



Orijinal Araştırma / Original Research

SİVAS BÖLGESİNE AİT DEMİR CEVHERİNİ KURU MANYETİK AYIRMA İLE ZENGİNLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE UYGUN TESİS TASARIMI

ENRICHMENT STUDIES OF IRON ORE IN SİVAS REGION WITH DRY MAGNETIC SEPARATION AND PROPER PLANT DESIGN

Ergin Gülcan^{a,*}, Özcan Yıldırım Gülsoy^{a,**}

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 25 Ocak / January 2018
Kabul Tarihi / Accepted : 27 Şubat / February 2018

Anahtar Sözcükler:

Hematit,
Yüksek alan şiddetli kuru
manyetik ayırma,
Ağır ortam,
Tesis tasarımı.

Keywords:

Hematite,
High intensity dry magnetic
separation,
Dense medium,
Plant design.

ÖZ

Bu çalışmada, Demir Export A.Ş.'ye ait demir cevheri numunesinin konvansiyonel manyetik ayırma ile zenginleştirmesine yönelik stratejiler değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan demir cevheri %53,20-53,78 Fe içeriğine sahip olup, SiO₂ içeriği %10,5'in üzerinde ölçülmüştür. Al₂O₃ içeriği ise %2,3'ün, toplam alkali içeriği (K₂O+Na₂O) ise %0,6'nın üzerindedir. Bu özellikleri ile cevherin satışlara temel teşkil eden analiz değerleri, Fe içeriğini sorunsuz olarak sağlamaktadır. Fakat silis, alümina ve alkali içerikleri red sınırı olarak tanımlanan değere çok yakın ya da bir miktar üzerinde olmaktadır. Deneysel çalışmalar özellikle impürite içeriğinin çıkardığı bu sorunları gidermeye yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut üretim yöntemi göz önüne alınarak geliştirilen yöntemin kuru bir ayırma yöntemi olması gerekliliği belirlenmiş ve bu nedenle kuru manyetik ayırma testleri planlanmış ve yürütülmüştür. Ayrıca cevherden üretilebilecek en kaliteli ürün özelliklerini ortaya koyabilmek amacıyla ağır sıvı testleri de uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda -30+10 mm ve -10 mm fraksiyonlarında sırasıyla ağırlıkça %68 (%61,26 Fe) ve %92 (%55,39 Fe) oranında ürünler alınabileceği belirlenmiştir.

ABSTRACT

In this study, strategies for enrichment of iron ore samples of Demir Export A.Ş. via conventional magnetic separation were evaluated. Fe% and SiO₂ % of the iron ore used in the study is measured as in between 53.20-53.78 and above 10.5, respectively. Also, Al₂O₃ content is 2.3% and total alkali content (K₂O + Na₂O) is over 0.6%. Fe content of the ore meet the basic market sales requirements. On the other hand, silica, alumina and alkali contents are close to or slightly above the value defined as rejection limit. Experimental studies have been carried out in order to overcome these problems, especially the impurity content. Considering the current production method, it has been determined that the developed method should be a dry separation method, and therefore dry magnetic separation tests were planned and carried out. In addition, heavy liquid tests have been applied to reveal the best quality products that can be produced from the ore. Experimental studies have shown that 68% (61.26% Fe) and 92% (55.39% Fe) of products can be obtained from size fractions of -30 + 10 mm and -10 mm, respectively.

* Sorumlu yazar: ergingulcan@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8861-8061>

** ogulsoy@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-7063-7432>

GİRİŞ

Demir cevheri bilinen anlamda madenciliğin başlangıcından bugüne endüstrinin temel hammaddesi konumundadır. Modern sanayi ve kimyasal endüstrisinin ihtiyaçları doğrultusunda bir yandan nihai üründe aranan safsızlıkların baz değerleri düşmekte, bir yandan da tenörü azalan rezervlerin daha verimli işlenmesi gerekliliği ön plana çıkmaktadır (Kuskov ve Nikitin, 2002; Rachappa ve Prakash, 2015). Doğada oksitli (hematit, manyetit, götit, limonit), karbonatlı (siderit) veya sülfürlü (pirit, pirotin, markazit) formlarda bulunabilen demir mineralleri, cevher yapısına bağlı olarak oldukça farklı özellikler gösterebilmektedir.

Temel olarak demir içeren mineralin manyetik alınganlığından faydalanılan demir cevheri zenginleştirme pratikleri; safsızlıkların mineralojik yapısına, serbestleşme boyuna, çelik vb endüstriler tarafından talep edilen ürün kalitesine ve manyetik alınganlığın derecesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir ve bu anlamda ortaya çıkan zorlukların giderilmesine yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır (Tripathy vd., 2014; Zeng vd., 2015; Ezhov ve Shvaljov, 2015; Seifelnassr vd., 2013; Chen vd., 2012; Srivastava ve Kawatra, 2009; Tripathy vd., 2017). Yüksek tenörlü hematit veya manyetit cevherleri alt tane boyu sınırı 10 mm olmak kaydı ile doğrudan veya kırma işlemini takiben izabeye verilebilmektedir. Düşük tenörlü cevherlerin ise zenginleştirilmeye tabi tutulması gerekmektedir (yüksek veya düşük alan şiddetli manyetik ayırma, ağır ortam, elektrotatik ayırma, flotasyon vb.) (Wills ve Napier-Munn, 2005). Bu çalışma kapsamında değerlendirilen numuneler Sivas bölgesinde bulunan demir cevheri zenginleştirme tesisinden temin edilmiştir. Mevcut üretim kapsamında, zaman zaman -70+30, -30+10 ve -10 mm tane boyutlarında ocaktan gelen cevherin kalitesinde yaşanan değişimler sebebiyle sorunlar yaşanmaktadır. İri boyda serbestleşme, ince boyda ise silis ve alkali safsızlıkların artışı ile ortaya çıkan bu sorunların çözümü amacıyla, çoğunlukla hematit olarak tanımlanan cevherin sorunlu durumlarda zenginleştirilebileceği alternatif bir manyetik ayırma tesisi tasarlanması değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda cevherin zenginleştirilebilirliğinin ortaya konulması amacıyla kademeli manyetik ayırma ve ağır sıvı testleri gerçekleştirilmiştir (Napier-Munn, 1991).

1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Numune Hazırlama ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalar kapsamında sahadan yaklaşık 500 kg numune temin edilmiştir. Numune yığını harmanlandıktan sonra iki temsili yığına bölünmüştür. Numune gruplarından birisi şahit olarak ayrılmış, diğeri de testlerde kullanılmak üzere satılabilir standartlara uygun olacak şekilde 30 mm'nin altına kırılmıştır. Çeneli kırıcı kullanılarak ve kontrollü olarak gerçekleştirilen kırma işlemini takiben karakterizasyon çalışmaları, manyetik ayırma ve ağır sıvı testlerinde kullanılmak üzere orijinal numune harmanlanarak temsili alt numuneler alınmıştır. Bu temsili numunelerden birisiyle elek analizi gerçekleştirilmiş ve zenginleştirme çalışmalarında da kullanılacak farklı tane boyutu fraksiyonlarının içerikleri belirlenmiştir. Diğer temsili numuneler ise deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere ayrılmıştır. Tane boyutu fraksiyonlarının ve besleme numunesinin genel bileşimleri ve ağırlıkları Çizelge 1'de verilmiştir. Elementel kompozisyonu belirlemede X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır. Ek olarak karşılaştırma amacıyla % Fe içerikleri eritiş yöntemiyle tekrar tayin edilmiştir. Şekil 1'de ise birikimli içeriklerin tane boyutu fraksiyonlarına göre dağılımı verilmektedir. Son olarak besleme numunesinin XRD desenleri incelenmiş ve tespit edilen baskın içerikler Şekil 2'de özetlenmiştir.

Çalışmalarda kullanılan cevherinin demir içeriği %53-54 seviyesindedir. Al_2O_3 içeriğinin ise %2,3-2,4 düzeyinde olduğu görülmektedir. Alkali içerikleri açısından Na_2O içeriği son derece düşük olup K_2O içeriği ise %0,63 seviyesindedir. SiO_2 içeriği ise yaklaşık %10 ölçülmüştür. XRD desenlerinde silikatların çoğunlukla olivin ve kuvars yapısında olduğu görülmektedir. Şekil 1'de de görülen bir diğer önemli husus ise demir ve diğer safsızlıkların tüm tane boyutlarına benzer miktarlarda dağılmış olmasıdır. Bu sebeple cevherin -2 mm fraksiyonunda bir miktar safsızlık artışı olmakla birlikte bu fraksiyonun demir içeriği de oldukça yüksektir. Cevherin safsızlık içeriğini düşürmek için ince tane boyutu fraksiyonunun elenerek ayrılması genel bir çözüm olarak görülmemektedir. Cevher çoğunlukla hematit mineralinden oluşmaktadır. XRD sonuçlarında yer yer manyetit desenlerine

gauss alan şiddetine sahip rulo tipi kuru manyetik ayırıcıya öncelikle yüksek rulo hızında beslenmiş ve manyetik bir ürün ayrılmıştır. Daha sonra manyetik olmayan ürüne giden kısım (atık), daha düşük rulo hızında yine aynı ekipmana beslenerek yeni bir manyetik ürün elde edilmiştir. Bu işlem rulonun endüstriyel olarak çalıştırılabileceği hız limitlerine kadar düşürülerek devam etmiş ve her aşamada bir manyetik ürün alınmıştır. Cevhere uygulanan test yöntemi Şekil 3'de şematik olarak verilmektedir.

Manyetik ayırma testleri, serbestleşme de göz önüne alınarak, -30+10 mm ve -10 mm tane boyu fraksiyonlarına ek olarak cevherin tümü 10mm'nin altına kırıldıktan sonra ortaya çıkan -10mm fraksiyonuna da uygulanmış ve farklı manyetik ürünler ayrılmıştır. Yine tamamı 10mm'nin altına kırılmış cevher içinden -2 mm fraksiyonu elenerek ayrılmış ve benzer zenginleştirme testi -10+2mm fraksiyonuna da uygulanmıştır. Cevher yapısı tam olarak hematit veya manyetitten oluşmadığı için düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıdan etkilenmeyen numunelerin yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıda ayrıldığı görülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan permoll tipi manyetik ayırıcıya -30+10 mm ve -10+4,75 mm tane boyutuna sahip malzemeler sırasıyla 200, 172, 132, 76 ve 32 devir/dakika hızla; içerisinde toz ve ince boyda taneler barındıran diğer tane boyutları ise sırasıyla 400, 350, 300, 230, 180 ve gerekmesi halinde 78 devir/dakika hızla beslenmişlerdir (Şekil 3). Yüksek rulo hızlarında demir içeriği oldukça yüksek, kaliteli bir ürün yakalanabilmiş, kalan kısımların daha düşük rulo hızlarında tekrar ayırıcıdan geçirilmesi ile yine bir manyetik ürün yakalama imkanı oluşmuştur. Şekil 3'de belirtilen yöntem, manyetik ürün yakalanamayana kadar rulo hızı düşürülerek devam ettirilmiş ve her aşamada alınmış olan ürünler ayrı ayrı analize tabi tutulmuşlardır.

Zenginleştirme çalışmalarında ilk hedef olarak toz (-10 mm) ve kalibre (-30+10 mm) tane boyutlarında, Çizelge 2'de verilen özelliklere uygun niteliklerde ürün üretilmesine yönelik testler planlanmış ve deneysel çalışmalar bu çerçevede yürütülmüştür. Yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma ile rulo hızı değiştirilerek hem Fe tenörü %60'ın üzerinde olan, hem de safsızlık

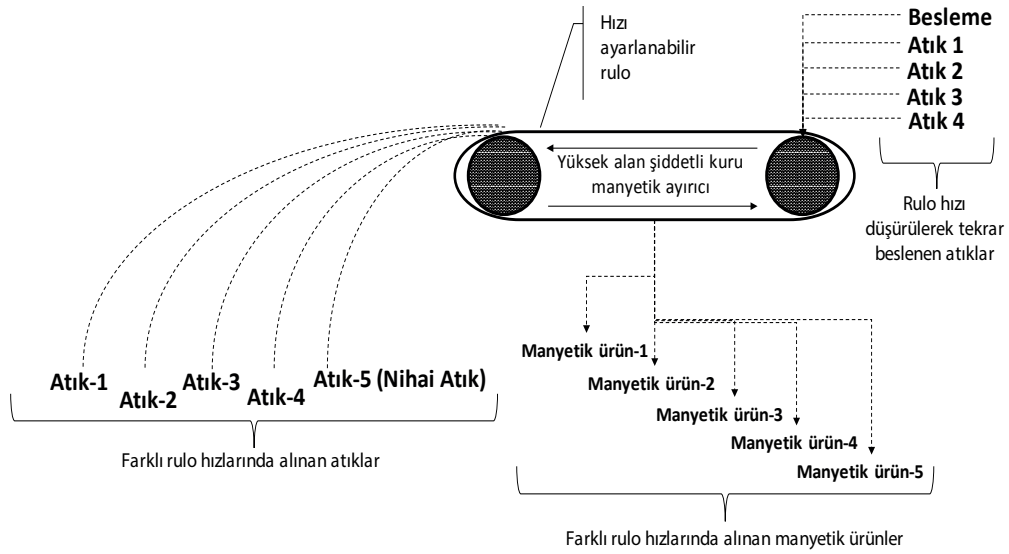
değerleri baz terkip olarak belirtilen değerlere çok yakın ürünlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple kademeli olarak yapılan manyetik ayırma ile tek kademe ve ortalama hızla elde edilebilecek ürünlerden oldukça farklı özellikteki ürünler elde edilebilmesi ve en az demir kaybı ile impürite değerleri red sınırının altında olan ürünlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Devamında gerçekleştirilen manyetik ayırma testleri doğrultusunda kütle denkleğinden bağımsız bir tesis akım şeması oluşturulmuştur.

Çizelge 2. Toz ve kalibre cevher için ulaşılmaması gereken ürün özellikleri

| | Toz (-10mm) | | Kalibre (-30+10mm) | |
|--------------------------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------|
| | Baz terkip % | Ret sınırı % | Baz terkip % | Ret sınırı % |
| Fe | 53 | 50 | 54 | 50 |
| SiO ₂ | 7,5 | 10 | 7,5 | 10 |
| S | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,15 |
| P | - | 0,25 | - | 0,25 |
| As | - | 0,15 | - | 0,15 |
| Cu | - | 0,2 | - | 0,2 |
| Al ₂ O ₃ | 1,6 | 2,5 | 1,6 | 2,5 |
| TA* | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,7 |
| Pb | - | 0,1 | - | 0,1 |
| Zn | - | 0,1 | - | 0,1 |
| TiO ₂ | - | 0,4 | - | 0,4 |

*TA=Toplam Alkali (K₂O+Na₂O)

Cevher genel itibari ile silikatlar, alkali mineraller ve demir içermektedir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında -30+10, -10+4,75, -4,75+2 mm fraksiyonlarına ve ayrıca -30+2 mm fraksiyonuna, cevherden safsızlıkların uzaklaştırılmasına ilişkin elde edilecek bulgular açısından oldukça önemli olan yüzdürme-batırma testleri uygulanmıştır. Demir minerallerinin yoğunlukları genel olarak 2,96 g/cm³'den büyük olduğundan bunlar ağır sıvı içinde batmakta, silikat ve alkaliler ise yoğunlukları bu değerden düşük olduğundan ağır sıvı içinde yüzmektedirler. Bu sebeple 2,96 g/cm³ yoğunluğa sahip ağır sıvı (tetrabromoethane) kullanılarak tek yoğunlukta yüzdürme batırma



Şekil 3. Deneysel test yöntemi genel şeması (Rulo hızı yüksekten düşüğe doğru değişmektedir)

testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede düşük ve yüksek yoğunluktaki minerallerin birbirlerinden ideal koşullarda ayrılabilirliklerinin ortaya konulması planlanmıştır. Ek olarak, ağır sıvı test sonuçlarından hareketle kurulması muhtemel bir ağır ortam zenginleştirme devresi ve bu devreden elde edilecek ürünler simülasyon yoluyla değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Manyetik Ayırma Testleri

Ana beslemeden elenerek ayrılan -30+10mm, -10+4,75mm ve -4,75+2mm tane boyutları ile gerçekleştirilen manyetik ayırma testlerine ilişkin ayırım ürünleri, miktarları ve temel içerikleri Çizelge 3'de özetlenmektedir. Benzer şekilde ana beslemenin tümünün -10mm'ye kırılmasıyla elde edilen -10 mm'lik besleme ve tümü -10 mm'ye kırıldıktan sonra -2 mm tane boyu uzaklaştırılarak elde edilen -10+2 mm'lik beslemelerle yapılan manyetik ayırma test sonuçları da Çizelge 4'de özetlenmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde, -30+10 mm tane boyutunda %53,7 demir içerikli bir beslemeden %61'in üzerinde demir içeren kaliteli bir ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Buna karşın demir içeriği %38 seviyesinde olan bir nihai atık ayrılabilmiştir. Bu fraksiyonda ağırlıkça kazanım %67 civarında olmaktadır (Şekil 4). Uzaklaştırılan atığın SiO_2 içeriği %25 gibi yüksek

seviyelerde olurken, konsantrede bu değer %5'in altına düşmektedir. Konsantrenin Al_2O_3 ve toplam alkali içeriğinde de önemli bir düşüş görülmektedir. Bu fraksiyon için hedef değerlerin oldukça üzerinde bir ürün üretmek mümkün olmuştur.

-10+4,75 mm fraksiyonunda ağırlık verimi %88 düzeyinde olurken demir kazanımı da %93 gibi oldukça yüksek bir seviyeye çıkmaktadır (Şekil 5). Yüksek hızlarda %60'ın üzerinde demir içeren ürün elde edilebilmesine rağmen (Çizelge 3) bu tür bir ürün için demir verimi %40'ın altına düşmektedir (Şekil 5). Fakat buna rağmen; düşük hızlarda impürite içerikleri hedef değerlerin altında olan, demir içeriği ise %56 ile hedef değer üzerinde olan bir ürün kazanımının mümkün olabileceği görülmektedir. Bu aşamada atığın demir içeriği %28 düzeyinde kalırken impürite içerikleri de son derece yüksek düzeydedir.

-4,75+2 mm fraksiyonu ile yapılan manyetik ayırma testleri incelendiğinde, düşük hızlarda ağırlık kazanımının çok yükseldiği ve nihai atık miktarının son derece düştüğü görülmektedir (Çizelge 4 ve Şekil 6). Fakat dördüncü rulo hızında alınan ürünün Fe içeriği %54,62 olarak ölçülmüştür. Buna rağmen impürite içerikleri hedef değerlerin altına düşmektedir. Ürün özellikleri hedef değerlere uyum sağladığı anda verim değeri %94 seviyelerinde olabilmektedir (Şekil 6). Daha kaliteli ürün hedeflenmesi durumunda ise verim kaybı olmaktadır.

Çizelge 3. -30 mm tane boyu fraksiyonlarının farklı rulo hızlarında kademeli olarak elde edilen manyetik ayırma ürünlerinin kimyasal içerikleri

| -30+10mm | | | | | | | | |
|------------|---------------|-------|------|--------------------------------|------------------|------|-------------------|------------------|
| | Ağırlık, % | Fe | CaO | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | SiO ₂ |
| M1* | 22,50 | 61,54 | 0,33 | 0,88 | 0,13 | 0,33 | 0,00 | 3,02 |
| M2 | 12,30 | 62,82 | 0,54 | 0,89 | 0,13 | 0,32 | 0,00 | 3,21 |
| M3 | 7,70 | 60,57 | 0,85 | 0,82 | 0,14 | 0,32 | 0,00 | 4,05 |
| M4 | 15,80 | 60,63 | 0,56 | 0,99 | 0,18 | 0,34 | 0,00 | 4,41 |
| M5 | 8,60 | 60,10 | 0,59 | 1,20 | 0,27 | 0,35 | 0,00 | 4,74 |
| Nihai Atık | 32,99 | 38,39 | 1,49 | 4,88 | 1,66 | 0,60 | 0,05 | 25,20 |
| -10+4,75mm | | | | | | | | |
| | Ağırlık, % | Fe | CaO | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | SiO ₂ |
| M1 | 34,01 | 60,44 | 0,36 | 1,06 | 0,18 | 0,33 | 0,00 | 4,22 |
| M2 | 20,03 | 58,73 | 0,59 | 1,32 | 0,26 | 0,37 | 0,01 | 6,47 |
| M3 | 15,22 | 53,90 | 0,76 | 1,74 | 0,39 | 0,40 | 0,00 | 8,55 |
| M4 | 18,88 | 48,83 | 0,96 | 2,71 | 0,76 | 0,49 | 0,02 | 14,65 |
| Nihai Atık | 11,86 | 28,15 | 1,66 | 7,90 | 2,93 | 0,91 | 0,08 | 33,30 |
| -4,75+2mm | | | | | | | | |
| | Ağırlık, % | Fe | CaO | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | SiO ₂ |
| M1 | 14,12 | 60,52 | 0,51 | 1,47 | 0,30 | 0,40 | 0,01 | 5,48 |
| M2 | 31,62 | 58,99 | 0,55 | 1,64 | 0,32 | 0,39 | 0,02 | 6,54 |
| M3 | 33,30 | 52,91 | 0,86 | 2,46 | 0,58 | 0,48 | 0,02 | 11,10 |
| M4 | 15,31 | 43,87 | 1,24 | 3,96 | 1,09 | 0,62 | 0,04 | 18,75 |
| Nihai Atık | 5,64 | 26,42 | 2,44 | 7,42 | 2,63 | 0,79 | 0,09 | 34,40 |

*M:Manyetik Ürün

Daha yüksek verim değerlerine ulaşılabilmesi amacıyla cevherin tümü 10mm'nin altına kırılarak hem doğrudan -10 mm'ye hem de -10 mm içinden -2 mm ayrıldıktan sonra kalan -10+2 mm'ye farklı hızlarda manyetik ayırma işlemi uygulanmış (Çizelge 4) ve sonuçları Şekil 7 ve Şekil 8'de değerlendirilmiştir. Cevherin tümünün 10mm'nin altına kırılması ile toplam atık miktarı %6,6 düzeyine indirilmiş ve ağırlık kazanımında %94 seviyesine ulaşmıştır. Burada uzaklaştırılan atık oldukça yüksek silis ve alkali içeriğine sahip bir malzemedir. Cevherin ağırlıkça yaklaşık %94'ü ürün olarak alındığında demir içeriği %2 gibi bir artış göstermekte ve safsızlık içerikleri red sınırlarının altına çekilebilmektedir. Ayrıca işletme sırasında rulo hızı artırılarak bir miktar cevher kaybi ile daha kaliteli ürün üretmek ve

sürekli emniyetli sınırlarda kalmak mümkün olabilmektedir (Şekil 7).

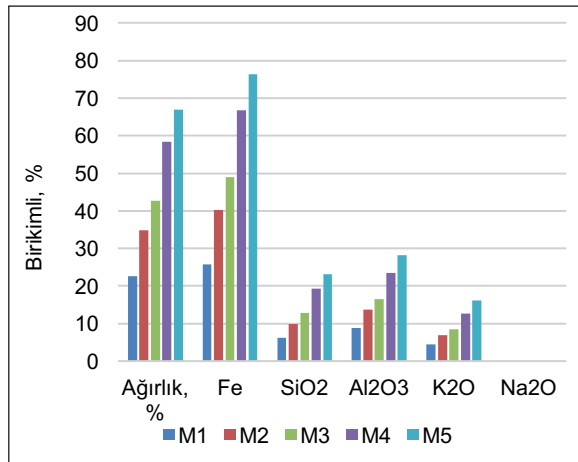
-30+10 mm, -10+4,75 mm ve -4,75+2 mm tane boyu fraksiyonları ile -10mm ve -10+2mm'lik beslemelerle elde edilen ürünlerin birleştirilmiş ağırlıkları her bir aşama ve içerik için (Fe, SiO₂, Al₂O₃ ve toplam alkali) birikimli olarak sırasıyla Şekil 9, 10, 11 ve 12'de verilmektedir. Düşük hızlara inildiğinde ağırlık kazanımı yükselmiş ve uzaklaştırılan safsızlık miktarları önemli ölçüde düşmüştür. Örneğin -4,75+2mm tane boyu ile yapılan testlerde en düşük hızda alınan ürünün Fe içeriğinin %54,62 olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan SiO₂ içeriği, Al₂O₃ ve toplam alkali içerikleri sırasıyla %10, %2,5 ve %0,55 seviyeleriyle, hedef değerlerin kritik sınırlarına yükselmektedir.

Çizelge 4. -10 mm ve -10+2 mm besleme numunelerinin farklı rulo hızlarında kademeli olarak elde edilen manyetik ayırma ürünlerinin kimyasal içerikleri

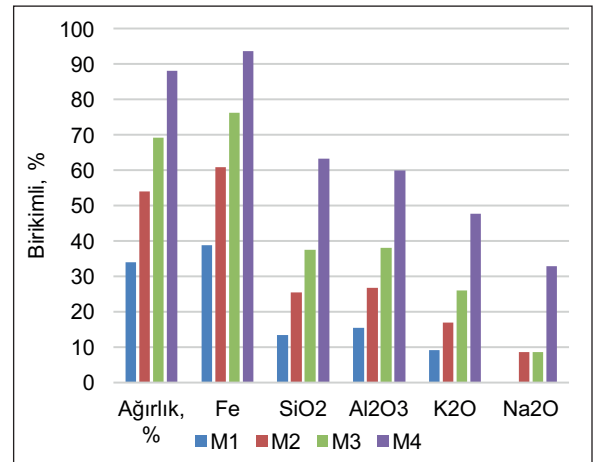
| -10 mm | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|------|--------------------------------|------------------|------|-------------------|------------------|
| | Ağırlık, % | Fe | CaO | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | SiO ₂ |
| M1* | 19,52 | 60,4 | 0,48 | 1,48 | 0,281 | 0,4 | 0,009 | 5,51 |
| M2 | 15,04 | 57,86 | 0,63 | 1,79 | 0,372 | 0,42 | 0,014 | 7,19 |
| M3 | 10,27 | 54,69 | 0,65 | 1,82 | 0,397 | 0,41 | 0 | 7,76 |
| M4 | 17,66 | 54,23 | 0,75 | 1,99 | 0,468 | 0,44 | 0,012 | 9,78 |
| M5 | 15,4 | 52,89 | 0,85 | 1,98 | 0,494 | 0,42 | 0,012 | 10,35 |
| M6 | 15,52 | 47,86 | 1,03 | 2,89 | 0,821 | 0,47 | 0,037 | 16,6 |
| Nihai Atık | 6,59 | 29,52 | 2,04 | 7,83 | 2,96 | 0,74 | 0,082 | 33,6 |

| -10+2 mm | | | | | | | | |
|------------|------------|-------|------|--------------------------------|------------------|------|-------------------|------------------|
| | Ağırlık, % | Fe | CaO | Al ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | Na ₂ O | SiO ₂ |
| M1 | 11,33 | 61,68 | 0,33 | 0,97 | 0,149 | 0,34 | 0 | 3,44 |
| M2 | 8,52 | 62,23 | 0,41 | 1,12 | 0,196 | 0,35 | 0 | 3,82 |
| M3 | 12,4 | 58,37 | 0,52 | 1,22 | 0,22 | 0,34 | 0 | 5,03 |
| M4 | 17,58 | 58,33 | 0,52 | 1,46 | 0,294 | 0,38 | 0,007 | 6,1 |
| M5 | 23,08 | 55,76 | 0,7 | 1,54 | 0,345 | 0,39 | 0 | 7,93 |
| Nihai Atık | 27,1 | 42,83 | 1,46 | 4,49 | 1,5 | 0,59 | 0,047 | 21,7 |

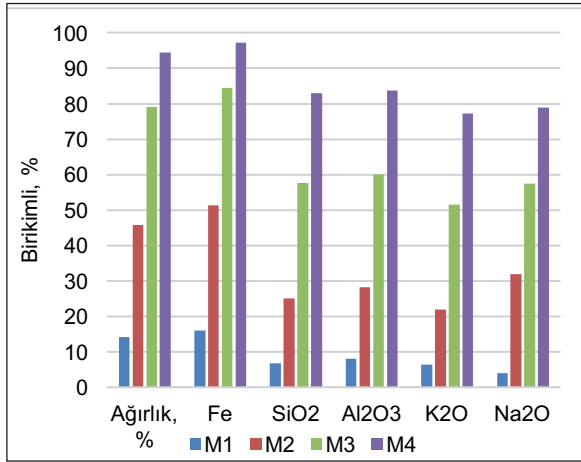
*M:Manyetik Ürün



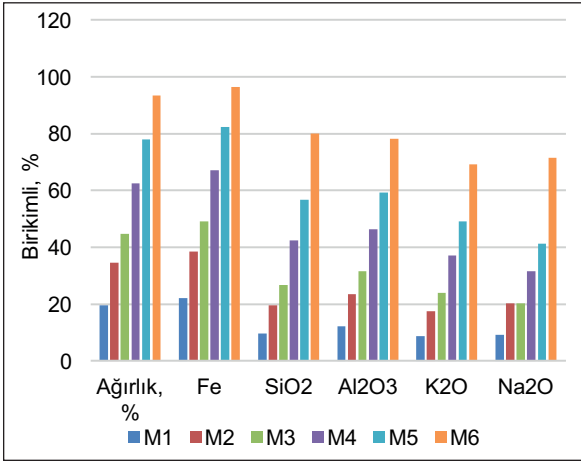
Şekil 4. -30+10 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



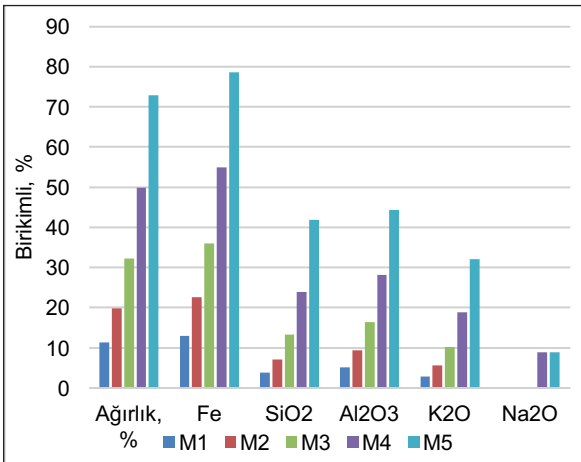
Şekil 5. -10+4,75 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



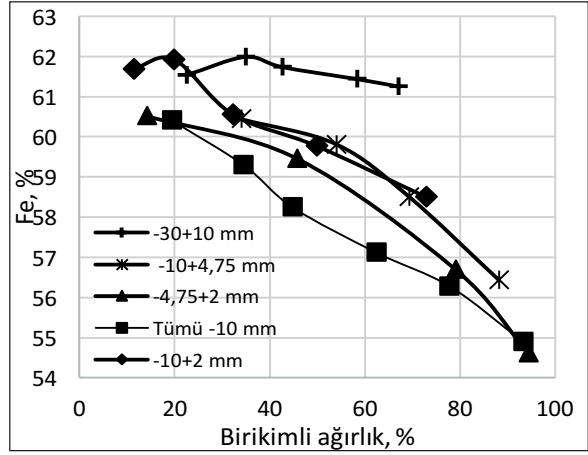
Şekil 6. -4,75+2 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



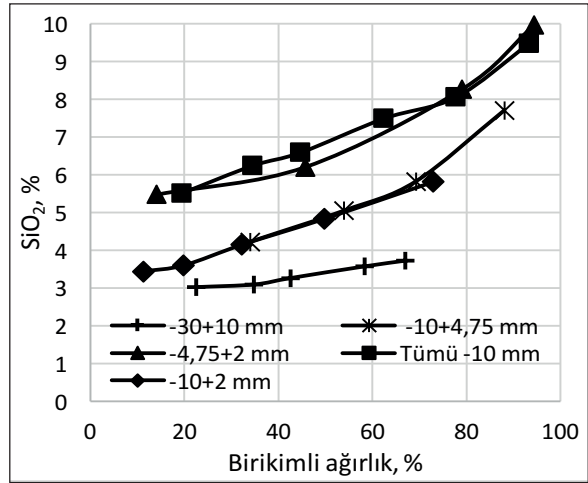
Şekil 7. -10 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



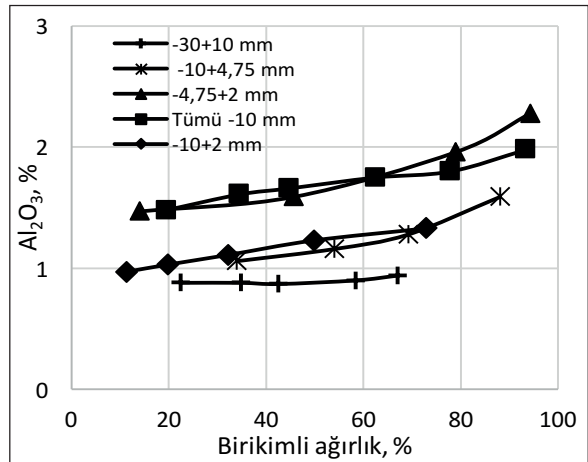
Şekil 8. -10+2 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



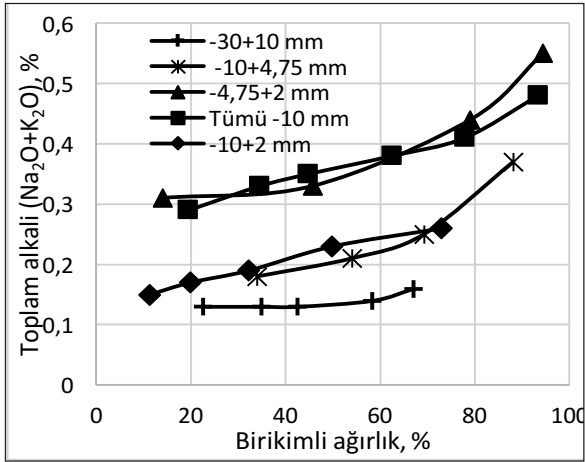
Şekil 9. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % Fe içeriklerinin değişimi



Şekil 10. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % SiO₂ içeriklerinin değişimi



Şekil 11. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % Al₂O₃ içeriklerinin değişimi



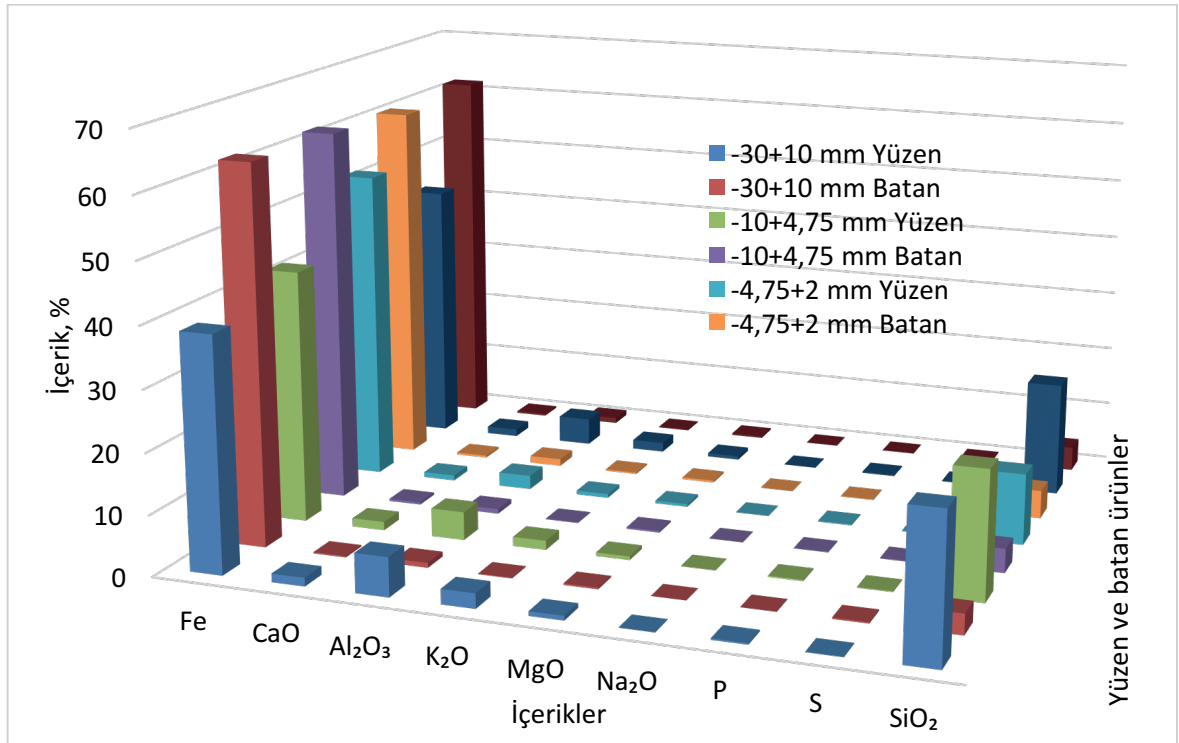
Şekil 12. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % toplam alkali içeriklerinin değişimi

2.2. Ağır Sıvı Testleri

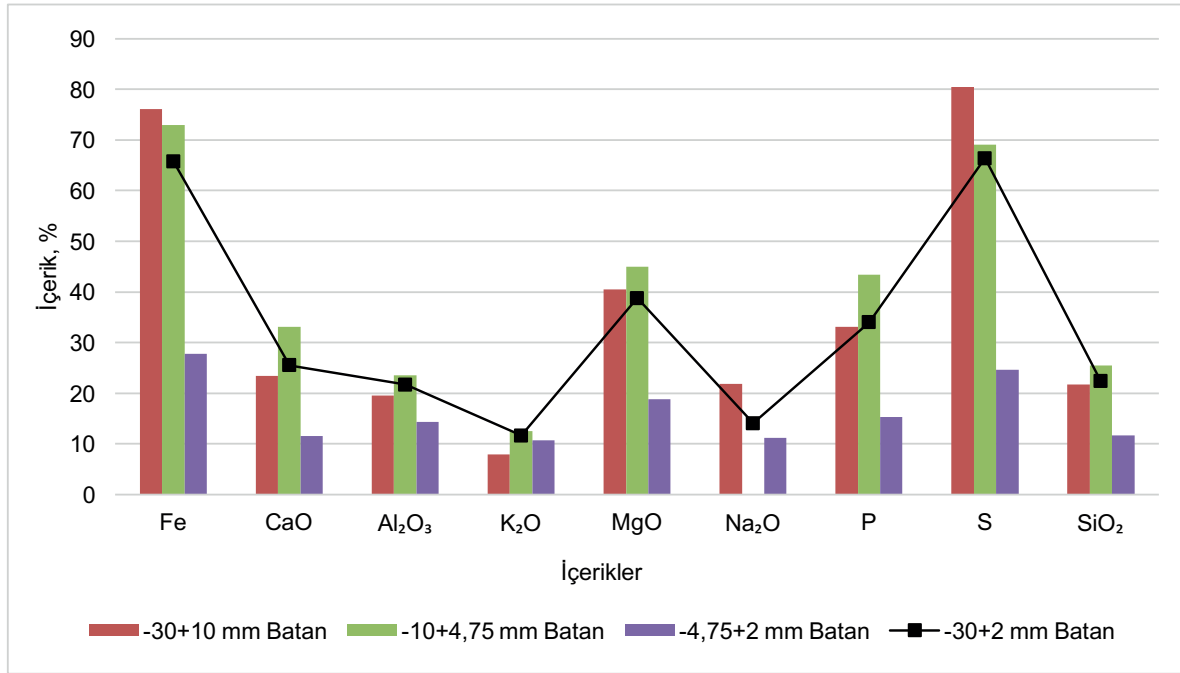
Cevherden kuru olarak elenerek ayrılan -30+10mm, -10+4,75 mm, -4,75+2 mm fraksiyonlarına ve ayrıca -30+2 mm fraksiyonuna 2,96 g/cm³ yoğunluğa sahip ağır sıvı kullanılarak yüzdürme batırma testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuç-

lar Şekil 13'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; hem iri hem de ince tane boyutlarında son derece yüksek demir içeriğine sahip, alkali içeriği ise hedef değerleri sorunsuzca sağlayacak düzeyde ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Fakat bu ayrımlarda önemli miktarda ağırlık kaybı olmakta ve bu durumda da demir kaybının önemi ortaya çıkmaktadır. Şekil 14'de ise ağır sıvı testlerinde elde edilen demir ve diğer bileşenler için verim değerleri verilmektedir. Genel olarak; bu şekilde bir ayırım sonucunda ürün kalitesini bozan silikat ve alkaliler çok yüksek oranda ayrılırken beslemedeki demirin %25-35'i kaybedilmektedir.

Demir cevheri safsızlıklarının uzaklaştırılması açısından ağır sıvı testleri önemli bulgular ortaya koymaktadır. Cevherin endüstriyel olarak yaş zenginleştirilmesinin planlandığı durumda üretilen ürün kalitesinde herhangi bir sorun olmayacaktır. Fakat bu durum ağır ortam ayırımında oluşacak atık miktarından dolayı ikinci planda kalmaktadır. Laboratuvar ağır sıvı test sonuçları kullanılarak ilgili cevherin -30 mm beslemesinin ağır ortam ayırıcısında ayrılma ürünleri simulas-



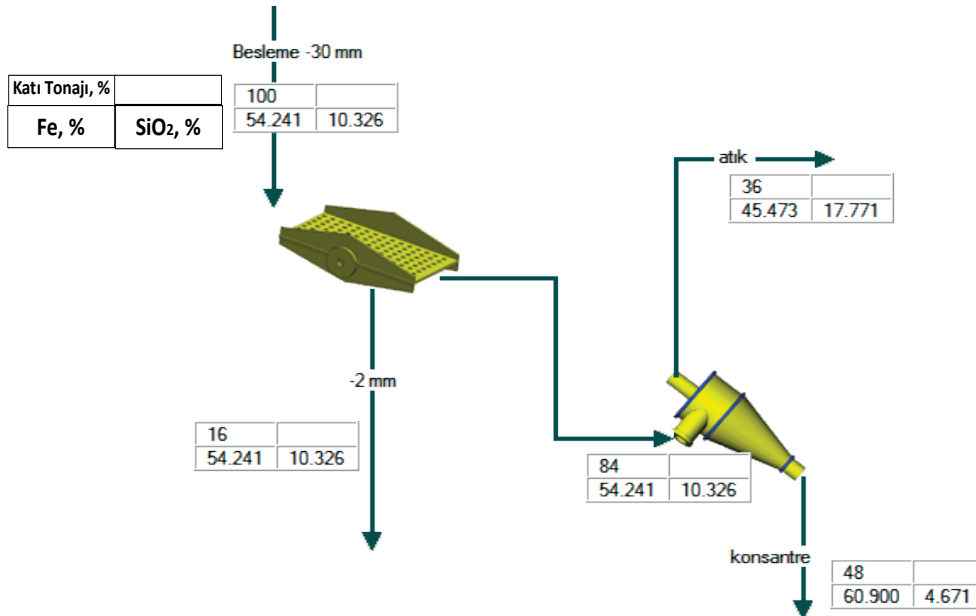
Şekil 13. Farklı tane boyutlarında 2,96 g/cm³ yoğunluğundaki ağır sıvı testlerinde elde edilen demir ve diğer bileşen miktarlarının yüzen ve batan ürünlerdeki dağılımı



Şekil 14. Ağır sıvı testlerinde elde edilen demir ve diğer bileşenler için farklı tane boyutlarının 2,96 g/cm³ yoğunlukta batan ürünlerinin verim değerlerinin dağılımı ve -30+2 mm fraksiyonu ile karşılaştırılması

yonla belirlenmiştir. Bir ağır ortam devresindeki ayırım performansı da göz önünde bulundurularak ağır sıvı test sonuçlarından hareketle kurulması muhtemel bir ağır ortam zenginleştirme devresi ve bu devreden elde edilecek ürünler Şekil 15'de verilmektedir. Simülasyonda endüstriyel ayırıcıların muhtemel performans bozuklukları da hesap-

lamalara katılmıştır. Ayrımlarda özellikle demir ve ağırlık verimlerinin yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Ürün kalitesi de safsızlıklar açısından sorunsuz olduğu görülmektedir. Fakat kayıplar açısından değerlendirildiğinde, kademeli olarak yapılan kuru manyetik ayırma daha tercih edilebilir görülmektedir.



Şekil 15. Ağır ortam zenginleştirme devresi ve bu devreden elde edilecek ürünler

3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında, Demir Export A.Ş.'ye ait demir cevheri numunesinin zenginleştirilmesine yönelik gerçekleştirilen kademeli kuru manyetik ayırma ve ağır sıvı testleri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde görülmektedir ki ürün özellikleri hedef değerlere uyum sağladığı anda verim değeri %94 seviyelerinde olabilmektedir. Daha kaliteli ürün hedeflenmesi durumunda ise verim kaybı oluşmaktadır. Cevherin 30 mm'nin altına kırılması ve kırılmış cevherden elenerek ayrılan -30+10 mm ile -10 mm fraksiyonlarının düşük hızda 6000 gauss alan şiddetine sahip kuru manyetik ayırıcıda ayrılması sonucu elde edilecek ürünlerin ve oluşacak toplam atığın genel özellikleri Çizelge 5'de verilmektedir. Burada atılan %18,17 oranındaki atığın %13,11'i -30+10 mm fraksiyonunun işlenmesinden %5,06'sı da -10mm'nin işlenmesinden kaynaklanmaktadır. -10mm ürünün oluşturulmasında 10 mm'nin altındaki fraksiyonlara yapılan manyetik ayırma sonuçları ve -2 mm fraksiyonunun analiz değerleri birlikte değerlendirilmiştir.

Çizelge 5. Manyetik ayırma uygulaması sonucu öngörülen genel ürün özellikleri

| % | -10mm ürün | -30+10 mm ürün | Nihai Atık | Besleme |
|--------------------------------|------------|----------------|------------|---------|
| Ağırlık | 55,21 | 26,63 | 18,17 | 100 |
| Fe | 55,39 | 61,26 | 34,72 | 53,2 |
| CaO | 0,7 | 0,52 | 1,58 | 0,81 |
| Al ₂ O ₃ | 1,99 | 0,94 | 5,63 | 2,37 |
| K ₂ O | 0,46 | 0,16 | 1,84 | 0,63 |
| MgO | 0,43 | 0,33 | 0,69 | 0,45 |
| Na ₂ O | 0,01 | 0 | 0,07 | 0,02 |
| P | 0,14 | 0,1 | 0,2 | 0,14 |
| S | 0,1 | 0,07 | 0,19 | 0,11 |
| SiO ₂ | 9,01 | 3,72 | 28,09 | 11,07 |
| Verim % Fe | 57,48 | 30,66 | 11,86 | 100 |

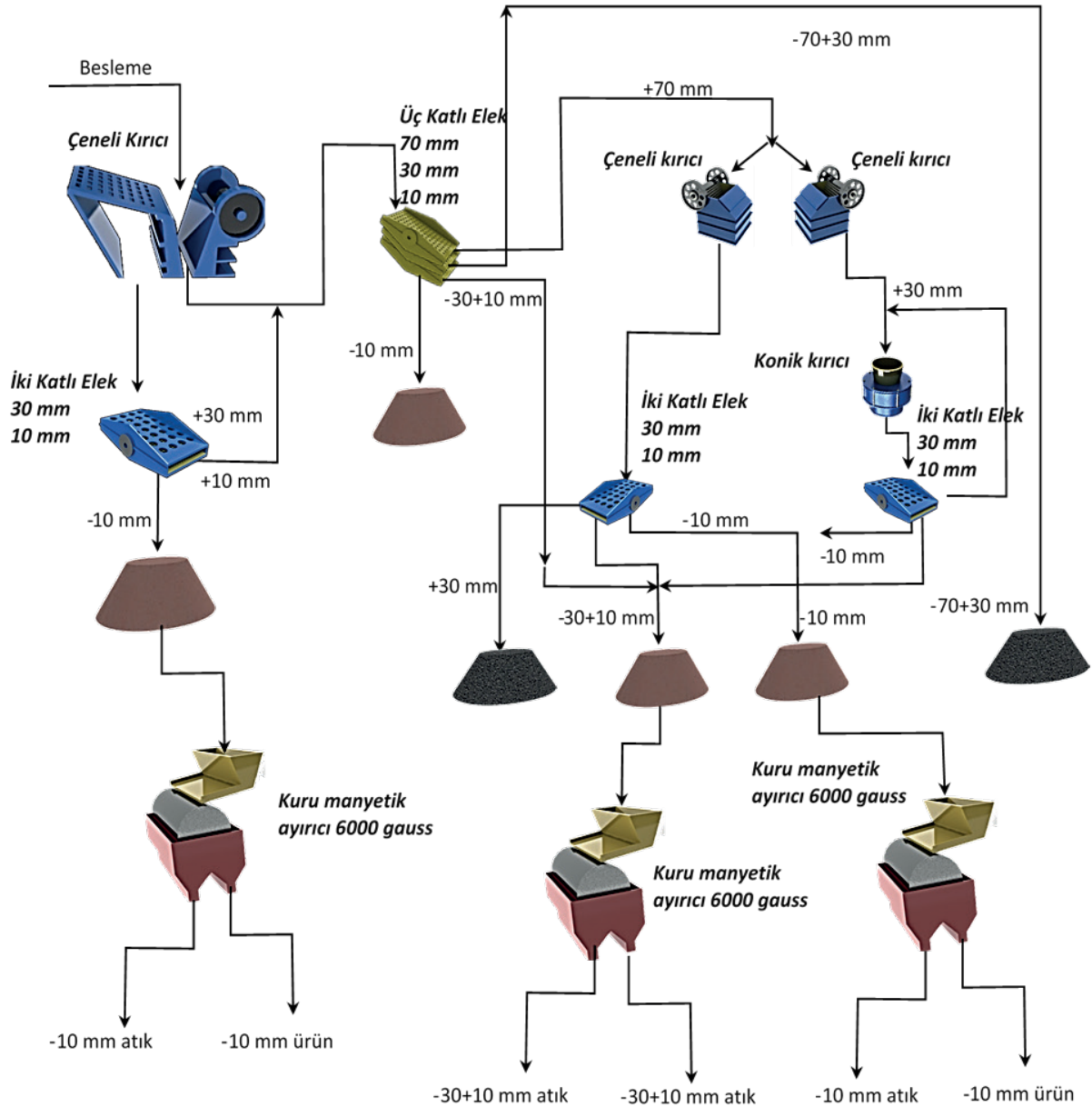
Cevher standart olarak 30mm'nin altına kırıldıktan sonra kalibre ve toz cevher olarak ayrılacak ürünlerin manyetik ayırıcıda temizlenmesi sonucu ağırlıkça yaklaşık olarak %80 oranında temiz cevher üretilebilmektedir. Kalibre ve toz cevher ağırlık oranları endüstriyel uygulamada kırıcı ürünle-

rinin miktarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu temizleme işlemi sırasında toplam demir kazanımı %90 düzeyinde olmaktadır. Ürünlerin hedef değerlerini sağladığı görülmektedir. Bu sebeple üretim sırasında ürün kalitesinde oluşabilecek muhtemel sorunların; rulo hızı değiştirilerek giderilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tümü -10 mm'ye kırılmış cevher içinden -2mm ayrılmış ve elde edilen -10+2 mm fraksiyonuna kademeli manyetik ayırma uygulanmıştır. Böylece daha yüksek kaliteli ve yüksek verimle ürün üretilebilirliği incelenmiştir. Tümü -10mm'ye kırılmış cevher içinden -2 mm'nin ayrılması ile daha temiz içerikli bir ürün üretmenin mümkün olmayacağı sonucuna varılmıştır. Yüksek rulo hızlarında daha yüksek demir tenörüne ve düşük safsızlık içeriklerine ulaşılmasına rağmen verimde önemli bir artış olmamıştır. Ayrıca -2mm önden ayrıldığı için bu aşamada önemli bir kayıp oluşmaktadır. Bu nedenle cevher içinden -2 mm'nin ayrılması önemli bir kazanç sağlamamaktadır.

3.1. Cevhere Özgü Tesis Tasarımı

Değişen tane boyutlarında kademeli gerçekleştirilen manyetik ayırma testleri sonuçları, elde edilen farklı koşullardaki ürün kaliteleri, safsızlıkların uzaklaştırılması ve nihai ürünün kalite standartları göz önünde bulundurularak mevcut cevher için Şekil 16'da verilen örnek akım şeması tasarlanmıştır. Akım şemasında kırma devresini takiben ilgili cevherde manyetik ayırma uygulamalarının yerleştirileceği noktalar verilmiştir. Burada belirtilen -70+30 mm ve üst boyutu tam bilinmeyen (kırıcı seçimi ve ayarlarına bağlı olarak) +30 mm ürünler için manyetik ayırma uygulaması önerilmemektedir. Devrede bu ürünler sorun yarattığı durumda bunların miktarını değiştirmeye yönelik kırıcı ve elek ayarları değiştirilebilir. Şekil 16'da verilen akım şemasında ürün miktarları kırma devresine bağlı olacağından burada herhangi bir akış miktarı verilmemiştir. Fakat her bir noktaya yerleştirilecek manyetik ayırıcının kendi içindeki ayırım verimleri ve ürün özellikleri kullanılarak bu noktadaki ürün özellikleri belirlenebilir. Çalışmalarda kullanılan demir cevheri, uygun kırma devresi tasarımını takiben -30 mm'yi kırılarak Çizelge 5'de belirtilen nihai ürün ve atık kalitelerine ulaşılması mümkün olacaktır.



Şekil 16. Demir cevherinin zenginleştirilmesinde kullanılabilir örnek akım şeması

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmalarda kullanılan cevher genel yapısı itibarı ile hematit mineralinden oluşmakla birlikte, manyetikleşme nedeniyle bir miktar manyetik alınganlık da göstermektedir. Bu nedenle düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılara herhangi bir tepki vermezken yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılarda ayrılmaları mümkün olmuştur. Özellikle silikat, alümina ve alkali içeriği yüksek taneler manyetik ayırıcılarda ayrılabilen, buna bağlı olarak da nihai ürünün SiO_2 , Al_2O_3 ve

toplam alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) içeriği azalmaktadır. Bu nedenle; cevher için -30+10 mm ve -10mm fraksiyonlarına yüksek alan şiddetli (yüzeyde 6000 gauss) kuru manyetik ayırma uygulanması ürün kalitesini yükseltecek ve impürite içeriklerinin sorun yaratmasına engel olacaktır. Daha iri tane boyutlarında manyetik ayırıcı uygulaması, cevherin manyetik alınganlığının düşük olması ve bu boyda serbestleşme sorunları nedeniyle oluşacak ürün kayıpları dikkate alındığında gereksiz görülmektedir.

Tesiste uygulanacak manyetik ayırma işleminde;

- -30+10 mm fraksiyonunda ağırlıkça %68, -10 mm fraksiyonu için ağırlıkça %92 oranında ürün alınmaktadır.

- Manyetik ayırıcıya beslenen tane boyutu incelendiğinde ürün miktarları da artmaktadır. Bu durumda daha iri tane boyutlarının manyetik ayırmaya tabi tutulması oldukça önemli miktarda üretim kaybına neden olabilir.

Testlerde kullanılan cevher hem demir içeriği hem de safsızlık içerikleri açısından satılabilir ürün özelliklerine yakın değerler içermektedir. Manyetik ayırma ile nihai ürün demir içeriğinde önemli artışlar sağlanırken safsızlık içerikleri red sınırlarının altına çekilebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında özellikle ürün kalitesini garanti altına almak açısından devrede -30+10 mm ve -10 mm ürünlerin alındığı nihai noktalara 6000 gauss değerinde yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı yerleştirilmesi önemli bir çözüm olarak görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Demir Export A.Ş.'ye veri kullanımı ve yayılması konusundaki desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Chen, L., Liao, G., Qian, Z., Chen, J., 2012. Vibrating High Gradient Magnetic Separation for Purification of Iron Impurities Under Dry Condition. *International Journal of Mineral Processing*, 102–103, 136-140.

Ezhov, A.M., Shvaljov, Y.B., 2015. Dry Magnetic Separation of Iron Ore of the Bakchar Deposit. *Procedia Chemistry*, 15, 160-166.

Kuskov, V.B., Nikitin, M.V., 2002. Enrichment

and Processing of Minerals. St. Petersburg: St. Peterburg's Mining Institute.

Napier-Munn, T.J., 1991. Modelling and Simulating Dense Medium Separation Processes — A progress report *Minerals Engineering*, 4 (3–4), 329-346.

Rachappa, S., Prakash Amit, Y., 2015. Iron Ore Recovery from Low Grade by Using Advance Methods. *Procedia Earth and Planetary Science*. 11, 195-197.

Seifelnassr, A.A.S, Moslim, E.M., Abouzeid, A.Z.M., 2013. Concentration of a Sudanese Low-grade Iron Ore. *International Journal of Mineral Processing*, 122, 59-62.

Srivastava, U., Kawatra, S.K., 2009. Strategies for Processing Low-grade Iron Ore Minerals. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 30 (4), 361-371.

Tripathy, S.K., Singh, V., Murthy, Y.R., Banerjee, P.K., Suresh, N., 2017. Influence of Process Parameters of Dry High Intensity Magnetic Separators on Separation of Hematite. *International Journal of Mineral Processing*, 160, 16-31.

Tripathy, S.K., Banerjee, P.K., Suresh, N., 2014. Separation Analysis of Dry High Intensity Induced Roll Magnetic Separator for Concentration of Hematite Fines. *Powder Technology*, 264, 527-535.

Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2005. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th Edition, ISBN: 9780080479477, p. 456.

Zeng, S., Zeng, W., Ren, L., An, D., Li, H., 2015. Development of a High Gradient Permanent Magnetic Separator (HGPMs). *Minerals Engineering*, 71, 21-26.

