini desteklemektedir. Konsantrenin kuvars pik şiddeti, tüvenan cevhere göre azalırken, pirofillit, kaolinit ve muskovit pik şiddetleri artmaktadır. Artıkta ise, tüvenan cevhere göre pirofillit, kaolinit ve muskovit pik şiddetlerinde belirli bir değişiklik gözlenmemiştir.

Liç Deney Sonuçları

Liç çalışmalarında Uysal (2018) Pütürge pirofillit cevherinden alümina üretimi üzerine yapmış olduğu doktora tez çalışmasında belirlenen ideal liç parametreleri temel alınarak yapılmıştır. Bu belirlenen liç parametrelerinde tüvenan cevher, AY ve flotasyon konsantrelerinin HCl liçi sonucu Al kazanımları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Tüvenan cevher, aşındırmalı yıkama ve flotasyon konsantrelerinin liçi sonucu Al kazanım değerleri (Liç koşulları; 4 M HCl, 108 °C, 24 saat, çözelti-cevher oranı 20 l/kg, 600 devir/dakika karıştırma hızı)

Şekil 6'da liç verimleri incelendiğinde, flotasyon ile zenginleştirme yönteminin AY ile zenginleştirme yöntemine göre %8.68 daha yüksek Al kazanımı sağladığı belirlenmiştir. Tüvenan cevherden direkt liç sonucu Al elementinin %17.2'si kazanılmıştır. Uysal (2018) tez çalışmasında aynı yatağa ait ancak farklı yerlerden alınmış Pütürge pirofillit cevheri tüvenan cevher için liç verimi %10.57 olarak bulunmuştur. Bu farklılığın sebebinin yüklü çözeltiden analiz yöntemi farklılığından, cevherin aynı ocak içerisinde farklı konumlardan alınması, içeriğinin farklı olmasından kaynaklanabileceği

düşünülmektedir. Uysal (2018) yüklü liç çözeltilisinden Al analizini gravimetrik yöntemle yapmışken bu çalışmada AAS ile yapılmıştır.

Aşındırmalı yıkama işleminde %54.79 verimle zenginleştirme sonucu tüvenanın yaklaşık yarısının konsantre olarak alındığı ve %26.13 liç verimi ile kazanılması sonucu tüvenan cevhere göre nihai kazanım değeri %14 ($26.13 \cdot 0.548$) olmaktadır. Flotasyon için ise bu değer %11 ($34.81 \cdot 0.31$) olmaktadır. Her ne kadar tüvenan cevhere göre liç verimi açısından direkt liç daha verimli olsada, zenginleştirme verimi, nihai olarak elde edilecek alümina miktarı ve saflığı birlikte değerlendirildiğinde AY konsantresinin biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Böylece nihai alümina miktarları 100 kg tüvenan cevher için 3.54 kg ($17.16 \cdot 0.206$) ve AY konsantresi için ise 3.93 kg ($14.31 \cdot 0.274$) olmaktadır. Bu değerlerin birbirine yakın olduğu ayrıntılı ekonomik analiz ile birlikte değerlendirme yapmanın daha doğru olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, zenginleştirme yapılmasına rağmen Al kazanım değerlerinin düşük olduğu bunun için konsantrelerin liç öncesi mekanik aktivasyonla (aşırı öğütme) aktifleştirilmesi önerilmektedir (Aydoğmuş, 2019).

SONUÇ

Bu çalışmada, Pütürge pirofillit cevherinden alümina üretimi üzerine farklı zenginleştirme yöntemlerinin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmaya göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Pütürge pirofillit cevherinin başlıca mineralleri; kuvars, pirofillit, kaolinit ve muskovit olduğu ve %20.64 Al_2O_3 ile %72.92 SiO_2 içerdiği belirlenmiştir.
2. Pirofillit cevheri AY yöntemi ile %54.79 verimle %27.44 Al_2O_3 tenörlü bir konsantre, flotasyon yöntemi ile ise %30.49 verimle %28.05 Al_2O_3 tenörlü bir konsantre elde edilmiştir.
3. Tüvenan, aşındırmalı yıkama ve flotasyon konsantrelerinin HCl liçi sonucu Al kazanım verimleri sırasıyla %17.16; %26.13 ve %34.81 olarak bulunmuştur. Tüvenan cevhere göre hesaplanan liç verimleri ise tüvenan %17.16; AY verimi %14.31; flotasyon verimi %10.6 olarak bulunmuştur. Tüvenan cevhere göre liç verimi açısından direkt liç daha verimli olsa da nihai olarak elde edilecek alümina miktarı ve saflığı birlikte değerlendirildiğinde AY konsantresinin biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Nihai alümina değerlerinin birbirine yakın olduğu ekonomik analiz ile birlikte uygun yöntemin belirlenmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir.
4. Sonuç olarak pirofillit cevherinden alümina üretimi için nihai olarak elde edilecek alümina miktarı ve saflığı birlikte değerlendirildiğinde aşındırmalı yıkama yönteminin daha yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca liç verimlerinin oldukça düşük olduğu bu yüzden cevherin mekanik olarak aktifleştirilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, projeyi destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (FYL-1533 nolu proje) teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Bu çalışmada; Ramazan Aydoğmuş ve Murat ERDEMOĞLU literatür araştırması, deneylerin gerçekleştirilmesinde, sonuçların değerlendirilmesi ve makale yazımında, Turan UYSAL literatür araştırması, sonuçların değerlendirilmesi ve makale yazımında katkı sağlamışlardır.

KAYNAKLAR

- Arlyuk, B.I., So. D., Pivnev, A.I. (1992). *Efficiency of Nepheline Ore Processing for Alumina Production All-union Aluminum and Magnesium*. Leningrad, In: Peterson, W.S. (Ed.), Light Metals, Wiley-VCH.
- Aydoğmuş, R. (2019). *Zenginleştirilmiş Malatya-Pütürge Pirofillit Cevherinin Alümina Üretimi İçin Aktifleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Birinci, M. (2002). *Pirofillit Cevherinin Zenginleştirme Olanaklarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Birinci, M. ve Erdemoğlu, M. (2016). Enrichment of Pütürge (Malatya, Turkey) Low-Grade Pyrophyllite Ore by Attrition-Scrubbing and Flotation. 15th International Mineral Processing Symposium, October 19-21, İstanbul.
- Birinci, M., Uysal, T., Erdemoğlu, M., Porgalı, E. ve Barry, T.S. (2017). Acidic Leaching of Thermally Activated Pyrophyllite Ore from Pütürge (Malatya, Turkey) Deposit. XVII. Balkan Mineral Processing Congress, November 1-3, Antalya.
- ElDeeb, A.B., Brichkin, V.H., Kurtenkov, R.V. ve Bormotov, I.S. (2019). Extraction of Alumina from Kaolin by A Combination of Pyro- and Hydro-metallurgical Processes. *Applied Clay Science*, 172, 146-154.
- Erdemoğlu, M. ve Sarıkaya, M. (1999). Malatya-Pütürge Pirofillit Cevherinin Flotasyonla Zenginleştirilmesi (sf: 124-131). 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 14-15 Ekim, İzmir.
- Erdemoğlu, M., Birinci, M. ve Uysal, T. (2018a). Kil Minerallerinden Alümina Üretimi: Güncel Değerlendirmeler. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 387-396.
- Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T., Tüzer, E. ve Barry, T.S. (2017). Acid Leaching Performance of Mechanically Activated Pyrophyllite Ore for Al₂O₃ Extraction. 9. International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying, September 3-7, Kosice.
- Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T., Tüzer, E. ve Barry, T.S. (2018). Mechanical Activation of Pyrophyllite Ore for Aluminum Extraction by Acidic Leaching. *Journal of Material Science*, 53(19), 13801-13812.
- Jorjani, E. ve Amirhosseini, M. (2007). Alumina Production Process from Nepheline Ore in Razgah- Iran (pp: 111-115). International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2007), Indian Institute of Mineral Engineers, February 22-24, Mumbai.
- Li, D., Jiang, K., Jiang, X., Wang, S., Fan, Y. ve Liu, W. (2018). The Recovery of Potassium Oxide and Alumina from Alunite Concentrate. *Hydrometallurgy*, 176, 1-8.
- Miao, L., Ji, G., Gao, G., Li, G. ve Gan, S. (2011). Extraction of Alumina Powders from the Oil Shale Ash by Hydrometallurgical Technology. *Powder Technology*, 207(1-3), 343-347.
- Shemi A., Ndlovu S., Sibanda V. ve van Dyk L.D. (2014). Extraction of Aluminum from Coal Fly Ash: Identification and Optimization of Influential Factors Using Statistical Design of Experiments. *International Journal of Mineral Processing*, 127, 10-15.
- Tripathy, B.K., Behera, B., Aishvarya, V., Sheik, A.R., Dash, B., Sarangi, C.K., Tripathy, B.C., Sanjay, K. and Bhattacharya, I.K. (2019). Sodium Fluoride Assisted Acid Leaching of Coal Fly Ash for the Extraction of Alumina. *Minerals Engineering*, 131, 140-145.
- Uysal, T. (2018). *Asit Liç Yöntemi ile Pirofillit Cevherinden Alümina Üretiminde Aktifleştirme Koşullarının Araştırılması*. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye.
- Xu, D., Li, H., Bao, W. and Wang, C. (2016). A New Process of Extracting Alumina from High-alumina Coal Fly Ash in NH₄HSO₄ + H₂SO₄ Mixed Solution. *Hydrometallurgy*, 165(2), 336-344.