

DÜŞÜK TENÖRLÜ MANGAN CEVHERİNİN KURU MANYETİK AYIRMA YÖNTEMİ İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE TANE BOYUTUNUN ETKİSİ

Yaşar Hakan GÜRSOY^{1*}

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-8987-7818>

Anahtar Kelimeler	Öz
Manganez Cevherleri, Manyetik Ayırma, Sınıflandırma, Pirolüsit, Manganit	<i>Pil ve kimya sanayilerinin yanı sıra manganez cevherlerinin ana tüketim alanı olan özellikle demir-çelik sanayinde önemli bir üretim artışı söz konusudur. Ancak dünyada artan talep ile birlikte yüksek tenörlü hammadde kaynaklarının azaldığı görülmektedir. Bu nedenle, düşük tenörlü cevherlerin hammadde olarak sanayiye sunulması günümüzde önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'deki düşük tenörlü mangan rezervlerinin değerlendirilmesi amacıyla, İzmir-Karaburun bölgesinden çıkarılan mangan cevheri üzerinde rulo tip kuru manyetik ayırıcı ile sınıflandırma ve zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Öğütme (boyut küçültme) ve tasnif işlemlerinden sonra cevher -1150+850, -850+425 ve -425+150 µm olmak üzere üç farklı boyut fraksiyonuna ayrılmış, daha sonra boyutun manyetik ayırma performansına etkisi araştırılmıştır. Manyetik ayırma testleri sonucunda, %17,21 Mn içeren iri taneli fraksiyon beslemesinden %69,39 geri kazanım ve %39,42 Mn tenörlü bir konsantralde elde edilmiştir. Orta boy fraksiyonda %15.15 Mn içeren cevherden %78.25 verim ve %31.30 Mn tenörlü bir konsantralde edilirken, ince boyutta % 16.85 Mn içeren cevherden %86.97 verim ve %28.56 Mn tenörlü bir manyetik ürün elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde %39.42 Mn tenörlü iri taneli fraksiyonda elde edilen konsantrentin demir-çelik endüstrisi için satılabilir ürün olduğu belirlenirken diğer boyut aralıkları için ek konsantrasyon çalışmalarının yapılması gerektiği belirlenmiştir.</i>

THE EFFECT OF PARTICLE SIZE ON THE ENRICHMENT OF A LOW GRADE MANGANESE ORE BY DRY MAGNETIC SEPARATION

Keywords	Abstract
Manganese ores, Magnetic Separation, Classification, Pyrolusite, Manganite	<i>There is a substantial production increase especially in the iron-steel industry, which is the main consumption area of manganese ores, besides battery and chemical industries. However, it is seen that high-grade raw material resources are decreasing with the increasing demand in the world. For this reason, presenting low-grade ores to the industry as raw materials is of importance today. In this study, in order to evaluate the low-grade manganese reserves in Turkey, classification and enrichment experiments with a roll-type dry magnetic separator were carried out on manganese ore from İzmir-Karaburun region. First, after grinding (size reduction) and classification processes, the ore was divided into three different size fractions as -1150+850, -850+425 and -425+150 µm then the effect of size on magnetic separation performance was investigated. As a result of magnetic separation tests, a concentrate with 69.39% recovery and 39.42% Mn grade was obtained from the coarse size fraction feed having 17,21% Mn. In the mid-size fraction, a concentrate with a recovery of 78.25% and 31.30% Mn grade was obtained from the feed containing 15.15% Mn, while obtaining a magnetic product with a recovery of 86.97% and 28.56% Mn grade from the fine size fraction feed containing 16.85% Mn. When the results obtained were examined, it was determined that the concentrate obtained in the coarse-grained fraction with a grade of 39.42% Mn was determined to</i>

* Sorumlu yazar; e-posta : hgursoy@ogu.edu.tr



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

be a salable product for the iron-steel industry, while additional concentration studies were required for other size ranges.

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 13.08.2021	Submission Date	: 13.08.2021
Kabul Tarihi	: 4.09.2021	Accepted Date	: 4.09.2021

1. Giriş

Dünyada artan metalik maden tüketimini karşılamak için günümüzde madencilik faaliyetleri daha fazla önem kazanmış durumdadır. Geçmiş yıllarda yüksek tenörlü cevherlerden bu ihtiyaçlar karşılanmakta iken günümüzde artık daha düşük tenörlü maden yatakları değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Düşük tenörlü cevherlerin ekonomik olarak kazanılması ve hammadde olarak satılabilecek tenörlere getirilmesi ise cevher zenginleştirme işlemlerinin başarısı ile sağlanabilmektedir.

Mangan (Mn), metalik bir elementtir ve doğada doğal halde oksit, karbonat ve silikatlar halinde bulunmaktadır. Gümüş parlaklığında bulunan mineralleri sert olmasına rağmen kolaylıkla toz haline gelebilen bir yapıya sahiptir.

Dünyada ortalama %0,1 oranında bulunan mangan günümüzde teknoloji için vazgeçilmez bir hammadDEDİR. Başta demir ve silisyum olmak üzere birçok elementle alaşım yapabilmektedir. Endüstride en yaygın kullanılan alaşımları ise ferromangan (%78 Mn) ve silikamangandır (%65-70 Mn) (DPT, 1996).

Manganez cevherlerinin genel görünümü toprağımsı yapıda olup, kripto-kristalin yapılı, masif ve amorf bileşikler halindedir. Renkleri çoğunlukla kahverengi ve siyahtır. Manganez minerallerinin genellikle oksitlerden oluşmakta ve en önemlileri; Pirolüsit (MnO_2), Psilomelan ($BaMn_9O_{18} \cdot 2H_2O$), Manganit ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$), Braunit ($3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$), Rodokrosit ($MnCO_3$), Hausmanit (Mn_3O_4) olmakla beraber doğada bileşiminde manganez bulunan 300'den fazla mineral bulunmaktadır (İnce, 2014).

U.S. Bureau of Mines'a göre içeriğinde en az %35 Mn olan cevherler manganez cevheri olarak adlandırılmaktadır. Manganez cevherleri ise, içerdiği manganez miktarına göre manganezli demir (%5-10 Mn), demirli manganez (%10-35 Mn) ve manganez cevheri (%35'den fazla Mn) olarak sınıflandırılmaktadır (DPT, 1996). Türkiye'deki manganez yatakları oluşumları, yaşları, kökenleri ve yapısal özelliklerine göre farklılıklar gösterir.

Mangan, yüksek kaliteli çelik üretmek için gerekli olan önemli bir hammadDEDİR. Son yıllarda, gelişmekte olan ülkelerde çelik talebindeki artış da, Mn cevheri tüketiminin artmasına neden olmuştur. Yıllık üretilen manganez cevherinin %95'i çelik endüstrisi tarafından tüketilirken, diğer %5'i kimya, boya, gübre ve pil

endüstrileri dâhil olmak üzere diğer endüstriler tarafından kullanılmaktadır (Singh, Chakraborty ve Tripathy, 2020).

Türkiye'de manganez kullanım alanları Dünya tüketimine paralel olarak %95'e yakını parça manganez cevheri ve manganlı demir alaşımları şeklinde demir çelik sanayiinde kullanılır. Manganlı demir alaşımları içinde en önemlisi ferromangan olup, demir çelik üretiminde kullanılan manganezin %90'ı ferromangan halindedir (DPT, 2001).

Mangan yataklarında bulunan gang mineralleri üç ana kategoriye (silikatlar, oksitler, karbonatlar) ayrılabilir. Cevher tenörlerindeki önemli değişkenlik, gang minerallerinin fizikokimyasal özelliklerindeki benzerlikler ve ekonomiklik açısından öğütme boyutuna getirilen sınırlamalar, düşük tenörlü mangan cevherinin zenginleştirmesinin önündeki önemli zorluklardır. Cevher mineralojisine bağlı olarak uygulanabilecek başlıca yöntemler gravite ayırma, manyetik ayırma, flotasyon ve hidrometalurjik işlemlerdir (Singh ve diğ., 2020).

Dünya mangan rezervleri Amerikan Jeoloji Araştırmaları Kurumunun (USGS) 2020 raporuna göre toplam 810 milyon ton olarak açıklanmıştır. Büyük rezerve sahip ülkeler 260 milyon ton ile Güney Afrika, 140 milyon ton ile Ukrayna ve Brezilya ve 100 milyon ton ile Avustralya'dır. Yine USGS 2020 yılı raporuna göre 2018 yılı verilerinde dünya metal manganez üretimi 18,9 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Üretimde dünya lideri 5,8 milyon ton ile Güney Afrika olup, onu 3,4 milyon ton ile Avustralya, 2,3 milyon ton ile Gabon, 1,3 milyon ton ile Gana ve Brezilya ve 1,2 milyon ton Çin izlemektedir.

Çin metal manganez üretiminde en büyük üretici konumundadır. Ülkedeki manganez rezervlerinin azalması, sıkı çevresel düzenlemeler ve artan enerji ve üretim maliyetleri sebepleriyle mangan madeni ve zenginleştirme tesislerinin bir kısmını kapatmasına rağmen Çin ithalatını artırarak hala manganezin alaşımları üretiminde dünyanın en büyük üreticisi durumundadır (Eroğlu ve Şahiner, 2020).

Mangan cevherine talep artarken, dünya kaynaklarının önemli bir kısmı düşük ve orta dereceli (Mn: %20-35; Mn/Fe < 2.5) cevherlerden oluşmaktadır (Singh ve diğ., 2020). Türkiye'deki manganez yatakları da genelde düşük tenörlü ve küçük rezervli yataklardır (Öztürk, Kasapçı ve Özbaş, 2019). Bu nedenle, özellikle düşük tenörlü mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinde,

cevherin mineralojik bileşimine uygun ekonomik ve çevre kirliliğine neden olmayacak yöntemlerin kullanılması önemli olmaktadır.

Bu çalışmada İzmir Karaburun bölgesine ait düşük tenörlü Mangan cevherinden manyetik ayırma ile yüksek verim ile yüksek tenörlü bir konsantre elde edilmeye çalışılmış ve araştırma, yayın etiğine uygun olarak analiz edilmiştir.

2. Mangan Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Manganez madenlerinde çıkarılan cevher, tüvenan (parça cevher) olarak, satışa uygun değilse, yani düşük tenörlü ise cevherin tenörünü yükseltmek ve ekonomik değerini artırmak için zenginleştirme tesislerine gönderilmektedir. Mangan cevherinin zenginleştirmesindeki amaç Mn tenörünü ve Mn/Fe oranını yükseltmek, silis, fosfor, alüminyum, demir, bakır, çinko, kurşun ve arsenik gibi konsantrde istenilmeyen elementleri uzaklaştırmaktır.

Manganez cevherinin kimyasal bileşimi cevherin sanayideki kullanım alanlarını belirlemektedir. Kimyasal analizlerde MnO, SiO₂, Al₂O₃ miktarları ve Mn/Fe oranı çok belirleyici olmaktadır. Manganez ticari olarak ferromangan, silikomangan, metalik mangan gibi adlarda tanımlanmaktadır (DPT, 1996).

Zenginleştirme işlemleri genel olarak iri boyutta ayıklama, tane boyutu küçültme (kıırma-öğütme) ve boyutlandırma (eleme-sınıflandırma) yöntemleri ile başlamaktadır. Cevherin yapısına göre gravite, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma, flotasyon, kalsinasyon, hidrometalurjik, pirometalurjik ve elektrolitik yöntemlerden biri veya birkaçı seçilerek zenginleştirme uygulanmakta ve konsantre manganez cevheri elde edilmektedir. Bu aşamadan sonra satılabilir konsantre cevher endüstriyel kullanım alanlarına uygun olarak; briketleme, peletleme, sinterleme işlemleri ile kalsine cevher, peletlenmiş cevher ve sinterlenmiş cevher halinde pazarlanmaktadır. Son yıllarda batarya sanayisi için elektrolitik mangan tercih edilen bir manganez ürünü olmuştur (Eroğlu ve Şahiner, 2020)

Madencilikte genellikle basit zenginleştirme yöntemleriyle en ekonomik şekilde satılabilir konsantrler üretmek hedeflenmektedir. Ancak bu yöntemlerin Mn kazanma verimleri düşük olduğundan (%50-60) yeterli rezerv ve cevherin yapısı uygun olduğu hallerde genellikle gravite zenginleştirmesi, manyetik zenginleştirme, flotasyon ve hidrometalurjik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. (İnce, 2014)

Mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinde birçok yöntem kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi sınıflandırma ile zenginleştirme yöntemidir. Grigороva (2011) çalışmasında düşük tenörlü mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinde hidrosiklon ile

sınıflandırma yönteminin kullanılabileceğini göstermiştir. Rao, Mohapatra ve Tripathy (1998) ise düşük fosforlu Mn/Fe oranı 5.7 olan Hindistan Chilka mangan yatağında yaş yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcının jigle zenginleştirmeye göre daha iyi sonuç verdiğini bildirmiştir.

Güven, Burat, Kangal ve Acarkan (2012) düşük tenörlü Türk mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinde gravite ayırma yöntemlerinden jig, sallantılı masa ve MGS (Multi Gravity Separator) ile yüksek yoğunluklu manyetik ayırma yöntemlerini kullanarak en az %10 Mn içeriği olan bir manganez cevherinin ekonomik olarak zenginleştirilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Singh ve diğ., (2020) düşük tenörlü mangan cevherlerinin zenginleştirme yöntemlerini inceledikleri çalışmalarında cevher yapısının zenginleştirme yönteminin seçiminde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu cevherlerden yoğun silis içerenlerinin çoğunlukla gravite ayırma, demir açısından zengin manganez cevherlerinin manyetik ayırma ve indirgeme kavurma, karbonat ve kompleks bir mineralojiye sahip cevherlerin ise hidrometalurjik yöntemlerle daha güvenilir bir şekilde zenginleştirilebildiği sonucuna ulaşmışlardır. Özellikle düşük tenörlü, silis ve demir açısından yüksek içeriğe sahip cevherlerin manyetik ayırma yöntemiyle zenginleştirilmeleri veya hidrometalurjik süreçler öncesi ön zenginleştirme yapılması ekonomik ve hacimsel yük açısından bir zorunluluk haline gelmektedir.

2.1. Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme

Manyetik ayırma, manyetik alanda minerallerin farklı manyetik duyarlılıklarına göre ayırım yapan bir yöntemdir. Manyetik ayırmada yüksek verim elde edebilmek için dar boyut aralığında sınıflandırılmış olması gerekir. Ayrıca kuru manyetik ayırma uygulanacaksa malzemede nem içeriği istenmez. Genel olarak kuru manyetik ayırma yöntemi tek başına veya diğer yöntemlerle birlikte 3–0,1 mm arasındaki tanelere uygulanır (Hacıfazlıoğlu, 2011).

Manyetik duyarlılığı yüksek olan ve manyetik alandan en fazla etkilenen mineraller kuvvetliden zayıfa doğru; manyetit, franklinit, ilmenit, pirotin, siderit, hematit, volframit, manganez oksitleri, kromit, rutil, monazit ve demirli silikatlardır. Kuvvetli bir elektromanyetik alandan etkilenebilecek düşük manyetik özellik gösteren oldukça fazla mineral vardır. Manyetik alandan etkilenmeyen mineraller ise çoğunlukla kuvars, pirit, feldspat, galen, antimuan ve kalsitir (Şimşek, 2011).

Düşük tenörlü mangan cevherlerinin manyetik ayırma ile zenginleştirilmesi konusunda yapılmış birçok çalışma vardır. Elliott ve Barati (2020) bu konuda yapılmış 24 çalışmanın verimlerini değerlendirerek ferromanganez üretiminde kullanıma uygun bir

konsantre elde etmek için cevherin minimum başlangıç konsantrasyonunun ~%25 Mn ve ~%10 Fe içermesini önermişlerdir.

Tripathy, Banerjee ve Suresh (2015) düşük tenörlü demirli mangan cevherini zenginleştirmek için indüklenmiş bir rulo manyetik ayırıcı kullanılarak manyetik ayırma çalışmaları yapmışlardır. Gao ve diğ., (2019) ise düşük tenörlü mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinde indirgeme kavurma ve manyetik ayırma yöntemlerinin birlikte kullanımını önermektedirler. Benzer şekilde birçok araştırmacı, zenginleştirme atıklarından, mangan ve demir kompleksinden oluşan refrakter özellikli ferromangan cevherlerinden ve demir çelik atıklarından, demir ve manganı ayrı ayrı ayırmak için kavurma yöntemi ve manyetik ayırma teknolojisinin kullanımını önermişlerdir (Yuan, Zhou, Han ve Li; 2020-a; Eghbali, Hazaveh, Rashchi ve Ataie, 2021; Liu, Zhang, Zhang, Han ve Zhang, 2021).

Eskişehir bölgesindeki braunitçe zengin -10+1mm tane boyutu aralığındaki mangan cevherinin manyetik ayırıcı kullanılarak başarılı bir şekilde zenginleştirilebileceği Grieco, Kastrati ve Pedrotti (2014) tarafından açıklanmıştır. Yine başka bir araştırmada antiferromanyetik ve paramanyetik özelliklere sahip düşük tenörlü karbonatlı mangan cevherlerinin, yüksek yoğunluklu manyetik ayırma yoluyla verimli bir şekilde zenginleştirilebileceği sonucuna varılmıştır (Wu, Shi, Ge, Yan ve Yang, 2014). Mangan cevherlerinin manyetik ayırıcılarla zenginleştirilmesinde genellikle orta ve yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar kullanılmaktadır.

Daha önce benzer bir çalışma yapılmamış olan İzmir-Karaburun bölgesinde yer alan ve tüvenan haliyle satış imkanı olmayan düşük tenörlü mangan cevherinin ekonomiye kazandırılması amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada boyut fraksiyonlarına göre cevher tenörünün artırılması hedeflenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Materyal

Çalışmada kullanılan cevher numunesi İzmir ili Karaburun mevkiinden alınmıştır. Parça halinde yaklaşık 100 kg numune (Şekil 1) Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Laboratuvarına getirilerek iri boyuttaki malzemenin tamamı çeneli kırıcıda kapalı devre kırılarak 16 mesh (1150 µm) altına indirilmiştir. Kırma işlemi sonrasında elde edilen elek analizi Tablo 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Tablo 1

Cevherin Elek Analizi Sonuçları

Elek Boyutu (µm)	Ağırlık (g)	Ağırlık (%)	Kümülatif Elek Altı (%)
-1150 +850	242,7	33,94	100,00
-850 +600	174,5	24,41	66,06
-600 +425	98,2	13,73	41,65
-425 +300	61,0	8,53	27,92
-300 +212	38,3	5,36	19,38
-212 +150	29,6	4,14	14,03
-150 +106	17,2	2,41	9,89
-106 +75	13,4	1,87	7,48
-75 +53	8,8	1,23	5,61
-53 +38	8,2	1,15	4,38
-38	23,1	3,23	3,23
Toplam	715,0	100,00	



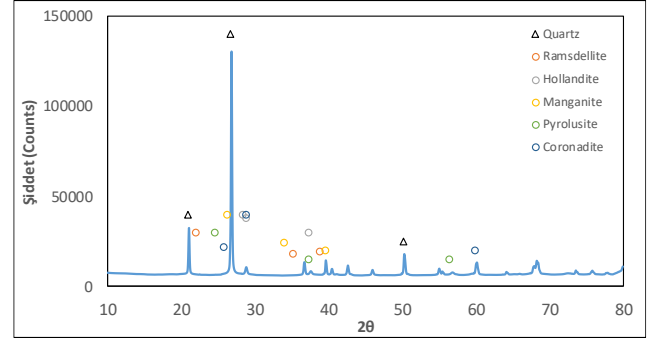
Şekil 1. Karaburun Bölgesinden Alınan Örnekler

3.2. Cevherin Karakterizasyonu

Örneğe ait XRD analizleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında (ARUM) kurulu bulunan Panalytical Empyrean marka X-ray kırınım cihazı ile yapılmış olup analiz sonucu Şekil 2'de verilmiştir. Çalışma konusu olan cevherin XRD analizine göre bileşiminde mangan minerali olarak pirolüsit (MnO₂), manganit (MnO₂ · H₂O) ve ramsdellit (MnO₂) yanında silikat (SiO₂) ve az miktarlarda diğer mangan mineralleri olan hollandit (BaMn₈O₁₆) ve koronadit (PbMn₈O₁₆) bulunduğu belirlenmiştir.

3.3. Kimyasal Analiz

Deneyisel çalışmada kullanılan tüvenan cevherin kuru manyetik ayırmada ki güçlüklerden dolayı ince boyut fraksiyonu (-150 µm) ayrılıp kalan malzeme sınıflandırılarak boyut gruplarına göre kimyasal analizleri yapılmıştır ve sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Kimyasal analizler Panalytical Zetium marka X-ışını floresans spektrometre cihazı ile yapılmıştır. Kimyasal analizlerde cevherin düşük tenörlü mangan içerdiği (%16) ve önemli miktarda silis (%26,88) bulundurduğu, az miktarda da demir, magnezyum ve alüminyum içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 2. Tüvenan Örneğin XRD Faz Bileşimi

Tablo 2

Cevherin Kimyasal Bileşimi

Boyut aralığı (µm)	Ağ. (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	K (%)	Ca (%)	Mn (%)	Fe (%)	Ba (%)	Na (%)
-1150+850	4,59	0,65	0,62	27,01	0,46	0,70	17,21	0,55	0,86	0,17
-800+600	5,94	0,64	0,60	26,70	0,46	0,70	15,12	0,72	0,79	0,15
-600+425	9,47	0,66	0,65	26,07	0,45	0,84	15,19	0,61	0,79	0,15
-425+300	15,24	0,73	0,69	27,34	0,47	1,05	16,42	0,94	0,80	0,15
-300+212	27,08	0,81	0,72	26,67	0,50	1,11	17,10	0,82	0,84	0,16
-212+150	37,67	0,88	0,77	27,06	0,52	1,39	17,43	1,35	0,86	0,16
Besleme	100,00	0,79	0,72	26,88	0,49	1,13	16,83	1,00	0,84	0,16

3.4. Manyetik Ayırma Çalışmaları

Manyetik ayırma deneylerinde Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan PermRoll marka sabit mıknatıslı tambur tipi kuru manyetik ayırıcı kullanılmıştır. Şekil 3’te verilen manyetik ayırıcının manyetik alan şiddeti yaklaşık 11000 gauss olup çalışma değişkenleri bant hızı, titreşimli besleme hızı ve konsantr alma bölümünde yer alan yönlendirme kanatlarının konumudur.



Şekil 3. Permroll Rulo Tipi Sabit Manyetik Alana Sahip Kuru Manyetik Ayırıcı

Hazırlanan deney numuneleri cihazın besleme ünitesine yerleştirilmekte ve titreşimli besleyici sayesinde bant üzerine akan malzeme silindirik şeklindeki manyetik rulo üzerinden geçmektedir. Manyetik özelliğe sahip olan taneler bant üzerine yapışarak konsantr bölümüne kadar taşınmakta ve bant tamburdan uzaklaştığı için manyetik alandan uzaklaşan tanelerin yerçekimi sayesinde konsantr kabına dökülmeleri sağlanmaktadır. Manyetik olmayan taneler ise tambur hızına bağlı olarak merkezkaç kuvvetinin etkisi ile tambur üzerinden toplama kabına dökülmektedirler. Yönlendirme bıçaklarının konumuna bağlı olarak cihazdan manyetik ve manyetik olmayan ürünlerin toplandığı bölümün arasında zayıf manyetik ya da bağlı tanelerin bulunduğu bir ara ürün de alınabilmektedir.

4. Deneysel Çalışmalar

Manyetik ayırma deneylerinde kullanılan malzeme yüksek verim alınabilmesi amacıyla dar boyut aralıklarında sınıflandırılmıştır. Örnekler örnek bölücü (riffle) yardımı ile homojen bir şekilde bölünerek deneylerde kullanılmak üzere stoklanmıştır. Deneylerde kullanılan boyut grupları ve örneklerin yaklaşık ağırlıkları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3

Deney Örneklerinin Boyut Aralıkları ve Miktarları	
Malzeme boyut grupları (μm)	Örnek miktarı (gr)
-1150+850	400
-850+425	400
-425+150	200

Üç farklı boyut grubunda gerçekleştirilen manyetik ayırma deneylerinde cihaz çalışma değişkenleri tane boyutuna göre farklılar göstermekle birlikte ayırmanın yapıldığı optimum çalışma parametresi belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için cihaz çalışma değişkenleri her tane boyutu için standart alınarak Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4

Manyetik Ayırıcı Çalışma Değişkenleri	
Cihaz Değişkenleri	Değişken Aralıkları
Besleme Hızı (Frekans)	3-4-5
Tambur Hızı (dev/dak)	60-80-100
Bıçak Konumu (Derece)	0-20-40

Manyetik ayırma deneylerinde bant üzerinde düzgün bir akış sağlanarak ve ürünlerin yüzde ağırlıkları da dikkate alınarak en iyi deney şartlarının belirlenmesine çalışılmıştır. Buna göre; tüm boyut aralıkları için düşük tambur hızı daha etkili olmaktadır. Konsantre tenörlerini daha yüksek tutabilmek için de bıçak konumu tüm çalışmalar için 40 derece olarak belirlenmiştir. Bant üzerinde tanelerin yayılması ve birbirini manyetik alandan etkilememeleri için boyut gruplarına göre besleme hızları deneylerde farklılık göstermektedir. -1150+850 μm boyut aralığı için besleme hızı 5, -850+425 μm boyut aralığında besleme hızı 4 ve -425+150 μm boyut aralığında ise besleme hızı 3 olarak belirlenmiştir.

DeneySEL çalışma sonuçları XRF sonuçlarıyla karşılaştırılarak boyut grubuna göre en iyi verimin alındığı manyetik ayırma sonuçları sırası ile Tablo 5, 6 ve 7'de verilmiştir.

Tablo 5

-1150+850 μm Tane Boyutuna Sahip Cevherin Metalürjik Denge Diyagramı			
-1150 +850 μm	Ağırlık (%)	Mn (%)	Verim (%)
Manyetik Ürün	30,31	39,42	69,39
Ara Ürün	18,05	8,87	9,30
Nonmanyetik Ürün	51,64	7,10	21,30
Toplam	100,00	17,21	100,00

Tablo 6

-850+425 μm Tane Boyutuna Sahip Cevherin Metalürjik Denge Diyagramı			
-850 +425 μm	Ağırlık (%)	Mn (%)	Verim (%)
Manyetik Ürün	37,86	31,30	78,25
Ara Ürün	16,86	9,01	10,03
Nonmanyetik Ürün	45,28	3,92	11,72
Toplam	100,00	15,15	100,00

Tablo 7

-425+150 μm Tane Boyutuna Sahip Cevherin Metalürjik Denge Diyagramı			
-425 +150 μm	Ağırlık (%)	Mn (%)	Verim (%)
Manyetik Ürün	51,32	28,56	86,97
Ara Ürün	17,48	6,29	6,53
Nonmanyetik Ürün	31,20	3,51	6,50
Toplam	100,00	16,85	100,00

Tablo 5 incelendiğinde -1150+850 μm boyut grubu için %17,21 Mn besleme tenörüne sahip cevherden %69,39 verim %39,42 Mn tenörlü bir konsantre üretilmiştir.

Tablo 6'ya göre -850+425 μm boyut grubunda %15,15 Mn içeriğine sahip besleme malzemesinden %78,25 verim ile %31,30 Mn tenörlü bir konsantre elde edilebilmektedir.

Tablo 7'de ise -425+150 μm boyut grubunda %16,85 besleme tenörüne sahip cevherden %86,97 verim ile %28,56 Mn tenörlü bir manyetik ürün elde edilmektedir.

Yapılan manyetik ayırma testlerinde ağırlıkça konsantre ve renk farkına göre homojen olan örneklerin analizleri yapılarak en iyi verime sahip olan deneylerin sonuçları incelenmiştir. Bu sebeple her testin analizinin yapılarak manyetik ayırıcı için optimum çalışma koşullarının belirlenerek tenör ve verim açısından daha kaliteli ürünler etmek mümkün olabilecektir.

Mangan kolay kırılan bir yapıya sahip olduğundan kırma öğütme devrelerinden ince ürün fazla alınmaktadır. Bu

nedenle boyut küçültme devreleri tasarlanmalı ve gereksiz öğütmeden kaçınılmalıdır. Ayrıca dar boyut aralıklarında manyetik ayırıcıda daha yüksek verimlere ulaşılabilmektedir. Bunun yanında dar boyutta besleme ürünü elde edebilmek endüstri koşullarında hem yatırım giderini hem de işletme maliyetini yükseltirken iş yükünü de arttırmaktadır.

Değerli cevher kaybının önüne geçmek için deneysel çalışmalarda elde edilen ara ürünler konsantre içine alınarak deneysel verim ve tenörleri yeniden hesaplanmıştır. İri boyutta verim %69,39'dan %78,70'e çıkarken tenörde %39,42'den %28,01'e düşme gözlenmiştir. Orta boyutta verim %78,25'ten %88,28'e artarken tenör %31,30'dan %24,43'e düşmekte, ince boyutta verim %86,97'den %93,50'te artış gösterirken tenör ise %28,56'dan %22,90'a düşmüştür.

Demir-çelik sanayiisi hammadde olarak kullandığı mangan cevherlerinde diğer safsızlıkların yanında Mn tenörünü en az %35 Mn olarak talep etmektedir. Bu veri ışığında elde edilen konsantrelerden sadece -1150+850 tane boyutunda olan konsantre satılabilir özellik taşımaktadır. Diğer boyut aralıklarında satılabilir konsantre elde edilememiştir.

Deneysel çalışmalar literatürde yer alan benzer çalışmalarla uyum göstermektedir. Erzurum yöresi düşük tenörlü mangan cevherlerinin yaş manyetik ayırma ile zenginleştirildiği bir çalışmada, besleme tenörü %24,47 olan cevherden kaba zenginleştirme ve temizleme devreleri sonunda %35,15 tenörlü bir konsantre elde edilmiştir (Gül, 2019). Manganez atıklarından manganez ferritin kazanılması amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada indirgeyici kavurma ve çok aşamalı manyetik ayırma sonucunda %15,12 Mn tenörlü besleme cevherinden %91 verim ile %35,21 tenörlü bir konsantre elde edilmiştir (Peng, Pan, Liu, Yang, & Wang, 2018). Çin'de yapılan bir başka çalışmada, toplam mangan içeriği %14,50 olan düşük tenörlü rodokrozit yatağından manyetik ayırmadan sonra %24,30 mangan tenörlü konsantre %59,61 verimle kazanılmıştır (Yuan, Zhou, Han & Li, 2020-b).

İri boyutlarda satılabilir tenörlerde yüksek verim elde edilirken ince boyutlu cevherde ara ürünün konsantre ile birlikte değerlendirilmesi satılabilir konsantre elde etmek için çok uygun görülmemektedir. Bu sebeple -1150+850 µm boyut aralığında ara ürünlerin boyut küçültme sağlandıktan sonra tekrar manyetik ayırıcıya beslenmesi düşünülebilir. Diğer boyut aralıklarında ise, düşük olan konsantre tenörünü yükseltmek için ilave çalışmalara gerek vardır.

5. Sonuçlar

Değerli minerallerin tane irilikleri ve serbestleşme dereceleri, manyetik ayırmada zenginleştirmeyi etkileyen önemli özelliklerdir. Serbestleşmiş durumdaki

100-150 mikrondan iri taneler kuru manyetik ayırıcılarla kolaylıkla zenginleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada parça halinde getirilen örnekler ufalandıktan sonra sınıflandırılarak deneylerde kullanılmıştır. Bilindiği gibi mangan mineralleri genellikle, kolaylıkla ufalanabilmekte ve ince/çok ince boyutlara geçebilmektedir. Bu durumda ince boyuttaki mangan minerallerinin kuru manyetik ayırıcılarla zenginleştirilmesi güç olmaktadır. İri boyutlu manyetik taneler manyetik alan etkisinde gravite etkisi altında yörüngelerinden saptırılarak ayrılabilirken para manyetik taneler manyetik kuvvetler, tambur üzerinde oluşan merkezkaç kuvveti ve graviteye bağlı olarak hareket etmektedir. İnce boyutlu tanelerde ise taneler arasındaki statik çekim ve tanelerin birbirini manyetik alanda perdelemeleri sebebiyle zenginleştirme verimi düşük olmaktadır. Bu sebeplerle tane boyutlarına bağlı olarak tane boyutu küçüldükçe verimde azalmalar görülmektedir. Bunun nedeni, ince ve çok ince tanelerin manyetik alan tarafından yakalanma olasılığının düşük olması şeklinde açıklanabilir. Bu sebeplerle 150 mikrometre altındaki boyutlardaki cevherlerin yaş manyetik ayırma teknikleri ile incelenmesi daha yerinde olacaktır.

Çalışmada yer alan boyut aralıklarındaki malzemenin (-850+150 µm) ince boyutlarında zenginleştirme verimleri iri olanlara kıyasla daha yüksektir. Bunun sebebi ise tane serbestleşme boyutuna bağlanabilir. Ancak tenörlerinin daha düşük seyretmesi ince tanelerin manyetik çekime daha az tepki vermesi ve manyetik olmayan tanelerin sürüklenme sebebiyle konsantreyi kirletmesi ile açıklanabilir.

Tanelerin manyetik duyarlılığı serbestleşme derecesinin bir fonksiyonu olduğu için serbestleşmemiş tanelerin manyetik ayırıcıdaki davranışı kestirilemez niteliktedir. Ayrıca iri tanelerin manyetik alandan daha fazla etkilenmeleri sebebiyle fazla ufalamaya gitmeden serbestleşme derecesinin hemen üzerinde yapılacak bir ufalama ile maksimum verim elde edilebileceği öngörülebilir.

Manyetik ayırma deneyleri %16,83 Mn içeren cevherden 3 farklı tane boyutu ile 11000 gauss manyetik alana sahip manyetik ayırıcı ile yapılmıştır. Bu deneylerin ayırma verimleri hesaplanmış ve en iyi verim değeri -425+150 µm boyut aralığında elde edilmiştir (% 28,56 Mn içeriği ve % 86,97 verim). En yüksek tenör ise -1150+850 µm boyut aralığında (% 39,42 Mn ve %69,39 verim) elde edilmiştir.

Mangan cevherleri kolay kırıldığından ve şlam boyutundaki tanelerin iri boyutlu tane yüzeylerini kaplamasından dolayı zenginleştirme veriminin düşmesine sebep olmaktadırlar. Tane yüzeylerinin temizlenmesi için yıkanması düşünülebilir. Ancak malzemenin tekrar kurutulacak olması ekonomik açıdan maliyet getireceği ve zaman kaybına sebep

olacağından ince öğütmeden mümkün olduğunca kaçınılması önerilebilir.

Manyetik ayırma deneylerine tane boyu açısından bakıldığında, tane boyutunun arttıkça mangan tenör değerlerinin de artma eğilimi içinde olduğu görülmektedir. Buna sebep olarak iri boyuttaki tanelerin manyetik alandan daha fazla etkilendikleri ve ince tane boyutlarındaki beslemenin, manyetik tambur üzerinde tanelerin birbirini perdelemeleri, sürüklenme yoluyla manyetik tanelerin atık oluğuna kaçmaları ya da manyetik tanelerin konsantreye sürüklenmesi ve son olarak ince tane boyutundan dolayı manyetik çekimden daha az etkilenmeleri gösterilebilir.

Ayrıca manyetik ayırma deneylerinde tenör ve verim değerlerinin daha yüksek olabilmesi için daha dar aralıkta tane boyutuna sahip besleme hazırlanabilir ve özellikle ince tane boyutlarında manyetik ayırıcının tambur hızının daha düşük seçilmesi ayırma etkinliğini artıracaktır. Ancak bu değerlendirmeler işletme açısından bakıldığında hem sınıflandırma hem de zenginleştirme kapasitesi açısından maliyetlerin artmasına sebep olacaktır.

Kuru manyetik ayırıcıların kısıtlarından biri olan ince tane boyutuna sahip cevherlerin zenginleştirilememesi değerli cevher kaybına sebep olduğu için bu çalışmada çalışma boyutu dışında kalan ince fraksiyonun (-150 µm) yaş manyetik ayırıcılarla zenginleştirilmesi araştırılmalıdır.

Bazı mangan minerallerinin manyetik özelliklerinin kavurma yöntemleri ile arttırılabildiği bilinmektedir (Gao ve diğ., 2019, Wu ve diğ., 2014, Yuan ve diğ., 2020). Bu sebeple Karaburun Mangan cevherinin kavurma sonrası manyetik ayırma yeteneğinin de arttırılabileceği araştırılmalıdır.

Özellikle işletilemeyen düşük tenörlü cevher yataklarının ekonomiye katkı sağlayabilmesi için bu tip cevherlerin zenginleştirilebilirliklerinin araştırılması, artan hammadde ihtiyacını da karşılamak için faydalı olacaktır.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

DPT (1996). Yedinci beş yıllık kalkınma planı: madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Metal Madenler Alt Komisyonu, Ankara. Erişim adresi: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/7_Madencilik.zip

DPT (2001). Sekizinci kalkınma planı. Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Metal Madenler Alt Komisyonu, Diğer Metal Madenler Çalışma Grubu, Ankara. Erişim adresi: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/08_Madencilik_MetalMadenler_DigerMetaIMadenler.pdf

Eghbali, R., Hazaveh, P.K., Rashchi, F. ve Ataie, A. (2021). Recovery of manganese from a low-grade waste and valorization via the synthesis of a nanostructured magnetic manganese ferrite. *Materials Science and Engineering: B*, 269, 115177. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115177>

Elliott, R. ve Barati, M. (2020). A review of the beneficiation of low-grade manganese ores by magnetic separation. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science* 59 (1), 1-16. doi: <https://doi.org/10.1080/00084433.2020.1711654>

Eroğlu G. ve Şahiner, M. (2020). Üretimden ticarete mangan. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 30: 99-109. Erişim adresi: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/kutuphane/ekonomi-bultenleri/2020_30/8.pdf

Gao, L., Liu, Z., Chu, M., Wang, R., Wang, Z. ve Feng, C. (2019) Upgrading of low-grade manganese ore based on reduction roasting and magnetic separation technique. *Separation Science and Technology*, 54 (1), 195-206. doi: <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1504795>

Grieco, G., Kastrati, S. ve Pedrotti, M. (2014). Magnetic enrichment of brauniterich manganese ore at different grain sizes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 35(4), 257-265. doi: <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.793680>

Grigorova, I. (2011). Studies and possibilities of low grade manganese ore beneficiation, *Proccessing of XXII World Mining Congress*, 3, 593-598, Istanbul, Turkey.

Gül, T. (2019). *Mangan cevherinin zenginleştirilebilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Güven, O., Burat, F., Kangal, O. ve Acarkan, N. (2012). Beneficiation of low-grade Turkish manganese ore, *XXVI International Mineral Processing Congress (Impc) 2012 Proceedings*, 24 - 28 New Delhi, India.

Hacıfazlıoğlu, H. (2011). Manyetik ayırmadaki son gelişmeler ve alternatif manyetik ayırıcı tiplerinin tanıtılması. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 24 (1), 75-93.

İnce, E. (2014). *Düşük tenörlü mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinin araştırılması*, (Yüksek lisans

- tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Liu, B., Zhang, L., Zhang, Y., Han, G. ve Zhang, B. (2021). Innovative methodology for co-treatment of mill scale scrap and manganese ore via oxidization roasting-magnetic separation for preparation of ferrite materials. *Ceramics International*, 47 (5), 6139-6153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.193>
- Öztürk, H., Kasapçı, C. ve Özbaş, F. (2019). *Manganese Deposits of Turkey*. F. Pirajno et al. (eds.), *Mineral Resources of Turkey, Modern Approaches in Solid Earth Sciences 16*, Springer Nature Switzerland AG. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-02950-0_6
- Peng, N., Pan, Q., Liu, H., Yang, Z. ve Wang, G. (2018). Recovery of iron and manganese from iron-bearing manganese residues by multi-step roasting and magnetic separation. *Minerals Engineering*, 126, 177-183. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.002>
- Singh, V., Chakraborty, T. ve Tripathy, S.K., (2020). A review of low grade manganese ore upgradation processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(6), 417-438, doi: <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634567>
- Şimşek, S., (2011). *Düşük tenörlü mangan cevherlerinin zenginleştirilmesinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Tripathy, S.K., Banerjee, P.K. ve Suresh, N. (2015). Effect of desliming on the magnetic separation of low-grade ferruginous manganese ore. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 22(7), 661 doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1120-0>
- USGS. (2020), Mineral commodity summaries. In *United States Geological Survey*, 104.
- Yuan, S., Zhou, W., Han, Y. ve Li, Y. (2020-a). Individual enrichment of manganese and iron from complex refractory ferromanganese ore by suspension magnetization roasting and magnetic separation. *Powder Technology*, 373, 689-701. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.008>
- Yuan, S., Zhou, W., Han, Y., ve Li, Y. (2020-b). Efficient enrichment of low-grade refractory rhodochrosite by preconcentration-neutral suspension roasting-magnetic separation process. *Powder Technology*, 61, 529-539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.082>
- Wu, Y., Shi, B., Ge, W., Yan, C.J. ve Yang, X. (2014). Magnetic separation and magnetic properties of low-grade manganese carbonate ore. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 67 (2) 361-368, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1212-8>