



Orijinal Araştırma / Original Research

OLİVİNİN REFRAKTER HAMMADESİ OLARAK KULLANIMI İÇİN DEMİR İÇERİĞİNİN MANYETİK AYIRMA İLE AZALTIKMASI

REDUCTION OF IRON CONTENT BY MAGNETIC SEPARATION FOR OLIVINE USE AS A REFRACTORY RAW MATERIAL

İlker Acar^{a,*}

^a Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 13 Ocak / January 2021

Kabul Tarihi / Accepted : 28 Şubat / February 2021

Anahtar Sözcükler:

Olivin,
Kromit zenginleştirme artığı,
Demir içeriği,
Manyetik ayırma.

Keywords:

Olivine,
Chromite enrichment tailing,
Iron content,
Magnetic separation.

ÖZ

Bu çalışmada, kromit zenginleştirilmesinde nihai artık olarak elde edilen bir olivin numunesindeki demir içeriğinin manyetik ayırma yöntemleri ile azaltılabileme potansiyeli incelenmiştir. Bu kapsamda, öncelikle numune +212, -212+150 ve -150 µm olarak üç fraksiyona ayrılmıştır. Sonrasında iri boyutlara kuru, ince boyuta ise yaş manyetik ayırma uygulanmıştır. Sonuçlar manyetik olmayan fraksiyonun ağırlık yüzdesi, Fe₂O₃ içeriği ve demir giderimi (%) gibi parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca manyetik olmayan fraksiyonlardaki mineralojik fazların miktarlarındaki değişimler XRD analizleri ile belirlenmiştir. +212 ve -212+150 µm için optimum değerlere sırasıyla 0,50-0,75 ve 1,0-2,0 A akım şiddeti aralıklarında ulaşılabileceği tespit edilmiştir. Her ne kadar karşılaştırılabilir olmasa da, -150 µm için ise efektif ayırmanın 2,0-3,0 A aralığında sağlandığı görülmüştür. Küçülen tane boyutu ile azalan demir içerikleri elde edilen bu sonuçları doğrular niteliktedir. XRD desenlerindeki demir içeriği yüksek fazların pik şiddetlerindeki azalışların da yine manyetik ayırma sonuçları ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Genel sonuçlar, olivince zengin numunedeki demir içeriğinin manyetik ayırma ile refrakter hammaddesi için gerekli sınır değerlere düşürülebileceğini göstermiştir.

ABSTRACT

In this study, the potential of reducing the iron content in an olivine sample obtained as the final tailing in chromite enrichment was examined via magnetic separation methods. Within this scope, the as-received sample was firstly divided into three fractions as +212, -212+150 and -150 µm. Dry magnetic separation was then applied to the coarse fractions and wet magnetic separation for the fine fraction. The results were evaluated using parameters such as the weight percentage of non-magnetic fraction, Fe₂O₃ content and iron removal (%). In addition, changes in the quantities of mineralogical phases in non-magnetic fractions were determined by XRD analysis. For +212 and -212+150 µm, it was determined that optimum values can be reached in the current intensity ranges of 0.50-0.75 and 1.0-2.0 A, respectively. Although not comparable, it was observed that the effective separation for -150 µm was achieved in the range of 2.0-3.0 A. Iron content decreasing with decreasing particle size confirms these results. The decreases in the peak intensities of the phases with high iron content in the XRD patterns were also found to be compatible with the magnetic separation results. Overall results showed that the iron content in the olivine rich sample can be reduced to the limit values required for the refractory raw material by magnetic separation.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: ilker.acar@atauni.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-9439-1580>

GİRİŞ

Forsterit (Mg_2SiO_4) ve fayalit (Fe_2SiO_4) minerallerinin katı çözeltisi şeklinde doğada bulunan olivin, $(MgFe)_2SiO_4$ kimyasal formülü ile ifade edilir ve düşük silis içeren ultrabazik ve bazik kayalarındaki en bol bulunan mineraldir (Acar, 2020; Michel vd., 2013; Örgün ve Erarslan, 2012). Ortorombik sistemde kristallenen olivinin rengi içeriğindeki fayalit miktarına bağlı olarak koyu yeşil ile açık yeşil arasında değişir. Mohs sertliği 6-7 ve özgül ağırlığı da yine fayalit içeriğine göre 3,22-4,39 g/cm³ arasında değişkenlik gösterebilir (Küçüköğlü, 2016; Örgün ve Erarslan, 2012).

Olivinin en yaygın kullanımı demir-çelik üretiminde cüruf düzenleyicisi olarak yüksek fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Refrakter malzeme ham maddesi ve döküm kumu olarak kullanımları da diğer yaygın uygulamalarıdır (Acar, 2020; Furlani vd., 2015; Qafoku vd., 2018). Bunun yanında olivinin aşındırıcı ve denge malzemesi, asitli toprakların ıslahı, endüstriyel, tıbbi ve nükleer atıkların bertarafı, CO₂ salınımının kontrolü, asit maden drenajının rehabilitasyonu ve süs taşı olarak kullanımı gibi çok farklı uygulama alanları da mevcuttur (Küçüköğlü, 2016; Örgün ve Erarslan, 2012).

Olivinin forsterit içeriği, yüksek ergime sıcaklığı (1890 °C) ve düşük ısı genleşme ve ısı iletkenliği gibi üstün özelliklerinden dolayı refrakter ham maddesi olarak kullanımında son derece önemli bir parametredir ve olabildiğince yüksek olması istenir (Barzegar vd., 2014; Hossain vd., 2017; Khattab vd., 2015). Diğer yandan, fayalit içeriğinin ise mümkün olduğunca az olması arzu edilir. Bunun temel nedeni fayalitin 1205°C'lik ergime sıcaklığı dolayısıyla olivinin ergime sıcaklığını düşürmesidir. Bunun yanında, fayalit bozduğunda ortamda serbest silika ve demir oksit fazları oluşur. Silika direkt olarak forsterit ile reaksiyona girerek hem forsterit miktarını azaltır hem de forsterite göre diğer bir düşük ergime sıcaklıklı (1557°C) enstatit ($MgSiO_3$) fazının oluşmasına neden olur. Serbest demir oksit ise refrakter malzemelerde bir başka istenmeyen özellik olan reaktifliği artırır (Dlugogorski ve Balucan, 2014; Küçüköğlü, 2016; Michel vd., 2013; Nemat vd., 2016).

Bu nedenlerden dolayı % 15'ten fazla fayalit veya % 6'dan fazla Fe_2O_3 içeren olivin refrakter endüstrisi

için uygun değildir. Her ne kadar olivine öğütülmüş magnezya, MgO (sinterlenmiş manyezit) ilavesi ile bu olumsuz etkilerin önüne geçilebilse de, bu kez de olivine göre daha pahalı olan magnezya kullanımından kaynaklanan maliyet prosesin uygulanabilirliğini negatif yönde etkilemektedir (Acar, 2020; Çolak vd., 2004; Küçüköğlü, 2016; Örgün ve Erarslan, 2012).

Kromitin en önemli gang mineralleri olivin ve serpantindir. Kromit zenginleştirilmesinde artık ürün olarak elde edilen olivin içeriğindeki demir oranına bağlı olarak farklı manyetik duyarlılık değerleri gösterebilir (Hacıoğlu, 2010; Kızıman, 2009). Bu noktadan hareketle olivini oluşturan tanelerin de farklı demir içeriklerine ve dolayısıyla farklı manyetik duyarlılık değerlerine sahip olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada, bir kromit cevheri zenginleştirme tesisinde nihai artık olarak elde edilen olivince zengin numunenin refrakter malzeme hammaddesi olarak kullanımı amacıyla demir içeriğinin manyetik ayırma yöntemleri ile azaltılabilme potansiyeli incelenmiştir. Yüksek magnezyum içeriğine sahip ve aynı zamanda öğütme ve kalsinasyon gerektirmeyen bu artığın kullanımı ile elde edilebilecek ucuz refrakter hammaddesi, proses maliyetlerindeki azalma, atık bertarafı ve doğal hammadde ihtiyacındaki azalış gibi ekonomik ve çevresel kazanımlar çalışmanın temel gerekçesini oluşturmaktadır.

1. MALZEME VE METOT

1.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan olivince zengin numune bir kromit cevheri zenginleştirme tesisinin nihai artık ürünüdür. Tesiste öncelikle düşük özgül ağırlıklı serpantin sallantılı masa ile ayrılmaktadır. Sonrasında kurutma ve boyutlandırma işlemlerini takiben kromit ve olivin mineralleri arasındaki manyetik duyarlılık farkından yararlanılarak kromit zenginleştirilmektedir.

1.2. Metot

1.2.1. Numune Karakterizasyonu

Numunenin temel kimyasal bileşenleri TS EN 15309 standardı uyarınca Spectro IQ

X-ışını floresans (X-ray Fluorescence; XRF) spektrometresi ile belirlenmiştir. Kızdırma kaybı (KK) değeri hem XRF sonuçlarından hem de fırında hava ortamında 750°C'de 3 saat sonunda meydana gelen kütle kaybından hesaplanmıştır. Tane boyut dağılımı yaş elek analizi ile belirlenmiştir. Mineralojik analiz için PANalytical Empyrean X-ışını difraktometresi (X-ray Diffraction; XRD) kullanılmıştır. XRD desenleri Cu-K α radyasyonu ($\lambda = 1.54051 \text{ \AA}$) kullanılarak 10-80° 2Teta aralığında 45 kV ve 40 mA koşullarında kaydedilmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon ise yüksek çözünürlüklü Zeiss Sigma 300 taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy; SEM) yardımıyla belirlenmiştir.

1.2.2. Manyetik Ayırma

Bu çalışmada laboratuvar tipi düşük alan şiddetli kuru (Carpco, elektro-mıknatıslı döner tambur tip) ve yüksek alan şiddetli yaş manyetik (Carpco, demir bilyalı tip) ayırıcılar kullanılmıştır. Bu cihazlar yalnızca elektrik akım şiddeti (A) değerlerini gösterdiğinden ve manyetik alan şiddetinin (Gauss veya Tesla) ölçülebileceği bir cihaza erişim bulunmadığından, manyetik alan şiddeti dolaylı olarak elektrik akım şiddeti ile ifade edilmeye çalışılmıştır.

Gerçekleştirilen ön denemelerde, numuneye direkt manyetik ayırma uygulanmış fakat son derece düşük verim değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında, -150 μm boyutlu tanelerin literatür verileri ile uyumlu olarak kuru ayrılmasının güç olduğu tespit edilmiştir (Hacıfazlıoğlu, 2011). Bu nedenlerden dolayı ve Şekil 1'deki tane boyut dağılımı da göz önünde bulundurularak boyut etkisini azaltmak ve ayırma verimini artırmak amacıyla numune +212,-212+150 ve -150 μm olarak üç fraksiyona ayrılmıştır. Bunlardan +212 ve -212+150 μm 'ye kuru, -150 μm 'ye ise yaş manyetik ayırma uygulanmıştır. Çizelge 2'den görüleceği üzere, fraksiyonların ağırlık yüzdelere bakıldığında +212, -212+150 ve -150 μm için sırasıyla 24,37, 27,28 ve 48,35 değerleri elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, fraksiyonların ağırlık yüzdeleri göz önünde bulundurularak bu boyut aralıkları seçilmiştir.

Manyetik ayırma işlemleri sonucunda elde edilen manyetik olmayan fraksiyonlardaki Fe₂O₃ içeriği

ve mineralojik fazlar sırasıyla XRF ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Manyetik olmayan fraksiyonlardaki demir giderimi aşağıdaki formüle (Eşitlik 1) göre hesaplanmıştır.

$$\text{Giderim (\%)} = \left(1 - \frac{C \times c}{100 \times f}\right) \times 100 \quad (1)$$

Formülde C ve c sırasıyla manyetik olmayan fraksiyonun beslemeye göre ağırlığını (%) ve Fe₂O₃ içeriğini (%), f ise beslemedeki Fe₂O₃ içeriğini (%) ifade etmektedir.

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

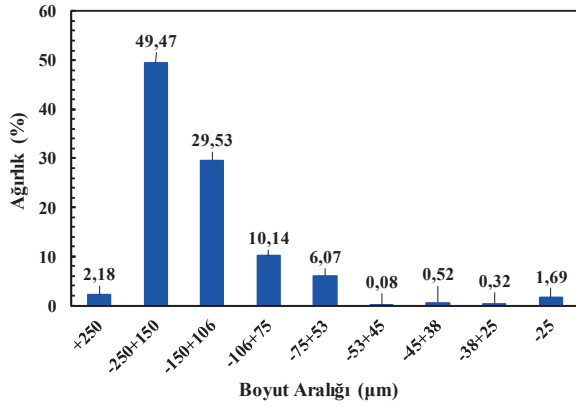
2.1. Karakterizasyon Analizleri

Olivince zengin artığın temel kimyasal bileşenleri ve KK değeri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'den görüldüğü üzere, numune %50,03 gibi oldukça yüksek bir MgO içeriğine sahiptir. Bununla birlikte, %7,32'lik Fe₂O₃ içeriğinin olivin refrakter için endüstride belirlenmiş üst sınır değer olan %6'dan yüksek olduğu görülmektedir (Acar, 2020; Küçükoğlu, 2016). XRF sonuçlarından elde edilen ve fırında tespit edilen KK değerleri birbirine çok yakındır ve ortalama değer yaklaşık %1,1'dir. Bu sonuç, elde edilen KK değeri %2'nin altında olduğundan numunenin refrakter malzeme hammaddesi olarak kullanımı öncesinde kalsinasyon işlemine gereksinim bulunmadığını göstermektedir (Acar, 2020; Küçükoğlu, 2016).

Çizelge 1. Numunedeki temel kimyasal bileşenler

Parametre	(%)
MgO	50,03
SiO ₂	38,24
Fe ₂ O ₃	7,32
Cr ₂ O ₃	1,59
Al ₂ O ₃	0,72
KK	0,98
KK (750°C-3h)	1,19

Numunenin tane büyüklüğü dağılımı Şekil 1'de görülmektedir. Elek analizi sonuçlarının interpolasyonundan numunenin ortalama tane boyutu (d_{50}) yaklaşık 153 μm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç artık malzemenin bir başka maliyetli işlem olan öğütmeye de gereksinim duymadığını göstermektedir (Acar, 2020).

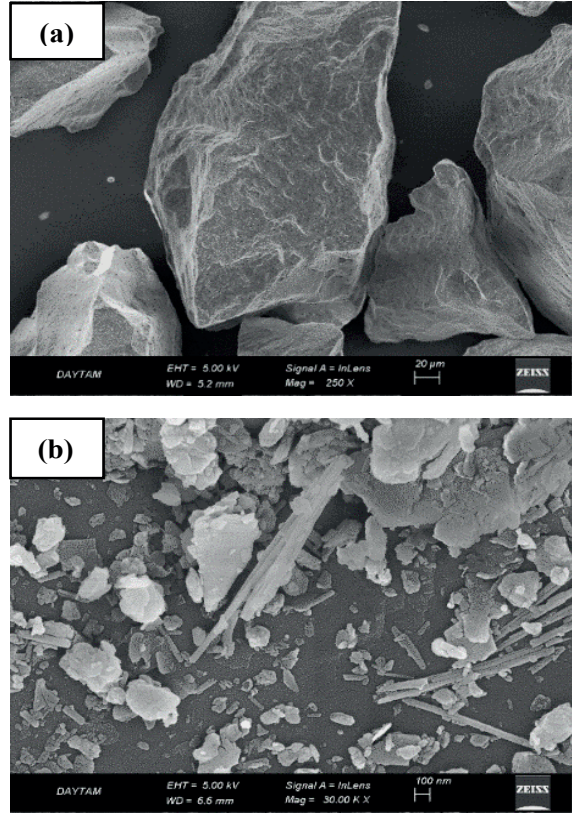


Şekil 1. Numunenin tane boyut dağılımı

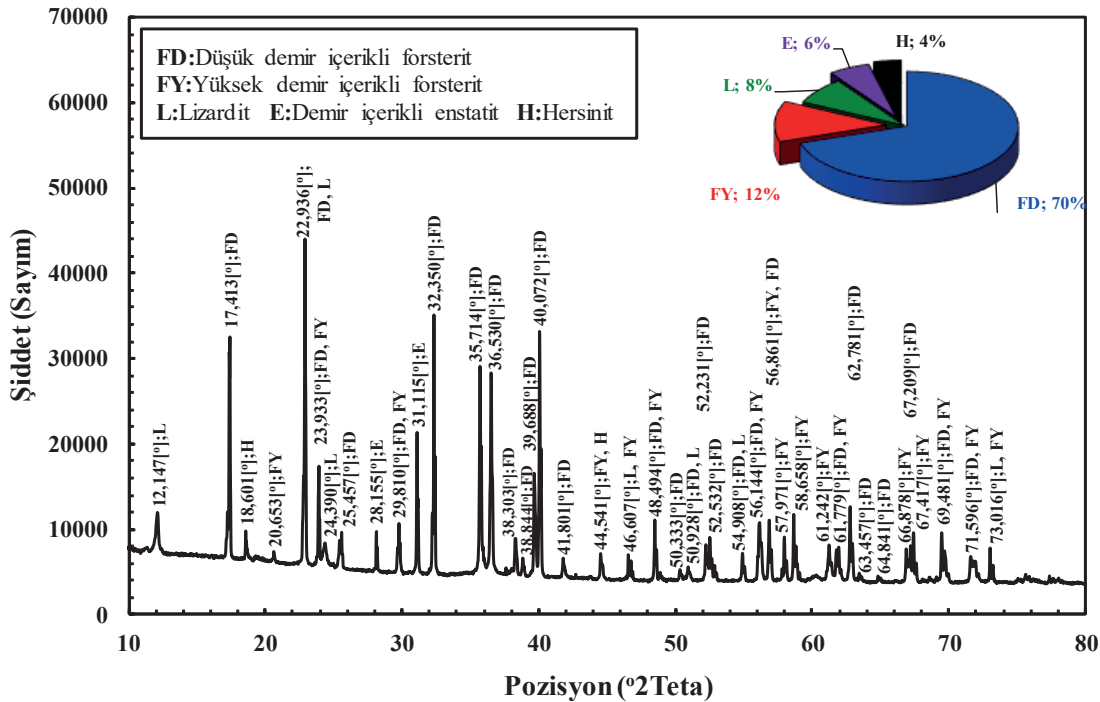
Olivince zengin numunenin iki farklı büyütme oranı için SEM görüntüleri Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi, numune çoğunlukla iri boyutlu ve düzensiz şekilli tanelerden oluşmaktadır. Temel olivin yapısı üzerindeki düzensiz şekilli ve nano boyutlu parçacıklar da Şekil 2 (b)'de görülmektedir.

Şekil 3 numunedeki kristal fazları ve bunların hesaplanmış yüzdelerini göstermektedir. XRD verilerinin değerlendirilmesinde X'Pert HighScore Plus yazılımı ve ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) veri tabanı kullanılmıştır. Kristal fazların

numune içerisindeki yüzdeleri kullanılan yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Numunenin SEM görüntüleri



Şekil 3'den görüldüğü üzere, numunenin %82'si olivin minerallerinden oluşmaktadır. Bunlar numunenin %70'ini oluşturan düşük demirli forsterit ($Mg_{1,86}Fe_{0,14}SiO_4$, ICSD 98-001-7886) ve %12'sini oluşturan yüksek demirli forsterit ($Mg_{1,63}Fe_{0,37}SiO_4$, ICSD 98-002-8551) fazlarıdır. Ek olarak, demir içerikli enstatit ($Mg_{1,562}Fe_{0,438}Si_2O_6$, ICSD 98-002-4067) ve hidrate silikat minerallerinden serpantin grubu içerisinde yer alan lizardit ($Mg_3Si_2O_9H_4$, ICSD 98-003-8534) sırasıyla numunenin %6 ve 8'ini oluşturan diğer magnezyum silikat mineralleridir. Numune ayrıca spinel grubu minerallerinden hersinit ($Al_{1,92}Fe_{0,75}Mg_{0,29}O_4$, ICSD 98-008-5975) fazını da %4 oranında içermektedir.

2.2. Manyetik Ayırma Sonuçları

Manyetik ayırmanın en temel prensiplerinden biri beslemenin mümkün olduğunca yakın boyutlu taneciklerden oluşması gerektiğidir (Kıdımın, 2009). Bu nedenle öncelikle numune +212, -212+150 ve -150 μm olarak üç fraksiyona ayrılmıştır. Bunların numune içerisindeki ağırlıkları ve demir içerikleri Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Boyut fraksiyonlarının ağırlıkları ve demir içerikleri

Fraksiyon (μm)	Ağırlık (%)	Fe_2O_3 (%)
+212	24,37	8,47
-212+150	27,28	7,79
-150	48,35	6,63
Besleme	100,00	7,32

Çizelge 2'de görüldüğü gibi, tane boyutu küçüldükçe demir içeriği azalmaktadır. Bu durumun demir içeriği yüksek olan tanelerin kırılmaya karşı daha fazla direnç göstererek büyük boyutlarda yoğunlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. +212 ve -212+150 μm kuru, -150 μm ise yaş manyetik ayırmaya tabi tutulmuştur.

2.2.1. Kuru Manyetik Ayırma

Öncül denemeler sonucunda ayırıcının konumu için 100° (yatayla yapılan açı), tambur ve elektro-

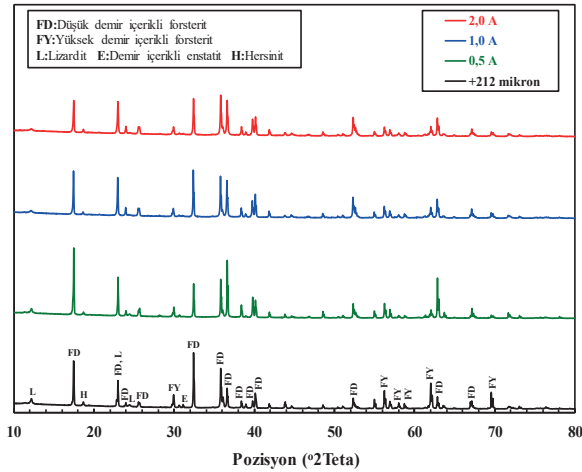
mıknatıs arasındaki mesafe için 35 mm (tambur merkezinden elektro-mıknatısa dik doğrultuda) ve tambur dönüş hızı için ise +212 ve -212+150 μm için sırasıyla 25 ve 30 devir/dakika olarak optimum değerler belirlenmiş ve bunlar deneyler boyunca sabit tutulmuştur. Böylelikle ayırmanın yalnızca uygulanan elektriksel akım şiddeti yani dolayısıyla manyetik alan şiddeti değişkenine bağlı olması sağlanmıştır.

Kazanılan manyetizmanın uygulanan manyetik alan şiddetine oranı olarak ifade edilen manyetik duyarlılık, malzemelerin mıknatıslanma değerinin bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Manyetik duyarlılık, SI birim sisteminde kütleli (χ , m^3/kg) veya hacimsel (κ , birimsiz) olarak ifade edilebilir ve uygulanan alan şiddeti ve ölçüm yapılan sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterir (Biedermann vd., 2014; Canbay ve Kurtuluş, 2008; Ferre ve Martin, 2004). Olivinin manyetik duyarlılığı, magnezyumca zengin diyamanyetik uç üyesi forsterit (Mg_2SiO_4) ve demirce zengin paramanyetik uç üyesi fayalitin (Fe_2SiO_4) sahip olduğu manyetik duyarlılıklar arasında değişir. Oda sıcaklığı ve düşük manyetik alan şiddeti koşullarında, forsteritin ve fayalitin manyetik duyarlılıkları (κ) SI birim sisteminde sırasıyla -9×10^{-6} ve 3646×10^{-6} 'dir. Bu koşullarda olivinin manyetik duyarlılığı ise büyük ölçüde Fe^{2+} içeriğinin bir fonksiyonu olarak bu iki uç üye arasında doğrusal olarak değişir (Ferre ve Martin, 2004).

Şekil 4 akım şiddetine bağlı olarak +212 μm için elde edilen manyetik olmayan fraksiyonların XRD desenlerini göstermektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, diamanyetik lizardit (serpantin) manyetik alandan etkilenmemiştir. Olivini oluşturan diğer tüm fazlar farklı manyetik duyarlılıklara sahip paramanyetik minerallerdir. Bunlardan enstatit 0,5 A akım şiddeti için dahi tamamıyla manyetik fraksiyona geçmiştir. Hersinit için ise bir miktar azalma görülmüş fakat daha yüksek akım şiddetlerinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Numune çok büyük bir oranda farklı demir içeriklerine sahip forsterit (olivin) tanelerinden oluştuğundan çalışmanın kalan bölümündeki XRD analizlerinde forsterite ait pik şiddetlerindeki değişimlere odaklanılmıştır.

Şekil 4'e göre, 0,5 A için manyetik olmayan fraksiyonda düşük demir içerikli forsterit (FD) piklerinin çoğunun şiddeti artarken yüksek demir

içerikli forsterit (FY) piklerinin ise azalmıştır. Bazı FD pik şiddetlerinin ise ya çok az değiştiği (2Teta: 35,714°, 40,072°, 52,532° ve 67,209°) veya azaldığı (2Teta: 32,350°) görülmüştür. Bunun FD olarak kabul edilen fazların dahi birbirinden farklı demir içeriklerine sahip olması dolayısıyla farklı manyetik duyarlılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Akım 1,0 A'e yükseltildiğinde göreceli olarak düşük demirli FD'lerin bir kısmının manyetik fraksiyona geçişinden kaynaklı bazı FD piklerinin (2Teta: 17,413°, 36,530°, 38,303°, 39,688° ve 62,781°) şiddetlerinde bir azalış görülmektedir. 2,0 A akım şiddeti için ise XRD deseninde belirgin bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 4. +212 µm için elde edilen manyetik olmayan fraksiyonların XRD desenleri

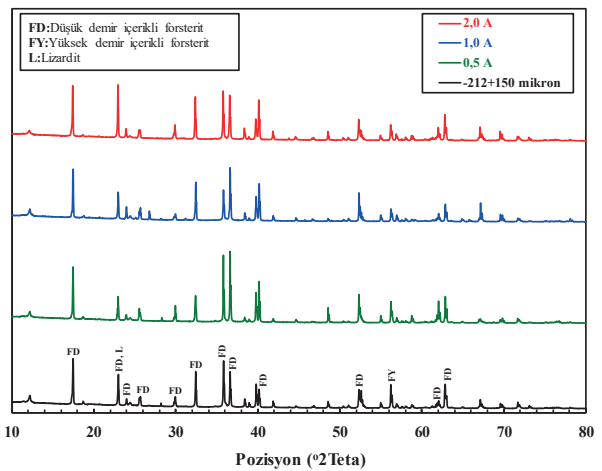
Çizelge 3. +212 µm için manyetik ayırma sonuçları

Akım Şiddeti (A)	Ağırlık (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Giderim (%)
<u>0,50</u>	<u>50,55</u>	<u>6,78</u>	<u>59,54</u>
<u>0,75</u>	<u>22,07</u>	<u>4,84</u>	<u>87,39</u>
1,00	13,96	3,35	94,48
2,00	8,69	2,63	97,30

+212 µm için elde edilen manyetik ayırma sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3'e göre, 0,5 A için beslemenin ağırlıkça %50,55'i manyetik olmayan fraksiyon olarak %6,78'lik Fe₂O₃ içeriği ile ayrılmış ve demir giderimi %59,54 olarak gerçekleşmiştir. Elektriksel akım şiddeti 0,75 A'e çıkarıldığında manyetik olmayan fraksiyonun

ağırlığı ve Fe₂O₃ içeriği sırasıyla %22,07 ve %4,84 olarak gerçekleşmiş ve buna paralel olarak demir giderimi %87,39'a yükselmiştir. 1,0 ve 2,0 A değerleri için sırasıyla %94,48 ve %97,30 gibi çok yüksek demir giderimi sağlansa da elde edilen çok düşük madde miktarları nedeniyle uygulanmasının güç olduğu tespit edilmiştir. Olivin refrakter için belirlenen Fe₂O₃ üst sınır değeri %6 olduğundan 0,50-0,75 A aralığının daha hassas bir şekilde test edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Şekil 5 artan akım şiddetine göre -212+150 µm için elde edilen manyetik olmayan fraksiyonların XRD desenlerini göstermektedir. Şekil 5'ten görüleceği üzere, 0,5 A için manyetik olmayan fraksiyonda FD piklerinin önemli bir kısmının şiddeti artarken FY piklerinin ise beklediği gibi azalmıştır. +212 mikrona benzer şekilde, bazı FD piklerinin ya az miktarda değiştiği (2Teta: 17,413°, 25,457° ve 62,781°) veya büyük oranda azaldığı (2Teta: 22,936° ve 32,350°) görülmüştür. Akım şiddeti 1,0 A'e çıkarıldığında artan manyetik alan şiddetinden dolayı 0,5 A için artış görülen bazı FD piklerinde (2Teta: 35,714°, 36,530° ve 61,779°) önemli ölçüde azalış meydana gelmiştir. 2,0 A için ise özellikle bazı FD piklerinde (2Teta: 22,936° ve 35,714°) dikkat çekici düzeyde artış gözlenmiştir.



Şekil 5. -212+150 µm için elde edilen manyetik olmayan fraksiyonların XRD desenleri

-212+150 µm için elde edilen manyetik ayırma sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge 4'e göre, 0,5 A için beslemenin ağırlıkça %82,30'u manyetik olmayan fraksiyon olarak ayrılmış

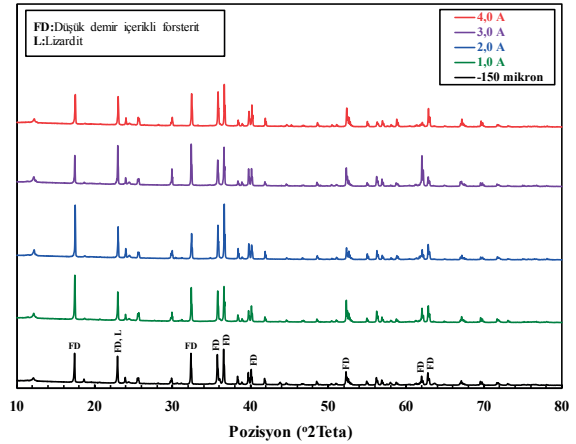
fakat demir giderimi %24,99'da kalmıştır. 0,75 A için manyetik ayırma sonuçlarında çok küçük değişimler meydana gelmiştir. Akım şiddeti 1,0 A'e yükseltildiğinde dahi manyetik olmayan fraksiyonun ağırlığı ve Fe₂O₃ içeriği için sırasıyla %69,02 ve %6,52 değerleri elde edilmiş ve demir giderimi %42,23 olarak gerçekleşmiştir. 2,0 A'de ise %5,20'lik Fe₂O₃ içeriği %36,20'lik ağırlık ile elde edilmiş ve demir giderimi %75,84'e yükselmiştir. Yine Fe₂O₃ içeriği için üst sınır göz önüne alındığında, uygulanması gereken akım şiddetinin 1,0-2,0 A arasında olması gerektiği belirlenmiştir.

Çizelge 4. -150+150 µm için manyetik ayırma sonuçları

Akım Şiddeti (A)	Ağırlık (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Giderim (%)
0,50	82,30	7,10	24,99
0,75	79,27	6,89	29,89
<u>1,00</u>	<u>69,02</u>	<u>6,52</u>	<u>42,23</u>
<u>2,00</u>	<u>36,20</u>	<u>5,20</u>	<u>75,84</u>

2.2.2. Yaş Manyetik Ayırma

Yaş manyetik ayırmada pülp yoğunluğu için ağırlıkça %20 ve katı besleme hızı için ise 9 kg/sa değerleri deneyler boyunca sabit tutulmuştur. -150 µm için elde edilen manyetik olmayan fraksiyonların XRD desenleri Şekil 6'da sergilenmiştir. Kuru manyetik ayırmadan farklı olarak 1,0 A için XRD deseninde giriş numunesine göre iki pik (2Teta: 17,413° ve 52,231°) haricinde göze çarpan bir değişim gözlenmemiştir. Akım şiddeti 2,0 A'e çıkarıldığında ise özellikle 17,413° ve 36,530° 2Teta değerlerindeki FD piklerinde önemli artışlar gözlenmiştir. 3,0 A için ise 2,0 A için yükseliş gösteren iki pikte büyük azalış meydana gelirken bazı önemli FD piklerinde (2Teta: 22,936°, 32,350°, 52,231° ve 61,779°) ise dikkate değer artışlar meydana gelmiştir. Akım şiddeti 4,0 A değerine yükseltildiğinde, 22,936°, 32,350° ve 61,779° konumlarındaki önemli piklerde azalış meydana gelirken 35,714° ve 62,781° konumlarındaki piklerde ise artış görülmektedir.



Şekil 6. -150 µm için elde edilen manyetik olmayan fraksiyonların XRD desenleri

-150 µm için elde edilen manyetik ayırma sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelge 5'e göre, 1,0 A için beslemenin ağırlıkça %83,77'si manyetik olmayan fraksiyon olarak ayrılmış fakat demir giderimi %19,77'de kalmıştır. 2,0 A için %5,92'lik Fe₂O₃ içeriği %69,80'lik ağırlık ile elde edilmiş ve demir giderimi %37,67'ye yükselmiştir. Akım şiddeti 3,0 A'e yükseltildiğinde Fe₂O₃ içeriği %5,16'ya çekilmiş ve ağırlık ve demir giderimi sırasıyla %45,03 ve %64,95 olarak gerçekleşmiştir. 4,0 A için ise ağırlık, Fe₂O₃ içeriği ve demir giderimi için sırasıyla %37,58, %4,79 ve %72,85 değerleri elde edilmiştir. Özellikle ürün miktarı ve demir içeriği göz önüne alındığında bu fraksiyon için 2,0-3,0 A arasında uygulanabilir bir manyetik alan şiddeti sağlanabileceği tespit edilmiştir.

Çizelge 5. -150 µm için manyetik ayırma sonuçları

Akım Şiddeti (A)	Ağırlık (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Giderim (%)
1,0	83,77	6,35	19,77
<u>2,0</u>	<u>69,80</u>	<u>5,92</u>	<u>37,67</u>
<u>3,0</u>	<u>45,03</u>	<u>5,16</u>	<u>64,95</u>
4,0	37,58	4,79	72,85

Çizelge 3-5 birlikte ele alındığında, tane boyutu inceldikçe demir giderim verimlerinin azaldığı görülmektedir. Optimum değerlerin +212 ve

-212+150 µm için sırasıyla 0,50-0,75 ve 1,0-2,0 A aralıklarında elde edildiği göz önüne alındığında, bu durumun tanelerin manyetik duyarlılık farklarının +212 µm için çok daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, taneler dar bir manyetik duyarlılık aralığında toplandığından daha efektif bir şekilde ayrılabilir.

SONUÇLAR

Deney sonuçları +212 µm fraksiyonun %8,47'lik Fe₂O₃ içeriğinin 0,50, 0,75, 1,0 ve 2,0 A elektriksel akım şiddetleri için sırasıyla %6,78, 4,84, 3,35 ve 2,63 değerlerine düşürülebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, elde edilen çok düşük madde miktarları 0,75 A üzerindeki değerleri mümkün kılmamaktadır. -212+150 µm için ise 0,50 ve 0,75 A oldukça düşük demir giderimlerine neden olmuştur. %7,79 Fe₂O₃ içeriğine sahip besleme 1,0 ve 2,0 A için sırasıyla %6,52 ve 5,20'ye çekilmiştir. Özetle optimum değerlere +212 ve -212+150 µm için sırasıyla 0,50-0,75 ve 1,0-2,0 A aralıklarında ulaşılabilirliği belirlenmiştir. -150 µm fraksiyonun yaş manyetik ayırma ile %6,63'lük Fe₂O₃ içeriğinin 2,0, 3,0 ve 4,0 A için sırasıyla %5,92, 5,16 ve 4,79 değerlerine azaltılabileceği görülmüştür. Her ne kadar kuru manyetik ayırma ile karşılaştırılabilir olmasa da, bu fraksiyon için optimum değerlerin 2,0-3,0 A aralığında elde edilebileceği tespit edilmiştir. XRD sonuçları numune içerisinde serbest halde bulunan demir içerikli enstatit tamamen spinel grubu minerallerin ise çok büyük ölçüde uzaklaştırılabileceğini göstermiştir. Fakat asıl önemli olan ve çalışmanın odak noktasını oluşturan olivin tanelerinin demir içeriğindeki farklılıklar ve bunların fiziksel olarak birbirlerinden ayrılabilirliğidir. XRD desenlerindeki demir içeriği yüksek olivin fazlarının pik şiddetlerindeki azalışlar çalışmanın temelini oluşturan bu hipotezi doğrular niteliktedir. Genel sonuçlar, olivince zengin bu kromit artığındaki demir içeriğinin manyetik ayırma ile refrakter hammaddesi için gerekli sınır değerlere düşürülebileceğini göstermiştir. Ek olarak, öğütme ve kalsinasyon işlemlerine gerek olmaması ve bir artık malzemenin kullanımı gibi ekonomik ve çevresel faydalar bu çalışmanın uygulanabilirliğini cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, endüstriyel

çapta yapılabilişinin belirlenebilmesi için bu ön çalışmanın detaylandırılması gerektiği de göz ardı edilmemelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma için teknik destek sağlayan Atatürk Üniversite'sine bağlı Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (DAYTAM) ve deneysel çalışmaların yürütüldüğü ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim. Ayrıca çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için maddi destek sağlayan ETİ KROMA.Ş.'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Acar, İ., 2020. Sintering Properties of Olivine and Its Utilization Potential as A Refractory Raw Material: Mineralogical and Microstructural Investigations. *Ceramics International*, 46 (18, Part A), 28025-28034.
- Barzegar Bafrooei, H., Ebadzadeh, T., Majidian, H., 2014. Microwave Synthesis and Sintering of Forsterite Nanopowder Produced by High Energy Ball Milling. *Ceramics International*, 40 (2), 2869-2876.
- Biedermann, A. R., Pettke, T., Reusser, E., Hirt, A. M., 2014. Anisotropy of Magnetic Susceptibility in Natural Olivine Single Crystals. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15 (7), 3051-3065.
- Canbay, M., Kurtuluş, C., 2008. Armutlu Yarımadası'nda Manyetik Duyarlık Çalışmaları. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 7 (1), 60-64.
- Çolak, M., Oyman, T., Altun, İ. A., Pişkin, Ö., 2004. Refractory Olivine Bricks Application from the Ağla-Köyceğiz (Turkey) Dunite. *Key Engineering Materials*, 264-268, 1799-1802.
- Długogorski, B. Z., Balucan, R. D., 2014. Dehydroxylation of Serpentine Minerals: Implications for Mineral Carbonation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 353-367.
- Ferre, E., Martin, F., 2004. Magnetic Properties of Natural and Synthetic Olivines: High-field Measurements. *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting*.
- Furlani, E., Aneggi, E., Leitenburg, C. D., Trovarelli, A., Maschio, S., 2015. Sintering Behaviour of Olivine-Ceria Blends. *Ceramics International*, 41 (5, Part A), 6293-6298.

Hacıfazlıoğlu, H., 2011. Manyetik Ayırmadaki Son Gelişmeler ve Alternatif Manyetik Ayırıcı Tiplerinin Tanıtılması. İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 24 (1), 75-93.

Hacıoğlu, S. (2010). Kayseri Pınarbaşı Kromitlerinin Kuru Zenginleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Hossain, S. K. S., Mathur, L., Singh, P., Majhi, M. R., 2017. Preparation of Forsterite Refractory Using Highly Abundant Amorphous Rice Husk Silica for Thermal Insulation. Journal of Asian Ceramic Societies, 5 (2), 82-87.

Khattab, R. M., Wahsh, M. M. S., Khalil, N. M., 2015. Ceramic Compositions Based on Nano Forsterite/ Nano Magnesium Aluminate Spinel Powders. Materials Chemistry and Physics, 166, 82-86.

Kıdıman, F. B., 2009. Düşük tenörlü krom cevherlerinin zenginleştirilmesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Küçükoğlu, Ö., 2016. Yerli Olivin Cevherinden Refrakter Malzemeye Uygun Hammadde Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Michel, R., Ammar, M. R., Poirier, J., Simon, P., 2013. Phase Transformation Characterization of Olivine Subjected to High Temperature in Air. Ceramics International, 39 (5), 5287-5294.

Nemat, S., Ramezani, A., Emami, S. M., 2016. Possible Use of Waste Serpentine from Abdasht Chromite Mines into the Refractory and Ceramic Industries. Ceramics International, 42 (16), 18479-18483.

Örgün, Y., Erarslan, C., 2012. 21. Yüzyılda Olivin ve Türkiye'nin Olivin Potansiyeli. Madencilik Türkiye, 23, 62-74.

Qafoku, O., Ilton, E. S., Bowden, M. E., Kovarik, L., Zhang, X., Kukkadapu, R. K., Loring, J. S., 2018. Synthesis of Nanometer-Sized Fayalite and Magnesium-Iron (II) Mixture Olivines. Journal of Colloid and Interface Science, 515, 129-138.

