نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره ۱۳، شماره۴۱ ، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱تا ۸
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol 13, No 41, 2019., 1-8

پرعیارسازی ذرات ریز کرومیت با استفاده از جداکننده مغناطیسی گرادیان بالای اسلون

شریف حسن کرامت[۱]، محمدرضا گرمسیری[۲*]

[۱] کارشناسی ارشد باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران، sharifkeramat@gmail.com
[۲] استاد گروه مهندسی معدن، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران، m.r.garmsiri@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۹، پذیرش: ۲۱-۰۱-۱۳۹۸)

چکیده

بخش عمده کرومیت تولید شده در معادن به صورت ذرات ریز (۲۰۰ میکرون) است که پرعیارسازی آن‌ها به کمک روش‌های ثقلی بسیار چالش برانگیز است. از سوی دیگر این مواد بسیار با ارزش با هدف افزایش سوددهی فرآیند و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی باید بازیابی شوند. جداکننده مغناطیسی گرادیان بالای اسلون می‌تواند برای پرعیارسازی مواد با خاصیت مغناطیسی کم مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله، امکان بازیابی ذرات ریز کرومیت به کمک جداکننده اسلون در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شده است. برای این منظور، تاثیر پارامترهایی مانند شدت میدان مغناطیسی، ابعاد ذرات، ابعاد ماتریس و نوسانات دستگاه به کمک طراحی آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش شدت میدان مغناطیسی عیار کنسانتره کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش فرکانس و کاهش ابعاد ماتریس، عیار کنسانتره افزایش می‌یابد. علاوه بر آن مشاهده شد که به کمک اسلون در مقیاس آزمایشگاهی عیار کرومیت بالای ۴۰ درصد و بازیابی ۶۵ تا ۹۰ درصد قابل دستیابی است. از این-رو می‌توان گفت فرآوری ذرات ریز کرومیت به کمک دستگاه اسلون امکان‌پذیر است.

کلمات کلیدی

کرومیت، اسلون، بازیابی، شدت میدان مغناطیسی، ابعاد ذرات.

[*] نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

کروم یکی از اجزای ضروری صنایع فولادسازی است که در تولید فولادهای خاص و آلیاژهای فروکروم، مواد نسوز، مواد شیمیایی و رنگ‌ها کاربرد دارد[۱]. کرومیت مهم‌ترین کانی کروم است و حدود ۹۰ درصد از کرومیت استخراج شده از معادن به فروکروم تبدیل می‌شود. همچنین ۸۰ درصد از فروکروم تولید شده در صنعت فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رایج‌ترین روش فرآوری کرومیت استفاده از روش‌های ثقلی مانند میز لرزان و مارپیچ است[۲] اما این روش‌ها حساسیت زیادی به ابعاد ذرات دارند. با کاهش ابعاد ذرات (برای مثال ذرات ریزتر از ۱۰۰ میکرون) راندمان روش‌های ثقلی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد[۲-۴] به طوری‌که اغلب ذرات ریز به جریان باطله منتقل می‌شوند. علاوه بر آن مشکل دیگر روش‌های ثقلی این است که ظرفیت آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌های پرعیارسازی کم است. برای مثال ظرفیت یک میز لرزان برای ذرات ریز کمتر از یک تن بر ساعت است که در مقیاس صنعتی ناچیز است[۲].

بخش زیادی از ذرات ریز تولید شده در حین معدنکاری و فرآوری کرومیت، در اثر جریان آب به جریان باطله منتقل می‌شوند[۴]. از این رو یافتن روشی برای فرآوری ذرات ریز کرومیت اهمیت بسیار زیادی دارد. هدرروی ذرات ریز کرومیت نه تنها از منظر اقتصادی بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز بسیار مهم است[۵].

یکی از کاربردهای گسترده کرومیت، تولید ماسه‌های کرومیتی است که در فرآیندهای ریخته‌گری به طور گسترده استفاده می‌شود. باقیمانده فرآیند تولید ماسه کرومیتی ذرات بسیار ریز کرومیت است که در صورت پرعیارسازی ارزش اقتصادی قابل توجهی دارد. علاوه بر آن ماسه‌های کرومیتی مستهلک شده که غالبا در صنایع کاشی [۶] و بتن [۷, ۸] استفاده می‌شوند نیز پتانسیل بازیابی و استحصال مجدد دارند. از این رو می‌توان گفت که پرعیارسازی ذرات ریز کرومیت اهمیت بسیار زیادی دارد.

فنگ و آلدریچ برای بازیابی ذرات ریز کرومیت از فلوتاسیون ستونی استفاده کردند[۹]. در این پژوهش با استفاده از مواد شیمیایی مختلف بازیابی ۳۰ تا ۴۰ درصد و عیار کنسانتره ۴۳ تا ۴۵ درصد به دست آمد. در فرآوری و خرید و فروش کرومیت، همواره عیار Cr_2O_3 بیان می‌شود و مد نظر است. همچنین استفاده از فلوکولاسیون- فلوتاسیون برای بازیابی ذرات بسیارریز کرومیت نیز مورد توجه قرار گرفته است[۱۰].

علاوه بر آن گزارش‌هایی مبنی بر استفاده از جداکننده موزلی برای استحصال ذرات ریز کرومیت منتشر شده [۱۱] که در آن بازیابی ۶۵ تا ۸۰ درصد به دست آمده است.تریپاتی و همکاران [۱۲] استفاده از ترکیبی از روش‌های ثقلی، فلوتاسیون و مغناطیسی را برای پرعیارکنی ذرات ریز کرومیت بررسی کردند و نشان دادند با هدف دستیابی به عیار بالای ۴۰ درصد، بازیابی در بازه ۱۷ تا ۲۳ درصد حاصل می‌شود که این مقدار بازیابی ناچیز است[۱۲].

برای جداسازی مواد با خاصیت پارامگنتیک یا ذرات ریز از جداکننده‌های مغناطیسی گرادیان بالا، مانند اسلون[1] استفاده می‌شود[۱۳]. در جداکننده اسلون دوغاب روی رینگ عمودی که ماتریس‌ها روی آن قرار دارند، وارد می‌شود. در اثر میدان و گرادیان مغناطیسی، ذرات با ارزش به ماتریس‌ها متصل می‌شوند و با حرکت رینگ به سمت فوقانی منتقل شده و با آب شسته و از ماتریس جدا شده و درون جعبه جمع‌آوری کنسانتره ریخته می‌شود[۲]. در دستگاه اسلون از سیستم ایجاد پالس و ماتریس‌ها برای افزایش کارایی جدایش استفاده می‌شود. به کمک پالس‌ها نه تنها از به تله افتادن ذرات غیرمغناطیسی در میان ذرات مغناطیسی جلوگیری می‌شود و نتیجتا دنباله‌روی کاهش می‌یابد، بلکه برخورد ذرات با ماتریس‌ها افزایش می‌یابد و امکان جمع‌آوری ذرات با ارزش در کلیه سطوح ماتریس‌ها و افزایش احتمال بازیابی آن‌ها فراهم می‌آید[۱۳]. ماتریس‌ها نیز نقش بهبود تاثیر میدان/ گرادیان مغناطیسی و کمینه‌سازی ریسک به تله افتادن ذرات را دارند. این موارد مزایای اسلون نسبت به جداکننده مغناطیسی شدت بالا است و بدین ترتیب جدایش مطلوب‌تر ماده مغناطیسی به دست می‌آید[۱۴]. این ویژگی‌ها موجب شده تا استفاده از این دستگاه روشی امیدبخش برای فرآوری ذرات ریز کانی‌های با خاصیت مغناطیسی کم مانند هماتیت، سیدریت، ایلمنیت و لیمونیت باشد[۱۵]. برای مثال حاجی‌زاده و قربان نژاد به کمک دستگاه اسلون در مقیاس نیمه صنعتی و به کمک باطله کارخانه هماتیت گل‌گهر اظهار کردند که حدود ۵۸ درصد از آهن محتوای باطله با عیار ۵۳ درصد قابل بازیابی است[۱۶]. شکل ۱ نمایی از ساختار و اجزای جداکننده گرادیان بالای اسلون را نشان می‌دهد.

در اکثر صنایع مصرف‌کننده کرومیت، عیار بالاتر از ۴۲ درصد مطلوب است و مقادیر بالاتر از ۴۴ درصد ارزش بسیار زیادی دارد[۱۷]. با توجه به اینکه ذرات ریز کرومیت حاصل از

[1] Slon

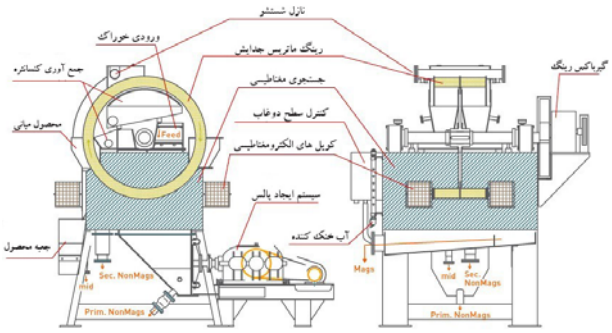
استخراج و یا پسماند تولید ماسه کرومیتی عیار نسبتا کمی دارند، در بازار قابل عرضه نیستند و باید پرعیارسازی انجام شود. از آنجا که کرومیت نوعی کانی پارامغناطیس است، یکی از روش‌های پرعیارسازی آن جدایش مغناطیسی است اما فرآوری ذرات ریز کرومیت با روش مغناطیسی گرادیان پایین مشکل‌ساز خواهد بود.

شرل و دون اظهار کردند امکان بازیابی نرمه‌های کرومیت به کمک اسلون با شدت میدان حداکثر یک تسلا وجود دارد به طوری که بازیابی ۶۸ درصد قابل دستیابی است[۱۷] اما اشاره‌ای به جزییات فرآیند جدایش نشده است.

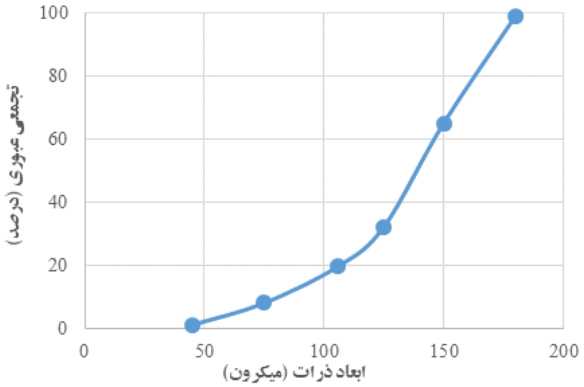
در این مقاله امکان پرعیارسازی ذرات کرومیت به وسیله جداکننده مغناطیسی گرادیان بالای اسلون مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین امکان پرعیارکنی ذرات ریزتر از ۲۰۰ میکرون کرومیت به کمک اسلون بررسی شد. دلیل استفاده از ذرات ریزتر از ۲۰۰ میکرون این است که بر مبنای تجارب گذشته راندمان جدایش این ذرات در روش ثقلی مطلوب نیست. با توجه به کارآیی و ظرفیت نسبتا بالای جداکننده‌های مغناطیسی نسبت به جداکننده‌های ثقلی و همچنین منابع معدنی قابل توجه کرومیت در استان کرمان، در صورت مثبت بودن نتایج، این روش می‌تواند جایگزین یا مکمل روش‌های ثقلی شود و بدین ترتیب گامی قابل توجه در فرآوری ذرات ریز کرومیت برداشته شود.

۲- مواد و روش کار

نمونه معرف ذرات ریز کرومیت به میزان ۱۰۰ کیلوگرم از کنسانتره کارخانه آریاداد فرآور جمع‌آوری شد. این کارخانه در منطقه آبدشت منطقه ارزوییه استان کرمان واقع شده و خوراک آن از سنگ‌های کم عیار تشکیل شده است. در این کارخانه از مارپیچ برای پرعیارکنی کرومیت استفاده می‌شود. عیار Cr_2O_3 در کنسانتره ریزتر از ۱۸۰ میکرون حدود ۳۵ درصد است (که قابل قبول نیست، عیار قابل قبول بیشتر از ۴۰ درصد است) و به همین منظور در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت. نمونه جمع‌آوری شده پس از همگن‌سازی تقسیم شد. آنالیز سرندی نمونه معرف در فراکسیون‌های مختلف انجام و مشخص شد که d_{80} نمونه ۱۶۳ میکرون است. شکل ۲ نتیجه آنالیز ابعاد ذرات را نشان می‌دهد. با هدف ارزیابی تاثیر ابعاد ذرات، نمونه معرف به سه بخش با فراوانی نسبتا برابر در اندازه‌های ۱۵۰+، ۱۰۶-۱۵۰+ و ۱۰۶- میکرون تقسیم شد. عیار Cr_2O_3 در همه بازه‌های ابعادی تقریبا برابر و حدود ۳۵/۵ درصد بود.

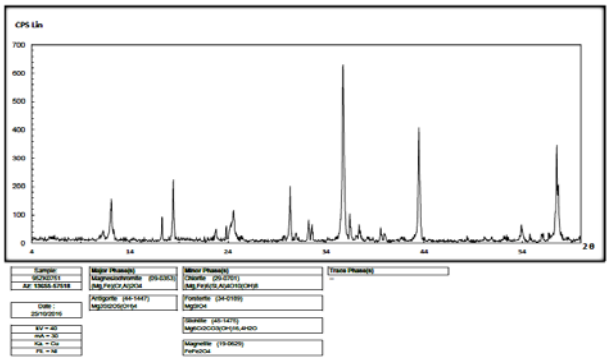


شکل ۱- نمای شماتیک از یک جداکننده گرادیان بالای اسلون.



شکل ۲- آنالیز ابعاد نمونه کرومیت مورد استفاده در این پژوهش

برای ارزیابی محتوای دقیق نمونه خوراک، آنالیز XRD به کمک دستگاه PHILIPS PW 1800 ساخت کشور هلند انجام شد (شکل ۳). نتایج نشان داد کرومیت، منیزیوکرومیت و آنتیگوریت کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده نمونه‌اند. کرومیت یک کانی پارامغناطیس است در حالی که منیزیوکرومیت و آنتیگوریت دیامغناطیس‌اند.



شکل۳- نتایج آنالیز XRD نمونه خوراک آزمایش‌ها

آزمایش‌ها به کمک دستگاه اسلون در مقیاس آزمایشگاهی و در آزمایشگاه شرکت دانش فرآور کانسار واقع در کرمان انجام شد. شکل ۴نمایی از جداکننده آزمایشگاهی اسلون را نشان می‌دهد. برای انجام هر آزمایش ۱۰۰ گرم نمونه از فراکسیون مدنظر مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام آزمایش

نمونه‌های کنسانتره و باطله حاصل از آزمایش، خشک و توزین شدند، سپس محصول مغناطیسی هر آزمایش برای تعیین عیار به روش شیمی‌تر به آزمایشگاه ارسال شد.

شکل ۴- نمایی از دستگاه آزمایشگاهی اسلون

در این مقاله ابتدا آزمایش‌های غربالگری اولیه برای ارزیابی امکان‌سنجی پرعیارسازی ذرات ریز کرومیت به کمک دستگاه اسلون انجام شد و سپس شدت میدان مغناطیسی مطلوب که در آن بهترین نتایج اقتصادی حاصل می‌شود، ارزیابی شد. بدین منظور آزمایش‌ها به کمک چهار متغیر شدت میدان مغناطیسی، بازه ابعادی ذرات، نوع ماتریس و شدت فرکانس نوسان‌کننده در سه سطح به کمک روش تاگوچی در نرم‌افزار DX7 طراحی شد. جدول ۱ متغیرها و سطوح مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- متغیرها و مقادیر سطوح استفاده شده در این پژوهش

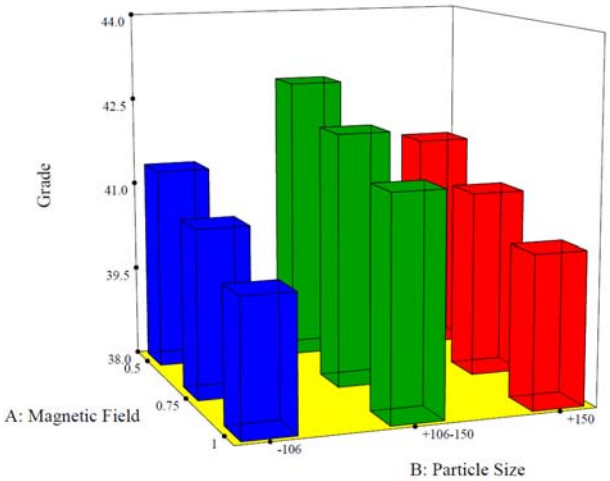
شماره آزمایش	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
شدت میدان مغناطیسی(تسلا)	۰/۵	۰/۷۵	۱
ابعاد ذرات (میکرون)	-۱۰۶	-۱۰۶ +۱۵۰	+۱۵۰
فرکانس پالس (دور بر دقیقه)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
ابعاد ماتریس (میلی‌متر)	۱	۲	۳

۳- ارایه یافته‌ها و تحلیل نتایج

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در مرحله غربالگری، نتایج نرم‌افزار DX7 در نظر گرفته شد.

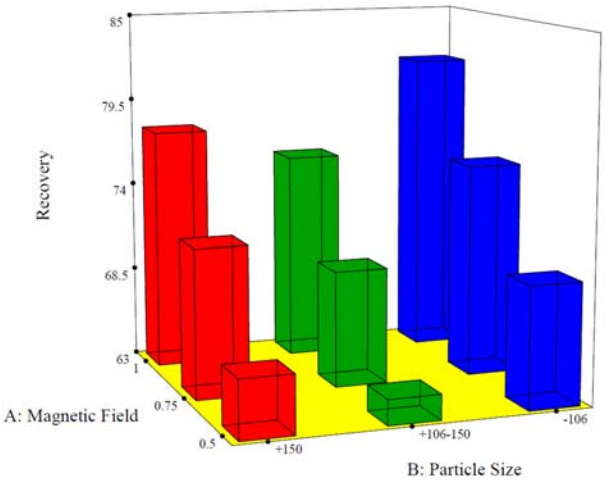
۳-۱- تاثیر ابعاد ذرات و شدت میدان مغناطیسی

از آنجا که در این پژوهش از نوعی از جداکننده‌های مغناطیسی استفاده شده است، طبیعتا شدت میدان مغناطیسی یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر فرآیند است. علاوه بر آن یکی از اهداف اصلی این مقاله بررسی تاثیر ابعاد ذرات بر فرآیند جدایش در دستگاه اسلون بوده است. از این رو با توجه به اهمیت ابعاد ذرات و شدت میدان مغناطیسی، در این بخش تاثیر این دو پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۵ تاثیر شدت میدان مغناطیسی و ابعاد ذرات بر عیار کرومیت و شکل ۶ تاثیر این دو پارامتر بر بازیابی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تاثیربازه ابعادی ذرات و شدت میدان مغناطیسی برعیارکرومیت.

با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۰/۵ تا ۱ تسلا، عیار کرومیت در کنسانتره کاهش یافته است. این رفتار در همه بازه‌های ابعادی مشاهده می‌شود. دلیل این مشاهده این است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، علاوه بر مواد با خاصیت مغناطیسی بالا، مواد با خاصیت مغناطیسی کمتر نیز به کنسانتره منتقل شده و بدین ترتیب عیار کاهش یافته است. علاوه بر آن شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی بازیابی افزایش یافته است. با توجه به رابطه معکوس عیار و بازیابی نتایج به دست آمده در شکل ۶ قابل انتظار بود. بررسی همزمان شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که اگر جداکننده اسلون در نقش رمق‌گیر به کار گرفته شود، بازیابی بالاتر و در نتیجه شدت میدان بیشتری مورد نیاز است ولی در صورتی که هدف به دست آوردن عیار محصول بالاتر است، شدت میدان کمتری باید اعمال شود. بدیهی است که در میانه این دو حالت شرایط بهینه رخ می‌دهد.

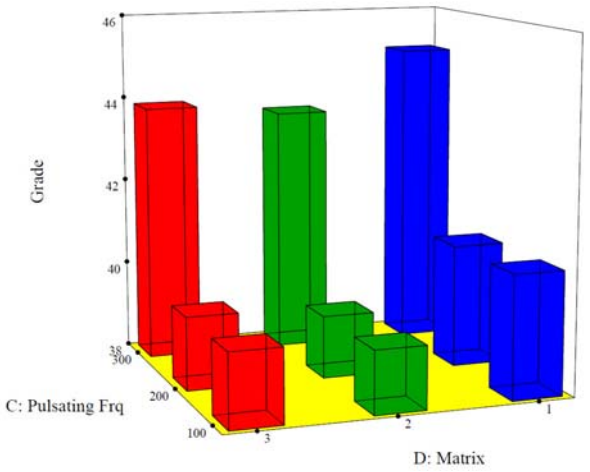


شکل ۶- تاثیرابعاددرات و میدان مغناطیسی بر بازیابی کرومیت

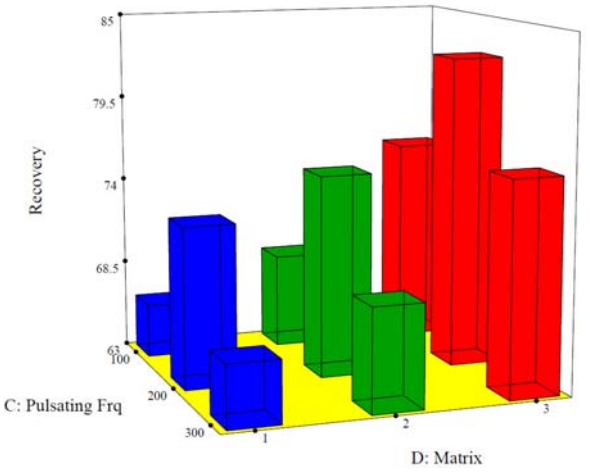
علاوه بر آن شکل ۵ نشان می‌دهد که به کمک بازه ابعادی ذرات ۱۵۰-۱۰۶+ میکرون، بیشترین عیار کرومیت حاصل شد. دلیل این مساله این است که ذرات ۱۵۰+ میکرون نسبتا درشت و ذرات ۱۰۶- میکرون نسبتا ریزند و بدین ترتیب به کمک این دو بازه ابعادی کنسانتره با عیار کمتری به دست آمده است. از یک سو عیار Cr_2O_3 در کنسانتره به دست آمده از ذرات نسبتا درشت به دلیل درجه آزادی کمتر آن‌ها با چالش مواجه است و از سوی دیگر ذرات ریز با مسایلی مانند به تله افتادن ذرات ریز گانگ در میان ذرات با ارزش و انتقال ذرات گانگ آن‌ها به کنسانتره مواجه است، بنابراین می‌توان گفت ابعاد ذرات ۱۵۰-۱۰۶+ مناسب‌ترین بازه ابعادی ذرات برای پرعیارکنی به کمک دستگاه اسلون است. همچنین در آزمایش‌های انجام شده در شکل ۶ مقدار بازیابی در بازه‌های ابعادی بررسی شده بسته به سایر پارامترهای عملیاتی در بازه ۶۴ تا ۸۲ به دست آمد. این مقدار بازیابی در مقایسه با بازیابی ناچیز ذرات ۱۰۶- میکرون در روش‌های معمول ثقلی [۱]، چشمگیر است. از سوی ظرفیت روش‌های ثقلی نسبتا کم است درحالی‌که به کمک دستگاه‌های اسلون موجود امکان فرآوری ۵۰ تن بر ساعت مواد وجود دارد. از این رو می‌توان گفت اسلون نه تنها از منظر کارایی بلکه از منظر ظرفیت نیز نسبت به روش‌های ثقلی برتری دارند.

۲-۳-تاثیر فرکانس پالس و ابعاد ماتریس

در بخش قبل تاثیر ابعاد ذرات و شدت میدان مغناطیسی بر کارایی فرآیند جدایش اسلون مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش تاثیر فرکانس پالس و ابعاد ماتریس به عنوان دو ویژگی اصلی جداکننده اسلون به ترتیب برعیار کنسانتره (شکل ۷) و بازیابی(شکل ۸) بررسی شده است.



شکل۷- تاثیرفرکانس پالس‌ها و ابعاد ماتریس بر عیار کرومیت.



شکل۸- تاثیرفرکانس پالس‌ها و ابعاد ماتریس بر بازیابی کرومیت.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با استفاده از ماتریس با ابعاد ۱ میلی‌متر نسبت به سایر ابعاد ماتریس بیشترین عیار کرومیت به دست آمده است. دلیل این مساله این است که سطح موثر ماتریس ۱ میلی‌متری کمترازسایرماتریس‌ها است و بدین ترتیب ذرات جذب شده خلوص بالاتری دارند. به عبارت دیگر با کاهش ابعاد ماتریس تاثیر گرادیان مغناطیسی بر فرآیند جدایش افزایش می‌یابد. از این رو کاهش ابعاد ماتریس راه حل موثری برای دستیابی به عیار بالاتر کرومیت است.

همچنین از شکل ۷ مشاهده می‌شود به کمک فرکانس ۳۰۰ دور بر دقیقه عیار بیشتری نسبت به سایر فرکانس‌ها حاصل شده است. دلیل این مساله این است که فرکانس بالاتر موجب می‌شود تا از به دام افتادن ذرات گانگو همچنین ذرات با خاصیت مغناطیسی کم درمیان ذرات مغناطیسی جذب شده روی سطح ماتریس جلوگیری شود. بنابراین می‌توان گفت که در اینجا به کمک فرکانس ۳۰۰ دور بر دقیقه و ابعاد ماتریس یک میلی‌متر عیار کرومیت افزایش می‌یابد به طوری‌که عیار

حدود ۴۵ درصد نیز قابل دستیابی است. این مقدار عیار کرومیت بسیار مطلوب است اما در عمل با توجه به رابطه معکوس عیار و بازیابی شرایط باید به گونه‌ای تنظیم شود که از ترکیب عیار و بازیابی بیشترین سوددهی اقتصادی حاصل شود. علاوه بر آن شکل ۸ نشان می‌دهد که بیشترین بازیابی در ابعاد ماتریس ۳ میلی‌متر به دست آمده است. دلیل این مشاهده این است که با افزایش فاصله ماتریس‌ها، ذرات قفل شده با خاصیت مغناطیسی نسبتا کم می‌توانند به کنسانتره راه یابند اگرچه این مساله موجب کاهش عیار کنسانتره خواهد شد. علاوه بر آن شکل ۸ نشان می‌دهد مقدار بازیابی در آزمایش‌های انجام شده در بازه ۶۶ تا ۸۳ درصد بود که نسبت به روش‌های ثقلی بسیار بالاتر است.

از ارزیابی شکل ۵ و شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از جداکننده اسلون، پرعیارسازی ذرات ریز کرومیت با راندمان قابل توجهی انجام می‌شود. این مساله چشم‌انداز روشنی برای بازیابی این ذرات، افزایش بهره اقتصادی تولید و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی دارد. از آسیب‌های زیست محیطی کروم و وجود یون‌های کروم در بدن انسان می‌توان به مشکلات پوستی، گوارشی، تنفسی، کلیه و کبد اشاره کرد.

۳-۳-شرایط بهینه اقتصادی بر حسب شدت میدان مغناطیسی

با توجه به اینکه هدف از این مقاله ارزیابی استحصال ذرات ریز کرومیت به کمک جداکننده اسلون است، در این بخش با ثابت قرار دادن ابعاد ماتریس و فرکانس، رفتار دو فراکسیون ۱۰۶-، ۱۰۶-۱۵۰+ میکرون در شدت میدان‌های مختلف بررسی شد. در بخش ۳-۱ نشان داده شد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی عیار کرومیت در کنسانتره کاهش و بازیابی افزایش می‌یابد. سوال این است که شدت میدان مغناطیسی چقدر باشد تا بیشترین سود اقتصادی حاصل شود. به عبارت دیگر با تغییر شدت میدان مغناطیسی در چه ترکیب عیار و بازیابی بیشترین سوددهی اقتصادی حاصل می‌شود. برای بررسی این موضوع، آهنگ بازدهی کارخانه ذوب[1] به عنوان یک شاخص اقتصادی تعیین‌کننده به ازای مقادیر مختلف عیار و بازیابی محاسبه شد (شکل ۹). جدول ۲ قیمت کرومیت در سال ۲۰۱۷ بر اساس عیار را نشان می‌دهد. هزینه‌های مورد نیاز برای محاسبه شاخص بازدهی کارخانه ذوب بر مبنای هزینه‌های رایج تولید در ایران در سال ۲۰۱۷ در نظر گرفته شده است [۱۸]. برای محاسبه بازدهی کارخانه ذوب، ارزش یک تن کنسانتره با توجه به قیمت‌های یاد شده در جدول ۲ و با توجه به عیار و بازیابی فرآیند محاسبه شد، سپس هزینه حمل و ذوب به ترتیب ۲۰ و ۲۸۰ دلار در نظر گرفته شده و از ارزش کنسانتره کم شد. جداول ۳ و ۴ جزییات محاسبات انجام شده برای دو بازه ابعادی یاد شده را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۳ و ۴ در شرایط بهینه عملیاتی که شامل ماتریس ۱ میلی‌متر و فرکانس ۳۰۰ به دست آمده است.

جدول ۲- قیمت هر تن کنسانتره کرومیت بر حسب عیار آن در سال ۲۰۱۷ [۱۸].

عیار	قیمت (دلار)
۳۶-۳۸	۳۵۰
۳۸-۴۰	۳۸۰
۴۰-۴۲	۴۱۰
۴۲-۴۴	۴۲۵
۴۴-۴۶	۴۳۰
۴۶-۴۸	۴۳۵

جدول ۳- نتایج آزمایش‌هادر بازه ابعادی ۱۰۶- میکرون و محاسبه آهنگ بازده کارخانه ذوب.

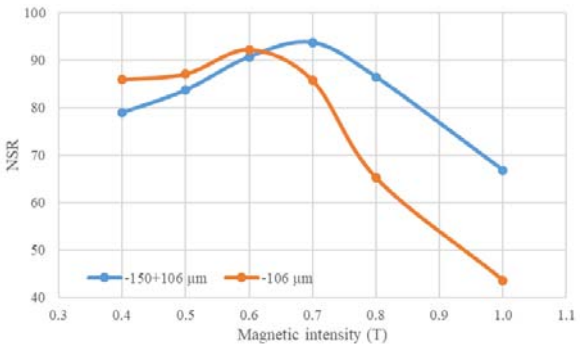
Magnetic Field	Cr_2O_3 (درصد)	Recovery (درصد)	Yield (درصد)	NSR
۰/۴	۴۴/۵	۸۵/۰	۶۶/۱	۸۵/۹
۰/۵	۴۳/۲	۸۷/۰	۶۹/۷	۸۷/۱
۰/۶	۴۲/۱	۸۹/۸	۷۳/۸	۹۲/۳
۰/۷	۴۰/۵	۹۱/۲	۷۷/۹	۸۵/۷
۰/۸	۳۹/۳	۹۲/۶	۸۱/۵	۶۵/۲
۱/۰	۳۷/۶	۹۴/۸	۸۷/۲	۴۳/۶

جدول ۴- نتایج آزمایش‌هادربازه ابعادی ۱۵۰- ۱۰۶+میکرون و محاسبه آهنگ بازده کارخانه ذوب

Magnetic Field	Cr_2O_3 (درصد)	Recovery (درصد)	Yield (درصد)	NSR
۰/۴	۴۶/۷	۷۷/۰	۵۸/۵	۷۹/۰
۰/۵	۴۵/۷	۸۲/۹	۶۴/۴	۸۳/۷
۰/۶	۴۴/۵	۸۷/۵	۶۹/۸	۹۰/۷
۰/۷	۴۳/۰	۹۰/۸	۷۵/۰	۹۳/۸
۰/۸	۴۱/۸	۹۰/۵	۷۸/۶	۸۶/۵
۱/۰	۳۹/۹	۹۳/۸	۸۳/۵	۶۶/۸

[1] Net smelter return (NSR)

برای سهولت تحلیل نتایج به دست آمده نتایج جداول ۳ و ۴ در شکل ۹ ترسیم شده است.



شکل۹- تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر آهنگ بازده کارخانه ذوب به دست آمده برای ذرات ۱۵۰-۱۰۶+ و ۱۰۶- میکرون.

از شکل ۹ مشاهده می‌شود که برای هر دو بازه ابعادی، شدت میدان بهینه‌ای وجود دارد که در آن بیشترین NSR حاصل شده است. برای ذرات با ابعاد ۱۵۰-۱۰۶+ و ۱۰۶- میکرون، بیشترین مقدار NSR به ترتیب در شدت میدان مغناطیسی ۰/۷ و ۰/۶ تسلا حاصل شد که نشان‌دهنده بیشترین سود اقتصادی است. علاوه بر آن مشاهده شد که ذرات ۱۰۶- میکرون به شدت میدان مغناطیسی کمتری برای دستیابی به شرایط بهینه اقتصادی نیاز است.

مشاهده می‌شود برای ذرات ۱۰۶- میکرون عیار و بازیابی Cr_2O_3 در شدت میدان مغناطیسی بهینه به ترتیب معادل با ۴۲/۱ و ۸۹/۸ درصد به دست آمد. علاوه بر آن مشاهده شد که برای بازه ابعادی ۱۰۶-۱۵۰+ میکرون عیار و بازیابی در مقدار بهینه شدت میدان مغناطیسی به ترتیب معادل ۴۳ و ۹۰/۸ درصد به دست آمد. از این رو می‌توان گفت جداکننده اسلون می‌تواند با کارایی نسبتا مطلوبی فرآیند پرعیارکنی ذرات ریز کرومیت را انجام دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان به کارگیری دستگاه اسلون برای پرعیارکنی ذرات ریز کرومیت ارزیابی شد. در این راستا تاثیر شدت میدان مغناطیسی، ابعاد ذرات، نوسان و ابعاد ماتریس بر پرعیارکنی ذرات ریز کرومیت به کمک جداکننده اسلون در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. برای این منظور نمونه با ابعاد ریزتر از ۱۸۰ میکرون پس از جمع‌آوری به سه فراکسیون با فراوانی برابر تقسیم شد. نتایج نشان داد ابعاد ذرات ۱۵۰-۱۰۶+ میکرون نتایج بهتری نسبت به سایر بازه‌های ابعادی داشتند. علاوه بر آن مشاهده شد که با افزایش فرکانس و کاهش ابعاد ماتریس، عیار کرومیت در کنسانتره افزایش یافت. همچنین نشان داده شد به کمک دستگاه اسلون عیار کرومیت بالای ۴۰ درصد و بازیابی ۶۵ تا ۹۰ درصد در شرایط مختلف عملیاتی قابل دستیابی است. در نهایت با محاسبه آهنگ بازده کارخانه ذوب مشاهده شد که مناسب‌ترین شدت میدان برای بازه‌های ابعادی ۱۰۶-۱۵۰+ و ۱۰۶- میکرون در ابعاد ماتریس و نوسان پالس ثابت حدود ۰/۷ تا ۰/۶ تسلا است.

منابع و مراجع

1. Y.R. Murthy, S.K. Tripathy, C.R. Kumar, 2011, "*Chrome ore beneficiation challenges & opportunities – A review*", Miner. Eng., 24(5) 375-380.
2. B.A. Wills, J.A. Finch, 2016, "*Mineral processing technology*", Eighth ed., Butterworth-Heinemann, 2016.
3. S.K. Tripathy, Y. Rama Murthy, 2012, "*Modeling and optimization of spiral concentrator for separation of ultrafine chromite*", Powder Technol., 221 387-394.
4. A. Güney, G. Önal, T. Atmaca, 2001, "*New aspect of chromite gravity tailings re-processing*", Miner. Eng., 14(11) 1527-1530.
5. M. Jaishankar, T. Tseten, N. Anbalagan, B.B. Mathew, K.N. Beeregowda, 2014, "*Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals*", Interdiscip Toxicol., 7(2) 60-72.
6. H.-L. Luo, D.-F. Lin, M.-L. Chung, L.Y. Chen, 2014, "*Waste Foundry Sand Reused as Clay Replacement for Tile Manufacture*", Int. J. Transp. Sci. Technol., 3(4) 339-351.
7. B. Bhardwaj, P. Kumar, 2017, "*Waste foundry sand in concrete: A review*", Constr. Build. Mater., 156 661-674.
8. R. Siddique, G. Singh, 2011, "*Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing*", Resour. Conserv. Recycl. , 55(11) 885-892.
9. D. Feng, C. Aldrich, 2004, "*Recovery of chromite fines from wastewater streams by column flotation*", Hydrometallurgy, 72(3) 319-325.
10. Ü. Akdemir, C. Hiçyilmaz, 1996, "*Shear flocculation of chromite fines in sodium oleate solutions*", Colloids Surf., A, 110(1) 87-93.
11. T. Çiçek, I. Cöcen, 2002, "*Applicability of Mozley multigravity separator (MGS) to fine chromite tailings of Turkish chromite*

concentrating plants", Miner. Eng., 15(1) 91-93.

12. S.K. Tripathy, Y.R. Murthy, V. Singh, 2013, "*Characterisation and separation studies of Indian chromite beneficiation plant tailing*", Int. J. Miner. Process., 122 47-53.
13. D. Xiong, S. Liu, J. Chen, 1998, "*New technology of pulsating high gradient magnetic separation*", Int. J. Miner. Process., 54(2) 111-127.
14. M. Dobbins, P. Dunn, I. Sherrell, Recent advances in magnetic separator designs and applications, in: The 7th International Heavy Minerals Conference, 2009, pp. 63-70.
15. X. Dahe, 2004, "*SLon Magnetic Separators Applied in the Ilmenite Processing Industry*", Physical Separation in Science and Engineering, 13(3-4) 119-126.
16. A. Hajizadeh, M. Ghorban Nejad, 2017, "*Recovery of Hematite from fine tailings at Golegohar mine using Slon Magnetic separator*", Iranian Journal of Mining Engineering, 12(34) 61-67 (In persian).
17. I. Sherrell, P. Dunn, 2012, "*Recent advances in high gradient magnetic separators*", in: C.A. Young, G.H. Luttrell (Eds.) Separation technologies for minerals, coal, and earth resources, SME, pp. 241-248.
18. Global chrome ore market prices, in: http://www.mining-bulletin.com/index.php/product_2.html (Ed.), 2017.