



Orijinal Araştırma / Original Research

KARAÇAM LATERİTİK NİKEL CEVHERİNİN MİNERALOJİK KARAKTERİZASYONU VE FİZİKSEL ZENGİNLEŞME DAVRANIMININ BELİRLENMESİ

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF KARAÇAM LATERITIC NICKEL ORE AND DETERMINATION OF ITS PHYSICAL BENEFICIATION DEPARTMENT

Özgür Özcan^{a,*}, N. Metin Can^{a,**}, İlkyay B. Can^{a,***}, Sönmez Sayılı^b

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, ANKARA

^b Fe-Ni Madencilik Ltd. Şirketi, Çankaya, ANKARA

Geliş Tarihi / Received : 08 Mayıs / May 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 09 Temmuz / July 2019

Anahtar Sözcükler:

Lateritik nikel,
 Kantitatif mineraloji,
 Zenginleştirme

Keywords:

Lateritic nickel,
 Quantitative mineralogy,
 Concentration

ÖZ

Bu çalışmada, Mihalicçık-Eskişehir bölgesine ait lateritik bir nikel cevherinin detaylı mineralojisi ve zenginleştirme olasılıkları araştırılmıştır. Cevherin kantitatif mineralojik analizi MLA (Mineral Liberation Analyzer) kullanılarak yapılmış; ernienikelit ve pimelit mineralleri nikel taşıyıcı mineraller olarak belirlenmiştir. Cevherin yerçekimi ile zenginleştirmeye uygunluğunu belirlemek için ağır sıvı testi yapılmıştır. Zenginleştirme çalışmaları kapsamında optik ayırma, kuru ve yaş manyetik ayırma ve mikrodalga ile ısıtma yöntemleri uygulanmıştır. Testler sonucunda nikel tenöründe kayda değer bir iyileşme gerçekleşmemiştir. Yalnızca mikrodalga ile ısıtılan cevherin arsenik tenöründe bir miktar düşüş gözlenmiştir. Ernienikelitlerin çok ince silikatlar (genellikle kil ve Si oksitler) ile bağlı formda bulunması, fiziksel zenginleştirme yöntemleri ile cevherin kolaylıkla zenginleştirilemeyeceğini desteklemektedir.

ABSTRACT

In this study, the detailed mineralogy and beneficiation possibilities of a lateritic nickel ore from Mihalicçık-Eskişehir region was investigated. Quantitative mineralogical analysis of the ore was performed using MLA (Mineral Liberation Analyzer); ernienickelite and pimellite minerals were determined as nickel bearing minerals. Heavy liquid test was performed to determine the amenability of the ore to gravity separation. In the scope of beneficiation studies, optical sorting, dry and wet magnetic separation and microwave heating were applied. As a result of the tests, there was no significant improvement in nickel grade. Only a slight decrease in the arsenic grade of the microwave-heated ore was observed. The presence of ernienickelite locked with very fine silicates (usually clays and Si oxides), supports the fact that the ore cannot be beneficiated easily by physical beneficiation methods.

* Sorumlu yazar / Corresponding author : ozgurozcan@hacettepe.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0001-6177-4585>

**metin.can@hacettepe.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0003-0214-0720>

***ilkay@hacettepe.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0002-3335-9285>

GİRİŞ

Yerkabuğunun %0,008 kadarını oluşturan nikel, çekirdeğin derin kısımlarında demir, oksijen, silis ve magnezyumdan sonra en bol bulunan beşinci elementtir. Nikel doğada oksitler, sülfidler ve silikatlar halinde bulunur (Çiftçi ve Atik, 2014).

Dünya nikel rezervlerinin yaklaşık olarak %72'si lateritik nikel yataklarından oluşmaktadır. Ancak, dünya nikel üretiminin %58'i sülfürlü yataklardan gerçekleşmektedir (Oxley, 2013). Tüm dünyada üretilen nikelin %66,2'si paslanmaz çelik üretiminde kullanılmaktadır (Zainol, 2005). Lateritik nikel yatakları kalıntı yatakların ürünlerinin yağmurla birlikte ultramafik kayaların yüzeylerine taşınarak burada kimyasal ve mekanik olaylarla değişim geçirmesi ile oluşmuşlardır (Golightly, 1981). Ticari öneme sahip lateritik nikel yatakları karmaşık bir mineralojik yapıya sahiptir. Bu tip yataklarda nikel, oksit ve/veya silikat mineralleri ile birlikte, ya da bu minerallerin yapısına girmiş halde bulunmaktadır. Bu tip cevherlerin karmaşık mineralojisinden dolayı fiziksel zenginleştirme yöntemleri nihai konsantrasyon üretiminde yetersiz kalmaktadır (Zubryckyj vd., 1965; Queneau, 1970; Whittington ve Muir, 2000). Bu nedenle, lateritik nikel yatakların endüstriyel olarak değerlendirilmesinde metalurjik (pirometalurjik ve/veya hidrometalurjik) yöntemler tercih edilmektedir (Ucyıldız ve Girgin, 2017; Girgin vd., 2011; Agacayak ve Zedef, 2011, 2012; Agacayak ve Köşeler, 2012; Agacayak vd., 2016; Kursunoglu ve Kaya, 2015; Agacayak, 2008; Nasuh, 2014).

Literatürde lateritik nikel cevherlerinin mineralojik yapısını inceleyen sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Landers ve Gilkes, 2007; Oliverira vd, 2001; Eliopoulos vd., 2000; Thorne vd., 2009; Elias vd, 1975; Zhu vd., 2012). Ülkemizde küçümsemeyecek miktarda lateritik nikel yatakları olmasına rağmen henüz bu yatakların detaylı mineralojik yapısını ortaya koyan bir çalışma yapılmamıştır. Bu yataklardan bir tanesi de Karaçam (Mihalıççık-Eskişehir) lateritik nikel yatağıdır.

Lateritik nikel cevherlerinin mineralojik yapılarının, cevher içerisindeki minerallerin yapı doku ilişkilerinin, mineral serbestleşme durumlarının ve nikel içeren minerallerin özelliklerinin belirlenmesi uygun zenginleştirme veya ön zenginleştirme yönteminin belirlenmesi açısından önem arz etmektedir.

Mineralojik yapının belirlenmesinde ise son yıllarda madencilik endüstrisinde büyük bir doğruluk payıyla yer edinen Intellection Pty. Ltd. 'in geliştirdiği QEM*SCAN (Anon(a), 2008) ile JK Tech Pty. Ltd.'in geliştirdiği MLA (Anon(b), 2008) sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. MLA oldukça detaylı mineralojik analiz yapabilen, yazılımla donatılmış bir elektron mikroskobudur. MLA analizi ile cevherdeki tüm minerallerin türleri, miktarları, serbestleşme durumları, elementel dağılımları, minerallerin yapı-doku özellikleri ve birbirleriyle olan kenetlenme durumları tane boyu bazında detaylı olarak belirlenebilmektedir (Can ve Çelik, 2009).

Bu çalışmada, Karaçam (Mihalıççık-Eskişehir) lateritik nikel cevherinin detaylı mineralojik karakterizasyonu ve zenginleştirme çalışmaları yürütülmüştür. Çalışmanın temel amacı cevherin fiziksel yöntemler kullanılarak nihai ya da ön zenginleştirmeye uygunluğunun araştırılmasıdır.

1. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Bu kapsamda, üretim yapılan ocaktan alınan numuneler kullanılarak yataktaki cevheri temsil edecek şekilde örnekler hazırlanmış ve detaylı karakterizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında tüvenan cevherin fraksiyonel kimyasal analizleri yapılmış, MLA ile mineralojik bileşimi ve serbestleşme durumu kapsamlı şekilde ortaya konmuştur. Ayrıca tüvenan cevherden elde edilen tane boyu fraksiyonlarına ağır sıvı testi uygulanmıştır. Ağır sıvı testinden elde edilen batan ürünlere de ayrıca MLA analizleri yapılmıştır.

1.1. Tüvenan Cevher Tane Boyu Dağılımının Belirlenmesi

Tüvenan cevher numunesinin tane boyu dağılımı en iri boydan 38 µm'a kadar yaş elek analizi yöntemi ile belirlenmiştir. Buna göre; tüvenan cevherin %80'i 19 mm'den incedir. Elek analizinden elde edilen tüm fraksiyonlar XRF yöntemi ile kimyasal analize tabi tutulmuştur. Elek analizi fraksiyonlarına ait ağırlık değerleri, nikel, demir ve arsenik tenörleri Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Elek analizi ve kimyasal analiz sonuçları kullanılarak tüvenan cevherin fraksiyonel bazda

nikel tenörü ve verimi hesaplanmıştır. Tüvenan cevherin fraksiyonel bazda ağırlık, tenör ve verim ilişkisi Şekil 1'de verilmektedir.

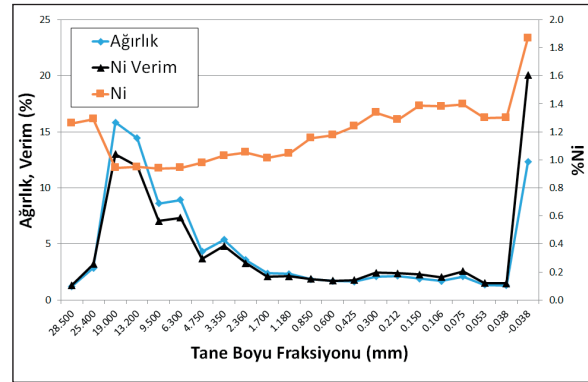
Şekil 1 incelendiğinde, tüvenan cevherin iri ve çok ince boylarda miktarca daha fazla olduğu, ara boylarda ise ağırlıkça dağılımın birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Nikel tenörü ele alındığında ise nikelin tane boyu fraksiyonlarına neredeyse eşit olarak dağıldığı, ince fraksiyonlara gildikçe hafif bir artış gösterdiği gözlenmektedir.

Çizelge 1. Tüvenan cevhere ait fraksiyonel ağırlık değerleri ile nikel, demir ve arsenik tenörleri

Tane Boyu (mm)	Ağırlık (%)	Ni (%)	Fe (%)	As (%)
28,50	1,22	1,26	4,16	0,054
25,40	2,85	1,29	15,03	0,036
19,00	15,85	0,94	9,85	0,033
13,20	14,43	0,95	11,04	0,029
9,500	8,61	0,94	11,53	0,044
6,300	8,93	0,94	11,31	0,041
4,750	4,32	0,98	12,90	0,043
3,350	5,38	1,03	12,92	0,045
2,360	3,59	1,05	13,05	0,044
1,700	2,38	1,01	13,22	0,049
1,180	2,35	1,04	13,69	0,047
0,850	1,86	1,16	14,48	0,051
0,600	1,69	1,18	14,38	0,051
0,425	1,66	1,24	15,10	0,052
0,300	2,10	1,34	14,94	0,047
0,212	2,14	1,29	14,24	0,042
0,150	1,90	1,39	14,78	0,045
0,106	1,69	1,38	14,68	0,046
0,075	2,10	1,40	14,73	0,046
0,053	1,34	1,30	13,87	0,044
0,038	1,31	1,30	14,56	0,050
-0,038	12,31	1,87	19,10	0,074
Toplam	100,00	1,15	12,94	0,044

Nikelin tüm fraksiyonlara benzer oranlarda dağılması herhangi bir boydan daha iri malzemenin atılarak tenörün yükseltilmesi olasılığını azaltmaktadır. Nikelin tane boyu fraksiyonlarındaki verimi incelendiğinde ise en yüksek verim değerinin en ince tane boyu fraksiyonunda old-

uğu görülmektedir. Demir ve arsenik tenörleri açısından bakıldığında da tane boyu fraksiyonları arasında benzer eğilim dikkati çekmektedir.



Şekil 1. Tüvenan cevhere ait fraksiyonel bazda ağırlık, tenör ve verim değerleri

1.2. Mineralojik Analiz Çalışmaları

Lateritik tipteki Fe-Ni cevherinin karmaşık bir yapı-dokuya sahip olması MLA yönteminin kullanılmasını gerekli kılmıştır. Minerallerin doğru tanımlanması ve serbestleşme durumlarının belirlenmesi amacıyla Kanada ActLab laboratuvarlarında bulunan MLA cihazı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, tüvenan cevherden yaş eleme yoluyla hazırlanan farklı tane boyu fraksiyonları (-600+300µm, -300+150µm, -150+75µm, -75+38µm) ve ağır sıvı testleri sonucunda elde edilen -1,18+0,212 mm batan ürün numunesine MLA analizi yapılmıştır.

Tüvenan cevher tane boyu fraksiyonlarında saptanan minerallerin ağırlıkça dağılımı Çizelge 2'de sunulmaktadır.

Buna göre cevherde miktarca fazla olan ana mineraller götit, kuvars ve dolomit olup nikel taşıyıcı ana mineraller ise ernienikelit ve pimelittir. Ernienikelitin bir kısmında oldukça ince silikat (çoğunlukla kil veya Si oksitler) karışımı bulunmaktadır. Bazı Ernienikelit tanelerinde Asbolan mineralinin kimyasal kompozisyonuna benzer ((Co, Ni)1-y(MnO₂)₂-x(OH)₂-2y+2x.n(H₂O)) Co, Ca, Mg ve Si pikleri belirlenmiş ancak, Co ve Ca miktarı genel anlamda kabul gören asbolan formülü için oldukça az olduğundan asbolan olarak sınıflandırılmamıştır.

Bu nedenle belirlenen bu fazlar Ernienikelit grubuna dahil edilmiştir. Pimelit minerali cevherde

daha az miktarda bulunmaktadır. Nikel, götit ve Fe-Mn oksit/hidroksit minerallerin bünyesinde de az miktarda mevcuttur. Fe-Mn oksit/hidroksit minerali bir karışım fazı olup mineral tanelerinde demir ve mangan miktarı oldukça değişkendir ve nikel bu karışımda oldukça az miktarda bulunmaktadır.

Kromun ana taşıyıcı minerali kromit minerali olup götit de az miktarda kromit içermektedir. Tüvenan cevherin karmaşık bir yapı-doku ilişkisi sergilediği MLA analizinde elde edilen geriye saçınımlı taramalı elektron mikroskop (Back Scattered Electron, BSE) görüntülerinde açıkça görülmektedir (Şekil 2).

Tüvenan cevher içerisinde yer alan ve nikel içeren mineral olan götitin, serbest, ikili ve çoklu bağlı yüzde miktarları hesaplanmıştır.

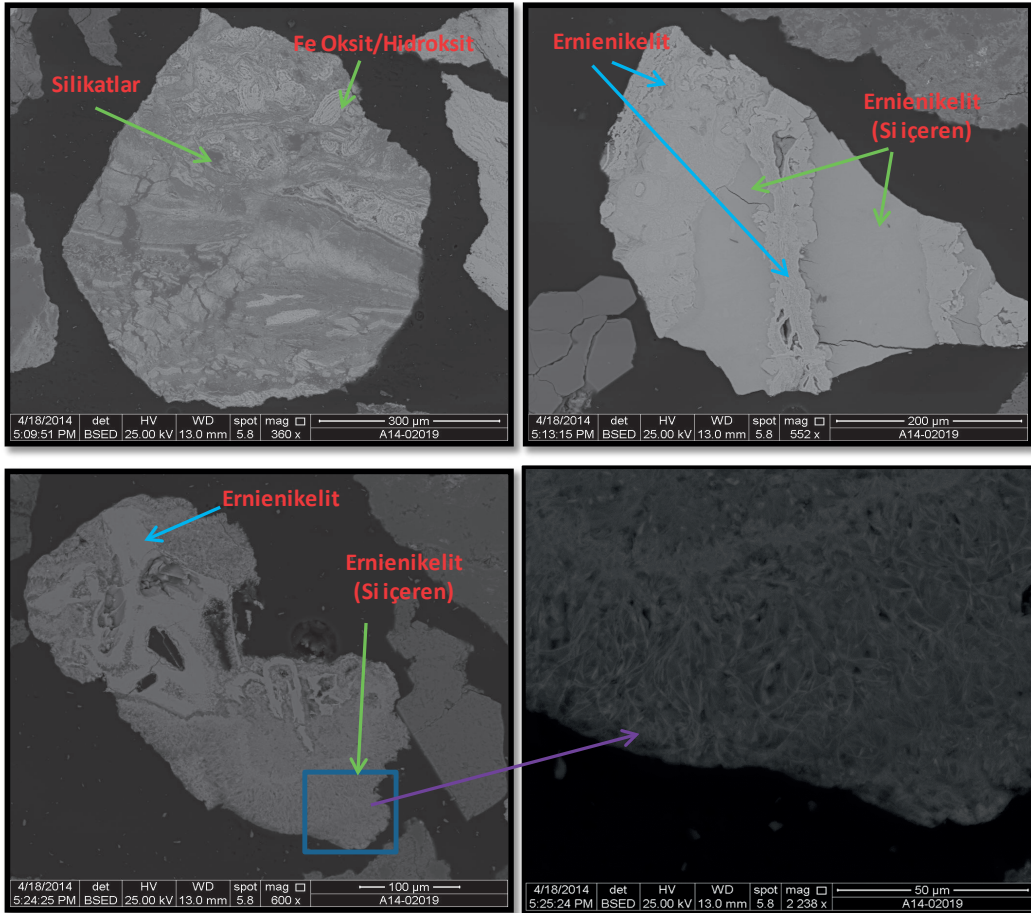
Bu hesaplamadaki serbest tane; tane yüzey alanının %90'ından fazlasının tek bir mineralden

oluştığı durumu ifade etmektedir. Tane boyu fraksiyonlarındaki götit mineralinin serbestleşme dereceleri Şekil 3'te verilmektedir. Buna göre, en iri fraksiyonda götitin %36'sı serbest haldedir. Tane boyu inceldikçe bir önceki iri fraksiyona göre serbestleşme derecesinin arttığı görülmektedir.

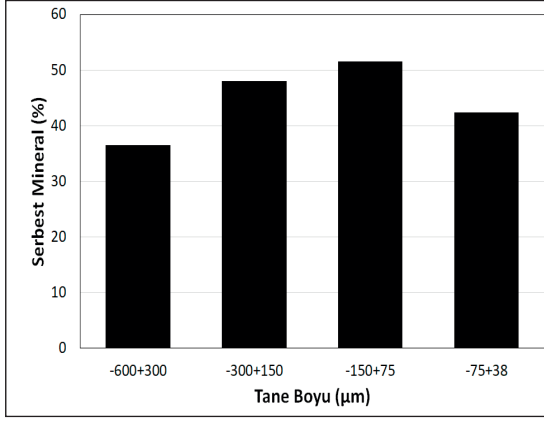
Tüvenan cevher içerisindeki götit mineralinin diğer ana mineraller olan kuvars ve dolomit ile ikili ve üçlü bağlılık oranları Şekil 4'te verilmektedir.

Şekil 4 incelendiğinde, götit genellikle %55'den fazla bir oranla çoklu bağlı tane formunda olup pek çok mineralle birlikte bulunmaktadır.

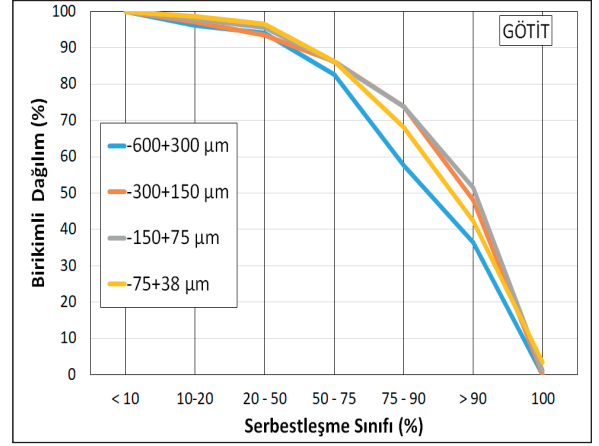
Tüvenan cevher içerisindeki ana minerallerin tane boyu inceldikçe ikili bağlı tane formundan üçlü/çoklu tane formuna geçmesi cevherin ne kadar karmaşık bir yapı-dokuda olduğunu da işaret etmektedir.



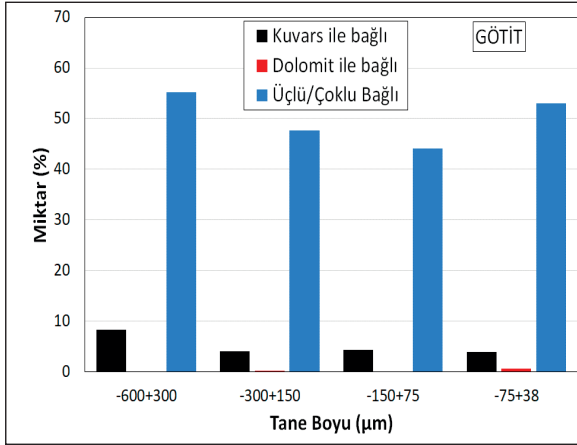
Şekil 2. Elektron mikroskop (BSE) görüntüleri



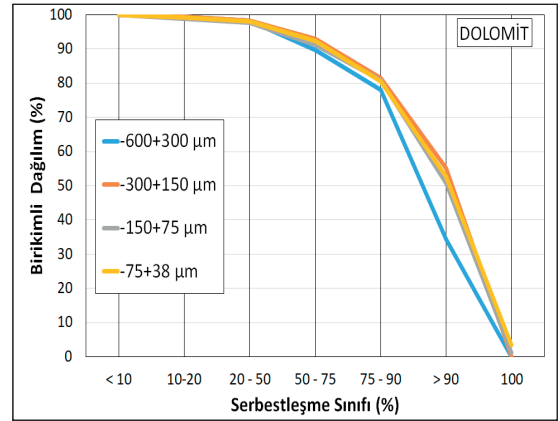
Şekil 3. Tüvenan cevher içerisindeki götit mineralinin serbestleşme dereceleri



Şekil 6. Götitin serbestleşme sınıflarındaki dağılımı

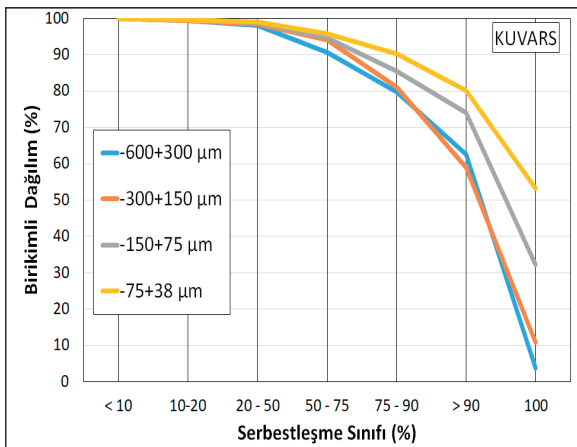


Şekil 4. Götit mineralinin ikili ve çoklu bağlılık oranları



Şekil 7. Dolomitin serbestleşme sınıflarındaki dağılımı

Tüvenan cevherdeki ana minerallerin serbestleşme sınıfları kuvars, götit ve dolomit için Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 5. Kuvarsın serbestleşme sınıflarındaki dağılımı

Ana minerallerin serbestleşme sınıflarındaki dağılımları incelendiğinde tane boyu fraksiyonunun incelenmesi ile minerallerin tane yüzeyinde %75'den daha fazla miktarda bulunma oranı artmaktadır Ancak özellikle nikel içeren götit mineralinin serbestleşme sınıflarındaki dağılımına bakıldığında bir önceki iri fraksiyona göre önemli bir serbestleşme göstermediği de anlaşılmaktadır (Şekil 6).MLA analizleri sırasında cevher içerisindeki tüm minerallerin ortalama tane boyları da hesaplanmıştır. Nikel taşıyıcı mineraller olan Erniekelit mineralinin ortalama tane boyu 14-30 µm, götit mineralinin ise 19-40 µm aralığında olduğu tespit edilmiştir.

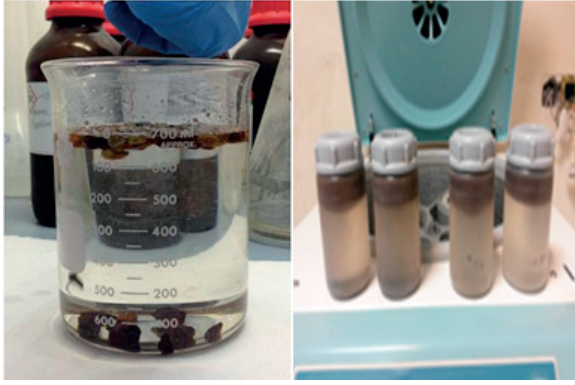
Çizelge 2. Besleme numunesinin tane boyu bazında mineralojik bileşimi

	-600+300	-300+150	-150+75	-75+38
	µm	µm	µm	µm
Mineral		Ağırlık, %		
Ernienikelit	0,39	0,80	0,68	0,59
Ernienikelit-Kil karışımı	0,48	0,67	0,40	0,49
Pimelit/Ni-Smektit ($Ni_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4(H_2O)$)	0,28	0,41	0,72	0,52
Nepoyit Mn-Fe ile birlikte ($Ni_3Si_2O_5(OH)_4$)	0,00	0,00	0,01	0,00
Nimit ($(Ni,Mg,Fe^{++})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$)	0,00	0,00	0,00	0,00
Götit (Ni ile birlikte)	0,17	0,20	0,19	0,15
Fe-Mn Oksit/Hidroksit (Ni ile birlikte)	0,08	0,16	0,08	0,07
Kromit	0,43	0,64	0,75	0,89
Kromit-Al	0,46	0,27	0,31	0,39
Spinel-Fe ve Cr	0,05	0,05	0,00	0,00
Götit (Cr ile birlikte)	0,09	0,76	0,19	0,33
Oksitler / Karbonatlar				
Götit	20,86	20,62	21,17	19,69
Götit (Si ile birlikte)	3,58	4,87	4,66	4,90
Hematit	1,94	1,01	1,14	2,21
Dolomit	14,89	13,24	9,12	8,91
Dolomit-QZ karışımı	1,17	0,93	0,72	0,73
Kalsit	5,89	4,37	4,37	4,42
Silikatlar ve Killer				
Kuvars	38,15	38,29	40,81	44,25
Kuvars-Götit Karışımı	4,48	5,21	4,22	3,32
Serpantin	3,16	3,76	3,79	3,00
Talk	1,25	1,42	3,13	2,73
Amfibol	0,47	0,32	0,93	0,66
Garnet	0,03	0,16	0,07	0,09
Killer	0,79	0,71	1,26	0,66
Fe-Kil	0,68	0,73	0,90	0,64
Diğer	0,25	0,39	0,40	0,37
Toplam	100	100	100	100

1.3. Ağır Sıvı Testleri

Tüvenan cevherden alınan temsili numune farklı boyut fraksiyonlarına (-9,5+4,75 mm, -4,75+1,18 mm, -1,18+0,212 mm, -0,212 mm) ayrılarak ağır sıvı testine tabi tutulmuştur. Ayrıca tüvenan cevherin tamamı 1mm'den ince olacak şekilde hazırlanan ayrı bir numuneye de ağır sıvı testi uygulanmıştır. Test sırasında 2,96 g/cm³ yoğunluğundaki tetrabromoetan ağır sıvısı kullanılmıştır.

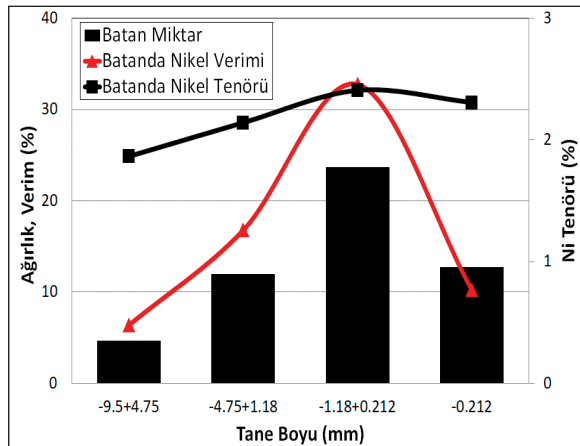
Test esnasında, her bir fraksiyon ayrı ayrı ortama beslenmiş, ardından yüzen ve batan ürünler toplanarak ağırlıkları belirlenmiştir. -1 mm ve -0,212 mm fraksiyonunda, normal koşullarda çökmenin çok yavaş olması nedeniyle bu boylardaki ağır sıvı testleri santrifüj yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen her bir fraksiyonun kimyasal analizi yapılmıştır. Ağır sıvı çalışmalarına ait fotoğraf görüntüleri Şekil 8'de gösterilmektedir.



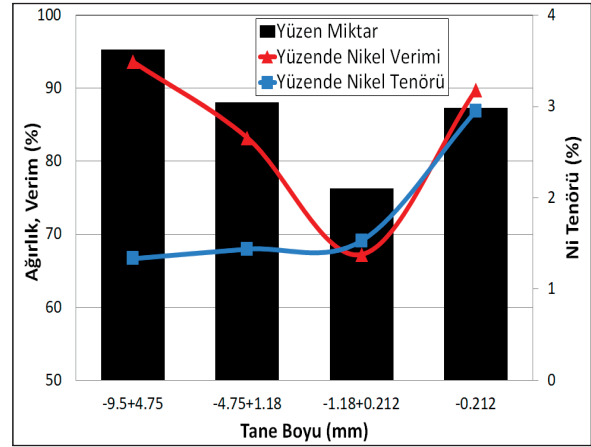
Şekil 8. Ağır sıvı testleri

Ağır sıvı testlerinde batan ürün miktarları ile nikel tenör ve verim değerlerinin karşılaştırılması Şekil 9'da, yüzen ürün miktarları ile nikel tenör ve verim değerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 10'da verilmektedir.

Şekil 9 ve Şekil 10 birlikte incelendiğinde, dar tane boyu fraksiyonlarında yüzen ürünlerdeki nikel tenörünün neredeyse aynı kaldığı ancak batan ürünlerdeki nikel tenörünün önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu durum yalnızca -0,212 mm fraksiyonunda terslik göstermektedir. Bu durumun ise tane boyunun çok geniş bir aralıkta olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 9. Ağır sıvı test sonuçları (Batan Ürünler)



Şekil 10. Ağır sıvı test sonuçları (Yüzen Ürünler)

Özellikle -1,18+0,212 mm fraksiyonunda batan ürünlerdeki nikel tenörü % 2,41, arsenik tenörü ise % 0,29'a kadar çıkmaktadır. Ancak bu koşulda ana beslemeye göre yapılan hesap verimin % 2,63 gibi düşük bir değerde olduğunu göstermektedir.

Ağır sıvı testlerinden elde edilen sonuçlar batan ürünlerin nikel tenörlerinin yanı sıra demir ve arsenik tenörlerinin de aşırı derecede yükseldiğini göstermiştir. Demir ve nikel açısından olumlu olan bu artış arsenik açısından ise olumsuzdur. Bu durum arsenik değerlerinin demir mineralleri ile bağlantısını ortaya koymaktadır. Bir diğer olumsuzluk ise batan ürünlerin toplam cevher içindeki düşük-çok düşük yüzdeleridir. -0,212 mm numunesinin batan ve yüzen ürünlerindeki nikel tenörleri incelendiğinde, % 2,95 gibi çok yüksek bir nikel tenörü ile karşılaşılmaktadır. MLA sonuçları dikkate alındığında bu kısımda yoğunluğu 2,5 g/cm³ civarında olan nikel taşıyıcı pimelit mineralinin bulunduğu sonucuna varılabilmektedir. Yüzen kısımda yer alan bu nikel mineralinin kazanılması için ayrıca bir çalışma yürütülmesi gerekmektedir.

-1 mm'ye uygulanan ağır sıvı testi sonucunda da, nikel ve arsenik tenörü batan üründe artış göstermiştir. Nikel tenörü batan üründe %21,12 verimle %1,304'ten %2,082'ye, arsenik tenörü ise %0,045'ten %0,136'ya yükselmiştir. Bu durum nikel ile birlikte arseniğin de -1 mm fraksiyonu içerisinde yoğunluğu yüksek mineraller ile bağlı halde bulunduğunu ve serbest olmadığını göstermektedir.

1.3.1. Ağır Sıvı ürünlerine Uygulanan MLA Analizleri ve Sonuçları

Ağır sıvı testleri sonucunda elde edilen ve en yüksek nikel tenörüne sahip olan -1,18+0,212 mm fraksiyonu batan ürününden alınan temsili bir numuneye de MLA analizi yapılmıştır.

-1,18+0,212mm batan ürününe ait mineralojik analiz sonuçları Çizelge 3'te sunulmaktadır. Çizelge 2 ve Çizelge 3 karşılaştırıldığında, nikel taşıyıcı ana mineral olan ernienikelitin tüvenan cevherde ortalama %0,60'tan batan üründe %1,58'e çıktığı görülmektedir. Ayrıca götit minerali ortalama %20'den %59,35 değerine ulaşmaktadır. Batan ürün içerisindeki kuvars ve dolomit içerikleri incelendiğinde ise bu minerallerin tüvenan cevhere oranla oldukça düşük seviyelere düştüğü açıkça görülmektedir. Bu sonuçlara ek olarak, ağır sıvı testi batan üründe kromitin tenörünün %2,5-3 seviyesine yükseldiği belirlenmiştir.

Serbestleşme analizine göre, götit %76 oranında serbest olup bağlı tane formu yine ikili bağlıdan çok, üçlü/çoklu formdadır. Ernienikelitin ise %58'lik kısmı serbest olup %22'lik kısmı kuvarsla ve %6'sı da kromitle ikili bağlıdır. Kromit ve Al içeren kromit mineralleri de sırasıyla %61 ve %53 oranında serbestleşme göstermektedir.

Her iki mineral de daha çok götittle ikili bağlı, %4'lük kısmı da diğer bir nikel minerali olan ernienikelitle bağlıdır.

2. ZENGİNLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI

Zenginleştirme çalışmaları kapsamında optik ayırma, kuru ve yaş manyetik ayırma yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca As miktarının düşürülmesi için cevher mikrodalgaya maruz bırakılmıştır. Tüvenan cevhere ve tüvenan cevherden elde edilen farklı boyut fraksiyonlarına uygulanan zenginleştirme çalışmalarını gösteren basitleştirilmiş akım şeması Şekil 11'de verilmektedir.

İri boyda gerçekleştirilen optik ayırma çalışmaları kapsamında cevher açık renkli ve koyu renkli olarak ayrılmıştır. Elde edilen koyu renkli ürünün nikel tenörü %0,852, açık renkli ürünün nikel tenörü ise %0,524 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar her iki üründe de istenilen nikel tenörüne ulaşamadığı anlamına gelmektedir.

Kuru manyetik ayırma çalışmaları yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırıcıda gerçekleştirilmiştir. Çalışma için temsili bir numune tüvenan cevher numunesi ile tüvenan cevherden elenerek hazırlanan +9,5mm ve -9,5mm fraksiyonları kullanılmıştır. Deneyler esnasında farklı tambur hızlarında numuneler alınarak gerekli analizler yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek tambur hızında (75 rpm) gerçekleştirilen testlerde herhangi bir zenginleşme gerçekleşmemiştir. Düşük tambur hızında (30 rpm) gerçekleştirilen çalışma sonucunda ise iri boydan ince boya gidildikçe nikel tenörünün ve veriminin arttığı gözlenmiştir. En yüksek nikel tenörü -9,5mm fraksiyonunda elde edilmiştir. Bu koşulda beslemenin %65,25'i manyetik ürün olarak alınmıştır. Manyetik ürünün nikel tenörü %1,629 verimi ise %77,22 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen manyetik ürünlerdeki %0,060 arsenik tenörü de sınır değerlerin altında kalmaktadır.

Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma çalışmaları kapsamında tüvenan cevherden yaş eleme yöntemi ile elde edilen -38 µm fraksiyonu ile yine tüvenan cevherin 1mm'nin altına kırılması ile elde edilen -1mm fraksiyonu kullanılmıştır. -38 µm fraksiyonu ile gerçekleştirilen iki kademeli manyetik ayırma çalışmaları sonucunda beslemenin ağırlıkça %20,78'i manyetik konsantr olarak elde edilmiştir (Şekil 12). Bu konsantrenin nikel tenörü %2,17, nikel verimi ise %23,88 olarak hesaplanmıştır. Manyetik olmayan ürünün nikel tenörü ise %1,80 gibi yüksek bir değerde kalmıştır. Nikelin manyetik olmayan ürün içerisindeki davranımını incelemek amacıyla atık numunesi -38+20 µm ve -20 µm fraksiyonlarına ayrılarak kimyasal analize tabi tutulmuştur (Çizelge 4).

Aynı bölgenin lateritik nikel cevheri ile yapılan yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma deneyleri sonucunda, cevherin karmaşık yapıda olduğu ve nikelin Fe (özellikle götit) ve diğer mineraller içerisinde kapanım halinde olduğu belirlenmiştir (Agacayak, 2008).

Çizelge 4 incelendiğinde manyetik olmayan ürünlerdeki nikelin neredeyse tamamının -20 µm fraksiyonundan kaybedildiği görülmektedir. Bu sonuç nikel içeren minerallerin hesaplanan ortalama tane boyu değerleri ile uyum göstermektedir.

Çizelge 3. -1,18+0,212 mm fraksiyonuna uygulanan ağır sıvı testi batan ürünü mineralojik bileşimi

Mineral	Ağırlık, %
Ernienikelit	1,58
Ernienikelit-Kil karışımı	3,05
Pimelit/Ni-Smektit (Ni ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ •4(H ₂ O))	0,95
Nepoyit Mn-Fe ile birlikte (Ni ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	0,00
Nimit ((Ni,Mg,Fe ⁺⁺) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈)	0,00
Götit (Ni ile birlikte)	0,27
Fe-Mn Oksi/Hidro	0,72
(Ni ile birlikte)	0,72
Kromit	2,56
Kromit-Al	3,42
Spinel-Fe ve Cr	0,00
Götit (Cr ile birlikte)	1,10
Cr/Ni Taşıyıcı Mineraller	
Götit	59,35
Götit (Si ile birlikte)	11,82
Hematit	4,73
Dolomit	0,39
Dolomit-QZ karışımı	0,00
Kalsit	1,10
Oksitler Karbonatlar	
Kuvars	2,84
Kuvars-Götit Karışımı	1,33
Serpantin	1,06
Talk	0,01
Amfibol	0,31
Garnet	0,32
Killer	0,97
Fe-Kil	1,05
Diğer	0,97
Toplam	100
Silikatlar ve Killer	

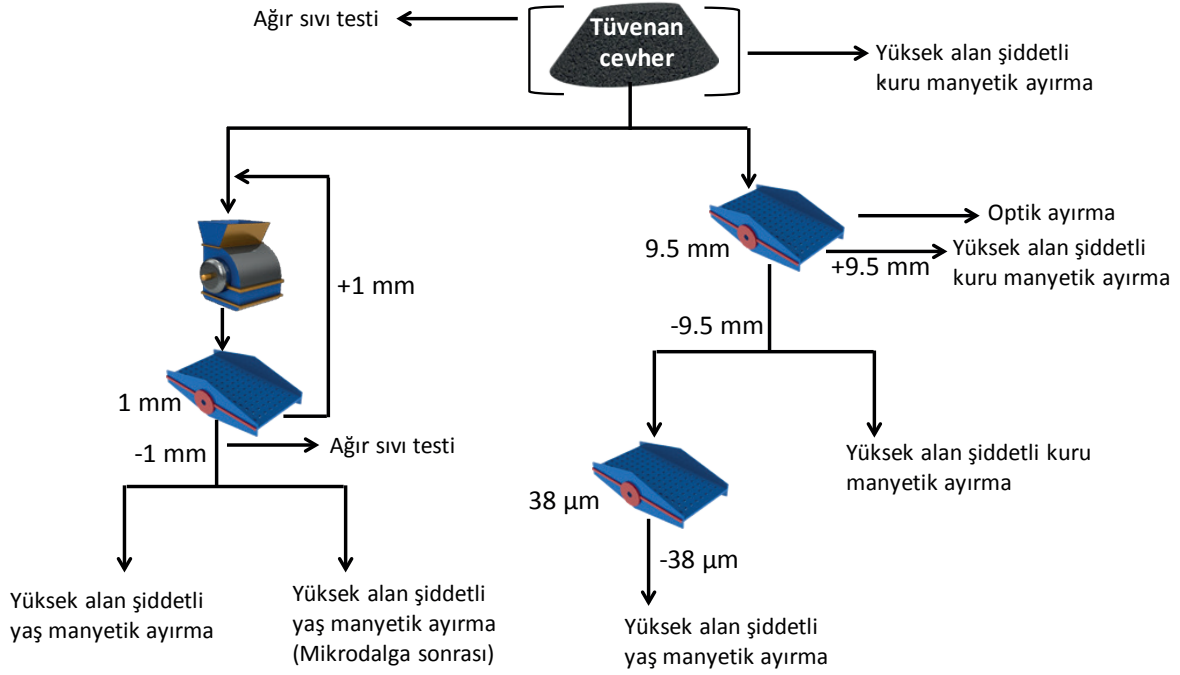
Çizelge 4. Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma atığına ait fraksiyonel nikel analizi

Tane Boyu (µm)	Ağırlık (%)	Ni (%)	Ni verim (%)
-38+20	10,25	0,37	2,34
-20	89,75	1,78	97,66
Toplam	100,00	1,64	100,00

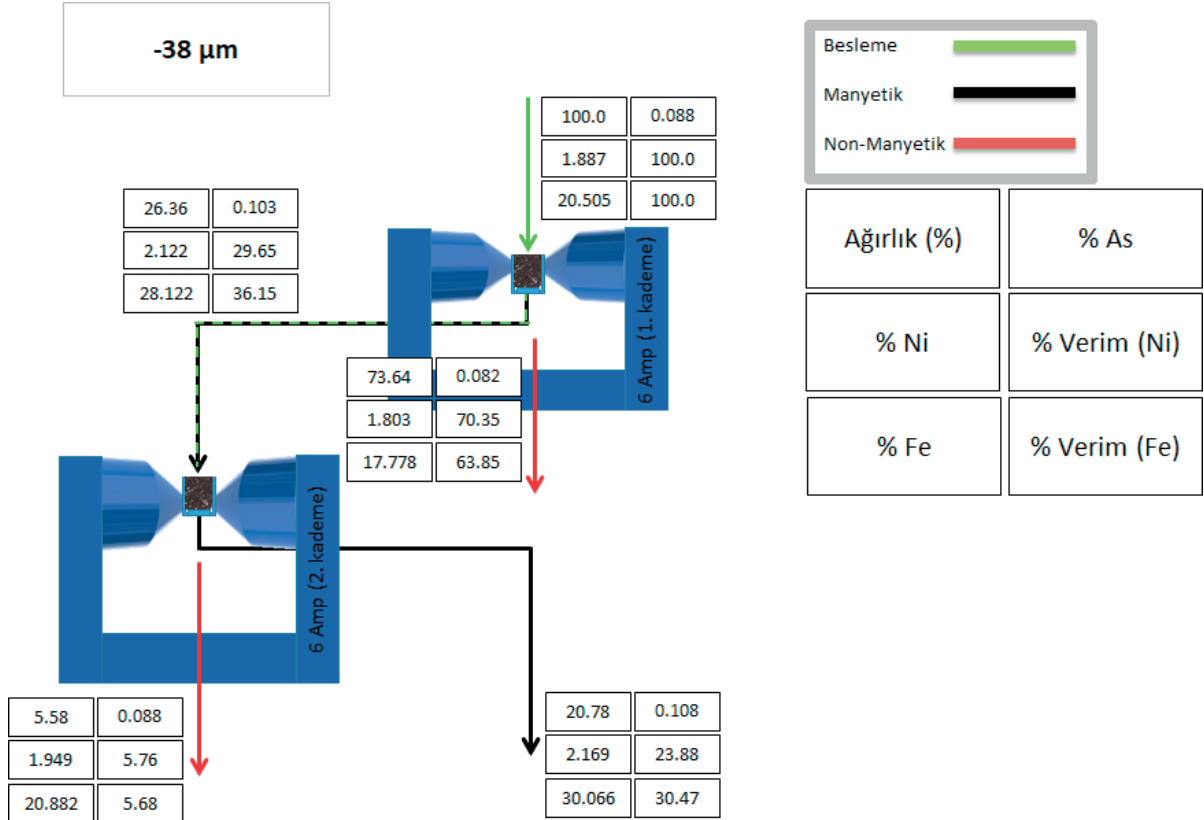
Cevherin endüstriyel ortamda çok ince öğütülmesi maliyetleri arttıracığından numunenin tamamı kırılarak 1 mm'den ince boya indirilmiş ve yeni bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. -1 mm frak-

siyonu ile gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testlerinden de kayda değer bir sonuç elde edilememiştir.

Zenginleştirme çalışmalarının son aşamasında, tüvenan cevherden temsili olarak alınan 1 mm'den ince cevher farklı sürelerde mikrodalga ile ısıtılmış ve ardından yüksek alan şiddetli yaş manyetik zenginleştirmeye tabi tutulmuştur. Zenginleştirme işlemi sonucunda nikel tenöründe önemli bir iyileşme görülmemiş, ancak mikrodalga ile ısıtma işleminin arsenik içeriğini değiştirdiği gözlemlenmiştir (Şekil 13).

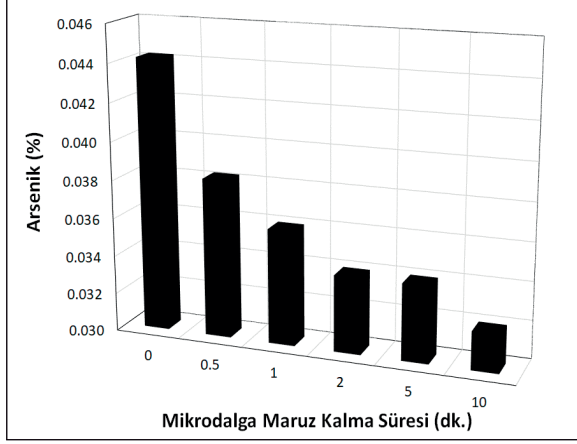


Şekil 11. Tüvenan cevher ve boyut fraksiyonlarına uygulanan zenginleştirme yöntemleri



Şekil 12. -38 µm fraksiyonu ile gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma sonuçları

Şekil 13 incelendiğinde mikrodalga ile ısıtma süresinin artması ile arsenik miktarının önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Bu sonuç mikrodalgaya maruz bırakmanın cevherin zenginleştirme sürecine önemli bir etkisinin olmadığı, ancak arsenik değerlerinde bir miktar azalma sağladığı şeklinde yorumlanmaktadır.



Şekil 13. Mikrodalga ile ısıtılan cevherin arsenik tenöründeki değişim

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Karaçam (Mihalıççık-Eskişehir) lateritik nikel cevherinin detaylı mineralojik karakterizasyon ve zenginleşme davranımının belirlenmesine yönelik MLA, ağır sıvı testleri, optik ayırma, manyetik ayırma ve mikrodalga ile ısıtma çalışmaları yürütülmüştür.

Yapılan kapsamlı karakterizasyon çalışmaları sonucunda nikelin tane boyu fraksiyonlarına neredeyse eşit olarak dağıldığı belirlenmiştir. Tüvenan cevher içerisinde iri fraksiyonlardan ince fraksiyonlara gidildikçe nikel tenöründe hafif bir artış gözlemlenmektedir. Nikelin tüm fraksiyonlara benzer oranlarda dağılması herhangi bir boydan daha iri bir malzemenin atılarak tenör artırma olasılığının çok düşük olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. İri boyda gerçekleştirilen optik ayırma ve kuru manyetik ayırma testlerine ait sonuçlar da bu yorumu desteklemektedir. Bu yorum sonucunda boya bağlı fiziksel bir ayırım yapılması sonucunda özellikle iri boylarda yüksek nikel kayıplarının olacağı öngörülmektedir.

BSE görüntülerinden de görüleceği üzere ernienikelit ve pimelit özellikle silikat ve kil mineralleriyle

oldukça karmaşık bir yapı-doku sergilemektedir. Tane boyunun incelenmesi sadece cevher içerisindeki ana minerallerden olan kuvars mineralinin serbestleşmesine olumlu etki göstermekte olup aynı sonuç diğer ana mineraller için gözlenmemiştir. Detaylı serbestleşme analizleri tüvenan cevher içerisindeki ana minerallerin birbirleri ile ikili ve çoklu bağıllık durumlarını da ortaya koymaktadır.

Tüvenan cevher fraksiyonlarında özellikle nikel içeren götit mineralinin serbestleşme sınıflarındaki dağılımına bakıldığında bir önceki iri fraksiyona göre önemli bir serbestleşme göstermediği anlaşılmaktadır.

Ernienikelit ve götit minerallerinin tane boyutunun 14-40 µm aralığında olması özellikle iri boylarda nihai bir fiziksel zenginleştirmenin olası olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır. Tüm zenginleştirme çalışmaları sonucunda alınan en optimum sonucun tüvenan cevherden elenerek elde edilen -38 µm fraksiyonunda elde edilmesi de bu durumun açık bir sonucudur. Ancak tesis şartlarında bu boylara yapılacak bir öğütmenin maliyeti mutlaka dikkate alınmalıdır. Ayrıca -38 µm fraksiyonu ile gerçekleştirilen yüksek alan şiddetli manyetik ayırma konsantresinin arsenik içeriğinin de nikel konsantresi için olumsuz bir etki yaratacağı düşünülmektedir.

Cevherin yoğunluk farkına dayalı bir nihai zenginleştirmeye vereceği tepkiyi belirlemek için yapılan ağır sıvı testleri sonucunda batan ürünlerin nikel tenörlerindeki kısmi artışın yanı sıra Fe ve As tenörlerinin de yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, As içeren minerallerin Fe mineralleri ile bağlantılı olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

Ağır sıvı ürünleri MLA sonuçlarına göre nikel içeren ana mineral olan ernienikelit içeriği tüvenan cevherde ortalama %0,60'tan batan üründe %1,58'e çıkmaktadır. Ağır sıvı batan ürünlerinde kuvars ve dolomit miktarlarının tüvenan cevher fraksiyonlarına göre oldukça azalması uygun bir zenginleştirme yöntemi ile bu minerallerin atık olarak uzaklaştırılabileceği ve tüvenan cevher Ni tenörünün ince boylarda bir miktar artırılabilceği şeklinde yorumlanmaktadır. Tanelerin karmaşık yapı doku ilişkisi tüvenan cevherde olduğu gibi ağır sıvı batan ürünlerinde de benzerlik göstermektedir. Nikel taşıyıcı minerallerin serbestleşme problemleri ve karmaşık doku yapı ilişkileri ned-

eniyle cevherden fiziksel yöntemler ile nihai bir konsantr elde edilmesinin güç olacağı mineralojik analiz bulguları ve zenginleştirme test sonuçları ile desteklenmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, katkılarından dolayı Fe-Ni Madencilik ailesine ve Fe-Ni Madencilik Genel Müdürü Sn. Birol Kaya'ya teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Agacayak, T., Zedef, V., Aras, A., 2016. Kinetic Study on Leaching of Nickel from Turkish Lateritic Ore in Nitric Acid Solution. *Journal of Central South University*, 23 (1), 39-43.

Agacayak, T., Zedef, V., 2012. Dissolution Kinetics of a Lateritic Nickel Ore in Sulphuric Acid Medium. *Acta Montanistica Slovaca*, 17 (1), 33-41.

Agacayak, T., Zedef, V., 2011. Determination of Leach Conditions of Karacam Lateritic Nickel Ores with Sulfuric Acid Under Effect of Sodium Fluoride. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management*, 1, 1109-1116.

Agacayak, T., 2008. Beneficiation of Karacam (Eskisehir) Lateritic Nickel Ore by Physical and Chemical Methods. PhD Thesis, Selcuk University, Turkey.

Anon(a), 2008. <http://www.intellection.com.au>.

Anon(b), 2008. http://www.lktech.com.au/Products_Services/MLA/index.htm.

Can, N. M., Çelik, İ. B., 2009. Proses Mineralojisi: Cevher Hazırlamadaki Önemi, Ölçüm Yöntem ve Araçları-Bölüm I. *Madencilik*, 48 (1), 43-53.

Çiftçi, H., Atik, S., 2014. Lateritik Cevherlerden Nikel Kazanımında Biyoliç Yöntemi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30 (4), 275-284.

Elias, M., Donaldson, M. J., Gliorgetta, N., 1975. *Geology, Mineralogy and Chemistry of Lateritic Nickel-Cobalt Deposits Near Kalgoorlie Western Australia*. *Economic Geology*, 76 (4), 1775-1783.

Eliopoulos, D. G., Economou, M., 2000. Geochemical and Mineralogical Characteristics of Fe-Ni and Bauxitic-Laterite Deposits of Greece. *Ore Geology Review*, 16 (1-2), 41-58.

Girgin, İ., Obut, A., Ucyildiz, A., 2011. Dissolution Behaviour of a Turkish Lateritic Nickel Ore. *Minerals Engineering*, 24 (7), 603-609.

Golightly, J. P., 1981. Nickeliferous Laterite Deposits. *Economic Geology*, 75, 710-735.

Kursunoglu, S., Kaya, M., 2015. Dissolution Behavior of Caldag Lateritic Nickel Ore Subjected to a Sequential Organic Acid Leaching Method. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 22, 1131-1140.

Köseler, M. 2012. Mikrodalga Etkisinde Adatepe (Karaçam) Lateritik Cevherinin Liçing Şartlarının Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Landers, M., Gilkes, R. J., 2007. Dehydroxylation and Dissolution of Nickeliferous Goethite in New Caledonian Lateritic Ni Ore. *Applied Clay Science*, 35 (3-4), 162-172.

Nasuh, A., 2014. Nickel Extraction from Eskisehir-Karacam Lateritic Ore by Pressure Leaching with Sulphuric Acid. PhD Thesis, Hacettepe University, Turkey (in Turkish).

Oliverira, S. M. B., Partiti, C. S. M., Enzweiler, J., 2001. Ochreous Laterite: A Nickel Ore from Punta Gorda. *Cuba Journal of South American Earth Sciences*, 14 (3), 307-317.

Oxley, A., Barcza, N., 2013. Hydro-pyro Integration in the Processing of Nickel Laterites. *Minerals Engineering*, 54, 2-13.

Queneau, P. E., 1970. The Recovery of Nickel From its Ores. *Journal of Metals*, 22, 44-48.

Thorne, R., Herrington, R., Roberts, S., 2009. Composition and Origin of The Çaldag Oxide Nickel Laterite. *W. Turkey. Mineralium Deposita*, 44 (3), 581-595.

Ucyildiz, A., Girgin, I., 2017. High Pressure Sulphuric Acid Leaching of Lateritic Nickel Ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53 (1), 475-488.

Whittington, B. I., Muir, D., 2000. Pressure Acid Leaching of Nickel Laterites: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 21, 527-600.

Zainol, Z., 2005. The Development of a Resin-in-Pulp Process for the Recovery of Nickel and Cobalt from Laterite Leach Slurries. Perth Australia: Murdoch University, 2-3.

Zhu, De-qing, Cui, Y., Sarath H., Keith, V., PAN, J., 2012. Mineralogy and Crystal Chemistry of a Low Grade Nickel Laterite Ore. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 907-916.

Zubryckij, N., Evans, D. J. I., Mackiw, V. N., 1965. Preferential Sulfation of Nickel and Cobalt in Lateritic Ores. *Journal of Metals*, 17, 478-486.