

مقایسه عملکرد فلوتاسیون ستونی و مکانیکی در سولفورزدایی از کنسانتره سنگ آهن

فردیس نخعی^۱، مهدی ایران‌نژاد^{۲*} و سیما محمدنژاد^۳

۱ و ۲- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

نویسنده مسئول: iranajad@aut.ac.ir *

دریافت: ۹۶/۵/۳۰ پذیرش: ۹۸/۲/۳

چکیده

در سال‌های اخیر، جایگزینی سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی با ستون‌های فلوتاسیون به منظور حذف ناخالصی‌ها، مورد توجه محققان و صنایع فرآوری آهن قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر، مقایسه عملکرد سلول‌های مکانیکی و ستونی در سولفورزدایی از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر است. استفاده فلوتاسیون ستونی در شرایط بهینه، منجر به کاهش قابل توجه سولفور شد، به طوری که کنسانتره نهایی با عیار سولفور کمتر از ۰/۱ درصد با بازیابی آهن بالای ۹۸ درصد حاصل شد. نتایج مقایسه آزمایش فلوتاسیون ستونی و مکانیکی نشان داد که، سلول ستونی از عملکرد متالورژیکی بالاتری برای تولید کنسانتره آهن با محتوی سولفور مناسب برخوردار است به طوری که کارایی جدایش سولفور در فلوتاسیون ستونی، در حدود ۷٪ بالاتر از سلول‌های مکانیکی به دست آمد. در عین حال میزان هدرروی آهن غیر پیریتی در فلوتاسیون ستونی کمتر از سلول مکانیکی است.

واژه‌های کلیدی: آهن، گل‌گهر، ستون فلوتاسیون، سلول مکانیکی، سولفورزدایی

۱- مقدمه

آهن توسط کلکتورهای آنیونی مانند اسیدهای چرب شناور می‌شود. در فلوتاسیون معکوس کانی‌های باطله با استفاده از مواد شیمیایی نظیر آمین یا گزنتات شناور شده و کانی با ارزش بازداشت می‌شود (بولاتوویچ، ۲۰۰۷). انتخاب روش پرعیارسازی بر پایه ترکیبات کانی‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی، درجه آزادی کانی‌های با ارزش و گانگ همراه است. در حال حاضر روش فلوتاسیون معکوس، رایج‌ترین روش مورد استفاده در صنایع تولید کنسانتره آهن است.

در صنعت فرآوری کانه‌های آهن، به طور عمده از سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی استفاده می‌شود. محدودیت‌های سلول‌های مکانیکی در زمان مواجهه با ذرات ریز که دارای احتمال برخورد پایین با حباب‌های هوا هستند و یا در معرض دنباله‌روی قرار دارند بسیار برجسته می‌گردد (الفاریس و همکاران، ۲۰۱۳؛ ایران‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۸). ستون‌های فلوتاسیون به دلیل هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی پایین‌تر، کاهش تعداد مراحل پرعیارسازی، فضای مورد نیاز کمتر، کنترل خودکار و تولید کنسانتره با عیار و بازیابی بالاتر در مقایسه با سلول‌های مکانیکی، به طور وسیعی در صنایع فرآوری

با کاهش ذخایر پر عیار کانه‌های آهن در جهان و رشد سریع تقاضا در بازارهای جهانی به محصولی با کمترین میزان ناخالصی، فرآوری کانه‌های کم عیار آهن به موضوع قابل توجهی تبدیل شده است (ما، ۲۰۱۲). جدایش ثقلی و مغناطیسی رایج‌ترین روش‌های فرآوری ذخایر اقتصادی آهن هستند. از نظر عملیاتی، کنسانتره آهن به دست آمده از جدایش ثقلی و مغناطیسی حتی بعد از چند مرحله جداسازی، به دلیل قفل‌شدگی کانی‌های باطله یا دنباله‌روی ذرات ریزدانه، اغلب دارای مقادیری ناخالصی است. نیاز بازار و صنایع تولید آهن و فولاد به کنسانتره‌های پر عیار آهن و حداقل ناخالصی‌های موجود، اهمیت استفاده از فرآیند فلوتاسیون را افزایش داده است (آراجو و همکاران، ۲۰۰۵؛ شریمالی و میلر، ۲۰۱۶؛ راس و همکاران، ۲۰۱۶؛ فیلیپوف و همکاران، ۲۰۱۴).

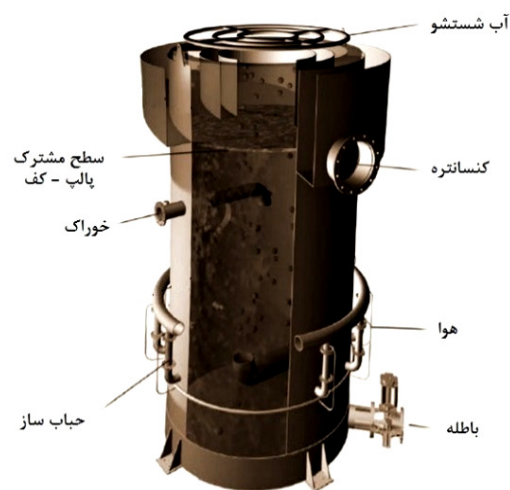
فلوتاسیون در حدود سال ۱۹۶۰، به عنوان روشی کارآمد در حذف ناخالصی‌ها به صنعت آهن معرفی شده است (کراپتری و وینسنت، ۱۹۶۲). فلوتاسیون کانه‌های آهن به دو روش مستقیم و معکوس انجام می‌شود (آراجو و همکاران، ۲۰۰۵). در فلوتاسیون مستقیم، اکسیدهای

جیمسون^۵ و میکروسول^۶ می‌شود (دل و جنکینز، ۱۹۷۶؛ جیمسون، ۱۹۸۸؛ لی و همکاران، ۲۰۰۳؛ لاترل و همکاران، ۱۹۸۵؛ اشناپدر و وان، ۱۹۸۸؛ وانگ، ۱۹۸۸). با وجود مزایا و معایب هر دو سلول، تصمیم نهایی در انتخاب فلوتاسیون مکانیکی و ستونی به نوع کانه و ملاحظات فنی و اقتصادی بستگی دارد.

عواملی نظیر مانند نرخ هوادهی، دبی خوراک ورودی و آب شستشو، ارتفاع کف و نرخ مواد شیمیایی بر روی عملکرد ستون فلوتاسیون تأثیر بسزایی دارند (نخعی و همکاران، ۲۰۱۲). با افزایش نرخ هوا، بازیابی تا رسیدن به نقطه حداکثر افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد (ماوروس و همکاران، ۱۹۹۳؛ تائو و همکاران، ۲۰۰۰). فینچ و دابی (۱۹۹۰) نشان دادند که با افزایش نرخ خوراک، زمان ماند کاهش و بازیابی افزایش می‌یابد. با افزایش میزان آب شستشو عیار محصول افزایش و بازیابی کاهش می‌یابد. تأثیر ارتفاع کف بر روی عملکرد فلوتاسیون مشابه آب شستشو است. تأثیر مواد شیمیایی (کلکتور و کف ساز) بر روی عملکرد فلوتاسیون ستونی شبیه به سلول مکانیکی است. به عبارت دیگر نرخ بهینه مواد شیمیایی برای رسیدن به حداکثر بازیابی در هر دو تجهیز تقریباً مشابه است (چائو و لاسکوفسکی، ۲۰۰۲؛ فلینت و همکاران، ۱۹۹۸؛ نخعی و ایران نژاد، ۲۰۱۷).

جایگزینی سلول‌های مکانیکی با ستون‌های فلوتاسیون برای کانه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در مقایسه ستون فلوتاسیون و سلول مکانیکی با یکدیگر در بیش‌تر موارد ادعا بر این است که ستون فلوتاسیون بازیابی بالاتری را نتیجه می‌دهد. ردی و همکاران (۱۹۸۸) با استفاده از سلول ستونی و مکانیکی به ترتیب زغالی با محتوی خاکستر ۱۲/۵ و ۱۳/۳ درصد با بازیابی ۹۰/۷ و ۸۶/۶ درصد به دست آوردند. به طور مشابه، هسیفضلی گلو و سوتکو (۲۰۰۷) کاهش محتوی خاکستر زغال از ۴۷/۵ به ۱۹/۵ درصد با استفاده از سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی و به ۱۵/۶ درصد در زمان استفاده از ستون را گزارش دادند. الفاریس و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که ستون‌های فلوتاسیون در مقایسه با سلول‌های مرسوم، برای ذرات ریز فسفات عملکرد بهتری دارند. مقایسه نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون

مورد استقبال قرار گرفته‌اند (فینچ و دابی، ۱۹۹۰؛ ولر، ۱۹۸۵). برخی از تولیدکنندگان آهن جهان از ستون‌های فلوتاسیون به عنوان جایگزین مناسب ماشین‌های فلوتاسیون مکانیکی مرسوم برای کاهش سیلیس، فسفر و آلومینا در خوراک کارخانه گندله‌سازی استفاده کرده‌اند. بخش دیگری از آن‌ها پس از مشخص شدن مزایای قابل توجه متالورژیکی این ستون‌ها (در مقایسه با فلوتاسیون مکانیکی) در کارهای نیمه صنعتی و آزمایشگاهی، در حال بررسی این روش فرآوری در مقیاس صنعتی هستند. بخش‌های مختلف سلول ستونی در شکل ۱ نشان داده شده است. مهم‌ترین تمایز سلول ستونی با مکانیکی، شکل سلول و عدم وجود ایمپلر یا استاتور برای تولید حباب‌های هوا در ستون است. در سلول ستونی، حباب‌های هوا (هوای ناشی از کمپرسور) توسط یک یا چند حباب‌ساز تولید می‌شود.



شکل ۱. ستون فلوتاسیون

مهم‌ترین مشکل ستون‌های فلوتاسیون در مقایسه با سلول‌های مکانیکی، آب مورد نیاز بیش‌تر به ازای هر تن خوراک ورودی، نرخ کف‌ساز بالاتر، اختلاط ضعیف در محور ستون و انسداد حباب‌سازهاست (الفاریس و همکاران، ۲۰۱۱؛ الشال و همکاران، ۱۹۹۶). در دهه اخیر طراحی‌ها برای حذف این معایب و افزایش بازیابی از طریق تولید میکروحباب‌ها توسعه داده شد. برخی از آن‌ها شامل ستون لیدز^۱، پکت^۲، فلوتایر^۳، هیدروکم^۴،

¹ Leeds

² Packed

³ Flotaire

⁴ Hydrochem

⁵ Jameson

⁶ Microcel

منظور استفاده بهینه از باطله‌های ایجاد شده کارخانه مگنتیت، که از زمان شروع تولید شده است و همچنین سولفورزدایی بخشی از کنسانتره تولیدی کارخانه مگنتیت، خط بازیابی هماتیت از باطله خشک با ظرفیت ۳۵۰ هزار تن در سال با ورودی ۸۰۰ هزار تن و خط سولفورزدایی از کنسانتره دارای ظرفیت ۴۶۰ هزار تن در سال با ورودی ۵۰۰ هزار تن را احداث نموده است. در مطالعه حاضر برای انجام آزمایش‌ها، از نمونه خوراک ورودی به سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی خطوط فرآوری باطله‌های خشک^۷ (DTP) و سولفورزدایی کنسانتره^۸ (SRP) مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر استفاده شد.

۲-۱- واحد فرآوری باطله‌های خشک (DTP)

در خط DTP، باطله بخش خشک کارخانه مگنتیت (با ذخیره احتمالی ۲۵ میلیون تن که از زمان شروع تولید در محل مشخصی انباشته شده‌اند)، را مورد فرآوری قرار داده و هماتیت (و باقی‌مانده مگنتیت) آن استحصال می‌شود. در مدار DTP، خوراک توسط نوارنقاله به سیلوی ۲۰۰۰ تنی انتقال می‌یابد. مواد در اولین مرحله وارد سرند دو طبقه می‌شوند. ذرات درشت‌تر از ۸ میلی‌متر از مدار خارج شده و ذرات با اندازه ۱/۵-۸ میلی‌متر در یک مدار بسته توسط آسیای میله‌ای مورد خردایش قرار می‌گیرند. تهریز سرند وارد بخش مارپیچ رافر می‌شود. باطله این بخش باطله نهایی تلقی شده و وارد تیکنر باطله شده و کنسانتره آن‌ها وارد مارپیچ‌های کلینر اولیه و ثانویه می‌شود. باطله این دو بخش در یک مدار بسته با مارپیچ رافر، وارد هیدروسیکلون می‌شود. سرریز هیدروسیکلون که دارای محتوای آهن بسیار پایین است به تیکنر باطله انتقال می‌یابد. کنسانتره مرحله کلینر ثانویه وارد سرند با دهانه ۳۰۰ میکرون می‌شود. ذرات بزرگ‌تر برای خردایش مجدد به آسیای گلوله‌ای ارسال می‌گردند. خروجی آسیا با تهریز سرند مخلوط شده و به سیکلونی که در مداری بسته با آسیای گلوله‌ای قرار دارد منتقل می‌گردد. سرریز سیکلون با دانه‌بندی ریزتر از ۱۰۰ میکرون، وارد جداکننده مغناطیسی شدت پایین (LIMS)^۹ می‌شود. باطله جداکننده LIMS، وارد جداکننده مغناطیسی شدت بالا (HIMS)^{۱۰} می‌شود. باطله

ستونی و مکانیکی نشان داد که در سلول مکانیکی، کنسانتره‌ای با عیار P_2O_5 ۳۶ درصد با بازیابی ۸۵ درصد به دست آمد در حالی که کنسانتره ستون فلوتاسیون با عیار مشابه، دارای بازیابی در حدود ۹۵ درصد بود. صنعت فرآوری آهن برزیل، در استفاده از تکنولوژی فلوتاسیون ستونی برای کاهش محتوی سیلیس کنسانتره آهن، در جهان پیش قدم بوده است. هم‌چنین در حال حاضر بسیاری از شرکت‌های تولیدکننده کنسانتره آهن در استرالیا، کانادا، آمریکا و هند اقدام به نصب سلول‌های ستونی در مدارهای فرآوری کرده‌اند (ساناساکرن و همکاران، ۲۰۱۳؛ ویانا و همکاران، ۱۹۹۱).

مرکز تحقیقات اریز در واحد نیمه صنعتی کبک کانادا محتوی سیلیس خوراک کارخانه گندله‌سازی را با استفاده از جایگزینی ستون‌های فلوتاسیون، تقریباً از ۵ درصد به ۰/۲۵ درصد با حفظ بازیابی آهن بالاتر از ۹۹ درصد کاهش داده است (ساناساکرن و همکاران، ۲۰۱۳).

مقایسه نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی و مکانیکی (مقیاس نیمه صنعتی) انجام شده در پروژه مگنتیت استرالیا برای حذف سیلیس نشان داد که در اغلب آزمایش‌ها روش فلوتاسیون ستونی عملکرد بهتری نسبت به سلول‌های مرسوم داشته است (ساناساکرن و همکاران، ۲۰۱۳).

عمده‌ترین مشکل مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر وجود سولفور در ماده معدنی است. ذرات ریز پیریت و پیرویت در حضور کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت و هماتیت، به طور کامل توسط جداکننده‌های مغناطیسی بازیابی نمی‌شوند. بنابراین به دلیل اهمیت نقش فلوتاسیون در عملیات سولفورزدایی از کنسانتره جداکننده‌های فلوتاسیون مغناطیسی و هم‌چنین کاربرد موفق ستون‌های فلوتاسیون در سیلیس‌زدایی از کانه‌های آهن، در تحقیق حاضر به مقایسه عملکرد ستون فلوتاسیون با سلول‌های مکانیکی در شرایط بهینه پرداخته می‌شود.

۲- واحدهای صنعتی مورد مطالعه

مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر با حدود ۱/۲ میلیارد تن ذخیره سنگ‌آهن (عمدتاً مگنتیت و هماتیت) و تولید سالانه ۱۰ میلیون تن کنسانتره، یکی از بزرگ‌ترین معادن و در عین حال تولیدکنندگان سنگ‌آهن مورد نیاز صنایع فولاد ایران محسوب می‌گردد. این مجتمع به

⁷ Dry tailing process

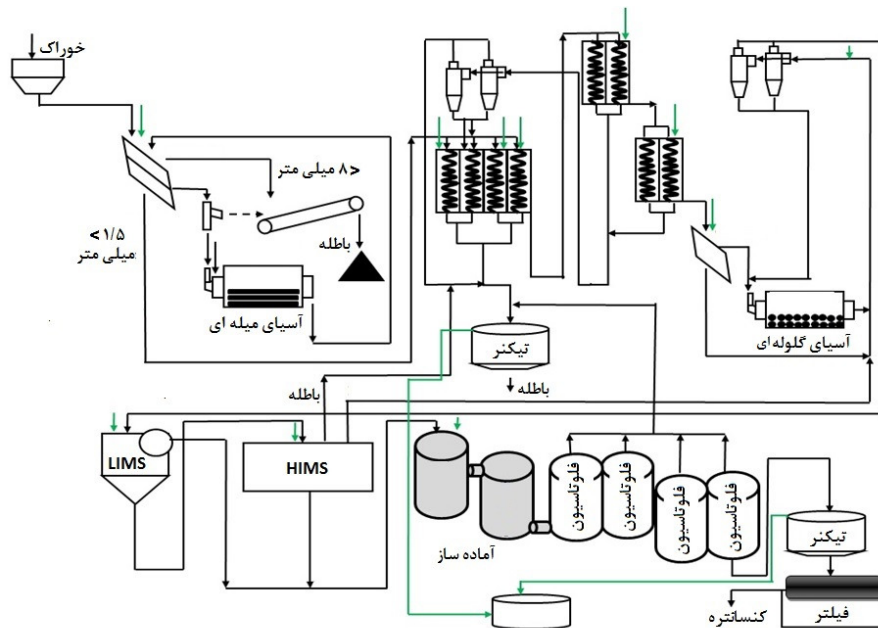
⁸ Sulfur reduction process

⁹ low intensity magnetic separator

¹⁰ high intensity magnetic separator

فلوتاسیون، از آمیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور و از متیل ایزو بوتیل کربونیل (MIBC) نیز به عنوان کف‌ساز استفاده می‌شود. مدار پرعیارکنی خط DTP در شکل ۲ نشان داده شده است.

HIMS به عنوان باطله نهایی وارد تیکنر باطله و محصول میانی آن به سیکلون انتقال می‌یابد. کنسانتره دو جداکننده مغناطیسی بعد از اختلاط به منظور کاهش میزان سولفور وارد مرحله فلوتاسیون می‌شود. در عملیات



شکل ۲. شمای کلی مدار DTP

آهن گل‌گهر در طی ۴ ماه و در ۱۰ نوبت نمونه‌برداری شد. نتایج آنالیز دانه‌بندی نمونه معرف نشان داد که برای خط DTP و SRP، d_{80} به ترتیب برابر ۹۵ و ۶۰ میکرون بود. میانگین عیاری عناصر در نمونه‌های معرف هر دو خط در جدول ۱ نشان داده شده است.

مطالعات کانی‌شناسی مقاطع صیقلی و تیغه‌های نازک نمونه DTP نشان داد که هماتیت مهم‌ترین کانی آهن‌دار است. هماتیت در نمونه ثانویه بوده و در اثر اکسیداسیون مگنتیت و طی فرآیند مارتیتی شدن ایجاد شده و حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد نمونه را تشکیل می‌دهد. شدت مارتیتی شدن بسیار شدید بوده و در مواردی بلورهای مگنتیت کاملاً به هماتیت تبدیل شده و اثری از مگنتیت باقی نمانده و یا به صورت باقی‌مانده‌هایی در مرکز بلور دیده می‌شوند. هم‌چنین فراوانی بسیار کم بلورهای مگنتیتی که در آن مارتیتی شدن ضعیفی رخ داده است مشاهده می‌شود. در مواردی شدت اکسیداسیون به حدی بالا بوده که هماتیت نیز در اثر اکسیداسیون به گوئیت تبدیل شده است. در نمونه گرفته شده معمولاً هماتیت و مگنتیت با

۲-۲- واحد سولفورزدایی از کنسانتره کارخانه مگنتیت (SRP)

مدار پرعیارکنی خط SRP در شکل ۳ نشان داده شده است. کنسانتره‌های بخش خشک و تر کارخانه مگنتیت پس از انتقال به سیلوی ۲۰۰۰ تنی، توسط نوارنقاله وارد آسیای گلوله‌ای (در مدار بسته با سیکلون) می‌شوند. سرریز سیکلون با دانه‌بندی ریزتر از ۱۰۰ میکرون توسط پمپ به سه جداکننده مغناطیسی شدت پایین منتقل می‌شود. باطله جداکننده‌های اولیه و ثانویه باطله نهایی را تشکیل داده و به تیکنر باطله ارسال می‌گردد. کنسانتره نهایی جداکننده‌های مغناطیسی، به منظور عملیات سولفورزدایی وارد مرحله فلوتاسیون می‌شود.

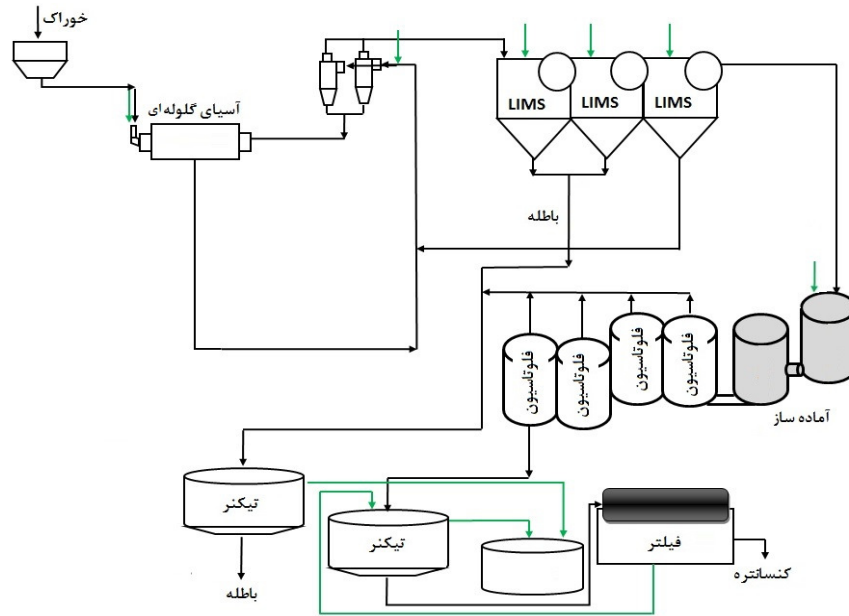
۳- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

۳-۱- ویژگی‌های خوراک ورودی

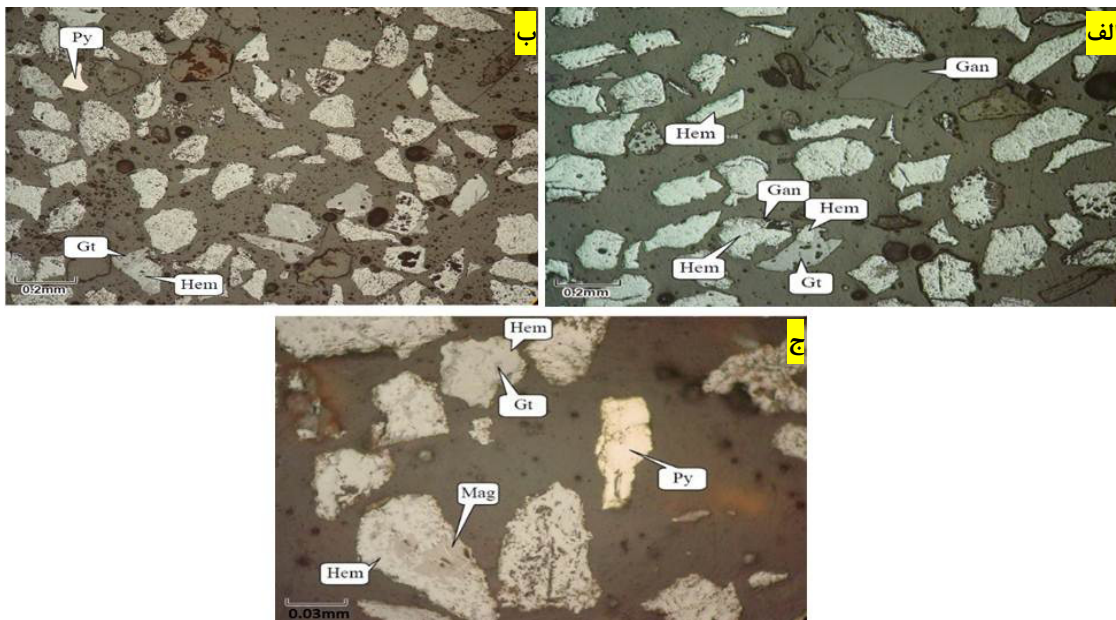
جهت انجام آزمایش‌های مربوطه در این تحقیق از خوراک ورودی به سلول‌های فلوتاسیون خط DTP و SRP کارخانه هماتیت، مگنتیت و سولفورزدایی مجتمع سنگ

دارای فراوانی تا ۶ درصد است. پیریت دارای فراوانی ۱ تا ۲ درصد است و درگیری کمی با بلورهای حاوی آهن در این نمونه نشان می‌دهد (شکل ۴).

یکدیگر درگیری دارند. مقدار تقریبی مگنتیت در نمونه تقریباً ۵ تا ۸ درصد است. گوتیت هم‌چنین در اثر اکسیداسیون پیریت حاصل شده است. گوتیت در نمونه



شکل ۳. شمای کلی مدار SRP



شکل ۴. الف) درگیری هماتیت با گانگ (۱۵۰+ و ۱۸۰- میکرون)، ب) بیش‌تر بلورهای هماتیت و پیریت به صورت آزاد (۱۰۶+ و ۱۵۰- میکرون)، ج) آزادی پیریت، اکسیداسیون بلور مگنتیت به هماتیت و اکسیداسیون هماتیت به گوتیت (۴۵+ و ۷۵- میکرون)

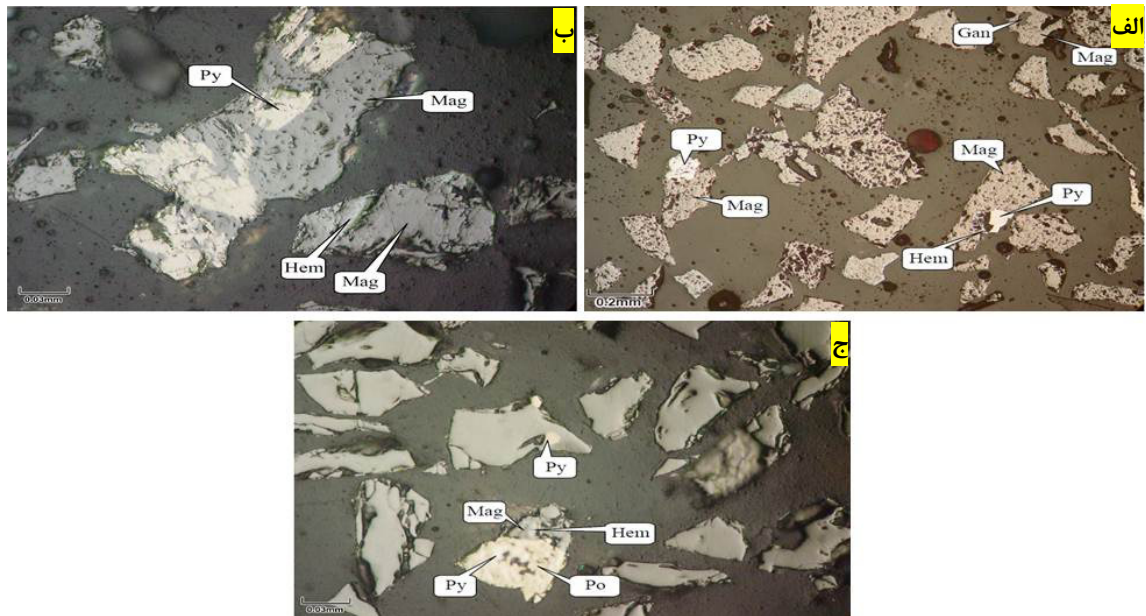
جدول ۱. مشخصات عیاری خوراک‌های نمونه‌برداری شده

نمونه	Fe (%)	FeO (%)	S (%)	P (%)
DTP	۶۳/۳۳	۱/۴۸	۰/۴۷	۰/۱۳
SRP	۶۹/۰۸	۲۷/۷۹	۰/۵۹	۰/۰۲

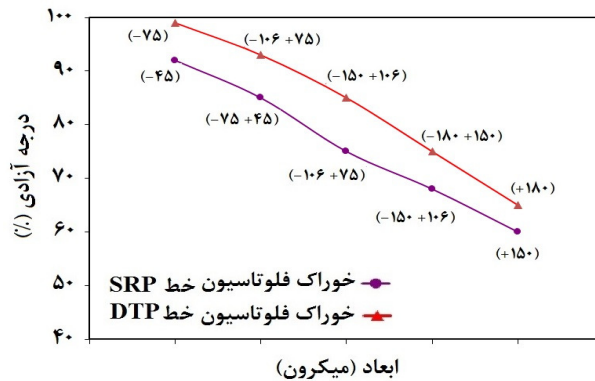
تا ۲ درصد است. در مواردی پیریت در اثر دگرسانی به گوتیت تبدیل شده است. گوتیت در نمونه دارای فراوانی ۱ تا ۳ درصد است (شکل ۵).

برای مطالعات درجه آزادی، مقاطع صیقلی از نمونه‌های طبقه‌بندی شده در ابعاد $+180$ ، $+150$ ، -180 ، -106 ، $+75$ و -75 بر حسب میکرون تهیه شد و توسط میکروسکوپ نوری پلاریزان با نور انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات درجه آزادی در شکل ۶ آورده شده است. درجه آزادی کل نمونه معرف DTP و SRP به ترتیب برابر ۹۲ و ۸۵ درصد می‌باشد.

مطالعات کانی‌شناسی نمونه معرف خط SRP نشان داد که مگنتیت مهم‌ترین کانی آهن‌دار است. مقدار تقریبی مگنتیت در نمونه به طور تقریبی ۶۵ تا ۷۰ درصد است. هماتیت در نمونه کانی ثانویه بوده و در اثر اکسیداسیون مگنتیت و طی فرآیند مارتیتی شدن ایجاد شده و دارای مقدار تقریبی ۵ تا ۱۰ درصد است. مارتیتی شدن در این نمونه بسیار شدید نبوده و بیش‌تر از قسمت‌های حاشیه‌ای و محل شکستگی‌ها ایجاد شده است. پیریت و پیروتیت کانی سولفیدی مزاحم در نمونه هستند که تقریباً به صورت درگیر با مگنتیت در تمامی فراکسیون‌ها مشاهده شده و به ترتیب دارای مقدار تقریبی ۲ تا ۳ و ۱



شکل ۵. الف) درگیری مگنتیت با پیریت و کانی باطله ($+150$ میکرون)، ب) درگیری پیریت با مگنتیت و مارتیتی شدن بلور مگنتیت ($+75$ و -106 میکرون)، ج) ادخال بلورهای پیریت در مگنتیت ($+45$ و -75 میکرون)



شکل ۶. درجه آزادی نمونه‌های مورد مطالعه

۳-۲- آزمایش‌های فلوتاسیون

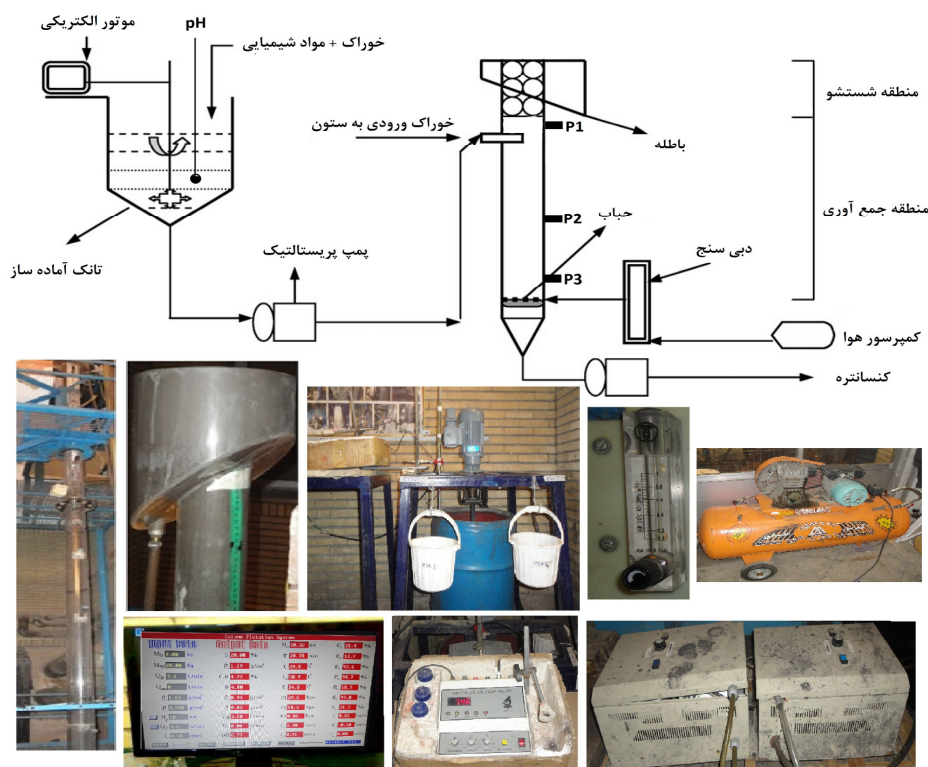
۳-۲-۱- فلوتاسیون ستونی

آزمایش‌ها در ماشین‌های فلوتاسیون ستونی (مقیاس نیمه صنعتی) و مکانیکی انجام شد. آزمایش‌ها در سلول ستونی از جنس پلاکسی‌گلاس با ارتفاع ۴۰۰ و قطر ۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت. جهت تامین بار اولیه از یک مخزن ۷۵ لیتری مجهز به یک همزن استفاده شد، تا ضمن آماده‌سازی از ته‌نشینی مواد جلوگیری نماید. پالپ آماده شده از طریق یک پمپ پریستالتیک به درون سلول پمپاژ شد. برای اندازه‌گیری و تنظیم نرخ جریان هوا و آب شستشو از فلومتر استفاده شد. حباب‌ساز مورد استفاده از نوع داخلی و متخلخل (قطر منافذ ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون) با قطر ۳ cm و طول ۱۴ cm بود.

pH پالپ در مخزن خوراک ورودی در طول آزمایش به طور پیوسته اندازه‌گیری شد. در عملیات فلوتاسیون معکوس از آمیل گزنات پتاسیم (PAX) به عنوان کلکتور و از MIBC به عنوان کف‌ساز استفاده گردید. از اسید

سولفوریک و NaOH برای تنظیم pH استفاده شد. پس از تنظیم pH و آماده‌سازی خوراک با مواد شیمیایی (۴ دقیقه کلکتور و ۳ دقیقه کف‌ساز)، پالپ به ستون خوراک‌دهی می‌شود و در یک مدار بسته تا رسیدن به شرایط پایا کار می‌کند.

در این ستون برای اندازه‌گیری ماندگی گاز و ارتفاع کف از سه فشارسنج استفاده شده است، بطوری که دو حس‌گر در ناحیه پالپ (ناحیه جمع‌آوری) و یک حس‌گر در ناحیه کف (ناحیه شستشو) قرار دارد. در سیستم کنترل سلول ستونی، تابع کنترل سطح دور موتور پمپ باطله را بر اساس موقعیت سطح مشترک نسبت به مقدار مطلوب، تغییر می‌دهد. داده‌های بدست آمده از حس‌گرها جهت انجام کالیبراسیون و مانیتورینگ به یک پردازشگر مخابره می‌شود و داده‌های واقعی به یک کنترل‌کننده فرستاده می‌شوند. مدار شماتیک فلوتاسیون ستونی مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. تجهیزات ستون فلوتاسیون مورد استفاده

شامل نرخ هوادهی، درصد جامد، ارتفاع کف، میزان مواد شیمیایی و pH مورد ارزیابی قرار گرفتند. در مجموع ۲۳ آزمایش فلوتاسیون ستونی در مقیاس نیمه صنعتی برای

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی بر حذف سولفور از روش طراحی آزمایش D-Optimal استفاده شد. در این مطالعه مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی

فلوتاسیون ستونی و سایر عوامل مانند نرخ اضافه کردن مواد شیمیایی، pH و درصد جامد در مقادیر بهینه (تعیین شده توسط آزمایش‌های قبلی (نخعی و ایران‌نژاد، ۲۰۱۷)) تنظیم شد (جدول ۳).

پس از تنظیم pH، کلکتور و سپس کف‌ساز به سلول اضافه شدند. زمان آماده‌سازی حدود ۶ دقیقه، ۴ دقیقه برای کلکتور و ۲ دقیقه برای کف‌ساز در نظر گرفته شد. پس از آماده‌سازی، با باز شدن شیر هوا به مدت ۷ دقیقه کف‌گیری انجام گرفت.

نمونه خط SRP و ۲۶ آزمایش برای خط DTP انجام شد. عوامل و سطوح به کار رفته در آزمایش‌های فلوتاسیون در جدول ۲ آورده شده است. به منظور فهم بهتر تأثیر کلکتور و کف‌ساز، چهار سطح مختلف از میزان مصرف آن بررسی شد.

۳-۲-۲- فلوتاسیون مکانیکی

آزمایش‌ها در یک سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی از نوع دنور با حجم ۴ لیتر با دور همزن ۱۵۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. نوع مواد شیمیایی مشابه شرایط آزمایش

جدول ۲. مقادیر سطوح انتخاب شده برای آزمایش‌ها

عامل	شاخص	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
میزان کلکتور (gr/t)	A	۸۰	۱۱۰	۱۶۰	۲۰۰
میزان کف‌ساز (gr/t)	B	۱۰۰	۱۴۰	۱۸۰	۲۴۰
ارتفاع کف (cm)	C	۲۰	۳۵	۵۰	-
سرعت ظاهری هوا (cm/s)	D	۱/۴	۱/۶	۱/۸	-
درصد جامد (%)	E	۱۵	۲۳	۳۰	-
pH	F	۲/۵	۴/۷۵	۷	-

جدول ۳. شرایط بهینه آزمایش فلوتاسیون مکانیکی [۲۸]

عامل	مقدار بهینه
میزان کلکتور (gr/t)	۱۶۰
میزان کف‌ساز (gr/t)	۱۴۰
درصد جامد (%)	۳۰
pH	۴/۷۵

هم‌چنین افزایش برخورد ذره - حباب افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش سرعت ظاهری هوا سبب کاهش زمان ماند ذرات در فاز کف شده و بازیابی افزایش می‌یابد ولی در مقادیر بالاتر از ۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه به دلیل افزایش در ادغام حباب‌ها (تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر) روند کاهش به خود می‌گیرد. با کاهش ارتفاع کف، میزان حذف پیریت افزایش می‌یابد که می‌تواند به کاهش برگشت ذرات از فاز کف به فاز پالپ و هم‌چنین کاهش زمان ماند ذرات در ناحیه کف مربوط باشد. بیش‌ترین و کمترین میزان حذف پیریت به ترتیب در pH برابر ۴/۷۵ و ۲/۵ به دست آمد. بازداشت پیریت در pH کمتر از ۳ به تجزیه گزنتات به اسید زانتیک و سپس به دی سولفید کربن و الکل مربوط می‌شود. وجود یون‌های فریک ناشی از ذرات کانی‌های اکسیدی آهن به شدت احتمال این

۴- نتایج و بحث

بر اساس آنالیز واریانس تست فیشر، مقادیر P کوچک‌تر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که هر دو مدل برای حذف پیریت در عملیات فلوتاسیون ستونی معنادار است (جدول ۴). این نکته بیانگر این است که مدل پیشنهادی دارای برآزش مناسبی است. متغیرهای A، C، D و F تأثیر معناداری بر حذف پیریت در هر دو نمونه SRP و DTP دارند. هم‌چنین میزان کف‌ساز در نمونه SRP دارای تأثیر معنادار است. میزان pH و نرخ کلکتور مصرفی بیش‌ترین تأثیر را بر حذف پیریت دارند.

نتایج نشان داد که با افزایش میزان کلکتور میزان حذف پیریت افزایش می‌یابد که آن را می‌توان به افزایش میزان آب‌گریزی ذرات پیریت نسبت داد. با افزایش سرعت ظاهری هوا، بازیابی پیریت به دلیل افزایش ماندگی گاز و

آزمایش‌ها نشان می‌دهد در شرایط بهینه، دستیابی به کنسانتره نهایی با عیار سولفور کمتر از ۰/۰۸ درصد برای خط DTP و ۰/۱ درصد برای خط SRP با بازیابی آهن بالای ۹۸٪ درصد ممکن است. این داده‌ها بهبود عملکردی قابل توجهی را در مقایسه با نتایج فلوتاسیون مرسوم کارخانه در روزهای نمونه‌گیری نشان می‌دهد، به طوری که میانگین عیار سولفور کنسانتره و همچنین میزان هدرروی آهن در واحد صنعتی، به طور چشم‌گیری بیش‌تر از نتایج حاصل از آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی بود.

تجزیه را افزایش می‌دهد. به دلیل پایداری کم هیدروکسیدهای فریک در محیط‌های با اسیدیته متوسط این یون‌ها در محلول آزاد شده و تبدیل گزنتات به دیگرانتوژن را راحت‌تر می‌کنند، بنابراین پیریت در pH حدود ۴/۷۵ به خوبی شناور می‌شود (ژیانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

جدول ۵ سطوح بهینه هر متغیر را برای دستیابی به بالاترین میزان حذف پیریت با هدف حداقل کردن عیار سولفور در کنسانتره (با در نظر گرفتن پارامترها در محدوده در نظر گرفته شده) را نشان می‌دهد. در واقع

جدول ۴. مقادیر P و F برای متغیرهای اصلی پاسخ‌ها

عامل	مقدار F	مقدار P	میانگین مربعات
DTP			
A	۱۶/۴	۰/۰۰۰۲	۲۵۶/۳۷
B	۲/۲۲	۰/۱۴	۳۴/۶۵
C	۴/۷۶	۰/۰۳	۷۴/۳۶
D	۳/۷	۰/۰۴۸	۵۷/۸۸
E	۲/۳۵	۰/۱۴	۳۶/۷۳
F	۱۰۲/۷۶	<۰/۰۰۰۱	۱۶۰۵/۹۸
مدل	۴۴/۲۹	<۰/۰۰۰۱	۶۹۲/۱۲
CV= 6.77%, B, E= NS			
SRP			
A	۱۴/۴۹	۰/۰۰۱۳	۴۸/۰۱
B	۱۲/۳۴	۰/۰۰۲	۴۰/۹۳
C	۷/۰۱	۰/۰۲	۲۳/۱۷
D	۱۵/۱۲	۰/۰۰۲	۵۰/۱۲
E	۱/۸۷	۰/۲	۶/۲۲
F	۱۲۰/۱۵	<۰/۰۰۰۱	۳۹۸/۴۸
مدل	۳۶/۰۸	<۰/۰۰۰۱	۱۱۹/۶۵
CV= 3.26%, E= NS			

جدول ۵. نتایج بهینه آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی

نمونه خوراک فلوتاسیون	میزان PAX (gr/t)	میزان MIBC (gr/t)	ارتفاع کف (cm)	دبی هوا (cm/s)	درصد جامد	pH	عیار S در کنسانتره (%)	حذف سولفور (%)	میانگین عیار S کنسانتره واحد صنعتی در روزهای نمونه‌برداری
DTP	۱۶۰	۱۴۰	۲۰	۰/۵۲	۳۰	۴/۷۵	۰/۰۸	۸۳	۰/۱۹
SRP	۲۰۰	۱۸۰	۲۰	۰/۵۲	۳۰	۴/۷۵ و ۷	۰/۱	۸۲	۰/۲۷

میزان مواد شیمیایی، درصد جامد و pH پالپ مشابه شرایط بهینه ستون فلوتاسیون در نظر گرفته شد. نتایج آورده شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که در همه آزمایش‌ها فلوتاسیون ستونی عملکرد بهتری نسبت به

به منظور بررسی کارایی فلوتاسیون ستونی، نتایج بهینه آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی با نتایج آزمایش‌های سلول فلوتاسیون مکانیکی و همچنین برنامه طراحی خطوط مورد مطالعه مقایسه گردید. لازم به ذکر است

اتلاف بسیار کمتر آهن در فرآیند سولفورزدایی با ستون فلوتاسیون است. به عبارت دیگر برای هر دو نمونه، ستون فلوتاسیون کارایی جدایش بسیار بهتری را نسبت به سلول مکانیکی دارد. مطالعه حاضر نشان داد که فلوتاسیون ستونی عملکرد متالورژیکی بالاتری را در مقایسه با ماشین‌های فلوتاسیون مکانیکی مرسوم برای تولید کنسانتره آهن با محتوی سولفور پایین و بازیابی بالا دارد.

سلول‌های مرسوم داشته است. به عنوان مثال در نمونه خط SRP با ستون فلوتاسیون، کنسانتره‌ای با عیار سولفور ۰/۱ درصد با نسبت وزنی باطله به خوراک (T/F) برابر ۱/۴ درصد به دست آمد. در حالی که کنسانتره فلوتاسیون مکانیکی با عیار سولفور ۰/۱۵ درصد دارای نسبت وزنی باطله به خوراک (T/F) برابر ۲/۸ درصد است. لازم به ذکر است طراحی اولیه خط دارای نسبت T/F حدود ۸ درصد با عیار سولفور مشابه ستون است. نتایج نسبت T/F و عیار آهن غیرپیریتی در باطله نشان‌دهنده

جدول ۶. مقایسه نتایج سلول ستونی با سلول مکانیکی و طراحی واحد عملیاتی

طراحی واحد		سلول مکانیکی				ستون فلوتاسیون				نمونه
درصد وزنی باطله / خوراک	عیار S کنسانتره	کارایی جدایش سولفور	عیار Fe غیر پیریتی در باطله	درصد وزنی باطله / خوراک	عیار S کنسانتره	کارایی جدایش سولفور	عیار Fe غیر پیریتی در باطله	درصد وزنی باطله / خوراک	عیار S کنسانتره	
۷	۰/۰۸	۷۸	۳۹/۶	۳/۰۷	۰/۱	۸۱/۴	۱۰/۲	۱/۲	۰/۰۸۶	DTP
۸/۲	۰/۰۸	۷۵/۷	۴۰/۶	۲/۸	۰/۱۵	۸۲/۶	۱۰/۴	۱/۴	۰/۱	SRP

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر و پژوهشکده سنگ آهن و فولاد به خاطر همکاری صمیمانه، تشکر و سپاسگزاری نمایند.

منابع

- Al-Fariss, T. F., Abd El-Aleem, F. A., El-Nagdy, K. A (2013) Beneficiation of Saudi phosphate ores by column flotation technology. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 25: 113–117.
- Al-Fariss, T. F., Al-Zahrani, S. M., Abd El-Aleem, F. A., El-Nagdy K. A (2011) Removal of carbonate minerals from Saudi phosphate by reverse flotation process. 6th International Conference on Phosphate Beneficiation, March 6–11, Kun Ming, China.
- Araujo, A. C., Viana, P. R. M., Peres, A. E. C (2005) Reagents in iron ores flotation. *Mineral Engineering*, 18: 219–224.
- Bulatovic, S. M (2007) *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*. Amsterdam: Elsevier, Internet resource.
- Cho, Y. S. and Laskowski, J. S (2002) Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability. *International Journal of Mineral Processing*, 64: 69–80.
- Crabtree, E.H., Vincent, J. D (1962) Historical outline of major flotation developments. 50th Anniversary, Ed. D.W. Fuerstenau. New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering Inc.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مقایسه عملکرد ستون فلوتاسیون با سلول‌های مکانیکی جهت سولفورزدایی از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر پرداخته شده است. همچنین، تأثیر عوامل عملیاتی مهم نظیر سرعت ظاهری گاز، ارتفاع کف، میزان کلکتور و کف‌ساز، درصد جامد و pH برای دستیابی به بالاترین میزان حذف پیریت با استفاده از ستون فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. جهت انجام آزمایش‌ها، از خوراک ورودی به سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی خطوط فرآوری باطله‌های خشک (DTP) و سولفورزدایی (SRP) این مجتمع با عیار سولفور به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۶ درصد استفاده شد.

با استفاده از سلول ستونی در شرایط بهینه، عیار سولفور کنسانتره به ۰/۰۸ درصد برای نمونه DTP و ۰/۱ درصد برای نمونه SRP کاهش یافت. نتایج حاصل از مقایسه عملکرد ستون فلوتاسیون با سلول مکانیکی در شرایط بهینه نشان داد که فلوتاسیون ستونی از عملکرد بالاتری جهت حذف سولفور برخوردار است، به طوری که کارایی جدایش سولفور در فلوتاسیون ستونی برای نمونه DTP و SRP به ترتیب حدود ۴ و ۷ درصد بالاتر از سلول مکانیکی است.

- Nakhaei, F. and Irannajad, M (2017). Pyrite removal from iron ore concentrate by column flotation. *Journal of Research-Papers Mineral Resources Engineering*, 1(2): 1-11.
- Nakhaei, F., Mosavi, M. R., Sam, A. Vaghei., Y (2012) Recovery and grade accurate prediction of pilot plant flotation column concentrate: neural network and statistical techniques. *International Journal of Mineral Processing*, 110-111: 140-154.
- Rath, S. S., Sahoo, H. S., Das, K., Das, B., Mishra, B. K (2014) Influence of band thickness of banded hematite quartzite (BHQ) ore in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 130: 48-55.
- Reddy, P. R. S., Kumar, S. G., Bhattacharyya, K. K., Sastri, S. R. S. and Narasimhan, K. S (1988) Flotation column for fine coal beneficiation. *International Journal of Mineral Processing*, 24: 161-172.
- Schneider, J. C. and Van, G. (1988) Design and operation of the hydrochem flotation column. Sastry, K. V. S. (Ed.), *Column Flotation'88: International Symposium on Column Flotation*, SME, Phoenix Arizona, 287.
- Shrimali, K., Miller, J. D (2016) Polysaccharide depressants for the reverse flotation of iron ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(1): 83-95.
- Tao, D., Luttrell, G. H. and Yoon, R. H (2000) A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*, 59: 25-43.
- Thanasekaran, H., Kohmuench, J. and Christodoulou, L (2013) Column flotation of iron ore - Status and advances. *Iron Ore*, Western Australia, 1-14.
- Viana, P. R. M., Silva, J. P., Rabelo, P. J. B., Coelho, A. G. and Silva, V. C (1991) Column flotation for the expansion of the flotation circuit at Samarco Mineracao. *Column 91*, Int. Conf. on Column Flotation, Sudbury, June 2-6.
- Wheeler, D. A (1985) Column flotation: the original column, in froth flotation. Conference, Chile, Proc. 2nd Latin American Congress on Froth Flotation.
- Yang, D. C (1988) A new packet column flotation system. Sastry, K. V. S. (Ed.), *Column Flotation'88: International Symposium on Column Flotation*, SME, Phoenix Arizona, 257.
- Dell, C. C., and Jenkins, B.W (1976) *The Leeds Flotation Column*. 7th International Coal Preparation Congress, Sydney, Australia.
- El-Shall, H., Zhang, P., Snow, R (1996) Comparative analysis of dolomite-francolite flotation techniques. *Minerals and Metallurgical Processing*, 13: 135-139.
- Filippov, L. O., Severov, V. V., Filippova, I. V (2014) An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 127: 62-69.
- Finch, J. A., Dobby, G. S (1990) *Column Flotation*. Pergamon Press, Oxford.
- Flint, I. M., MacPhail, P. and Dobby, G. S (1988) Aerosol frother addition in column flotation, *CIM Bull.*, 81: 81-90.
- Hacifazlioglu, H. and Sutcu, H (2007) Optimization of some parameters in column flotation and a comparison of conventional cell and column cell in terms of flotation performance. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineer*, 38: 287-293.
- Irannajad, M., Nakhaei, F., Mohammadnejad, S (2018) Correlation between column flotation froth image features in respect to operational variables. *Journal of Research-Papers Mineral Resources Engineering*, 3 (1): 59-76.
- Jameson, G. J (1988) A new concept in flotation column design. Sastry, K. V. S. (Ed.), *Column Flotation' 88: International Symposium on Column Flotation*, SME, Phoenix Arizona, 281.
- Jiang, C. L., Wang, X. H., Parekh, B. K. and Leonard, J. W (1998) The surface and solution chemistry of pyrite flotation with xanthate in the presence of iron ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 136 (1-2): 51-62.
- Li, B., Tao, D., Ou, Z., and Liu, J (2003) Cyclo-Microbubble column flotation of fine coal. *Separation Science and Technology*, 38: 1125-1140.
- Luttrell, G. H., Keyser, P. M., Adel, G. T., Yoon, R. H (1985) Improvements in recovery and selectivity with the microbubble flotation process, *Second Annual Pittsburgh Coal Conference*, Vol. 43, Pittsburg, Pennsylvania, U.S.A.
- Ma, M (2012) Froth flotation of iron ores. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1(2): 56-61.
- Mavros, P., Kydros, K. A. and Matis, K. A (1993) Arsenopyrite enrichment by column flotation. *Mineral Engineering*, 6: 1265-1277.
- Nakhaei, F., Irannajad, M (2017) Sulphur Removal of Iron Ore Tailings by Flotation. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38 (12): 1755-1763.

Comparison of conventional and column flotation performance for desulfurization of iron ore concentrate

F. Nakhaei¹, M. Irannajad^{2*} and S. Mohammadnejad³

1, 2- Dept., of Mining & Metallurgical Eng., Amirkabir University of Technology, Tehran
3-Dept., of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

* iranajad@aut.ac.ir

Received: 2017/8/21 Accepted: 2019/4/23

Abstract

The content of sulfur in iron ore concentrate is the major problem of steel making industries. In this regard, the reverse flotation operation is used to reduce the amount of sulfur of the final concentrate. Recently, the substitution of mechanical flotation cells with flotation columns for the sake of impurities removal has been highly taken into consideration. The purpose of this study is comparing the performance of mechanical and column cells in desulphurization of Gole Gohar iron ore complex magnetic separators concentrate. Using column flotation in an optimal condition led to the remarkable reduction of sulfur so that the final concentrate with the sulfur grade lower than 0.1 % and iron recovery over 98% was obtained. The results comparison of column and mechanical flotation have showed that the column cell outperformed the metallurgical performance for producing iron concentrate consisting of low sulfur content. Sulfur separation efficiency in column flotation was almost 7% higher than that of the mechanical cells, meanwhile, the wasting rate of non- pyrite iron in column flotation is less than that of the mechanical cells.

Keywords: Iron ore, Gole Gohar, Flotation column, Mechanical cells, Desulfurization