

Bu makale aşağıda atfı bilgisi verilen makalenin Türkçe çevirisidir.

Atfı bilgisi: Özcan, Ö. 2022. Separation efficiency of different methods in treatment of a low-grade iron ore. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 168, 77-92. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.992412>



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>

MADEN TETKİK VE ARAMA
D E R G İ S İ



KİMLİKLER

Düşük tenörlü bir demir cevherinin işlenmesi için farklı yöntemlerin ayırım verimi

Separation efficiency of different methods in treatment of a low-grade iron ore

Özgür ÖZCAN^{a*}

^aHacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Ayırım Verimi, Tenör,
Verim, Manyetik
Ayırma, Yer Çekimi ile
Zenginleştirme.

ÖZ

Bu çalışmada, farklı zenginleştirme yöntemlerine ait ayırım verimi (AV) değerlerinin değerlendirilmesi amacıyla demir cevheri numunesi üzerinde karakterizasyon ve zenginleştirme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tercih edilen zenginleştirme yöntemi fark etmeksizin, besleme malzemesi boyut fraksiyonundaki küçülmenin AV'yi artırdığını göstermiştir. Serbestleşme analizlerinde, daha ince boyutlu fraksiyonların daha yüksek serbestleşmeye bağlı olarak AV'yi artırdığı sonucu görülmüştür. Hesaplanan AV değerleri, operasyonel parametrelerin tüm yöntemlerde elde edilen AV değerleri üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermiş, farklı boyut fraksiyonlarında tanelere etki eden net kuvvetin AV değerlerinde önemli bir rol oynadığı saptanmıştır. Farklı boyut fraksiyonlarındaki ortalama AV değerleri, yer çekimi ile zenginleştirme ve manyetik ayırma yöntemlerinde 1 mm üzerinde benzerlik gösterirken, 1 mm altındaki boyut fraksiyonlarında manyetik ayırma yönteminin yer çekimi ile zenginleştirme yöntemine kıyasla oldukça yüksek AV değerleri verdiği gözlenmiştir. Düşük tenörlü cevherler için bir akım şeması oluşturulmuş, en uygun tenör ve verim değerlerine erişmek ve en uygun yöntem sayesinde maliyeti de düşürmek için önem arz etmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmadaki AV hesaplamaları, farklı zenginleştirme yöntemlerindeki verimliliğin karşılaştırılması hususunda temel bir yöntem olarak kullanılabilir. AV yöntemi, hızlı ve deneysel sonuçları kullanması nedeniyle avantajlıdır.

Geliş Tarihi: 05.03.2021

Kabul Tarihi: 07.09.2021

Keywords:

Separation Efficiency
Grade, Recovery,
Magnetic Separation,
Gravity Concentration.

ABSTRACT

In the present study, characterization and beneficiation tests were performed on an iron ore sample for the evaluation of separation efficiency (SE) of different methods. Results showed that the decrease in feed size fraction increases the SE irrespective of the beneficiation method. It was determined from the liberation analyses that the increase in SE values at finer size fractions is related with higher liberation. Calculated SE values revealed that operational parameters significantly affect the SE of all methods and the net forces acting on particles play an important role on SE of different size fractions. Mean SE of different size fractions showed that the separation efficiencies of gravity concentration and magnetic separation takes similar values above 1 mm, however, SE of magnetic separation is significantly higher than gravity concentration below 1 mm for the studied sample. For low grade ores, it is very crucial to develop a flow sheet to achieve the optimum grade and recovery while decreasing the cost likely by using optimum method. Therefore, SE calculations used in this research can be used as a basic method to compare the efficiency of different beneficiation methods. SE method has advantages as they provide fast evaluation of efficiency by using experimental results for the efficiency evaluation by using experimental results.

*Başvurulacak yazar: Özgür ÖZCAN, ozgurozcan@hacettepe.edu.tr

1. Giriş

Amacı, değerli mineralleri farklı özellikleri kullanarak yan taş minerallerinden ayırmak olan Cevher Hazırlama Mühendisliğinde, zenginleştirme yöntemleri her zaman önemli bir hedef olmuştur. Zenginleştirme yöntemleri, farklı miktar ve kalitede ürünler üretir (Drzymala, 2007). Bir konsantrenin veya atığın kalitesi tenör terimi ile ifade edilir. Tenör, nihai konsantre içerisindeki değerli malzeme olarak tanımlanabilir. Verim ise, zenginleştirilmiş cevherdeki toplam mineral veya metalin ağırlıkça oranını temsil eder (Irannajad vd., 2018).

Tenör ve verim, zenginleştirme çalışmalarında en sık kullanılan performans değerlendirme parametreleridir (Wills ve Napier-Munn, 2006). Araştırmacılar tarafından bugüne kadar birçok parametre tercih edilmiş ve bu parametrelerin bazıları literatürdeki yerini almıştır. (Drzymala, 2006, 2007, 2008). Irannajad, farklı indeksleri karşılaştırmış ve ayırma süreci değerlendirmeleri alanında yeni bir yaklaşım öne sürmüştür. Araştırmacılar, ayırım verimi (AV), operasyonel verim (OV) ve seçicilik indeksi (SI) parametrelerinin mineral zenginleştirme yöntemlerinde kullanılan optimum parametreler olduğunu belirtmiştir (Irannajad vd., 2018). Ek olarak, Mukherjee, besleme özelliklerinden bağımsız olarak, yer çekimi ile zenginleştirme yönteminde AV ölçümü üzerine alternatif bir yöntem önermiştir (Mukherjee, 2009).

Demir zenginleştirme işleminde verimlilik ölçümü, tanelerin özgül ağırlıklarının daha yüksek olmasından dolayı ağır sıvı testlerinin mümkün olmaması nedeniyle oldukça zordur (Mukherjee, 2009). Fakat, düşük maliyetli akım şemalarının tasarlanması, sinter/pelet kalitesinde konsantrelerin üretilmesi aşamasında büyük önem teşkil eder (Özcan vd., 2021). Manyetik duyarlılık ve yer çekimi açısından yan taş ve demir mineralleri belirli farklılıklara sahiptir. Bu yüzden, yer çekimi ile zenginleştirme ve manyetik ayırma işlemleri, demir cevherleri için etkin olarak uygulanabilir yöntemlerdendir. Fakat yan taş ve değerli minerallerin daha ince boyutlu dağılımları ve yetersiz serbestleşme dereceleri, iri fraksiyonlarda etkin zenginleştirmeyi engelleyen etmenlerdendir (Makhija vd., 2013).

Demir cevheri zenginleştirmelerinde farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler, yer çekimi ile zenginleştirme ve santrifüj ile zenginleştirme,

flotasyon, düşük ve yüksek alan şiddetli manyetik ayırma olarak sıralanabilir. Manyetik ayırma, bu yöntemler arasında en etkin olanıdır. Flotasyon daha yüksek seçiciliğe sahip olmasına karşın manyetik ayırma, flotasyona göre daha düşük işletme maliyetine sahiptir. Yer çekimi ile zenginleştirme ise maliyet açısından uygun olmasına karşın, manyetik ayırmaya göre daha küçük ölçekli çalışma imkânı sunar (Xiong vd., 2015). Düşük tenörlü demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde yer çekimi ile zenginleştirme ve manyetik ayırma yöntemlerinin etkinliğine dair bazı önemli veriler yayınlanmıştır (Seifelnassr vd., 2012; Suthers vd., 2014; Amiri, 2019).

Bir mineral zenginleştirme işleminde veya herhangi bir türden iki bileşenin fiziksel olarak birbirinden ayrıldığı herhangi bir başka işlemde elde edilen herhangi bir ayırımın teknik mükemmelliği, ayırım verimi (SE) ile ifade edilebilir (Denklem 1).

$$SE = W(Cm(c - f))/f(Cm - f) \quad (1)$$

Bu eşitlikte, W beslemenin konsantreye giden yüzdesini, m değerli mineralin maksimum tenörünü (Fe_3O_4 'de 72,36% oranında Fe), f beslemedeki metal oranını, c ise konsantredeki metal oranını temsil etmektedir (Schulz, 1979; Barari vd., 1979). Ayırım verimi hesaplamaları üzerine Mukherjee farklı yöntemleri incelemiş, 25 farklı eşitliği ele almış ve yeni bir yöntem ileri sürmüştür. Ek olarak, bahsedilen 25 farklı eşitliğin birkaç küçük değişimle, kömür temizleme ve yer çekimi ile zenginleştirme tesislerinde kullanılabilirliğini ifade etmiştir (Mukherjee, 2009).

AV hesaplama, farklı operasyonel parametrelerin tanımlanmasında kullanışlı bir yöntemdir. Bu, tesislerde uygulanan farklı zenginleştirme yöntemlerinin performans karşılaştırmaları için de kullanılabilir. (Shivakumar vd., 2017). AV değerleri 0 ve 100 arasında değişkenlik göstermekte olup, AV indeksi, zenginleştirme yöntemlerinin teknik değerlendirmelerinde sıkça kullanılmaktadır (Irannajad vd., 2018).

Wills ve Finch (2016) ilgili düşüncelerini farklı operasyonel koşul performanslarının karşılaştırılmasında, ayırım verimi kullanışlı olsa da ekonomik faktörleri içermediği için, bazen teknik ayırma verimi olarak adlandırılabilir. Fark

edileceği üzere, yüksek ayırım değerleri her zaman en ekonomik sonuçları vermez. Yine de ekonomik değerlendirmelerden önce kullanılabilirliği olan alternatiflerin ölçümünde yaygınca kullanılmaktadır şeklinde ifade etmiştir. Sousa (2020) ise grafiklerdeki tenör/verim eğrilerinin serbestleşme verimi (Vs) ve teknik verim (Vt) arasında ayırım yapılmasına izin vermediğini belirtmiştir. Düşük verimliliğin, yetersiz serbestleşmeden mi yoksa operasyonel koşullardan mı kaynaklandığını anlamak zordur. Bu sebeple, detaylı malzeme karakterizasyonu işlemi bu durumu açıklamada yardımcı olabilir.

Günümüzde, düşük tenörlü demir cevherlerinin işletilmesi ekonomi ve çevre koruma alanında büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, en uygun yöntem ve koşulların kullanılarak demir üretimi önem kazanmıştır. Bu çalışmada, sıradan düşük tenörlü bir demir cevherine uygulanan laboratuvar ölçekli zenginleştirme çalışmaları neticesinde, en uygun zenginleştirme koşulları incelenmiştir. Bu amaçla, testlerden elde edilen ürünlerin kimyasal analizleri yapılmış ve farklı zenginleştirme yöntemlerinin ayırım verimi değerleri hesaplanmıştır. Literatürde hâlihazırda demir cevheri zenginleştirme üzerine önemli çalışmalar mevcuttur, ancak farklı yöntemlerin AV değerlerini karşılaştıran ve değerlendiren çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bu nedenle, çalışmanın amacı düşük alan şiddetli kuru ve yaş manyetik ayırma, jig yöntemi ve sallantılı masa ile düşük tenörlü demir cevherindeki ayırım verimini etkileyen farklı operasyonel parametrelerin temel esaslarını inceleyerek süreç için en uygun yöntem ve operasyonel parametreleri tespit etmektir. Bu çalışmada, düşük tenörlü demir cevheri zenginleştirme potansiyellerinin değerlendirilmesinde, tenör/verim eğrileri ve ayırım verimine vurgu yapılmaktadır.

2. Malzeme ve Yöntem

Temsili karot numuneleri potansiyel cevher alanı olan, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki Kuluncak'tan elde edilmiştir. Malatya'ya bağlı Kuluncak ve Hekimhan'ı çevreleyen bölgeler yeraltı demir kaynakları ve sahip olduğu krom rezervleri açısından oldukça önemlidir. Numuneler, detaylı karakterizasyon ve laboratuvar ölçekli testlere tabi tutulmuştur. Karot numuneleri 30 mm'nin altına kırılarak kimyasal analiz, mineralojik

analiz, serbestleşme analizi ile ağır sıvı testleri ve zenginleştirme çalışmalarında kullanılmak üzere küçük temsili parçalara ayrılmıştır.

Malzeme karakterizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, farklı boyutlardaki cevhere yer çekim ile zenginleştirme ve manyetik ayırma testleri uygulanmıştır. Tüm yöntemler için tenör/verim eğrileri çizilmiş ve karşılaştırılmıştır. Malzeme özellikleri ve operasyonel parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir.

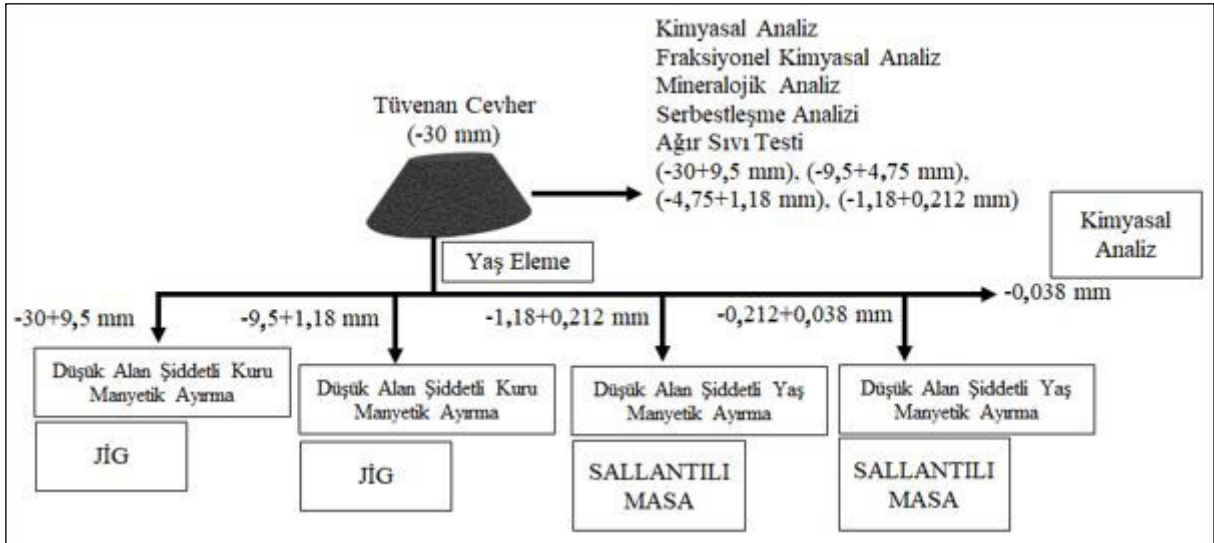
Bu hedefle, jig ile zenginleştirme, akan sıvı filmi ile zenginleştirme (sallantılı masa), düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırma (DLIMS) ve düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma (WLIMS) testleri yapılmıştır. Ekipmanların performansını etkileme ihtimali olan, manyetik ayırmada manyetik alan şiddeti, sallantı masada masa eğim açısı, jig ile zenginleştirmede su hızı gibi operasyonel değişkenler ayırım verimi hesaplamada kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara ait basitleştirilmiş akım şeması Şekil 1'de verilmiştir.

3. Malzeme Karakterizasyonu

Malzeme karakterizasyonu, düşük tenörlü cevherlerin mineralojik, farklı kimyasal ve serbestleşme özellikleri hakkında bilgi veren ve uygun yöntemin seçilmesinde belirleyici rol oynayan, oldukça önemli bir adımdır. Uygun yöntemin seçilmesi, demir mineralleri ve yan taşların fiziksel ve dokusal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, tüvenan cevher numunesi ve belirli boyut fraksiyonları, özgül ağırlıkların belirlenmesi, XRD, Satmagan analizi, kimyasal analizler ve serbestleşme analizleri gibi çeşitli karakterizasyon testlerine tabi tutulmuştur. Belirlenen boyut fraksiyonları hem iri hem de ince boyut fraksiyonlarında zenginleştirme testleri için uygun olacak şekilde seçilmiştir.

3.1. Kalitatif Mineralojik Analiz ve Cevher Mikroskopisi

Demir cevherindeki mineral fazları XRD yöntemiyle belirlenmiştir. Difraktogramlar, Rigaku D/Max 2200 Powder X-Işını Difraktometresi ile krom anotunu kullanılarak elde edilmiştir. Söz konusu cihaz, yatay açölçere sahip olduğu için tipik teta-2 teta taramaları yapabilmektedir. Sonuçlara göre, numune,

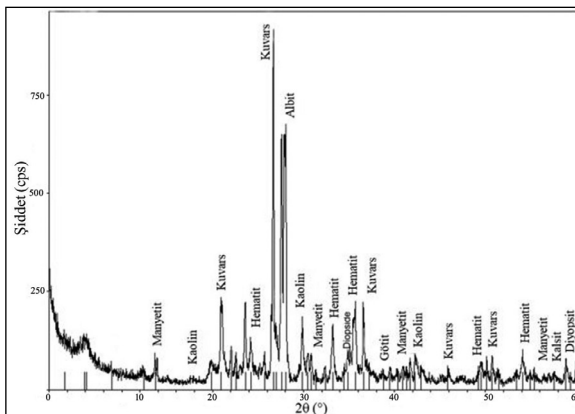


Şekil 1- Deneyel çalışmaların basitleştirilmiş akış şeması.

manyetit (Fe_3O_4) ve ek olarak hematit (Fe_2O_3) ile götit $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ içermektedir. Silikatlar, karbonatlar ve kil mineralleri de ana yan taş fazlarında yer almaktadır. Numunenin XRD deseni Şekil 2’de verilmiştir.

3.2. Fraksiyonel Kimyasal Analiz

XRF yardımı ile belirli boyut fraksiyonları, majör element bileşenleri açısından analiz edilmiştir (Çizelge 1). Çizelge 1’den elde edilen sonuçlara göre, düşük tenörlü demir cevherinin % 31,78 oranında toplam demir, % 17,52 oranında ana safsızlık olarak silis, % 14,26 CaO, % 4,37 MgO ve % 16,59’luk kızdırma kaybı ile % 0,56 Al_2O_3 içerdiği belirlenmiştir. Fraksiyonel analiz sonuçları, tane boyu incelidikçe, demir içeriğinin 38 μm ’ye kadar arttığını



Şekil 2- Tüvenan cevherin X-ışını kırılım deseni.

ancak bu boyun altında önemli oranda azaldığını göstermiştir. Beslemenin -212+38 μm fraksiyonu en yüksek toplam demir tenörü ve en düşük silis tenörüne sahiptir. Fraksiyondaki toplam demirin % 96’sı ve silisin % 97’si 0,212 mm’den daha iri fraksiyondadır. Çizelge 1’e göre, -38 μm fraksiyonu % 3,08 ile en yüksek alümina tenörüne sahiptir. Yüksek alümina ve düşük demir içeriği (% 6,57) bu boyut fraksiyonda kil varlığını işaret edebilir. XRD deseni de, cevherde kaolinit olduğunu göstermektedir.

3.3. Manyetik İçeriğin Tespiti

Manyetit mineralden gelen demir miktarının tespiti için Satmagan analizleri, Rapiscan Systems Satmagan 135 (Doğunluk Manyetizasyonu Analizörü) cihazı ile yapılmıştır. Satmagan, demir konsantrelerindeki manyetit miktarını ölçmek için özel olarak tasarlanmıştır. Satmagan 135’in çalışma mantığı manyetik alandaki gradyan üzerine etki eden kuvvetin hesaplaması prensibine dayanmaktadır. Manyetik alan, numunenin manyetik içeriğini doyuracak kadar güçlüdür. Bu durum için, numunedeki tüm manyetit, mıknatısla ayrılma durumuna bakılmaksızın ölçülür. Tahmin edildiği gibi, önceki çalışmalar Satmagan ölçümlerinin, tane boyutundan etkilenmediğini göstermiştir (Amikiya, 2014). Bu nedenle, temsili numuneler -53 μm boyutuna kadar öğütülmüş ve analizleri yapılmıştır. Çizelge 2’de boyut fraksiyonlarının manyetit içeriği verilmiştir.

Çizelge 1- Demir cevheri numunesine ait fraksiyonel kimyasal analiz sonuçları.

Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)				
		Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
-30+9,5	48,47	30,54	18,73	15,14	4,37	0,51
-9,5+4,75	24,57	31,32	17,27	14,51	4,37	0,50
-4,75+1,18	12,54	34,55	16,06	13,26	4,55	0,53
-1,18+0,212	10,57	35,87	15,66	11,50	4,01	0,68
-0,212+0,038	2,82	38,66	9,50	9,96	3,62	0,75
-0,038	1,03	6,57	25,43	19,18	8,15	3,08
Tüvenan	100,00	31,78	17,52	14,26	4,37	0,56
Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)				
		Fe	SiO ₂	CaO	Fe	Al ₂ O ₃
-30+9,5	48,47	46,58	51,82	51,46	48,43	43,90
-9,5+4,75	24,57	24,21	24,21	25,00	24,55	21,88
-4,75+1,18	12,54	13,63	11,49	11,66	13,06	11,92
-1,18+0,212	10,57	11,93	9,45	8,52	9,70	12,86
-0,212+0,038	2,82	3,43	1,53	1,97	2,33	3,76
-0,038	1,03	0,21	1,50	1,39	1,92	5,66
Tüvenan	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Çizelge 2- Boyut fraksiyonlarının manyetit içeriği.

Boyut (mm)	Ağırlık (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	Analiz sonucu Fe (%)	Satmagan sonucu Fe (%)	Manyetitteki Fe / Toplam Fe (%)
-30+9,5	48,47	41,15	30,54	29,78	0,975
-9,5+4,75	24,57	42,42	31,32	30,70	0,980
-4,75+1,18	12,54	47,07	34,55	34,06	0,986
-1,18+0,212	10,57	49,14	35,87	35,56	0,991
-0,212+0,038	2,82	52,35	38,66	37,88	0,980
-0,038	1,03	8,87	6,57	6,42	0,977
Tüvenan	100,00	43,03	31,78	31,14	0,980

Çizelge 2’de görülebileceği üzere, numunede demir içeren ana mineral (%98) manyettittir. Bunun dışında cevher, az miktarda hematit (Fe₂O₃) ve götit Fe³⁺O(OH) içermektedir. Hematit ve Götit cevherdeki toplam demirin sadece %2’sini oluşturmaktadır. Bu sonuçlar, cevherin düşük alan şiddetli manyetik ayırmadaki davranımın belirlenmesinde faydalıdır.

3.4. Serbestleşme Analizi

Serbestleşme analizi Nikon SMZ 1500 Stereo Mikroskop ve Clemex Vision PE 3.5.025 görüntü

analiz yazılımı ile yapılmıştır (Şekil 3). Boyut fraksiyonları, yansıyan ışık modunda mikroskop altında incelenmiştir.

Manyetit tanelerinin serbestleşme derecesi, tane sayma tekniği ile belirlenmiştir. Her bir boyut fraksiyonu için yaklaşık 600 adet sayılmıştır. Takiben görüntülerde yer alan serbest ve bağlı manyetit taneleri sayılarak her boyut fraksiyonu için serbestleşme derecesi hesaplanmıştır. Boyut fraksiyonlarının serbestleşme dereceleri Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 3- Stereo mikroskop ve imaj analiz yazılımı..

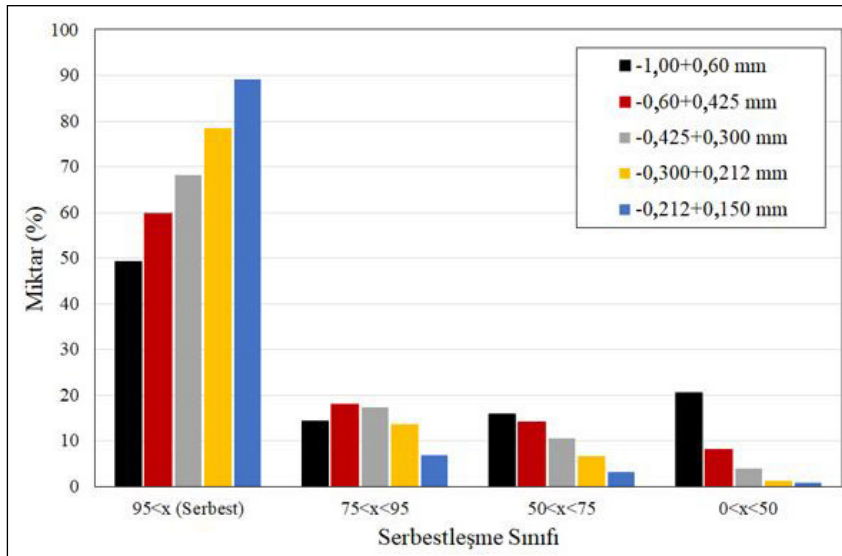
Sonuçlara göre, tane boyundaki inceleme ile orantılı olarak serbestleşme derecesinin de arttığı görülmüştür. 0,212 mm altındaki manyetit tanelerinin serbestleşmesi oldukça kabul edilebilir seviyededir. -0,212+0,150 mm boyutları arasında serbest tanelerin oranı %49,18'den %89,05'e yükselmektedir. 50>x>0% aralığında serbestleşen manyetit (bu sınıf

manyetit için taneler yaklaşık olarak tamamen bağlı olarak kabul edilebilir) 0,212+0,150 mm aralığında sadece % 0,86 olarak tespit edilmiştir. Bu olgu 212 μm 'den daha ince bir öğütme boyunun manyetit ve yan taş ayrımı için yeterli olduğunu göstermektedir.

3.6. Ağır Sıvı Analizi

Ağır sıvı analizi, cevherlerin serbestleşme karakteristiklerinin tespitinde oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Bu çalışmada cevherin boyut fraksiyonları ağır sıvı analizine tabii tutulmuştur. Teorik olarak, bu işlem sonucunda serbestleşen silis ve karbonatlar yüzen üründe toparlanırken, demir mineralleri ile bağlı taneler, (ara ürünler) yeterli ağırlığa sahip olduklarında, batan üründe birikirler. Ağır sıvı analizinde, 2,70 g/cm³ ve 2,90 g/cm³ yoğunluklarında ağır sıvılar oluşturmak için bir tetrabromoetan (TBE) ve aseton karışımı kullanılmıştır. Ardından, her fraksiyon 2,90 g/cm³ yoğunluğundaki sıvıya batırılmıştır. Sonra, yüzen ürün bu sıvıdan çıkarılmış, süzölmüş ve 2,70 g/cm³ yoğunluktaki sıvıya batırılmıştır. Tüm ürünler son olarak süzölmüş, yıkanmış, kurulanmış, tartılmış ve analiz edilmiştir. Ağır sıvı analizi sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3'ten anlaşıldığı üzere, ince fraksiyonlarda batan ürün miktarları artış göstermektedir. Batan ürünlerin toplam demir içeriği, yüzenlere göre daha yüksek olup, %51-55 arasındadır.



Şekil 4- Manyetit mineralinin serbestleşme sınıfları.

Çizelge 3- Ağır sıvı analiz sonuçları.

Boyut Fraksiyonu (mm) / Ürün	(%)	Tenör (%)				
	Ağırlık	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
-30+9,5 / 2,7 Batan	30,09	9,95	24,44	18,93	5,75	0,53
-30+9,5 / 2,9 Batan	22,98	15,01	15,39	16,63	4,77	0,53
-30+9,5 / 2,9 Yüzen	46,93	51,35	16,71	11,98	3,28	0,48
-30+9,5	100,00	30,54	18,73	15,14	4,37	0,51
-9,5+4,75 / 2,7 Batan	31,05	9,10	25,69	18,92	6,24	0,47
-9,5+4,75 / 2,9 Batan	19,59	15,06	19,92	17,74	4,44	0,66
-9,5+4,75 / 2,9 Yüzen	49,36	51,74	10,91	10,45	3,16	0,45
-9,5+4,75	100,00	31,32	17,27	14,51	4,37	0,50
-4,75+1,18 / 2,7 Batan	24,76	6,71	30,75	22,99	7,42	0,69
-4,75+1,18 / 2,9 Batan	19,26	14,14	25,84	15,48	5,14	0,69
-4,75+1,18 / 2,9 Yüzen	55,98	53,89	6,19	8,19	3,08	0,41
-4,75+1,18	100,00	34,55	16,06	13,26	4,55	0,53
Boyut Fraksiyonu (mm) / Ürün	(%)	Dağılım (%)				
	Ağırlık	Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
-30+9,5 / 2,7 Batan	30,09	9,81	39,26	37,62	39,64	31,58
-30+9,5 / 2,9 Batan	22,98	11,29	18,88	25,24	25,10	24,01
-30+9,5 / 2,9 Yüzen	46,93	78,90	41,86	37,13	35,25	44,41
-30+9,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-9,5+4,75 / 2,7 Batan	31,05	9,02	46,20	40,50	44,37	29,55
-9,5+4,75 / 2,9 Batan	19,59	9,42	22,60	23,95	19,92	25,92
-9,5+4,75 / 2,9 Batan	49,36	81,56	31,19	35,55	35,72	44,53
-9,5+4,75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-4,75+1,18 / 2,7 Batan	24,76	4,81	47,42	42,93	40,38	31,94
-4,75+1,18 / 2,9 Batan	19,26	7,88	31,00	22,49	21,75	24,96
-4,75+1,18 / 2,9 Yüzen	55,98	87,31	21,58	34,58	37,87	43,10
-4,75+1,18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tane boyutundaki küçülme batan üründeki toplam demir içeriğini artırmakla beraber silis içeriğini de azaltmaktadır. Yüzen ürünlerin silis tenörü, tüm boyut fraksiyonları için yüksektir. Silis için en yüksek tenör -30+9,5 mm boyut fraksiyonunda görülmüştür. Ağır sıvı testlerinden alınan sonuçlar, silis ve demir serbestleşmesinin yetersiz olduğunu göstermiştir. Mikroskop altında yapılan gözlem sonucu, bu veri teyit edilmiştir. Ağır sıvı testleri aynı zamanda +4,75 mm serbestleşme derecesinin oldukça yetersiz olduğuna da işaret etmektedir. Bu sonuçlar batan ürünlerde bağlı bazı yan taş tanelerinin varlığını göstermektedir.

4. Zenginleştirme Çalışmaları

Manyetik ayırma ve yer çekimi ile zenginleştirme süreçlerinin değerlendirilmesi için detaylı bir test

prosedürü tasarlanmış ve kullanılmıştır. Testler sırasında ürünlerden temsili numuneler alınmış ve kimyasal analizlerle her bir testin performansı ölçülmüştür. Besleme boyutu ve diğer bazı önemli operasyonel parametrelerin ayırım verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Her test için tenör/verim eğrileri oluşturulmuş ve değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalara dair sonuçlar aşağıda irdelenmektedir.

4.1. Manyetik Ayırma Çalışmaları

Detaylı karakterizasyon çalışmalarından elde edilen veriler ışığında bilindiği üzere beslemedeki ana mineral manyetittir. Bu sebeple, manyetik alan şiddeti ve besleme boyut dağılımının AV üzerindeki etkilerinin incelenmesi için düşük alan şiddetli manyetik ayırma testleri yapılmıştır (Çizelge 4). Tek

Çizelge 4- Düşük alan şiddetli manyetik ayırma test koşulları.

Test No.	Besleme Boyutu (mm)	Test Türü	Manyetik Alan Şiddeti (Gauss)
1	-30+9,5	Kuru	1000
2	-30+9,5	Kuru	1200
3	-30+9,5	Kuru	1400
4	-30+9,5	Kuru	1600
5	-9,5+1,18	Kuru	1000
6	-9,5+1,18	Kuru	1200
7	-9,5+1,18	Kuru	1400
8	-9,5+1,18	Kuru	1600
9	-1,18+0,212	Yaş	1000
10	-1,18+0,212	Yaş	1200
11	-1,18+0,212	Yaş	1400
12	-1,18+0,212	Yaş	1600
13	-0,212+0,038	Yaş	1000
14	-0,212+0,038	Yaş	1200
15	-0,212+0,038	Yaş	1400
16	-0,212+0,038	Yaş	1600

aşamalı düşük alan şiddetli manyetik ayırma testi farklı boyut fraksiyonlarına uygulanmıştır. Şekil 1’de test çalışmalarının basitleştirilmiş akım şeması verilmiştir. Manyetik ayırma testleri, kesikli şekilde yapılmıştır. Tambur tipi manyetik separatörün yüzeyinde, tekli-tane katmanı üretmesi için, besleme oranı manuel olarak yaklaşık 0,25 kg/dk’ya ayarlanmıştır. Operasyonel manyetik alan şiddeti, silindir yüzeyinde bir Gauss metre kullanılarak ölçülmüştür.

4.2. Yer Çekimi ile Zenginleştirme Çalıştırmaları

4.2.1. Jig ile Zenginleştirme

Su hızının AV üzerine etkisini değerlendirmek için -30+9,5 ve -9,5+1,18 mm boyut fraksiyonları kullanılarak jig testleri yapılmıştır. Çalışmalarda 10,5x10,5 cm boyutlarında laboratuvar ölçekli Denver mineral jig kullanılmıştır. Her test için sabit 5 dakikalık pulsasyon (60 sn. besleme, 240 sn. pulsasyon) uygulanmıştır. Yüzen ve batan ürünler toplanmış ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Literatüre göre, ince tane boylarında jig yöntemlerinin verimliliğini kaybettiği bilinmektedir (Dobbins vd., 2009). Bu yüzden, zenginleştirme işlemi öncesi demir cevherinin -1,18 mm fraksiyonu elenerek sistemden uzaklaştırılmış ve bu fraksiyona düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırma ile sallantılı masa

testleri uygulanmıştır. Jig test koşulları Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5- Jig testi koşulları.

Test No.	Besleme Boyutu (mm)	Su Hızı (cm/sn.)
17	-30+9,5	5
18	-30+9,5	10
19	-30+9,5	15
20	-30+9,5	20
21	-30+9,5	25
22	-9,5+1,18	3
23	-9,5+1,18	6
24	-9,5+1,18	9
25	-9,5+1,18	12
26	-9,5+1,18	15

4.2.2. Sallantılı Masa Testleri

Besleme boyut dağılımı ile masa eğiminin AV üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi için -1,18+0,212 mm ve -0,212+0,038 mm fraksiyonlarına sallantılı masa testleri yapılmıştır. Test sırasında 500x1200 mm boyutlu bir masa tercih edilmiş ve test boyunca yıkama suyu oranı (10 l/dk), besleme katı oranı (%25 katı) sabit tutulmuştur. Her bir test için konsantre, ara ürün ve atık numuneleri, özel tasarlanmış

numune alıcı yardımı ile alınmıştır. Sallantılı masa test koşulları Çizelge 6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6- Sallantılı masa test koşulları.

Test No.	Besleme Boyutu (mm)	Masa Eğim Açısı (derece)
27	-1,18+0,212	2
28	-1,18+0,212	4
29	-1,18+0,212	6
30	-1,18+0,212	8
31	-0,212+0,038	2
32	-0,212+0,038	4
33	-0,212+0,038	6
34	-0,212+0,038	8

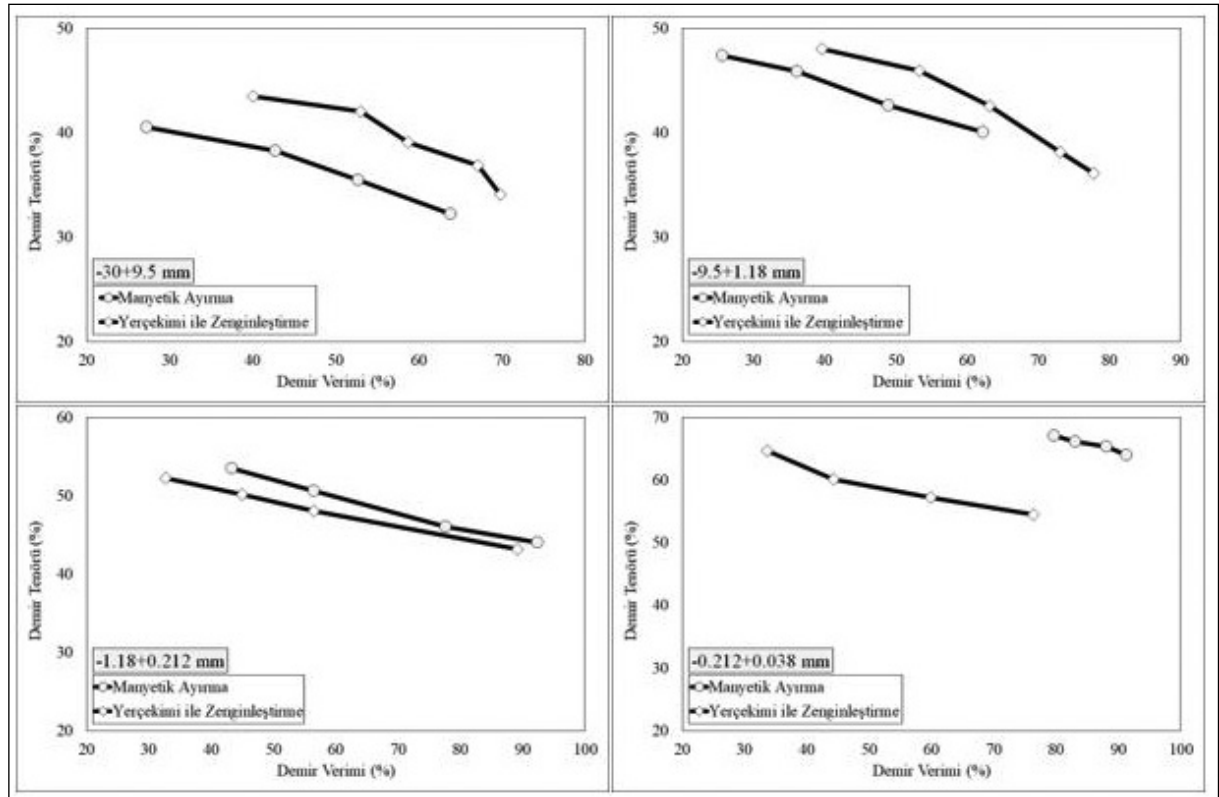
5. Tartışma

Zenginleştirme yöntemlerinin tenör/verim eğrileri farklı besleme boyut fraksiyonları için karşılaştırılmıştır. (Şekil 5).

Şekil 5'te görüldüğü üzere, 1 mm'den daha iri tanelerde yer çekimi ile zenginleştirme yönteminin

toplam demir veriminin, manyetik ayırmaya göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşın, 1 mm'den daha ince boyutlarda yer çekimi ile zenginleştirme yönteminin toplam demir veriminin, manyetik ayırmadan daha düşük olduğu görülmektedir. -30+9,5 mm boyut fraksiyonunda tenör/verim değerleri en düşüktür. Verim ve tenör, zenginleştirme yönteminden bağımsız bir şekilde besleme boyunun incelenmesi ile artmaktadır. 1 mm'den iri tanelerde verim değerlerinin düşmesindeki sebep, ağır sıvı analiz sonuçlarında detaylı olarak değinildiği üzere manyetit mineralinin yetersiz serbestleşmesidir.

Jig yönteminin süreç dinamikleri açısından bakıldığında, iri boyut fraksiyonlarının zenginleştirilmesinin, inceleme göre daha kolay olduğu bilinmektedir (Mukherjee vd., 2006). Ancak, günümüzdeki manyetik ayırma ekipmanlarında verimli zenginleştirme sadece manyetik kuvvetin, yer çekimi kuvvetlerini aştığı durumlarda mümkündür (Lin vd., 1997). Serbestleşmeden bağımsız olarak, tane boyunun irileşmesi sonucu yer çekimi kuvveti artıp manyetik alan kuvvetini geçer hale gelebilir.



Şekil 5- Farklı besleme boyut fraksiyonlarında zenginleştirme yöntemlerinin tenör/verim eğrileri.

Bu durum, manyetik ayırmada iri tanelerin zenginleştirme oranının düşmesine yol açabilir. Şekil 1'e göre jig yöntemi, 1 mm üzerindeki boyutlarda ön zenginleştirme için faydalı olabilir. Sonuçlara göre, jig, daha iri taneleri işlemek için daha yüksek kabiliyete sahiptir.

Serbestleşme analizi sonuçlarına göre, 1 mm altında manyetit serbestleşme derecesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, yukarı ve sağa yönelmiş eğriler, sallantılı masa ve manyetik ayırıcıdaki performans iyileştirmesini göstermektedir. Yaş manyetik ayırma ve sallantılı masa -1,18+0,212 mm boyut fraksiyonları için benzer tenör/verim eğrileri vermektedir. Ancak, manyetik ayırma aynı verim değeri için daha yüksek tenörlü bir konsantre elde edilmesini sağlamaktadır. Satmagan analizleri sonuçları dahilinde, cevherde demir içeren ana mineralin manyetit olduğu bilinmektedir. Manyetit toplam demirin %98'ini içermektedir. İnce tanelerde serbestleşmedeki iyileşmeden dolayı manyetik alınganlık artmaktadır. Alanda yapılmış önceki çalışmalarda, manyetik kuvvetlerin orta boyut aralıklarında daha etkin olduğu görülmüştür. (Rayner ve Napier-Munn, 2000; Vijayendra, 2001; Arol ve Aydoğan, 2004; Mahmoud, 2010; Dworzanowski, 2012). Manyetik ayırmanın daha yüksek verim sağlaması, baskın manyetik kuvvetin orta boyut aralıklarındaki etkisi ile tanımlanabilir. Bununla birlikte hem yaş manyetik ayırma hem de sallantılı masadaki benzer tenör/verim eğrileri, her iki yöntemin de değişen verim değerleriyle ara boydaki taneleri işleme kabiliyetine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ek olarak, çalışma konusu olan numunelerde ne manyetik ayırma yöntemi ne de sallantılı masa, orta boyut aralıkları için yüksek tenörlü konsantre veya daha yüksek verim değeri sağlayamamıştır.

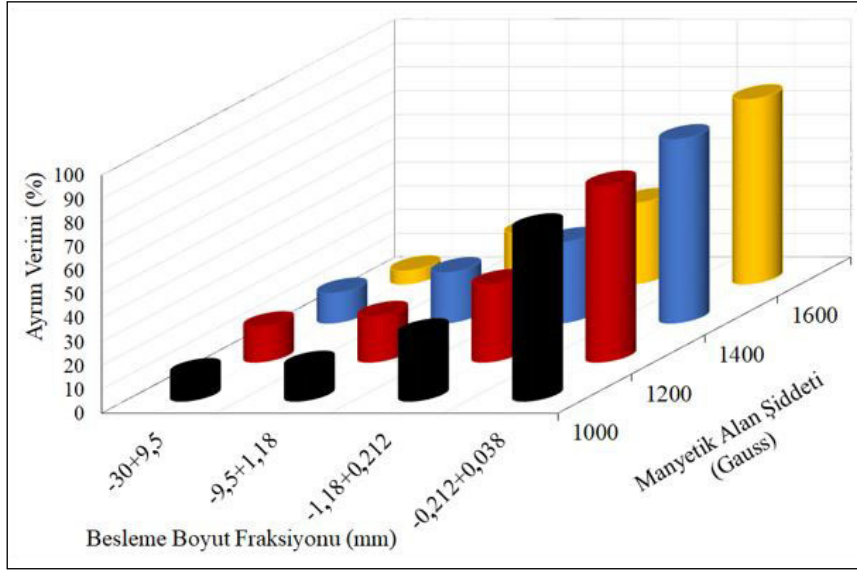
Manyetik ayırmanın tenör/verim değerleri, 0,212 mm'den ince boyut fraksiyonları için sallantılı masaya göre daha yüksektir. Bu fraksiyon tamamen serbest olarak tanımlanabilir (Şekil 4). Bu nedenle, tenör/verim eğrilerindeki farklar, manyetik ayırma ve yer çekimi ile zenginleştirme yöntemlerinin manyetiti daha iyi işleme özellikleri olarak görülebilir. Spiral ve sallantılı masa gibi geleneksel yer çekimi ile zenginleştirme ekipmanlarının performansının 75 µm altında oldukça düştüğü bilinmektedir (Hearn, 2002).

Bir sıvıdaki tanelerin hareketi, özgül ağırlık ve tane çapı ile ilgilidir. Çapı büyük olan taneler, küçük olanlara göre daha çok etkilenmektedir. Yer çekimi ile zenginleştirme yönteminde, iri boyutlardan alınacak verimin yüksek olması daha olasıdır. Sonuç olarak, tanelere uygulanan manyetik kuvvetin, çekim ve sürüklenme kuvvetinden daha yüksek olması ile 0,212+0,038 mm besleme boyutlarında daha yüksek verim sağlanmaktadır (Chatterjee, 1998).

Bu çalışmada; manyetik ayırma, jig ve sallantılı masa yöntemleri, operasyonel parametre ve besleme boyutunun etkilerinin ölçümü için, ayrı ayrı AV temelli performans hesaplamalarına tabii tutulmuştur. Her yöntemin AV değerleri besleme ve ürünlere demir analizi yapılarak bulunmuştur. Manyetik ayırma yönteminin AV değerleri, Şekil 6'da verilmiştir. Her besleme fraksiyonu için Denklem 1 kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

Şekil 6'da görüldüğü üzere manyetik ayırmada en düşük AV değeri, en iri boyutta elde edilmiştir. Ayırım verimi, tüm manyetik alan şiddetleri için artan tane inceliği ile kademeli olarak iyileşmektedir.

Bazı yazarlara göre, hidrodinamik kuvvetler, manyetik kuvvetler, yer çekimi kuvvetleri ve sürüklenme kuvvetleri, manyetik bir ayırıcıda tanelerin tam hareketini sağlayan ana kuvvetlerdir (Arol ve Aydoğan, 2004; Wills ve Napier-Munn, 2006). Yer çekimi ve sürüklenme kuvvetleri, manyetik taneleri çeken manyetik kuvvetlere karşı çalışır. Bu kuvvetlerin büyüklüğü tanelerin boyutundan önemli ölçüde etkilenir. Önceki çalışmalardan, hidrodinamik sürüklenme kuvvetinin tane çapı ile orantılı olduğu bilinmektedir. Manyetik ve yer çekimi kuvvetleri sırasıyla, tane çapının karesi ve küpü ile orantılıdır. Sonuç olarak, yer çekimi kuvvetleri iri taneler üzerinde, hidrodinamik sürüklenme kuvvetleri ince taneler (-38 µm) üzerinde, manyetik kuvvetler ise ara tane boyutları üzerinde daha etkilidir (Vijayendra, 2001). Çekim, tane kütlesi ile doğru orantılı olduğundan, daha büyük taneler, ince tanelere göre daha yüksek manyetik yoğunluk gerektirir. İnce tanelerin manyetik olarak ayrılmasında, manyetik kuvvetler hidrodinamik sürüklenme kuvvetlerini aşmalıdır (Arol ve Aydoğan, 2004). Ancak iri mineral taneleri için yer çekimi kuvvetlerinden daha yüksek manyetik kuvvetler gereklidir. Bu nedenle, tane boyu



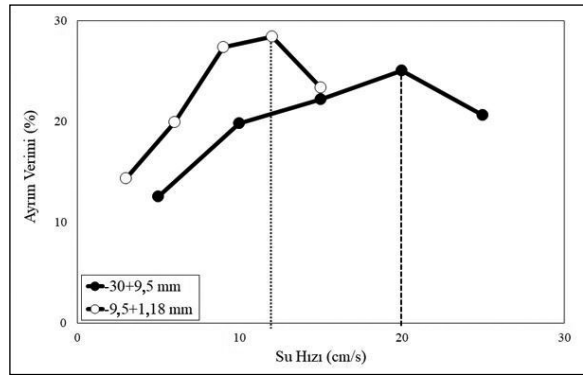
Şekil 6- Manyetik ayırma yönteminin ayırım verimi.

arttıkça, yer çekimi kuvveti daha da artar ve manyetik kuvvetten daha büyük olabilir.

Manyetik alan yoğunluğu arttıkça, manyetik mineraller, separatörler tarafından verimli bir şekilde yakalanır bu da manyetik tane sayısının artmasını ve AV değerinin marjinal olarak yükselmesini sağlar. -30+9,5 arası iri boyut fraksiyonları için ayırım verimi, tüm manyetik alanlarda benzer şekildedir. Yukarıda da ele alındığı gibi, yer çekimi kuvvetlerinin iri boyut fraksiyonlarına etkisi daha yüksektir. Ek olarak, iri boydaki serbestleşme yetersizliği, AV değerini negatif olarak etkileyebilir. Diğer boyut fraksiyonları için AV değeri artan alan şiddeti ile doğru orantılıdır. En yüksek ayırım verimi, en ince besleme boyutunda elde edilmiştir. Bu durumun temel sebebi olarak, boyut fraksiyonlarının serbestleşme dereceleri gösterilebilir. AV değerinin, manyetik alan yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artış gösterebilmesi için yeterli serbestleşmenin gerektiği de dikkate alınmalıdır.

Jig yöntemi AV değerleri Şekil 7’de gösterilmiştir.

Şekil 7’de görüldüğü üzere AV değeri besleme boyu ve su hızı ile ilişkilidir. Şekil 7’de 9,5+1,18 mm boyut fraksiyonunun daha yüksek AV değeri verdiği görülmektedir. Bu boyut fraksiyonunun daha yüksek AV değeri, daha yüksek serbestleşme derecesinin etkisini belirgin olarak gösterir. Her iki fraksiyonda



Şekil 7- Jig yöntemi AV değerleri.

da AV değerini arttırmak için su hızı artırılmalıdır. İri boyut fraksiyonunun AV'sini arttırmak için daha yüksek miktarda su gereklidir. -9,5+1,18 mm fraksiyonunda manyetik minerallerinin yan taştan ayrılabilmesi için gerekli olan optimum su hızı 12 cm/s.'dir. Bu hızın aşılması AV üzerinde negatif etki gösterirken,

20 cm/s.'lik su hızı -30+9,5 mm boyut fraksiyonu için kabul edilebilir en uygun ayırmayı sağlamaktadır.

Bazı araştırmacılar, jig yöntemini detaylı olarak incelemişlerdir. Yazarlar, bu çalışmalarda jig ile zenginleştirme yönteminin ayırım etkinliği hakkında iki önemli bulgu ortaya koymuştur (Mukherjee vd., 2005a, b; Mukherjee vd., 2006; Mukherjee ve Mishra, 2006; Mukherjee, 2009). Bu verilere göre AV değeri,

su hızı ile doğru orantılı artış gösterirken, maksimum su hızı değeri sonrası düşüşe geçmektedir. Ek olarak, iri boyutlu besleme malzemeleri, en uygun verimlilik için daha yüksek su hızı pik değerine ihtiyaç duyar (Mukherjee ve Mishra, 2006). Maksimum su hızı değeri, Mukherjee tarafından belirtildiği üzere, jig yöntemi en uygun AV değerinin tanımlanabilmesi için önemli bir parametredir. Araştırmacıya göre, jig yöntemi verimliliği doğrudan maksimum su hızı ile orantılıdır (Mukherjee vd., 2006). Şekil 7, maksimum su hızının bu çalışmadaki etkisini de açık bir şekilde göstermektedir.

Das vd. (2008)'a göre, ince boyutlarda AV verimi daha yüksek olmakla birlikte jig yönteminde 4-5 cm/s maksimum su hızı, -5+1 mm boyut fraksiyonlarında demir içeren taneleri yan taştan ayırmak sureti ile zenginleştirme sağlamak için yeterlidir. Bu değer üstündeki su hızı, AV değeri üzerinde kayda değer bir pozitif etkiye sebep olmamaktadır. Bu çalışmada önceki çalışmalarla benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlar neticesinde, üzerinde çalışılan düşük tenörlü demir cevheri için -9,5+1,18 mm boyutunda maksimum su hızı 12 cm/sn. olarak verilebilir. Tüm çalışmalar, maksimum su hızı teriminin, jig işleminde önemli ve geçerli bir terim olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, en uygun AV elde edilmesi amacıyla farklı demir cevherleri için maksimum su hızları belirlenmelidir. AV değerleri, besleme boyutuna göre değişkenlik gösterebilmektedir.

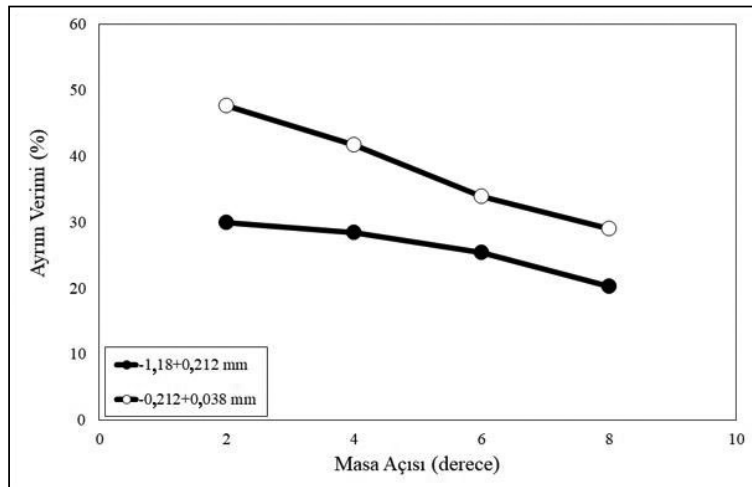
İri fraksiyonların AV değeri, zayıf serbestleştirme karakteristiklerine işaret etmektedir. Bu çıkarım, optik analiz ile teyit edilmiştir. Ağır sıvı testleri, -30+1,18 mm boyut fraksiyonu için maksimum %54 demir içeren bir konsantrenin, %82'lik verim değeri ile elde edilebildiğini göstermiştir. Jig testlerinde elde edilen konsantre tenörü, analiz tenörü ile neredeyse örtüşürken, verim değeri ise analiz değerinin yaklaşık %66'sı kadar olmuştur.

Sallantılı masa AV değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Şekil 8'de görüldüğü üzere sallantılı masa, özellikle ince boylarda ve 2 derecelik açı ile en iyi performansı sağlamıştır. Her iki boyut fraksiyonu için de eğim açısının azalması ile AV değeri oldukça yükselmiştir. Test sonuçlarından, masa eğim açısının AV değerini ciddi anlamda etkilediği görülmüştür. Dolayısı ile besleme boyutunun, serbestleşme derecesinin ve masa eğim açısının sallantılı masa AV değerleri üzerinde büyük etkisi olduğu açıktır.

-1,18+0,212 mm boyut aralıklarındaki düşük AV değerleri, serbestleşme analizleri neticesinde, yetersiz serbestleşme ile açıklanabilir. -1,18+0,212 mm ve -0,212 mm boyut fraksiyonlarının ortalama serbestleşme dereceleri sırasıyla %64 ve %89,05 olarak hesaplanmıştır.

Sallantılı masa test sonuçlarına göre, en yüksek AV değeri için en düşük açı değeri tercih edilmelidir. 2



Şekil 8- Sallantılı masa AV değerleri.

derecelik bir aç ı değ erinin üzerindeki değ erlerde, AV değ eri önemli ölçüde düş mektedir. Bu düş üş , tanelerin masa üzerindeki kalma süreleri ile açıklanabilir. Akan sıv ı filmindeki tanelerin kalma süreleri, artan aç ı ile ters orantılı olarak azalır. Bu kısa zaman diliminde, oldukça ince manyetit tanelerinin ara ürün ve atığ a kayması, seç imliliğ i düş ürebilir. Ek olarak, ş lamın atılması (-38 μ m) genel verimlilik üzerinde olumlu sonuçlar doğ urmuştur.

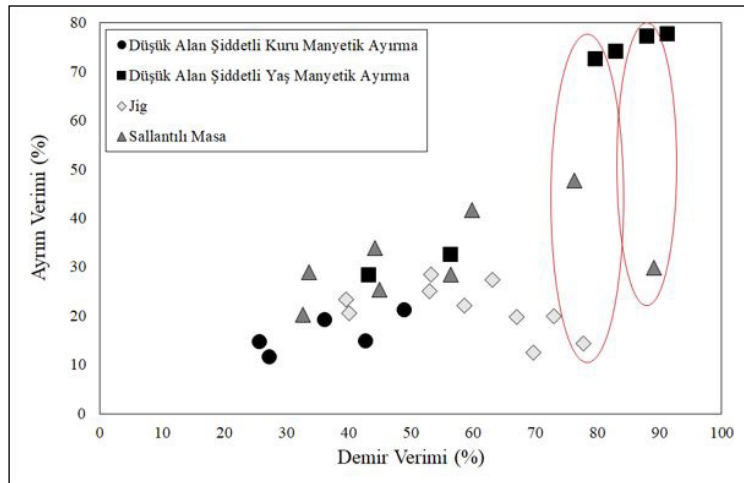
Demir verimi ile zenginleş tirme yöntemleri verimliliklerinin ilişkisi Ş ekil 9'da gösterilmiştir.

Ş ekil 9'da görüldüğü üzere, verimdeki artış , manyetik ayırma yönteminde AV değ erini de artırmaktadır. Jig ve sallantılı masa yöntemlerinde verime bağı lı olarak AV değ erleri sadece belli bir noktaya kadar gelmektedir. Yer çekimi ile zenginleş tirme yönteminde ise AV değ erleri oldukça düş üktür. Bu, yer çekimi kuvvetlerinin manyetik taneler üzerindeki sınırlı etkisi ile açıklanabilir. Ek olarak, manyetit tanelerinin yeterli serbestleş mesi neticesinde daha yüksek demir verimi sağ lanabilir. +1 mm'nin düşük serbestleş me karakteristiğ i, Jig ve düşük alan ş iddetli kuru manyetik ayırma yöntemlerindeki AV değ erlerini olumsuz etkilemektedir. Buna karş ın, 1 mm altında manyetit serbestleş mesi artış göstermektedir. Sallantılı masa ve düşük alan ş iddetli yaş manyetik ayırma için artan AV değ eri, daha yüksek serbestleş me derecesinin bir sonucudur. Ş ekil 9'da açıkça görüldüğü üzere, %80 demir verimi ile yaş manyetik ayırmanın AV

değ eri, sallantılı masa ve jig yöntemine göre daha yüksektir. Ş ekil 9 incelendiğ inde, düşük alan ş iddetli yaş manyetik ayırma AV değ erinin, demir cevheri zenginleş tirmede, çeş itli yer çekimi ile zenginleş tirme yöntemlerine göre daha iyi olduğı söylenebilir. Düş ük alan ş iddetli kuru manyetik ayırma yönteminin düşük verimliliğ i, yer çekimi kuvvetlerinin daha iri taneler üzerindeki etkisi ve esas olarak düşük serbestleş tirme ile açıklanabilir.

Yer çekimi ile zenginleş tirme ve manyetik ayırma yöntemlerinin ortalama ayırım verimi, ortalama besleme boyutları için istatistiksel analiz kullanılarak hesaplanmıştır. Yer çekimi ile zenginleş tirme ve manyetik ayırma yöntemlerine ait sonuçlar sırasıyla Ç izelge 7 ve Ç izelge 8'de verilmiştir. Yer çekimi ile zenginleş tirme ve manyetik ayırmanın ortalama ayırım verimi, Ş ekil 10'da gösterilmiştir.

Ş ekil 10'dan anlaşıldığı üzere, manyetik ayırmanın AV değ erlerinin %11,19 ile %75,34 arasında olduğı görülmektedir. Benzer şekilde, yer çekimi ile zenginleş tirmede AV değ erlerinin %20,05 ile %38,07 arasında değ iş tiğ i gözlenmektedir. Her iki yöntemde de ortalama tane boyutundaki küç ülme, AV değ erini artırmaktadır. İ ki yöntemde de 1 mm üzerindeki boyutlarda, AV değ erleri benzerlik göstermekle birlikte, 1 mm altında manyetik ayırma yer çekimi ile zenginleş tirmeye göre oldukça yüksek AV değ erleri vermektedir.



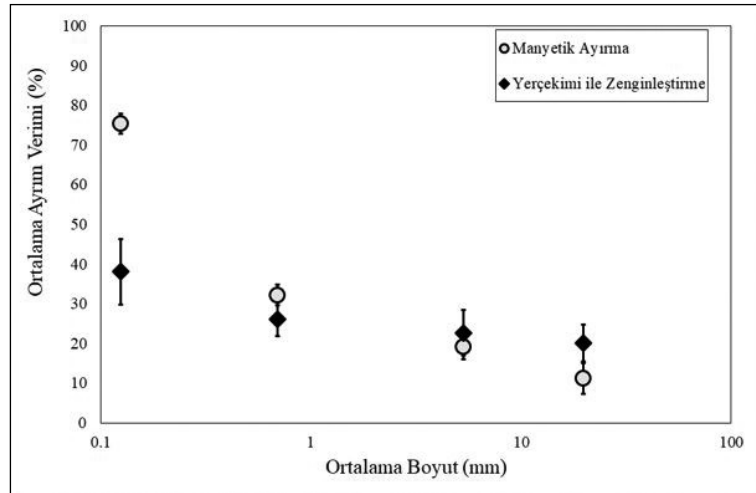
Ş ekil 9- Demir verimi ile zenginleş tirme yöntemleri verimliliklerinin ilişkisi.

Çizelge 7- Yer çekimi ile zenginleştirme yöntemi ortalama AV değerleri.

Besleme Boyut Frak. (mm),	Ortalama Besleme Boyutu (mm)	Ortalama SE (%)	Ortanca	Standart Sapma	Standart Hata
-30+9,5	19,75	20,05	20,62	4,65	2,08
-9,5+1,18	5,34	22,68	23,39	5,76	2,57
-1,18+0,212	0,70	26,03	26,94	4,26	2,13
-0,212+0,038	0,13	38,07	37,80	8,27	4,13

Çizelge 8- Manyetik ayırma yöntemi ortalama AV değerleri.

Besleme Boyut Frak. (mm),	Ortalama Besleme Boyutu (mm)	Ortalama SE (%)	Ortanca	Standart Sapma	Standart Hata
-30+9,5	19,75	11,19	12,13	3,95	1,98
-9,5+1,18	5,34	19,17	20,26	3,14	1,57
-1,18+0,212	0,70	32,21	33,27	2,67	1,34
-0,212+0,038	0,13	75,34	75,34	2,48	1,24



Şekil 10- Manyetik ayırma ve yer çekimi ile zenginleştirme için AV değerleri.

6. Sonuçlar

Türkiye'nin Doğu Anadolu bölgesinden alınmış düşük tenörlü bir demir cevheri numunesi, tenör/verim ilişkilerini ve farklı fiziksel zenginleştirme yöntemlerinin ayırım verimlerini değerlendirmek amacıyla ayrıntılı karakterizasyon ve çeşitli zenginleştirme yöntemlerine tabi tutulmuştur. Cevherin daha iri, orta ve daha ince fraksiyonlarına düşük alan şiddetli kuru ve yaş manyetik ayırma, jig ve sallantılı masa içeren detaylı zenginleştirme testleri uygulanmıştır. En önemli operasyonel parametrelerden olan manyetik alan şiddeti, su hızı ve masa eğim açısı gibi değişkenlerin AV değerleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve tartışılmıştır.

Zenginleştirme yöntemlerinin performans değerlendirmeleri, AV hesaplamaları ile yapılmıştır. Operasyonel parametrelerin, tüm yöntemlerdeki AV değerlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, zenginleştirme yönteminden bağımsız olarak besleme boyut fraksiyonundaki incelenen, ayırım verimini artırdığını göstermiştir. Aynı şekilde, ince boyut fraksiyonlarında daha yüksek serbestleşmenin AV değerleri üzerindeki olumlu etkisi de gözlemlenmiştir. Boyuta bağımlı demir verimi ve AV değerleri arasındaki sıkı ilişki, yüksek demir verimi sağlanırken düşük AV değerlerinin alınmasına dair potansiyel nedenleri açıklayabilmek açısından önemlidir.

Çalışılan demir cevher numunesi için farklı boyut fraksiyonlarının ortalama AV değerleri, manyetik ayırma ve yer çekimi ile zenginleştirme yöntemlerinde 1 mm üzerindeki boyutlarda, benzerlik gösterse de 1 mm altında manyetik ayırma yönteminin yer çekimi ile zenginleştirmeye göre oldukça yüksek AV değerleri verdiği gözlemlenmiştir.

AV hesaplamalarına göre, 16. testin en iyi verimlilik değerini (%77,61) sağladığı söylenebilir. Bu testte -212+38 µm boyut fraksiyonu için yaş manyetik ayırma yöntemi uygulanmıştır. Sonuçlar neticesinde, %64,01 Fe tenörlü bir manyetik konsantre %91,27 toplam demir verimi ile elde edilebilmektedir. Ancak, sunulan sonuçlara ekonomik kaygılar göz önünde bulundurulmadan ulaşılmış olup sonuçlar sadece farklı zenginleştirme yöntemlerinin teknik verimliliklerini karşılaştırma niteliğindedir. Herhangi bir zenginleştirme yönteminin daha düşük bir ayırım veriminin, işletme koşullarıyla veya yetersiz serbestleştirme nedeniyle ilişkili olup olmadığının bilinmesi zordur. Bu çalışmada yoğun şekilde kontrol edilen bir test planından yararlanılmıştır. AV değerlerindeki değişimler zenginleştirme yönteminin türü ve malzeme özellikleri çerçevesinde açıklanabilmektedir.

Düşük tenörlü cevherler için, özellikle demir cevherlerinde, en uygun yöntem kullanılarak ve akım şeması yardımı ile hem verim/tenör için ideal değerler kazanılabilir hem de maliyet azaltılabilir. Bu yüzden, çalışmada verilen tenör/verim eğrileri ve AV hesaplamaları, farklı zenginleştirme yöntemlerinin karşılaştırılması ve teknik olarak en iyi olanın seçiminde, kalitatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Tenör/verim eğrileri ve AV yöntemleri hızlı ve temel yöntemler olmaları ve deneysel sonuçlar dâhilinde verimliliğin değerlendirilebilmesini sağladıkları için kendi içlerinde avantajlara sahiptir. Düşük alan şiddetli kuru ve yaş manyetik ayırma, jig, sallantılı masa ve diğer potansiyel yöntemlere bu tekniklerin uygulanması, tesis dinamiklerinin kavranabilmesi ve optimizasyon konularında destekleyici bir kaynak görevi görebilir.

Operasyonel parametreler ve zenginleştirme yöntemleri içinden en iyi süreci teknik olarak tespit edebilme açısından, bu temel hesaplamalar kullanışlı olmakla birlikte, araştırmacılara kolaylık sağlayabilir. Bu yöntemin avantajlarından biri de birçok

yöntem içinden en iyi olanı seçebilmelerine olanak sağlamasıdır. Sonuçlar, ekonomiklikten ziyade, süreç performansı açısından herhangi bir ayırma süreci değerlendirmesi için gerekli stratejik yöntemlerden birinin ele alınması bağlamında sunulmuştur. AV değerleri ve verim arasındaki ilişki ile tenör/verim eğrileri, kullanıcıların ihtiyaçları dahilinde, ayrı ayrı işe yarar sonuçlar sunmaktadır.

Değinilen Belgeler

- Amikiya, C. A. 2014. Characterisation of iron ore - a case study of Mount Tokadeh, Western Nimba Area, Liberia. Master of Philosophy in Chemical Engineering, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, 119.
- Amiri, S. H. 2019. Investigation of efficiency of magnetic separation methods for processing of low-grade iron pigments ore (RED Ochre). *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 4(1), 18-25.
- Arol, A. I., Aydoğan, A. 2004. Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 232, 151-154.
- Barari, H. B., Sen, P., Sengupta, P. 1979. Generalized approach for multi-component multi-stage separation efficiency. *Society of Mining Engineers AIME* 266, 1901-1904.
- Chatterjee, A. 1998. Role of particle size in mineral processing at Tata steel. *International Journal of Mineral Processing* 53, 1-14.
- Das, B., Prakash, S., Das, S. K., Reddy P. S. R. 2008. Effective beneficiation of low grade iron ore through jigging operation. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 7, 27-37.
- Dobbins, M., Dunn, P., Sherell, I. 2009. Recent advances in magnetic separator designs and applications. *The 7th International Heavy Minerals Conference What next, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 63-70.
- Drzymala, J. 2006. Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 40, 19-29.
- Drzymala, J. 2007. Atlas of upgrading curves used in separation and in mineral science and technology. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 41, 27-35.

- Drzymala, J. 2008. Atlas of upgrading curves used in separation and mineral science and technology. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 42, 75-84.
- Dworzanowski, M. 2012. Maximizing the recovery of fine iron ore using magnetic separation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 112, 197-202.
- Hearn, S. 2002. The use of hindered settlers to improve iron ore gravity concentration circuits. *Mineral processing plant design, practice and control, Colorado. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Incorporation.*
- Irannajad, M., Salmani Nuri, O., Allahkarami, E. 2018. A new approach in separation process evaluation. Efficiency ratio and upgrading curves. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 54, 847-57.
- Lin, I. J., Knish-Bram, M., Rosenhouse, G. 1997. The beneficiation of minerals by magnetic jigging, Part 1. Theoretical aspects. *International Journal of Mineral Processing* 50, 143-59.
- Mahmoud, M. A. 2010. Statistical design application and analysis of separation efficiency in Davis Tube tester. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University* 38, 1047-1058.
- Makhija, D., Mukherjee, A. K., Ghosh, T. K. 2013. Preconcentration feasibility of gravity and magnetic techniques for banded hematite Jasper. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing* 2, 8-15.
- Mukherjee, A. K. 2009. New method for evaluation of gravity separation processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 30, 191-210.
- Mukherjee, A. K., Mishra, B. K. 2006. An integral assessment of the role of critical process parameters on jigging. *International Journal of Mineral Processing* 81, 187-200.
- Mukherjee, A. K., Dwivedi, V. K., Mishra, B. K. 2005a. Analysis of a laboratory jigging system for improved performance. *Minerals Engineering* 18, 1037-1044.
- Mukherjee, A. K., China, M., Rai, S. K., Sinha, M. 2005b. Flowsheet development for Joda classifier fines. *R and D Reports* 60(4), 8.
- Mukherjee, A. K., Bhattacharjee, D., Mishra B. K. 2006. Role of water velocity for efficient jigging of iron ore. *Minerals Engineering* 19, 952-59.
- Özcan, Ö., Aghlmandı Harzanagh, A., Orhan, E., Ergün, Ş. 2021. Beneficiation and flowsheet development of a low grade iron ore: a case study. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 165, 235-251.
- Rayner, J. G., Napier-Munn, T. J. 2000. The mechanism of magnetics capture in the wet drum magnetic separator. *Minerals Engineering* 13, 277-285.
- Schulz, N. F. 1979. Separation efficiency. *Transactions of the Society of Mining Engineers. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers* 247, 81-87.
- Seifelnassr, A., Moslim, E., Abouzeid, A. Z. 2012. Effective processing of low-grade iron ore through gravity and magnetic separation techniques. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 48, 567-578.
- Shivakumar, I. A., Chinthapudi, E., Ho-Seok, J., Barada, K. M., Jan, D. M. 2017. Selection of gravity separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 38, 54-61.
- Sousa, R. J. C. 2020. Assessment of separation efficiency in mineral processing using the ultimate upgrading concept-a holistic window to integrate mineral liberation data. PhD Dissertation, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering of University of Porto.
- Suthers, S. P., Nunna, V., Tripathi, A., Douglas, J., Hapugoda, S. 2014. Experimental study on the beneficiation of low-grade iron ore fines using hydrocyclone desliming, reduction roasting and magnetic separation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 123(4), 212-227.
- Vijayendra, H. G. 2001. *A Handbook on Mineral Dressing.* Vikas Publishing House, New Delhi, 271-279.
- Wills, B. A., Napier-Munn, T. J. 2006. *Mineral Processing Technology, 6th Edition Australia.* Elsevier Science and Technology Books.
- Wills, B. A., Finch, J. A. 2016. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 8th Edition,* Elsevier.
- Xiong, D., Liming, L., Holmes, R. 2015. Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. *iron ore. Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability* 66, 283-307.