

بررسی کاهش سیلیس کنسانتره هماتیتی مدار فلوتاسیون چادرملو

آرش طهری^۱، علی دهقانی^{۲*}، سید حسین مجتهدزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد؛ arashtohry@yahoo.com

۲- دانشیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد؛ a.deghani@yazduni.ac.ir

۳- استادیار اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد؛ shmojtahedzadeh@yahoo.com

(دریافت ۱۳ مرداد ۱۳۹۳، پذیرش ۲۴ خرداد ۱۳۹۴)

چکیده

در کارخانه فرآوری چادرملو، کنسانتره مغناطیسی هماتیتی با روش فلوتاسیون معکوس فسفرزدایی می‌شود. در این روش از سیلیکات سدیم به‌عنوان بازداشت کننده و از مخلوط Alke و Dirol به‌عنوان کلکتور استفاده می‌شود. میزان فسفرکنسانتره مدار فلوتاسیون اغلب در حد قابل قبول (حدود ۰/۴۷ درصد) است ولی محتوی سیلیس آن (حدود ۳/۵ درصد) بیش از حد مجاز است. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که سیلیس کنسانتره اغلب کوارتز، و به‌صورت ذرات آزاد (کوچکتر از ۴۵ میکرون) هستند. چون مدار فلوتاسیون چادرملو برای شناور سازی آپاتیت طراحی شده است، نمی‌توان انتظار داشت که سیلیس نیز در این سیستم شناور شود. هدف این تحقیق بررسی امکان کاهش سیلیس است. به این منظور آزمایش‌های فلوتاسیون، با تغییر پارامترهای مرتبط با سیلیکات سدیم، روی خوراک با محتوی سیلیس بالا (حدود ۵/۷۳ درصد) انجام شد. مشاهده شد که با استفاده از ۸۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم با مدول ۲/۵ و زمان آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم کمتر از ۱۰ دقیقه، کنسانتره آهن با بازیابی خوب (حدود ۹۷ درصد) و میزان فسفر مجاز (حدود ۰/۴۳ درصد) قابل دستیابی است ولی عملکرد آن در کاهش محتوی سیلیس کنسانتره (حدود ۴/۵ درصد) رضایت‌بخش نبود و توزیع آن در کنسانتره حدود ۶۸ درصد بود. با اضافه کردن کاتیون‌های Ca^{++} به محلول سیلیکات سدیم، ضمن کاهش محتوی سیلیس کنسانتره خوراک معمول کارخانه، از ۴/۵ به حدود ۲ درصد، عیار آهن نیز حدود ۱ درصد افزایش یافت. افت بازیابی در این حالت حدود ۱ درصد بود.

کلمات کلیدی

فلوتاسیون معکوس هماتیت، فسفر، سیلیس، سیلیکات سدیم، کاتیون Ca^{++}

۱- مقدمه

[۵] به منظور کاهش سیلیس کنسانتره آهن چادرملو، بهینه‌سازی مصرف مواد شیمیایی معمول کارخانه، اغلب کلکتور، مورد توجه بوده است. نتایج منجر به کاهش سیلیس کنسانتره آهن تا حدود ۳/۵ درصد شد.



شکل ۱: تغییرات عیار سیلیس کنسانتره نهایی چادرملو، از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۱

در ادامه، ضمن مرور اصول فلوتاسیون در سیستم‌هایی که اکسیدهای آهن همراه با آپاتیت و سیلیس هستند، علل راه‌یابی ذرات سیلیس به کنسانتره هماتیتی بررسی شده است. سپس امکان کاهش سیلیس کنسانتره آهن چادرملو، با انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، بررسی شده است.

۲- سیستم فلوتاسیون آپاتیت - اکسید آهن - سیلیس

سیلیس یکی از رایج‌ترین گانگ‌های موجود در کانه‌های آهن است. سیلیس‌زدایی از کنسانتره آهن از طریق فلوتاسیون کاتیونی معکوس کوارتز، فلوتاسیون آنیونی مستقیم اکسیدهای آهن و یا فلوتاسیون معکوس آنیونی کوارتز فعال شده، امکان‌پذیر است [۶، ۷].

فلوتاسیون آنیونی معکوس سیستم شامل آهن و سیلیس با فعال‌سازی سطح کوارتز، توسط آهک و فلوتاسیون سیلیس فعال شده با اسید چرب انجام می‌شود [۸]. ولی استفاده از آهک در سیستمی که شامل آپاتیت، اکسیدهای آهن و سیلیس باشد، به دلیل آزادسازی مقادیر زیادی از یون‌های کلسیم، باعث غیرانتخابی شدن فلوتاسیون آپاتیت می‌شود. استفاده از کلکتور آنیونی در فلوتاسیون معکوس، به علت بهبود فلوتاسیون انتخابی سیلیس و آهن، و بازیابی بیشتر، رایج‌تر است. از طرف دیگر هزینه کلکتورهای کاتیونی بیشتر است و به حضور نرمه‌ها نیز حساسیت بالاتری دارند [۹، ۸، ۶].

کارخانه فرآوری چادرملو به منظور تولید دو نوع کنسانتره آهن و آپاتیت طراحی شده است. کنسانتره نهایی این کارخانه مخلوطی از کنسانتره‌های مگنتیتی و هماتیتی است. بار اولیه کارخانه پس از سنگ‌شکنی وارد آسیای خودشکن می‌شود. محصول آسیای خودشکن با d_{80} حدود ۲۰۰ میکرون) وارد جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط اولیه می‌شود. محصول جداکننده‌های اولیه به مدار آسیای گلوله‌ای در مدار بسته با هیدروسیکلون وارد می‌شود. سرریز هیدروسیکلون d_{80} حدود ۴۰ میکرون) وارد جداکننده‌های شدت متوسط کلینر می‌شود. محصول این جداکننده‌ها، کنسانتره مگنتیتی نهایی را تشکیل می‌دهد. باطله جداکننده‌های کلینر از جداکننده مغناطیسی شدت بالا عبور داده می‌شود. محصول جداکننده شدت بالا وارد یک آسیای گلوله‌ای می‌شود. محصول این آسیا d_{80} حدود ۴۵ میکرون) به مدار فلوتاسیون خوراک‌دهی می‌شود.

مواد شیمیایی مصرفی در مدار فلوتاسیون معکوس چادرملو شامل کلکتور، بر پایه اسیدهای چرب (Dirol+Alke) و سیلیکات سدیم، برای بازداشت کانی‌های آهن، است. برای تنظیم pH (حدود ۹/۵ تا ۱۰) از مخلوط کربنات سدیم و سود با نسبت‌های ۱۰ به ۱ استفاده می‌شود. در این محدوده pH، بار سطحی کانی‌های سیلیکات (کوارتز) و آپاتیت منفی است. شناورسازی آپاتیت با مکانیزم جذب شیمیایی انجام می‌شود [۱]. کلکتور مذکور در شرایط فوق قادر به جذب (فیزیکی) روی کانی‌های سیلیکات نیست.

از سال ۱۳۸۴ سهم بخش مگنتیتی در بار اولیه کارخانه چادرملو افزایش یافت و جداکننده‌های مغناطیسی شدت پایین با شدت متوسط جایگزین شدند. به منظور جبران کاهش بار اولیه مدار فلوتاسیون و کاهش فسفر کنسانتره مگنتیتی، حدود یک سوم از این کنسانتره به مدار فلوتاسیون خوراک‌دهی می‌شود. با افزایش ظرفیت کارخانه و مدار فلوتاسیون، از سال ۱۳۸۵، عیار سیلیس کنسانتره نهایی نیز افزایش یافت (شکل ۱). طی همین سال‌ها در مدار فلوتاسیون چادرملو، سیلیکات سدیم جایگزین نشاسته و دکستین شد.

در مطالعات انجام شده روی مدار فلوتاسیون چادرملو اغلب به جدایش آپاتیت از آهن توجه شده است [۴-۲]. مطالعات انجام شده برای مقایسه تأثیر سیلیکات سدیم و مخلوط نشاسته و دکستین، در فلوتاسیون معکوس چادرملو، نشان داده است که سیلیکات سدیم عملکرد بهتری در افزایش بازیابی آهن و کاهش میزان فسفر کنسانتره داشته است. ولی در مورد تأثیر آن بر محتوای سیلیس بحث نشده است [۲]. در یکی از تحقیقات

می‌دهد، ولی در مقادیر زیاد، باعث افت شدید بازیابی و عیار آپاتیت و افزایش مصرف مواد شیمیایی، از جمله کلکتور و سود، می‌شود [۱۸]. ممکن است افزایش مصرف مواد شیمیایی به علت تشکیل رسوب کلکتور با این یون‌ها باشد.

اضافه کردن نمک‌های چند ظرفیتی به محلول سیلیکات سدیم، در فلوتاسیون آپاتیت-اکسیدهای آهن-سیلیس، موجب افزایش پلی‌میزاسیون اجزاء سیلیکات و خاصیت انتخابی بازداشت‌کننده می‌شود. همچنین محتوی آهن کسانتره آپاتیت نیز کاهش پیدا می‌کند. استفاده از نمک دو ظرفیتی کلسیم کلراید مؤثرتر از نمک‌های چند ظرفیتی مشابه بوده است [۱۰]. بررسی پدیده‌های بین سطحی نشان داده است که تأثیر کاتیون‌های چند ظرفیتی در فلوتاسیون آپاتیت، بسته به نوع کلکتور اسید چرب موجود در سیستم، متفاوت است. به‌طور مثال فلوتاسیون با کلکتور آلکنیل ساکسینیک اسید مونو استر، موسوم به آسام، (کلکتور مورد استفاده در مدار ۳ چادرملو) حساسیت زیادی به یون‌های کلسیم ندارد ولی به حضور یون‌های منیزیم به شدت حساس است و مصرف آن را افزایش می‌دهد [۱۹].

۳- مواد و آزمایش‌ها

در این بخش ضمن ارائه فلوشیت مدار فلوتاسیون چادرملو، نمونه‌گیری از جریان‌های مختلف مدار، به منظور موازنه جرم و شناسایی جریان‌های مختلف، انجام شد. سپس آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده روی نمونه خوراک این مدار، در شرایط مختلف، توضیح داده شده است.

۳-۱- نمونه‌گیری از مدار فلوتاسیون

فلوشیت ساده‌ای از مدار فلوتاسیون چادرملو در شکل ۲ نشان داده شده است. کسانتره حاصل از جداکننده‌های شدت بالا، بعد از خردایش تا حدود ۴۷ میکرون (طبق طراحی)، به بخش فلوتاسیون معکوس (فسفرزدايي) هدایت می‌شود. باطله‌های سلول‌های رافر اول و دوم و سلول‌های رمق‌گیر اولیه به تیکر باطله نهایی منتقل می‌شوند. باطله بقیه جریان‌ها به رمق‌گیر اول فرستاده می‌شود. کسانتره سلول‌های کلینر سوم، محصول نهایی فلوتاسیون را تشکیل می‌دهد.

کارخانه فرآوری چادرملو شامل ۵ مدار تقریباً مشابه هم است که به موازات هم قرار گرفته‌اند. نمونه‌گیری از مدار تولید شماره ۱ با ظرفیت ۳۸۰ تن بر ساعت، طی یک شیفت کاری انجام

از دهه ۸۰ میلادی فلوتاسیون معکوس (کوارتز و سیلیکات‌ها) مورد توجه قرار گرفت [۹]. در این حالت از نشاسته، دکستروزین یا سیلیکات سدیم به منظور بازداشت کانه‌های آهن استفاده می‌شد [۱۰]. آزمایش‌های فلوتاسیون با اسید چرب، روی کانه فسفات و آهن‌دار یکی از معادن فنلاند نشان داده است که سیلیکات سدیم عملکرد بهتری در بازداشت آهن، نسبت به سایر بازداشت‌کننده‌ها، از جمله نشاسته و دکستروزین داشته است [۱۱].

اکثر مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که کسانتره حاصل از فلوتاسیون آنیونی اکسیدهای آهن دارای مقادیر زیادی سیلیس است. در واقع سیلیکات سدیم بازداشت‌کننده مؤثری در سیستم شامل سیلیس و اکسیدهای آهن، نیست [۶، ۱۲، ۱۳]. در اکثر مطالعات از سیلیکات سدیم برای بازداشت گانگ‌های سیلیکاته یا هماتیت، در فلوتاسیون فسفات‌ها استفاده شده است [۱۴-۱۷]. همچنین در فلوتاسیون مستقیم آهن، از سیلیکات سدیم به‌عنوان بازداشت‌کننده کوارتز و کانی‌های سیلیکاته استفاده شده است [۱۴]. مکانیزم عملکرد سیلیکات سدیم ناشناخته مانده است. فرایند تفکیک سیلیکات سدیم، به دلیل تولید مقادیر زیادی از اجزاء یونی و کلوئیدی در محلول، پیچیده است. محصول هیدرولیز سیلیکات سدیم شامل تکه‌های مونومریک، پلی‌مریک و کلوئیدال است. نوع و تعداد این تکه‌ها به مدول‌های سیلیکات سدیم، مقدار مصرف، زمان آماده‌سازی و pH محلول بستگی دارد [۷، ۱۰، ۱۴، ۱۵، ۱۶].

حلالیت سیلیس در آب بسیار محدود و ناچیز است. بنابراین فلوتاسیون آنیونی سیلیس در شرایطی میسر است که یون‌های فلزی در سیستم موجود باشند و یا به طریقی به سیستم اضافه شوند [۶، ۱۷]. با توجه به ماهیت کانی‌های گروه آپاتیت، این کانی‌ها با قرارگیری در محلول، تفکیک شده و کاتیون‌های دو ظرفیتی Ca^{++} را در محیط پخش می‌کنند. حضور کاتیون‌های Ca^{++} در پالپ، باعث فعال‌سازی جزئی سطح سیلیس می‌شود. در این شرایط مقادیری از سیلیس توسط کلکتورهای اسید چرب شناور می‌شوند [۱۳، ۱۷، ۱۸]. در حضور سیلیکات سدیم، رسوب آن روی سطح کوارتز باعث می‌شود که یون‌های کلسیم قادر به فعال‌سازی سطح کوارتز نباشند. تأثیر سیلیکات سدیم به‌عنوان بازداشت‌کننده سیلیس، به میزان زیادی به غلظت کاتیون‌های چند ظرفیتی در محلول بستگی دارد. اگر غلظت این کاتیون‌ها بالا باشد، سیلیکات سدیم قادر به بازداشت مؤثر ذرات سیلیس نخواهد بود [۱۴، ۱۵، ۱۸].

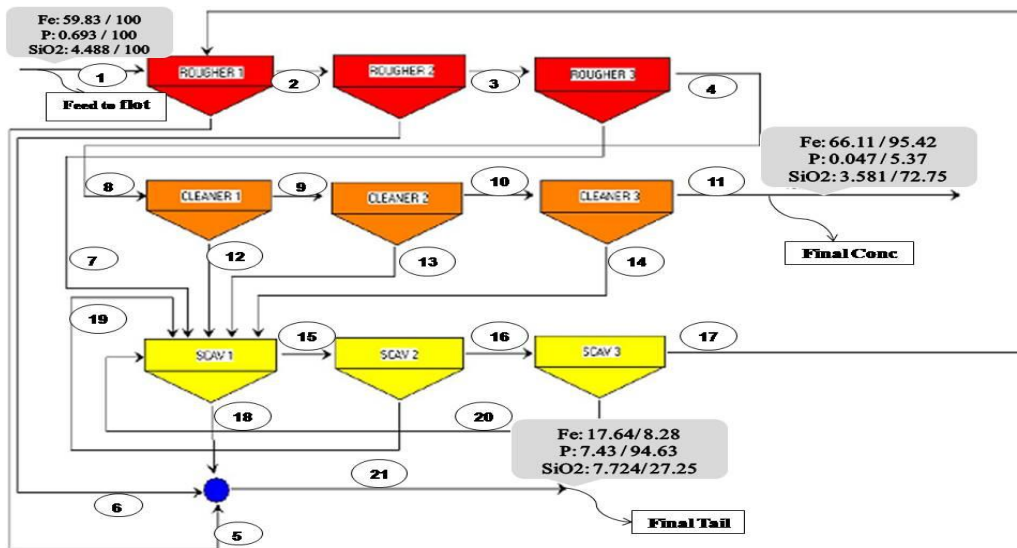
مطالعات نشان داده است که حضور یون‌های منیزیم و کلسیم در مقادیر کم، در پالپ فلوتاسیون، بازیابی آپاتیت را افزایش

سیلیس بالا بررسی شد. با توجه به مباحث قبل در این آزمایش‌ها، تأثیر مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با سیلیکات سدیم شامل: زمان آماده‌سازی، مدول و مقدار مصرف سیلیکات سدیم، بررسی شده است. همچنین تأثیر افزایش پلی‌مریزاسیون سیلیکات سدیم، با افزودن کاتیون Ca^{++} به محلول سیلیکات سدیم، بر راندمان فلوتاسیون بررسی شد. در همه آزمایش‌ها از مخلوط کلکتورهای Alke و Dirol با نسبت ۵۰:۵۰ استفاده شده است.

۵ سری نمونه‌گیری از ۲۱ جریان موجود در مدار در بازه زمانی ۱/۵ تا ۲ ساعت انجام گرفت. از نمونه‌های گرفته‌شده برای موازنه جرم مدار استفاده شد. نمونه‌های جریان‌های مختلف مدار تجزیه ابعادی شدند و مقاطعی نیز از نمونه کنسانتره نهایی برای مطالعات کانی‌شناسی و درجه آزادی تهیه شدند.

۲-۳- آزمایش‌های فلوتاسیون

در این تحقیق امکان کاهش محتوی سیلیس کنسانتره آهن، با انجام آزمایش‌های فلوتاسیون روی نمونه‌های خوراک با درصد



شکل ۲: فلوشیت مدار فلوتاسیون فسفر زدایی کارخانه فرآوری چادرملو.

(مقادیر موازنه شده آهن، فسفر و سیلیس در جریان‌های خروجی و ورودی مدار به صورت "درصد توزیع/عیار" آمده است).

آهن راه یافته است. همچنین حدود ۸/۳ درصد از آهن در باطله (بخش شناور شده) فلوتاسیون به هدر رفته است.

۴- نتایج و بحث

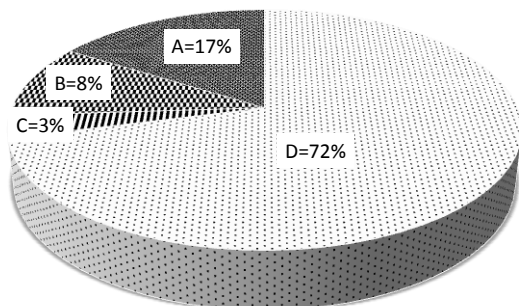
۴-۱- موازنه جرم مدار فلوتاسیون

۴-۲- دانه‌بندی ذرات در جریان‌های مختلف مدار تجزیه سرندي نمونه‌های گرفته شده از همه جریان‌ها با استفاده از سرندهای ۷۵، ۳۸، ۲۵ میکرون انجام شد. با استفاده از آنالیزهای عیاری هر محدوده ابعادی، توزیع آهن، فسفر و سیلیس محاسبه شد. نتایج نشان داد که ابعاد ذرات موجود در کنسانتره (بخش غوطه‌ور) کلینر (۳۹/۸ میکرون) نسبت به بخش رافر (۳۵/۴ میکرون) درشت‌تر است در حالی که ابعاد ذرات موجود در بخش رم‌گیر (۲۸/۶ میکرون) به‌طور نسبی کوچک‌تر است. احتمالاً تفاوت در اندیس خردایش کانی‌های موجود در مدار موجب اختلاف نسبی ابعاد جریان‌ها شده است. در جریان‌هایی که آپاتیت بیشتری حضور دارد ابعاد ذرات به‌طور نسبی ریزتر است.

موازنه جرم مدار فلوتاسیون چادرملو با استفاده از نتایج تجزیه سرندي و شیمیایی نمونه‌های گرفته شده از جریان‌های مختلف، در نرم افزار "موازن" انجام شد. خطای نسبی لحاظ شده برای هر جریان، با توجه به باطله یا کنسانتره بودن جریان بین ۵ تا ۱۰ درصد لحاظ شده است. داده‌های مربوط به موازنه جرم آهن، سیلیس و فسفر در بخش‌های خروجی و ورودی مدار در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای خوراکی با عیار فسفر و سیلیس، به ترتیب، ۰/۶۹۳ و ۴/۴۹ درصد، کنسانتره‌ای با عیار فسفر ۰/۰۴۷ و عیار سیلیس ۳/۵۸ درصد به‌دست آمده است. در این حالت حدود ۵/۴ درصد از فسفر و ۷۲/۸ درصد از سیلیس موجود در بار اولیه به کنسانتره

آپاتیت ($\text{Ca}_5(\text{F,Cl})\text{P}_3\text{O}_{12}$) و سایر کانی‌های سیلیکاته و رسی است.

مطالعات روی مقاطع میکروسکوپی نشان دادند که درجه آزادی کوارتز بین ۳۰ تا ۴۷ میکرون و درجه آزادی آپاتیت بین ۲۵ تا ۴۰ میکرون است. به منظور بررسی وضعیت درگیری کانی‌ها مقطعی از محدوده‌های ابعادی بزرگتر از ۲۵ میکرون کنسانتره آهن مدار فلوتاسیون چادرملو تهیه و وضعیت درگیری کانی‌ها بررسی شد (شکل ۴). مشاهده شد که ذرات سیلیس درگیر با آهن (عمدتا درگیر با هماتیت) حدود ۸ درصد کنسانتره را تشکیل می‌دهند. همچنین حدود ۱۷ درصد از کنسانتره شامل ذرات گانگ آزاد (بیش از ۹۰ درصد سیلیس) می‌باشد. سهم ذرات آپاتیت آزاد و درگیر در کنسانتره ناچیز است.



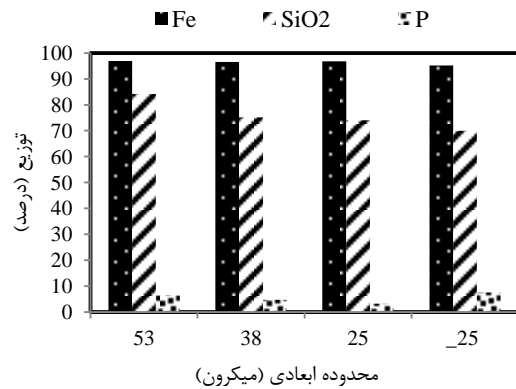
شکل ۴: وضعیت درگیری کانی‌ها در کنسانتره هماتیته چادرملو (ابعاد ۲۵ + میکرون) - A: گانگ آزاد، B: سیلیس درگیر با کانی بارزش، C: آپاتیت درگیر با کانی بارزش، D: کانی آهن آزاد

۴-۵- نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون

بخش عمده‌ای از این تحقیق شامل آزمایش‌های فلوتاسیون روی نمونه خوراک مدار فلوتاسیون فسفرزدایی چادرملو است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که بیش از ۷۵ درصد سیلیس موجود در بار اولیه به کنسانتره آهن (بخش غوطه ور) راه پیدا کرده‌اند (شکل ۳) و ذرات سیلیس اغلب به صورت آزاد هستند (شکل ۴). چون هدف اصلی مدار فلوتاسیون معکوس چادرملو، فسفرزدایی از کنسانتره آهن است نباید انتظار داشت که این مدار قادر به شناورسازی ذرات سیلیس باشد. بنابراین هدف از انجام آزمایش‌های فلوتاسیون بررسی امکان کاهش میزان سیلیس کنسانتره آهن بوده است. بنابراین ابتدا تأثیر پارامترهای مرتبط با سیلیکات سدیم روی شناورسازی سیلیس بررسی شده است. سپس تأثیر اضافه کردن یون کلسیم به محلول سیلیکات سدیم مطالعه شده است.

۴-۳- توزیع آهن، فسفر و سیلیس در محدوده‌های ابعادی کنسانتره

توزیع آهن، فسفر و سیلیس در محدوده‌های ابعادی کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: توزیع فسفر، سیلیس و آهن در کنسانتره نهایی مدار فلوتاسیون چادرملو

مشاهده می‌شود که توزیع فسفر در کنسانتره آهن (بخش غوطه‌ور)، در محدوده ابعادی زیر ۲۵ میکرون، حدود ۷/۵۳ درصد است که نسبت به محدوده‌های ابعادی دیگر بیشتر است. سیلیس در همه محدوده‌های ابعادی کنسانتره توزیع بالایی دارد ولی محتوی سیلیس محدوده‌های درشت‌تر به طور نسبی بیشتر است. همچنین توزیع آهن کنسانتره حدود ۹۵/۴۲ درصد است که در محدوده ابعادی کوچکتر از ۲۵ میکرون اندکی کاهش یافته است.

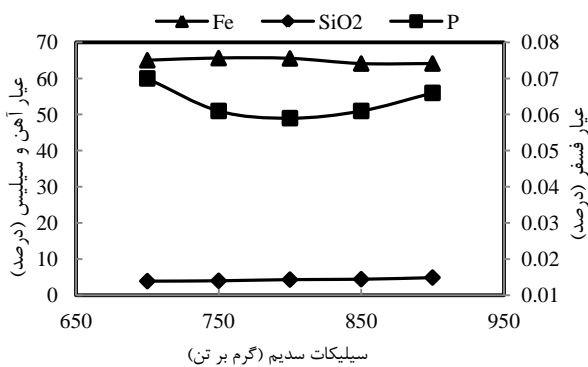
به نظر می‌رسد که در مدار فسفرزدایی چادرملو، آپاتیت‌های تا ابعاد ۲۵ میکرون تا حد قابل قبولی شناور شده‌اند ولی بخشی از آن‌ها که در محدوده ابعادی کوچکتر از ۲۵ میکرون قرار دارند، به خوبی شناور نشده‌اند. احتمالاً به خاطر حضور نرمه‌ها در این محدوده ابعادی، شناورسازی آن‌ها با فلوتاسیون واقعی میسر نشده و بخشی به صورت دنباله‌روی به بخش شناور شده منتقل شده‌اند. این اتفاق در مورد محدوده‌های ابعادی کوچکتر از ۲۵ میکرون آهن و سیلیس نیز رخ داده است.

۴-۴- مطالعات کانی‌شناسی

مطالعات XRD نشان داده است که کانی‌های عمده موجود در نمونه کنسانتره هماتیته شامل هماتیت (Fe_2O_3)، مگنتیت (Fe_3O_4)، به مقدار کمتر کوارتز (SiO_2) و مقادیر ناچیزی

در مقادیر کمتر از ۸۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم، آهن به خوبی بازداشت نشده و بیش از ۷ درصد هدرروی دارد. ولی کاهش قابلیت شناورشدگی آهن در مقادیر بالای ۸۰۰ گرم بر تن کمتر از ۳ درصد است.

با توجه به شکل ۶ افزایش نسبی عیار سیلیس و کاهش عیار آهن (در کنسانتره) با افزایش مقادیر سیلیکات سدیم به بیش از ۸۰۰ گرم بر تن مشاهده می‌شود. احتمالاً افزایش عیار سیلیس (و کاهش عیار آهن) در بخش غوطه‌ور، به علت بازداشت بیشتر ذرات سیلیس با افزایش میزان سیلیکات سدیم است. البته با افزایش میزان سیلیکات سدیم، ذرات سیلیس درگیر با آهن نیز در کنسانتره (بخش غوطه‌ور) افزایش می‌یابد در نتیجه عیار آهن کاهش و بازیابی آن افزایش می‌یابد، عیار سیلیس نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت بالای بازیابی در مرحله رافر سعی شده بازیابی بیشینه آهن مدنظر باشد. بنابراین مصرف ۸۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم منجر به نتایج رضایت‌بخشی شده است. در این حالت عیار فسفر هم در حد قابل قبولی است.



شکل ۶: تغییرات عیار فسفر، سیلیس و آهن کنسانتره، نسبت به تغییرات غلظت سیلیکات سدیم

۴-۵-۲- زمان آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم

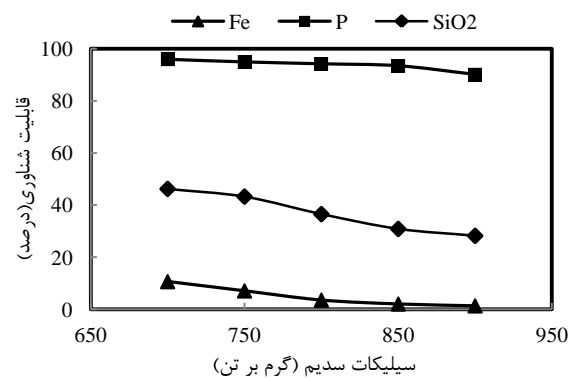
به‌منظور بررسی تأثیر زمان آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم، آزمایش‌هایی در شرایط مشابه آزمایش‌های قبل، با استفاده از ۸۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم و زمان‌های آماده‌سازی ۳ تا ۴۵ دقیقه انجام شد. تغییرات قابلیت شناورشدن و عیار آهن، فسفر و سیلیس، نسبت به تغییرات زمان آماده‌سازی محلول به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش زمان آماده‌سازی منجر به بازداشت بیشتر سیلیس می‌شود، ولی تأثیر چندانی بر شناوری آهن و فسفر ندارد. محتوی سیلیس کنسانتره با افزایش زمان آماده‌سازی

آزمایش‌های فلوتاسیون روی نمونه خوراک مدار فلوتاسیون باعیار آهن، فسفر و سیلیس به ترتیب ۵۷/۲۱، ۰/۶۴۹ و ۵/۷۸ درصد انجام شده است. ابعاد نمونه حدود ۴۳ میکرون بوده است. آنالیز نمونه‌ها در آزمایشگاه شیمی معدن چادرملو انجام گرفت.

با توجه به محدودیت‌ها، امکان تکرار همه آزمایش‌ها فراهم نبود ولی تکرار چند آزمایش منجر به نتایج نسبتاً نزدیکی شد. به‌عنوان مثال هنگام تکرار آزمایش‌ها با شرایط یکسان در حضور مقادیر متفاوت سیلیکات سدیم و محاسبه قابلیت شناورشدگی (بازیابی) آهن، فسفر و سیلیس خطای استاندارد به ترتیب حدود ۰/۳۳، ۰/۳۹ و ۰/۶۹ برآورد شد.

۴-۵-۱- تأثیر غلظت سیلیکات سدیم

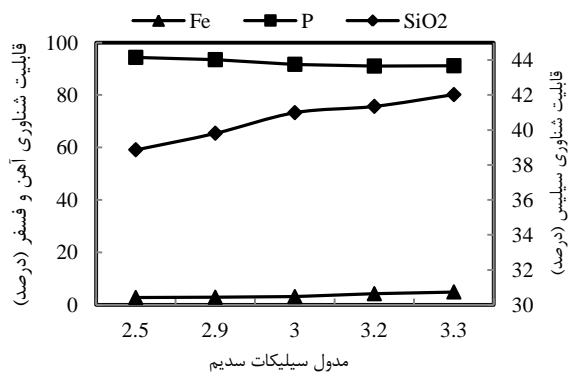
در این آزمایش‌ها میزان مصرف سیلیکات سدیم از حدود ۷۰۰ تا ۹۰۰ گرم بر تن تغییر داده شد. آزمایش‌ها در درصد جامد ۳۰ درصد، هوادهی ثابت و pH حدود ۱۰ انجام شدند. شکل ۵ تغییرات قابلیت شناورشدن فسفر، سیلیس و آهن نسبت به تغییرات غلظت سیلیکات سدیم را نشان می‌دهد. شکل ۶ تغییرات عیار این عناصر را نسبت به تغییرات غلظت سیلیکات سدیم نشان می‌دهد.



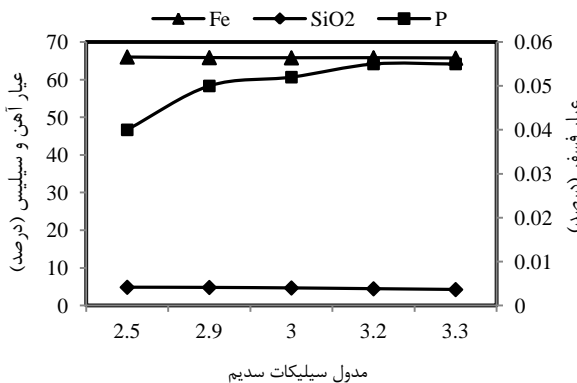
شکل ۵: تغییرات قابلیت شناور شدن فسفر، سیلیس (SiO₂) و آهن نسبت به تغییرات غلظت سیلیکات سدیم

بر اساس شکل ۵ با افزایش میزان مصرف سیلیکات سدیم، قابلیت شناورشدن آهن کاهش می‌یابد. در واقع بازیابی آن در کنسانتره آهن (بخش غوطه‌ور) افزایش می‌یابد. از طرف دیگر شناورشدگی سیلیس (و تا حدودی فسفر) نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر بازداشت سیلیس و فسفر با افزایش میزان مصرف سیلیکات سدیم افزایش می‌یابد.

۲/۹، ۳، ۳/۲ و ۳/۳ استفاده شد که توسط شرکت سیلیکات گستر اصفهان تهیه شدند. سایر شرایط آزمایش‌ها مشابه در نظر گرفته شدند. شکل ۹ تغییرات قابلیت شناور شدن فسفر، سیلیس و آهن و شکل ۱۰ تغییرات عیار آن‌ها نسبت به تغییرات مدول سیلیکات سدیم را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش مدول‌های سیلیکات سدیم فسفر به میزان کمی بازداشت می‌شود. شکل ۱۰ نیز نشان می‌دهد که همین عامل باعث شده تا محتوی فسفر کنسانتره افزایش پیدا کند. کاهش نسبی عیار آهن تحت تأثیر همین عامل نیز مشاهده می‌شود.



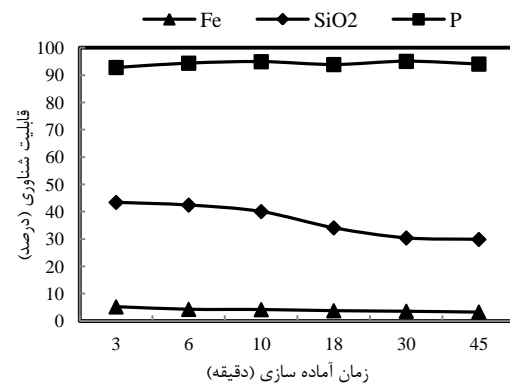
شکل ۹: تغییرات قابلیت شناور شدن فسفر، سیلیس و آهن نسبت به تغییرات مدول سیلیکات سدیم



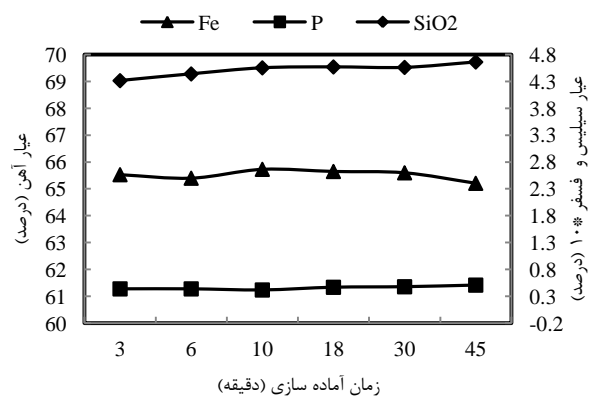
شکل ۱۰: تغییرات عیار فسفر، سیلیس و آهن کنسانتره، نسبت به تغییرات مدول سیلیکات سدیم

پلی‌مریزاسیون سیلیکات سدیم، با افزایش نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ افزایش می‌یابد. در واقع سیلیکات سدیم با مدول بالاتر بسیار پلی‌مریک است. این خاصیت باعث می‌شود جذب ذرات سیلیکات سدیم در سطح کانی به سختی صورت گیرد [۲۰]. به همین دلیل در نسبت‌های بالای $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ توزیع

افزایش می‌یابد. احتمالاً با افزایش زمان آماده‌سازی محلول، سیلیکات سدیم فرصت لازم برای پوشش سطحی سیلیس را دارد تا از فعال شدن سطح آن توسط کاتیون‌های جزئی کلسیم موجود در محلول جلوگیری کند و موجب بازداشت آن شود. همچنین بازداشت سیلیس با افزایش زمان آماده‌سازی می‌تواند در اثر افزایش واکنش بین کلکتور و بازداشت کننده باشد که در فصل مشترک بین محلول-کانی جذب شده است [۲۰]. با توجه به نتایج، زمان آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم نباید بیشتر از ۱۰ دقیقه باشد. زیرا زمان آماده‌سازی بیشتر موجب بازداشت بیشتر سیلیس و افزایش نسبی عیار فسفر کنسانتره می‌شود.



شکل ۷: تغییرات قابلیت شناور شدن فسفر، سیلیس و آهن نسبت به تغییرات زمان آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم



شکل ۸: تغییرات عیار فسفر، سیلیس و آهن در کنسانتره نسبت به تغییرات زمان آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم

۴-۵-۳- مدول‌های سیلیکات سدیم

به منظور بررسی تأثیر مدول سیلیکات سدیم (نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) بر فلوتاسیون آهن از ۵ مدول با نسبت‌های ۲/۵،

سیلیس و آهن در کنسانتره به میزان کمی کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). دلیل این کاهش را می‌توان جذب کمتر سیلیکات سدیم، در مدول‌های بالاتر روی سطح سیلیس و کانی‌های آهن دانست که در نتیجه تأثیر کلکتور، شناوری آن‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه سیلیکات سدیم با مدول ۲/۵ بیشترین کارایی در کاهش عیار و توزیع فسفر در کنسانتره و بالاترین تأثیر در بازداشت کنندگی آهن را دارد می‌توان مدول ۲/۵ را به عنوان مقدار مطلوب در نظر گرفت.

۴-۵-۴- ارزیابی تأثیر پارامترهای مرتبط با سیلیکات سدیم بر فلوتاسیون کنسانتره آهن

پس از تعیین سطوح بهینه پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیلیکات سدیم، فلوتاسیون مرحله رافر با شرایط: سیلیکات سدیم به میزان ۸۰۰ گرم بر تن، مدول سیلیکات سدیم ۲/۵ و زمان آماده‌سازی محلول کمتر از ۱۰ دقیقه، انجام شد. نتایج این آزمایش روی نمونه با محتوی سیلیس بالا، در جدول ۱، آزمایش شماره ۱، نشان داده شده است. در این آزمایش عیار سیلیس خوراک از مقدار ۵/۷۳ درصد به مقدار حدود ۴/۵۳ درصد در کنسانتره کاهش یافته است. توزیع سیلیس در کنسانتره مرحله رافر حدود ۶۸ درصد و توزیع آهن بیش از ۹۷ درصد است. آزمایش در شرایط مشابه روی نمونه معمول خوراک کارخانه (آزمایش ۵)، عیار سیلیس را از ۴/۴۹ به ۳/۴۱ درصد کاهش داد.

با توجه به نتایج در سطوح مؤثر پارامترهای اصلی سیلیکات سدیم مقادیر به‌دست آمده برای محتوی آهن و فسفر کنسانتره قابل قبول بود ولی مقادیر مربوط به میزان سیلیس آن رضایت بخش نبود.

در ادامه، آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی تأثیر پلی‌مریزاسیون سیلیکات سدیم، از طریق تغییر فاز سیلیکات سدیم ژل مانند به سیلیکات سدیم مایع با افزودن یون‌های Ca^{++} به محلول سیلیکات سدیم بر فلوتاسیون نمونه آهن چادرملو انجام شده است.

۴-۵-۵- اضافه کردن یون کلسیم به محلول سیلیکات سدیم با مشخص شدن سطح مؤثر پارامترهای سیلیکات سدیم، آزمایش‌هایی به منظور کاهش سیلیس کنسانتره آهن، با اضافه کردن نمک کلسیم کلراید آبدار به محلول سیلیکات سدیم (افزایش پلی‌مریزاسیون سیلیکات سدیم) انجام گرفت. در این حالت محلول‌هایی با نسبت‌های Me/Si (فلز به سیلیس) ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ تهیه شد. نتایج آزمایش‌ها در نسبت‌های مختلف محلول بالا در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌های ۱ تا ۴ روی نمونه‌های با محتوی سیلیس بالا و آزمایش ۶ روی خوراک معمولی مدار فلوتاسیون انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مخلوط سیلیکات سدیم-کلسیم کلراید آبدار با نسبت Me/Si معادل ۰/۴، سیلیس کنسانتره را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. در این حالت محتوی سیلیس کنسانتره از حدود ۵/۷۳ به ۳/۱ درصد کاهش یافته است. در این حالت توزیع سیلیس در کنسانتره حدود ۲۱ درصد و بازیابی آهن نیز حدود ۱/۵ درصد کاهش یافته است. مقادیر فسفر در همه آزمایش‌ها در حد مجاز بوده است.

تکرار آزمایش‌ها با محلول سیلیکات سدیم با نسبت Me/Si ۰/۴ روی نمونه خوراک معمولی کارخانه منجر به تولید کنسانتره آهن با محتوی سیلیس ۲/۰۱ و توزیع سیلیس ۳۹ درصد شد. به‌طور کلی نتیجه این آزمایش روی خوراک معمولی کارخانه رضایت‌بخش بود.

همان‌طور که بیان شد با افزایش پلی‌مریزاسیون سیلیکات سدیم جذب آن روی سطح کانی‌ها مشکل‌تر می‌شود. در این حالت شرایط برای جذب کلکتور آنیونی روی سطح ذرات سیلیس که با یون‌های کلسیم موجود در محلول سیلیکات سدیم فعال شده‌اند، فراهم می‌شود. در نتیجه میزان بیشتری از ذرات سیلیس شناور می‌شوند و محتوی سیلیس کنسانتره آهن کاهش می‌یابد.

جدول ۱: تأثیر افزودن نمک کلسیم کلراید به محلول سیلیکات سدیم بر بازیابی و عیار کنسانتره آهن (فلوتاسیون نمونه پرسیلیس و معمولی مدار چادرملو)

توزیع سیلیس (درصد)	توزیع فسفر (درصد)	توزیع آهن (درصد)	عیار سیلیس (درصد)	عیار فسفر (درصد)	عیار آهن (درصد)	نسبت Me/Si	آزمایش‌ها
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵/۷۳	۰/۶۵	۵۷/۲۱		خوراک با محتوی سیلیس بالا
۶۷/۷۹	۵/۶۷	۹۷/۹۵	۴/۵۳	۰/۰۴۳	۶۵/۴		بدون نمک ۱
۵۵/۷۶	۵/۰۱	۹۷/۸۳	۳/۵۷	۰/۰۴۱	۶۵/۹۸	۰/۲	۲
۴۶/۷۷	۴/۶۷	۹۶/۳۵	۳/۱۸	۰/۰۳۶	۶۶/۳۵	۰/۴	۳
۴۲/۵۶	۴/۵۹	۹۵/۱۴	۲/۹۱	۰/۰۶۱	۶۷/۳۶	۰/۶	۴
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴/۴۹	۰/۶۹	۵۹/۸۳		خوراک معمولی کارخانه
۶۱/۸۷	۶/۲۳	۹۷/۱۲	۳/۴۱	۰/۰۴۱	۶۶/۳۶		بدون نمک ۵
۳۹/۰۳	۴/۵۹	۹۶/۰۴	۲/۰۱*	۰/۰۳۴	۶۷/۱۰	۰/۴	۶

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق عوامل راه‌یابی سیلیس به کنسانتره آهن (بخش غوطه‌ور) در مدار فلوتاسیون معکوس چادرملو و روش کاهش آن بررسی شده است.

به این منظور نمونه‌هایی از بخش‌های مختلف مدار فلوتاسیون چادرملو تهیه شد. موازنه جرم و مطالعات درجه آزادی نشان داد که علت اصلی کاهش کیفیت کنسانتره آهن، راه‌یابی ذرات سیلیس اغلب آزاد و بخشی درگیر با کانی‌های آهن، به کنسانتره است. کارایی فلوتاسیون در مورد ذرات کوچکتر از ۲۵ میکرون کمتر از سایر محدوده‌های ابعادی است. میزان فسفر کنسانتره نیز در حد مجاز است.

آزمایش‌های فلوتاسیون روی نمونه خوراک با محتوی سیلیس بالای (حدود ۵/۷ درصد) مدار فلوتاسیون فسفرزدایی چادرملو به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مرتبط با سیلیکات سدیم انجام شد. سیلیکات سدیم به‌عنوان بازداشت‌کننده آهن، خاصیت انتخابی برای آهن و سیلیس در سیستم شامل آپاتیت-سیلیس-اکسیدهای آهن ندارد ولی با توجه به کارایی آن در بازداشت آهن و فراهم آوردن شرایط برای کاهش فسفر کنسانتره دارد به‌طور وسیعی استفاده می‌شود.

در این تحقیق تأثیر بعضی پارامترهای اصلی مرتبط با سیلیکات سدیم بررسی شد. همچنین تأثیر اضافه کردن یون‌های کلسیم به محلول سیلیکات سدیم به‌منظور فعال‌سازی سطح ذرات سیلیس بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از سیلیکات سدیم با مدول ۲/۵ به میزان ۸۰۰ گرم بر تن و زمان

آماده‌سازی محلول سیلیکات سدیم کمتر از ۱۰ دقیقه کنسانتره‌ای با محتوی آهن و فسفر قابل قبول را تولید می‌کند ولی مقادیر سیلیس آن رضایت‌بخش نیست. در این حالت محتوی سیلیس کنسانتره به ۴/۵ درصد با توزیع بیش از ۶۷ درصد رسید. اضافه کردن نمک کلسیم کلراید با نسبت Me/Si (فلز به سیلیس) ۰/۴ به محلول سیلیکات سدیم موجب کاهش سیلیس کنسانتره تا حدود ۳ درصد، با توزیع حدود ۴۶ درصد شد.

آزمایش‌های نهایی با سیلیکات سدیم پلیمریزه شده و با پارامترهای بهینه روی خوراک معمول کارخانه با محتوی سیلیس ۴/۵ درصد نشان داد که امکان دستیابی به کنسانتره‌ای با محتوی سیلیس حدود ۲ درصد و میزان فسفر در حد مجاز امکان‌پذیر است. در این حالت عیار آهن حدود ۱ درصد افزایش یافت و بازیابی آن حدود ۹۶ درصد گزارش شد.

۶- تقدیر و تشکر

از مدیریت و کارشناسان محترم مجتمع معدنی-صنعتی سنگ آهن چادرملو به خاطر حمایت از انجام این تحقیق، قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

- flotation*”, International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 18(5), 515-522.
- [15] Dho, H & Iwasaki, I; 1990; “*Role of sodium silicate in phosphate flotation*”, Minerals & Metallurgical Processing, 7(4), 215-221.
- [16] Wen Qi, G; Parentich, A; Little, L.H & Warren L.J; 1992; “*Mechanism of action of sodium silicate in the flotation of apatite from hematite*” International Journal of Mineral Processing, 34 83-102.
- [17] Potapova, E; Yang, X.; Grahn, M; Holmgren, A; Forsmo, S. P. E; Fredriksson, A & Hedlund, J; 2011; “*The effect of calcium ions, sodium silicate and surfactant on charge and wettability of magnetite*”, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 386(1), 79-86.
- [18] dos Santos, M. A; Santana, R. C; Capponi, F; Ataíde, C. H & Barrozo, M.A; 2010; “*Effect of ionic species on the performance of apatite flotation*”, Separation and Purification Technology, 76(1), 15-20.
- [19] Ahmadi A and Ranjbar M; 2008; “*Investigation of the interfacial phenomena in the flotation system of apatite*”, Second Iranian Mining Conference, Tehran University, Tehran
- [20] Rezaei B; 2008; “*Flotaion*”; Second Edition, Hormozgan University Publication.
- [1] Mark, M; 2012; “*Froth Flotation of Iron Ores*”, International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing, 1(2), 56-61.
- [2] Abdollahi M; Koleini J. and Pagard H; 2006; “*Determining the type of concentration of reagents in the hematite column flotation of Chadormalu Mine*”, Journal of The College of Engineering, Article 4, Volume 40, Issue 1.
- [3] Abdollahi M; Koleini J. and Pagard H; 2004; “*Comparison of the effects of Asam, Atrac and their mixture on the column flotation of Chadormalu apatite ore*”, First Iranian Mining Conference, Tarbiat Modares University, Tehran.
- [4] Bastagani M; Jafari A and Fathi F; 2008; “*Introducing and investigating the effect of Dirol-B as Collecto-Frother in the dephosphorization of Chadormalu iron ore*”; Second Iranian Mining Conference, Tehran University, Tehran
- [5] Shafahi Tonkaboni et al; 2004; “*Investigating the silica reduction method of Chadormalu iron concentrate*”; Research project, Iranian Mineral Research Centre, Yazd.
- [6] Araujo, A. C; Viana, P. R. M & Peres, A. E. C; 2005; “*Reagents in iron ores flotation*”, Minerals Engineering, 18(2), 219-224.
- [7] Arantes, R. S & Lima, R. M. F; 2013; “*Influence of sodium silicate modulus on iron ore flotation with sodium oleate*”, International Journal of Mineral Processing, 125, 157-160.
- [8] Ma, X; Marques, M & Gontijo, C; 2011; “*Comparative studies of reverse cationic/anionic flotation of Vale iron ore*”, International Journal of Mineral Processing, 100(3), 179-183.
- [9] de Souza Arantes, R & Lima, R. M. F; “*Comparative Studies of Inverse and Direct Flotation of a Brazilian Low Grade Iron Ore*”
- [10] Wen Qi, G; Parentich, A; Little, L. H & Warren, L. J; 1992; “*Selective flotation of apatite from iron oxides*”, International journal of mineral processing, 34(1), 83-102.
- [11] Qun, W & Heiskanen, K; 1990; “*Batch flotation tests by fatty acid on a phosphate-iron oxide-silicate regolith ore sample from Sokli, Finland*”, Minerals engineering, 3(5), 473-481.
- [12] Zhang, P; Snow, R; El-Shall, H & El-Midany; 2007; “*Depressants in nonsulfide minerals flotation*”, In: Fuerstenau, M.C; Jameson, G; Yonn, R; (Eds), Froth flotation: A Century of Innovation, 555-574.
- [13] Al-Thyabat, S; 2009; “*Empirical evaluation of the role of sodium silicate on the separation of silica from Jordanian siliceous phosphate*”, Separation and Purification Technology, 67(3), 289-294.
- [14] Rao, D. S; Vijaya Kumar, T. V; Rao, S. S; Prabhakar, S & Raju, G. B; 2011; “*Effectiveness of sodium silicate as gangue depressants in iron ore slimes*”