

پایش وضعیت جداکننده های مغناطیسی مجتمع فرآوری سنگ آهن همدان

محمد شایگان افضل^۱، هیوا فرهادی^۲، رامین حق محمدی^۳

۱- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه بیرجند، shaygan.mohammad@gmail.com

۲- دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تهران، h.farhadi@ut.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند، Haghmohamadipasand@gmail.com

چکیده

جداکننده های مغناطیسی از مهم ترین تجهیزات مورد استفاده در کارخانه های فرآوری سنگ آهن هستند که وظیفه اصلی آن ها افزایش عیار ماده معدنی و حذف باطله های غیر آهن دار است. در پژوهش حاضر، عملکرد جداکننده های مغناطیسی کارخانه کنسانتره سنگ آهن همدان بررسی شده است. عیار آهن در نمونه اولیه 42/5 درصد اندازه گیری شد و نمونه مورد مطالعه، افزون بر کانی های آهن دار، حاوی ناخالصی هایی از جمله سیلیکات ها، کربنات ها، رس و حدود ۳ درصد گوگرد بود. مطابق فلوشیت کارخانه، جداکننده مغناطیسی تکی که در پایین دست آسیای گلوله ای اولیه قرار گرفته است، در دانه بندی حدود ۱۷۰ میکرون و شدت میدان ۱۸۰۰ گوس، عیار آهن را از 42/5 درصد به ۶۰ درصد افزایش می دهد. در ادامه، جداکننده های مغناطیسی طبقاتی که به صورت سری بعد از سرریز هیدروسیکلون نصب شده اند، با شدت میدان های ۱۴۵۰ گوس در درام اول، ۱۲۵۰ گوس در درام دوم و ۱۱۰۰ گوس در درام سوم، عیار محصول را از ۶۰ درصد به ۶۷ درصد می رسانند. همچنین نتایج نشان می دهد که کاهش شدت میدان مغناطیسی موجب افزایش عیار کنسانتره و در مقابل کاهش بازیابی می شود. تمامی جداکننده های مورد استفاده در این کارخانه با سرعت چرخش ۲۱ دور بر دقیقه فعالیت می کنند و ابعاد آن ها شامل طول ۳ متر و قطر ۲/۱ متر است. بر این اساس، می توان بیان کرد که انتخاب صحیح پارامترهای طراحی و بهره برداری از جداکننده های مغناطیسی، اثر مستقیمی بر بهبود راندمان فرآوری، افزایش کیفیت کنسانتره و کاهش هزینه های عملیاتی کارخانه دارد.

کلیدواژه ها: جداکننده های مغناطیسی تر، پرعیار سازی سنگ آهن، بازیابی آهن، کنسانتره سنگ آهن همدان

1. مقدمه

دنیای صنعت و فناوری مدرن، با روند روبه رشد توسعه و گسترش خود، هر روز بیش از پیش به مواد معدنی وابسته می شود [۱]. آهن، پس از اکسیژن، سیلیسیم و آلومینیوم، چهارمین عنصر فراوان در پوسته زمین است و حدود ۶ درصد از ترکیب آن را تشکیل می دهد. این فلز، پرمصرف ترین فلز صنعتی به شمار می رود و فولاد به تنهایی حدود ۹۳ درصد از کل تولیدات فلزی و آلیاژی جهان را شامل می شود. از این رو، آهن و فولاد همچنان از مهم ترین محصولات راهبردی در کشورهای صنعتی محسوب می شوند [۲].

ذخایر کشف شده سنگ آهن در ایران حدود ۳/۱ میلیارد تن برآورد شده است و این ذخایر به انواع ماگمایی، دگرسانی- گرمایی، رسوبی- گرمایی، رسوبی و دگرگونی تقسیم می شوند [۳]. با توجه به اهمیت این ذخایر، فرآوری و پرعیار سازی سنگ آهن از جایگاه ویژه ای در صنعت معدن و متالورژی برخوردار است. در فرآیند پرعیار سازی، برای دستیابی به بیشترین

بازیابی، یک محدوده بهینه از ابعاد ذرات وجود دارد؛ به گونه‌ای که بازیابی ذرات درشت‌تر و ریزتر از این محدوده کاهش می‌یابد. از این‌رو، کنترل دقیق دانه‌بندی مواد ورودی به مدار فرآوری، از عوامل اساسی در دستیابی به بازیابی نهایی مطلوب به شمار می‌رود [۴].

این موضوع در مورد تجهیزات جدایش مغناطیسی نیز صادق است و توزیع دانه‌بندی ذرات، یکی از پارامترهای کلیدی در انتخاب و عملکرد این تجهیزات محسوب می‌شود. به‌طور معمول، جداکننده‌های تر برای پرعیارسازی ذرات ریز به کار می‌روند. با این حال، حضور ذرات بسیار درشت یا بسیار ریز می‌تواند عملکرد متالورژیکی این جداکننده‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. به‌ویژه، ذرات نرمه مگنتیتی از مهم‌ترین عوامل کاهش راندمان و انتخاب‌پذیری در جدایش مغناطیسی به شمار می‌روند. این ذرات، به دلیل جرم بسیار کم و در عین حال تأثیرپذیری مغناطیسی بالا، هنگام قرار گرفتن در میدان مغناطیسی، مغناطیسی شده و به یکدیگر می‌چسبند. در نتیجه، احتمال به دام افتادن ذرات گانگ در میان توده‌های تشکیل‌شده افزایش یافته و این ذرات به همراه کانی‌های مغناطیسی وارد کنسانتره می‌شوند. از سوی دیگر، ذرات گانگ به علت جرم کم، به سطح ذرات درشت‌تر مغناطیسی چسبیده و به‌صورت غیرانتخابی به کنسانتره راه می‌یابند [۵].

از سوی دیگر، نوع مکانیزم خردایش نیز بر توزیع دانه‌بندی محصول اثرگذار است. در شکست ناشی از مکانیزم ضربه، سرعت بارگذاری بالا بوده و در نتیجه، دانه‌بندی ذرات تولیدشده گسترده‌تر است [۶]. این مسئله می‌تواند بر رفتار ذرات در مراحل بعدی فرآوری، به‌ویژه در جدایش مغناطیسی، تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های پرعیارسازی سنگ‌آهن، جدایش مغناطیسی است. این روش بر پایه تفاوت در خواص مغناطیسی کانی‌ها عمل می‌کند و به‌ویژه در جداسازی کانی‌های فرومغناطیس و پارامغناطیس، مانند مگنتیت و هماتیت، از باطله‌های غیرمغناطیسی کاربرد گسترده‌ای دارد. جداکننده‌های مغناطیسی در انواع مختلف شدت پایین*، شدت بالا[†] و شدت بسیار بالا[‡] طراحی می‌شوند که هر یک متناسب با نوع کانی، ابعاد ذرات و درجه آزادی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].

کارایی فرآیند جدایش مغناطیسی به عوامل متعددی از جمله شدت میدان مغناطیسی، توزیع دانه‌بندی، میزان آزادی کانی‌ها، نرخ خوراک‌دهی و طراحی تجهیزات وابسته است. بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند منجر به افزایش بازیابی، بهبود عیار کنسانتره و کاهش هزینه‌های عملیاتی شود. از جمله مهم‌ترین انواع جداکننده‌های مغناطیسی، جداکننده مغناطیسی درام[§] است که به دلیل کارایی بالا در جدایش ذرات ریز در محیط تر، از رایج‌ترین تجهیزات مورد استفاده در صنایع فرآوری سنگ‌آهن به شمار می‌رود. این دستگاه معمولاً در مدارهای رافر، کلیئر و اسکاونجر به کار گرفته می‌شود [۸].

کارخانه کنسانتره سنگ‌آهن همدان، با ظرفیت تولید سالیانه ۶۰۰۰۰ تن کنسانتره، در نزدیکی شهر همدان واقع شده است. مدار فرآوری این کارخانه شامل دو آسیای گلوله‌ای اولیه و ثانویه، جداکننده مغناطیسی شدت پایین، هیدروسیکلون، جداکننده طبقاتی مغناطیسی شدت پایین و فیلترهای دیسکی است. آسیای گلوله‌ای ثانویه و هیدروسیکلون نیز به‌صورت

* LIMS

† HIMS

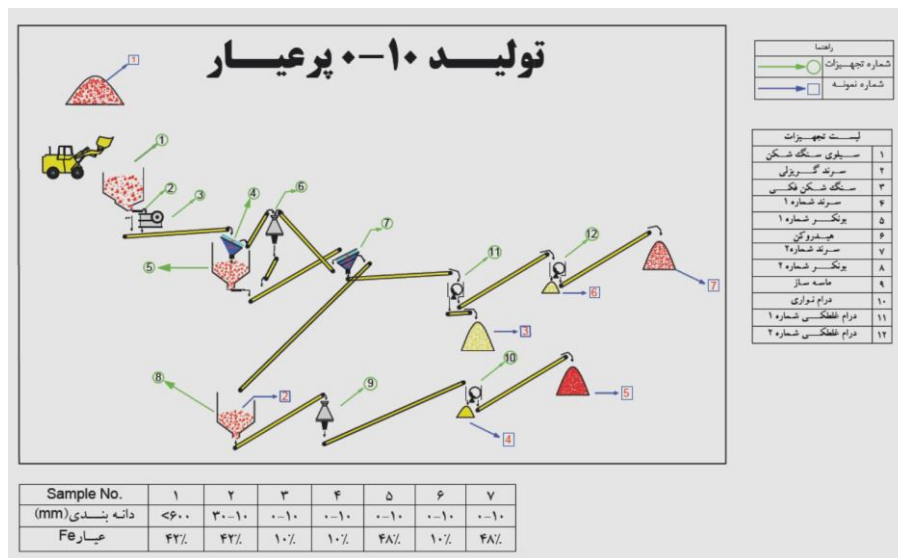
‡ HGMS

§ Wet Drum Magnetic Separator

مدار بسته با یکدیگر کار می کنند [۹]. در مقاله حاضر، مباحث مربوط به تهیه و شناسایی نمونه، انجام آزمایش های جدایش مغناطیسی و ارائه فلوشیت اولیه بررسی شده است.

۲- مواد و روش ها

نخستین مرحله این پژوهش، نمونه برداری از مدار خردایش کارخانه کنسانتره سنگ آهن همدان بود. نمونه های مورد استفاده از خوراک معدن باباعلی همدان تهیه شدند. این نمونه ها دارای ابعاد ۰ تا ۶ میلی متر و وزن مخصوص حدود ۴ گرم بر سانتی متر مکعب بودند. فلوشیت مدار سنگ شکنی و خردایش در شکل (۱) و جداکننده مغناطیسی طبقاتی تر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- فلوشیت واحد خردایش، دانه بندی و پرعیارسازی



شکل ۲- جداکننده مغناطیسی طبقاتی تر

انتخاب این نمونه ها با هدف بررسی رفتار فرآوری ماده معدنی در شرایط نزدیک به وضعیت واقعی کارخانه انجام شد تا نتایج حاصل از آزمایش های آزمایشگاهی، از قابلیت تعمیم مناسبی به شرایط عملیاتی برخوردار باشند.

پس از انجام نمونه برداری، نمونه ها به آزمایشگاه فرآوری مواد معدنی منتقل شدند. به منظور آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش های جدایش مغناطیسی و نیز کاهش اثرات ناشی از ناهمگنی اولیه، ابتدا عملیات یکنواخت سازی و آماده سازی روی آن ها صورت گرفت. در این مرحله، نمونه ها پس از اختلاط مناسب، تحت خردایش قرار گرفتند تا شرایط لازم برای آزادسازی نسبی کانی های بارز از باطله فراهم شود. خردایش اولیه توسط سنگ شکن فکی انجام شد و سپس برای دستیابی به ابعاد ریزتر و مناسب برای آزمایش های جدایش، از آسیای گلوله ای استفاده شد. به کارگیری این دو مرحله خردایش، با هدف رسیدن به توزیع دانه بندی مطلوب و فراهم سازی شرایط مناسب برای بررسی عملکرد جدایش مغناطیسی انجام گرفت.

پس از اتمام مرحله خردایش، مواد حاصل با استفاده از مجموعه ای از الک های استاندارد دانه بندی شدند. این مرحله از آن جهت اهمیت داشت که توزیع ابعادی ذرات یکی از عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد جدایش مغناطیسی به شمار می رود. بر این اساس، کسر دانه بندی مناسب و مورد نظر برای انجام آزمایش ها انتخاب شد تا تأثیر اندازه ذرات بر شاخص های فرآوری، از جمله عیار و بازیابی، به صورت دقیق تری مورد ارزیابی قرار گیرد. انتخاب بازه دانه بندی مناسب همچنین به کاهش خطاهای ناشی از حضور هم زمان ذرات بسیار درشت و بسیار ریز در فرایند جدایش کمک می کند.

به منظور شناخت ویژگی های اولیه نمونه و تعیین ترکیب آن، مطالعات شیمیایی و کانی شناسی بر روی نمونه انجام شد. در این راستا، آنالیز شیمیایی به منظور تعیین عناصر اصلی و میزان آهن موجود در نمونه، با استفاده از روش هایی نظیر XRF انجام گرفت. همچنین، برای شناسایی کانی های تشکیل دهنده نمونه و بررسی نوع فازهای آهن دار و باطله، از روش های کانی شناسی مانند XRD و در صورت نیاز مطالعات میکروسکوپی استفاده شد. نتایج این بخش، اطلاعات ارزشمندی درباره نوع کانی های مغناطیسی و غیرمغناطیسی موجود در نمونه، میزان حضور آن ها و وضعیت آزادی کانی ها فراهم کرد و مبنای مناسبی برای طراحی و تفسیر آزمایش های جدایش مغناطیسی به دست داد.

در این تحقیق، فرآیند پرعیار سازی سنگ آهن با استفاده از جداکننده مغناطیسی آزمایشگاهی انجام شد. این دستگاه امکان اعمال و تنظیم شدت میدان مغناطیسی و نیز کنترل برخی شرایط عملیاتی مؤثر بر فرآیند را فراهم می کرد. پس از آماده سازی نمونه ها و انتخاب کسر دانه بندی مناسب، مقدار مشخصی از هر نمونه توزین و برای انجام آزمایش در شرایط از پیش تعیین شده آماده شد. آزمایش های جدایش مغناطیسی با هدف بررسی رفتار نمونه در شرایط مختلف و ارزیابی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد فرآیند طراحی شدند.

برای دستیابی به درک دقیق تر از رفتار نمونه، آزمایش ها تحت شرایط متفاوتی از جمله شدت میدان مغناطیسی، اندازه ذرات و درصد جامد پالپ انجام گرفت. تغییر شدت میدان مغناطیسی به منظور بررسی میزان تأثیر نیروی مغناطیسی بر جذب ذرات آهن دار و افزایش انتخاب پذیری انجام شد. همچنین، بررسی اثر اندازه ذرات از آن جهت اهمیت داشت که میزان آزادی کانی ها و نحوه پاسخ آن ها به میدان مغناطیسی تابع مستقیمی از ابعاد ذرات است. درصد جامد پالپ نیز به عنوان یکی از متغیرهای مهم عملیاتی مورد مطالعه قرار گرفت، زیرا تغییر آن می تواند بر شرایط هیدرودینامیکی، احتمال برخورد ذرات و در نهایت بر راندمان جدایش اثرگذار باشد.

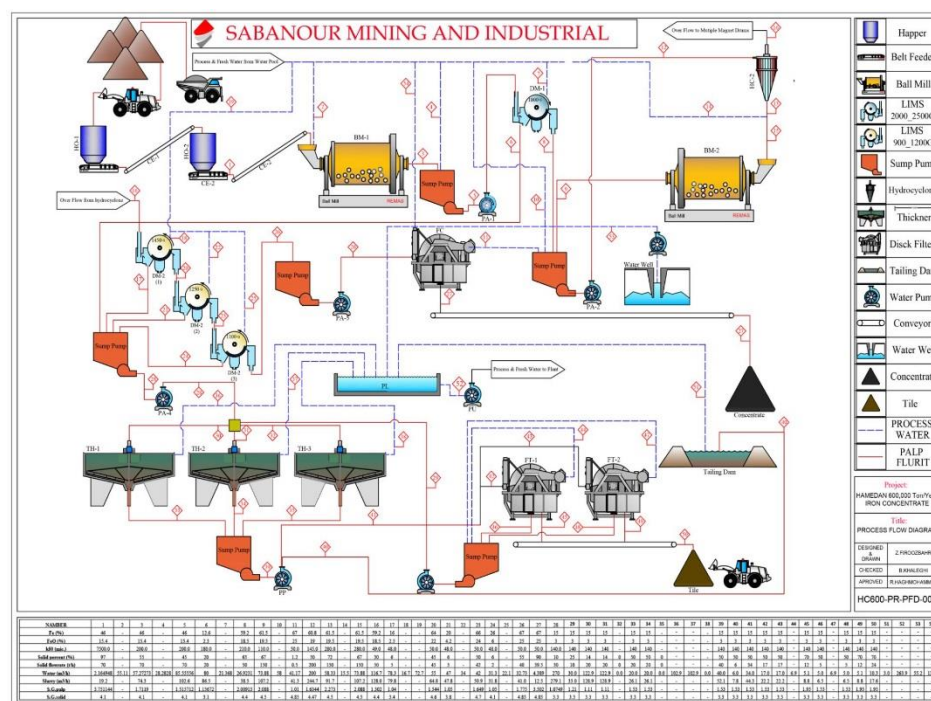
در هر یک از آزمایش ها، پس از انجام عملیات جدایش، دو محصول مغناطیسی و غیرمغناطیسی به طور جداگانه جمع آوری شدند. سپس این محصولات خشک شده و وزن هر یک به دقت اندازه گیری شد. ثبت وزن محصولات، امکان انجام موازنه جرمی و محاسبه شاخص های اصلی فرآوری را فراهم کرد. پس از آن، نمونه های حاصل برای تعیین عیار آهن تحت آنالیز شیمیایی قرار گرفتند تا کیفیت هر یک از محصولات از نظر مقدار آهن موجود مشخص شود.

در مرحله نهایی، با استفاده از نتایج حاصل از توزین و آنالیز شیمیایی، شاخص های مهم فرآوری شامل عیار کنسانتره، بازیابی آهن و راندمان جدایش محاسبه شدند. این شاخص ها مبنای اصلی ارزیابی عملکرد جداکننده مغناطیسی در شرایط مختلف آزمایش بودند. در نهایت، با مقایسه نتایج آزمایش ها و تحلیل اثر هر یک از پارامترهای عملیاتی، شرایط مناسب تر برای

دستیابی به بیشترین بازیابی همراه با عیار مطلوب تعیین شد. داده‌های به‌دست‌آمده از این مرحله، علاوه بر ارزیابی فنی فرآیند، می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی یا بهینه‌سازی مدار جدایش مغناطیسی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گیرند.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی جداکننده مغناطیسی تر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. تمرکز اصلی این ارزیابی بر اثر پارامترهای مهم عملیاتی و فرآیندی، از جمله دانه‌بندی خوراک، سرعت چرخش جداکننده، درصد جامد پالپ، افت عیار کنسانتره، نوسانات عیار و بازیابی، توزیع خوراک در عرض درام و همچنین افت ناگهانی قدرت جدایش است. بررسی این عوامل از آن جهت اهمیت دارد که عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی تر به شدت تحت تأثیر شرایط خوراک و نحوه بهره‌برداری از تجهیزات قرار دارد و هرگونه تغییر در این متغیرها می‌تواند به‌طور مستقیم بر عیار، بازیابی و کیفیت محصول نهایی اثر بگذارد. همچنین فلوشیت اصلی کارخانه در شکل (۳) و محل نمونه‌گیری در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- فلوشیت کارخانه کنسانتره سنگ آهن همدان



شکل ۴- نمونه گیری از جداکننده مغناطیسی شدت پایین

۱-۳- تأثیر دانه بندی

نتایج حاصل از آزمایش های دانه بندی، که در جدول ۱ ارائه شده است، نشان می دهد که اندازه ذرات خوراک نقش بسیار مهمی در کیفیت جدایش مغناطیسی و میزان ناخالصی های موجود در کنسانتره ایفا می کند. بررسی ها نشان داد که رفتار خوراک ورودی به جداکننده مغناطیسی تکی، که عمدتاً دارای دانه بندی در حدود ۱۷۰ میکرون و حاصل از خروجی آسیای اولیه است، با رفتار خوراک جداکننده های طبقاتی، که دارای دانه بندی در حدود ۴۵ میکرون و حاصل از سرریز هیدروسیکلون است، تفاوت محسوسی دارد. این تفاوت بیانگر آن است که تغییر در توزیع ابعادی خوراک می تواند پاسخ ذرات را به میدان مغناطیسی تغییر داده و در نهایت بر کیفیت محصول تأثیر بگذارد.

نتایج نشان می دهد که ذرات با اندازه کمتر از ۴۵ میکرون، به دلیل ریزدانه بودن بیش از حد، بیشترین میزان ورود ناخالصی به کنسانتره را سبب می شوند. این رفتار را می توان به پدیده آگلومره شدن، افزایش چسبندگی سطحی بین ذرات و کاهش درجه آزادی مؤثر نسبت داد. در چنین شرایطی، ذرات ریز مغناطیسی تمایل بیشتری به تشکیل توده های تجمعی پیدا می کنند و در این میان، ذرات گانگ و به ویژه کانی های سولفیدی یا سیلیکاتی نیز به صورت مکانیکی یا سطحی در میان این تجمعات گرفتار شده و همراه با بخش مغناطیسی وارد کنسانتره می شوند. بنابراین، هرچه دانه بندی خوراک ریزتر شود، احتمال کاهش انتخاب پذیری و افزایش آلودگی کنسانتره بیشتر خواهد شد.

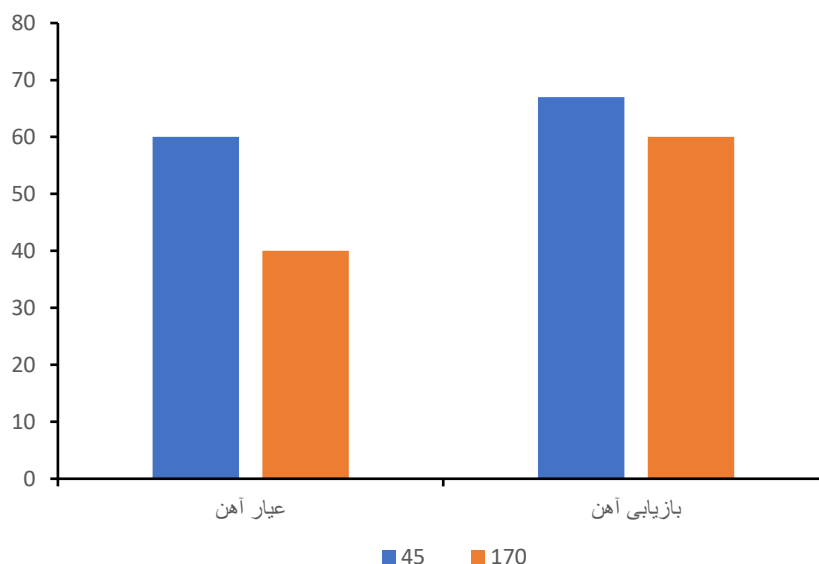
از سوی دیگر، نتایج آزمایش ها بیانگر آن است که در شرایط این مطالعه، ذرات در محدوده درشت تر، به ویژه در حدود ۱۷۰ میکرون، عملکرد مناسب تری از نظر جدایش نشان داده اند. این وضعیت را می توان ناشی از کاهش مشکلات مربوط به آگلومره شدن، کاهش دنباله روی مکانیکی ذرات باطله و نیز فراهم شدن شرایط بهتر برای جدایش ذرات آزاد شده دانست. به عبارت دیگر، در این محدوده دانه بندی، ذرات آهن دار فرصت بیشتری برای پاسخ انتخابی به میدان مغناطیسی داشته و ذرات غیرمغناطیسی نیز با احتمال کمتری به کنسانتره راه یافته اند. بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که کنترل دقیق دانه بندی خوراک ورودی به جداکننده های مغناطیسی، یکی از مهم ترین پیش شرط های دستیابی به عملکرد مطلوب، کاهش ناخالصی کنسانتره و افزایش کارایی فرآیند است.

جدول ۱- نتایج مربوط به عیار و بازیابی جداکننده مغناطیسی در اندازه های ۱۷۰ و ۴۵ میکرون

وزن %	عناصر %	بازیابی %
-------	---------	-----------

Fe	S	Fe	S		مراحل شستشو	d ₈₀ (میکرون)
67	0/3	60	0/3	100	3	45
60	0/3	40	0/3	۱۰۰	3	170

با استناد به داده‌های جدول و روند نشان داده شده در شکل (۵)، می‌توان بیان کرد که دانه‌بندی خوراک نه تنها بر مقدار بازیابی، بلکه بر کیفیت کنسانتره نیز اثر تعیین کننده‌ای دارد.



شکل ۵- میزان بازیابی ذرات در اندازه های مختلف

از این رو، طراحی مدار خردایش و طبقه‌بندی باید به گونه‌ای انجام شود که از تولید بیش از حد ذرات نرمه جلوگیری شده و شرایط برای جدایش مؤثرتر فراهم شود.

۲-۳- سرعت جداکننده

سرعت خطی یا سرعت چرخش استوانه جداکننده، یکی از پارامترهای بسیار مهم در فرآیند جدایش مغناطیسی با جداکننده‌های درامی به شمار می‌رود. تغییر در این پارامتر، زمان ماند ذرات بر روی سطح درام، ضخامت بستر ذرات، شدت اثر نیروهای هیدرودینامیکی و همچنین نسبت نیروی مغناطیسی به نیروی گریز از مرکز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، هرگونه تغییر در سرعت چرخش می‌تواند مستقیماً موجب تغییر در عیار و بازیابی محصول شود.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش سرعت چرخش استوانه، عمق بستر ذرات روی سطح درام کاهش می‌یابد و این موضوع می‌تواند شرایط بهتری برای جمع‌آوری ذرات مغناطیسی فراهم کند. در عین حال، افزایش سرعت باعث افزایش نیروی گریز

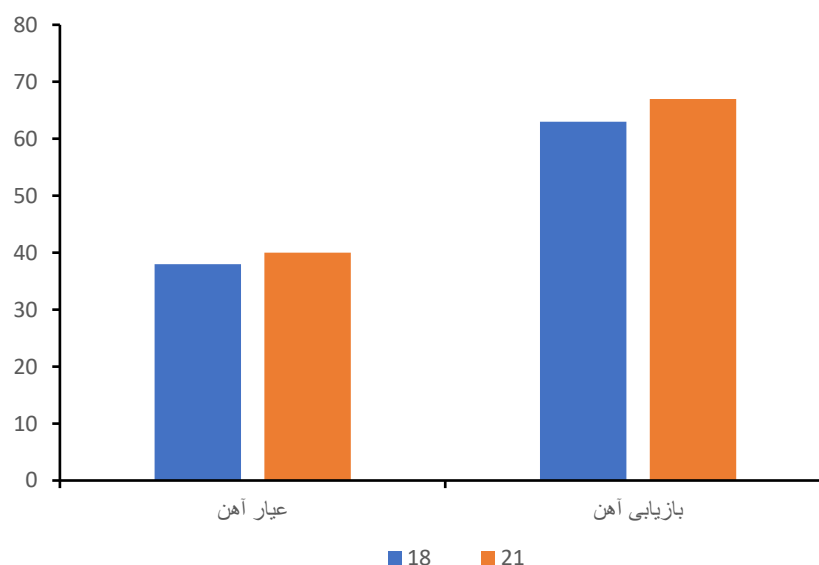
از مرکز نیز می شود. این نیرو در صورتی که از حد معینی فراتر رود، می تواند نقش منفی در فرآیند ایفا کند؛ زیرا در سرعت های بالا، نیروی گریز از مرکز بر نیروی نگهدارنده مغناطیسی غلبه کرده و مانع از چسبیدن مؤثر برخی ذرات مغناطیسی به سطح درام می شود. در نتیجه، کارایی جدایش کاهش می یابد و بخشی از ذرات باارزش ممکن است وارد باطله شوند.

به منظور ارزیابی اثر سرعت، آزمایش ها در دو سرعت ۱۸ و ۲۱ دور بر دقیقه انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج مربوط به عیار و بازیابی جداکننده مغناطیسی در سرعت های مختلف

بازیابی %		عناصر %		وزن %	مراحل شستشو	سرعت (دور در دقیقه)
Fe	S	Fe	S			
63	0/3	38	0/3	۱۰۰	3	۱۸
67	0/3	40	0/31	۱۰۰	3	۲۱

همان گونه که در شکل (۶) نیز مشاهده می شود، با افزایش سرعت از ۱۸ به ۲۱ دور بر دقیقه، بازیابی آهن افزایش یافته است.



شکل ۶- میزان بازیابی ذرات در سرعت های مختلف

این موضوع نشان می دهد که در بازه مورد بررسی، افزایش سرعت چرخش هنوز در محدوده مفید قرار داشته و به بهبود جمع آوری ذرات مغناطیسی کمک کرده است. با این حال، باید توجه داشت که این روند الزاماً در سرعت های بالاتر ادامه نخواهد یافت و احتمال دارد پس از عبور از یک نقطه بهینه، بازیابی و حتی عیار کاهش یابد. بنابراین، تعیین سرعت بهینه جداکننده باید بر اساس تعادل میان افزایش بازیابی و حفظ کیفیت کنسانتره انجام شود.

۳-۳- درصد جامد

درصد جامد پالپ یکی از متغیرهای کلیدی در بهره برداری از جداکننده های مغناطیسی تر است و انتخاب مقدار بهینه آن نقش مهمی در دستیابی به شرایط مناسب عملیاتی دارد. تغییر درصد جامد، به طور مستقیم بر گرانروی پالپ، رفتار

هیدرودینامیکی ذرات، ضخامت بستر تشکیل شده بر سطح درام و احتمال برخورد و برهم کنش ذرات اثر می گذارد. بنابراین، این پارامتر می تواند هم بر بازیابی و هم بر عیار کنسانتره تأثیرگذار باشد. نتایج بررسی ها نشان می دهد که با افزایش درصد جامد پالپ، بازیابی مغناطیسی تا حدی افزایش می یابد. این مسئله را می توان ناشی از افزایش غلظت ذرات مغناطیسی و تسهیل تشکیل بستر بر روی سطح استوانه دانست. با این حال، افزایش درصد جامد بیش از مقدار بهینه، به ویژه در مقادیر بالاتر از ۴۵ درصد، اثرات نامطلوبی بر فرآیند بر جای می گذارد. در این شرایط، علاوه بر افزایش میزان سولفور در کنسانتره، احتمال گیر کردن ذرات در فاصله بین سطح استوانه و مخزن افزایش یافته و عملکرد دستگاه مختل می شود. همچنین، بالا رفتن بیش از حد جرم مخصوص پالپ موجب افزایش گرانروی شده و این موضوع حرکت آزادانه ذرات و جدایش انتخابی آن ها را با مشکل مواجه می سازد. از سوی دیگر، اگر درصد جامد بیش از حد پایین باشد، پالپ حالت بسیار رقیق پیدا می کند و تلاطم ذرات افزایش می یابد. در نتیجه، بستر مناسبی بر سطح استوانه تشکیل نشده و پایداری فرآیند کاهش می یابد. این مسئله نیز می تواند باعث افت راندمان جدایش و افزایش ورود ذرات غیرمغناطیسی به کنسانتره شود. بنابراین، تعیین درصد جامد بهینه باید به گونه ای باشد که ضمن حفظ روانی مناسب پالپ، از افزایش بیش از حد گرانروی و نیز از رقیق شدن بیش از حد پالپ جلوگیری شود.

۴-۳- افت عیار کنسانتره

افت عیار کنسانتره یکی از مشکلات مهم در عملکرد جداکننده های مغناطیسی تر است که می تواند ناشی از مجموعه ای از عوامل فرآیندی و تجهیزاتی باشد. از جمله مهم ترین علل این پدیده می توان به ضخیم شدن بیش از حد بستر مغناطیسی، ناکافی بودن آب شستشو، حضور زیاد ذرات ریز و بالا بودن درصد جامد پالپ اشاره کرد. در چنین شرایطی، ذرات غیرمغناطیسی و یا ذرات حدواسط به راحتی در میان توده ذرات مغناطیسی محبوس شده و همراه کنسانتره جمع آوری می شوند که در نهایت موجب افت عیار محصول خواهد شد.

برای شناسایی و کنترل این مشکل، انجام آنالیزهای منظم بر روی کنسانتره، به ویژه از نظر Fe و SiO_2 ، ضروری است. این داده ها می توانند نشان دهند که کاهش عیار ناشی از افزایش باطله سیلیکاته، حضور کانی های سولفیدی، یا ضعف در عملکرد بخش شستشو است. همچنین بررسی وضعیت آب شستشو از نظر دبی، فشار و نحوه توزیع بر سطح درام می تواند در تشخیص علت افت عیار بسیار مؤثر باشد.

از منظر عملیاتی، کنترل مدار خردایش نیز نقش مهمی در جلوگیری از افت عیار دارد. کاهش بار ورودی اولیه، کنترل بهتر خردایش، افزایش میزان آزادسازی کانی های آهن دار و جلوگیری از تولید بیش از حد نرمه ها، همگی می توانند به بهبود کیفیت جدایش کمک کنند. علاوه بر این، افزودن یک مرحله کلینر یا بهینه سازی شستشوی کنسانتره نیز از جمله راهکارهایی است که می تواند موجب افزایش عیار محصول نهایی شود.

۵-۳- تحلیل نوسانات شدید عیار و بازیابی

نوسانات شدید در عیار و بازیابی، از جمله مشکلات مهم در بهره برداری صنعتی از مدارهای فرآوری سنگ آهن است و معمولاً ریشه در ناپایداری خوراک و شرایط عملیاتی مدار دارد. این نوسانات اغلب به دلیل بی ثباتی مدار خردایش، تغییرات دبی خوراک، نوسان در درصد جامد، عدم پایداری عملکرد آسیا و هیدروسیکلون و همچنین تغییرات زمین شناسی در خوراک

ورودی رخ می دهند. در چنین شرایطی، جداکننده مغناطیسی با خوراکی مواجه می شود که از نظر دانه بندی، عیار و خصوصیات کانی شناسی یکنواخت نیست؛ در نتیجه، پاسخ فرآیند نیز متغیر خواهد بود. برای پایش و مدیریت این وضعیت، ثبت و بررسی روزانه پارامترهایی نظیر دبی خوراک، درصد جامد، توزیع ابعادی ذرات و عیار آهن خوراک کاملاً ضروری است.

این اطلاعات می تواند امکان شناسایی منشأ نوسانات و ارتباط آن ها با تغییرات عملکرد مدار را فراهم کند. همچنین، استفاده از نمودارهای کنترلی و تحلیل روند داده ها می تواند در پیش بینی و پیشگیری از نوسانات شدید مفید باشد. به منظور تثبیت عملکرد مدار، راهکارهایی همچون یکنواخت سازی خوراک ورودی، کنترل دقیق تر شرایط آسیا و هیدروسیکلون، بهره گیری از مخازن متعادل ساز و پایش مستمر کیفیت خوراک توصیه می شود. در واقع، هرچه شرایط ورودی به جداکننده پایدارتر باشد، دستیابی به عیار و بازیابی یکنواخت تر نیز امکان پذیرتر خواهد بود.

۶-۳- تحلیل توزیع خوراک در سطح جداکننده های مغناطیسی

توزیع یکنواخت پالپ در عرض جداکننده مغناطیسی، یکی از پیش نیازهای اساسی برای عملکرد مناسب درام و دستیابی به جدایش مؤثر است. هرگونه توزیع ناهمگن خوراک در عرض درام می تواند منجر به بارگذاری غیریکنواخت سطح جداکننده شود؛ به این معنا که بخشی از سطح درام بیش از حد بارگذاری شده و بخشی دیگر کمتر از ظرفیت واقعی خود مورد استفاده قرار گیرد. نتیجه این وضعیت، کاهش راندمان جدایش، افت بازیابی و در برخی موارد کاهش عیار کنسانتره است.

این مشکل معمولاً ناشی از نقص عملکرد جعبه تقسیم خوراک*، عدم تقارن در الگوی تغذیه، فرسودگی بخش های ورودی یا انسداد قسمتی از مسیر ورود پالپ است. بررسی این عارضه از طریق مشاهده مستقیم الگوی جریان در نقطه ورود خوراک، ارزیابی نحوه پخش پالپ در عرض درام و نیز بازبینی وضعیت مکانیکی بخش تغذیه امکان پذیر است. برای رفع این مشکل، اقداماتی نظیر اصلاح یا بازطراحی جعبه تقسیم، رفع انسدادهای احتمالی، تنظیم مجدد مسیر ورود پالپ و ایجاد شرایط مناسب برای توزیع یکنواخت جریان در عرض درام پیشنهاد می شود. این اقدامات، ضمن بهبود استفاده از کل عرض جداکننده، می تواند به افزایش پایداری عملکرد دستگاه و ارتقای کیفیت جدایش منجر شود.

۷-۳- تحلیل افت ناگهانی قدرت جدایش

افت ناگهانی قدرت جدایش، یکی از مشکلات مهم و در عین حال هشداردهنده در عملکرد جداکننده های مغناطیسی است، زیرا می تواند به صورت مستقیم راندمان کل مدار را تحت تأثیر قرار دهد. این پدیده معمولاً زمانی رخ می دهد که شدت میدان مغناطیسی مؤثر کاهش یابد یا شرایط مکانیکی دستگاه به گونه ای تغییر کند که نیروی مغناطیسی دیگر برای نگهداری و جداسازی ذرات آهن دار کافی نباشد. از مهم ترین علل فنی این مسئله می توان به تضعیف یا خرابی سیستم مغناطیسی، افزایش فاصله مؤثر میان منبع میدان و ذرات به دلیل سایش پوسته درام، خطاهای مونتاژ، یا تغییر در وضعیت قطعات داخلی دستگاه اشاره کرد. در چنین حالتی، ذراتی که پیش تر به راحتی جذب می شدند، دیگر پاسخ کافی به میدان نشان نداده و بخشی از ماده بارزش وارد باطله می شود.

* Feed Box

ارزیابی این مشکل نیازمند انجام آزمون‌های فنی و بازرسی تجهیز است. از جمله مهم‌ترین روش‌های بررسی می‌توان به سنجش شدت میدان مغناطیسی با استفاده از گوس‌سنج، بازبینی وضعیت پوسته درام، کنترل ضخامت بخش‌های فرسوده و بررسی صحت مونتاژ اجزای داخلی اشاره کرد. اقدامات اصلاحی پیشنهادی نیز شامل تعمیر یا تعویض مجموعه مغناطیسی، جایگزینی پوسته فرسوده، اصلاح فاصله‌های عملکردی و بازبینی کامل وضعیت نصب و مونتاژ جداکننده‌ها است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در فرآیند جدایش مغناطیسی تر، دانه‌بندی خوراک یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در کیفیت جدایش، میزان بازیابی و مقدار ناخالصی‌های موجود در کنسانتره است. به‌ویژه، حضور ذرات بسیار ریز، به‌خصوص در ابعاد کمتر از ۴۵ میکرون، به دلیل افزایش پدیده آگلومره شدن، چسبندگی بین ذرات و کاهش درجه آزادی، موجب افزایش راهیابی ناخالصی‌ها، از جمله سولفور، به کنسانتره می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که تولید بیش از حد نرمه در مدار خردایش می‌تواند اثر منفی قابل توجهی بر عملکرد جداکننده‌های مغناطیسی تر داشته باشد.

در مقابل، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در شرایط مورد بررسی، خوراک با دانه‌بندی درشت‌تر، به‌ویژه در حدود ۱۷۰ میکرون، از عملکرد مناسب‌تری از نظر بازده جدایش برخوردار بوده است. این امر را می‌توان ناشی از کاهش مشکلات مربوط به تجمع ذرات، کاهش دنباله‌روی مکانیکی باطله و فراهم شدن شرایط مطلوب‌تر برای پاسخ انتخابی ذرات آهن‌دار به میدان مغناطیسی دانست. بنابراین، کنترل مدار خردایش و طبقه‌بندی به‌منظور دستیابی به توزیع دانه‌بندی مناسب، یکی از الزامات اصلی برای بهبود عملکرد فرآیند جدایش مغناطیسی است.

همچنین بررسی اثر سرعت چرخش جداکننده نشان داد که افزایش سرعت دستگاه تا محدوده مشخصی می‌تواند موجب افزایش بازیابی شود، زیرا با کاهش ضخامت بستر ذرات و بهبود شرایط جمع‌آوری، احتمال بازیابی ذرات مغناطیسی افزایش می‌یابد. با این حال، این روند تنها تا یک حد بهینه معتبر است و در صورت افزایش بیش از اندازه سرعت، غلبه نیروی گریز از مرکز بر نیروی مغناطیسی می‌تواند موجب افت کارایی فرآیند شود. از این‌رو، تعیین سرعت بهینه چرخش برای دستیابی هم‌زمان به بازیابی بالا و عیار مناسب ضروری است.

از دیگر نتایج مهم این تحقیق، نقش تعیین‌کننده درصد جامد پالپ در عملکرد فرآیند بود. افزایش درصد جامد تا مقدار بهینه، شرایط لازم برای تشکیل بستر مناسب و افزایش بازیابی را فراهم می‌کند؛ اما افزایش بیش از حد آن، به دلیل بالا رفتن گرانروی پالپ، کاهش تحرک ذرات، افزایش احتمال گیر افتادن ذرات غیرمغناطیسی و بالا رفتن سولفور کنسانتره، اثر معکوس بر کیفیت جدایش خواهد داشت. در مقابل، پایین بودن بیش از حد درصد جامد نیز موجب افزایش تلاطم و ناپایداری فرآیند می‌شود. بنابراین، تنظیم دقیق درصد جامد یکی از شروط اساسی بهره‌برداری بهینه از جداکننده‌های مغناطیسی تر است.

علاوه بر عوامل فرآیندی، نتایج این مطالعه نشان داد که برخی مشکلات بهره‌برداری نظیر افت عیار کنسانتره، نوسان شدید عیار و بازیابی، توزیع نامناسب خوراک در عرض درام و افت ناگهانی قدرت جدایش نیز می‌توانند عملکرد جداکننده را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهند. این مشکلات، هر یک ریشه در عوامل مشخصی دارند و برای رفع آن‌ها باید مجموعه‌ای از اقدامات کنترلی، پایشی و اصلاحی در مدار اعمال شود؛ از جمله پایش مداوم ویژگی‌های خوراک، کنترل بهتر مدار خردایش و طبقه‌بندی، بهبود شرایط شستشو، یکنواخت‌سازی تغذیه، اصلاح سیستم توزیع خوراک و نگهداری مناسب اجزای مغناطیسی و مکانیکی دستگاه.

در مجموع، می توان نتیجه گرفت که بهینه سازی عملکرد جداکننده های مغناطیسی تر، صرفاً به تنظیم یک پارامتر محدود نمی شود، بلکه نیازمند کنترل همزمان و هماهنگ مجموعه ای از عوامل شامل دانه بندی خوراک، سرعت چرخش، درصد جامد، شرایط شستشو، پایداری مدار خردایش و وضعیت مکانیکی تجهیزات است. در این میان، کنترل مناسب فرآیند خردایش در آسیای گلوله ای اولیه و آسیای گلوله ای ثانویه، که همراه با هیدروسیکلون به صورت مدار بسته عمل می کنند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ زیرا این بخش نقش اصلی را در تعیین دانه بندی خوراک، کاهش تولید نرمه های نامطلوب و در نهایت افزایش عیار و کیفیت کنسانتره ایفا می کند. از این رو، توجه همزمان به کنترل مدار خردایش و بهینه سازی شرایط جدایش مغناطیسی می تواند نقش مؤثری در ارتقای کیفیت کنسانتره تولیدی و افزایش کارایی کلی فرآیند داشته باشد.

۵- قدردانی و تشکر

از مسئولین و مهندسين کارخانه کنسانتره سنگ آهن همدان به خاطر همکاری و مساعدت صمیمانه برای انجام این تحقیق عملی را داشتند تشکر و قدردانی به عمل می آید.

۶- منابع

- 1- رضایی، بهرام . تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (پرعبارسازی به روش مغناطیسی) ، انتشارات نور ، ۱۳۷۶
- 2- وقار، رامز، آماده سازی بار کوره های تولید آهن و فولاد، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.
- 3- شفیعی حمید، " طراحی مقدماتی کارخانه فرآوری سنگ آهن علی آباد رباط پشت بادام "، پایان نامه کارشناسی ، دانشگاه یزد، ۱۳۸۵
- 4- J.S.Laskowski, " Aggregation of Fine Particles in Mineral Processing Circuits", Mineral processing on the verge of the 21st century , 2000, 139-147
- 5-A.I.Arol,A.Aydogan, "Recovery Enhancement of Magnetite Fine in Magnetic Separation", Colloids and Surfaces :A Physicochem . Eng.Aspects 232(2004) 151-154
- 6-R-P King. (2001). Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems.
- ۷- اعظمی، مختار. (۱۳۸۴). شبیه سازی مدار خردایش کارخانه فرآوری معدن سنگان. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۸- بنیسی، صمد. جزوه درسی کانه آرایی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. بخش مهندسی معدن. ۱۳۸۰
- ۹- شایگان افضل، محمد. (۱۳۹۶). شبیه سازی مدار آسیای گلوله ای مجتمع فرآوری سنگ آهن همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.