

MANYETİK AYIRMADAKİ SON GELİŞMELER VE ALTERNATİF MANYETİK AYIRICI TİPLERİNİN TANITILMASI

RECENT DEVELOPMENTS IN MAGNETIC SEPARATION AND INTRODUCTION OF ALTERNATIVE MAGNETIC SEPARATOR TYPES

Hasan HACİFAZLIOĞLU

İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar-İSTANBUL

Yayına Geliş (Received): 30.06.10, Yayına Kabul (Accepted): 25.10.11

ÖZ: Manyetik ayırma yöntemi, yüzyıllar öncesinden beri bilinen ve minerallerin ayrımı için özellikle son yüzyılda kullanımı yaygınlaşan bir ayırma ve zenginleştirme yöntemidir. Bu cihazlar ilk başlarda, sadece manyetit gibi ferromanyetik minerallerin zenginleştirilmesi için kullanılmakta iken, bugün tüm paramanyetik minerallerin zenginleştirilmesi için kullanılabilir. Son yıllarda geliştirilen süper iletkenler ile manyetik ayırma yöntemi de gelişmiş ve en yüksek manyetik alan şiddeti 24000 Gauss seviyelerinden 50000 Gauss seviyelerine kadar çıkmıştır. Bu durum, çok düşük manyetik duyarlılığı olan pirit gibi minerallerin bile zenginleştirilebilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, ayırma boyutları da birkaç mikron seviyelerine kadar düşmüş ve koloidal yapıdaki çamurlardan demirli minerallerin ayrılmasına olanak sağlamıştır. Eddy-akımlı ayırıcılar sayesinde, alüminyum gibi demir içermeyen maddeler ayrılabilmiş ve yeni geliştirilen manyetik sıvılarla platin grubu metallerin etkili bir şekilde zenginleştirilebilirliği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, cevher hazırlama alanında ve cevher hazırlama alanı dışında kullanılan alternatif manyetik ayırıcı tipleri tanıtılmış ve ayrıntılı olarak çalışma prensipleri açıklanmıştır. Ayrıca, manyetik ayırmanın bugünkü durumu ve gelecekteki muhtemel gelişmeleri irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik Ayırıcı, Mıknatıs, Süper İletken, Eddy-Akımlı Ayırıcı, Manyetik Sıvı

ABSTRACT: Magnetic separation is a well known separation and enrichment method for centuries used for separating minerals and especially became prevalent in the last century. These devices initially were used for enrichment of ferromagnetic minerals such as magnetite however they can be used for enrichment of all paramagnetic elements today. With the help of super conductors developed in recent years, the magnetic separation method has also been developed and the magnetic field strength increased from 24000 Gauss to 50000 Gauss levels. As a result, enrichment of minerals like pyrite which has very low magnetic sensitivity could be achieved. Besides the separation dimensions also decreased to a few micron levels and accordingly ferrous minerals can be separated from mud with colloidal structure. Thanks to Eddy-current separators, non-ferrous materials like aluminum can be separated and researches are made regarding the effective enrich ability of platinum group elements can be made with recently developed magnetic fluids.

In this study, alternative magnetic separator types used in ore dressing field and in other fields are introduced and their operation principles are explained in detail. Besides the current situation of magnetic separation and possible future developments are examined.

Key words: Magnetic Separator, Magnet, Super Conductor, Eddy-Current Separator, Magnetic Fluid

GİRİŞ

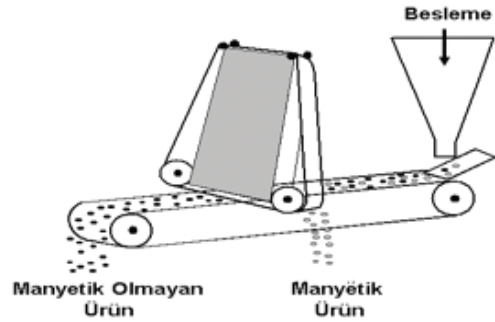
Manyetik ayırma, bir mıknatısın oluşturduğu manyetik alanda çeşitli kuvvetlerin etkisi ile “manyetik olan” ve “manyetik olmayan” tanelerin birbirinden ayrılması işlemidir. Manyetik ayırmanın temelinde, oluşturulan manyetik alanın rolü büyük olup, manyetik alan şiddeti ayrılacak olan mineralin manyetik duyarlılığına göre değişiklik göstermektedir. Minerallerin büyük bir bölümünü kapsayan ve zayıf manyetik özellik gösteren mineraller olan “paramanyetikler” için “yüksek alan şiddetli” manyetik ayırıcılar, güçlü manyetik özellik gösteren mineraller olan “ferromanyetikler” için “düşük alan şiddetli” manyetik ayırıcılar kullanılmaktadır. Manyetik özelliği olmayan taneler ise “diamanyetik” mineraller olarak tanımlanmakta ve oluşturulan manyetik alandan etkilenmemektedir. Bu tip mineraller ancak paramanyetik sıvılarla muamele edildikten sonra manyetik özellik kazanabilmekte ve manyetik alanda zenginleştirilebilmektedir (Watson vd 1997). Bazı uygulamalarda ise düşük manyetik özelliği olan taneler, ısıtılarak yüksek manyetik özelliği olan tanelere dönüştürülebilmektedir (Bluhm vd 1986). Koloidal yapıdaki ultra ince tanelere manyetik salkımlaştırma yapılarak boyutunun büyütülmesi ve takribinde manyetik ayırıcı ile ayrılabilmesi bir diğer alternatif ayırma yöntemidir (Cikcik 1986). Kısacası günümüzde ekonomik olması koşulu ile hemen hemen her minerali, çeşitli işlemlerden geçirerek manyetik ayırıcılarla ayırmanın mümkün olmaktadır.

Manyetik alanı oluşturan mıknatıslar, doğal, yapay ve elektro mıknatıs olmak üzere üçe ayrılırlar. Manyetik ayırıcılarda ilk başlarda ferrit denilen sürekli doğal mıknatıslar kullanılmış daha sonra nadir toprak elementlerinin kullanımı ile yüksek alan şiddetli (>10 000 Gauss) ve yüksek gradyanlı manyetik ayırıcılar geliştirilmiştir. Son 50 yıl içerisinde ise demir ve hava (selenoid) merkezli elektro mıknatısların kullanımı yaygınlaşmıştır (Svoboda ve Fujita 2003).

Doğal mıknatıslar ilk kez Agricola'nın De Re

Metallica (1556) kitabında belirtildiği üzere, bir cevher içerisindeki demirli minerallerin miktarını saptamak amacıyla kullanılmıştır. Bir analiz amacıyla yönelik olmakla birlikte, Agricola'nın bu çalışması, manyetik ayırmanın, minerallerin ayrılmasında ilk uygulamasıdır. Ancak Sokrates tarafından sözü edilen manyetizma olayı M.Ö.550 yıllarına kadar uzanmaktadır. Manyetik ayırmanın, bir cevher zenginleştirme yöntemi olarak, endüstriyel çapta ilk uygulaması, 1792 yılında, İngiltere'de William Fullarton tarafından demir cevherinin zenginleştirilmesi için alınan bir patentle başlamaktadır. Daha sonra bunu, 1849 yılında ABD'de alınan başka bir patent izlemiştir (Yalçın ve Ateşok 1980; Özeren 1981; Ekmekçi 1990; Svoboda ve Fujita 2003).

Günümüzde kullanılan manyetik ayırıcıların temelini oluşturan bazı önemli eski tip manyetik ayırıcılar; Ransom Cook'un elektro-manyetik kuru tamburlu ayırıcısı (1849); John Smith'in durağan mıknatıslı kuru makaralı ayırıcısı (1870); Ball ve Norton'un paralel bantlı kuru ayırıcısı (1890); Wetheril'in yüksek alan şiddetli çapraz bantlı kuru ayırıcısı (1896) (Şekil 1); Forsgren'in düşük alanlı matris tipi yaş manyetik ayırıcısı (1897); Gröndal'in yaş tamburlu ayırıcısı (1899); Korda'nın yüksek alan şiddetli indüklenmiş rotor tipi kuru ayırıcısı (1905); Rapid'in yüksek alan şiddetli döner diskli kuru ayırıcısı (1920); Dings ve Roche'nin bantlı yaş ayırıcısı (1922)'dir. (Özeren 1981). Günümüzdeki manyetik ayırıcıların çoğu yukarıda zikredilen ayırıcıların değişik tasarımları ile üretilmektedir.



Şekil 1. Çapraz bantlı manyetik ayırıcı.

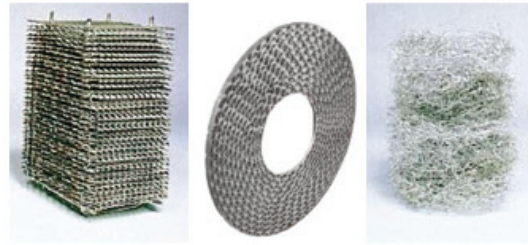
Figure 1. Cross-belt magnetic separator.

Manyetik ayırma ile zenginleştirme yönteminin en büyük aşaması, 1960 yılında yüksek alan şiddetli Jones manyetik ayırıcısının geliştirilmesi ile olmuştur. 10 yıl sonra bu cihazın endüstriyel ölçekteki uygulamaları başlamıştır (Önal, 1985). Yine 1970’li yıllarda yüksek alan şiddetli neodyum (Nd) gibi nadir toprak elementleri, alüminyum (Al) ve kobalttan (Co) oluşan sabit mıknatıslı sürekli manyetik ayırıcılar (RE manyetik ayırıcılar) geliştirilmiştir. Bu manyetik ayırıcıların o döneme kadar bilinen en güçlü sürekli manyetik ayırıcılar olduğu ve alan şiddetlerinin 22 000 Gauss’a kadar çıkabildiği belirtilmiştir (Arvidson, 1985; Davy, 1990; Marinescu, 1989; Ekmekçi, 1990). Günümüzde bu tip manyetik ayırıcılar farklı firmalar tarafından kuru ayırma işlemleri için tambur veya rulo tipi olarak imal edilmektedir.

1980’li yıllarda deneysel ölçekte geliştirilen ve 90’lı yıllardan itibaren endüstriyel ölçekte kullanıma başlayan “süper iletkenli” manyetik ayırıcılar günümüzün en yüksek alan şiddeti oluşturabilen yeni nesil manyetik ayırıcılarıdır. Bu ayırıcılar ile elde edilen manyetik alan şiddeti 50 000 Gauss (5 Tesla)’dır. Eriez ve Outotec firmaları tarafından üretilen bu cihazların manyetik alan şiddetinin 150 000 Gauss’a kadar çıkabileceği belirtilmektedir (Unkelbach ve Wasmuth, 1990; Fears, 2004). Yine son yıllarda geliştirilen Eddy-akımlı ayırıcılar ve manyetik sıvılar ise daha çok demir içermeyen katıların ayrılması için kullanılmaktadır.

Son yıllardaki gelişmeler daha çok yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılar üzerinde olmuştur. Giderek artan incelikte ve düşük manyetik duyarlılıktaki cevherlerin zenginleştirilmesi ve farklı kaynaklardan hammadde temini zorunluluğu bu alanda yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Özellikle son 20 yıl içerisinde çok sayıda yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı geliştirilmiştir. Bu manyetik ayırıcıların ortak özelliği ferromanyetik bir malzemeden oluşan ve “matrix” denilen bir dolgu malzemesini ihtiva etmeleridir (Şekil 2). Bu

malzeme, hareketli bir sistem içerisinde bulunmakta ve elektro mıknatısın kutupları arasında yer almaktadır. Dolgu malzemesinin görevi, manyetik alan şiddetini ve manyetik alan şiddetinin değişim oranını –yani gradyantını- arttırmaktır. Başka bir deyişle, mineral taneleri üzerindeki manyetik çekim kuvvetinin artırılması, noktasal manyetik alan şiddetinden daha çok manyetik alan gradyantını arttırmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Minerallerin ayrılmasında manyetik alan şiddeti kadar manyetik alan gradyantınında etkili olduğu belirtilmektedir (Svabota ve Fujita, 2003; Acarkan, 2008).



Şekil 2. Alternatif matris dolgu malzemeleri.

Figure 2. Alternative matrix filling material.

MANYETİK AYIRICILARIN KULLANIM ALANLARI

Manyetik ayırıcılar, 19. yüzyılın sonlarından beri hem cevher hazırlama hem de endüstrinin pek çok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlangıçta birkaç bin Gauss gibi düşük alan şiddetlerinde kullanılan bu ayırıcılar, günümüzde 50 000 Gauss’a kadar çıkabilmektedir. Kullanım alanına ve mineralin manyetik duyarlılığına göre 500-50 000 Gauss arasında manyetik alan şiddeti oluşturabilen manyetik ayırıcılar üretilmektedir. Manyetik ayırıcılar, Şekil 3’den görülebileceği üzere başlıca 3 ana alanda kullanılmaktadır.



Şekil 3. Manyetik ayırıcıların kullanım alanları.

Figure 3. Usage areas of magnetic separators.

Cevher zenginleştirme amacıyla kullanılan manyetik ayırıcılar en yaygın kullanım alanına sahip olan manyetik ayırıcı tipleridir. Başta manyetit olmak üzere, nadir toprak elementleri, nikel, elmas, krom, kalay, tungsten, titanyum, manganez, alüminyum, baryum, molibden, germanyum, kil, kum ve seramik hammaddeleri gibi pek çok mineralin zenginleştirilmesinde başarı ile kullanılmaktadır (Acarkan, 2008). Geri kazanma amaçlı olarak, ağır ortam esaslı kömür yıkama tesislerindeki manyetit veya ferrosilikonun geri kazanılması örneği verilebilir. Ağır ortamla çalışan kömür yıkama tesislerinde, ağır ortam oluşturucu olarak kullanılan toz manyetit tambur tipi manyetik ayırıcılar ile geri kazanılmaktadır (Şekil 4). Genellikle 5000 Gauss'un altında bir manyetik alan şiddeti yaratan bu ayırıcılar ile manyetit %99 oranında geri kazanılabilmektedir. Geri kazanma amaçlı bir diğer uygulama ise katı atıklar içersinden demirli parçaların evsel veya endüstriyel atıklardan geri kazanılmasıdır. Özellikle hurda sanayisinde demirli parçaların alüminyum ve plastik gibi diğer paramanyetik veya diamanyetik malzemelerden ayrılması için kullanılabilmektedir.

Manyetik Ayırıcıların Kullanım Alanları



Şekil 4. Düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı.

Figure 4. Low intensity wet magnetic separator.

Manyetik ayırıcılar, cevher hazırlama tesislerinde cevherin kırılması veya zenginleştirilmesi öncesinde koruyucu amaçlı olarak kullanılabilmektedir. Örneğin, ocaktan gelen ve cevhere karışan çeşitli metal parçalarının (profil, kazma ucu, vida, çelik plaka vesaire) kırıcıya girmeden önce tutulması; zenginleştirme cihazlarına verdiği zararın önceden önlenmesi açısından önemlidir. Şekil 5'den görüldüğü üzere bir bant üzerine monte edilen doğal veya elektro mıknatıslar şeklinde tatbik edilmektedir.

Manyetik ayırıcılar yukarıdaki kullanım alanları dışında; çevre, gıda, ilaç, kimya, su, cam, mantar ve tekstil işleri gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilmektedir. Örneğin, günümüzde koloidal çamurlu suların ağır metallerin giderilmesi için yüksek alan şiddetli ve yüksek alan gradyanlı manyetik ayırıcıların kullanıldığı bilinmektedir (Ciesla, 2003).



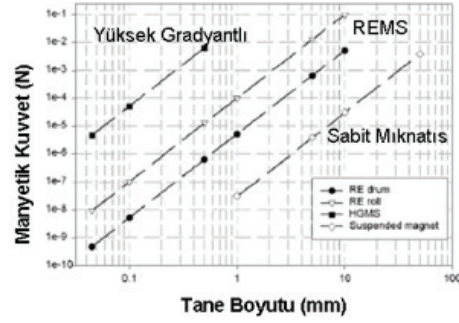
Şekil 5. Koruyucu amaçlı manyetik ayırma

Figure 5. Protective magnetic separation application.

MANYETİK AYIRICI TİPLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Manyetik ayırıcılar, uygulanan alan şiddetine ve ayırmanın yapıldığı ortama bağlı olarak başlıca dört ana guruba ayrılırlar. Uygulanan alan şiddetine göre “Yüksek Alan Şiddetli” ve “Düşük Alan Şiddetli” olarak adlandırılan manyetik ayırıcılar, ayırmanın yapıldığı ortamın hava veya su olmasına göre de “Kuru” veya “Yaş” yöntem olarak adlandırılmaktadır (Çizelge 1). Hem yüksek alan şiddetli ayırıcılar, hem de düşük alan şiddetli ayırıcılar yaş veya kuru olarak çalıştırılabilmektedir. Yaş yöntemler genellikle çok ince boyutlu (<100 µm) tanelerin zenginleştirilmesi için kullanılmakta iken, kuru yöntemler nispeten daha iri boyutlu (>100 µm) tanelerin zenginleştirilmesi için kullanılmaktadır. Buradaki kısıtlama, kuru ayırmada taneler arasındaki elektro-statik çekim kuvvetleri ve manyetik alanın etkisi ile tanelerin topaklaşması (flokülasyonu veya koagülasyonu) ile manyetik olmayan minerallerin tutsaklanması (entrapment) ve konsantreye geçerek ayırma verimliliğini düşürmesi şeklinde tanımlanabilir. Her ne kadar yaş manyetik ayırıcılarda da manyetik topaklaşma meydana gelse bile, bu sorun yüksek gradyanlı manyetik ayırıcıların geliştirilmesi ile çözülmüştür. Özellikle koagüle olan tanelerin etkili zenginleştirilmesinde gradyanın büyüklüğü önemli etkiye sahiptir (Özeren, 1981).

Şekil 6’da tane boyutunun bir fonksiyonu olarak, hematit minerali üzerinde, çeşitli manyetik ayırıcıların oluşturduğu manyetik kuvvetler gösterilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi, yüksek gradyanlı manyetik ayırıcı çok ince boyutlarda dahi çok daha yüksek manyetik kuvvetler oluşturabilmiştir.



Şekil 6. Manyetik ayırıcıların oluşturduğu manyetik kuvvetler (Svaboda ve Fujita, 2003).

Figure 6. Magnetic forces formed by magnetic separators (Svaboda ve Fujita, 2003).

ALTERNATİF MANYETİK AYIRICI TİPLERİ

Son 50 yıl içerisinde geliştirilmiş olan ve endüstride en yaygın kullanılan ticari manyetik ayırıcılardan en önemlileri; Jones, Permos, GTML, Permroll, Carpc, Gill, Rapid, Krupp Sol, Carousel, Slon, REMS, Metso Cyclic, PyroMag, Cryofilter, Eddy-current ve bu cihazlara benzer imitasyon manyetik ayırıcılardır (Çizelge 1). Bu ayırıcılara ait teknik özellikler “düşük alan şiddetli”, “yüksek alan şiddetli” ve her bir tipin “kuru” ve “yaş” uygulamaları olmak üzere başlıca dört gurup halinde aşağıda verilmiştir.

Düşük Alan Şiddetli Kuru Manyetik Ayırıcılar

Düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılar grubuna bant üstü mıknatıslar (Şekil 5), bant tipi (Şekil 7) ve tambur tipi (Şekil 8) ayırıcılar girmektedir. Daha çok koruyucu amaçlı ve yüksek manyetik duyarlılığı olan minerallerin diamanyetik tanelerden uzaklaştırılması için kullanılmaktadır.



Şekil 7. Bant tipi manyetik ayırıcı (Metso).

Figure 7. Bant type magnetic separator (Metso).

Çizelge 1. Endüstride kullanılan ticari yaş ve kuru, yüksek ve düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı tipleri.

Table 1. Industrial magnetic separators; wet and dry, high and low intensity magnetic separators.

Manyetik Ayırıcı Tipi (Üretici Firma Adı)	Manyetik Alan Şiddeti (Max.Gauss*)	Çalışma Ortamı (Yaş/Kuru)	Uygulama Tane Boyu (mm)	Endüstriyel Uygulama Alanları
JONES (HWedag)	17 000	Yaş	1-0,020	Hematit, limonit, götit, siderit, kromit, nikel, çinko ve seramik hammaddeleri.
PERMOS (HWedag)	6 000	Yaş/Kuru	10-0,100	Kömür yıkama tesislerinde manyetitin geri kazanılması, hematit, götit vs. zenginleştirme.
GTML (HWedag)	15 000	Kuru	12-0,500	Manyezit, silikon karbit, refrakterler ve korendom zenginleştirmede.
CAROUSEL (Metso, Eriez)	15 000	Yaş	-1+0,001	Galen, refrakter malzemeler, fosfat, sfalerit, kaolen ve seramik killerininin zenginleştirilmesinde
CYCLIC (Metso)	20 000	Yaş	-1+0,001	Kaolen, galen, kalkopirit, sfalerit, silis kumu, kömür, fosfat, seramik hammaddeleri.
CARPCO (----)	17 000	Kuru	-1+0,100	Eskiden endüstriyel minerallerin ve sahil kumlarının zenginleştirilmesi için kullanılmıştır.
GILL (----)	14 000	Yaş	-1+0,010	Eskiden sahil kumlarının zenginleştirilmesi için Avustralya'da kullanılmıştır.
KRUPP SOL (----)	17 000	Yaş	1-0,020	Eskiden hematit, limonit, kromit gibi minerallerin zenginleştirilmesi için kullanılmıştır.
ROCHE WHIMS (Roche)	20 000	Yaş	-1+0,010	Sahil kumlarının zenginleştirilmesi için uygulamaları vardı.
SLON (Outotec)	15 000	Yaş	-1,3+0,005	Demir cevherleri, ilmenit, manganez, kromit, silis kumu ve feldispatların zenginleştirilmesi.
CRYOFILTER (Outotec)	50 000	Yaş	-0,5+0,000	Koloidal tanelerin ve kaolenin saflaştırılması (beyazlaştırma).
FERROUS WHELL (Eriez)	15 000	Yaş	-1,3+0,005	Demir cevherleri, ilmenit, manganez, kromit, silis kumu ve feldispatların zenginleştirilmesi
PYROMAG (Outotec)	2 500	Eriyik	-	Demir-Çelik ve izabe tesislerinde eriyikten kül, karbon, cüruf ayrımı.
PERMROLL (Bateman, Eriez)	21 000	Kuru	50 – 0,075	Manyezit, elmas, boksit, kromit, hematit, limonit ve diğer endüstriyel hammaddeler için.
REMS (yurt içi ve yurtdışı pek çok firma)	21 000	Kuru	50-0,075	Manyezit, elmas, boksit, kromit, hematit, limonit, şamot, şiferton, asbest, kireçtaşı, talk, bentonit, ilmenit, feldispat zenginleştirme.
Manyetik Filtre (Metso)	15 000	Yaş	-1 +0,005	Boru içerisinden akan muhtelif manyetik minerallerin tutulması.
Eddy-Akımlı Ayırıcı (Eriez)	15 000	Kuru	100+0,1	Geri dönüşümlü, metalik veya metalik olmayan maddelerin birbirinden ayrılmasında. alüminyumun geri kazanılmasında

*Manyetik alan şiddetleri 500-5 000 Gauss arası Düşük Alan Şiddetli; 5 000-10 000 Gauss arası Orta Alan Şiddetli, 10 000 Gauss'un üstü ise Yüksek Alan Şiddetli Manyetik ayırıcılar olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 7’de gösterilen bant tipi manyetik ayırıcının oluşturduğu manyetik alan şiddeti 500-5 000 Gauss arasında değişmektedir. Besleme boyutu 300 mm’ye kadar çıkabilmekte iken, ayırma alt boyutu genellikle 0,5 mm’in üstündedir. Bant hızı 2 m/sn olup, saatlik kapasiteleri 400 tona kadar çıkabilmektedir (Metso Minerals, 2009).

Tambur tipi kuru ayırıcılar ise standart hızlı (20-45 dev/dk) veya yüksek hızlı (40-200 dev/dk) olarak çalıştırılabilmektedir (Şekil 8). Yüksek hızlı manyetik tamburlar, 0,8 mm veya daha ince malzemeden oldukça yüksek tenörlü konsantre elde etmek için kullanılır. Kuru manyetik konsantre eldesi ve baca tozlarındaki manyetik içerikli malzemenin kazanılması başlıca kullanım alanlarıdır (Acarkan, 2008). Cevherin nem içeriği %5’i geçmemek koşulu ile manyetit, franklinit, lösit gibi ferromanyetik minerallerin ön zenginleştirmesinde de kullanılabilir. Besleme boyutu 25 mm ile 0.1 mm arasında olup, tambur çapına bağlı olarak kapasiteleri saatte 200 ton’a kadar ulaşabilmektedir (Metso Minerals, 2009).



Şekil 8. Düşük alan şiddetli tambur tipi kuru manyetik ayırıcı tipleri.

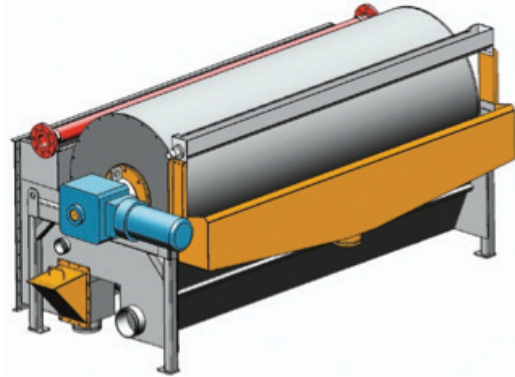
Figure 8. Drum type low intensity dry magnetic separator.

Düşük Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırıcılar

Düşük alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılar 10 mm veya daha ince (birkaç 10 mikrona kadar) tanelerin zenginleştirilmesinde kullanılır. Bu ayırıcı-

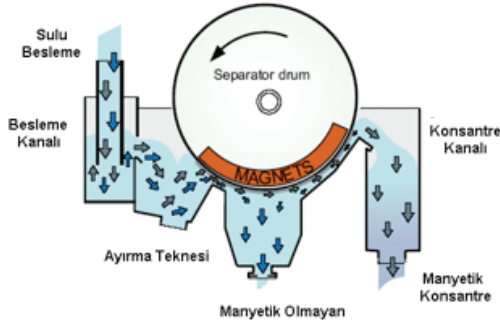
cılarda sabit veya elektromıknatıslar kullanılabilir (Acarkan, 2008). Günümüze kadar değişik türlerde imal edilen bu ayırıcıların en yaygın kullanılan tipi Şekil 9’da gösterilmiş olan tambur tipi ayırıcılardır.

Yaş tambur tipi ayırıcılarda, Şekil 10’dan görülebileceği üzere sulu manyetit ve gang mineralleri tekne içerisine beslenmekte ve suyun akış hareketi ile manyetik ayırıcının yüzeyine temas ederek geçmektedir. Ayırıcının 3/1’lik kısmında yer alan sabit mıknatıs, manyetik özelliği olan taneleri tamburun yüzeyine doğru çekmekte ve tamburun dönüş hareketi ile manyetik mineralleri yukarıya doğru taşımaktadır. Bu esnada, mıknatıstan uzaklaşan manyetik taneler konsantre kanalından alınırken, manyetik olmayan taneler tambur yüzeyine yapışmadıkları için ayırma teknesinin altından alınarak ayırma gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel ölçekte randımanı arttırması amacıyla bu ayırıcılar seri halde çalıştırılmaktadır. Tambur hızları 25-40 dev/dk, çapları ise 1000 mm’ye kadar çıkabilmektedir. Besleme boyutuna bağlı olarak metre tambur genişliği için kapasitesi 10-25 t/s arasında olabilmektedir.



Şekil 9. Düşük alan şiddetli tambur tipi yaş manyetik ayırıcı (Outotec, 2009).

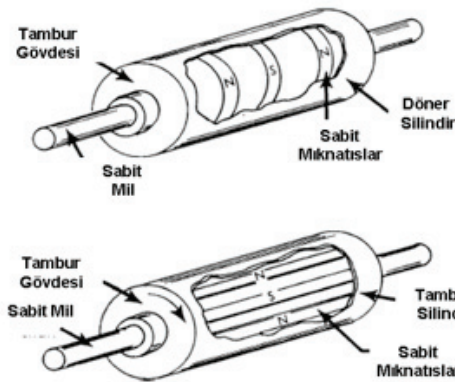
Figure 9. Drum type wet low intensity magnetic separators (Outotec, 2009).



Şekil 10. Düşük alan şiddetli tambur tipi yaş manyetik ayırıcının çalışma prensibi (Metso Minerals, 2009).

Figure 10. Working principle of drum type wet low intensity magnetic separator (Metso Minerals, 2009).

Yaş olarak çalışan manyetik tamburlar genellikle birkaç standart çapta ve mıknatıs dizilişi ile üretilir. Şekil 11’de radyal veya aksel olmak üzere tamburdaki başlıca iki ana mıknatıs dizilimi şekli gösterilmiştir. Tambur tipi manyetik ayırıcılar özellikle manyetit mineralinin zenginleştirilmesinde ve kömür yıkama tesislerinde ağır ortamın geri kazanılması için yaygın olarak kullanılmaktadır.



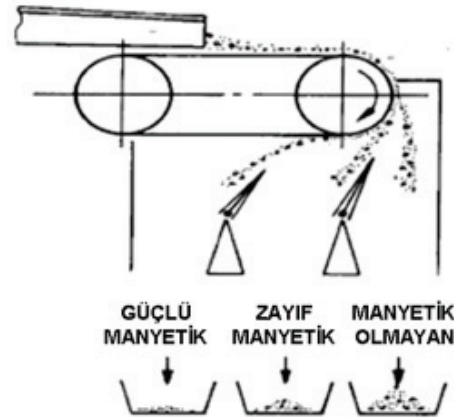
Şekil 11. Tambur tipi ayırıcılarda mıknatıs kutuplarının yerleşimi (Svoboda ve Fujita, 2009).

Figure 11. Arrangements of magnet poles in a drum type magnetic separator (Svoboda ve Fujita, 2009).

Yüksek Alan Şiddetli Kuru Manyetik Ayırıcılar

Bu grup ayırıcılarda, elektro mıknatıs bobinler aracılığıyla 18 000 Gauss civarında bir manyetik alan şiddeti oluşturulabilmektedir. Besleme boyutu $-3+0.1$ mm olup, en büyük sakıncası yüksek alan şiddetinin yaratılması için yüksek miktarlarda enerji tüketmesi ve 0,1 mm’ in altındaki taneleri ayırmada verimsiz olmasıdır. Endüstride çapraz bantlı, döner diskli ve endü silindirik yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırıcılar uzun yıllar kullanılmış; ancak nadir topraklı kalıcı yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıların (REMS) endüstriye girmesi ile bu ayırıcıların endüstride kullanımı terk edilmiştir (Acarkan, 2008).

Son 30 yılda, yüksek alan şiddetli nadir toprak elementlerinden imal edilmiş manyetik ayırıcılar, özellikle zayıf manyetik özelliğe sahip demir cevherlerinin zenginleştirilmesinde ve endüstriyel hammaddelerde bulunan manyetik safsızlıkların uzaklaştırılmasında yaygın olarak kullanılmıştır. En yaygın kullanılan tipi Bateman firmasının **Permroll** manyetik ayırıcısı olup, bunun çalışma prensibi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Rulo tipi 3 ürünli RE (Rare-Earth) manyetik ayırıcısının çalışma prensibi.

Figure 12. Working principle of roll type 3 products RE (Rare-Earth) magnetic separator.

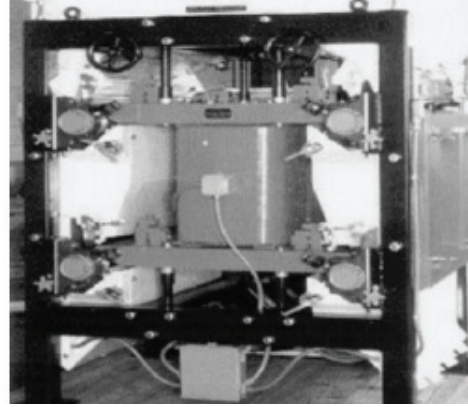
Yüksek alan şiddetli RE tipi Permroll manyetik ayırıcısı 40 dev/dak ile 500 dev/dak arasında değişen geniş bir rulo dönüş hızı aralığına çalışabilmektedir. Çok kuvvetli manyetik özelliğe sahip tanelerin ayırımı söz konusu olduğunda rulo dönüş hızı 700 dev/dak değerine kadar arttırılabilmektedir. Alan şiddeti ise 21 000 Gauss'a kadar çıkabilmektedir. Besleme boyutu 50-0,075 mm arasındadır. Tek cihazda kapasiteleri saatte 10 tona kadar çıkabilmektedir. Bateman firması verilerine göre bugün itibariyle dünyadaki kurulum sayısı binin üzerindedir (Bateman, 2009). Manyezitten serpantin ve demirli minerallerin ayırımı için kullanılan bir Permroll ayırıcısı Şekil 13'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Rulo tipi Permroll manyetik ayırıcısının endüstriyel görüntüsü (Acarkan, 2008).

Figure 13. Roll type Permroll magnetic separator (Acarkan, 2008).

Şekil 14'de RE tipi manyetik ayırıcılar geliştirilmeden önce yaygın olarak kullanılan **Carpco** adlı ve elektro mıknatıslı kuru manyetik ayırıcı gösterilmiştir.



Şekil 14. Rulo tipi carpco manyetik ayırıcısının endüstriyel görüntüsü (Svaboda ve Fujita, 2003).

Figure 14. Roll type Carpco magnetic separator at industrial scale (Svaboda ve Fujita, 2003).

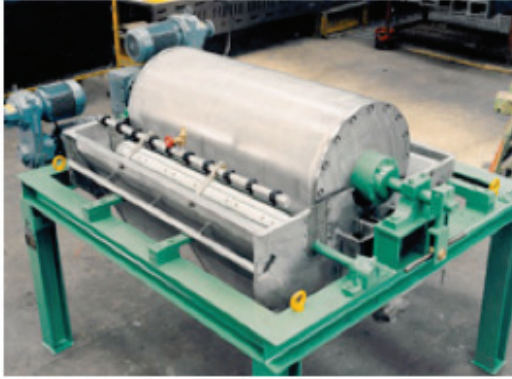
GTML ayırıcısı (Şekil 15), Alman Humboldt Wedag firması tarafından geliştirilmiş olan yüksek alan şiddetli kuru bir manyetik ayırıcı tipidir. Elektrik akımıyla oluşturulan manyetik alan, demir halkalar etrafında meydana gelmekte ve kolaylıkla kontrol edilebilen bu alan yüksek gradyant değerleri sağlamaktadır. Beslenecek malzemenin boyutu 12 mm ile 0,5 mm arasında olup, kapasitesi 0,7 ile 2,4 t/s arasında değişmektedir. Manyetik alan şiddeti 15 000 Gauss olan bu cihaz ile manyezit, silikon karbit, korendom ve bazı refrakter malzemeler zenginleştirilebilmektedir (HWedag, 2009).



Şekil 15. HWedag GTML manyetik ayırıcısı.

Figure 15. HWedag GTML magnetic separator.

Bir diğer kuru olarak çalıştırılabilen ve orta alan şiddetli olarak tabir edilen Humbold Wedag yapımı manyetik ayırıcı tipi Permos ayırıcısıdır. Bu ayırıcı klasik yaş tambur tipi ayırıcıdan esinlenerek geliştirilmiştir (Şekil 16). Tambur çapları 0,6 metre ile 3 metre arasında değişebilmektedir. Yapısındaki mıknatıs neodyum, demir ve bor (Nd-Fe-B) elementlerinden imal edilmektedir. Manyetik alan şiddetleri 6000 Gauss, kapasiteleri tambur çapının artmasına bağlı olarak 50 t/s'e kadar çıkabilmektedir (Humbold Wedag, 2009).



Şekil 16. HWedag Permos manyetik ayırıcısı.

Figure 16. HWedag Permos magnetic separator.

Yüksek Alan Şiddetli Yaş Manyetik Ayırıcılar

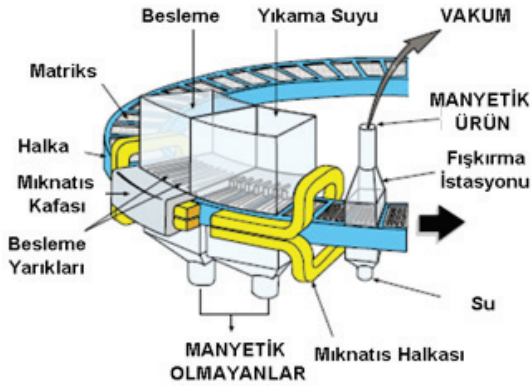
Son yıllardaki en büyük gelişme yaş manyetik ayırıcılarda olmuştur. Yüksek alan şiddetinin yanı sıra yüksek gradyanlı çok sayıda manyetik ayırıcı geliştirilmiştir. Bu manyetik ayırıcılarla 24 000 Gaussluk manyetik alan şiddetlerine ulaşılmış ve birkaç mikron boyutlarına kadar ayırma mümkün olmuştur. Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcılar; **karosel** ve **hazne** tipi olmak üzere 2 farklı temel tasarım tipi ile üretilmektedir. Karosel tipi manyetik ayırıcılar, dikey eksen etrafında dönen ve kesiksiz ayırma yapabilen dairesel oluk şeklindeki cihazlardır. Bu sınıfa giren ayırıcıların en önemlileri Gill, Jones, Krupp Sol ve Şekil 17'de gösterilen Metso Mineral'in **Carousel** ayırıcılarıdır. Bu ayırıcının çalışma prensibi Şekil 18'de verilmiştir.

Şekil 18'de çalışma prensibi gösterilen ayırıcının, besleme tane boyutu birkaç milimetre ile birkaç mikron arasında olabilmektedir. Saatlik kapasiteleri 150 tona kadar, Gauss değerleri ise 15 000'e kadar çıkabilmektedir. 150 t/s'lik Metso Carousel cihazı (10 000 Gauss) 66 ton ağırlığında ve 165 kw'lık bir motora sahiptir. Bu cihaz 7 metre uzunluğunda, 7,5 metre genişliğinde ve 4,6 metre yüksekliğindedir. Benzer çalışma prensibi ile üretilen Eriez Firmasının karosel tipi ayırıcısı (WHIMS) 20 000 Gaussa kadar manyetik alan oluşturabilmektedir (Şekil 19). Bu tip cihazlar, çok ince boyutlu kalkopirit, hematit, aplit, apatit, boksit, asbest, fosfat, talk, mika, molibden, spodümen, barit, kalsiyum ve seramik killeri gibi minerallerin zenginleştirilmesi için kullanılabilir (Eriez ve Metso Minerals, 2009).



Şekil 17. Yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı "Metso Carousel" (Metso Mineral, 2009).

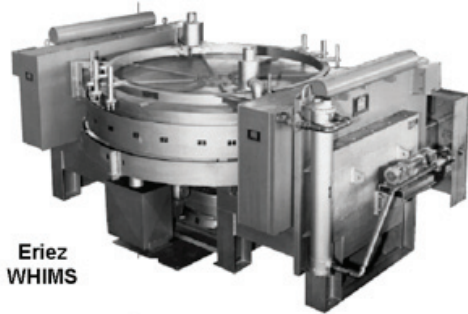
Figure 17. Wet high intensity magnetic separator "Metso Carousel" (Metso Mineral, 2009).



Şekil 18. Metso Carousel ayırıcısının çalışma prensibi (Metso Mineral, 2009).

Figure 18. Working principles of Metso Carousel magnetic separator (Metso Mineral, 2009).

Gill ayırıcısı, üzerine oluklu hale getirilmiş bir rotorlu elektro mıknatıs kutupları arasında dönmesi esasıyla çalışır. Rotora kutupların bulunduğu bölmeden besleme yapılır. Beslenen malzeme içindeki zayıf manyetik mineraller olukların yüzeyinde tutulurlar. Manyetik olmayan mineraller akarak altta toplanırken, olukların üzerinde tutulan manyetik mineraller, olukların manyetik alan dışına çıkmasıyla yıkanarak dışarı alınırlar. Manyetik alan şiddetleri 14000 Gaussa kadar çıkabilen bu cihazların, saatlik kapasiteleri her bir manyetik kutup için 0,8 tondur (Özbayoğlu ve Arol, 1994).



Şekil 19. WHIMS ayırıcısı (Eriez, 2009).

Figure 19. WHIMS separator (Eriez, 2009).

Humboldt Wedag firması tarafından üretilen Jones ayırıcısında, Gill ayırıcısındaki rotor yerine oluklu plakalar kullanılarak kapasite büyük ölçüde artırılmıştır. Bu ayırıcılar hematit ve diğer pek çok zayıf manyetik özelliği olan minerallerin zenginleştirilmesi için halen kullanılmaktadır. Ayırma boyutu 1 mm ile 20 mikron arasında değişen bu cihazın kapasitesi saatte 120 tona kadar çıkabilmektedir (Şekil 20).



Şekil 20. Jones manyetik ayırıcısı (Hwedag, 2009).

Figure 20. Jones magnetic separator (Hwedag, 2009).

Krupp Sol ayırıcısında, geleneksel elektro-mıknatıs tasarımı yerine selenoid tasarımından yararlanılmaktadır. Başka bir deyişle, akım geçen telin merkezinde ferromanyetik bir malzeme bulunmamakta, sarım merkezi hava ile dolu (boş) olmaktadır (Şekil 21).

Bir diğer yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı Roche Mining tarafından geliştirilmiş olan kollektörle beslemeli **WHIMS** ayırıcısıdır. 1978 de ilk uygulaması rutil minerali için olan bu ayırıcı halen üretilen bir manyetik ayırıcı tipidir. Manyetik alan şiddeti 20 000 Gauss'a kadar çıkabilmektedir (Roche Mining, 2005).



Şekil 21. Krupp Sol manyetik ayırıcısı.

Figure 21. Krupp Sol magnetic separator.



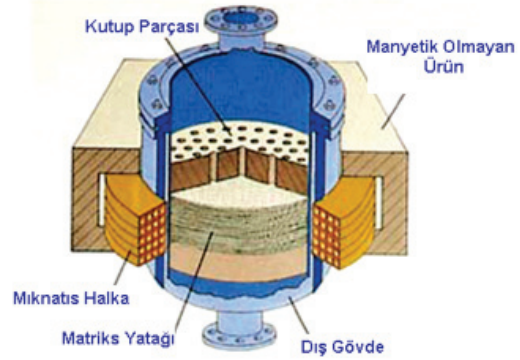
Şekil 22. Roche WHIMS manyetik ayırıcısı.

Figure 22. Roche WHIMS magnetic separator.

Bir diğer yüksek alan şiddetli yaş manyetik ayırıcı Roche Mining tarafından geliştirilmiş olan kollektörle beslemeli **WHIMS** ayırıcısıdır. 1978 de ilk uygulaması rutil minerali için olan bu ayırıcı halen üretilen bir manyetik ayırıcı tipidir (Şekil 22). Manyetik alan şiddeti 20 000 Gauss'a kadar çıkabilmektedir (Roche Mining, 2005).

Hazne tipi bir manyetik ayırıcı olan Metso firmasının **Cyclic** (kesikli) adlı ayırıcısının çalışma prensibi Şekil 23'te gösterilmektedir. Kesikli çalışan bu ayırıcılarda manyetik olmayan mineraller haznenin üstünde bulunan çıkıştan alınmaktadır. Hazne içerisindeki matriks üzerinde tutulan manyetik

mineraller zaman zaman manyetik alan kaldırılarak ortamdaki uzaklaştırılır. Daha çok demir ve titanlı bileşiklerin kaolen mineralinden ayrılmasında kullanılmaktadır. Bu ayırıcıların en büyük avantajı düşük demir oranı nedeni ile diğer manyetik ayırıcılara kıyasla daha hafif olmasıdır. Ancak yüksek enerji gereksinimleri en önemli dezavantajını oluşturmaktadır (Acarkan, 2008). Manyetik alan şiddetleri 20 000 Gaussa kadar çıkabilmektedir.



Şekil 23. Hazne tipi (Cyclic) manyetik ayırıcısının çalışma prensibi (Metso Minerals, 2009).

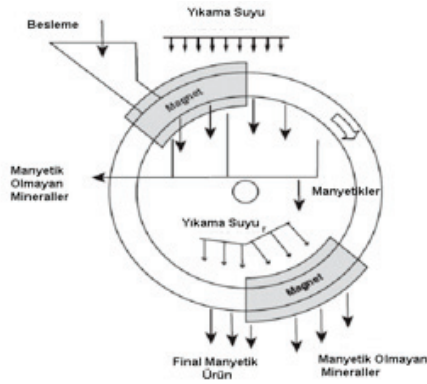
Figure 23. Working principles of cyclic magnetic separator (Metso Minerals, 2009).

Karousel tipi manyetik ayırıcıların en büyük dezavantajı seçimliliğin düşük olması ve matriks malzemesinin -ki bunlar bilyalar, çubuklar, oluklu plakalar ve çelik yünü olabilmektedir- ince boyutlu tanelerle zamanla tıkanmasıdır. Bu sakıncaların ortadan kaldırılması için, Şekil 24'de çalışma prensibi gösterilen halka şeklinde dönen yatay rotorlu manyetik ayırıcılar geliştirilmiştir. Başka bir deyişle, karosel tipi manyetik ayırıcının dikey olarak döndürülmesi şeklinde düşünülebilir.

Eriez firmasının üretmiş olduğu, **Ferrous Wheel** isimli ve yatay rotorlu bu yaş manyetik ayırıcıda, pülp halindeki besleme üst kısımdan yapılmakta ve tanecikler matriks malzemesinin içinden geçerken manyetik olan taneler bunların arasında tutulmaktadır. Halka ile birlikte dönen matriks üzerinde-

ki malzeme daha sonra verilen yıkama suyu ile halkanın ortasından alınarak ayırım gerçekleştirilmektedir. Matriks hareketli olduğu için tıkanma yaşanmaktadır.

Endüstriyel ölçekteki Ferrous Wheel ayırıcı Şekil 25’de gösterilmiştir. Cihazın dakikadaki devir sayısı uygulama alanına göre 0,3 ile 4 arasında değişmektedir. Halka çapının 2,5 metreye çıkması durumunda kapasitesi saatte 150 tona kadar çıkabilmektedir. Besleme boyutu 1,3 mm ile 5 mikron arasındadır.



Şekil 24. Ferrous Wheel manyetik ayırıcısının çalışma prensibi (Eriez, 2009).

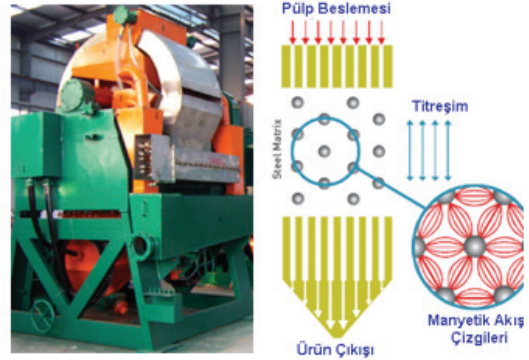
Figure 24. Working principle of Ferrous Wheel magnetic separator (Eriez, 2009).



Şekil 25. Endüstriyel ölçekteki Ferrous Wheel manyetik ayırıcısının görüntüsü (Eriez, 2009).

Figure 25. Ferrous Wheel magnetic separator at industrial scale (Eriez, 2009).

Bazı yeni nesil yatay rotorlu ayırıcılarda, dikey manyetik ayırıcılara titreşim de verilmekte ve bu yolla hem seçimlilik arttırılmakta hem de matrikslerin tıkanması büyük ölçüde önlenebilmektedir. Çin’de geliştirilen ve **Slon** manyetik ayırıcısı adı verilen böyle bir cihaz Outotec firması tarafından üretilmektedir (Şekil 26). Diğer taraftan pülp beslemesinin alttan yapıldığı cihazlar da mevcut olup, bu yolla pülpün hızı ayarlanabilmekte ve daha etkili bir ayırma gerçekleştirilebilmektedir (Cibuka vd, 1985; Xiong, 1994).



Şekil 26. Slon manyetik ayırıcısı (Outotec, 2009).

Figure 26. Slon magnetic separator (Outotec, 2009).

Yatay rotorlu veya bir diğer adıyla dikey yatay manyetik ayırıcılar (VMS) genellikle; demir cevherleri, ilmenit, manganez, kromit, silis kumu ve feldispatların zenginleştirilmesi için kullanılmakta olup, manyetik alan şiddetleri 10 000 ile 15 000 Gauss arasında değişmektedir (Zeng ve Dahe, 2003).

Süper İletkenli Manyetik Ayırıcılar

Süper iletkenlik, bazı malzemelerin hiçbir direnç göstermeksizin elektrik akımını iletmesine verilen addır. Başka bir deyişle, bir tel üzerinden geçen elektriğin sıfır direnç ile iletilmesidir. Çok iyi iletken olan bakır, gümüş ve altın bile süper iletkenlik göstermezler. Bugün itibarıyla oda sıcaklığında süper iletken olan bir madde yoktur. Süper iletkenlik çeşitli malzemeleri -273 °C veya altındaki sıcaklık-

lara soğutmakla elde edilebilmektedir. Bu ısıları sağlamak kolay olmadığı için süper iletkenlerin kullanım alanı da oldukça kısıtlıdır (Jüngst vd, 1984; Ahoranta vd, 2003). Eriez ve Outotec firmaları, süper iletkenleri kullanarak sırasıyla, **Powerflux** ve **Croyfilter** adında iki farklı manyetik ayırıcı tipi geliştirmişlerdir. Buradaki düşük ısı sıvı azot veya çeşitli gazlarla sağlanmıştır. Her iki cihazda da oluşturulan manyetik alan şiddetinin 50 000 Gauss olduğu belirtilmekte ve dünyanın çeşitli yerlerinde (Amerika, Brezilya, Almanya gibi) kaolenin saflaştırılması için uygulamaları bulunmaktadır. Endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılan Cryofilter cihazı Şekil 27’de gösterilmiştir.

Temelde koloidal çamurlardan demirli bileşiklerin uzaklaştırılması ve kaolen mineralinin renginin parlaklaştırılması ve demir, nikel gibi emprütlerin giderilmesi için geliştirilen bu ayırıcıların saatteki kapasitesi 100 tona kadar çıkabilmektedir.



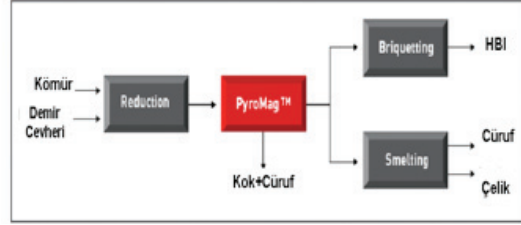
Şekil 27. Süper iletkenli MA (Outotec, 2009).

Figure 27. Super conducting MS (Outotec, 2009).

Sıcak Manyetik Ayırıcılar (PyroMag™)

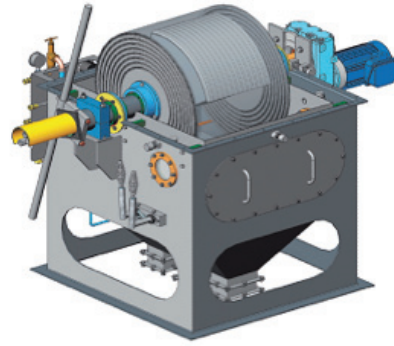
Outotec firması tarafından geliştirilmiş olan **PyroMag™** adlı manyetik ayırıcı, demir-çelik sanayisindeki eriyik sıcak malzemelerden kül, karbon ve cürufaların uzaklaştırılması için kullanılmaktadır. Tambur tipli olarak imal edilen bu ayırıcının manyetik alan şiddeti 2500 Gauss olup, tambur yüzeyleri 600 °C’ye kadar ısıya dayanıklıdır (Outotec, 2009). Demir cevherinin redüksiyonu sonrasında kullanılan

bir PyroMag™ uygulaması Şekil 28’de, cihazın kendisi ise Şekil 29’da gösterilmiştir.



Şekil 28. PyroMag™ ayırıcısının bir uygulaması.

Figure 28. An application of PyroMag™ separator .



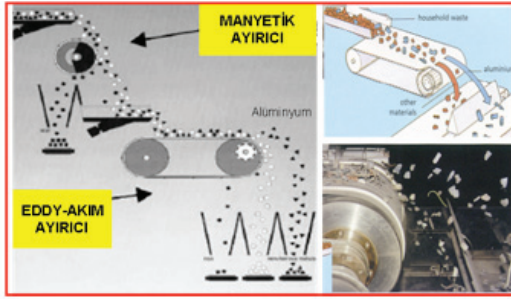
Şekil 29. PyroMag™ (Outotec, 2009)

Figure 29. PyroMag™ (Outotec, 2009)

Eddy-Akımlı Manyetik Ayırıcısı

Eddy-Akımlı ayırıcılar, sert veya yarı-sert alüminyum ambalaj atıklarının (meşrubat kutusu, kaplar vb.) geri kazanılmasında kullanılmaktadır. Tüm evsel atıklar inkinerasyon ile yakıldığında, yakılma sonrasında, atıklar arasında bulunabilecek alüminyum “eddy-akım (eddy-current)” metodu ile diğer atıklardan ayrılmaktadır. Eddy-akımlı ayırıcı (Şekil 30) elektromagnetik bir alan oluşturur ve çöpler bu alandan geçerken alüminyum ve demir içermeyen metal malzemeler burada bir hareket kazanırlar ve böylece dışarı atılarak ayrılmış olurlar (Zhang, 1999). Uygulama boyutu genellikle 5 mm’nin üzerinde olup bu boyutun altında ayırma yapmaları oldukça güçleşmektedir. Ancak son yıllarda 0.1

mm'ye kadar taneleri ayırabilen yaş eddy-akımlı ayırıcılar geliştirilmiştir (Zhang vd, 1999). Bu ayırıcılarda genellikle nadir toprak elementli yüksek alan şiddetli sürekli mıknatıslar kullanılmaktadır (Köhnlechner vd, 2002).

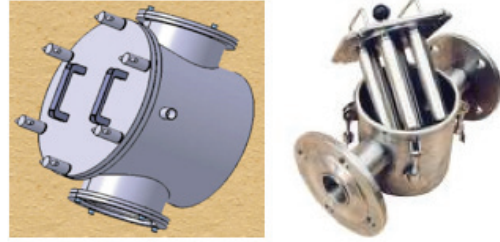


Şekil 30. Eddy-Akımlı manyetik ayırıcı.

Figure 30. Eddy-current magnetic separator.

Manyetik Filtreler

Manyetik filtreler sıvı işleme ve nakil hatlarında sürtünme ve paslanma ile oluşan manyetik metal partiküllerini temizlemek amacıyla kullanılan ekipmanlardır. Bu filtrelerin yapımında yüksek alan şiddetli mıknatıslar (9 000 - 15 000 Gauss) kullanıldığından zayıf manyetik metalleri dahi akan sıvı içerisinden çekip alabilirler. Manyetik filtreler sıvı (ya da yağ) içerisine karışan mikron ölçüsündeki manyetik metal partiküllerini temizlemek maksadıyla tasarlanır ve kullanılırlar. Bu filtreler normal tip ve ısıtmalı filtre olmak üzere iki şekilde tasarlanır. Normal tip filtrelerde temizlenecek sıvı filtrelerin içerisine girer ve manyetik tanelerden arınarak diğer taraftan çıkar. Isıtmalı filtrelerde ise sıvı akışkanlığında sıcaklığın önemli olduğu ısıtmalı boru hatlarında kullanılırlar. Örneğin, çikolata, şurup, reçel, sos vs gibi imalatlarda uygulamaları bulunmaktadır.



Şekil 31. Manyetik filtrenin iç ve dış görüntüsü.

Figure 31. Magnetic filter.

Metso firması tarafından üretilen Sala HGMF adlı bir manyetik filtre Şekil 32'de gösterilmiştir. Bu filtre sıcak veya soğuk sıvı geçen metalik borularda meydana gelen korozyon, paslanma ve aşınma ile oluşan metal partiküllerinin tutulması için kullanılmaktadır (Metso, 2009).



Şekil 32. Sala HGMF manyetik filtresinin görünüşü.

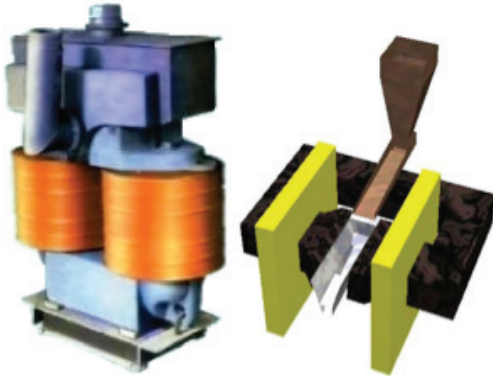
Figure 32. Sala HGMF magnetic filter.

Manyetik Sıvılarla Ayırma

Manyetik sıvılar, taşıyıcı bir sıvının içinde askıya alınmış, yaklaşık 10 nanometre (10×10^{-9} m) boyutundaki ferromanyetik parçacıklarının süspansiyonundan oluşturulmaktadır. Taşıyıcı sıvı olarak, kullanım amacına göre; hidrokarbon yağları, ester veya su seçilebilmektedir. Böyle bir manyetik sıvı, sabit bir mıknatısın yol açtığı manyetik alan sayesinde, çeşitli yönlerde doğru çevrilebilmektedir. Manyetik sıvılar, özellikle boru hatlarında akışkanlığın hızlandırılmasında ve hoparlörde soğutucu olarak

kullanılmaktadır (Altın,2009).

Cevher hazırlama alanında, deneysel ölçekte yapılan çalışmalarla demir içermeyen metallerin manyetik sıvılı ayırıcılarla (FHS) ayrılabilceği görülmüştür. Homojen olmayan manyetik alana, manyetik sıvı konulduğu zaman, kendi yoğunluğundan dolayı yeni bir yoğunluk farkı oluşmaktadır. Bu yoğunluk farkı geniş ölçüde kontrol edilebildiği için çeşitli minerallerin ayırımına olanak sağlamaktadır. Svoboda tarafından 2005 yılında patentlenen ve **ferrohidrostatik** ayırıcı (FHS) olarak bilinen bu ayırıcı ile altın ve platin grubu metaller zenginleştirilebilmektedir. Günümüzdeki uygulaması ise otomobil hurdalarından demirsiz metallerin ayrılması işlemi ile kısıtlıdır. FHS çoğu zaman iyi sonuç vermesine rağmen, halen endüstriyel uygulaması yaygınlaşmamıştır. Ancak, düşük işletim ve yatırım maliyeti, temiz ve çevreye dost oluşu FSH'nin ileride yaygınlaşacağına en önemli kanıtlarıdır (Svoboda, 2000; Svoboda ve Fujita, 2003; Murariu and Sergeant,2006). Ferrohidrostatik ayırıcının bir görüntüsü Şekil 33'da gösterilmiştir.



Şekil 33. Ferrohidrostatik manyetik ayırıcı (FHS) görünümü (Murariu and Sergeant,2006)

Figure 33. Ferrohidrostatik magnetic separator (FHS) (Murariu and Sergeant,2006).

SONUÇLAR

Uzun yıllardır bilinen ve özellikle son yüzyılda kullanımı yaygınlaşan manyetik ayırıcıların, diğer

pek çok sektörde olduğu gibi cevher hazırlama sektöründe de vazgeçilmez bir ayırma cihazı olma özelliğini yitirmeyeceği düşünülmektedir. Manyetik ayırıcıların, manyetik alan şiddetlerinin kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi, düşük maliyetlerle yüksek manyetik alan şiddetlerinin yaratılabilmesi, sistemde ilave bir kimyasalın kullanılmaması ve dolayısı ile çevre ile dost bir yapısının bulunması nedeniyle, manyetik ayırıcıların gelecekte de yaygın bir şekilde kullanılacağı muhtemel görünmektedir. Bu bağlamda, manyetik ayırıcılarla ilgili şimdiki yapılan çalışmalara istinaden gelecekte gerçekleşmesi muhtemel olan bazı araştırmalar ve gelişmeler aşağıda kısaca yorumlanmıştır:

Son yıllarda özellikle üzerinde durulan süper iletkenli manyetik ayırıcılar, yeni süper iletkenlerin keşfi ile yeniden tasarlanacak ve bu tip manyetik ayırıcılarda en büyük maliyet unsurunu oluşturan soğutma işlemi oda sıcaklığında süper iletken olan maddelerin keşfi ile daha da ekonomik hale getirilebilecektir. Diğer taraftan, süper iletkenlerde oluşturulan 50 000 Gauss ve üzeri manyetik alan şiddetinin, mineral ayırma teknolojisi için gerçekten gerekli olup olmadığı halen inceleme konusu olup, ispatlanması gerekmektedir.

Pek çok avantaja sahip olan manyetik sıvıların zenginleştirmeye yönelik ferrohidrostatik ayırıcı (FHS) adında bir cihaz geliştirilmiştir. Gelecekte bu konudaki araştırmaların artması ve manyetik sıvılı yeni cihazların geliştirilmesi muhtemel görülmektedir.

Manyetik alan uygulamaları ya da manyetik kuvvetler cevher hazırlamadaki diğer konvansiyonel ayırma cihazlarına dahil edilebilecek ve yeni karma cihazlar üretilebilecektir. Geçmişte ve günümüzde manyetik flotasyon, flökülasyon ve manyetik siklonlarla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Ancak bu alanda henüz kayda değer bir adım atılamamıştır. Yakın gelecekte, gravite ayırıcılarına manyetik alan uygulaması ilave edilebilecektir. Örneğin spiral hatvelerinin iç kesimlerine ya da sarsıntılı masa

yüzeylerine manyetik özellik kazandırılabilir ve bu yolla hem yoğunluk farkına göre hem de manyetik özelliğe göre ayırma yapabileceklerdir.

Manyetik ayırıcılarda oluşturulan gradyantın artırılması için, yeni mıknatıs şekilleri ve dizilimleri geliştirilecek; alternatif maddelerden yeni mıknatıslar üretilerek manyetik ayırıcılar daha ekonomik hale getirilebilecektir. Ayrıca, değişik matris tasarımları ile manyetik alan şiddetleri güçlendirilebilecektir. Diğer taraftan, özellikle son yıllarda matris içerisine sıkışan tanelerin önlenmesi ve ayırma verimliliğinin artırılabilmesi için hareketli ya da titreşimli matris yapıları da geliştirilmektedir.

Atom düzeyindeki gelişmeler ve manyetik momentlerle ilgili bilgilerin artmasıyla birlikte minerallerin manyetik özellikleri de artırılabilir ve çoğu mineralin ayırımı için uygun çalışma koşulları hazırlanabilecektir.

Bugün itibarıyla, özellikle mikrodalga ısıtma ile bazı minerallerin manyetik özelliğinin artırılabilmesi bilinmektedir. Örneğin pirit ısıtıldığında pirotine dönüşmekte ve manyetik özelliği kat kat artmaktadır. Bu da kömürden piritin daha kolay giderilebilmesi için alternatif bir yöntem olmaktadır. Isıtma dışında yararlanılabilecek çeşitli yöntemlerin (salkımlaştırma gibi) geliştirilmesi muhtemel gözükmektedir. Diğer taraftan, manyetik ayırmada ses dalgalarının etkisi henüz araştırılmış değildir.

Kısaca manyetizma konusunda; çevre, tıp, kimya, ilaç, uzay ve fizik alanlarında meydana gelen her gelişme, cevher hazırlama sektöründe kullanılan manyetik ayırıcıların da gelişmesine ön ayak olacaktır. Örneğin ilk başlarda, hurda sanayisinde kullanılan eddy-akımlı ayırıcılar şu anda altın, gümüş, elmas ve platin grubu metallerin zenginleştirilmesi için umut vaat etmektedir.

SUMMARY

While gravity separation and froth flotation are two important processes for mineral beneficiation,

other methods can be used to concentrate minerals and separate them from gangue and each other. One of these is magnetic separation with growing interest because of new developments in high-field-strength magnets. Magnetic separation is an inherent part of numerous material treatment processes. This technique has at its disposal the magnetic force, which can be selectively controlled over a wide range of values.

It is believed that magnetic separators, which are known for many years and be used commonly in the last century, will not lose their characteristic of being an indispensable separation tool in ore dressing industry. It seems probable that magnetic separators will be used widely, also in the future, due to their characteristics enabling control of magnetic field strengths easily, creation of intense magnetic field strengths with low costs, and the fact that no additive chemicals are used in the system, thus making the nature of magnetic separators environment-friendly.

Superconducting magnetic separators, which have been particularly emphasized in recent years, will be redesigned with the introduction of new superconductors and the cooling process, which constitutes the biggest cost element for this kind of magnetic separators, will become even more efficient with the invention of materials that are superconductors at room temperature. On the other hand, the question whether the 50 000 Gauss and stronger magnetic field intensities, created by means of superconductors, are really essential for mineral separation technology is still being examined and needs clarification.

A device called ferrohydrostatic separator (FHS) has been developed with the intention of enriching through magnetic liquids that have many advantages. It seems possible for the future that the number of researches on this matter will increase and new devices based on magnetic liquids will be developed.

The inclusion of magnetic field implementations

or magnetic forces in other conventional separation tools of ore dressing will be possible and new hybrid devices will be developed. Today, studies on magnetic flotation, flocculation and magnetic cyclones are still being conducted, as they were in the past. However, no significant progress has been made yet on this matter. In the near future it will be possible to include magnetic field implementations in gravity separators. For instance, it will be possible to add magnetic features to the inner parts of spiral pitches or shaking table surfaces, and separations based on both density difference and magnetic characteristics will be possible by this way.

In order to increase the gradient created by magnetic separators, new forms and sequences of magnets will be developed, and magnetic separators will be rendered even more economical by means of producing magnets from alternative substances. Also, it will be possible to increase magnetic field strengths through various matrix designs. On the other hand, also mobile or vibrating matrix structures have been developed particularly in the recent years in order to avoid particles sticking in the matrix and to increase separation efficiency.

With the developments on atomic level and with the increasing amount of information on magnetic moments, it will also be possible to increase the magnetic characteristics of minerals and the operational conditions convenient to separate most minerals will be created.

As of today, it is well known that the magnetic features of some minerals can be enhanced, particularly through microwave heating. For instance, pyrite (FeS_2) transforms to pyrotite (FeS) when heated, and its magnetic feature enhance in many folds. This in turn paves the way for an alternative method for removing pyrite from coal. Development of various methods, other than heating, to be utilized seems probable. On the other hand, the effect of ultrasound waves on magnetic separation has not been examined yet.

Briefly, all developments in the fields of environment, medicine, chemistry, space and physics will also initiate the development of the magnetic separators utilized in ore dressing industry. For instance, eddy-current separators which were originally used in scrap industry, currently promise hope for the enrichment of the group of metals of gold, silver, diamond and platinum.

DEĞİNİLEN BELGELER

Acarkan, N., 2008; “Fiziksel Zenginleştirme Yöntemleri ve Teknikleri”, Cevher ve Kömür Hazırlama Tesislerinde İşletme Denetimi ve Verim Artırma Kursu, YMGV Yayını, İstanbul, 51-88.

Ahoranta, M., Lehtonen, J., Mikkonen, R., 2003; “Magnet design for superconducting open gradient magnetic separator”, *Physica C Superconductivity*, **386**, 398-402.

Altın, V. 2009; “Manyetik Sıvılar”, *Bilim ve Teknik Dergisi*, Sorular. <http://www.biltek.tubitak.gov.tr>

Arvidson, B.R., Fritz, J., 1985; “New Inexpensive High-Gradient Magnetic Separator”, XVth International Mineral Processing Congress, Cannes, 317-329.

Bateman, 2009; <http://www.bateman.com>, 29 Mayıs 2010.

Bluhm, D., Fanslow, G., Nelson, S., 1986; “Enhanced magnetic separation of pyrite from coal after microwave heating”, *Magnetics, IEEE Transactions on Volume 22, Issue 6, Nov 1986*, 1887 – 1890.

Cibulka, J., Zurek, F., Kolar, O., Horacek, M., Hencl, V., Suslikov, G.F., Lomovtsev, L.A., Gramm, V.A., Davydov, Yu.A., 1985. “A new concept of high-gradient magnetic separators”, In: *Proc. 15th Int. Miner. Proc. Congress, Cannes, France*, p. 363.

Cikcik, 1986; “Cevher Hazırlamada Manyetik Salkımlaştırma”, *Madencilik*, **15**, 3, 23-30.

Davy, M., 1990; “Rare-Earth Magnets in Mineral

- Sands Processing”, *Industrial Minerals Processing Supplement*, 9-11.
- Ekmekçi, Z., 1990;** “Yüksek Alan Şiddetli Sürekli Miknatıslı Manyetik Ayırıcılar”: Özellikleri ve Uygulamalar, *Madencilik*, **3**, 40-46.
- Eriez, 2009;** <http://www.eriez.com>, 10 Mart 2010.
- Fears, P., 2004;** “Pure and Simple: Superconducting Magnets”, *Magnetic Separation*, June, 84-89.
- Humbold Wedag, 2009;** <http://www.khd.com>
- Jüngst, K.P., Ries, G., Förster, S., Graf, F., Obermaier, G. Lehmann, W., 1984;** “Magnet system for a superconducting magnetic separator Cryogenics”, **24**, 11, 648-652.
- Köhnlechner, R., Schlett, Z., Lungu, Caizer, C., 2002;** “A new wet Eddy-current separator Resources, Conservation and Recycling”, **37**, 1, 55-60
- Marinescu, M., Marinescu, N., Unkelbach K.H., Scanbel, H.G., Hock, S., Kramming, H., Wagner, R. ve Zoller, R., 1989;** “New Permanent Magnetic Separator With Nd-Fe-B Meets Theoretical Predictions”, *IEEE Transactions on Magnetics*, **25**, 3, 2732-2738.
- Murariu, V. and Sergeant, P.J., 2006;** Modelling of the Separation Process in a Ferrohydrostatic Separator Using Discrete Element Method, *Physical Separation in Science and Engineering*, **2007**, 1-13.
- Metso Minerals, 2009;** <http://www.metso.com>, 10 Mart 2009.
- Outotec, 2009;** <http://www.outotec.com>, 10 Mart 2009.
- Özeren, M.S., 1981;** “Manyetik Ayırım Yönteminin Gelişimi, Güncel ve Gelecekteki Sorunları”, *Madencilik*, 339-354.
- Önal, G., 1985;** “Cevher Hazırlamada Flotasyon Dışındaki Zenginleştirme Yöntemleri”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları*, İstanbul, 86.
- Özbayoğlu, G. ve Arol, A.İ. 1994;** “Manyetik Ayırma”, *Cevher Hazırlama El Kitabı*, Ed., G.Önal, G. Ateşok, 173-205.
- Roche Mining, 2005;** <http://www.rochemining.com>, 10 Mart 2010.
- Svaboda, J., Fujita, T., 2003;** “Recent Developments in Magnetic Methods of Material Separation, *Minerals Engineering*, **16**, 785-792.
- Svoboda, J., 2000;** “Separation in Magnetic Fluids: Time to Meet Technological Needs”, In: *Proc. MINPREX 2000 Congress*, Melbourne, Australia, 297.
- Unkelbach, K.H., Wasmuth H.D., 1990;** “DESCOSA High-Intensity Drum-Equipped Magnetic Separator With Superconducting Magnet”, *Ind. Min.Proc. Supp.*, 48-54.
- Watson, J., Peter, H., 1997;** “Magnetic Separation in a Magnetic Fluid”, *WIPO Patent*, International App. No.6: PCT/GB1996/003146.
- Xiong, D., 1994;** “New Development of the Slon Vertical Ring and Pulsating HGMS Separator”, *Magn. Electr. Sep.* **5**, 211-233.
- Yalçın, T., Ateşok, G., 1980;** “Demir Cevherinin Zenginleştirilmesi”, 20-32.
- Yiğit, E., 1999;** “Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme”, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü*, Zonguldak, 86.
- Zeng, W., Dahe, X., 2003;** “The latest application of Slon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator”, *Minerals Engineering*, **16**, 6, 563-565.
- Zhang, S., Rem, P.C., Forssberg, E., 1999;** “The Investigation of Separability of Particles Smaller Than 5 mm by Eddy-Current Separation Technology”, *Magn. Electr. Sep.*, **9**, 233-254.