

معرفی روش‌های جدایش مغناطیسی

ابراهیم پناهی، دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان r.panahi888@gmail.com
 علی اکبر عبدالله زاده، استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان abdzad@kashanu.ac.ir

مقدمه

بشر از دیرباز خاصیت طبیعی آهنربایی بعضی از اجسام مانند مگنتیت را تجربه کرده است. عده‌ای تشکیل آهنربای طبیعی را ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی زمین و برخی حاصل جریان‌های الکتریکی ناشی از رعد و برق می‌دانند [۱]. یونانیان باستان از ۵۵۰ سال قبل از میلاد با پدیده‌های مغناطیسی آشنا بوده‌اند. با این حال نشانه‌های عملی مغناطیسی و به خصوص جدایش مغناطیسی، خیلی دیر و در اواسط قرن نوزدهم میلادی ظاهر شد [۴]. در حقیقت، تحقیقات و کشفیات فارادی بود که زمینه رشد این پیشرفت را فراهم کرد [۱]. در سال‌های اخیر جدایش مغناطیسی به یک تکنیک قوی برای فرآوری مواد مغناطیسی ضعیف و ذرات بسیار ریز تبدیل شده است [۵].

جدایش مغناطیسی ممکن است به صورت واحد کاملی از فرآیند اولیه یا ثانویه یا عملیات رمق‌گیری برای تولید کنسانتره مورد استفاده قرار گیرد. تکنیک‌های مغناطیسی در فرآوری مواد کاربردهای بسیاری دارد، مانند حذف قطعات فلزی زاید قبل از سیستم‌های خردایش، پرعیارسازی انتخابی کانی‌های مغناطیسی، شستشوی مغناطیسی کانی‌های صنعتی، حذف عناصر مغناطیسی آسیب‌رسان در فرآیندها، بازیابی مواد ارزشمند از انواع باطله‌ها و ضایعات، حذف اجزای پرمخاطره در مقاصد زیست محیطی [۲].

برخلاف روش‌های سنتی نظیر جدایش با مایع سنگین، فلوتاسیون، فلوکولاسیون و ...، جدایش مغناطیسی به مواد شیمیایی نیاز ندارد که این خود موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی و مخاطرات زیست محیطی می‌شود [۵].

چکیده:

روش‌های جدایش مغناطیسی به صورت گسترده در عملیات فرآوری مواد معدنی و به خصوص سنگ آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به پاره‌ای از پیشرفت‌های تحقیقاتی و عملیاتی اخیر در زمینه تکنیک‌ها و ابزارهای مورد استفاده در فرآوری معدنی به روش مغناطیسی پرداخته شده است. ضمن بررسی نوآوری‌های طراحی و بهینه‌سازی ابزارهای ایجاد کننده میدان مغناطیسی و جداکننده‌ها، کاربردهای جدید روش‌های جدایش مغناطیسی در فرآوری ضایعات و باطله‌ها، به فرآیندهایی مانند جدایش مغناطیسی ابررسانا، سیال‌های مغناطیسی، فلوکولاسیون مغناطیسی، پوشش‌کاری مغناطیسی، تشویه مغناطیسی، طبقه‌بندی مغناطیسی پرداخته شده است. جهت‌گیری نوآوری‌ها به سمت بهبود دقت، سهولت عملیات و کاهش هزینه‌های عملیاتی جداکننده‌ها است. به صورتی که جداکننده‌های مغناطیسی از مزایای اقتصادی بیشتری برخوردار باشند. در این رابطه دورنمایی از روند تحقیقات ترسیم شده است.

کلمات کلیدی: جدایش مغناطیسی، جداکننده مغناطیسی شدت پایین، جداکننده مغناطیسی شدت بالا، جداکننده مغناطیسی گرادیان بالا

در یک جداکننده مغناطیسی چندین نیروی رقیب روی ذره عمل می‌کنند. این نیروها عبارتند از: نیروی ثقل، نیروی ماند، مقاومت هیدرودینامیک و نیروهای سطحی و درون ذره‌ای^(۴). ذرات مغناطیسی از ذرات غیرمغناطیسی (یا ذرات مغناطیسی از ذرات کمتر مغناطیسی) تنها در صورتی جدا خواهند شد که:

(۳)

$$F_m^{\text{mag}} > \sum F_c^{\text{mag}} \quad \text{و} \quad F_m^{\text{non-mag}} < \sum F_c^{\text{non-mag}}$$

که در آن: F_m نیروی مغناطیسی، F_c نیروی مقاوم^(۵) و $F_m^{\text{non-mag}}$ و $F_c^{\text{non-mag}}$ نیروهای اعمالی روی ذرات مغناطیسی و غیرمغناطیسی هستند [۵].

در تکنیک‌های جدایش مغناطیسی پیشرفته امروزی، برای تولید میدان‌های مغناطیسی از دوروش الکترومگنت‌ها و آهنرباهای دائمی استفاده می‌شود [۶].

پیشرفت‌های اخیر

آهنرباهای دائمی از چهار جنس ۱- آلیاژهای متداول (برای مصارف سنتی)، ۲- فریت^(۶) (قادر به تولید شدت میدان بالا و در عین حال ارزان)، ۳- عناصر نادر خاکی^(۷) (قادر به تولید شدت میدان تا ۱/۹ تسلا و نیز تولید گرادیان بسیار بالا) و ۴- آلیاژهای سرامیکی ساخته می‌شوند. در دو نوع اخیر که مطالعات و پیشرفت‌های بسیاری در ساخت آنها صورت گرفته و تأثیر شگرفی بر پیشرفت جدایش مغناطیسی داشته‌اند، شدت میدان آهنرباها برای یک دوره نامحدود ثابت می‌ماند [۴]. شکل (۱) روند گسترش مواد مغناطیسی دائمی و به تبع آن ساخت آهنرباهای دائمی را نشان می‌دهد. در این شکل حداکثر انرژی مغناطیسی تولید شده $((B \times H)_{\text{Max}})$ توسط آهنرباهای دائم که از آلیاژهای مختلف ساخته شده‌اند، در مقابل اولین سال کاربرد تجاری شان نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست مهم‌ترین مرحله، ابداع آهنرباهایی از جنس عناصر نادر خاکی در طی حدود ۳۰ سال گذشته است.

الکترومگنت‌ها نیز به انواع مختلف تقسیم می‌شوند. قبلاً از

امروزه با شناخته‌تر شدن مفاهیم اصول مغناطیسی، پیشرفت‌های تکنولوژیکی، پژوهشی و خلاقیتی بسیاری در تکنیک‌های موجود برای کاربرد جدایش مغناطیسی در صنایع مختلف حاصل شده است. همچنین پیشرفت در ساخت مواد مغناطیسی دائم، امکان جدایش مواد با ابعاد بسیار درشت تا کلوئیدها و مواد فرومغناطیسی تا مواد نزدیک به دیامغناطیسی را فراهم کرده است. مزایای اقتصادی که توسط هر جداکننده مغناطیسی جدید ارائه می‌شود، همواره مهم‌ترین فاکتور در نحوه استفاده در مقیاس صنعتی است [۴، ۸].

اصول جدایش با نیروی مغناطیس

میدان‌های مغناطیسی از حرکت بارهای الکتریکی شامل حرکت اوربیتال و اسپین الکترون‌ها در ماده حاصل می‌شوند [۱]. میدانی که اطراف آهنربا را احاطه کرده یا میدان مغناطیسی که توسط جریان الکتریکی ایجاد می‌شود، به طور کمی توسط شدت میدان مغناطیسی (H) توصیف می‌شود. القاء مغناطیسی^(۱) (B) طبق رابطه (۱) با شدت مغناطیس کردن^(۲) (M) و شدت میدان مغناطیس (H) مرتبط است.

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0H(1 + S) \quad (1)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی در خلأ و S تأثیرپذیری مغناطیسی^(۳) است. رفتار مواد در یک میدان مغناطیسی به طور مستقیم با این پارامترها در ارتباط است. تأثیرپذیری مواد فرومغناطیس به میدان مغناطیسی بستگی دارد و با افزایش شدت میدان کاهش می‌یابد تا جایی که کاملاً اشباع شود. از طرفی نیروی مغناطیس ناشی از میدان روی ذره (F) متناسب با شدت و گرادیان میدان (dH/dl) است.

$$F \propto H \frac{dH}{dl} \quad (2)$$

از این رو به منظور تولید نیروی کششی مشخص، تعداد نامحدودی ترکیب میدان و گرادیان وجود دارد که همان اثر را تولید خواهد کرد. تولید گرادیان میدان بالا همانند شدت زیاد میدان یکی از مهم‌ترین جنبه‌های طراحی جداکننده‌ها محسوب می‌شود [۳، ۷].

1-Magnetic induction

2- Magnetisation

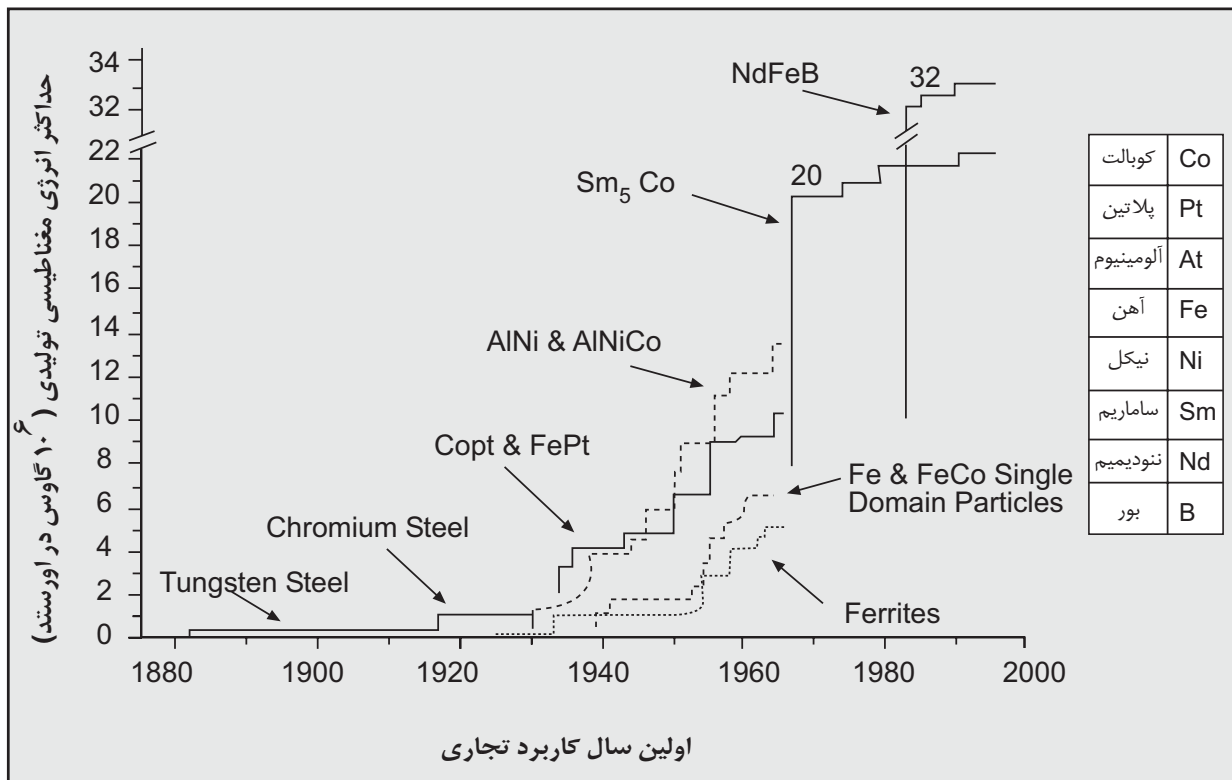
3- Magnetic susceptibility

4- InterParticle

5- Competing Force

6- Ferrite

7- Rare Earth elements(RE)



شکل (۱): روند گسترش مواد مغناطیسی دائمی [۵]

مغناطیسی قابل دستیابی، با اشباع مغناطیسی آهن محدود می‌شود. علاوه بر این بزرگ مقیاس کردن این آهنرباها هم محدود است. چرا که با این کار میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد و وزن تجهیزات بالا می‌رود. در این زمینه با ساخت سلنویدهایی با پوشش آهنی و تولید میدان مغناطیسی زیاد در فضای وسیع پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است.

الکترومگنت‌های هسته آهنی برای تولید میدان مغناطیسی در جداکننده‌های مغناطیسی استفاده می‌شد. با اینکه این آهنرباها هنوز نقش مهمی را دارند اما نقش آنها با ظهور آهنرباهای دائمی و الکترومگنت‌های سلنویید^(۱) با هسته‌ای از جنس هوا، همچنین الکترومگنت‌های مقاومتی^(۲) و ابررساناها^(۳) کاهش یافته است. عیب اصلی الکترومگنت‌های هسته آهنی این است که میدان

اندازه ذرات	نوع مسیر	خاصیت مغناطیسی مواد	جداکننده مغناطیسی مناسب
>75 μ	تر	فرومغناطیس	LIMS
		پارامغناطیس	WHIMS, HGMS / استوانه‌ای
	خشک	فرومغناطیس	LIMS فلکه مغناطیسی، غلتکی آهنربای شبکه‌ای
		پارامغناطیس	HGMS غلتکی، استوانه‌ای نوار متقاطع، غلطک القا شده - گرادیان باز
<75 μ	تر	فرومغناطیس	LIMS
		پارامغناطیس	استوانه‌ای HGMS, WHIMS

شکل (۲): درخت تصمیم‌گیری در جدایش مغناطیسی [۵].

جداکننده‌های مغناطیسی شدت پایین^(۱) و شدت بالای خشک^(۲) و شدت پایین تر^(۳) از مرسوم‌ترین انواع جداکننده‌های مغناطیسی محسوب می‌شوند (شکل ۲). بدون شک مهم‌ترین پیشرفت، گسترش جداکننده‌های مغناطیسی تر با شدت بالا^(۴) و گرادیان بالا^(۵) است. جداکننده‌های خشک در فرآوری کانه‌های عیار پایین و همین‌طور مواد ریزتر از ۷۵ میکرون دچار محدودیت هستند. با استفاده از سیستم پرعیارسازی تر حداقل اندازه ذره برای جدایش مؤثر کاهش داده شده و عملیات پرهزینه خشک کردن نیز حذف می‌شود. شاید مشهورترین ماشین جداکننده مغناطیسی تر شدت بالا، جداکننده جونز باشد. خالص‌سازی کائولن، پرعیارسازی کانه‌های پارامغناطیس آهن و پرعیارسازی ماسه‌های ساحلی کاربردهای موفق این جداکننده‌ها در فرآوری مواد معدنی هستند. در این حوزه‌ها این نوع جداکننده‌ها می‌توانند جایگزین روش فلوتاسیون شوند. البته این دستگاه‌ها نیز دارای معایبی هم چون قابلیت انتخابی ضعیف مواد مغناطیسی و انسداد ماتریکس هستند. ماتریکس شیئی فرومغناطیس مانند گلوله، شبکه، توری یا پشم فولاد و غیره است که در میدان مغناطیس جداکننده قرار می‌گیرد و باعث افزایش قابل توجه در گرادیان میدان مغناطیسی می‌شود. چنانچه فضای بین این ساختارها و شبکه‌ها توسط پالپ مسدود شود، به آن انسداد ماتریکس گویند.

متخصصان جمهوری چک با طراحی جداکننده‌های مغناطیسی قائم^(۶) و چین‌ها با ایجاد مکانیزم نوسان پالپ در داخل ماتریکس در جداکننده SION ضمن برطرف کردن این مشکلات باعث بهبود قابل توجه در بزرگ مقیاس کردن، قابلیت انتخاب بهتر مواد مغناطیسی و تولید میدان مغناطیسی بالا با مصرف متوسط انرژی شده‌اند.

یکی دیگر از پیشرفت‌های حاصله برای القای مغناطیسی بیش از دو تسلا، استفاده از تکنولوژی ابررسانایی بوده است. در سال‌های اخیر از این وسایل تا شدت ۵ تسلا برای فرآوری کائولن استفاده شده است. مصرف کم انرژی، وزن کم تجهیزات و امکان تولید نیروی مغناطیسی زیاد در حجم عملیاتی بالا از مهم‌ترین مزایای این نوع

جدایش است. این جداکننده‌ها می‌توانند در حذف ذرات کلوئیدی مواد پارامغناطیسی مانند آهن با حساسیت مغناطیسی ضعیف و اکسیدهای تیتانیوم مفید باشند.

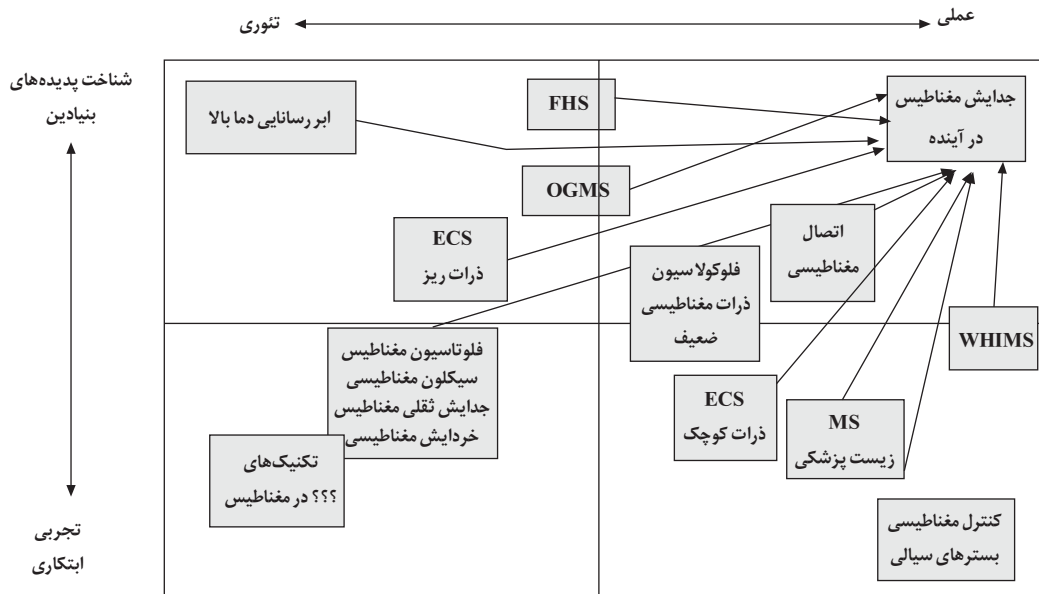
تکنولوژی جدایش مغناطیسی پاسخی مناسب به نیازهای زیست محیطی و اقتصادی در بازیافت فلزات و محصولات فلزی است. جداکننده‌های جریان گردابی^(۷) در این راستا گسترش قابل توجهی یافته‌اند. این تکنیک بر این پایه استوار است که چنانچه ذرات غیرمغناطیسی ولی از نظر الکتریکی رسانا در یک میدان مغناطیسی مناسب قرار گیرند یا در یک میدان مغناطیسی ثابت حرکت کنند، این ذرات دارای حرکت گردابی خواهند بود. بازیابی فلزات غیرآهنی از پالپ‌ها عمده‌ترین کاربرد این جداکننده‌ها است.

بازیافت انتخابی و جدایش فلزات غیرآهنی مانند طلا و فلزات گروه پلاتین را می‌توان با استفاده از سیالات مغناطیسی به عنوان واسطه جدایش انجام داد (مشابه واسطه سنگین). زمانی که یک سیال مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی غیرهموزن قرار گیرد، دانسیته‌ای متفاوت با دانسیته طبیعی خود نشان می‌دهد. این دانسیته ظاهری را می‌توان در دامنه وسیعی از مقادیر (حتی بالاتر از دانسیته تمامی عناصر و مواد شناخته شده) ایجاد کرد. تعداد زیادی جداکننده فروهیدرواستاتیک^(۸) در طی ۲۰ سال گذشته برای جدایش فلزات غیرآهنی از ضایعات اتومبیل و نیز بازیابی طلا، فلزات گروه پلاتین و الماس طراحی شده‌اند. صرفه اقتصادی، زیست محیطی و کاربری آسان سیالات مغناطیسی که می‌توانند به راحتی بازیافت شوند، زمینه گسترش به‌کارگیری این روش در آینده را فراهم می‌کند [۴، ۵، ۷].

طبقه‌بندی مغناطیسی در حین جدایش مغناطیسی تلاشی برای انجام چندین کار در یک زمان و بهبود رابطه دقت و هزینه است. طبقه‌بندی مغناطیسی یعنی توانایی طبقه بندی ذرات مغناطیسی در بخش‌های مختلف تأثیرپذیری مغناطیسی به‌گونه‌ای که حدود آن انتخابی باشد. استفاده از یک وسیله جدایش مغناطیسی به جای چند وسیله در مراحل مختلف و در نتیجه، ارائه مزایای اقتصادی از جمله فواید این نوآوری است [۸].

1- Dry Low Intensity Magnetic Separator(DLIMS)
3- Wet Low Intensity Magnetic Separator(WLIMS)
5- High Gradient Magnetic Separator(HGMS)
7- Eddy-Current separators(ECS)

2- Dry Low Intensity Magnetic Separator(DHIMS)
4- Wet Low Intensity Magnetic Separator(WHIMS)
6- Vertical magnetic separator(VMS)
8- Ferro-hydrostatic(FHS)



شکل (۳): روند کنونی گسترش تکنیک‌های مغناطیسی [۵]

- جدایش مغناطیسی گرادیان باز^(۱) که در شرایط خلا کار می‌کند.

- جداکننده دیسکی اصلاح شده

- لرزش ماتریکس در جدایش مغناطیسی گرادیان بالا

- حامل‌های مغناطیسی^(۲)

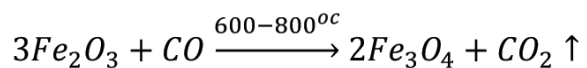
- و تکنولوژی‌های اتصال^(۳) شامل:

پوشش کاری انتخابی مغناطیسی و فلوکولاسیون مغناطیسی. در روش پوشش مغناطیسی، تأثیرپذیری مغناطیسی ذرات ضعیف مغناطیسی توسط ذرات شدیداً مغناطیسی مانند مگنتیت بالا می‌رود. پوشاندن ذرات ریز هماتیت توسط مگنتیت هیدروفوب در سلول فلوتاسیون در حضور اولئات سدیم و جدایش در جداکننده مغناطیسی شدت بالا، مثالی از این روش است.

در پدیده فلوکولاسیون یا آگلومراسیون مغناطیسی، ذرات ریز داخل پالپ در اثر عبور پالپ از بین دو قطب مغناطیس (که بلوک‌های مغناطیس کننده نامیده می‌شوند)، دارای خاصیت فرومغناطیسی شده و به هم می‌چسبند. کوچک بودن ذرات و استعداد آنها در متمرکز کردن خطوط نیرو و نیز شدت بسیار بالای میدان، عوامل مؤثر در تشکیل این پدیده‌اند. از این پدیده می‌توان در پرعیارسازی مگنتیت ریزدانه و در تصفیه آب زاید کارخانه‌های فولاد استفاده کرد.

در بعضی موارد به دلیل پیچیده بودن کانسنگ آهن از لحاظ ترکیبات مینرالوژیکی (تفرق مینرالیزاسیون) و ابعاد بسیار ریز ذرات و قفل شدگی با مواد دیگر نمی‌توان از روش‌های معمول استفاده کرد. در چنین شرایطی می‌توان از تشویه مغناطیسی سود جست. در این روش ابتدا ماده معدنی تا ابعاد ۳-۱۰ میلی متر خرد می‌شود و در حدود ۱۰ درصد وزنی به آن کربن افزوده می‌شود و در ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره‌های دوار با اتمسفر خلا عمل تشویه مغناطیسی را انجام می‌دهند. کربن موجود در کوره ابتدا اکسید آهن را تا حدی احیا می‌کند. هوا نیز در داخل کوره باعث اکسیداسیون ماده معدنی می‌شود. با چنین عملی می‌توان هماتیت، لیمونیت و حتی سیدریت را به مگنتیت تبدیل کرد. مگنتیت حاصل شده پس از خردایش به دستگاه‌های جداکننده مغناطیسی شدت کم منتقل می‌شود [۳].

(۴)



در راستای تلاش برای دستیابی به مقدار حداقلی قابلیت انتخاب در جدایش مغناطیسی برخی دستگاه‌ها و روش‌ها گسترش یافته‌اند. برای مثال می‌توان از موارد زیر نام برد:

دورنمایی از روند تحقیقات

نتیجه گیری

در سال‌های اخیر در زمینه جدایش مغناطیسی تلاش‌های فراوانی به منظور تبدیل ایده‌های نو به تکنیک‌های کاربردی و ویژه، برای استفاده در فرآوری مواد معدنی صورت گرفته است. جداکننده‌های غلتکی مغناطیسی دائمی، جداکننده‌های ماتریکسی ارائه شده توسط جونز، سلنوتیدها با پوشش آهنی و معرفی تکنیک جریان گردابی برای جدایش فلزات غیرآهنی از این جمله محسوب می‌شوند.

پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر در زمینه جدایش مغناطیسی از یک طرف مرهون استفاده از روش‌های کامپیوتری برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی مدارهای مغناطیسی است و از طرف دیگر مرهون ساخت آهنرباهای دائمی از جنس عناصر نادر خاکی است که امکان طراحی مدارهای مغناطیسی شدت بالا با کارایی و قدرت بیشتر را فراهم کرده است. لازم به ذکر است که کلیه تلاش‌های صورت گرفته در راستای کاهش هزینه‌ها بوده و در آینده صنایع تنها شامل جداکننده‌هایی خواهند بود که مزایای اقتصادی بیشتری را ارائه دهند.

روش‌های جدایش مغناطیسی مانند جدایش مغناطیسی ابر رسانا، جدایش جریان گردابی (> 5 میلی متر) و جدایش مغناطیسی زیست پزشکی^(۱) که مبنای تئوریک آنها کاملاً شناخته شده نبوده و عموماً جنبه تجربی دارند، هم‌اکنون بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. تکنیک‌هایی مثل جدایش جریان گردابی برای ذرات ریز (> 1 میلی متر)، جدایش فروهیدرواستاتیک و جدایش مغناطیسی ابررسانای دما بالا که مورد توجه مراکز دانشگاهی است، وارد مراحل عملی موفقیت آمیزی شده‌اند.

در آینده باید منتظر گسترش روش‌های مغناطیسی جدید چه به صورت تئوری و چه به صورت تجربی باشیم. فرآیندهایی مثل فلوکولاسیون مغناطیسی مواد از نظر مغناطیسی ضعیف، جدایش با چرخش ذرات، فلوتاسیون مغناطیسی، جدایش ثقلی با کمک مغناطیس (مانند جیگ و سیکلون مغناطیسی) و خردایش با کمک مغناطیس، نمونه‌هایی از این مقوله هستند (شکل ۳).

منابع

- ۱- رضایی، بهرام. "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی، پرعیارسازی به روش مغناطیسی"، ۱۳۷۸، تهران: نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۲- پناهی، ابراهیم. "تکنولوژی پرعیارسازی مواد معدنی به روش مغناطیسی با تکیه بر پیشرفت‌های اخیر"، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، ۱۳۸۸.
- ۳- بهروزی، کورش. "فرآوری هماتیت از باطله‌های کارخانه تغلیظ مجتمع سنگ آهن گل‌گهر". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۷.
- 4-Svoboda J., Fujita T., "Recent Developments in Magnetic Methods of Material Separation", Minerals Engineering, 2003, Vol. 16, pp785-792.
- 5-Svoboda J. "Magnetic Techniques for the Treatment of Materials", 2004, Kluwer Academic Publishers.
- 6-Norrgan D.A and Mankaso, M.J. "Selection and Sizing of Magnetic Concentrating Equipment, Plant Design/Layout", Mineral Processing Plant Design/Practice and Control Proceeding, Vol.1, 2002, New York, A.L.Mular et al, SME-AIME.
- 7-Wills B.S., A Napier-Munn T.J. "Wills' Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral recovery", 2006, Elsevier Science & Technology Books.
- 8-Augusto P.A., Augusto P, Castelo-Grande T. "Magnetic Classification", Minerals Engineering, 2001, Vol. 15, pp35-43.