

حذف پیریت از کنسانتره سنگ آهن با فلوتاسیون ستونی

فردیس نخعی^۱، مهدی ایران نژاد^{*۱}

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۹۵/۰۸/۲۳، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۱۷)

چکیده

پیریت که به طور معمول همراه کانی‌های اکسیدی آهن یافت می‌شود به دلیل ایجاد مشکل در صنایع فولادسازی به عنوان کانی باطله و مزاحم در نظر گرفته می‌شود. ذرات ریز پیریت در حضور کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت و هماتیت، به طور کامل با جداکننده‌های مغناطیسی بازیابی نمی‌شوند. فلوتاسیون معکوس روشی موثر برای کاهش سولفور از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی است. امروزه ستون‌های فلوتاسیون به دلیل هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی پایین‌تر و توانایی تولید کنسانتره با عیار و بازیابی بالاتر در مقایسه با سلول‌های مکانیکی، به طور وسیع در صنایع فرآوری آهن با هدف کاهش ناخالصی‌ها مورد استقبال قرار گرفته‌اند. هدف از این تحقیق، کاهش میزان سولفور ناشی از پیریت کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی خط بازیابی هماتیت مجتمع سنگ آهن گل‌گهر از حدود ۰/۵ درصد به کمتر از ۰/۱ درصد با استفاده از فلوتاسیون ستونی است. به این منظور با انجام ۲۶ آزمایش در قالب طراحی آزمایش‌ها، تاثیر عوامل عملیاتی مهم مانند سرعت ظاهری گاز، ارتفاع کف، میزان کلکتور و کف‌ساز، درصد جامد و pH پالپ برای دستیابی به هدف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فلوتاسیون معکوس ستونی روشی مناسب برای سولفورزدایی کانه‌های آهن است به طوری که در شرایط بهینه، تولید محصولی با عیار سولفور ۰/۰۸ درصد با بازیابی آهن ۹۹/۵ درصد قابل دستیابی است. مقایسه عملکرد فلوتاسیون ستونی با مکانیکی در شرایط بهینه نشان می‌دهد که برای حذف سولفور، فلوتاسیون ستونی کارایی جدایش بالاتری (در حدود ۴ درصد) نسبت به فلوتاسیون مکانیکی دارد.

کلمات کلیدی

آهن، گل‌گهر، فلوتاسیون ستونی، پیریت، سولفورزدایی.

۱- مقدمه

کاهش ذخایر پرعیار مواد معدنی با ترکیب کانی شناختی ساده، تولیدکنندگان آهن را مجبور به اکتشاف ذخایر اقتصادی با عیار پایین و با ترکیبات پیچیده و به دنبال آن بررسی مدارهای جدید برای تعیین موثرترین رویکرد فرآیندی کرده است.

آهن پر مصرفترین فلز در سطح جهان است و در حدود ۵ درصد پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. بیش از ۹۸ درصد ذخایر معدنی آهن، برای تولید فولاد و مابقی آن‌ها در صنایع دیگر مانند شستشوی زغال و تولید سیمان استفاده می‌شود. بیشتر کانسنگ‌های آهن به شکل اکسیدی و سولفیدی و درصد کمتری به صورت کربناته وجود دارند [۱].

مشکل عمده تولیدکنندگان آهن در جهان حضور ناخالصی‌ها مانند سیلیکا، فسفر، آلومینا و سولفور در خوراک ورودی به واحدهای فرآوری برای تولید محصول با کیفیت است. کیفیت لازم کنسانتره آهن مورد استفاده در صنایع فولادسازی (احیای مستقیم) در جدول ۱ آورده شده است. امروزه پرعیارسازی کانه‌های آهن اکسیده به منظور تولید محصول قابل عرضه در بازارهای جهانی و همچنین استفاده در صنایع پایین‌دستی اهمیت زیادی دارد. انتخاب روش پرعیارسازی بر پایه ترکیبات کانی‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی، درجه آزادی کانی‌های آهن‌دار و باطله همراه است.

جدول ۱: کیفیت مورد نیاز کنسانتره آهن برای صنایع فولاد

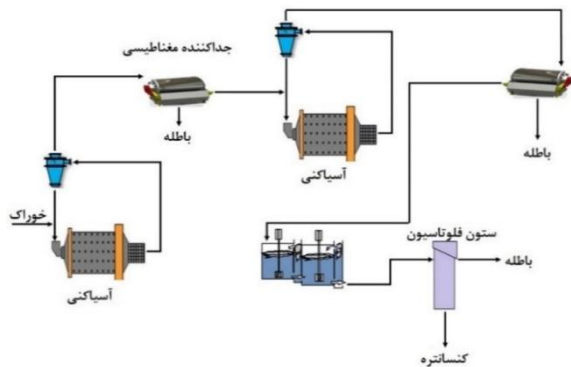
ناخالصی	عیار (درصد)
سولفور	>۰٫۱
سیلیس	>۲
آلومینا	>۲
فسفر	>۰٫۰۲

با کاهش ذخایر پرعیار آهن (۶۰-۶۳ درصد) در جهان، روش‌های فرآوری برای تولید کنسانتره از مواد معدنی کم عیار، روند رو به رشدی دارد. جدایش ثقلی و مغناطیسی (SLon و PHGMS, WHIMS, LIMS) 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 مقادیری ناخالصی دارد. نیاز بازار و صنایع تولید آهن و فولاد به کنسانتره‌های با عیار آهن بالا و حداقل ناخالصی‌های موجود، اهمیت استفاده

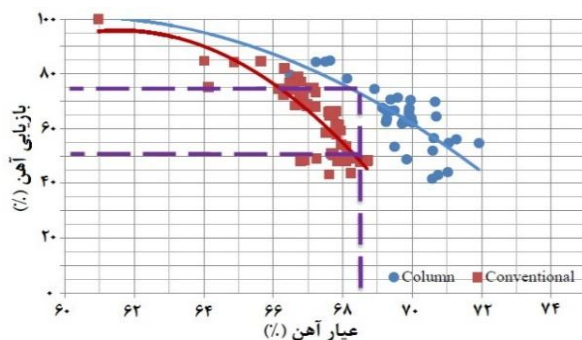
از فرآیند فلوتاسیون را افزایش داده است. فلوتاسیون حدود ۵۰ سال به عنوان روشی موثر برای حذف ناخالصی‌ها در صنایع آهن استفاده شده است. بخش اعظم تحقیقات انجام شده در فلوتاسیون کانه‌های آهن، به حذف سیلیس از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی مربوط می‌شود [۷-۲].

فلوتاسیون کانه‌های آهن به دو روش مستقیم و معکوس انجام می‌شود. در فلوتاسیون مستقیم، اکسیدهای آهن به وسیله کلکتورهای آنیونی مانند اسیدهای چرب شناور می‌شود. در فلوتاسیون معکوس کانی‌های باطله با استفاده از مواد شیمیایی مانند آمین یا گزنتات شناور شده و کانی با ارزش بازداشت می‌شود [۸].

کاربرد صنعتی سلول‌های ستونی از اوایل سال ۱۹۸۰ شروع شد و در حال حاضر به صورت یک واحد متداول در مراحل نهایی مدارهای کانه‌آرایی در آمده است. در واقع این ستون‌ها، دارای طیف گسترده‌ای از کاربرد در کانه‌های فلزی و غیرفلزی‌اند. این ستون‌ها به دلیل هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی پایین‌تر و توانایی تولید کنسانتره با عیار و بازیابی بالاتر در مقایسه با سلول‌های مکانیکی، به طور وسیعی در صنعت فرآوری مورد استقبال قرار گرفته‌اند. 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. صنعت فرآوری آهن برزیل، در استفاده از تکنولوژی فلوتاسیون ستونی برای کاهش محتوی سیلیس کنسانتره آهن، در جهان پیش قدم بوده است. اخیراً بیشتر از ۱۰۰ ستون فلوتاسیون در مدار فرآوری آهن برزیل برای حذف سیلیس در مراحل پرعیارکنی اولیه، ثانویه و رم‌گیر نصب شده است [۹]. سامارکو مینرال اولین شرکت برزیلی است که به عنوان برنامه توسعه در سال ۱۹۹۰ از سلول ستونی برای افزایش ظرفیت مدار فلوتاسیون و بهبود بازیابی ذرات نرمه آهن بهره برد [۱۰]. همچنین در تحقیقات مشخص شده است که در حال حاضر بسیاری از شرکت‌های تولیدکننده کنسانتره آهن در استرالیا، کانادا، آمریکا و هند اقدام به نصب سلول‌های ستونی در مدارهای فرآوری کرده‌اند. بخش‌های مختلف سلول ستونی معمول در شکل ۱ نشان

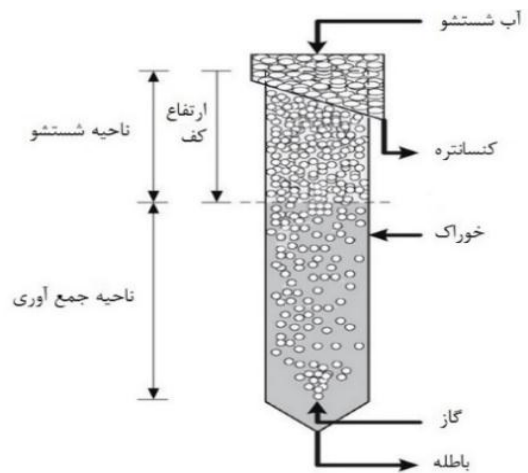


شکل ۲: مدار اصلاح شده با ستون فلوتاسیون برای پریارسازی مگنتیت



شکل ۳: مقایسه عملکرد ستون فلوتاسیون و سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی

داده شده است. جریان خوراک از نقطه‌ای واقع در یک سوم بالایی ستون وارد می‌شود و در جهت مخالف حباب‌های هوای تولید شده به وسیله حباب سازها، به سمت پایین انتقال می‌یابد. ذرات چسبیده شده به حباب‌های هوا به سمت بالای ستون حرکت می‌کنند و سرانجام به سطح مشترک پالپ و کف می‌رسند. موقعیت سطح مشترک می‌تواند توسط کاربر به وسیله یک حلقه کنترل اتوماتیک با تغییر آهنگ جریان باطله تنظیم و در مقدار مطلوب ثابت نگه داشته شود [۱۱].



شکل ۱: ستون فلوتاسیون

اکثر تحقیقات انجام شده در مورد به کارگیری ستون‌های فلوتاسیون در فرآوری کانه‌های آهن، برای حذف سیلیس بوده است و تاکنون بررسی نظام‌مند این روش برای پریارسازی ذرات ریزدانه آهن به منظور کاهش محتوی سولفور انجام نشده است. به دلیل اهمیت نقش فلوتاسیون در عملیات سولفورزدایی و همچنین مزایای بارز ستون‌های فلوتاسیون و کاربرد موفق‌تر این سلول‌ها در معادن بزرگ آهن جهان نسبت به سلول‌های مکانیکی، در تحقیق حاضر از ستون فلوتاسیون برای سولفورزدایی کنسانتره‌های جداکننده‌های مغناطیسی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر استفاده می‌شود.

۲- فلوتاسیون پیریت

پیریت رایج‌ترین کانی سولفیدی در پوسته زمین است و معمولاً به همراه دیگر کانی‌های سولفیدی و اکسیدی یافت می‌شود و به طور معمول کانی باطله به حساب می‌آید. ذرات ریز پیریت و پیروتیت در حضور کانی‌های آهن‌دار مانند مگنتیت، به دلیل تاثیر تجمعی ماتریس مگنتیت تا حدودی دارای خاصیت مغناطیسی شده و به طور کامل با جداکننده‌های مغناطیسی بازیابی نمی‌شوند [۱۲]. فلوتاسیون به عنوان

مرکز تحقیقات اریز، اخیراً یک واحد فلوتاسیون ۱۱۸۰ تن بر ساعت را به منظور کاهش محتوای سیلیس کنسانتره مگنتیت از ۷-۹ درصد به ۲٫۲ درصد طراحی کرده است (شکل ۲). خوراک پس از آسیاکنی و طبقه‌بندی با d_{80} ۱۵۰ میکرون به جداکننده‌های مغناطیسی اولیه ارسال می‌شود. کنسانتره مگنتیتی پس از آسیاکنی مجدد با توزیع دانه‌بندی در حدود ۷۵ درصد عبوری از سرند ۴۵ میکرون به جداکننده‌های مغناطیسی ثانویه ارسال می‌شود که کنسانتره‌ای در حدود ۷-۹ درصد سیلیس به دست می‌آید. کنسانتره مگنتیتی با محلول نشاسته و آمین آماده‌سازی و سپس به فلوتاسیون ستونی خوراک‌دهی می‌شود، جایی که محتوی سیلیس تا کمتر از ۲٫۲ کاهش می‌یابد [۹].

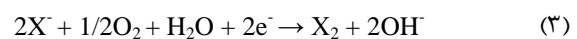
مقایسه نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی و مکانیکی (مقیاس نیمه‌صنعتی) انجام شده در پروژه مگنتیت استرالیا برای حذف سیلیس در شکل ۳ به شکل مقایسه‌ای آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در اغلب آزمایش‌ها روش فلوتاسیون ستونی عملکرد بهتری نسبت به سلول‌های مرسوم داشته است [۹].

گزارش دادند ولی هیچ جزئیاتی را در مورد چگونگی و شرایط آزمایش‌ها ارائه ندادند. آرویدسون و همکاران [۱۹] آزمایش‌هایی در مقیاس پیشاهنگ بر روی سه ذخیره آهن با ترکیبات کانی‌شناسی متفاوت در فنلاند و سوئد برای تولید کنسانتره مگنتیت با عیار سولفور کمتر از ۰٫۰۵ درصد (۹۸ درصد حذف پیریت) انجام دادند. شرایط فلوتاسیون هر ذخیره بسته به درجه آزادی و نوع کانی‌های موجود متفاوت است. آهن‌گ بالایی کلکتور و زمان ماند طولانی و درصد جامد بین ۴۵-۵۰ درصد و محدوده pH ۴ تا خنثی مورد نیاز بود. سلطان محمدی و همکاران آزمایش‌های فلوتاسیون مکانیکی را برای حذف پیریت از کنسانتره مگنتیتی مجتمع سنگ آهن گل‌گهر با عیار گوگرد ۰٫۵ درصد انجام دادند [۲۰، ۲۱]. در این تحقیق، تاثیر نوع و نرخ مواد شیمیایی، درصد جامد، pH، سرعت همزن، زمان کف‌گیری، زمان آماده‌سازی بر روی حذف پیریت بررسی شد. بهترین نتایج با استفاده از ۵۰ گرم بر تن کلکتور آمیل گزنتات پتاسیم (PAX)، ۶۰ گرم بر تن کف‌ساز و ۲۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم در pH برابر ۸ به دست آمد. نتایج نشان داد که پس از یک مرحله عملیات نرمه زدایی و دو مرحله فلوتاسیون در شرایط بهینه دستیابی به کنسانتره‌ای با عیار آهن ۷۰ و سولفور ۰٫۰۵ درصد مقدور است.

مجتمع سنگ آهن گل‌گهر با حدود ۱٫۲ میلیارد تن ذخیره سنگ آهن (عمدتاً مگنتیت و هماتیت) و تولید سالیانه ۱۰ میلیون تن کنسانتره، یکی از بزرگترین معادن و در عین حال تولیدکنندگان سنگ آهن مورد نیاز صنایع فولاد ایران محسوب می‌شود. عمده‌ترین مشکل این مجتمع وجود سولفور در ماده معدنی اولیه است. به طور کلی اکثر آنومالی‌های این معدن دارای عیار سولفور بیشتر از ۲ درصد است، در صورتی که حد مجاز سولفور برای تولید فولاد ۰٫۱ درصد است. پیریت و پیروتیت در زمان قرارگیری در یک میدان مغناطیسی در مجاورت کانی فرومنیتیتی مانند مگنتیت، به طور کامل حذف نمی‌شوند. به همین دلیل کنسانتره‌های حاصل از جدایش مغناطیسی، حاوی ۰٫۴ تا ۰٫۷ درصد سولفور است.

هدف از این تحقیق، کاهش میزان سولفور کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی خط فرآوری باطله‌های خشک (DTP) این مجتمع از حدود ۰٫۵ درصد به کمتر از ۰٫۱ درصد با استفاده از فلوتاسیون ستونی در مقیاس پیشاهنگ است.

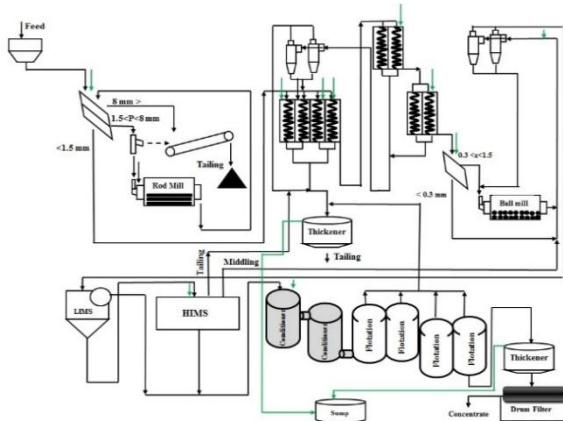
روشی برتر برای حذف ذرات پیریت از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی استفاده می‌شود [۱۴-۱۲]. جدایش موثر این دو کانی سبب کاهش عیار سولفور در کنسانتره نهایی می‌شود. وجود سولفور در سنگ آهن مشکلاتی را در فرآیند تولید آهن و فولاد به وجود می‌آورد. از جمله این مشکلات می‌توان به افزایش میزان سرباره در کوره‌های ذوب، کاهش مرغوبیت و استحکام آهن و فولاد، تولید گاز SO₂ و تشکیل اسید سولفوریک اشاره کرد که دو مورد اخیر موجب آلودگی محیط زیست و خوردگی جداره‌های کوره‌های ذوب می‌شود. روش مرسوم در فلوتاسیون پیریت در کانه‌های سولفیدی، بازداشت پیریت در محیط‌های قلیایی (pH بالای ۱۱٫۵) است. در حضور کانی‌های اکسیدی آهن، از فلوتاسیون معکوس در حضور گزنتات استفاده می‌شود. مکانیزم جذب گزنتات روی سطح پیریت به طور گسترده توسط محققان زیادی بررسی شده است. به طور کلی این تئوری مورد قبول واقع شده است که تنها گونه مسوول فلوتاسیون پیریت (مستقل از شرایط سطح پیریت و محلول) دیگرانتوژن است [۱۵، ۱۶]. دیگرانتوژن به وسیله اکسیداسیون آنودیک یون گزنتات روی سطح پیریت همراه با احیای کاتودیک اکسیژن جذب شده تشکیل می‌شود [۱۷]:



این واکنش‌ها تا pH ۱۱ انجام‌پذیر است. در pH های بالاتر دیگرانتوژن به یون گزنتات تجزیه می‌شود. همچنین در pH های بالای ۱۰٫۵ تشکیل Fe(OH)₃ بر روی سطح پیریت منجر به کاهش جذب کلکتور و بازداشت پیریت می‌شود [۸]. به طور کلی اعتقاد بر این است که یون‌های گزنتات به دیگرانتوژن از طریق فرآیند الکتروشیمیایی (پیریت به عنوان کاتالیزور) اکسید می‌شود.

امروزه کاربرد فرآیند فلوتاسیون معکوس در عملیات صنعتی پرعیارسازی آهن به منظور حذف ناخالصی‌ها به خوبی اثبات شده است. تاکنون اطلاعات انتشار یافته بسیار کمی در مورد فرآیند فلوتاسیون پیریت برای دستیابی به کنسانتره مگنتیت با عیار سولفور کمتر از ۰٫۱ درصد ارائه شده است. دیوید و همکاران [۱۸]، کنسانتره مگنتیت با عیار سولفور کمتر از ۰٫۱ درصد را بعد از عملیات فلوتاسیون

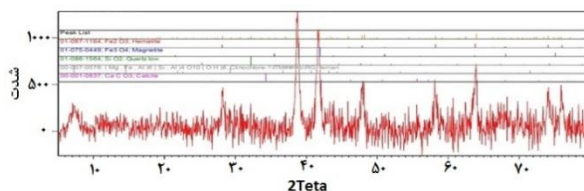
۳- مدار فرآوری مورد مطالعه



شکل ۴: شمای کلی مدار DTP

مگنتیت و گوگردزایی مجتمع سنگ آهن گل گهر در طی ۴ ماه و در ۱۰ نوبت نمونه برداری شد. نتایج آنالیز دانه بندی نمونه معرف نشان داد که به طور متوسط در حدود ۸۰ درصد وزنی از نمونه را ذراتی با اندازه کوچکتر از ۹۵ میکرون تشکیل می دهند.

آنالیز شیمیایی نمونه خوراک در جدول ۲ آورده شده است. مطالعات پراش پرتو ایکس^۵ با استفاده از دستگاه مدل PW1800 ساخت کارخانه Philips انجام شد. نتایج نشان داد که هماتیت و مگنتیت کانی اصلی و کلسیت، کوارتز و کلینوکلر در نمونه مشاهده می شوند (شکل ۵).



شکل ۵: آنالیز XRD نمونه مورد مطالعه

جدول ۲: مشخصات عیاری خوراک نمونه برداری شده با استفاده از روش شیمی تر

P (%)	S (%)	FeO (%)	Fe (%)
۰٫۱۳	۰٫۴۷	۱٫۴۸	۶۳٫۳۳

در شکل ۶ توزیع آهن و گوگرد در طبقات مختلف ابعادی نشان داده شده است. ذرات بالای ۱۸۰ میکرون که میزان بسیار کمی از نمونه را تشکیل می دهد، بالاترین عیار گوگرد (۱٫۲۲) را دارد که با کاهش اندازه ذرات، این میزان کاهش می یابد. بالاترین توزیع آهن و گوگرد در محدوده ۴۵-۷۵ میکرون مشاهده می شود. بالا بودن توزیع آهن و گوگرد در

خط فرآوری باطله های خشک^۲ مجتمع سنگ آهن گل گهر، باطله بخش خشک کارخانه مگنتیت (با ذخیره احتمالی ۲۵ میلیون تن که از زمان شروع تولید در محل مشخصی انباشته شده اند) را فرآوری و هماتیت (و باقیمانده مگنتیت) آن را استحصال می کند.

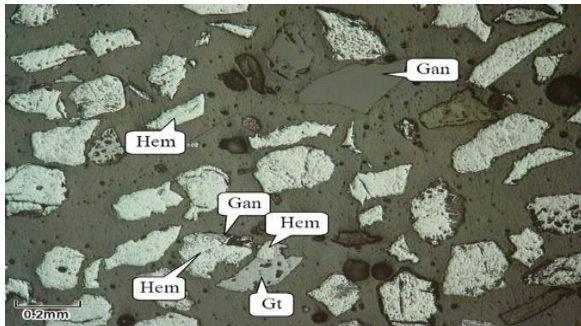
در مدار DTP، خوراک با نوار نقاله به سیلوی ۲۰۰۰ تنی انتقال می یابد. مواد در اولین مرحله وارد سردند دو طبقه با اندازه دهانه های ۸ و ۱٫۵ میلی متر می شوند. ذرات درشت تر از ۸ میلی متر از مدار خارج و ذرات با اندازه ۱٫۵-۸ میلی متر در یک مدار بسته با آسیای میله ای خرد می شوند. ته ریز سردند وارد بخش ماریپچ رافر می شود. باطله این بخش باطله نهایی تلقی می شود و وارد تیکنر باطله شده و کنسانتره آن ها وارد ماریپچ های کلینر اولیه و ثانویه می شود. باطله این دو بخش در یک مدار بسته با ماریپچ رافر، وارد هیدروسیکلون می شود. سرریز هیدروسیکلون که محتوای آهن بسیار پایین دارد به تیکنر باطله انتقال می یابد. کنسانتره مرحله کلینر ثانویه وارد سردند با دهانه ۳۰۰ میکرون می شود. ذرات بزرگ تر از ۳۰۰ میکرون برای خردایش مجدد به آسیای گلوله ای ارسال می شود. خروجی آسیا با ته ریز سردند مخلوط شده و به سیکلونی که در مداری بسته با آسیای گلوله ای قرار دارد منتقل می شود. سرریز سیکلون با دانه بندی ریزتر از ۱۰۰ میکرون، وارد جداکننده مغناطیسی شدت پایین^۳ می شود. باطله جداکننده LIMS، وارد جداکننده مغناطیسی شدت بالا^۴ می شود. باطله HIMS به عنوان باطله نهایی وارد تیکنر باطله و محصول میانی آن به سیکلون انتقال می یابد. کنسانتره دو جداکننده مغناطیسی بعد از اختلاط به منظور کاهش میزان سولفور وارد مرحله فلوتاسیون مکانیکی (RCS15) می شود. در انتها کنسانتره نهایی فرآیند بعد از عملیات فلوتاسیون وارد تیکنر کنسانتره می شود. در عملیات فلوتاسیون، از آمیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور و از MIBC نیز به عنوان کف ساز استفاده می شود. مدار پریعار کنی خط DTP در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴- مواد و روش انجام آزمایش ها

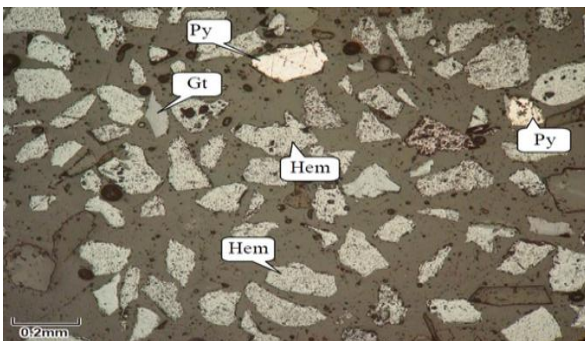
۴-۱- ویژگی های خوراک ورودی

برای انجام آزمایش های مربوط در این تحقیق از خوراک ورودی به سلول های فلوتاسیون خط DTP کارخانه هماتیت،

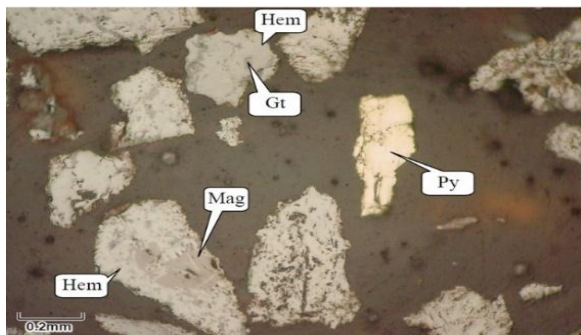
دارای فراوانی ۱ تا ۲ درصد است و درگیری کمی با بلورهای حاوی آهن در این نمونه نشان می‌دهد (شکل ۷-۹).



شکل ۷: درگیری هماتیت با گانگ در حاشیه‌ها (۱۸۰- و +۱۵۰ میکرون)



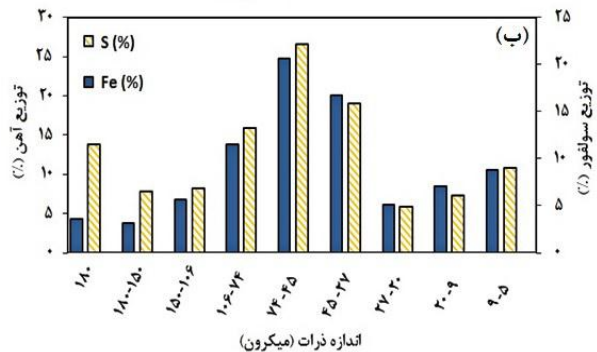
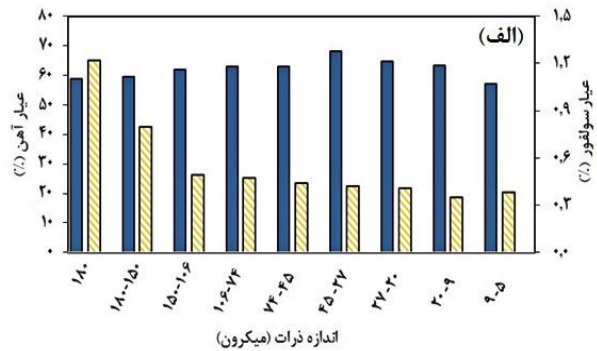
شکل ۸: بیشتر بلورهای هماتیت و پیریت به صورت آزاد (۱۵۰- و +۱۰۶ میکرون)



شکل ۹: آزادی پیریت، اکسیداسیون بلور مگنتیت به هماتیت و اکسیداسیون هماتیت به گوتیت (۷۵- و +۴۵ میکرون)

برای مطالعات درجه آزادی، مقاطع صیقلی از نمونه‌های طبقه‌بندی شده (بر حسب میکرون) در ابعاد (+۱۸۰)، (-۱۸۰) و (+۱۵۰)، (-۱۵۰ و +۱۰۶)، (+۷۵ و -۱۰۶)، (-۷۵) تهیه شد و با میکروسکوپ نوری پلاریزان با نور انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات درجه آزادی در جدول ۳ آورده شده است.

این محدوده ابعادی ناشی از بالا بودن درصد وزنی این بخش است. نکته قابل توجه بالا بودن توزیع گوگرد در محدوده ۱۸۰ میکرون است که دلیل آن عیار بالای این طبقه نسبت به طبقات دیگر است.



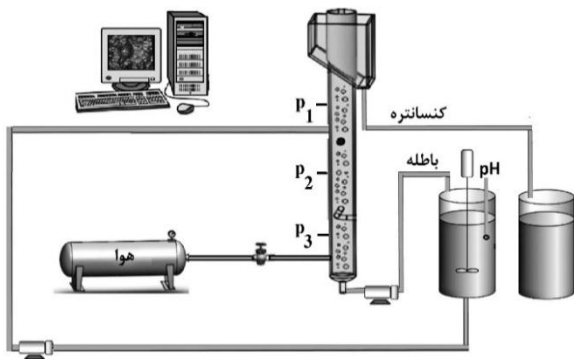
شکل ۶: عیار (الف) و توزیع (ب) آهن و گوگرد (سولفور) در طبقات مختلف ابعادی

مطالعات کانی‌شناسی مقاطع صیقلی و تیغه‌های نازک 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 است و فراوانی ۵۵ تا ۶۰ دارد. شدت مارتیتی شدن بسیار شدید است و در مواردی بلورهای مگنتیت کاملا به هماتیت تبدیل شده و اثری از مگنتیت باقی نمانده است و یا به شکل 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 گوتیت تبدیل شده است. در نمونه گرفته شده معمولا هماتیت و مگنتیت با هم بوده و با یکدیگر درگیری دارند. فراوانی مگنتیت در نمونه تقریبا ۵ تا ۸ درصد است.

گوتیت همچنین در اثر اکسیداسیون پیریت نیز حاصل شده است. گوتیت در نمونه فراوانی تا ۶ درصد دارد. پیریت

و مانیتورینگ به یک پردازشگر مخابره می‌شود و داده‌های واقعی به یک کنترل کننده فرستاده می‌شوند.

pH پالپ در مخزن خوراک ورودی در طول آزمایش به طور پیوسته اندازه‌گیری شد. در عملیات فلوتاسیون معکوس از آمیل گزنتات پتاسیم به عنوان کلکتور و از MIBC به عنوان کف ساز و 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. شمای کلی از روش انجام آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: آزمایش فلوتاسیون ستونی

در این تحقیق از روش طراحی آزمایش D-Optimal برای اجرای آزمایش‌ها به منظور بررسی تاثیر متغیرهای عملیاتی بر حذف گوگرد استفاده شد. بدین ترتیب تعداد ۲۶ آزمایش طراحی شد. عوامل و سطوح به کار رفته در آزمایش‌های فلوتاسیون در جدول ۴ آورده شده است. به منظور فهم بهتر تاثیر کلکتور و کف‌ساز، چهار سطح مختلف از میزان مصرف آن بررسی شد.

جدول ۴: مقادیر سطوح انتخاب شده برای آزمایش‌ها

عامل	شاخص	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
میزان کلکتور (g/t)	A	۸۰	۱۱۰	۱۶۰	۲۰۰
میزان کف ساز (g/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	۴٫۵	۷	-

جدول ۳: آنالیز درجه آزادی نمونه مورد مطالعه

اندازه (میکرون)	هماتیت ± گوتیت ± مگنتیت	پیریت
(+۱۸۰)	۷۰	۶۵
(-۱۸۰ و +۱۵۰)	۸۰	۷۵
(+۱۰۶ و -۱۵۰)	۹۰	۸۵
(+۷۵ و -۱۰۶)	۹۵	۹۳
(-۷۵)	۱۰۰	۱۰۰

۲-۴- ستون فلوتاسیون

آزمایش‌ها در سلول ستونی از جنس پلاکسی گلاس با ارتفاع ۴۰۰ و قطر ۱۰ سانتی‌متر انجام شد (شکل ۱۰). برای 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 با یک پمپ پریستالتیک به درون سلول پمپاژ می‌شود. در این ستون برای اندازه‌گیری ماندگی گاز و ارتفاع کف از سه فشارسنج استفاده شده است، به طوری 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 با استفاده از تعدادی شرط و بر اساس موقعیت سطح مشترک نسبت به مقدار مطلوب، تغییر می‌دهد. برای اندازه‌گیری و تنظیم آهنگ جریان هوا و آب شستشو از فلومتر استفاده می‌شود. حباب ساز مورد استفاده از نوع داخلی و متخلخل (قطر منافذ ۵۰ تا ۱۰۰ میکرون) با قطر ۳ cm و طول ۱۴ cm بود.



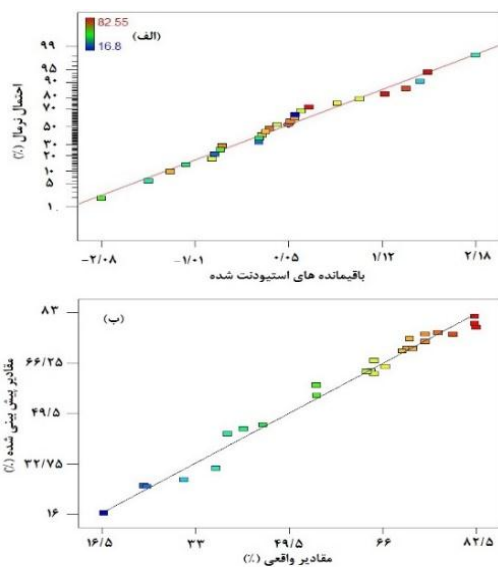
شکل ۱۰: تجهیزات ستون فلوتاسیون مورد استفاده

داده‌های بدست آمده از حسگرها برای انجام کالیبراسیون

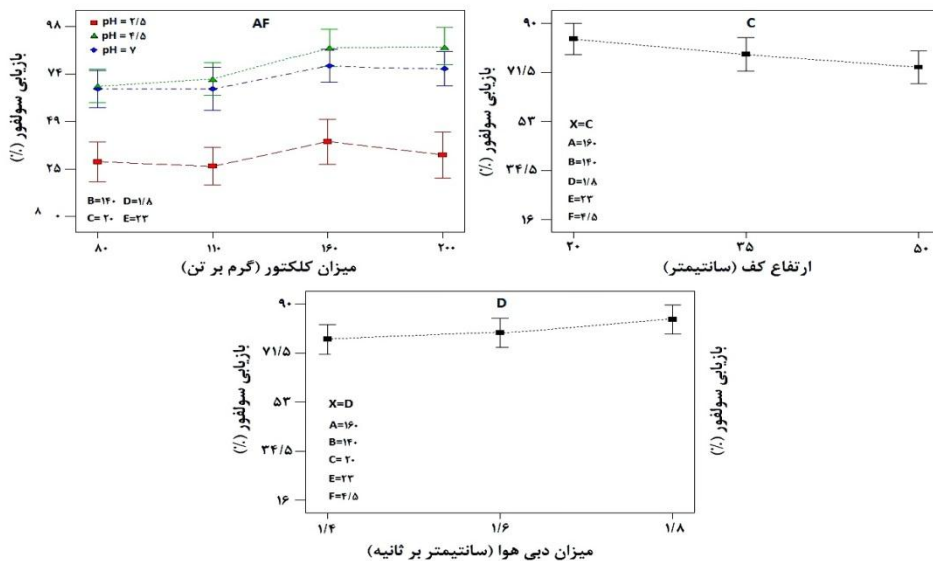
جدول ۵: مقادیر F و P برای متغیرهای اصلی پاسخ ها

عامل	مقدار F	مقدار P	میانگین مربعات
A	۵۳,۳۷	۰,۰۰۰۳	۲۹۶,۲
B	۲,۹۸	۰,۱۴	۱۶,۵۲
C	۱۶,۳۳	۰,۰۱	۹۰,۶
D	۸,۷۶	۰,۰۲۳	۴۸,۶
E	۳,۸۵	۰,۱	۲۱,۳۵
F	۳۸۳	<۰,۰۰۰۱	۲۱۳۰
AF	۵,۰۶	۰,۰۴۷	۲۸,۰۷
مدل	۸۸,۸	<۰,۰۰۰۱	۴۹۲,۷

CV= 4.03%, R²= 0.98, Adj R²=0.97, B, E= NS



شکل ۱۲: (الف) نمودار احتمال نرمال باقیمانده ها و (ب) نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی



شکل ۱۳: تاثیر پارامترهای فرآیند بر حذف پیریت

همچنین به منظور مقایسه عملکرد ستون فلوتاسیون با سلول های مکانیکی مرسوم، آزمایش هایی در شرایط بهینه با سلول آزمایشگاهی دنور انجام گرفت.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- تاثیر متغیرها

تحلیل واریانس (ANOVA) ابزار آماری استاندارد برای تفسیر داده های آزمایشگاهی و ارزیابی معناداری تاثیر عوامل مختلف بر فرآیند است. در این تحقیق از نرم افزار DX7 برای تحلیل نتایج آزمایش ها استفاده شده است. تاثیر متغیر، معنادار است اگر سطح معناداری آن بزرگتر از ۹۵ درصد (مقدار P کوچکتر از ۰,۰۵) باشد.

بر اساس آنالیز واریانس تست فیشر، مقادیر P کوچکتر از ۰,۰۵ نشان می دهد که مدل برای حذف پیریت معنادار است (جدول ۵). نمودار احتمال نرمال باقیمانده ها و نمودار مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی در شکل ۱۲ آورده شده اند. در این شکل باقیمانده ها بر روی یک خط قرار دارند که نشان دهنده توزیع نرمال خطاها است. این نکته بیانگر این است که مدل پیشنهادی برازش مناسبی دارد. متغیرهای A، C، D و F، تاثیر معناداری بر حذف پیریت دارند. ترتیب تاثیر آنها به صورت $F > A > C > D$ است. در میان تاثیر متقابل AF، تاثیر معناداری بر حذف گوگرد دارد. شکل ۱۳ تاثیر عوامل مهم عملیاتی در فلوتاسیون ستونی را بر حذف پیریت نشان می دهد.

در محدوده مطالعه شده با استفاده از نرم افزار DX7 به دست آورده شد. جدول ۶ سطوح بهینه هر متغیر را برای دستیابی به بالاترین میزان حذف پیریت با هدف حداقل کردن عیار گوگرد در کنسانتره (با در نظر گرفتن پارامترها در محدوده در نظر گرفته شده) را نشان می‌دهد. بر اساس پیش‌بینی نرم افزار، بازیابی پیریت معادل ۸۴ درصد در شرایط بهینه قابل دستیابی است. شرایط بهینه به دست آمده در این تحقیق شامل ۱۶۰ گرم بر تن کلکتور، ۱۸۰ گرم بر تن کف ساز، ارتفاع کف ۲۰ سانتی‌متر، سرعت ظاهری هوا ۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه، درصد جامد ۳۰ و pH برابر ۴/۵ است. به منظور تایید پیش‌بینی مدل، دو آزمایش شاهد با شرایط بهینه تعیین شده، انجام شد که نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است. نتایج بهینه‌سازی به دست آمده با استفاده از روش D-Optimal، با انجام آزمایش‌های اعتبارسنجی تایید شد. در واقع آزمایش‌ها نشان داد که در شرایط بهینه، دستیابی به کنسانتره نهایی با عیار گوگرد کمتر از ۰/۰۸ درصد، برای خط DTP با بازیابی آهن بالای ۹۹ درصد ممکن است.

جدول ۶: سطوح بهینه پارامترها

پارامتر	A	B	C	D	E	F	بازیابی (%)	مطلوبیت
مقدار	۱۶۰	۱۸۰	۲۰	۱/۸	۳۰	۴/۵	۸۴	۰/۹

جدول ۷: نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی با سطوح بهینه

آزمایش	حذف پیریت (%)	عیار سولفور کنسانتره (%)
۱	۸۲/۹	۰/۰۸
۲	۸۲/۸۶	۰/۰۸۴

۵-۳- مقایسه عملکرد ستون فلوتاسیون و سلول مکانیکی

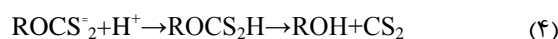
مقایسه نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی و مکانیکی (مقیاس آزمایشگاهی) برای حذف پیریت در شرایط بهینه در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: مقایسه نتایج سلول ستونی با سلول مکانیکی

معیار	ستون فلوتاسیون	سلول مکانیکی
عیار S در کنسانتره (%)	۰/۰۸۴	۰/۱
درصد وزنی باطله نسبت به خوراک (%)	۱/۲	۳/۰۷
عیار Fe در باطله (%)	۳۸/۲	۵۱/۳
کارایی جدایش (%)	۸۱/۴	۷۸

با افزایش میزان کلکتور میزان حذف پیریت افزایش می‌یابد که آن را می‌توان به افزایش میزان آبریزی ذرات پیریت نسبت داد. عملکرد متالورژیکی هر سیستم فلوتاسیون به طور قابل ملاحظه‌ای به سرعت ظاهری هوا و ارتفاع کف وابسته است. همچنان که در شکل ۱۳ نشان داده شده است با افزایش سرعت ظاهری هوا، بازیابی پیریت به دلیل افزایش ماندگی گاز و همچنین افزایش در 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 کاهشی به خود می‌گیرد. این مقدار بهینه برای سرعت ظاهری گاز در فلوتاسیون ستونی توسط محققان دیگر مشاهده شده است.

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 ۴/۵ 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 تجزیه را افزایش می‌دهد. هرچند در بسیاری از مقالات به این تجزیه اشاره نشده است. به دلیل پایداری کم هیدروکسیدهای فریک در محیط‌های اسیدی متوسط این یون‌ها در محلول آزاد شده و تبدیل گزنتات به دیگرانژون را راحت می‌کنند، بنابراین پیریت در pH حدود ۴/۵ به خوبی شناور می‌شود [۲۲].

نکته قابل توجه، اختلاف اندک میزان حذف گوگرد بین pH های ۴/۵ و ۷ در آهنگ‌های پایین کلکتور است که با افزایش میزان کلکتور این اختلاف افزایش می‌یابد. این عمل را می‌توان به تجزیه بخشی از کلکتور در pH برابر ۴/۵ نسبت داد که در آهنگ‌های کلکتور پایین برجسته‌تر است.

۵-۲- بهینه سازی فرآیند

سطوح بهینه متغیرها، برای حداکثر کردن بازیابی پیریت

کاهش زمان ماند ذرات در فاز کف شده و بازیابی افزایش می‌یابد.

۴- شرایط بهینه به دست آمده در این تحقیق شامل ۱۶۰ گرم بر تن کلکتور، ۱۸۰ گرم بر تن کف‌ساز، ارتفاع کف ۲۰ سانتی‌متر، سرعت ظاهری هوا ۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه، درصد جامد ۳۰ و pH برابر ۴/۵ بود.

۵- مطالعه حاضر نشان داد که فلوتاسیون ستونی عملکرد متالورژیکی بالاتری را در مقایسه با ماشین‌های فلوتاسیون مکانیکی برای تولید کنسانتره آهن با محتوی گوگرد پایین و بازیابی بالا دارد.

۷- سپاس‌گزاری

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

۸- مراجع

- [1] Yellishetty, M., Ranjith, P. G., and Tharumarajah A. (2010). "Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable?". Resources, Conservation and Recycling, 54: 1084-1094.
- [2] Araujo, A. C., Viana, P. R. M., and Peres, A. E. C. (2005). "Reagents in iron ores flotation". Minerals Engineering, 18: 219-224.
- [3] Shrimali, K., and Miller, J. D. (2016). "Polysaccharide depressants for the reverse flotation of iron ore". Transactions of The Indian Institute of Metals, 69(1): 83-95.
- [4] Rath, S. S., Sahoo, H., Das, S. K., Das, B., and Mishra B. K. (2014). "Influence of band thickness of banded hematite quartzite (BHQ) ore in flotation". International Journal of Mineral Processing, 130: 48-55.
- [5] Filippov, L. O., Severov, V. V., and Filippova, I. V. (2014). "An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation". International Journal of Mineral Processing, 127: 62-69.
- [6] Xiong, D., Liu, S., Chen, J. (1998). "New technology of pulsating high gradient magnetic separation". International Journal of Mineral Processing, 54: 111-127.
- [7] Zhao, C., Yahui, Zh., and Yongdan, C. (2012). "Reverse flotation of quartz from magnetite ore with modified sodium oleate", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 34(5): 320-330.

نتایج نشان می‌دهد که میزان هدرروی آهن با ارزش در سلول ستونی به طور چشمگیری کمتر از سلول مکانیکی است. همچنین ستون فلوتاسیون کارایی جدایش بسیار بهتری نسبت به سلول‌های مکانیکی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

وجود پیریت در کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی یکی از مشکلات عمده واحدهای پایین دستی فرآوری آهن است. امروزه بسیاری از تولیدکنندگان آهن جهان از ستون‌های فلوتاسیون به عنوان جایگزین مناسب سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی برای کاهش عناصر مزاحم در کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی بهره می‌برند. در این تحقیق به دلیل مزایای متالورژیکی قابل توجه ستون‌های فلوتاسیون و کاربرد موثر آن‌ها در واحدهای فرآوری معادن بزرگ آهن در جهان، از این سلول‌ها برای گوگردزدایی از کنسانتره‌های جداکننده‌های مغناطیسی خط فرآوری باطله‌های خشک مجتمع سنگ‌آهن گل‌گهر (DTP) در مقیاس پیشاهنگ استفاده شد. تاثیر عوامل عملیاتی مهم، مانند سرعت ظاهری گاز، ارتفاع کف، میزان کلکتور و کف‌ساز، درصد جامد و pH برای دستیابی به بالاترین میزان حذف پیریت در قالب ۲۶ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های به دست آمده در این مطالعه به شرح زیر است:

۱- تولید محصولی با عیار گوگرد کمتر از ۰/۱ درصد با حداکثر بازیابی آهن، از کنسانتره جداکننده‌های مغناطیسی خط DTP (با عیار گوگرد ۰/۵ درصد) با به کارگیری یک مرحله فلوتاسیون ستونی مقدور است.

۲- pH و میزان کلکتور بیشترین تاثیر را در میزان حذف پیریت دارند. با افزایش میزان کلکتور میزان حذف پیریت افزایش می‌یابد که آن را می‌توان به افزایش میزان آب‌گریزی ذرات پیریت نسبت داد. بیشترین و کمترین میزان حذف پیریت به ترتیب در pH برابر ۴/۵ و ۲/۵ به دست آمد. بازداشت پیریت در pH کمتر از ۳ به تجزیه اسید زانتیک به دی سولفید کربن و الکل مربوط می‌شود.

۳- عملکرد متالورژیکی سیستم فلوتاسیون ستونی به طور قابل ملاحظه‌ای به سرعت ظاهری هوا و ارتفاع کف وابسته است. در این مطالعه 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 نسبت داده شود. افزایش سرعت ظاهری هوا سبب

- (1986). "The role of dixanthogen in xanthate flotation of pyrite". Transactions of the Society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), 241: 148-156.
- [18] David, D., Larson, M., and Li, M. (2011). "Optimising Western Australia magnetite circuit design". Proceedings of the Metallurgical Plant Design and Operating Strategies, Perth.
- [19] Arvidson, B., Klemetti, M., Knuutinen, T., Kuusisto, M., Man, Y. T., and Hughes-Narborough, C. (2013). "Flotation of pyrrhotite to produce magnetite concentrates with a sulphur level below 0.05% w/w". Minerals Engineering, 50-51: 4-12.
- [20] Soltanmohammadi, V., Noaparast, M., Kohsari, A. H., and Zamani, F. (2011). "Influence of flotation parameters on decreasing sulfur and phosphorus contents in the Gol-E-Gohar iron ore concentrate". Physicochemical Problems of Mineral Processing, 46: 173-190.
- [21] Soltanmohammadi, V., Noaparast, M., Kohsari, A. H., and Zamani, F. (2009). "Determination of optimum conditions to remove sulfur and phosphorus from Gol-E-Gohar iron ore concentrate". Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, 33(B3): 267-278.
- [22] 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.
- [8] Bulatovic, S. M. (2007). "Handbook of flotation reagent- s: chemistry, theory and practice". Amsterdam: Elsevier, pp. 22.
- [9] Thanasekaran, H., Kohmuench, J., and Christodoulou, L. (2013). "Column flotation of iron ore - status and advances". Iron Ore, Western Australia, 1-14.
- [10] 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, International Conference on Column Flotation, June 2-6, Sudbury, 89-95.
- [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.
- [12] Cline, W., Connolly, L., and Grandy, G. (1974). "Marcona pyrrhotite flotation from magnetite". Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME) Fall Meeting, September, Acapulco, Mexico, 22-25.
- [13] Chang, C. S., Cooke, S. R. B., and Iwasaki, I. (1954). "Flotation characteristics of pyrrhotite with xanthate". Transactions of the Society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), 199: 209-217.
- [14] Iwasaki, I. (1999). "Iron ore flotation: Historical perspective and future prospects". Proceedings of the Symposium, Advances in Flotation Technology, Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME) Annual Meeting, March 1-3, Denver, CO, pp. 231.
- [15] Woods, R. (1988). "Flotation of sulfide minerals". In: P. Somasundaran and B. Moudgil (Editors), Reagents in Mineral Technology. Marcel Dekker, New York, NY, 39-77.
- [16] Finkelstein, N. P. (1997). "The activation of sulphide minerals for flotation: a review". International Journal of Mineral Processing, 52: 81-120.
- [17] Fuerstenau, M. C., Kuhn, M. C. and Elgillani, D. A.

¹ Eriez² Dry Tailing Process³ LIMS⁴ HIMS⁵ XRD