

مقاله "علمی-پژوهشی"

## بررسی تأثیر کانی‌های رسی بر کارایی فلوتاسیون کانسنگ مس سونگون

شهاب اسدپور<sup>۱</sup>، پرویز پورقهرمانی<sup>۲\*</sup>، جواد وظیفه مهربانی<sup>۳</sup>، حسین عبادی<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، Asadpourshahab@gmail.com

۲- استاد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، Pourghahramani@sut.ac.ir

۳- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، mehrabani@sut.ac.ir

۴- دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، H\_Ebadi@sut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴)

### چکیده

تأثیر کانی‌های رسی در عملکرد فلوتاسیون با ساخت نمونه‌های تصنعی برای انواع رس در درصدهای مختلف مطالعه شده است. حضور ترکیب کانی‌های رسی در خوراک کارخانه تغلیظ مس سونگون باعث مشکلات متفاوتی از جمله کاهش عیار و بازیابی کنسانتره نهایی می‌شود. بدیهی است که درک رفتار رس‌ها در عملکرد فلوتاسیون این کانسنگ می‌تواند گام مؤثری در امکان بهبود عملیات کارخانه در هنگام مواجه با خوراک‌های با درصد رس بالا باشد. بنابراین رفتار فلوتاسیون دو نمونه رس‌دار با درصد رس متفاوت در بخش رافر بررسی شد. نتایج دو نمونه‌ی رس بالا با محتوای ایلیت ۱۰/۴۶ درصد، کائولینیت ۲/۳۶ درصد و مسکویت ۶/۶۲ درصد و رس پایین با محتوای ایلیت ۶/۱۲ درصد، کائولینیت ۲ درصد و مسکویت ۱۱/۳ درصد مشخص کرد که در نمونه رس پایین اندازه حباب‌ها کاهش یافته است و همچنین کف، حاوی ذرات با ارزش کمتری است که در نهایت موجب کاهش بازیابی شده است. در طرف مقابل، کاهش قابل توجهی در عیار و بازیابی نمونه رس بالا علی‌رغم حجم کف پایین مشاهده نشد و مشخص شد کانی ایلیت (با درصد موجود در کانسنگ مذکور) تأثیری در فلوتاسیون مس ندارد. با بررسی تأثیر میزان کانی‌های رسی بر عملکرد فلوتاسیون مشخص شد که افزایش مقدار کانی‌های رسی به بیش از ۱۰ درصد ویسکوزیته پالپ را به شدت افزایش می‌دهد. در ادامه با افزایش مقدار کائولینیت به ۲۰ درصد وزنی تعداد حباب‌های با اندازه بزرگ کاهش یافت و کف بی‌رنگ شد و موجب کاهش بازیابی از ۸۱/۲۵ به ۷۱/۴۳ درصد و عیار از ۵/۳۸ به ۲/۰۵ درصد شد.

کلمات کلیدی: کانی‌های رسی، فلوتاسیون مس، ویسکوزیته، عملکرد کف

## ۱- مقدمه

کانی‌های رسی، سیلیکات‌های آبدار با ساختمان لایه‌ای یا ورقه‌ای هستند که از ورقه‌های چهاروجهی سیلیس (T) و هشت‌وجهی آلومینیم (O) یا منیزیم تشکیل شده‌اند که با نسبت‌های معینی به همدیگر متصل می‌شوند. بر این اساس اکثر کانی‌های رسی بر طبق دو واحد ساختاری: ۱:۱ (T-O) مانند کائولینیت و ۲:۱ (T-O-T) مانند مونت‌موریلونیت و ایلیت دسته بندی می‌شوند [۱]. رس‌های از نوع ۱:۱ از نظر الکتریکی خنثی هستند بنابراین بارهای مثبت و منفی را جذب نمی‌کنند و در آب متورم نمی‌شوند. ولی رس‌های از نوع ۲:۱ به دلیل تعویض یونی در لایه‌ها دارای بار منفی در سطح خود هستند بنابراین مولکول‌های آب با بار مثبت را جذب می‌کنند و در آب متورم می‌شوند [۲]. این بار الکتریکی، تورم‌پذیری و مساحت سطحی بالای کانی‌های رسی باعث شده است که اهمیت زیادی در فلوتاسیون مواد معدنی داشته باشد.

در صنعت فرآوری مواد معدنی با کاهش کانسنگ‌هایی با کیفیت بالا کانسنگ‌های کم عیار که محتوای کانی‌های رسی و دیگر کانی‌های گانگ می‌باشند بهره‌برداری می‌شوند [۳]. کانسنگ‌های مس پرفیری به‌طور معمول همراه با فرایندهای دگرسانی تیپیک بوده و بخش عمده کانی‌های حاصل از دگرسانی را انواع کانی‌های رسی به خود اختصاص می‌دهند. کانی‌های رسی همواره در کانسنگ‌های مس پرفیری وجود دارند هر چند که با تغییر زون‌های معدن‌کاری نوع و مقدار آن‌ها به شدت تغییر می‌کند [۴]. بالا بودن مقدار کانی‌های رسی بسته به نوع آن‌ها می‌تواند به شدت فرایند شناورسازی کانی‌های با ارزش مس را تحت تأثیر قرار دهد. کانی‌های رسی مختلف دارای تأثیرات متفاوت در فلوتاسیون کانی‌های مس می‌باشند که شدت تأثیرات آن‌ها وابسته به نوع و میزان حضور کانی‌های رسی در کانسنگ است. اما در حالت کلی وجود کانی‌های رسی با درصد زیاد معمولاً منجر به افزایش مصرف مواد شیمیایی به دلیل سطح

بسیار بالایی که دارند (کانی‌های رسی هم به سطح حباب‌های هوا و هم ماده معدنی جذب می‌شوند) [۵-۷]، افزایش مقدار نرمه و نرمه‌پوشی سطح ذرات [۵]، دنباله‌روی [۴،۸]، افزایش ویسکوزیته پالپ [۹-۱۱]، تغییر پایداری کف تولیدی [۱۱،۱۲] و غیره می‌شوند. نتیجه وجود رس زیاد در اکثر واحدهای فلوتاسیون مس‌های پرفیری معمولاً با کاهش کیفیت کنسانتره و عملکرد فلوتاسیون گزارش شده است [۷]. در حالت کلی، کانی‌های رسی رایج در کانسنگ‌ها را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد: گروه کائولینیت، گروه اسمکتیت و گروه ایلیت، که هر کدام تأثیر متفاوتی در فلوتاسیون دارند. کانی‌های رسی گروه کائولینیت به‌طور قابل توجهی دنباله‌روی را افزایش می‌دهند اما به دلیل ساختار ساده و بدون بار الکتریکی خود، دارای ظرفیت جذب آب بالایی نیستند [۱۳] بنابراین فقط در غلظت‌های بالا باعث افزایش ویسکوزیته پالپ می‌شوند. کانی‌های رسی گروه اسمکتیت یکی از مشکل‌سازترین کانی‌ها در فلوتاسیون به‌شمار می‌روند زیرا به‌دلیل تورم، ظرفیت تبادل کاتیونی و کریستالینیتی<sup>۱</sup> در غلظت‌های کم نیز باعث افزایش ویسکوزیته پالپ می‌شوند. و در غلظت‌های بالا به‌طور کامل مانع دینامیک فلوتاسیون شده و در نتیجه مانع تولید کف در بالای پالپ می‌شوند که به‌طور معمول در عملیات صنعتی اتفاق می‌افتد [۴]. کانی‌های رسی گروه ایلیت کمترین اثر منفی را در فلوتاسیون مواد معدنی دارند. کاتیون بین لایه‌ای ایلیت پتاسیم است که به دلیل ایجاد ساختار قوی یونی، مانع نفوذ مولکول‌های آب به فضاهای بین لایه‌ای می‌شود و در نتیجه کانی‌های رسی گروه ایلیت تأثیری روی ویسکوزیته ندارند [۵، ۹، ۱۷-۱۴]. لازم به ذکر است که ویسکوزیته پالپ بالا می‌تواند هیدرودینامیک<sup>۲</sup> سلول‌های فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار دهد که منجر به تأثیر منفی روی فرایندهای پایین دستی مورد نیاز برای فرایند کارآمد مانند پراکندگی گاز، تعلیق ذرات، برخورد ذره \_ حباب، اتصال و جدایش می‌شود [۷، ۱۰]. از طرفی مطالعات سیستماتیک چندانی در مورد تأثیر مسکویت که همواره در کنار کانی‌های رسی دیده می‌شود، روی فلوتاسیون

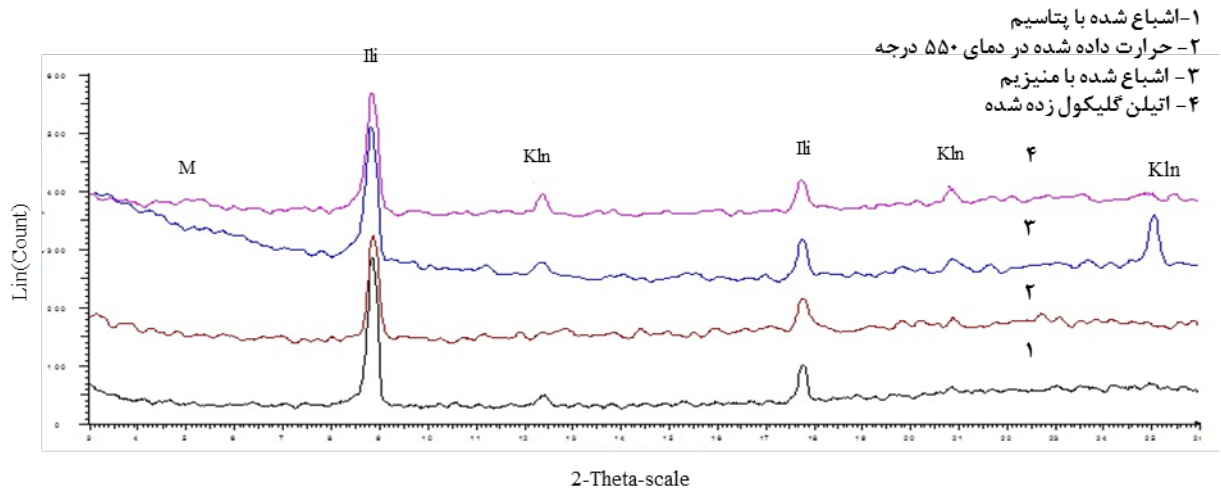
شناسی انجام گرفت. شناسایی کانی‌های رسی پس از حذف فیزیکی و شیمیایی کانی‌های غیر رسی انجام شد. پس از استخراج بخش رس آماده‌سازی‌های مخصوص کانی‌های رسی شامل قرار دادن نمونه در معرض بخار اشباع اتیلن‌گلیکول برای شناسایی رس‌های انبساط‌پذیر و حرارت دادن نمونه به مدت نیم ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای شناسایی کائولینیت انجام شد. سپس از نمونه خشک شده در هوا و نمونه‌های آماده شده به روش‌های ذکر شده طیف XRD تهیه شد. با مقایسه تغییرات فاصله بین صفحات در طیف‌های تهیه شده نوع کانی رسی تعیین شد [۲۱-۱۹]. جابجایی پیک‌های اصلی در اثر آماده‌سازی‌های مختلف برای نمونه سینه کار در شکل ۱ نشان داده شده است. درصد کانی‌های رسی با استفاده از روش ریتولد<sup>۴</sup> و نرم‌افزار MAUD تخمین زده شد [۲۲]. روش ریتولد یکی از برترین روش‌های شناسایی کمی کانی‌های رسی است. در روش ریتولد از توابع گاوسی و لورنتس و ترکیبی از این دو تابع برای فرآیند اصلاح ساختار کریستالی و برازش داده‌های تئوری حول نقاط تجربی استفاده می‌شود و اختلاف بین داده‌های تئوری و تجربی به حداقل می‌رسد و در نهایت با توجه به سطح زیر منحنی، مقدار هر فاز با خطای خیلی کم تخمین زده می‌شود [۲۷-۲۳]. نمونه‌ای از برازش طیف نمونه‌ها با روش ریتولد برای نمونه سینه کار در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق جدول ۲ کانی‌های رسی غالب هر دو نمونه ایلیت و کائولینیت است و کانی میکایی مسکویت نیز در هر دو نمونه وجود دارد. مقدار کائولینیت برای دو نمونه تفاوت اندکی دارد ولی ایلیت موجود در نمونه سینه کار ۴/۳۴ درصد بیشتر از نمونه خوراک خوراک آسیای نیمه‌خودشکن است. همچنین مقدار مسکویت نمونه سینه کار کمتر از نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن است و چون مسکویت یکی از کانی‌های تأثیرگذار در فلوتاسیون مس است. می‌تواند بمراتب تأثیر بیشتری از ایلیت بر روی فرایند داشته باشد.

کانسنگ‌های مس انجام نگرفته است. فرخپای و همکاران [۱۸]، در مطالعه انجام گرفته در این زمینه گزارش کردند که مسکویت در رئولوژی پالپ تأثیرگذار بوده و تأثیر کمی در رفتار کف دارد و عیار فلوتاسیون مس در حضور مسکویت به دلیل دنباله‌روی کاهش می‌یابد [۱۸]. هرچند مسکویت جزء گروه رس‌ها دسته بندی نمی‌شود اما به دلیل ساختار بسیار مشابه به کانی‌های رسی، تأثیر مسکویت نیز در کنار رس‌ها بوسیله محققان بررسی می‌شود [۵۰۷].

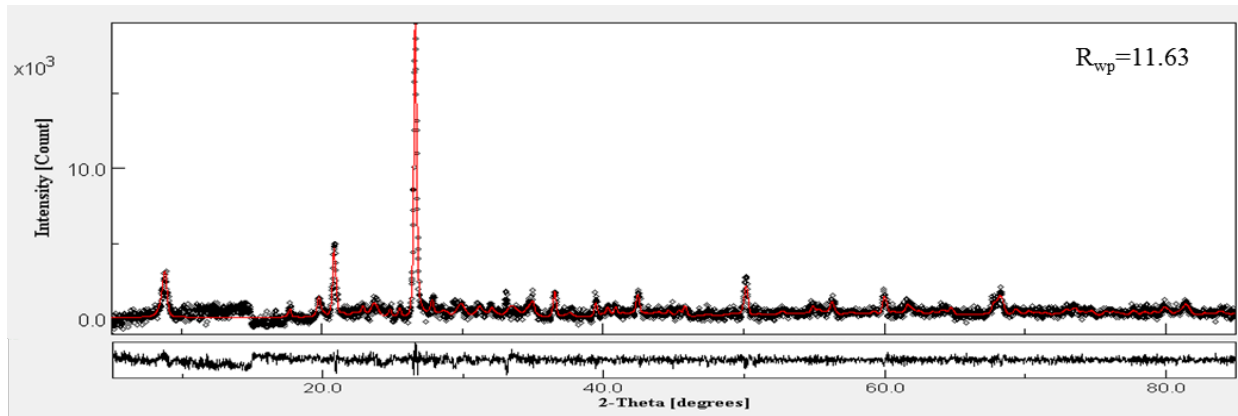
تحقیقات انجام گرفته در زمینه تأثیر رس‌ها در کانسنگ‌های مس با اضافه کردن جداگانه هر کانی رسی در درصدهای مختلف به کانسنگ‌های بدون رس و ساختن نمونه تصنعی برای هر نوع رس، بررسی و تحلیل شده است اما تأثیر کانی‌های رسی موجود در یک کانسنگ به دلیل وجود چند نوع رس در کنار هم و پیچیدگی شناخت تأثیر آن‌ها بررسی نشده است. در این مقاله تلاش شده است که تأثیر میزان و نوع رس‌های دو نمونه رس‌دار با درصد رس متفاوت و تأثیر کائولینیت در عملکرد کانسنگ مس سونگون مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و همچنین تأثیر مسکویت نیز به‌عنوان یک کانی مزاحم در فلوتاسیون مس با توجه به شباهت ساختار و خواص آن به کانی‌های رسی بررسی شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

با تهیه دو نمونه معرف از خوراک آسیای نیمه‌خودشکن<sup>۳</sup> (نمونه کم رس) و سینه کار معدن (نمونه با درصد رس بالا)، از تجزیه‌های XRF و XRD برای آنالیز شیمیایی و کانی شناسی استفاده شد (جدول ۱ و ۲). آنالیز شیمیایی نشان داد مقدار مس کل هر دو نمونه تقریباً برابر است و مس اکسیدی نمونه آسیای نیمه‌خودشکن ۷ درصد و سینه کار معدن ۴ درصد است. آنالیزهای XRD با استفاده از دستگاه پراش‌سنج پیشرفته مدل D5000 با آند مس و طول موج  $K\alpha = 1/54 \text{ \AA}$  در سازمان زمین



شکل ۱-جابجایی پیک‌های اصلی در اثر تیمارهای مختلف برای نمونه سینه کار



شکل ۲-منحنی ریتولد برای نمونه سینه کار

جدول ۲- ترکیب کانی شناسی دو نمونه

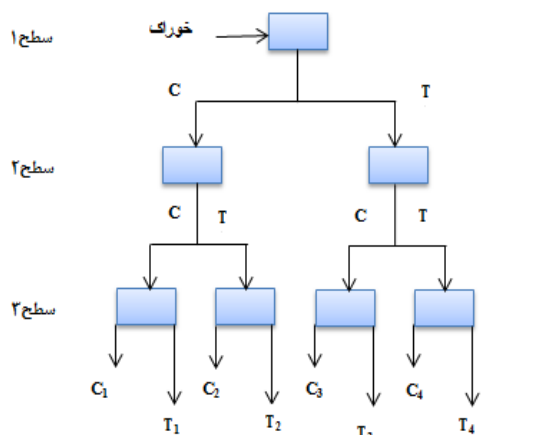
مجموع کانی های رسی (%)	مسکویت (%)	کانی های رسی (%)		نوع نمونه
		ايليت	کائولینيت	
۸/۱۲	۳/۱۱	۶/۱۲	۲	خوراک آسیای نیمه خود شکن
۱۲/۸۲	۶/۶۲	۱۰/۴۶	۲/۳۶	سینه کار

جدول ۱- آنالیز شیمیایی دو نمونه

عیار (%)			نوع نمونه
آهن	مس اکسیدی	مس کل	
۳/۸۸	۰/۰۷	۰/۷۰۵	خوراک آسیای نیمه خود شکن
۴/۱۶	۰/۰۴	۰/۶۹	سینه کار

دسته تقسیم می‌شوند: ۱- روش‌هایی بر مبنای کشش سطحی و زاویه تماس<sup>۵</sup>، ۲- روش‌های بر مبنای فلوتاسیون که روش‌های مبتنی بر فلوتاسیون به دلیل اینکه به شرایط واقعی آزمایش‌های فلوتاسیون نزدیک‌تر هستند مناسب تشخیص داده شد [۲۸]. از بین روش‌های مبتنی بر فلوتاسیون، روش آنالیز درختی برای آزمایشات استفاده شد.

در روش آنالیز درختی تمام کنسانتره‌ها و باطله‌ها جداگانه نگهداری شده و هرکدام به صورت جداگانه پرعیار کنی ثانویه و رم‌گیری می‌شوند دقت کارایی و جدایش بسته به تعداد مراحل پرعیارکنی و رم‌گیری است. در مراحل مختلف با توجه به کاهش حجم مواد به ترتیب از سلول‌های ۵ و ۳ لیتری استفاده شد. میزان مواد شیمیایی، درصد جامد، دور روتور، pH و زمان آماده‌سازی یکسان در نظر گرفته شد. درصد جامد ۳۲٪،  $pH=10/65$  و زمان آماده‌سازی ۵ دقیقه در نظر گرفته شد همچنین مواد شیمیایی Z11 و FLOMIN به‌عنوان کلکتور، A<sub>70</sub> و A<sub>65</sub> به‌عنوان کف‌ساز استفاده شد. شمای عملیات آنالیز درختی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- شمای آنالیز درختی

## ۲-۱- خردایش و آزمایش‌های فلوتاسیون

هر دو نمونه در ابتدا با استفاده از سنگ‌شکن فکی تا اندازه زیر ۱ سانتیمتر خرد شدند و سپس با استفاده از آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی اندازه نمونه‌ها به زیر ۱۲۵ میکرون رسانده شد ( $P_{80}=80/28$ ).

برای مقایسه تأثیر رس‌ها روی دو نمونه، آزمون‌های فلوتاسیون مطابق با شرایط بهینه کارخانه بر روی آن‌ها انجام شد. در این آزمون‌ها از Z11 (Xanthate) و FLOMIN (Dithiophosphates) با مقادیر به ترتیب ۱۵ و ۲۰ گرم بر تن به‌عنوان کلکتور و از A<sub>70</sub> (Alcohol) و A<sub>65</sub> (Poly glycol) با مقادیر به ترتیب ۱۰ و ۵ گرم بر تن به‌عنوان کف‌ساز برای انجام آزمون‌ها استفاده شد.

زمان آماده‌سازی در مرحله رافر با کلکتور ۸ دقیقه، با کف‌ساز ۱ دقیقه و با آهک برای تنظیم pH، ۷ دقیقه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در  $pH=11/4$  و درصد جامد ۳۴ درصد و دور روتور ۱۱۰۰rpm انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه فلوتاسیون دنور آزمایشگاهی و سلول فلوتاسیون ۵ لیتری استفاده شد.

برای بررسی تأثیر افزایش مقدار کائولینیت روی شناوری کانسنگ مقدار کائولینیت نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن به ۲۰ درصد افزایش داده شد که برای این منظور از سوپر کائولن معدن کائولن زنوز استفاده شد.

## ۲-۲- آزمون‌های تعیین حد شناورسازی ذرات

هدف از تعیین قابلیت شناوری روشن ساختن این موضوع است که آیا محدوده فعلی منحنی عیار- بازیابی مدار بالاترین محدوده است و یا امکان ارتقا این منحنی به مقادیر بالاتر وجود دارد. روش‌های مختلفی برای این منظور توسعه یافته‌اند که به دو

### ۳-۲- اندازه گیری ویسکوزیته و عملکرد کف

برای اندازه گیری ویسکوزیته نمونه‌ها از دستگاه ویسکومتر دورانی مدل ZNN-D6 موجود در شرکت الماس باریت مهاباد استفاده شد. همچنین برای درک تأثیر افزایش مقدار رس‌ها در ویسکوزیته پالپ، برای اینکه ماهیت کانی‌های رسی نمونه‌ها تغییر نکند ابتدا دو جزء نمونه با وزن یکسان از نمونه سینه کار جدا شد. در مرحله بعد بخش رس یکی از نمونه‌ها به روش بشر ته‌نشینی جداسازی شد و در نمونه دوم افزوده شد تا مقدار رس نمونه دوم دو برابر شود سپس ویسکوزیته این نمونه اندازه‌گیری شد. به همین ترتیب این عمل برای نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن نیز تکرار شد. به نحوی که درصد رس نمونه سینه کار از ۱۳/۸۴ درصد به ۲۷/۶۸ درصد رس نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن از ۷/۱۲ به ۲۰/۹۶ درصد افزایش پیدا کرد. برای درک عملکرد کف تصاویر کف در دقایق اولیه کف‌گیری با دوربین کیفیت بالایی ثبت شد.

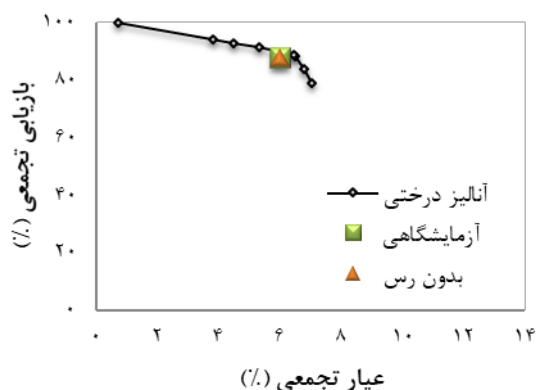
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آزمون‌های قابلیت شناوری

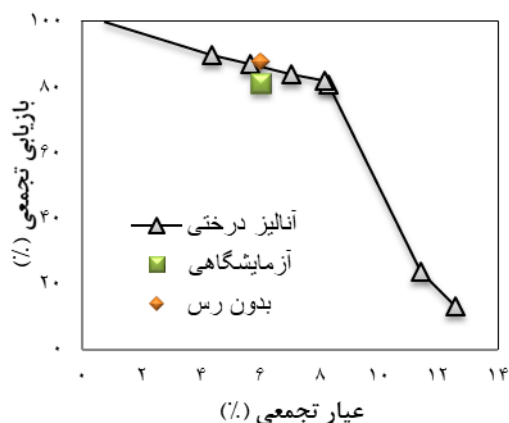
مقایسه نتایج آنالیز درختی با مقادیر آزمایشگاهی و متوسط عیار و بازیابی کارخانه بدون حضور کانی‌های رسی برای نمونه سینه کار نشان می‌دهد (شکل ۴) که حضور کانی‌های رسی تأثیر چندانی روی نمونه سینه کار ندارند اما منحنی آنالیز درختی نشان‌دهنده این است که هرچند رسیدن به بازیابی بالا با کاهش عیار ممکن است ولی امکان افزایش عیار به بالای ۷ درصد با کاهش بازیابی امکان پذیر نیست. در نتیجه، افزایش مقدار ایلیت در نمونه مانع افزایش عیار در درصد‌های بالا می‌شود.

برای نمونه آسیای نیمه خودشکن شرایط متفاوت‌تر از نمونه سینه کار است مطابق شکل ۵، منحنی آنالیز درختی پایین‌تر از متوسط عیار و بازیابی کارخانه و مقدار آزمایشگاهی پایین‌تر از این دو مقدار است و با عیار ۶ درصد نمی‌توان به بازیابی متوسط کارخانه رسید. هر چند دستیابی به عیار بالا با کاهش بازیابی و

برعکس در این نمونه ممکن است اما مقدار بالای مسکویت باعث شده است که عیار و بازیابی کاهش یابد.



شکل ۴- مقایسه نتایج آنالیز درختی با مقادیر طراحی و نمونه بدون رس برای نمونه سینه کار



شکل ۵- مقایسه نتایج آنالیز درختی با مقادیر طراحی و آزمایشگاهی برای نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن

#### ۳-۲- آزمایش‌های فلوتاسیون اولیه

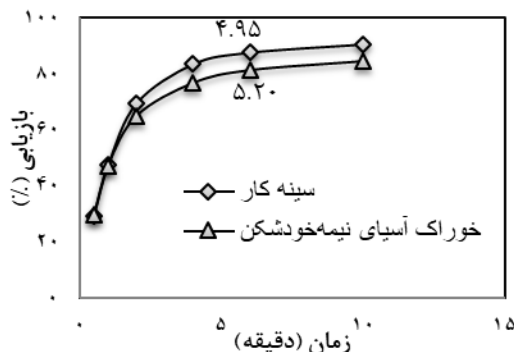
به منظور درک بهتر از رفتار نمونه‌ها در فلوتاسیون، روی هر دو نمونه آزمایش‌های فلوتاسیون اولیه انجام شد. رسیدن بازیابی و عیار نمونه سینه کار پس از ۶ دقیقه کف‌گیری به ترتیب به ۴/۹۵ و ۸۷/۶۹ درصد مشخص کرد که کانی‌های رسی موجود در این نمونه تأثیر محسوسی روی عیار و بازیابی ندارند چرا که کانی رسی غالب این نمونه ایلیت بوده و طبق تحقیقات انجام شده در

سینه‌کار ۳۷/۵ درصد و نمونه آسیای نیمه‌خودشکن ۳۴/۹۹ درصد است، بنابراین یکی دیگر از دلایل پایین بودن بازیابی نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن را می‌توان به بازیابی کم مس اکسیدی آن نسبت داد. همچنین بازیابی ۳۷/۵ درصد اکسید مس در فلوتاسیون سولفیدی بازیابی بالای محسوب می‌شود که دلیل آن درگیری با کانی‌های سولفیدی است از طرفی ممکن است برخی از کانی‌های سولفیدی نیز در حین فلوتاسیون اکسید شوند که موجب بالا رفتن بازیابی کانی‌های اکسیدی مس شده است.

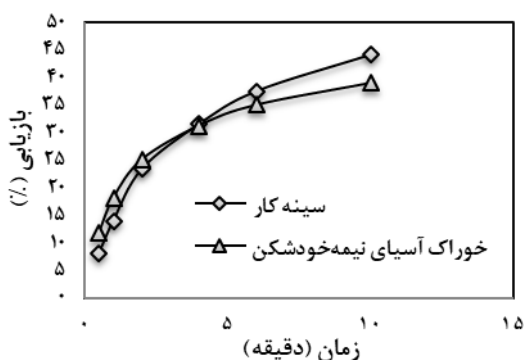
### ۳-۳- تأثیر کانی‌های رسی در عملکرد کف

در کانسنگ حاضر که کانی رسی عمده آن ایلیت است و دارای درصد پایینی کاتولینیت نیز می‌باشد، بجز کانی‌های رسی، مسکوویت نیز وجود دارد که شرایط کف آزمایش‌های مختلف نشان داد که تأثیر به مراتب بیشتری بر روی کف دارد. مطابق شکل ۸ حجم کف نمونه سینه‌کار در ابتدا کم است، که بعد از حدود ۱ دقیقه و ۳۰ ثانیه کف‌گیری حجم کف افزایش یافت و با ادامه کف‌گیری حجم کف به حالت عادی برگشت. اندازه کف این نمونه مشکل چندانی نداشت و کف مذکور حاوی حباب‌های ریز و درشت بود. همچنین طبق تحقیقات فرخپای و همکاران [۱۱]، ایلیت به تنهایی تأثیری روی کف نمی‌گذارد. اما حضور توام ایلیت و مسکوویت باعث شده است که مقدار کف در لحظات اولیه کف‌گیری بسیار کم باشد و با ادامه کف‌گیری و خارج شدن کانی‌های رسی کف به حالت عادی خود باز گردد. نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن در مقایسه با نمونه سینه‌کار دارای حجم کف بیشتری است ولی تعداد حباب‌های با اندازه بزرگ‌تر برای نمونه سینه‌کار بیشتر است. مقایسه کف‌های دو نمونه نشان می‌دهد علی‌رغم حجم کف بیشتر نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن، حباب‌ها در این نمونه دارای ذرات با ارزش کمتری نسبت به نمونه سینه‌کار هستند که باعث می‌شود بازیابی آن

این زمینه ایلیت تأثیر چندانی روی عیار و بازیابی ندارد (شکل ۶). [۷].



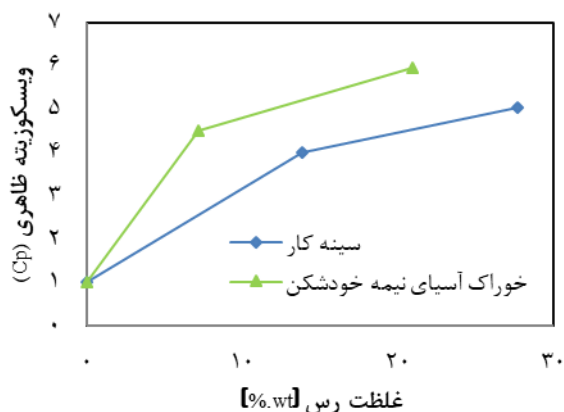
شکل ۶- منحنی بازیابی تجمعی- زمان برای مس کل.



شکل ۷- منحنی بازیابی تجمعی- زمان برای مس اکسیدی.

اما عیار و بازیابی نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن در مرحله رافر به ترتیب ۵/۲۰ و ۸۱/۲۵ است که دلیل این بازیابی پایین را نمی‌توان به حضور کانی‌های رسی نسبت داد زیرا کانی رسی غالب نمونه ایلیت و مقدار آن پایین است. احتمالاً وجود ۱۱ درصد مسکوویت با توجه به تأثیر بسزایی که روی زتا پتانسیل کانی‌های مس دارد می‌تواند باعث پوشش سطح کانی‌های مس شده و بازیابی آن را پایین آورده است [۵]. همچنین نتایج آنالیز شیمیایی دو نمونه نشان می‌دهد که درصد مس اکسیدی نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن نسبت به نمونه سینه‌کار بیشتر است (جدول ۱)، با این حال شکل ۷ نشان می‌دهد که پس از ۶ دقیقه کف‌گیری بازیابی اکسید نمونه

نمونه سینه‌کار با افزایش درصد رس آن از ۱۳/۸۴ به ۲۷/۶۸ درصد، از ۴ به ۵/۰۵ سانتی پواز رسیده است. و ویسکوزیته نمونه خوراک سگ میل با افزایش درصد رس از ۷/۱۲ به ۲۰/۹۶ درصد، از ۴/۵ به ۵/۹۶ سانتی پواز رسیده است. بنابراین یکی از دلایل پایین بودن بازیابی نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن را می‌توان به بالا بودن ویسکوزیته آن نسبت داد.



شکل ۹- تأثیر افزایش غلظت رس در ویسکوزیته ظاهری

### ۵-۳- تأثیر افزایش pH در رئولوژی نمونه خوراک سگ میل

هنگام انجام تست‌های مختلف روی نمونه آسیای نیمه‌خودشکن مشاهده شد که افزایش pH با اضافه کردن شیر آهک به شدت ویسکوزیته نمونه را افزایش می‌دهد؛ که می‌تواند ناشی از تأثیر آهک در پالپ باشد. بنابراین به منظور بررسی تأثیر pH (تأثیر آهک) روی ویسکوزیته پالپ نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن پس از افزایش درصد رس آن به ۲۰ درصد، pH آن با اضافه کردن مرحله‌ای آهک تا pH=۱۳ افزایش داده شد و ویسکوزیته پالپ در pH های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش pH پالپ از ۵/۴ به ۱۲، ویسکوزیته پالپ از ۵/۹۶ سانتی پواز به ۸/۲۵ سانتی پواز رسیده است. ولی با افزایش pH از ۱۲ به ۱۳ ویسکوزیته تغییری نکرده است. این افزایش ویسکوزیته در pH حدود ۱۲ می‌تواند یکی از

نسبت به نمونه سینه کار کمتر باشد. بی‌بار بودن کف نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن را می‌توان به نرمه پوشی ناشی از وجود مسکوویت نسبت داد. زیرا افزایش مقدار مسکوویت در پالپ حاوی کالکوپیریت، زتاپتانسیل را به زتاپتانسیل مسکوویت خالص نزدیک می‌کند که نهایتاً موجب می‌شود سطح کانی کالکوپیریت با مسکوویت پوشش داده شود [۵].



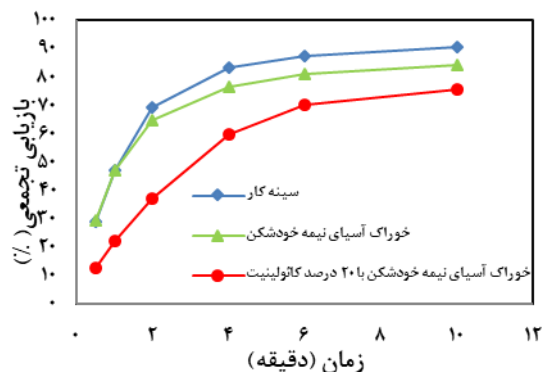
الف ب

شکل ۸- تصویر کف نمونه‌ها، الف) خوراک آسیای نیمه خودشکن و ب) سینه کار

### ۴-۳- تأثیر افزایش مقدار رس‌ها بر روی ویسکوزیته پالپ

در فرایند فلوتاسیون ویسکوزیته پالپ بالا برخورد بین حباب و ذرات و تحرک توده حباب\_ذره را کاهش می‌دهد که نتیجه آن کاهش مقدار کف در بالای سلول فلوتاسیون و کاهش بازیابی است [۴]. ویسکوزیته اولیه نمونه سینه کار علی‌رغم درصد رس بالا کمتر از نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن است. ویسکوزیته اولیه نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن، ۴/۵ سانتی‌پواز و نمونه سینه کار، ۴ سانتی پواز است (شکل ۹). با توجه به این‌که کانی رسی ایلیت متورم نمی‌شود و تأثیری روی ویسکوزیته ندارد و همچنین تفاوت عمده دو نمونه در مقدار مسکوویت آن‌ها است بنابراین می‌توان دریافت که وجود مسکوویت موجب افزایش ویسکوزیته پالپ نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن شده است. همچنین افزایش درصد رس نمونه‌ها به شدت ویسکوزیته را افزایش داده است. به‌طوری‌که ویسکوزیته





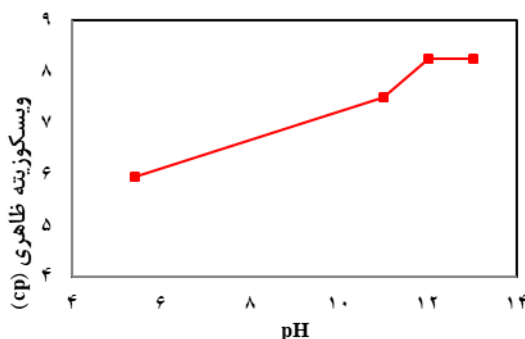
شکل ۱۱- منحنی عیار\_بازیابی نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن، سینه کار و خوراک آسیای نیمه خودشکن با ۲۰ درصد کائولینیت

مطابق شکل ۱۱ با افزایش مقدار کائولینیت به ۲۰ درصد وزنی، عیار کنسانتره از ۵/۳۸ به ۲/۰۵ کاهش می‌یابد و همچنین بازیابی از ۸۱/۲۵ به ۷۰/۴۳ کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقدار کائولینیت خوراک، بازیابی و عیار را به شدت کاهش خواهد داد.

### ۷-۳- تأثیر کائولینیت در عملکرد کف

بررسی اندازه و حجم کف با افزایش درصد کائولینیت به ۲۰ درصد مشخص کرد که حجم کف بدون تغییر مانده ولی فرم کف به کلی تغییر یافته است (شکل ۱۲). همچنین رنگ کف مشخص کرد که با اضافه کردن کائولینیت کف رنگ روشن‌تری به خود گرفته، حباب‌های با اندازه متوسط و ریز افزایش یافته است و حباب‌ها حاوی کانی‌های با ارزش کمتری است. با ادامه کف‌گیری و خارج شدن مقدار زیادی از کائولینیت از پالپ، پس از ۱ تا ۱/۵ دقیقه کف به شرایط عادی خود برگشت. به نظر می‌رسد کاهش عیار مس با افزایش نسبت کائولینیت به احتمال زیاد به دلیل دنباله روی مکانیکی یا جذب فیزیکی ذرات رس روی کانی‌های مس است که ذرات کائولینیت به دلیل اندازه ریز در آب معلق می‌شوند، به سمت بالا حرکت می‌کنند و در نهایت با کنسانتره خارج می‌شوند.

دلایل بازیابی پایین نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن باشد گرچه اکثر مواد سولفیدی غیر اکسید شده در شرایط فلوتاسیون معمولی دارای بار منفی هستند. ولی پوشش ذرات رسی هنوز هم می‌تواند از طریق جاذبه الکترواستاتیک بین کانی‌هایی با بار منفی و لبه‌هایی با بار مثبت از کانی‌های رسی اتفاق بیفتد [۲۹]. پوشش ذرات سرسیت بر روی سطح کالکوپیریت زمانی که زتاپتانسیل هردو کانی در سیستم منفی است اتفاق می‌افتد. در نتیجه نرمه پوشی اتفاق افتاده بین دو کانی با بار منفی از طرف محققین غیر منتظره نامیده شده است [۳۰]. با این حال آن‌ها این رفتار را به هتروکواگالاسیون<sup>۶</sup> بین کالکوپیریت و کانی‌های رسی ناشی از آزاد شدن  $Ca^{2+}$  از آهک که برای تنظیم pH به پالپ اضافه می‌شود نسبت داده‌اند [۳۱].



شکل ۱۰- تأثیر افزایش pH بر روی ویسکوزیته نمونه آسیای نیمه خودشکن

### ۶-۳- تأثیر کائولینیت روی فلوتاسیون کانسنگ

با توجه به اینکه هردو نمونه دارای مقدار اندکی کائولینیت بودند. بنابراین برای درک بهتر از تأثیر کائولینیت روی فلوتاسیون نمونه‌ها، با اضافه کردن کائولینیت به نمونه خوراک آسیای نیمه خودشکن که درصد رس آن پایین بود. درصد کائولینیت آن از ۲ درصد به ۲۰ درصد افزایش داده شد. و عیار و بازیابی، پایداری کف با نمونه‌های اولیه مقایسه شد.

سیستم منفی است که علت آن هتروکواگلاسیون بین کالکوپریت و کانی‌های رسی ناشی از آزاد شدن  $Ca^{2+}$  از آهک است.

۵- افزایش مقدار کائولینیت تا ۲۰ درصد وزنی نشان داد عیار کنسانتره از ۵/۳۸ به ۲/۰۵ و بازیابی از ۸۱/۲۵ به ۷۰/۴۳ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر زیاد کائولینیت روی عیار، به دلیل ریز شدن کف و دنباله‌روی است.

### تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم امور تحقیق و توسعه شرکت صنایع ملی مس ایران به خاطر همکاری صمیمانه و اجازه انتشار این مقاله، تشکر و قدردانی می‌شود.

### مراجع

[1] Theng, B.K.G., 2012. *The clay minerals. In Developments in clay science* (Vol. 4, pp. 3-45). Elsevier.

[2] Tucker, M.E. ed., 2009. *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. John Wiley & Sons.

[3] Bulatovic, S.M., Wyslouzil, D.M., Kant, C., 1998. *Operating practices in the beneficiation of major porphyry copper/molybdenum plants from Chile: innovated technology and opportunities, a review*. Miner. Eng. 11 (4), 313-33

[4] Wang, Y., Peng, Y., Nicholson, T. and Lauten, R.A., 2015. *The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation*. Applied Clay Science, 114, pp.48-52.

[5] Peng, Y., Zhao, S., 2011. *The effect of surface oxidation of copper sulfide minerals on clay slime coating in flotation*. Miner. Eng. 24 (15), 1687-1693.



ب

الف

شکل ۱۲- تصویر کف نمونه آسیای نیمه‌خودشکن (الف) با اضافه کردن ۲۰ درصد کائولینیت (ب) بدون اضافه کردن کائولینیت

### ۴- نتیجه‌گیری

۱- در این پژوهش تأثیر دو نمونه رس‌دار با درصد رس متفاوت روی فلوتاسیون کانسنگ مس سونگون بررسی شد. نتایج نشان داد وجود ۱۱/۴۶ درصدی ایلیت و ۶/۶۲ درصدی مسکویت در نمونه سینه کار تأثیری چندانی در عیار و بازیابی و عملکرد کف ندارد هرچند مانع افزایش عیار در درصدهای بالای عیار می‌شود و همچنین حجم کف را مقداری کاهش داده است.

۲- با افزایش درصد مسکویت و کاهش درصد ایلیت در نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن حجم کف افزایش یافت ولی اندازه حباب‌ها ریز شد و به دلیل نرمه‌پوشی سطح حباب‌ها و ذرات مس با مسکویت، حباب‌ها دارای مواد با ارزش کمتری بودند که موجب کاهش بازیابی این نمونه شد.

۳- بررسی ویسکوزیته دو نمونه نشان داد مسکویت تأثیر به مراتب بیشتری نسبت به ایلیت در افزایش ویسکوزیته دارد در نتیجه در نمونه‌ای که مسکویت غالب است بازیابی کاهش یافته است.

۴- بررسی ویسکوزیته پالپ با افزایش pH نشان داد که افزودن آهک برای تنظیم pH موجب افزایش ویسکوزیته نمونه خوراک آسیای نیمه‌خودشکن می‌شود و در نتیجه پوشش ذرات سرسیت روی سطح کالکوپریت زمانی که زتا پتانسیل هر دو کانی در

- [16] Wang, Y., 2016, "Mitigating the deleterious effect of clay minerals on copper flotation." PhD Thesis, The University of Queensland.
- [17] Cruz, N., Peng, Y., Farrokhpay, S. and Bradshaw, D., 2013. *Interactions of clay minerals in copper-gold flotation: Part 1-Rheological properties of clay mineral suspensions in the presence of flotation reagents*. Minerals Engineering, 50, pp.30-37.
- [18] Farrokhpay, S., Ndlovu, B. and Bradshaw, D., 2018. *Behavior of talc and mica in copper ore flotation*. Applied Clay Science, 160, pp.270-275.
- [19] Moore, D.M. and Reynolds, R.C., 1989. *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals* (Vol. 322, p. 321). Oxford: Oxford university press.
- [20] Poppe, L.J., Paskevich, V.F., Hathaway, J.C. and Blackwood, D.S., 2001. *A laboratory manual for X-ray powder diffraction*. US Geological Survey Open-File Report, 1(041), pp.1-88.
- [21] Brindley, G.W., 1980. *Crystal structures of clay minerals of clay minerals and their X-ray identification*. Mineralogical Society Monograph., 5, pp.Chapter-2.
- [22] Lutterotti, L. (2000). *MAUD*. CPD Newsletter (IUCr).
- [23] Young, R., *Introduction to the Rietveld method*. The Rietveld Method, 1993.
- [24] Hill, R.J. and Howard, C.J., 1987. *Quantitative phase analysis from neutron powder diffraction data using the Rietveld method*. Journal of Applied Crystallography, 20(6), pp.467-474.
- [25] Rietveld, H., *A profile refinement method for nuclear and magnetic structures*. Journal of applied Crystallography, 1969. 2(2): p. 65-71.
- [6] Chen, X. and Peng, Y., 2018. *Managing clay minerals in froth flotation—A critical review*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 39(5), pp.289-307.
- [7] Farrokhpay, S. and Ndlovu, B., 2013. *Effect of phyllosilicate minerals on the rheology, colloidal and flotation behaviour of chalcopyrite mineral*. Chemeca 2013: Challenging Tomorrow, p.733.
- [8] Liu, D., Peng, Y., 2014. *Reducing the entrainment of clay minerals in flotation using tap and saline water*. Powder Technol. 253, 216–222
- [9] Zhang, M., Peng, Y., 2015. *Effect of clay minerals on slurry rheology and the flotation of copper and gold minerals*. Miner. Eng. 70, 8–13.
- [10] Cruz, N. and Peng, Y., 2016. *Rheology measurements for flotation slurries with high clay contents—a critical review*. Minerals Engineering, 98, pp.137-150.
- [11] Farrokhpay, S., Ndlovu, B. and Bradshaw, D., 2016. *Behaviour of swelling clays versus non-swelling clays in flotation*. Minerals Engineering, 96, pp.59-66.
- [12] Farrokhpay, B. Ndlovu "Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation: A riview" 26th International Mineral Processing Congress ,2252
- [13]. Murray, H.H., 1999. *Applied clay mineralogy today and tomorrow*. Clay minerals, 34(1), pp.39-49.
- [14] Wang, L., Peng, Y., Runge, K. and Bradshaw, D., 2015. *A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation*. Minerals Engineering, 70, pp.77-91.
- [15] Cruz, N., Peng, Y., Wightman, E. and Xu, N., 2015. *The interaction of clay minerals with gypsum and its effects on copper-gold flotation*. Minerals Engineering, 77, pp.121-130.

- [26] Hillier, S., *Accurate quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by XRD: comparison of a Rietveld and a reference intensity ratio (RIR) method and the importance of sample preparation*. Clay Minerals, 2000. 35(1): p. 291-302.
- [27] Will, G., *Powder diffraction: The Rietveld method and the two stage method to determine and refine crystal structures from powder diffraction data*. 2006: Springer Science & Business Media.
- [28] Randolph Jr, J.M., *Characterizing flotation response: a theoretical and experimental comparison of techniques*. 1997.
- [29] Xu, Z., Liu, J., Choung, J. W., and Zhou, Z., 2003, "Electrokinetic study of clay interactions with coal in flotation." International Journal of Mineral Processing, 68(1-4), pp. 183-196.
- [30] He, M., Addai-Mensah, J., and Beattie, D., 2009, "The influence of polymeric dispersants on sericite-chalcocite particle interactions in aqueous media." Chemical Engineering Journal, 152(2-3), pp. 471-479.
- [31] Uribe, L., Gutierrez, L., and Jerez, O., 2016, "The depressing effect of clay minerals on the floatability of chalcopyrite." Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 37(4), pp. 227-235.

---

1 -crystallinity  
2 -hydrodynamic  
3 -SAG Mill  
4 -Rietveld Method  
5- Contact Angle  
6 - Hetero-Coagulation