



Bir mangan cevheri için yer çekimi ile zenginleştirme akım şeması oluşturma çalışmaları

Gravity beneficiation flowsheet development studies for manganese ore

ERGİN GÜLCAN^{1*}, ÖZCAN YILDIRIM GÜLSOY¹, Ş. LEVENT ERGÜN¹

¹ Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 29 Nisan (*April*) 2022 Kabul (*accepted*): 29 Haziran (*June*) 2022

ÖZ

Dünya genelinde oldukça yaygın kullanım alanı bulunan mangan (Mn) metalinin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemlerin, tükenen kaynaklar ve kompleks mineralojik yapılar sebebiyle yer çekimi ile zenginleştirmeden kimyasal ekstraksiyon yöntemlerine doğru kaydığı görülmektedir. Ülkemizde ise farklı jeolojik oluşum şekillerinde, değişen yan kayaçlarda, farklı mineralojik ve yapısal özelliklerde olduğu bilinen Mn rezervlerinin zenginleştirme işlemleri çoğunlukla problemli özellik göstermekte ve gelecekte oldukça maliyetli kimyasal süreçlerin proseslere dahil edilmesi kaçınılmaz görünmektedir. Mangan zenginleştirme işlemleri, nihai üründe Mn/Fe oranını artırmaya dönük prosesleri kapsamaktadır. Bu çalışmada Mn/Fe oranı oldukça düşük (yaklaşık 1) olan ve bu açıdan yerçekimi ile zenginleştirilmesi problemli bir mangan cevherinin, tahribatsız ve kimyasal kullanımının olmadığı fiziksel yöntemlerle zenginleştirilmesinin araştırılması ve uygun tesis tasarımına ilişkin bulgular sunulmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında cevherin farklı tane boyları üzerinde ağır sıvı analizi ve sallantılı masa testleri gerçekleştirilmiştir. Ağır sıvı sonuçları ve boyut dağılımları kullanılarak yerçekimiyle zenginleştirme devresinin performansı modelleme-simülasyon yardımıyla belirlenmiştir. İlgili mangan cevherine ilişkin yapılan çalışmalar bu anlamda bir ilktir ve tesis ölçekli uygulamaya olanak sağlamıştır.

Cevherin kırma ve zenginleştirilmesine yönelik gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, bünyesinde ağır ortam içeren bir akım şeması kullanılarak cevherden % 51 Mn verimi ile miktarca % 33.3 oranında, % 39.48 Mn ve % 11.75 Fe içerikli bir konsantrenin elde edilmesi mümkün görünmektedir. Konsantrenin SiO₂ içeriği ise % 8-10 seviyelerine düşürülmüştür. Bu kapsamda Mn/Fe oranı yaklaşık "1" olan cevherden, spiraller ve ağır ortam ile zenginleştirmenin entegre edildiği akım şeması kullanılarak Mn/Fe oranı 3.36 olan ve metalurjik süreçlerde kullanılabilir bir mangan konsantresinin elde edilebileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mangan, cevher zenginleştirme, ağır ortam siklonu, spiral, simülasyon ve modelleme

ABSTRACT

It is foreseen that the methods used in the processing of manganese (Mn), which has very common usage areas throughout the world, are shifting from gravity enrichment to chemical extraction methods due to depleted resources and complex mineralogical structures. In our country, the enrichment processes of Mn reserves, which are known to be in different geological formations, having various host-rocks, and different mineralogical and structural features, are often problematic and it seems inevitable to include costly chemical

processes in the near future. Manganese enrichment include processes to increase the Mn/Fe ratio in the final product. In this study, the investigation of the enrichment of a problematic manganese ore (Mn/Fe ratio = 1) with non-destructive and chemical-free physical methods and the findings regarding the appropriate plant design are presented. Within the scope of experimental studies, heavy liquid analysis and shaking table tests were carried out on different particle size ranges. Using the heavy liquid results and size distributions, the performance of the gravity concentration circuit was presented with the help of modeling-simulation. The studies on the related manganese ore are a first in this sense and enabled the plant-scale application.

In simulation studies for crushing and concentration of the ore which incorporate heavy medium separation, results showed that it is possible to obtain a 33.3% weight concentrate with a Mn recovery of 51%, having Mn and Fe contents of 39.48% and 11.75%, respectively. The SiO₂ content of the concentrate was reduced to marketable 8-10%. In this context, it is concluded that a manganese concentrate with a Mn/Fe ratio of 3.36 that is usable in metallurgical processes can be obtained from ore with a Mn/Fe ratio of approximately "1" by using the integrated flowsheet of spirals and heavy medium cyclones.

Keywords: Manganese, ore beneficiation, heavy medium cyclone, spiral, simulation and modelling

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1111081>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: ergingulcan@hacettepe.edu.tr

GİRİŞ

En basit tanımıyla yerçekimi ile zenginleştirme yöntemleri, cevher taneleri arasındaki yoğunluk farklılıklarından yararlanan bir yöntemler sınıfıdır (Burt, 1999; Gupta ve Yan, 2006; Burt ve Wills, 1984). Birbirinden farklı yoğunluklara sahip olan taneler, ortam viskozitesi, viskoz ortamdaki harekete karşı direnç, yoğunluk, ağırlık, tane boyu, şekil gibi parametreler veya bu parametrelerin birkaçının etkisiyle ortamda farklı şekillerde hareket ederler (Hanoker ve Richard, 2003). Yerçekimi ile zenginleştirme yöntemleri çok eski madencilik operasyonlarından günümüze cevher zenginleştirme operasyonlarının vazgeçilmez birim elemanlarıdır ve günümüzde hem eski usüllerle hem de modern teknolojik gelişmelere uygun ekipmanlarla yaygın kullanım alanları bulmaya devam etmektedirler (Wills ve Munn, 2006; Fuerstenau ve Han, 2003; Mular vd., 2002). Yerçekimi ile zenginleştirmenin kimyasal kullanımına gerek kalmadan kolay ve geniş kullanım imkanı sunmasına rağmen, ekipman

kapasitelerinin düşük olması ve daha kaliteli ürün talebinin artması, yerçekimi ile zenginleştirmeyi diğer tüm yöntemler başarısız olduğunda her zaman düşünülmesi gereken en son çare haline getirmiştir. Bununla birlikte nispeten daha çevre dostu olan bu yöntemin mevcut kurulumlarının performansının artırılmasının araştırılması, daha entegre ve aşamalı yerçekimi proseslerinin tasarlanması ve modern yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarının geliştirilmesi ile yerçekimi konsantrasyonu yöntemlerine olan ilgi artarak devam etmektedir (Burt, 1999; Gupta ve Yan, 2006; Wills ve Munn, 2006; Fuerstenau ve Han, 2003).

Yerçekimi ile zenginleştirmenin başarılı uygulamalardan bazıları, jigler (altın içeren sülfür mineralleri, kalay, mineral kumlar, kromit, demir, kömür vb. (Richards ve Jones, 2004), santrifüjli yerçekimi ayırıcıları (altın, bakır, platin, kromit cevheri, kömür vb. (Lins vd., 1992; Olyaei vd., 2016; Hanoker vd., 2005), kabaran yataklı ayırıcılar (kömür, kromit, manganez vb. (Tripathy vd., 2013), ağır ortam

siklonları (kömür ve mineraller (*Marion vd., 2017*)), spiral ayırıcılar (kromit, kum, kömür, demir vb. (*Palmer ve Vedeikis, 2010*)), sallantılı masalar (kromit, altın, nadir toprak mineralleri (*Dehaine vd., 2017; Manser vd., 1991*)) ve çoklu yerçekimi ayırıcılarıdır (multigravity separators) (kromit, kömür, grafit, nadir toprak mineralleri (*Patil vd., 1999; Chan vd., 1991*)).

Mangan (Mn), birçok alanda geniş endüstriyel kullanımı olan önemli bir metaldir. Dünyada manganın %90-95'i çelik üretiminde, % 5'i ise geri kalanı ise demir dışı üretim, pil ve diyet katkı maddeleri alanlarında kullanılmaktadır (*Liu vd., 2019*). Mangan yaygın olarak demir (Fe) ve silikatlar (Si-) ile birlikte bulunur ve cevher zenginleştirme süreçleri, çoğunlukla izomorfik olan Fe-Mn cevherlerinde Mn/Fe oranını artırmaya dönük işlemleri içerir. Mn, Fe ve Si bileşenlerinin mangan cevherlerinde bir arada bulunması ve çoğunlukla birlikte cevherleşmesi sebebiyle Mn ve Fe'yi yalnızca yerçekimi ve manyetik ayırma işlemleri gibi fiziksel zenginleştirme yöntemlerini kullanarak etkili bir şekilde ayırmanın çok zor olduğunu bilinmektedir (*Tripathy vd., 2015*). Bu noktada Fe-Mn cevherlerinden Mn ve Fe'nin seçimli ekstraksiyonu ve ayrılması için birçok çalışma yapılmıştır (*Tripathy vd., 2015; Wu vd., 2015*). Mangan cevherine ilişkin cevher zenginleştirme süreçleri, metalurjik olarak değerlendirilebilir ve Mn/Fe oranının yüksek (>3-4) konsantreler alınmasını hedeflemektedir. Metalurjik süreçler açısından Mn/Fe oranının artırılmasının önemine ilişkin pek çok endüstriyel ve akademik çalışma mevcuttur (*Singh vd., 2011; Singh ve Biswas, 2017; Granina vd., 2010*). Bu noktada mangan cevherinin fiziksel ve yerçekimine dayalı süreçlerle zenginleştirilmesinin ve buna ilişkin tesis tasarımının kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında Mn/Fe oranı yaklaşık "1" olan ve yerçekimi ile zenginleştirme açısından problemlili bir mangan cevheri için fiziksel yöntemler ve ağır ortam ile

zenginleştirmenin entegre edildiği bir yerçekimi ile zenginleştirme tesisi tasarımına dönük bulgular sunulmaktadır. Bu kapsamda karakterizasyon testleri ve zenginleştirme testleri uygulanmış, sonuçlar doğrultusunda cevhere en uygun tesisin simülasyon ve modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon testleri kapsamında tane boyu fraksiyonu bazında yoğunluk dağılımını ölçmek amacıyla detaylı "yıkabilirlik" testleri gerçekleştirilmiş, bu kapsamda bir ağır ortam devresinin uygulanabilirliğine dönük veriler elde edilmiştir. Bu açıdan benzer cevherlerle yapılan çalışmalara kıyasla kimyasal süreçlere gerek kalmaksızın ağır ortam devresi ile Mn/Fe oranının artırılabilirdiği ortaya konulmuştur.

MALZEME ve YÖNTEM

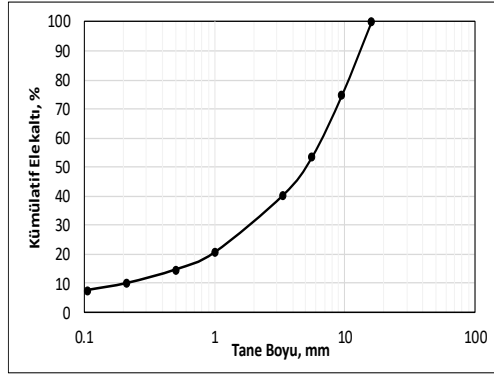
Numune hazırlama ve karakterizasyon çalışmaları

Numune alma ve hazırlama çalışmaları kapsamında İç Anadolu bölgesindeki bir sahadan temin edilen yaklaşık 500 kg civarındaki temsili karot numunesi laboratuvara teslim edilmiştir. Ana numune yığınının temsili olarak konileme-dörtleme yöntemi ile alınan 65kg numunenin tamamı laboratuvar ölçekli çeneli kırıcı kullanılarak -16 mm tane boyuna indirilmiştir. Kırılan numunenin boyut dağılımı **Şekil 1**'de verilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneden alınan temsili numune ile gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçları ve beslemenin genel bileşimi **Tablo 1**'de ayrıca verilmektedir. Besleme analizi incelendiğinde mangan içeriği yaklaşık % 20 seviyelerinde olan cevherin temel safsızlıklarının silikatlar, alümina, feldispatik killer ve demir olduğu görülmektedir. Manganın çoğunlukla pirolüsit, bixbit ve polianit mineralleri bünyesinde bulunduğu cevherin ortalama yoğunluğu 3.6 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Mangan ve demirin yoğunluğunun

5 g/cm³'ün üzerinde olduğu düşünüldüğünde, cevherden silikat ve diğer safsızlıkların uzaklaştırılmasında, dünyada da mangan zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan fiziksel ayırım yöntemlerinin uygulanabilirliğine ve serbestleşmeye bağlı olarak yoğunluk farkına bağlı zenginleştirilme işlemlerinin yapılabileceği en iri tane boyunun belirlenmesine ilişkin deneysel çalışmalar bu kapsamda planlanmıştır.

Deneysel yöntem

Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikli olarak cevherin farklı tane boylarının değişen yoğunluklarda sıvılardaki davranışı incelenmiştir. 16mm'den inceye kırılan numune miktarı konileme-dörtleme yöntemiyle azaltılmış ve azaltılan numune -16mm+5mm, -5mm+1mm, -1mm+0.2mm ve -0.2mm tane boyu fraksiyonlarına elenmiştir. Yer çekimi ile zenginleştirmeye uygunluğun ve buna uygun tane boyunun belirlenmesi amacıyla yüzdürme-batırma testleri, -16mm+5mm, -5mm+1mm ve -1+0.2mm fraksiyonlarına ayrı ayrı 2.75g/cm³, 2.85g/cm³, 3.2g/cm³ ve 3.5g/cm³ ayırma yoğunluklarında uygulanmıştır.



Şekil 1. 16 mm'den inceye kırılan numunenin boyut dağılımı.

Figure 1. Size distribution of the sample crushed below 16 mm.

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin kimyasal analiz sonuçları.

Table 1. Chemical analysis results of the sample used in experimental studies.

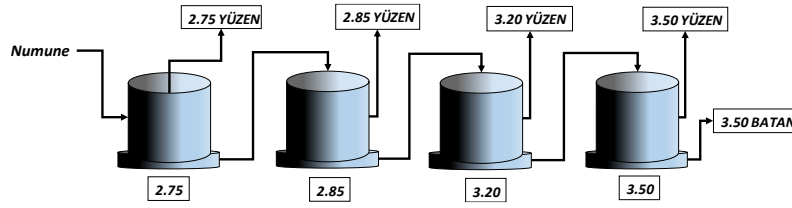
SiO ₂	(%)	40.98
Al ₂ O ₃	(%)	2.39
Fe ₂ O ₃	(%)	19.89
MgO	(%)	0.61
CaO	(%)	2.73
Na ₂ O	(%)	0.28
K ₂ O	(%)	0.53
TiO ₂	(%)	0.09
P ₂ O ₅	(%)	0.35
Mn	(%)	21.78
Cr ₂ O ₃	(%)	0.006
Ba	(ppm)	2351
Ni	(ppm)	213
Sr	(ppm)	4001
Zr	(ppm)	23
Y	(ppm)	51
Nb	(ppm)	<5
Sc	(ppm)	5
Kızdırma Kaybı	(%)	9.6

Ağır sıvıların hazırlanması için tetrabrometan, sodyumpolitungstat ve tungsten karbür kullanılmıştır. Yüzdürme-batırma testlerinde kullanılan yöntem **Şekil 2**'de şematik olarak verilmektedir. Yüzdürme-batırma testlerinde -16mm+5mm tane boyu fraksiyonu öncelikle 2.75g/cm³ yoğunluğundaki sıvıya dökülmüş ve bu sıvıda yüzen ve askıda kalan taneler alınarak 2.75g/cm³ yüzen ürünü olarak ayrılmıştır. 2.75g/cm³ yoğunluklu sıvıda batan malzeme süzülerek ayrılmış ve 2.85g/cm³ yoğunluklu sıvıya aktırılmıştır. Seri bu şekilde tamamlanarak nihai sıvıdan da bir batan ürün alınmıştır. Devamında -5mm+1mm ve -1+0.2mm tane boyu fraksiyonlarına da aynı prosedür uygulanarak alınan tüm ürünler kimyasal analize gönderilmiştir. -0.2mm fraksiyonu bu testin uygulanabilirliği açısından

çok ince bir tane boyu olması sebebiyle ayrı olarak analiz edilmiştir. Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak ağır ortam siklonları, sipiraller, jigler vb. yoğunluğa dayalı yerçekimi ile ayırım yapan ekipmanların zenginleştirmede kullanımına ilişkin değerlendirmeler ve simülasyon çalışmaları yapmak mümkün olmaktadır.

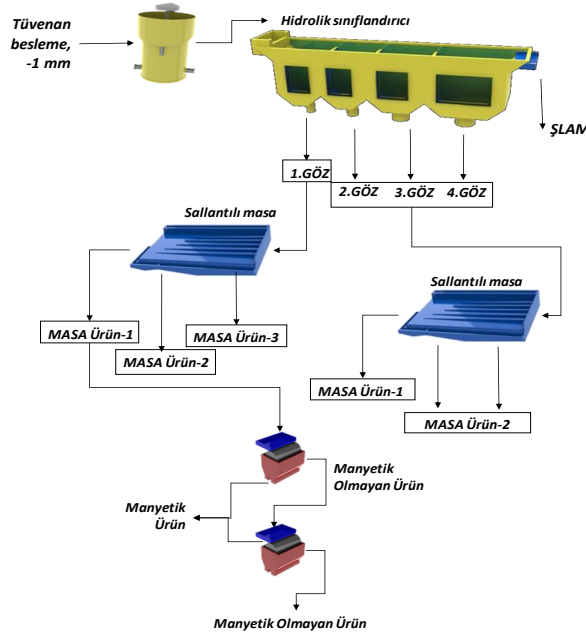
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar kapsamında cevherin genel yapısına bağlı olarak, manyetit cevherinden ince boyda manyetit ve flotasyon ile bakır ürünü alınması, aynı zamanda da alkali ve alümina gibi safsızlıkların da uzaklaştırılmasına yönelik test çalışmaları planlanmıştır.



Şekil 2. Yüzdürme batırma test yönteminin şematik olarak gösterimi.

Figure 2. Schematic representation of the sink-float test method.



Şekil 3. -1mm besleme numunesi ile gerçekleştirilen fiziksel zenginleştirme testlerinin şematik görünümü.

Figure 3. Schematic view of the physical beneficiation tests performed with -1mm feed sample.

Zenginleştirme deneylerinde kullanılacak deneysel yöntem, mineralojik veriler ve cevherin serbestleşme davranımı göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu kapsamda farklı sondaj karotlarından alınan ocak numunesi -10 mm'ye kırılmış ve temsili numune gruplarına ayrılmıştır. Öncelikle bir grup temsili -10 mm numune iri boyda atık (gang) minerallerinin uzaklaştırılabilirliğini incelemek amacıyla, düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırma testlerine (cobbing) tabi tutulmuştur. Devamında, belirlenen tane boylarına öğütülen numunelerle nihai ürünlerdeki kayıplar göz önünde bulundurularak düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri, yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırma testleri ve nihai kalite artışına yönelik yaş manyetik ayırma ve flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ilgili cevherin en yüksek verimle zenginleştirilebileceği bir akım şeması tasarlanmıştır.

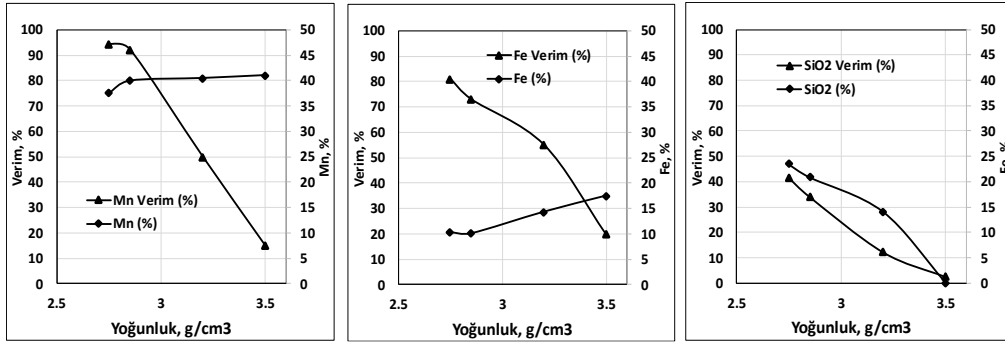
Zenginleştirme çalışmaları kapsamında ise tamamı -1mm'ye kırılan fraksiyon ile de hidrolik sınıflandırıcı, sallantılı masa ve cevher içerisinde demirin önemli ölçüde varlığı sebebiyle manyetik ayırma testleri gerçekleştirilmiştir. Yerçekimi ile zenginleştirme açısından özellikler sulu sistemlerde tanenin yoğunluğu, boyu ve şekli ayırmada önemli parametrelerdir. Mangan cevherinde değerli metal ile safsızlıklar arasındaki yoğunluk farkı göz önüne alındığında, tane boyunun etkisini en aza indirmek amacıyla ayırım öncesinde malzemeyi tane boyuna göre sınıflandırmak gerekmektedir. Ek olarak çok ince boydaki "şlam" denilen tanelerin de sallantılı masa performansını etkilememesi amacıyla, dört adet göze sahip bir hidrolik sınıflandırıcı kullanılarak -1 mm'ye kırılan besleme boya göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca sallantılı

masanın konsantresinin iri fraksiyonuna (1. göz konsantresi) yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma testi de uygulanmıştır. Fiziksel zenginleştirme testlerine ilişkin deneysel çalışmalarda kullanılan yöntem **Şekil 3**'de şematik olarak verilmektedir. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda yüksek verim ve düşük safsızlık içeren, satılabilir bir mangan ürününün elde edilebileceği zenginleştirme devre stratejileri değerlendirilmiştir.

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

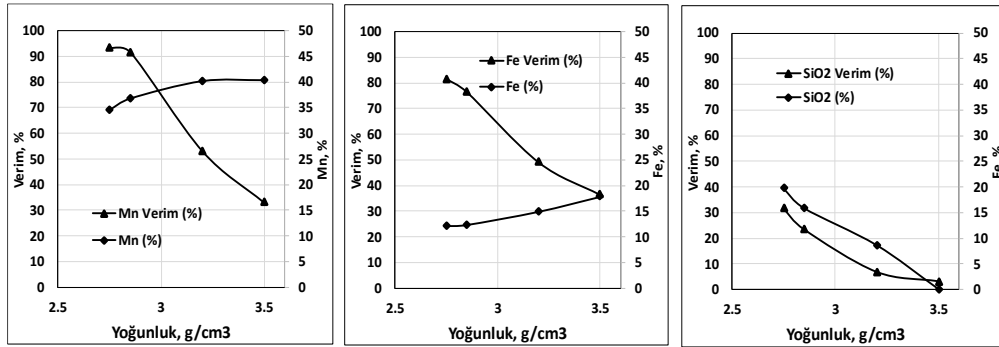
Yüzdürme-Batırma Testleri

-16mm+5mm, -5mm+1mm ve -1+0.2mm tane boyu fraksiyonlarına uygulanan yüzdürme-batırma testlerinin verim, tenör ve yoğunluk ilişkilerine ilişkin sonuçları sırasıyla **Şekil 4**, **Şekil 5** ve **Şekil 6**'da verilmektedir. Benzer şekilde her fraksiyon için yoğunluğa bağlı bilikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef ürünlerdeki % Mn içeriği ile ilişkileri de **Şekil 7**, **Şekil 8** ve **Şekil 9**'da verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, yaklaşık %37.33-%41.05 Mn içerikli ve miktarca % 10.25-19.69 oranında ürünler elde edilebildiği görülmektedir. **Şekil 4**, **5** ve **6** incelendiğinde özellikle incelen tane boyuyla cevherden alınan ürün miktarı, tenörü ve metal veriminin göreceli olarak düştüğü görülmektedir. Yine cevherin yoğunluğa karşı ağırlık ilişkisi (**Şekil 7, 8 ve 9**), eğrinin eğiminin oldukça yüksek olması sebebiyle cevherin yerçekimiyle zenginleştirme ile ayırımının oldukça zor olduğuna işaret etmektedir. Yaklaşık 0.1g/cm³ yoğunluk değişimiyle ürün miktarındaki sapma yaklaşık olarak %15 civarında olduğu görülmektedir. Oldukça dar bir yoğunluk aralığında yüksek miktarda malzemenin bulunması, sadece fiziksel zenginleştirme yöntemleriyle zenginleştirmenin zorluğuna ilişkin önemli bir bulgudur.



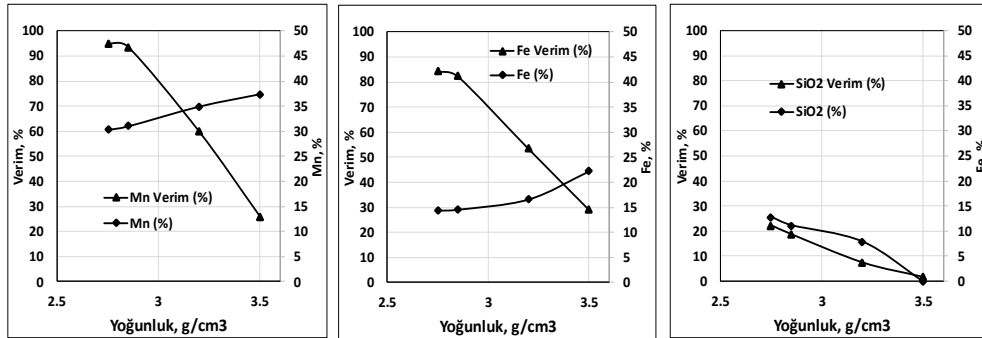
Şekil 4. -16+5mm fraksiyonunun yoğunluğa karşı (Mn, Fe ve SiO₂) verim ve tenör eğrileri.

Figure 4. Density versus (Mn, Fe and SiO₂) recovery & grade curves of -16+5mm fraction.



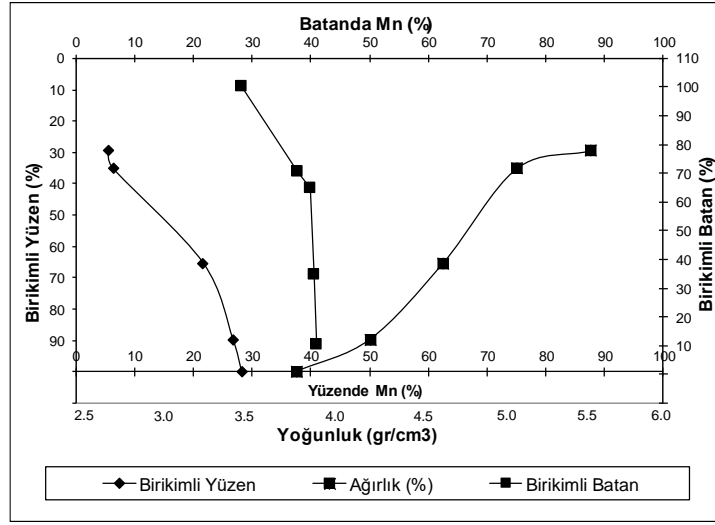
Şekil 5. -5+1mm fraksiyonunun yoğunluğa karşı (Mn, Fe ve SiO₂) verim ve tenör eğrileri.

Figure 5. Density versus (Mn, Fe and SiO₂) recovery & grade curves of -5+1mm fraction.



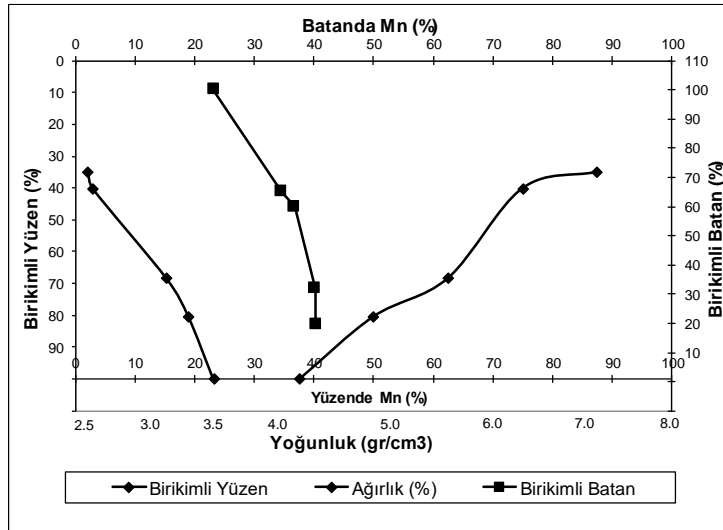
Şekil 6. -1+0.2mm fraksiyonunun yoğunluğa karşı (Mn, Fe ve SiO₂) verim ve tenör eğrileri.

Figure 6. Density versus (Mn, Fe and SiO₂) recovery & grade curves of -1+0.2 mm fraction.



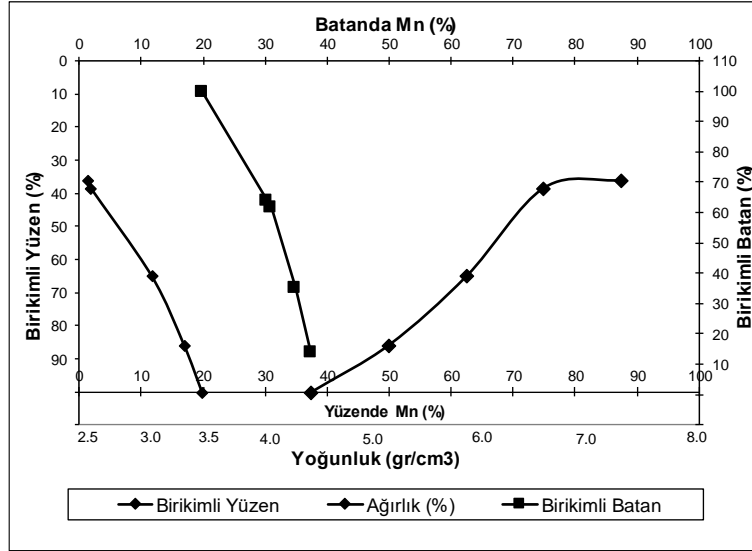
Şekil 7. -16+5mm fraksiyonu için yoğunluğa bağlı birikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef ürünlerdeki % Mn içeriği ile ilişkileri.

Figure 7. Relationship of the density-dependent cumulative sink-float weights to % Mn content in the target product for the -16+5mm fraction.



Şekil 8. -5+1mm fraksiyonu için yoğunluğa bağlı birikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef ürünlerdeki % Mn içeriği ile ilişkileri.

Figure 8. Relationship of the density-dependent cumulative sink-float weights to % Mn content in the target product for the -5+1mm fraction.



Şekil 9. -1+0.2mm fraksiyonu için yoğunluğa bağlı bilikimli yüzen ve batan ağırlıkların hedef ürünlerdeki % Mn içeriği ile ilişkileri.

Figure 9. Relationship of the density-dependent cumulative sink-float weights to % Mn content in the target product for the -1+0.2mm fraction.

Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen bu sonuçlar neticesinde cevherin zenginleştirilmesinde bir ağır ortam devresinin kullanılmasının zaruri olduğu sonucuna ulaşılmaktadır

Hidrolik Sınıflandırıcı ve Sallantılı Masa Testleri

Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen sonuçların sınanması amacıyla ek olarak yaygın fiziksel zenginleştirme yöntemleri de ayrıca deneysel olarak uygulanmıştır. Orjinal cevherden temsili olarak alınan yaklaşık 20 kg numune laboratuvar ölçekli çeneli ve merdaneli kırıcılarla kontrollü olarak -1 mm tane boyuna kırılmış ve tesiste uygulanabilecek şekilde kademeli olarak hidrolik sınıflandırıcı, sallantılı masa ve manyetik ayırma testlerine tabi tutulmuştur. -1mm'ye kırılan numune öncelikle dört ayırma gözü olan hidrolik sınıflandırıcıda iri ve ince tane boyu gruplarına ayrılmıştır.

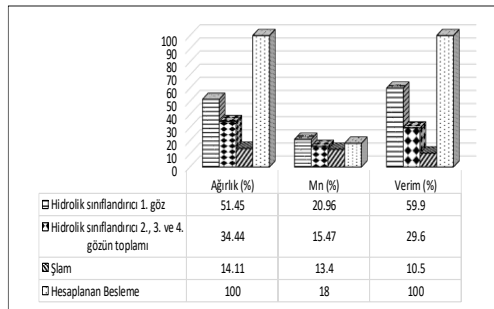
Sınıflandırıcıdan 1. göz ürünü ve diğer gözlerden alınan ürünler olmak üzere 2 farklı boy ve yoğunlukta ürün alınmıştır. Hidrolik sınıflandırıcı testinden elde edilen ürün detayları **Şekil 10**'da sunulmuştur. Devamında sınıflandırıcının 1. gözünden alınan yaklaşık -1mm+0.425 mm tane boyuna sahip numuneye ve diğer 2+3+4 gözlerden alınan yaklaşık -0.425mm+0.212 mm tane boyuna sahip numuneye ayrı ayrı sallantılı masa testleri uygulanmıştır. 1. Göz ürünüyle sallantılı masa testleri nispeten düşük masa eğimi, yüksek frekans ve yüksek su hızında gerçekleştirilmiştir. 1. Göz ve 2+3+4. Gözlerden alınan sınıflandırılmış ürünlerle gerçekleştirilen sallantılı masa test sonuçları sırasıyla **Şekil 11** ve **Şekil 12**'de verilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde malzemenin yaklaşık %14 gibi bir miktarının hidrolik sınıflandırıcıda şlam olarak atıldığı görülmektedir. Masa ürünlerine bakıldığında birinci göz ürününe

uygulanan testlerde alınabilen en kaliteli ürün 26.33 %Mn içeriğiyle ağırlıkça %14.25 oranında olmuştur. İkinci göz ürününe uygulanan testlerde alınabilen en kaliteli ürün ise 28.06 %Mn içeriğiyle ağırlıkça %4.58 oranındadır. Yüzdürme-batırma testleri ile elde edilen sonuçlarla uyumlu şekilde her iki masa testinden elde edilen ürünlerin de miktar ve kalite olarak oldukça düşük düzeylerde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen birbirine uyumlu veriler, zenginleştirme amaçlı oluşturulacak bir akım şemasının da ağır ortam kullanımının zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

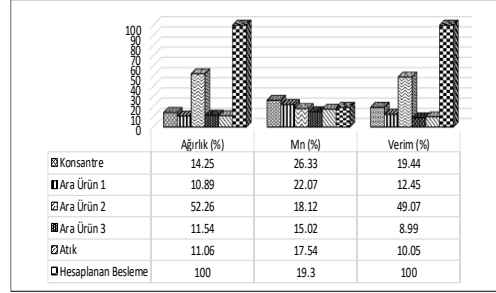
Yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma testleri

Elde edilen sonuçlarda manganın satılabilir düzeylere çıkarılabilirliğinin test edilmesi için, özellikle demir ve mangan davranımını incelemek açısından sallantılı masa konsantresine yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma testi uygulanmıştır. **Şekil 13**'de verilen manyetik ayırma test sonuçları incelendiğinde buradan ağırlıkça % 61.4 oranında % 34.15 Mn ve % 12.77 Fe içeren bir ürün alınabilmesine rağmen, uygulanan prosesin genelinde mangan veriminin % 10-15'lere düşmesi sebebiyle uygulanabilir bir temizleme yöntemi olmadığına karar verilmiştir.



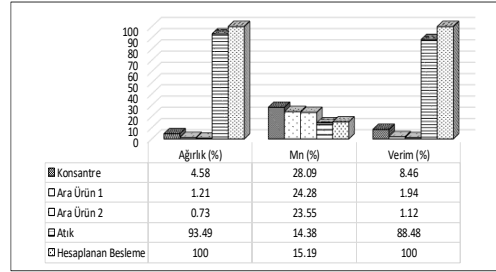
Şekil 10. Hidrolik sınıflandırıcı test sonuçları.

Figure 10. Hydraulic classifier test results



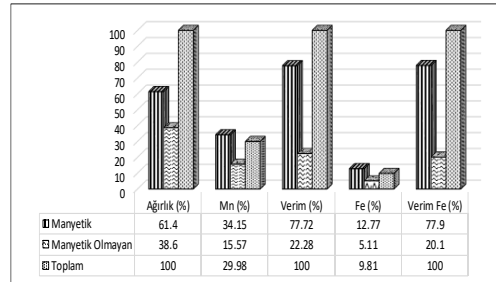
Şekil 11. Birinci gözden alınan numunenin sallantılı masa testi sonuçları.

Figure 11. Shaking table test results of the sample collected from first compartment.



Şekil 12. İkinci, üçüncü ve dördüncü gözlerden alınan toplam numunenin sallantılı masa testi sonuçları.

Figure 12. Shaking table test results of the sample collected from first compartment.



Şekil 13. Sallantılı masa konsantreleri ile gerçekleştirilen manyetik ayırma toplu test sonuçları.

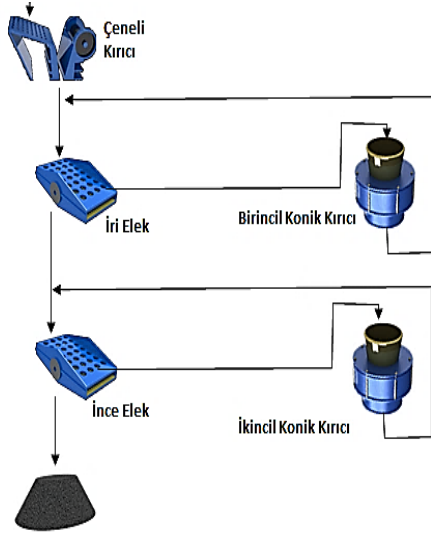
Figure 13. Magnetic separation batch test results with shaking table concentrates.

SİMÜLASYON ve MODELLEME ÇALIŞMALARI

Elde edilen deneysel sonuçlar dikkate alınarak, ekipman tasarım ve işletme parametrelerinden bağımsız olmak suretiyle, cevherden üretilebilecek ürün miktar ve niteliklerinin tahmini için temsili 100 t/saat besleme için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

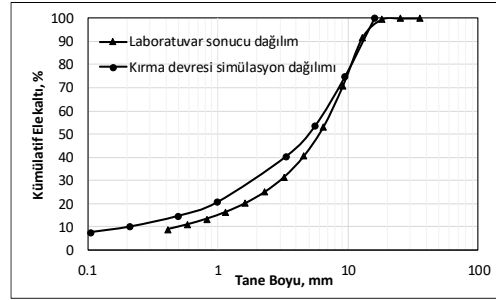
Cevherin öncelikle konvansiyonel bir kırma devresinde yaklaşık 25mm altına kırılma davranımı değerlendirilmiş ve bir kırma ürünü elde edilmiştir. Simülasyonda kullanılan basit kırma devresi akım şeması **Şekil 14**'de ve kırma sonucu elde edilen ürün boyut dağılımı **Şekil 15**'de verilmektedir.

Kırılan cevher boyut dağılımı kullanılarak zenginleştirme devresi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda cevher öncelikle 1mm'den elenerek +1mm fraksiyonu ağır ortam devresinde zenginleştirilmiştir.



Şekil 14. Kırma simülasyonu akım şeması.

Figure 14. Flowsheet used in crushing circuit simulation.



Şekil 15. Kırma simülasyonu ürünü boyut dağılımı.

Figure 15. Size distribution of the crushing simulation product.

-1mm fraksiyonundan ise öncelikle şlam atılmış ve şlamı atılmış cevher iki kademe zenginleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Uygulanan simülasyona ilişkin akım şeması ve akışlara ait veriler **Şekil 16**'da verilmiştir.

Yüzdürme-batırma testlerine dayalı karakterizasyon çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak potansiyel bir ağır ortam akım şeması tasarlamak amacıyla, mangan cevherinden satılabilir ürün eldesini hedefleyen çeşitli kütle dengesi modellerinin kullanıldığı nihai bir akım şeması değerlendirilmiştir. Modelleme çalışmalarında özellikle tane boyu fraksiyonlarına göre yıkanabilirliklere (yüzdürme-batırma testi davranımına) uygun ekipmanın seçimine, her akıştaki verimlere ve istenen nihai kazanımlara odaklanılmıştır. Ağır ortam kullanılarak gerçekleştirilecek zenginleştirme devrelerinde ayırma yoğunluğu, ekipman kapasitelerini ve hedeflenen ürün kalitesini sınırlayan en belirleyici parametredir. Bu nedenle çeşitli yoğunluklarda ayırma ve tesis performans değerlendirme çalışmalarından elde edilen E_p (Ecart probability) değerleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Burada E_p , "Ecart olasılık katsayısını" ifade etmektedir. E_p basitçe, ayırma

işlemin verimsizliğini belirten yoğunluk kesme noktası çevresinde seçilen bir "aralık" olarak ifade edilebilir (Napier-Munn vd., 2009). Deneysel çalışmalardan elde edilen model parametrelerinin yanı sıra, zenginleştirme tesisi için gerçekçi koşulları temsil etmeye yönelik modelleme ve simülasyon parametreleri seçilmiştir.

Ağır ortam ile zenginleştirme işlemleri için, bir partiyon eğrisinin (**Eşitlik 1**) (Wills ve Munn, 2006) modellenmesinde kullanılan ve JKMRRC'de (Avustralya) geliştirilen yaklaşım kullanılmıştır.

$$Y_i = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{\ln 3(\rho_{50} - \rho_i)}{E_p}\right]} \quad (1)$$

Burada;

Y_i , ayırım sonrasında batan ürüne giden ρ_i yoğunluklu fraksiyonun partiyon numarasını,

ρ_{50} , ayırım yoğunluğunu,

ve E_p , ayırımın verimsizliğini gösteren Ecart olasılık katsayısını ifade eder ($E_p = (\rho_{75} - \rho_{25})/2$).

Boyut ayırımlarının simülasyonu için ise **Eşitlik 2**'de (Wills ve Munn, 2006) verilen ve Whiten tarafından geliştirilen verimlilik eğrisi modeli kullanılmıştır.

$$E_{OA} = C \left[\frac{(1 + \beta \cdot \beta^* \cdot x) (e^\alpha - 1)}{e^{(\alpha \cdot \beta^* \cdot x)} + e^\alpha - 2} \right] \quad (2)$$

Burada;

E_{OA} , ince ürüne giden besleme yüzdesini,

C , ayırma tabii tutulan beslemenin yüzdesini (100-kaçak),

α , keskinlik parametresini,

β , "fish-hook" parametresini,

β^* , hesaplanan "β" parametresini,

ve x normalleştirilmiş tane boyutunu (d/d_{50c}), burada da d tane boyutu ve d_{50c} ise düzeltilmiş ayırım boyunu ifade eder.

Bu modeller, kurum içinde geliştirilen Lave® kömür simülatörüne dahil edilmiş ve mangan numunesinin boyut dağılımı ve yıkanabilirlikleri kullanılarak prosesin kütle akış hızları hesaplanmıştır.

Simülasyon devre tasarımında kırma tane boyu dağılımı **Şekil 15**'te verilen cevher öncelikle 1 mm'den elenmiştir. Elek üstü +1 mm malzeme yaklaşık 3 g/cm³ yoğunluğunda ağır ortam siklonu ile zenginleştirmeye tabi tutulduğunda satılabilir standartlara uygun % 40.3 Mn ve % 10.9 Fe içeren bir iri ürün elde edilebilmektedir. -1 mm malzemeden ise öncelikle hidrolik sınıflandırıcı ile ince boydaki şlamın uzaklaştırıldığı ve devamında spiraller ile iki kademe fiziksel zenginleştirmenin uygulandığı bir devre uygulanmıştır. Burada yaklaşık % 14 Mn içeren ağırlıkça % 3.7 miktarında bir atık uzaklaştırıldıktan sonra elde edilen ürünün, ağır ortam siklonu ile elde edilen iri ürünle karıştırıldığı nihai bir ürün elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda ağır ortam ve yer çekimiyle zenginleştirmenin birlikte kullanıldığı cevherden, besleme tonajının ağırlıkça % 33.3'ü oranında, %51 Mn verimi ile % 39.48 Mn ve % 11.75 Fe içerikli ürün elde edilebileceği görülmektedir.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yerçekimi, yoğunluk farkı ve fiziksel ayırım prensipleriyle zenginleştirilen cevherlerde taneler arasındaki yoğunluk farkı en önemli ayırım parametrelerinden birisidir. Yoğunluk farkının tane boyu fraksiyonları özelinde dağılımı, prosesde kullanılacak ekipman ve yöntemlerin seçiminde önemli bir rol oynar. Mevcut çalışma kapsamında bir mangan cevheri için yerçekimi ve fiziksel zenginleştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği ve

karakterizasyon testleri doğrultusunda cevhere uygun bir akım şemasının geliştirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Mangan cevheri ile karakterizasyon amaçlı gerçekleştirilen yüzdürme batırma testlerinden yaklaşık % 37.33-% 41.05 Mn içerikli ürünler elde edilebildiği görülmüştür. Cevherin ağır sıvı analizi sonuçları incelendiğinde yerçekimiyle zenginleştirme ile ayırımının oldukça zor olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu sebeple cevherin zenginleştirilmesinde yoğunluk farkına dayalı daha hassas ayırma olanak veren bir ağır ortam devresinin kullanılmasının gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer özelliklere sahip Mn cevherine ilişkin değerlendirmelerin yapıldığı bir çalışmada (*Singh vd., 1991*) fiziksel ve gravite zenginleştirme yöntemlerine ilişkin değerlendirmelerde karakterizasyon amaçlı bir yoğunluk dağılımı belirlenmesi yoluna gidilmemiş, sadece jig ve sallantılı masa testlerine göre karar verilmiştir. Yine aynı ekibin bir diğer çalışmasında (*Singh ve Biswas, 2017*) nispeten yetersiz bir gravite karakterizasyonunun ardından fiziksel ve kimyasal yöntemlerin bir arada kullanımının değerlendirildiği görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, detaylı yoğunluk dağılımının fraksiyonel olarak belirlenmesi ile bir ağır ortam devresinin simülasyonu ve uygulanabilirliği ortaya konulabilmiştir.

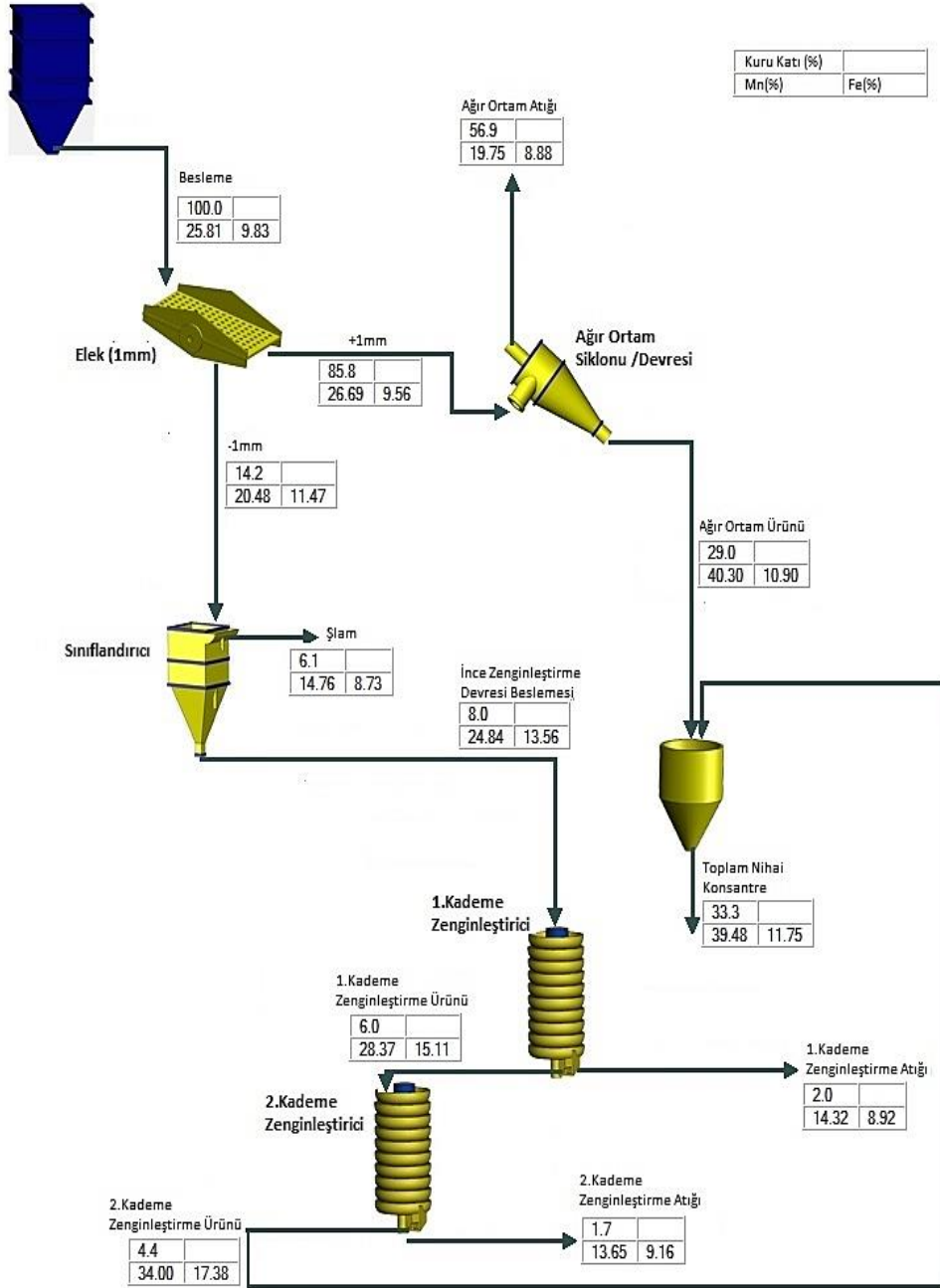
Yerçekimine dayalı zenginleştirme çalışmaları kapsamında -1mm boyutuna uygulanan sallantılı masa testlerinde cevherin yaklaşık %14'ünün şlam boyutunda ve değerlendirilemez nitelikte olduğu görülmüştür. Masa testlerinde tek kademedede % 26.33-28.06 Mn içerikli ve ağırlıkça % 4.58-14.25 oranında ürünler alınabilmiştir. Masa testlerinde tek kademedede elde edilen ürünler miktar ve kalite olarak oldukça düşük düzeylerde kalmıştır. Masa konsantresine uygulanan manyetik ayırma testinde % 34.15 Mn ve % 12.77 Fe

içerikli, ağırlıkça % 61.4 oranında ürün elde edilmiştir.

Yüzdürme-batırma test sonuçlarından elde edilen göreceli başarılı sonuçlar, ilgili cevherin zenginleştirilmesine yönelik tasarlanacak bir akım şemasında, ağır ortam devresinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bünyesinde ağır ortam içeren bir akım şeması ile cevherin zenginleştirilmesine yönelik gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında cevherden % 51 Mn verimi ile miktarca % 33.3 oranında % 39.48 Mn ve % 11.75 Fe içerikli ürünün elde edilmesi mümkün olduğu görülmüştür. Bu kapsamda Mn/Fe oranı yaklaşık "1" olan ve yerçekimi ile zenginleştirme açısından problemlili bir mangan cevherinden, spiraller ve ağır ortam ile zenginleştirmenin entegre edildiği akım şeması kullanılarak Mn/Fe oranı 3.36 olan ve metalurjik süreçlerde kullanılabilir bir mangan konsantresi elde edilebileceği görülmektedir.

KATKI BELİRTME

Çalışmanın değerlendirilme sürecinde katkı veren değerli Yerbilimleri editör ve hakemlerine teşekkürlerimizi sunarız.



Şekil 16. Zenginleştirme simülasyonu akım şeması ve akışlara ait veriler.

Figure 16. Flowsheet of beneficiation simulation and data of each flow.

KAYNAKLAR

- Burt RO., 1999. "The role of gravity concentration in modern processing plants". *Minerals Engineering*, Vol. 12 No. 11, 1291-1300.
- Burt RO, Mills C. , 1984. "Gravity Concentration Technology". Elsevier Science Publishing Company Inc, New York, sf.605.
- Chan BSK, Mozley RH, Childs GJC. , 1991. "Extended trials with the high tonnage multi-gravity separator", *Minerals Engineering* Vol. 4 Issues 3–4, 489-496.
- Dehaine Q, Filippov LO, Joussemet R. , 2017. "Rare earths (La, Ce, Nd) and rare metals (Sn, Nb, W) as by-products of kaolin production – Part 2: Gravity processing of micaceous residues", *Minerals Engineering* Vol. 100, 200-210.
- Fuerstenau MC, Han KN. , 2003. "Principles of Mineral Processing". Colorado Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. SME, sf.73.
- Gupta A, Yan DS., 2006. "Mineral Processing Design and Operations". Amsterdam, Elsevier, sf.516.
- Granina LZ, Mats VD, Phedorin MA., 2010. "Iron-manganese formations in the Baikal region", *Russ. Geol. Geophys.*, 51, sf. 650-660.
- Honaker R, Das A, Nombe M., 2005. "Fine coal cleaning using a Centrifugal Fluidized Bed Separator". SME Annual Meeting No. 05-96.
- Honaker R, Richard W., 2003. "Advances in Gravity Concentration". SME Littleton Colorado USA, sf.196, ISBN: 0-87335-227-0.
- Lins FF, Veiga MM, Stewart JA, Papalia A, Papalia R., 1992. "Performance of a new centrifuge (Falcon) in concentrating a gold ore from texada island B.C. Canada". *Minerals Engineering* Vol. 5 Issues 10–12, 1113-1121.
- Liu B, Zhang Y, Lu M, Su Z, Li G, Jiang T., 2019. "Extraction and Separation of manganese and iron from ferruginous manganese ores: A review", *Minerals Engineering*, Volume 131, Pages 286-303.
- Manser RJ, Barley RW, Wills BA., 1991. "The shaking table concentrator — The influence of operating conditions and table parameters on mineral separation — The development of a mathematical model for normal operating conditions", *Minerals Engineering* Vol. 4 Issues 3–4, 369-381.
- Maré E, Beven B, Crisafio C., 2015. "Chapter 10: Developments in nonmagnetic physical separation technologies for hematitic/goethitic iron ore". *Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability-Iron Ore*, 309-338.
- Marion C, Williams H, Langlois R, Kökkılıç O, Waters KE., 2017. "The potential for dense medium separation of mineral fines using a laboratory Falcon Concentrator", *Minerals Engineering* Vol. 105, 7-9.
- Mular AL, Halbe DN., Barratt DJ., 2002. "Mineral Processing Plant Design, Practice and Control". Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. SME, sf.2422.
- Munn, Napier-T.J., Gibson, G., Bessen, B., 2009. Advances in dense medium cyclone plant design. In: Proc. 10th Mill Operators' Conf., Adelaide, Ekim (AusIMM).

- Olyaei Y, Aghazadeh S, Gharabaghi M, Mamghaderi H, Mansouri J., 2016. "Gold, Mercury, and Silver Extraction by Chemical and Physical Separation Methods". *Rare Metal Materials and Engineering* Vol. 45 Issue 11, 2784-278.
- Palmer M, Vadeikis C. 2010. "New Developments in Spirals and Spiral Plant Operations, XXV International Mineral Processing Congress (IMPC)", Brisbane, Qld, Australia.
- Patil DP, Govindarajan B, Rao TC, Kohadi VP, Gaur RK., 1999. "Plant trials with the multi gravity separator for the reduction of graphite", *Minerals Engineering* Vol. 12 Issue 9, 1127-1131.
- Richards RG, Jones TA., 2004. "Kelsey centrifugal jig-an update on technology and application" SME Annual Meeting Denver, No. 04-21.
- Singh V, Biswas A., 2017. "Physicochemical processing of low grade ferruginous manganese ores", *Int. J. Miner. Process.*, 158, sf. 35-44.
- Singh V, Ghosh TK, Ramamurthy Y, Tathavadkar V., 2011. "Beneficiation and agglomeration process to utilize low-grade ferruginous manganese ore fines", *Int. J. Miner. Process.*, 99, sf. 84-86.
- Tripathy SK, Banerjee PK, Suresh N., 2015. "Effect of desliming on the magnetic separation of low-grade ferruginous manganese ore", *Int. J. Min. Met. Mater.*, 22 (7), sf.661-673.
- Tripathy SK, Mallick MK, Singh V, Rama Murthy Y., 2013. "Preliminary studies on teeter bed separator for separation of manganese fines", *Powder Technology* Vol.239, 284-289.
- Wills BA, Napier-Munn T., 2006. "Wills' Mineral Processing Technology". Elsevier Science & Technology Books, sf.512.
- Wu XD, Ming XQ, Huang GH, Chen NX, Huang BL, Lu WS., 2015. "Production by using low poverty manganese mine to smelt quality rich manganese slag", *China's Manganese Ind.*, 33 (3), sf.131-133.