

جدایش اسفالریت از باطله‌های معدن سرب و روی کوشک به روش فلوتاسیون

بهنام باقری، جواد وظیفه مهربانی*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

چکیده: در این پژوهش، امکان بازیابی انتخابی روی از باطله‌های پرعیار دپو شده در معدن سرب و روی کوشک به روش فلوتاسیون، بررسی شد. دو مشخصه‌ی بارز این نمونه، علاوه بر درصد بالای اسفالریت، درصد بسیار زیاد پیریت (حدود ۵۰٪) و حضور مواد کربن‌دار بود؛ از این رو رقابت بین کانی‌های اسفالریت و پیریت و جدایش انتخابی در فرآیند فلوتاسیون دارای اهمیت بود. نتایج حاصل از فلوتاسیون آزمایشگاهی با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای مختلف PAX، Aero 3477، Danafloat 233 و Florrea 2214 در pH طبیعی، نشان داد که در مرحله‌ی رافر، بیشترین عیار و بازیابی روی با کلکتور Aero 3477 به دست می‌آید که در این شرایط، کمترین عیار و بازیابی آهن در کنسانتره‌ی روی، حاصل شد. با افزایش مقدار کلکتور Aero 3477 تا ۴۰ گرم بر تن، عیار و بازیابی روی به ترتیب ۲۴/۲۷٪ و ۶۸/۸۹٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که بر خلاف کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات، با کلکتور Aero 3477 در pH‌های قلیایی و بالای ۱۰/۵، پیریت نه تنها بازداشت نشد، بلکه نسبت به pH‌های اسیدی، فعال شد. در pH‌های قلیایی و اسکوزیته‌ی پالپ به طور چشمگیری افزایش یافته و میزان شناورشدگی اسفالریت و کارایی جدایش بین اسفالریت و پیریت به شدت افت کرد که می‌تواند مربوط به تأثیر منفی حضور ژپس و کانی‌های رسی در نمونه‌ی باطله بر آبرانی سطح اسفالریت و رئولوژی پالپ فلوتاسیون باشد.

کلمات کلیدی: فلوتاسیون؛ باطله؛ اسفالریت؛ پیریت؛ نوع کلکتور.

KEYWORDS: Flotation; Tailing; Sphalerite; Pyrite; Collector type.

مقدمه

فرآوری سرب و روی موجود از این ذخایر به روش فلوتاسیون، حذف مواد کربن‌دار همراه، ضروری است. حضور کانی‌های کربن‌دار یک عامل مزاحم در فلوتاسیون انتخابی سرب و روی است و حضور آن باعث ناپایداری کف‌ها و کاهش عیار کنسانتره می‌شود [۲].

ذخایر سرب و روی تشکیل شده در شیل‌های سیاه از جمله ذخیره‌های مهمی هستند که به منظور استحصال فلزات باارزش آن، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. ذخایر رد داگ آمریکا، سولیوان کانادا، مونت‌ایزا و هیلتون استرالیا نمونه‌ای از این ذخیره‌ها هستند که دارای مواد کربن‌دار می‌باشند [۱]. به منظور

*E-mail: mehrabani@sut.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

مولد شیمیایی گوناگون از جمله سولفات فرو، آهنک، سیانید (به دلیل مشکلات زیست‌محیطی، استفاده از سیانید محدود شده است) گونه‌های سولفوراکسی (سولفیت (SO_3^{2-}))، بی‌سولفیت (H_2SO_3)، متابی‌سولفیت ($S_2O_8^{2-}$)، گاز گوگرد دی‌اکسید (SO_2)، پتاسیم پرمنگنات و غیره به منظور بازداشت پیریت و کاهش شلور شدن پیریت استفاده می‌شود [۱۲-۱۸]. همچنین، کلکتور گزنتات، نمی‌تواند جدایش انتخابی مورد نظر را در سیستم فلوتاسیون پیچیده‌ی شامل پیریت تأمین کند؛ برای افزایش انتخابی بودن فلوتاسیون در چنین سیستمی، کلکتورهای مانند دی‌تیوفسفات‌ها (DTP)، دی‌تیوفسفینات‌ها (DTPI)، تیونوکربامات‌ها (TC) و دی‌تیوکربامات‌ها (DTC) به تنهایی یا به صورت ترکیب با گزنتات استفاده می‌شوند این کلکتورها معمولاً در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی استفاده می‌شوند و انتخابی بودن در برابر سولفیدهای آهن را افزایش می‌دهند و قدرت جمع‌آوری بالایی نسبت به گزنتات دارند [۵]. این کلکتورها معرف‌های کی‌لیت‌سازی هستند که در ساختار خود اتم‌هایی با تمایل شیمیایی بیشتر به سمت یون‌های فلزی خاص را دارند که انتخابی بودن بالای آن‌ها را سبب می‌شود [۱۳، ۵]. پرکاربردترین کلکتورها در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی روی، کلکتورهای Aero 4037، Aerofloat 211، Sodium Aerofloat و Danafloat 233 هستند و به صورت ترکیب با گزنتات‌ها به عنوان کلکتور کمکی، بازیابی حداکثر با جدایش انتخابی مورد نظر را فراهم می‌کنند [۱۴].

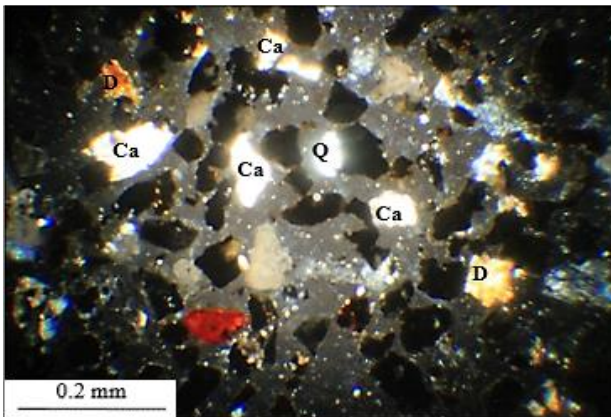
در این مطالعه، با توجه به مشخصات نمونه‌ی مورد مطالعه و به دلیل وجود درصد بسیار بالای پیریت و نیز حضور کربن، شناورسازی انتخابی اسفالریت از پیریت مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ به همین منظور، تأثیر انواع کلکتورها با خاصیت انتخابی بالا، میزان pH، نوع تنظیم‌کننده‌ی pH، نوع بازداشت‌کننده‌ی پیریت، مقدار کلکتور، سولفات فرو و همچنین، تأثیر پیش‌فلوتاسیون و تأثیر فرآیند اسکرابینگ اسیدی خوراک فلوتاسیون قبل و بعد از مرحله‌ی شیل‌گیری بر روی عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بخش تجربی

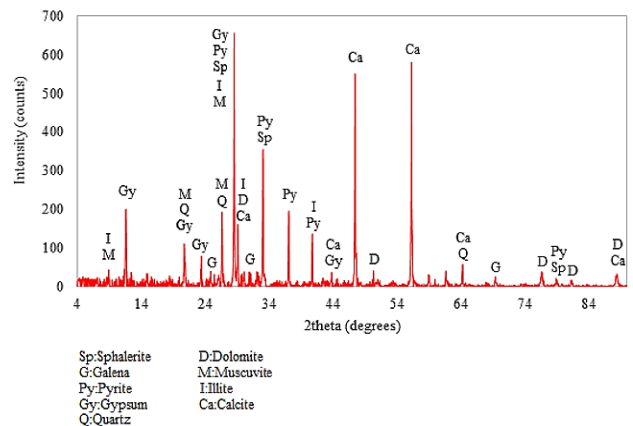
نمونه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش، از باطله‌های پرعیار دپو شده در معن سرب و روی کوشک یزد با وزن تقریبی ۲۰۰ کیلوگرم تهیه شد به علت انباشت نمونه‌ها در سد باطله، ذرات به هم چسبیده و به صورت کلوخه درآمده بودند که برای جداسازی آن‌ها در مرحله‌ی اول از سنگ‌شکن فکی و سپس از سنگ‌شکن غلطکی استفاده شد. از سرنده ۱۰ مش (۱۶۵۱ میکرون) به عنوان سرنده کنترل استفاده شد.

معادن سرب و روی کوشک یکی از معادن مهم سولفیدی کشور می‌باشد که بیش از ۴۰ سال از فعالیت آن می‌گذرد و از جمله معادنی است که فلزات باارزش آن در شیل‌های سیاه و پیریت قرار دارند و در مرحله‌ی اولیه‌ی فلوتاسیون با افزودن گازوئیل و کف‌ساز، کربن آن حذف می‌شود. این بخش شناور شده، دارای مقادیر قابل توجهی کانی روی است که به طور مستقیم به سد باطله هدایت می‌شود. صدها هزار تن باطله در طول سال‌ها بهره‌برداری از کارخانه‌ی فرآوری در سدهای باطله انباشته شده است. بخشی از این باطله‌های انباشته شده، پرعیار بوده، میزان پیریت موجود حدود ۵۰٪ - ۲۵٪ و میزان فلز روی موجود در آن حدود ۱۳٪ - ۳/۵٪ می‌باشد.

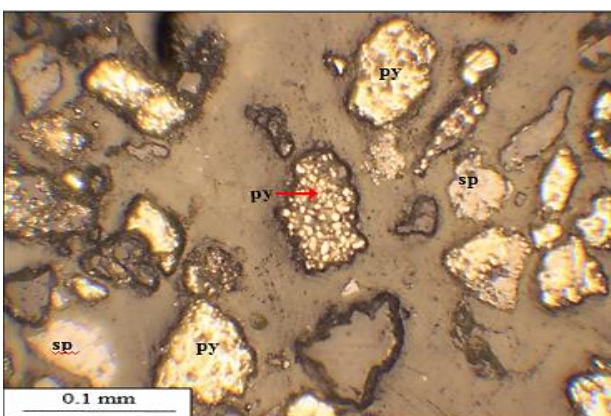
با توجه به ارزش اقتصادی فلز روی و افزایش روز افزون تقاضا برای فلز روی و کم‌عیار شدن کانه‌های آن، باطله‌های مذکور می‌تواند به عنوان یک منبع مناسب جهت استحصال فلز روی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مشخصات نمونه و وجود ناخالصی‌هایی مانند کربن و وجود مقادیر بالای پیریت به همراه کانی‌های باارزش اسفالریت، فرآوری و تولید محصولات نهایی، پیچیده و با مشکلاتی همراه است. با توجه به درصد بالای پیریت در نمونه‌ی باطله، بازداشت مناسب پیریت و شناورسازی اسفالریت با استفاده از کلکتورهای انتخابی‌تر با مقادیر مناسب بسیار مهم است که در ادامه به انواع بازداشت‌کننده‌های پیریت و کلکتورها پرداخته خواهد شد. انتخابی بودن فلوتاسیون، امری مهم و ضروری است [۳]. یکی از مشکل‌های عمده در مدارهای فلوتاسیون، راه‌یابی ناخواسته‌ی مقلد زبادی از کانی‌های سولفیدی آهن به کنسانتره می‌باشد پیریت با فرمول شیمیایی FeS_2 - فراوان‌ترین کانی سولفیدی آهن است که معمولاً با کانی‌های باارزش مانند اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، طلا و زغال‌سنگ همراه بوده و انتخابی بودن فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیریت اصلی‌ترین کانی مزاحم در فلوتاسیون کانسنگ‌های سرب و روی می‌باشد که به دلیل فعال شدن توسط مس (که به منظور فعال‌سازی اسفالریت به پالپ افزوده می‌شود و یا حاصل اکسایش کانی‌های دارای مس هستند) شناور می‌شود [۶-۴] و مقابله با آن در فلوتاسیون انتخابی، یک مسئله مهم است؛ چون به علت آبرانی بالا یا شناور شدن توسط کلکتور به راحتی به کنسانتره‌ی فلوتاسیون، انتقال می‌یابد [۵]. حضور آن در کنسانتره، عیار کنسانتره را کاهش داده و ارزش اقتصادی آن را پایین می‌آورد [۵۷]. همچنین، یون‌های فلزی مانند Cu^{2+} و Pb^{2+} با جذب در سطح پیریت باعث فعال شدن آن می‌شوند. CuS_2 یا $(CuFe)_2S_2$ به همراه هیدروکسید Cu^{2+} (که با هیدروکسید فریک حاصل از اکسیداسیون سطح پیریت واکنش داده است)، از جمله محصولات تشکیل شده در سطح پیریت در اثر فعال شدن آن توسط یون‌های Cu^{2+} ، هستند [۸].



شکل ۲- نمایی از تیغه‌ی نازک محدوده‌ی ابعادی ۱۰۵+۷۴- میکرون.



شکل ۱- طیف XRD نمونه‌ی باطله‌ی معدن کوشک.



شکل ۳- نمایی از مقطع صیقلی محدوده‌ی ابعادی ۱۰۵+۷۴- میکرون.

مطالعه‌ی مقطع‌های صیقلی نیز نشان داد که پیریت، اسفالریت و گالن به ترتیب، فراوان‌ترین کانی‌های فلزی موجود در نمونه هستند. پیریت به دو فرم قطعات درشت و بلوری (پیریت هیدروترمال) و ذرات ریز پراکنده در زمینه‌ی سایر کانی‌های فاز اصلی (پیریت به فرم باکتریوژنیک) می‌باشد. اسفالریت بیشتر به شکل آزاد و کمتر به صورت درگیر با سایر کانی‌ها مشاهده می‌شود. ابعاد ذرات، بسیار ریز بوده و کانی‌ها بیشتر به فرم آزاد هستند گالن با مقلار جزئی به طور عمده به صورت ذرات ریز و به صورت آزاد دیده می‌شود. در شکل ۳، نمایی از مقطع صیقلی محدوده‌ی ابعادی ۱۰۵+۷۴- میکرون، آورده شده است.

میزان عناصر سرب، روی و آهن موجود در نمونه‌ی تهیه شده از این باطله‌ها با روش جذب اتمی (AAS) به ترتیب ۳/۱۲٪، ۱۲/۷٪ و ۲۰/۰۲٪ و با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP-MS) به ترتیب ۳/۲۹٪، ۱۳/۰۵٪ و ۲۰/۲۲٪ و همچنین، با استفاده از این روش، میزان عناصر نقره، مس، نیکل و کبالت به ترتیب ۰/۸ ppm، ۷۳۴ ppm، ۳۲ ppm و ۶ ppm اندازه‌گیری شد.

سپس، مقاری نمونه‌ی معرف، برای تعیین توزیع دانه‌بندی با استفاده از تجزیه‌ی سردی به روش تر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تجزیه‌ی سردی تر دلالت بر آن داشت که حدود ۷۱٪ ذرات، ریزتر از ۳۷ میکرون می‌باشند. ذرات زیر ۳۷ میکرون نیز با استفاده از بشر ته‌نشینی دانه‌بندی شدند که حدود ۵۳٪ ذرات زیر ۳۷ میکرون در ابعاد ریزتر از ۱۱ میکرون قرار گرفتند. سرانجام با محاسبه‌ی دانه‌بندی کل باطله، d_{80} ذرات حدود ۶۳ میکرون به دست آمد. برای انجام آنالیزهای XRD، جذب اتمی (AAS) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده‌ی القایی (ICP-MS)، مقاری نمونه‌ی معرف توسط آسیای گولهای خرد شد تا به ابعاد زیر ۷۵ میکرون برسد. با توجه به نتایج آنالیز XRD کیفی، پیریت، اسفالریت و ژیس به عنوان فازهای اصلی و کوارتز، گالن، کلسیت، دولومیت، موسکویت و ایلیت به عنوان فازهای جزئی مشخص شدند. طیف XRD در شکل ۱، آورده شده است.

به منظور انجام مطالعات کانی‌شناسی، پس از تجزیه‌ی سردی به روش تر، از فراکسیون‌های ۱۰۵+۱۴۹-، ۱۰۵+۷۴-، ۷۴+۵۳- و ۳۷- میکرون که درصد بیشتری از نمونه را تشکیل می‌دادند، مقطع‌های صیقلی و همچنین، از فراکسیون ۱۰۵+۷۴- میکرون، تیغه‌ی نازک تهیه شد. در شکل ۲، نمایی از تیغه‌ی نازک محدوده‌ی ابعادی ۱۰۵+۷۴- میکرون، آورده شده است. قطعات سیاه‌رنگ، کانی‌های فلزی و قطعات نیمه‌شفاف به احتمال زیاد، کانی‌های گانگ و قطعات شفاف که به طور عمده به رنگ بژ مشاهده می‌شود، کانی‌های کربناته می‌باشد. گانگ همراه به طور عمده از نوع کربناتی بوده و شامل کلسیت و یا دولومیت است. سایر کانی‌های شفاف به ترتیب فراوانی از نوع کوارتز، ژیس و کانی‌های رسی می‌باشد.

آماده‌سازی پالپ با درصد وزنی جامد ۵۰٪ به مدت ۳ دقیقه
افزودن ۶۰۰ گرم بر تن سولفات روی و آماده‌سازی به مدت ۸ دقیقه
افزودن ۲۰ گرم بر تن گزویئل و ۲۰ گرم بر تن MIBC و آماده‌سازی به مدت ۲ دقیقه
افزودن آب و رساندن درصد وزنی جامد پالپ به ۳۰٪
حذف مواد کربن دار با استفاده از پیش‌فلوتاسیون (مرحله‌ی شیل‌گیری به مدت ۵ دقیقه)
تظیم pH
افزودن ۴۰۰ گرم بر تن سولفات فرو و آماده‌سازی به مدت ۸ دقیقه
افزودن ۶۰۰ گرم بر تن سولفات مس و آماده‌سازی به مدت ۸ دقیقه
افزودن کلکتور و آماده‌سازی به مدت ۲ دقیقه
افزودن ۴۰ گرم بر تن کف‌ساز MIBC و آماده‌سازی به مدت ۲ دقیقه
کف‌گیری مرحله‌ی رافر به مدت ۸ دقیقه

شکل ۴- مراحل انجام آزمایش‌های فلوتاسیون.

(۱۰ گرم بر تن) باعث شناورشدگی پیریت شده و جدایش انتخابی اسفالریت از پیریت را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۵]. به همین منظور در آزمایش‌ها در مرحله‌ی اول بر اساس مشاهدات آزمایش‌های فلوتاسیون از مقلدهای پایین کلکتور استفاده شد نتایج حاصل از فلوتاسیون آزمایشگاهی در pH طبیعی پالپ (۵/۵) با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای مختلف در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده است. همان طور که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود، بیشترین عیار روی (۴۳/۸۲٪) و بیشترین بازیابی روی (۵۲/۴۱٪) و کارایی جلايش روی (۴۵/۶۴٪) با ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 به دست آمد از طرفی با توجه به شکل ۶، کمترین عیار و بازیابی آهن در کنسانتره‌ی روی با کلکتور Aero 3477 به ترتیب Aero 3477 ۷/۵۵٪ و Aero 3477 ۶/۰۱٪ حاصل شد نتایج حاصل از کلکتور Florea 2214 نیز از لحاظ بازیابی روی، نزدیک به کلکتور Aero 3477 به دست آمد ولی عیار روی و کارایی جلايش روی نسبتاً پایین‌تری در مقایسه با کلکتور Aero 3477 را نشان داد. از طرفی کمترین عیار و بازیابی روی با کلکتور Danafloat 233 به ترتیب Aero 3477 ۲۹/۶۴٪ و Aero 3477 ۳۹/۵۷٪ به دست آمد تاثیر مقلد کلکتور Aero 3477 بر روی عیار، بازیابی و کارایی جلايش روی در pH طبیعی پالپ بررسی شد که نتایج تغییر مقلد این کلکتورها در شکل ۷، نشان داده شده است.

آزمایش‌های فلوتاسیون رافر در سلول ۴ لیتری توسط ماشین فلوتاسیون دنور با دور موتور ۱۳۷۰ دور در دقیقه و با درصد وزنی جامد ۳۰٪ انجام شد و به منظور حذف مواد کربن‌دار، یک مرحله پیش‌فلوتاسیون مورد استفاده قرار گرفت. در این سری آزمایش‌ها از انواع مختلف کلکتور مانند PAX (پتاسیم آمیل گزنات)، Aero 3477 (دی‌تیوفسفات)، Florrea 2214 (دی‌تیوفسفات) و Danafloat 233 (دی‌تیوفسفات) استفاده شد. همچنین، از سولفات فرو و دکستروزین به صورت جداگانه به عنوان بازداشت‌کننده‌ی پیریت، سولفات روی به عنوان بازداشت‌کننده‌ی اسفالریت، سولفات مس به عنوان فعال‌کننده‌ی اسفالریت Aero 633 به عنوان بازداشت‌کننده‌ی کربن و از کف‌ساز MIBC استفاده شد. لازم به ذکر است که به دلیل محدودیت‌ها و مشکلات زیست‌محیطی از سیانید سدیم برای بازداشت پیریت استفاده نشد.

مراحل کلی انجام تست‌های فلوتاسیون در شکل ۴، آورده شده است. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته‌ی مطلق پالپ در pHهای مختلف نیز از دستگاه Rotary Viscometer مدل ZNN-D6 استفاده شد.

برای انجام اسکرابینگ و شستشوی ذرات ریز و چسبیده به سطح ذرات درشت از سلول ۲ لیتری با درصد وزنی جامد ۵۰٪ و از پره‌ی مخصوص اسکرابینگ استفاده شد.

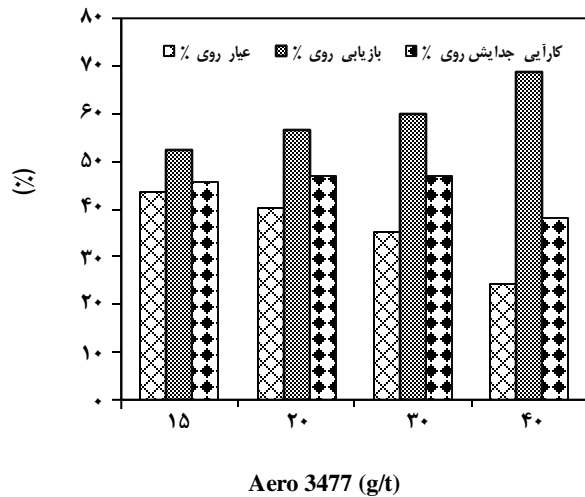
به منظور کاهش دررفت اسفالریت در بخش سرریز پیش‌فلوتاسیون، در قسمتی از آزمایش‌ها، شستشوی بخش سرریز مورد بررسی قرار گرفت که این آزمایش‌ها در سلول ۱ لیتری دنور با درصد وزنی جامد ۱۰٪، دور موتور ۹۰۰ دور در دقیقه و ۴۰ گرم بر تن گزویئل انجام پذیرفت.

اندازه‌گیری عناصر روی و آهن نمونه‌های حاصل از تست‌های آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه جذب اتمی و اندازه‌گیری کربن موجود در نمونه با استفاده از دستگاه LECO انجام شد که میزان کربن نمونه‌ی مورد مطالعه ۱/۴۶٪ اندازه‌گیری شد. از pH متر ساخت Metrohm (مدل ۸۲۷) برای اندازه‌گیری pH استفاده شد. آزمایش‌های مختلفی برای تعیین تأثیر پارامترها انجام شد و نتایج حاصل از آن‌ها بر روی عیار و بازیابی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از کارایی جدایش روی به عنوان مبنایی بر انتخابی بودن در شرایط مختلف آزمایش‌ها استفاده شد.

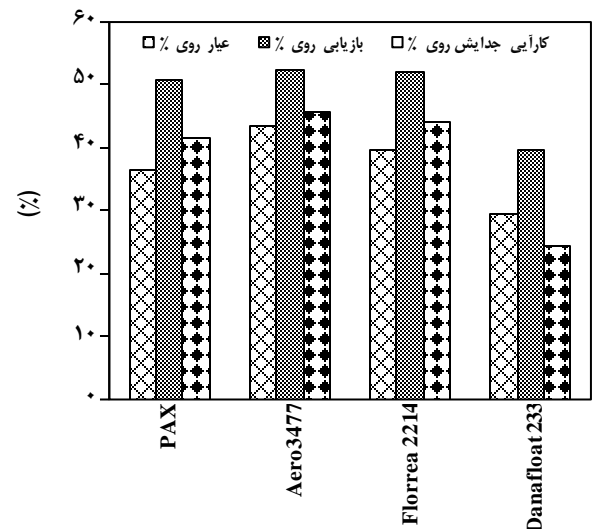
نتایج و بحث

اثر و مقدار کلکتور

بر اساس کار پژوهشی انجام گرفته بر روی نمونه‌ی باطله کم‌عیار معدن کوشک، گزارش شده بود که استفاده از کلکتور حتی مقادیر کم آن



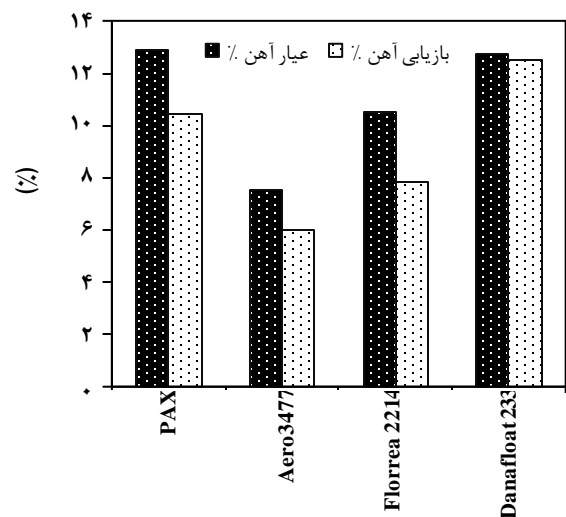
شکل ۷- تغییر عیار، بازبایی و کارایی جدایش روی در pH طبیعی پالپ با مقادیر مختلف کلکتور Aero 3477.



شکل ۵- تغییر عیار، بازبایی و کارایی جدایش روی با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای مختلف در pH طبیعی پالپ.

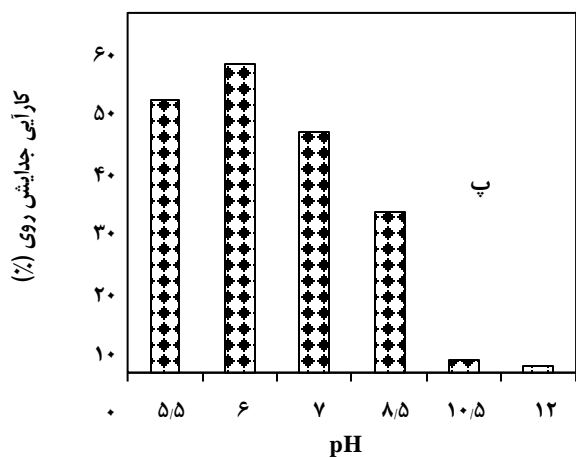
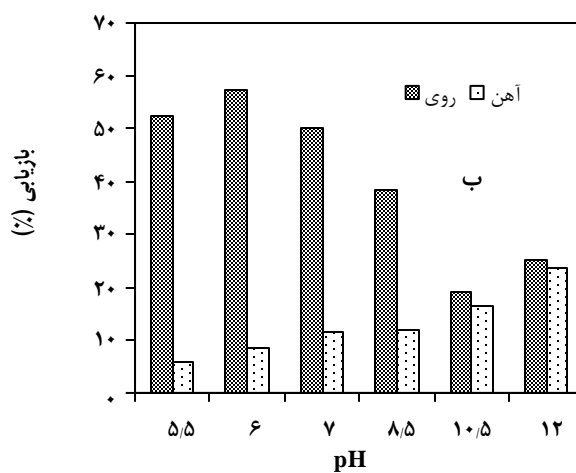
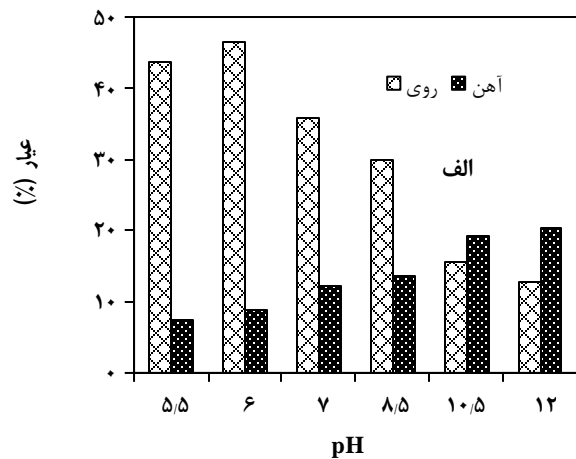
تأثیر میزان pH و نوع تنظیم‌کننده‌ی pH

برای بررسی تأثیر pH بر روی عیار و بازبایی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر، آزمایش‌های فلوتاسیون با ۱۵ گرم بر تن از کلکتور Aero 3477 در شرایط یکسان و در pHهای مختلف انجام شد که در این آزمایش‌ها از شیر آهک برای تنظیم pH استفاده شد. نتایج حاصل، نشان داد که بر خلاف انتظار، با قلیایی کردن محیط فلوتاسیون و افزایش pH تا بالای ۱۰/۵، پیریت شناور شده و از شناورشدگی اسفالریت کاسته شد به گونه‌ای که با افزایش pH پالپ از حالت طبیعی (۵/۵) تا ۱۲، پیریت به طور چشمگیری فعال و شناور شده است. در pH طبیعی تنها حدود ۶٪ پیریت شناور شده است، در حالی که با افزایش pH پالپ تا ۱۲، میزان شناور شدگی آن حدود ۳/۹ برابر افزایش یافته و به حدود ۲۳/۵٪ رسیده است. از طرفی در محیط‌های قلیایی (pH بالای ۸/۵) بازبایی روی نسبت به محیط اسیدی به شدت افت می‌کند به طوری که بیشترین عیار روی، بازبایی روی و کارایی جدایش روی در pH=6 به ترتیب ۴۶/۳۸٪، ۵۷/۳۸٪ و ۵۱/۶٪ حاصل شد. همچنین، در pHهای ۵/۵ و ۶ کمترین عیار آهن و شناورشدگی پیریت به دست آمد. کمترین کارایی جدایش روی در محیط‌های قلیایی در pHهای بالای ۷ بویژه در pH برابر ۱۰/۵ و ۱۲ به ترتیب حدود ۲٪ و ۱٪ به دست آمد. بر اساس مطالعه‌ها و پژوهش‌های انجام گرفته، یکی از روش‌های بازداشت ناخالصی پیریت در حضور سایر کانی‌های سولفیدی بارزش، استفاده از آهک و افزایش pH پالپ بالای ۱۰/۵ می‌باشد که در این شرایط به دلیل تشکیل فازهای آبنوست هیدروکسیدهای



شکل ۶- تغییر عیار و بازبایی آهن با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای مختلف در pH طبیعی پالپ.

همچنان که از شکل ۷ مشخص است، با افزایش مقلر کلکتور از ۱۵ گرم بر تن به ۲۰ گرم بر تن، عیار روی از ۴۳/۶۲٪ به ۴۰/۰۲٪ کاهش و بازبایی از ۵۲/۴۱٪ به ۵۶/۵۳٪ افزایش یافته. کارایی جدایش روی نیز تغییر چندانی نکرد؛ همچنین، با افزایش مقلر کلکتور به ۳۰ گرم بر تن، عیار روی، نسبت به مقلر ۱۵ گرم بر تن کلکتور، حدود ۸٪ کاهش ولی در مقابل، بازبایی حدود ۷٪ افزایش پیدا کرد. با افزایش مقلر کلکتور به ۴۰ گرم بر تن نیز عیار روی حدود ۱۹٪ کاهش و بازبایی روی حدود ۱۶٪ افزایش یافت. کارایی جدایش روی نیز نسبت به مقلر ۱۵ گرم بر تن کلکتور، حدود ۷٪ و نسبت به مقلر ۳۰ گرم بر تن کلکتور، حدود ۹٪ کاهش یافت.



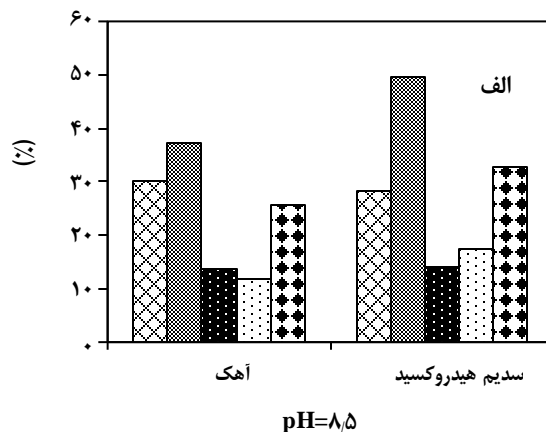
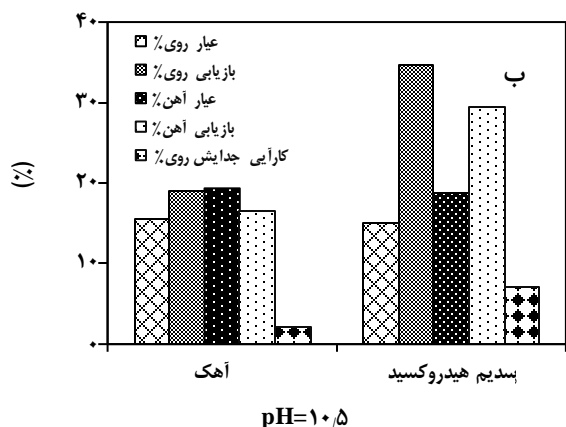
شکل ۸ - تغییر عیار روی و آهن، بازیابی روی و آهن و کارایی جدایش روی با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 در pH های مختلف؛ الف: عیار، ب: بازیابی، پ: کارایی جدایش روی.

آهن، ناپایداری لایه هیدروکسید تشکیل شده از کلکتور در pH بالای ۱۰/۵ و نیز اتصال یون‌های کلسیم ناشی از افزودن آهک بر روی سطح پیریت باعث بازداشت پیریت می‌شود [۴-۵، ۹]. ولی در این نمونه‌ی مورد مطالعه با توجه به نتایج به دست آمده و آنالیزهای صورت گرفته، رفتار عکس دیده شد.

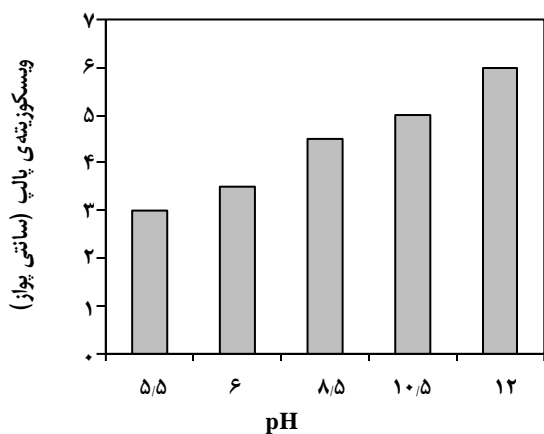
این احتمال داده شد که با افزایش pH با استفاده از آهک، اثر نامطلوب قلیایی کردن محیط فلوتاسیون، مربوط به یون‌های کلسیم باشد به همین دلیل، به منظور افزایش pH تا pH های ۸/۵ و ۱۰/۵ از سدیم هیدروکسید نیز استفاده و نتایج مقایسه شد. نتایج نشان داد که در pH=8.5 و با استفاده از تنظیم کننده‌ی سدیم هیدروکسید عیار روی و آهن در مرحله‌ی رافر نسبت به تنظیم کننده‌ی آهک، تغییر چندانی نمی‌کند ولی بازیابی روی و آهن در مرحله‌ی رافر به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۶٪ افزایش یافت و همچنین، کارایی جدایش روی حدود ۷٪ بهبود یافت. در pH=10.5 نیز با استفاده از تنظیم کننده‌ی سدیم هیدروکسید، عیار روی و آهن در مرحله‌ی رافر نسبت به تنظیم کننده‌ی آهک، تغییر چندانی نکرد ولی بازیابی روی و آهن در مرحله‌ی رافر به ترتیب حدود ۱۵٪ و ۱۳٪ افزایش یافت و کارایی جدایش روی نیز حدود ۵٪ افزایش پیدا کرد (شکل ۹). نتایج حاصل، نشان داد که در صورت استفاده از سدیم هیدروکسید به جای آهک، کارایی جدایش روی تا حدودی افزایش می‌یابد ولی با این حال، بازیابی روی و کارایی جدایش روی در محیط‌های قلیایی، همچنان بسیار پایین‌تر از محیط اسیدی است. همچنین، این احتمال داده شد که رفتار معکوس پیریت در pH های قلیایی نسبت به pH اسیدی، مربوط به نوع کلکتور باشد؛ بنابراین، آزمایش‌هایی با کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات در شرایط مشابه آزمایش‌های انجام شده با کلکتور Aero 3477 در pH های ۵/۵، ۶، ۸/۵، ۱۰/۵ و ۱۲ انجام شد.

نتایج نشان داد که در حضور کلکتور PAX نیز با افزایش pH، عیار روی، بازیابی روی و کارایی جدایش روی کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). بر خلاف کلکتور Aero 3477 در حضور کلکتور PAX، شناورشدگی پیریت در pH های قلیایی نسبت به pH اسیدی کاهش یافت که به احتمال زیاد، کاهش شناورشدگی پیریت در pH های قلیایی ناشی از تجزیه‌ی دی‌گزنوتوزن (عامل اصلی آبرانی) می‌باشد.

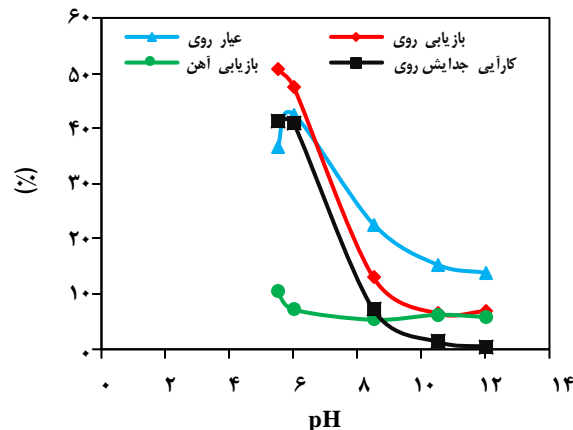
در طول آزمایش‌ها، دیده شد که به دلیل درصد بالای پیریت در نمونه‌ی مورد مطالعه که ویژگی اسیدی دارد؛ برای افزایش pH به مقلر تنظیم کننده‌ی pH بیشتری نیاز است که با مصرف تنظیم کننده‌ی pH افزایش pH، پالپ به صورت فزاینده‌ای چسبناک شده و ویسکوزیته‌ی پالپ افزایش می‌یابد و ویسکوزیته‌ی بالای پالپ، باعث عدم پراکندگی حباب‌های هوا در پالپ و نیز کاهش اتصال حباب-ذره در سیستم



شکل ۹- تغییر عیار، بازیابی روی و آهن، و کارایی جدایش روی با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 و تنظیم کننده‌های مختلف pH: الف: pH=8.5، ب: pH=10.5



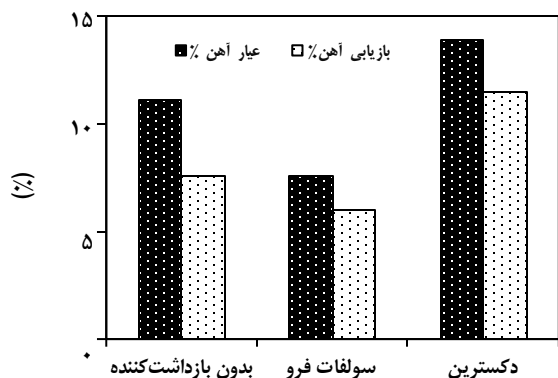
شکل ۱۱- تغییرات ویسکوزیته‌ی پالپ در pHهای مختلف.



شکل ۱۰- تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی و بازیابی آهن با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات در pHهای مختلف.

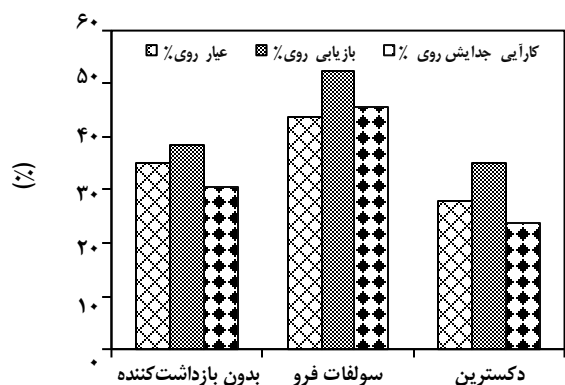
کانی‌های رسی تغییر یافته و با توجه به نوع رس و وضعیت قرارگیری آن، ویسکوزیته‌ی پالپ می‌تواند افزایش یابد [۱۸-۱۹]. این احتمال نیز داده می‌شود که کاهش شناورشدگی اسفالریت در pHهای قلیایی ناشی از تاثیر ژل‌پس بر روی سطح اسفالریت باشد کارهای پژوهشی انجام شده نیز، نشان می‌دهد که اسفالریت و ژل‌پس هر دو در pHهای قلیایی، بار سطحی منفی دارند، حضور یون‌های کلسیم، سولفات و نیز ژل‌پس می‌تواند باعث تغییر پتانسیل زتای اسفالریت شده و در سطح اسفالریت را پوشش داده و منجر به کاهش زاویه‌ی تماس و در نتیجه، آبرانی اسفالریت شود. همچنین، جذب یون‌های کلسیم در محیط قلیایی بر روی سطح اسفالریت با یون‌های مس رقابت کرده و مانع از جذب مناسب یون‌های مس بر روی سطح اسفالریت می‌شود که این امر

فلوتاسیون می‌شود [۱۶]. کارهای پژوهشی انجام شده بر روی کانی‌های مس و طلا نیز نشان داده است که افزایش ویسکوزیته‌ی پالپ، باعث کاهش شناورشدگی کانی‌های مس و طلا می‌شود [۱۷]. بنابراین، اندازه‌گیری ویسکوزیته‌ی مطلق پالپ در pHهای مختلف با استفاده از ویسکومتر چرخشی انجام شد که نتایج در شکل ۱۱، آورده شده است. با توجه به نتایج، می‌توان گفت که با افزایش pH، به تدریج ویسکوزیته‌ی پالپ افزایش می‌یابد؛ افزایش ویسکوزیته می‌تواند ناشی از وجود ژل‌پس یا کانی رسی مسکویت و ایلیت باشد که در آنالیز XRD نمونه، شناسایی شده‌اند. افزایش ویسکوزیته توسط کانی‌های رسی می‌تواند مربوط به قدرت جذب آب توسط برخی رس‌ها و نیز تغییرات بار سطحی و ساختار قرارگیری رس‌ها باشد. به طوری که با افزایش pH، پتانسیل سطح



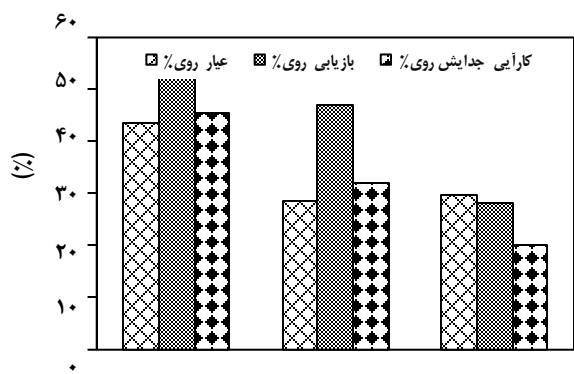
بازداشت کننده پیریت (۴۰۰ گرم بر تن)

شکل ۱۲- تغییر عیار و بازیابی آهن با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 و بازداشت کننده‌های مختلف پیریت در pH طبیعی پالپ.



بازداشت کننده پیریت (۴۰۰ گرم بر تن)

شکل ۱۳- تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 و بازداشت کننده‌های مختلف پیریت در pH طبیعی پالپ.



بدون پیش فلوتاسیون / بدون پیش فلوتاسیون با پیش فلوتاسیون
 ۱۰۰ گرم بر تن / ۵۰ گرم بر تن
 Aero 633 / Aero 633

شکل ۱۴ - تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 در pH طبیعی پالپ در شرایط با پیش فلوتاسیون و بدون پیش فلوتاسیون.

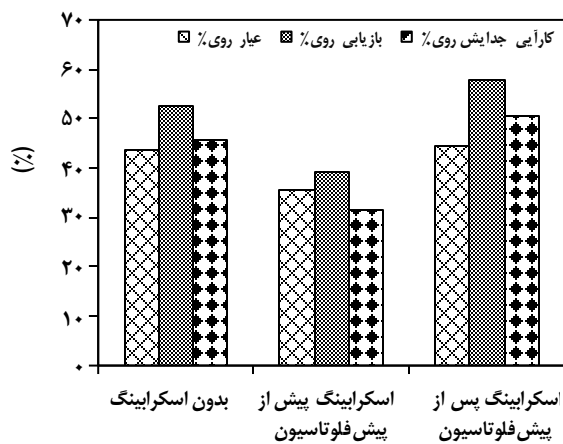
بازیابی اسفالریت را کاهش می‌دهد در واقع، در سطح اسفالریت بین ژپس، یون Cu^{2+} و کلکتور، جذب رقابتی وجود دارد که جذب ژپس در سطح اسفالریت مکان‌های احتمالی جذب یون Cu^{2+} و کلکتور را پوشش داده و باعث کاهش زاویه تماس، شناورشدگی اسفالریت و کاهش جدایش انتخابی در فرآیند فلوتاسیون می‌شود [۲۰، ۲۱].

تأثیر بازداشت کننده‌ی پیریت

سولفات فرو یکی از بازداشت کننده‌های معدنی پیریت می‌باشد. بر اساس کار پژوهشی انجام گرفته بر روی خوراک فلوتاسیون معدن کوشک، گزارش شده بود که در برخی شرایط، استفاده از سولفات فرو تأثیر چندانی در بازداشت پیریت ندارد و استفاده از آن به همراه سیانید سدیم مؤثر است [۸، ۲۲]. به همین منظور در چند آزمایش از سولفات فرو استفاده نشد نتایج موجود در شکل ۱۲ و شکل ۱۳، نشان می‌دهد که در pH طبیعی پالپ، در صورت استفاده نکردن از سولفات فرو، عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در کنسانتره‌ی روی به ترتیب حدود ۸/۵٪، ۱۴٪ و ۱۵٪ کاهش یافته و عیار آهن و بازیابی آهن در کنسانتره‌ی روی، افزایش می‌یابد همچنین، وقتی از ۴۰۰ گرم بر تن دکسترین به جای سولفات فرو برای بازداشت پیریت استفاده شد عیار و بازیابی آهن حتی نسبت به حالت بدون بازداشت کننده‌ی پیریت، افزایش یافت و عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی، افت کرد که احتمالاً به دلیل مقدار مصرف زیاد دکسترین می‌باشد که باعث بازداشت اسفالریت نیز شده است؛ بازداشت کننده‌های آلی، مانند نشاسته و دکسترین در محلول‌های آبی یونیزه نمی‌شوند بلکه به صورت کلوییدی حضور دارند. ذره‌های کلوییدی نشاسته و دکسترین ممکن است، سطح کانی را پوشانند و از شناور شدن آن‌ها جلوگیری کنند هنگامی که مقدار زیادی دکسترین و یا نشاسته به محلول اضافه شود، تمام کانی‌ها بازداشت می‌شوند [۲۳].

تأثیر پیش فلوتاسیون و شستشوی مجدد بخش شناور شده

با توجه به این که در مرحله‌ی شیل گیری فلوتاسیون آزمایشگاهی، ناگزیر حدود ۱۳٪ هدر روی فلز روی وجود داشته به گونه‌ای که در سرریز پیش فلوتاسیون، عیار روی تا ۲۰٪ نیز می‌رسید سعی شد به جای مرحله‌ی پیش فلوتاسیون، از بازداشت کننده‌ی Aero 633 استفاده شود. ولی با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۴، حذف مرحله پیش فلوتاسیون و استفاده از بازداشت کننده‌ی Aero 633، تأثیر منفی در شناورسازی اسفالریت را نشان داد، به طوری که با افزایش مقدار Aero 633 بازداشت اسفالریت بیشتر شده و افت بیشتر بازیابی روی



شکل ۱۵ - تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 در pH طبیعی پالپ، در شرایط بدون اسکرابینگ اسیدی، اسکرابینگ اسیدی پیش از مرحله‌ی پیش فلوتاسیون و بعد از مرحله‌ی پیش فلوتاسیون.

بر بازیابی روی و کارایی جدایش روی دارد و در pH طبیعی پالپ، باعث افزایش حدود ۵٪ بازیابی اسفالریت و حدود ۵٪ کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر می‌شود (شکل ۱۵).

نتیجه‌گیری

نمونه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش از باطله‌های پرعیار دیو شده در معدن سرب و روی کوشک یزد تهیه شد و امکان فرآوری روی از این باطله‌ها به روش فلوتاسیون بررسی شد. میزان عناصر سرب روی و آهن موجود در نمونه‌های تهیه شده از این باطله‌ها به ترتیب ۳/۱۲٪، ۱۲/۷٪ و ۲۰/۰۲٪ اندازه‌گیری شد. با توجه به ویژگی‌های نمونه‌ی مورد مطالعه و به دلیل وجود درصد بسیار بالای پیریت و نیز حضور کربن آلی، شناورسازی انتخابی اسفالریت از پیریت مورد بررسی قرار گرفت؛ به همین منظور، تأثیر انواع کلکتورها با خاصیت انتخابی بالا، میزان pH، نوع تنظیم‌کننده‌ی pH، نوع بازداشت‌کننده‌ی پیریت، مقدار کلکتور، سولفات فرو و همچنین، تأثیر پیش فلوتاسیون و تأثیر فرآیند اسکرابینگ اسیدی خوراک فلوتاسیون قبل و بعد از مرحله‌ی شیل‌گیری بر روی عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر، مورد بررسی قرار گرفت و در این ارتباط آزمایش‌های مختلفی برای تعیین اثر پارامترها صورت پذیرفت که نتایج به صورت زیر ارائه می‌شود:

جدول ۱- نتایج حاصل از کلینر سرریز پیش فلوتاسیون.

محصول	بازیابی وزنی %	عیار روی %	بازیابی روی %
سرریز پیش فلوتاسیون	۱۰۰	۱۹/۴	۱۰۰
سرریز کلینر پیش فلوتاسیون	۳۵/۶۶	۲۴/۴۶	۴۴/۹۷
تهریز کلینر پیش فلوتاسیون	۶۴/۳۴	۱۶/۵۹	۵۵/۰۳

مشاهده شد. بنابراین، در ادامه، انجام کلینر بخش سرریز پیش فلوتاسیون با هدف برگرداندن روی از سرریز پیش فلوتاسیون به مدار فلوتاسیون بررسی شد. نتایج به دست آمده در جدول ۱، نشان می‌دهد که با کلینر کردن سرریز پیش فلوتاسیون حدود ۵۵٪ از فلز روی شناور شده در بخش سرریز پیش فلوتاسیون را می‌توان به مدار فلوتاسیون برگشت داد و از هدرروی آن به باطله جلوگیری کرد.

تأثیر فرآیند اسکرابینگ اسیدی خوراک فلوتاسیون

با توجه به دانه‌بندی، درصد ذرات ریز و کربن آلی، این احتمال داده شد که اسکرابینگ و حذف ذرات چسبیده به ذرات درشت می‌تواند مؤثر باشد؛ به منظور بررسی تأثیر اسکرابینگ اسیدی خوراک فلوتاسیون بر روی عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی، آزمایشی در شرایط یکسان با آزمایش پایه انجام شد. با این تفاوت که خوراک فلوتاسیون، قبل از مرحله‌ی پیش فلوتاسیون به مدت ۲۰ دقیقه و با استفاده از ۲۰۰ گرم بر تن سولفوریک اسید و پره‌ی مخصوص اسکرابینگ در سلول ۲ لیتری با درصد وزنی جامد ۵۰٪، شستشوی سطحی شد. پس از فرآیند اسکرابینگ، عیار روی در مرحله‌ی پیش فلوتاسیون نسبت به آزمایش پایه که بدون فرآیند اسکرابینگ انجام شده بود، به ترتیب از ۱۵/۲۵٪ به ۳۴/۹٪ و بازیابی از ۹/۰۹٪ به ۳۱/۸۸٪ افزایش یافت.

بنابراین، به دلیل افزایش دررفت روی در مرحله‌ی پیش فلوتاسیون در اثر اسکرابینگ، عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر در شرایط اسکرابینگ خوراک به ترتیب ۸٪، ۱۳٪ و ۱۴٪ کاهش یافت (شکل ۱۵). به نظر می‌رسد که اسکرابینگ قبل از مرحله‌ی پیش فلوتاسیون باعث زدودن آلودگی و نرمه‌ها از سطح اسفالریت و فعال شدن آن شده است؛ بنابراین، قبل از مرحله‌ی شیل‌گیری، استفاده از اسکرابینگ مناسب نمی‌باشد. با توجه به این نتیجه‌ی به دست آمده، احتمال داده شد که فرآیند اسکرابینگ پس از مرحله‌ی پیش فلوتاسیون، مؤثر واقع شود؛ به همین منظور در آزمایش دیگر، پس از مرحله‌ی پیش فلوتاسیون، ته‌ریز پیش فلوتاسیون، شستشوی سطحی شد؛ نتایج نشان داد که فرآیند اسکرابینگ باطله‌ی پیش فلوتاسیون، تأثیر مطلوبی

• فرآیند اسکرابینگ باطله‌ی پیش‌فلوتاسیون، تأثیر مطلوبی بر بازیابی روی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر داشت و باعث افزایش بازیابی و کارایی جدایش روی شد.

• آزمایش‌های مقلمانی انجام گرفته بر روی باطله‌ی پرعبار انباشت شده در معدن کوشک نشان می‌دهد که امکان جدایش انتخابی اسفالریت از سایر کانی‌های گالنگ (عمدتاً پیریت) و تهیه کنسانتره‌ی روی مناسب در مرحله رافر وجود دارد. البته انجام آزمایش‌های تکمیلی و کلینر و نیز آزمایش‌های نیمه‌صنعتی برای تولید کنسانتره در مقیاس صنعتی نیاز است.

قدردانی

از مجموعه‌ی محترم شرکت معادن بافق به خاطر حمایت‌ها و همکاری، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۳

• در فلوتاسیون آزمایشگاهی با استفاده از کلکتورهای PAX (پتاسیم آمیل گزنات)، Aero 3477 و Danafloat 2214 و Florrea در pH طبیعی پالپ، بیشترین عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی با کلکتور Aero 3477 به دست آمد. نتایج حاصل از کلکتور Florrea 2214 نیز از نظر عیار و بازیابی روی نزدیک به کلکتور Aero 3477 نشان داد، با این تفاوت که کلکتور Aero 3477 نسبت به پیریت انتخابی‌تر عمل نمود.

• در حضور کلکتورهای PAX و Aero 3477 با افزایش pH و قلیایی شدن محیط فلوتاسیون، گرانروی پالپ به طور چشمگیری افزایش یافت، به گونه‌ای که عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر کاهش یافت.

• با کلینر کردن سرریز پیش‌فلوتاسیون، حدود ۵۵٪ از روی دررفتی به بخش سرریز پیش‌فلوتاسیون، برگشت داده شد و از هدرروی آن جلوگیری شد.

مراجع

- [1] Bulatovic S. M., "Handbook of Flotation Reagents-Chemistry, Theory and Practice- Flotation of Sulfide Ores", Elsevier Science & Technology, **1**: (2007).
- [2] Gredelj S., Zanin M., Grano S.R., Selective Flotation of Carbon in the Pb-Zn Carbonaceous Sulfide Ores of Century Mine, Zinifex, Minerals Engineering, **22**: 279-288 (2009).
- [3] Basilio C.I., Kartio I.J., Yoon R. H., Lead Activation of Sphalerite During Galena Flotation, Minerals Engineering, **9**(8): 869-879 (1996).
- [4] Boulton A., Formasier D., Ralston, J., Depression of Iron Sulphide Flotation in Zinc Roughers, Minerals Engineering, **14**(9): 1067-1079 (2001).
- [5] Mu Y., Peng Y., Lauter R.A., The Depression of Pyrite in Selective Flotation by Different Reagent System- A Literature Review, Minerals Engineering, **96-97**: 143-156 (2016).
- [6] Chandra A.P., Gerson A.R., The Mechanisms of Pyrite Oxidation and Leaching: A Fundamental Perspective, Science Reports, **6**: 293-315 (2010).
- [7] López Valdivieso A., Celedón Cervantes T., Song S., Robledo Cabrera A., Laskowski J.S., Dextrin as a Non-Toxic Depressant For Pyrite in Flotation with Xanthates as Collector, Minerals Engineering, **17**: 1001-1006 (2004).
- [8] Bulatovic S. M., "Handbook of Flotation Reagents-Chemistry, Theory and Practice- Flotation of Sulfide Ores", Vol. 1, pp.153-184 (2007).
- [9] Klassen V.I., Mokrousov V. A., "An Introduction to the Theory of Flotation", Butterworth and Co. Ltd., London (1963).

- [10] Guo B., Peng Y., Espinosa-Gomez R., [Cyanide Chemistry and its Effect on Mineral Flotation](#), *Minerals Engineering*, **66-68**: 25-32 (2014).
- [11] Khmeleva T.N., Skinner W., Beattie D.A., Georgiev T.V., [The Effect of Sulphide on the Xanthate-Induced Flotation of Copper-Activated Pyrite](#), *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **36**: 185-195 (2002).
- [12] Tapley B., Yan D., [The Selective Flotation of Arsenopyrite From Pyrite](#), *Minerals Engineering*, **16**: 1217–1220 (2003).
- [13] Pencina-Trevinno E.T., Uribe-Salas A., Nava-Alonso F., Perez-Garibay R., [On the Sodium-Diisobutyle Dithiophosphate \(Aerophine 3418A\) Interaction with Activated and Unactivated Galena and Pyrite](#), *Int. J. Miner. Process*, **71**: 201-217 (2003).
- [14] Cytec Industries Inc., "Mining Chemicals Handbook", Revised Edition, Cytec, (2002).
- [۱۵] رجائی م.م.؛ "مطالعه و بررسی بازیابی روی از باطله‌های کارخانه‌ی فرآوری سرب و روی کوشک"، پروژه‌ی کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، (۱۳۹۰).
- [16] Patra P., Nagaraj D.R., Somasundaran P., ["Impact of Pulp Rheology on Selective Recovery of Value Minerals from Ores"](#), *Proceedings of the XI International seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2010)*, pp. 1223-1231 (2010).
- [17] Zhang M., Peng Y., [Effect of Clay Minerals on Pulp Rheology and the Flotation of Copper and Gold Minerals](#), *Minerals Engineering*, **70**: 8-13 (2015).
- [18] Ndlovu B., Becker M., Forbes E., Deglon D., Franzidis J.P., [The Influence of Phyllosilicate Mineralogy on the Rheology of Mineral Slurries](#), *Minerals Engineering*, **24**: 1314–1322 (2011).
- [19] Luckham P.F., Rossi S., [The Colloidal and Rheological Properties of Bentonite Suspensions](#), *Adv. Colloid Interf. Sci.*, **82** (1–3): 43–92 (1999).
- [20] Davila-Pulido G.I., Uribe-Salas, A., [Effect of Calcium, Sulphate and Gypsum on Copper-Activated and Non-Activated Sphalerite Surface Properties](#), *Minerals Engineering*, **55**: 147-153 (2014).
- [21] Deng M., Liu Q., Xu Zh., [Impact of Gypsum Supersaturated Water on the Uptake of Copper and Xanthate on Sphalerite](#), *Minerals Engineering*, **49**: 165-171 (2013).
- [۲۲] حیدری ق.؛ "بهینه‌سازی مدار شناورسازی کارخانه‌ی فرآوری سرب و روی کوشک"، پروژه‌ی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی سهند تبریز، (۱۳۹۵).
- [23] Bogusz E.J., ["The Mechanism of the Depressant Action of Dextrin on Pyrite"](#), M.Sc. Thesis, McGill University (1995).