

# جدایش اسفالریت از باطله‌های معدن سرب و روی کوشک به روش شناورسازی

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 دیو شده در معدن سرب و روی کوشک به روش شناورسازی، بررسی شد. دو مشخصه‌ی بارز این نمونه افزون 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 فرایند شناورسازی دارای اهمیت بود. نتیجه‌های به دست آمده از شناورسازی آزمایشگاهی با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای گوناگون PAX، Aero 3477 و Florrea 2214 و Danafloat 233 در pH طبیعی، نشان داد که در مرحله‌ی رافر، بیش‌ترین عیار و بازیابی روی با کلکتور Aero 3477 به دست آمد که در این شرایط کم‌ترین عیار و بازیابی آهن در کنسانتره روی به دست آمد. 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. نتیجه‌ها نشان داد که برخلاف کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات، با کلکتور Aero 3477 در pH های قلیایی و بالای ۱۰/۵ پیریت نه تنها بازداشت نشد بلکه نسبت به pH های اسیدی، فعال شد. در pH های قلیایی، گرانیروی 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 شناورسازی باشد.

**کلمات کلیدی:** شناورسازی؛ باطله؛ اسفالریت؛ پیریت؛ نوع کلکتور.

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

## مقدمه

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

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

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

\*عهدہ دار مکاتبات

فراورده‌های تشکیل شده در سطح پیریت در اثر فعال شدن آن توسط یون‌های  $\text{Cu}^{2+}$  هستند [۸].

مواد شیمیایی گوناگون از جمله سولفات فرو، آهنک، سیانید (به دلیل مشکلات زیست‌محیطی، استفاده از سیانید محدود شده است)، گونه‌های سولفوراکسی (سولفیت  $(\text{SO}_3^{2-})$ ، بی‌سولفیت  $(\text{HSO}_3^-)$ ، متابی‌سولفیت  $(\text{S}_2\text{O}_5^{2-})$ ، گاز گوگرد دی‌اکسید  $(\text{SO}_2)$ ، پتاسیم پرمنگنات و غیره به منظور بازداشت پیریت و کاهش شناور شدن پیریت استفاده می‌شود [۸-۱۲]. همچنین، کلکتور گزنتات، نمی‌تواند جدایش انتخابی مورد نظر را در سامانه شناورسازی پیچیده‌ی شامل پیریت تأمین کند؛ برای افزایش انتخابی بودن شناورسازی در چنین سامانه‌ای، کلکتورهایی مانند دی‌تیوفسفات‌ها (DTP)، دی‌تیوفسینات‌ها (DTPI)، تیونوکربامات‌ها (TC) و دی‌تیوکربامات‌ها (DTC) به تنهایی یا به صورت ترکیب با گزنتات استفاده می‌شوند. این کلکتورها به طور معمول در شناورسازی کانی‌های سولفیدی استفاده می‌شوند و انتخابی بودن در برابر سولفیدهای آهن را افزایش می‌دهند و قدرت جمع‌آوری بالایی نسبت به گزنتات دارند [۵]. این بازداشت‌کننده‌ها معرف‌های کی‌لیت‌سازی هستند که در ساختار خود، اتم‌هایی با تمایل شیمیایی بیش‌تر به سمت یون‌های فلزی خاص را دارند که انتخابی بودن بالایی آن‌ها را سبب می‌شود [۵، ۱۳].

پرکاربردترین کلکتورها در شناورسازی کانی‌های سولفیدی روی، کلکتورهای Sodium Aero float 211، Aero float 4037 و Aero 3477 و Dana float 233 هستند و به صورت ترکیب با گزنتات‌ها به عنوان کلکتور کمکی، بازیابی بیشینه با جدایش انتخابی مورد نظر را فراهم می‌کنند [۱۴].

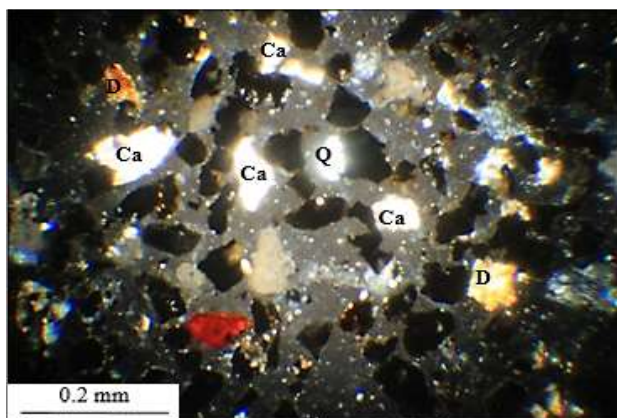
در این مطالعه، با توجه به مشخصه‌های نمونه‌ی مورد مطالعه و به دلیل وجود درصد بسیار بالایی پیریت و نیز حضور کربن، شناورسازی انتخابی اسفالریت از پیریت مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ به همین منظور تأثیر انواع کلکتورها با خاصیت انتخابی بالا، میزان pH، نوع تنظیم‌کننده‌ی pH، نوع بازداشت‌کننده‌ی پیریت، مقدار کلکتور،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

### بخش تجربی

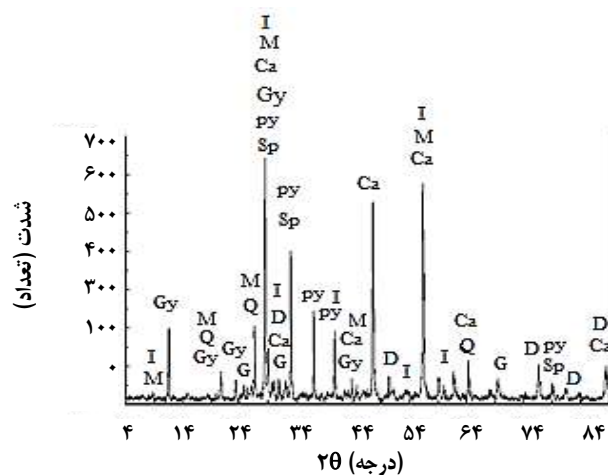
نمونه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش از باطله‌های پرعیار دیو شده در معدن سرب و روی کوشک یزد، با وزن تقریبی ۲۰۰ کیلوگرم تهیه شد.

معدن سرب و روی کوشک یکی از معدن‌های مهم سولفیدی کشور می‌باشد که بیش از ۴۰ سال از فعالیت آن می‌گذرد و از جمله معدن‌های است که فلزهای باارزش آن در شیل‌های سیاه و پیریت قرار دارند و در مرحله‌ی اولیه‌ی شناورسازی با افزودن گازوئیل و کف‌ساز، کربن آن حذف می‌شود. این بخش شناور شده، دارای مقدارهای چشمگیری 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 کم عیار شدن کانه‌های آن، باطله‌های یاد شده 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 مقدارهای بالای پیریت به همراه کانی‌های باارزش اسفالریت، فرآوری و تولید فراورده‌های پایانی، 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 مقدارهای مناسب، بسیار مهم است که در ادامه به انواع بازداشت‌کننده‌های پیریت و کلکتورها پرداخته خواهد شد. انتخابی بودن شناورسازی، امری مهم و ضروری است [۳]. یکی از مشکل‌های عمده در مدارهای شناورسازی، راه‌یابی ناخواسته‌ی مقدار زیادی از کانی‌های سولفیدی آهن به کنسانتره می‌باشد. پیریت با فرمول شیمیایی  $\text{FeS}_2$  فراوان‌ترین کانی سولفیدی آهن است که به طور معمول با کانی‌های باارزش مانند اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، طلا و زغال‌سنگ همراه بوده و انتخابی بودن شناورسازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیریت، اصلی‌ترین کانی مزاحم در شناورسازی 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 [۴-۶] و مقابله با آن در شناورسازی انتخابی، یک مسئله مهم است؛ چون به علت آبرانی بالا یا شناور شدن توسط کلکتور به سادگی به کنسانتره‌ی شناورسازی، انتقال می‌یابد [۵]. حضور آن در کنسانتره، عیار کنسانتره را کاهش داده و ارزش اقتصادی آن را پایین می‌آورد [۵، ۷]. همچنین، یون‌های فلزی مانند  $\text{Cu}^{2+}$  و  $\text{Pb}^{2+}$  با جذب در سطح پیریت، باعث فعال شدن آن می‌شوند.  $\text{CuS}_2$  یا  $(\text{CuFe})\text{S}_2$  به همراه هیدروکسید  $\text{Cu}^{2+}$  (که با هیدروکسید فریک به دست آمده از اکسایش سطح پیریت، واکنش داده است)، از جمله

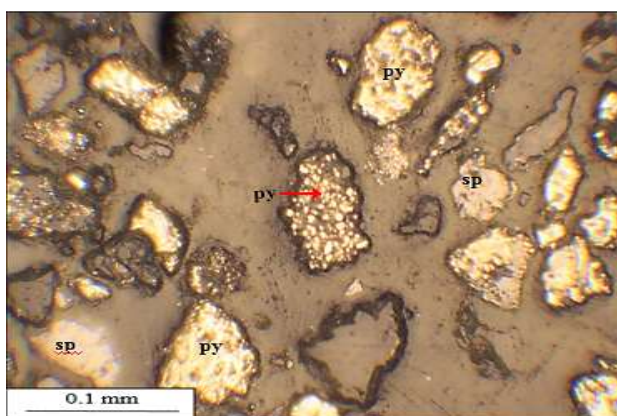


شکل ۲- نمایی از تیغی نازک بازه‌ی اندازه ۷۴+۱۰۵- میکرون.



Sp: Sphalerite	D: Dolomite
py: pyrite	M: muscovite
Gy: Gypsum	I: Illite
G: Galena	Ca: Calcite
Q: Quartz	

شکل ۱- طیف XRD نمونه‌ی باطله‌ی معدن کوشک.



شکل ۳- نمایی از مقطع صیقلی بازه‌ی اندازه ۷۴+۱۰۵- میکرون.

در شکل ۲، نمایی از تیغی نازک بازه‌ی اندازه ۷۴+۱۰۵- میکرون، آورده شده است. قطعه‌های سیاه‌رنگ، کانی‌های فلزی و قطعه‌های نیمه‌شفاف به احتمال زیاد، کانی‌های گانگ و قطعه‌های شفاف که به طور عمده به رنگ بژ دیده 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، ژیپس و کانی‌های رسی می‌باشد.

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 ذره‌های 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 دیده می‌شود. اندازه ذره‌ها، بسیار ریز بوده و کانی‌ها بیش‌تر به فرم آزاد هستند. گالن با مقدار جزئی به طور عمده به صورت ذره‌های ریز و به صورت آزاد دیده می‌شود. در شکل ۳، نمایی از مقطع صیقلی بازه اندازه ۷۴+۱۰۵- میکرون، آورده شده است.

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. سپس، مقداری نمونه‌ی معرف، برای تعیین توزیع دانه‌بندی با استفاده از تجزیه‌ی سرنده‌ی به روش تر مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌های تجزیه‌ی سرنده‌ی تر دلالت بر آن داشت که حدود ۷۱٪ ذره‌های ریزتر از ۳۷ میکرون می‌باشند. ذره‌های زیر ۳۷ میکرون نیز با استفاده از بشر ته‌نشینی دانه‌بندی شدند که حدود ۵۳٪ ذره‌های زیر ۳۷ در اندازه ریزتر از ۱۱ میکرون قرار گرفتند. سرانجام با محاسبه‌ی دانه‌بندی کل باطله،  $d_{80}$  ذره‌ها حدود ۶۳ میکرون به دست آمد. برای انجام آنالیزهای XRD، جذب اتمی (AAS) و طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی (ICP-MS)، مقداری نمونه‌ی معرف توسط آسیای گلوله‌ای خرد شد تا به اندازه زیر ۷۵ میکرون برسد. با توجه به نتیجه‌های آنالیز XRD کیفی، پیریت، اسفالریت و ژیپس 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 مطالعه‌های کانی‌شناسی، پس از تجزیه‌ی سرنده‌ی به روش تر، از فراکسیون‌های ۱۰۵+۱۴۹-، ۷۴+۱۰۵-، ۵۳+۷۴- و ۳۷- میکرون که درصد بیش‌تری از نمونه را تشکیل می‌دادند، مقطع‌های صیقلی و همچنین از فراکسیون ۷۴+۱۰۵- میکرون، تیغی نازک تهیه شد.

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 گازوئیل و ۲۰ گرم بر تن MIBC و آماده‌سازی به مدت ۲ دقیقه
افزودن آب و رساندن درصد وزنی جامد پالپ به ۳۰٪
حذف مواد کربن‌دار با استفاده از پیش‌شناورسازی (مرحله‌ی شیل-گیری به مدت ۵ دقیقه)
تنظیم 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- مرحله‌های انجام آزمون‌های شناورسازی.

جدایش روی به عنوان مبنایی بر انتخابی بودن در شرایط مختلف آزمایش‌ها استفاده شد.

## نتیجه‌ها 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 کمی آن (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 مشاهده‌ها آزمایش‌های شناورسازی از مقدارهای پایین کلکتور استفاده شد. نتیجه‌های به دست آمده از شناورسازی آزمایشگاهی در pH طبیعی پالپ (۵/۵) با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای گوناگون در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده است. همان‌گونه که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود، بیش‌ترین عیار روی (۴۳/۸۲٪) و بیش‌ترین بازیابی (۵۲/۴۱٪) و کارایی جدایش روی (۴۵/۶۴٪) با ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 به دست آمد. از سویی با توجه به شکل ۶ کم‌ترین عیار و بازیابی آهن در کنسانتره روی با کلکتور Aero 3477 به ترتیب

میزان عنصرهای 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 جفت‌شده‌ی القایی (ICP-MS) به ترتیب ۳/۲۹٪، ۱۳/۰۵٪ و ۲۰/۲۲٪ و همچنین با استفاده از این روش، میزان عنصرهای نقره، مس، نیکل و کبالت به ترتیب ۰/۸ ppm، ۷۳۴ ppm، ۳۲ ppm و ۶ ppm اندازه‌گیری شد.

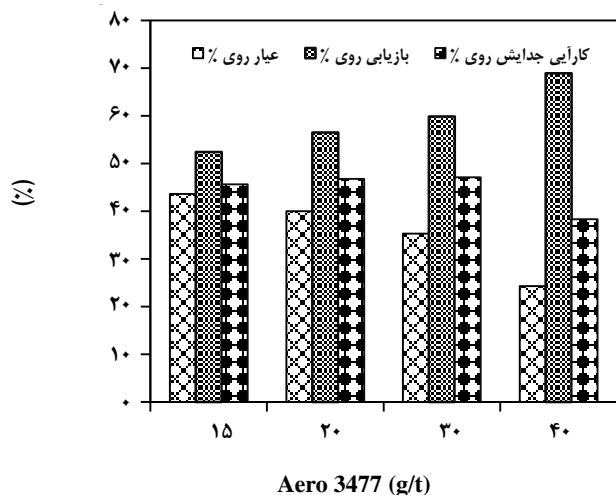
آزمایش‌های شناورسازی رافر در سلول ۴ لیتری توسط ماشین شناورسازی دنور با دور موتور ۱۳۷۰ دور در دقیقه و با درصد وزنی جامد ۳۰٪ انجام شد و به منظور حذف مواد کربن‌دار، یک مرحله پیش‌شناورسازی مورد استفاده قرار گرفت. در این سری آزمایش‌ها از انواع گوناگون بازداشت کننده مانند PAX (پتاسیم آمیل گزنات)، Aero 3477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

مرحله‌های کلی انجام آزمون‌های شناورسازی در شکل ۴، آورده شده است. برای اندازه‌گیری گرانروی مطلق پالپ در pH‌های گوناگون نیز از دستگاه Rotary Viscometer مدل ZNN-D6 استفاده شد.

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

به‌منظور کاهش دررفت اسفالریت در بخش سرریز پیش‌شناورسازی، 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 گازوئیل 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 نتیجه‌های به دست آمده از آن‌ها بر روی عیار، بازیابی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از کارایی

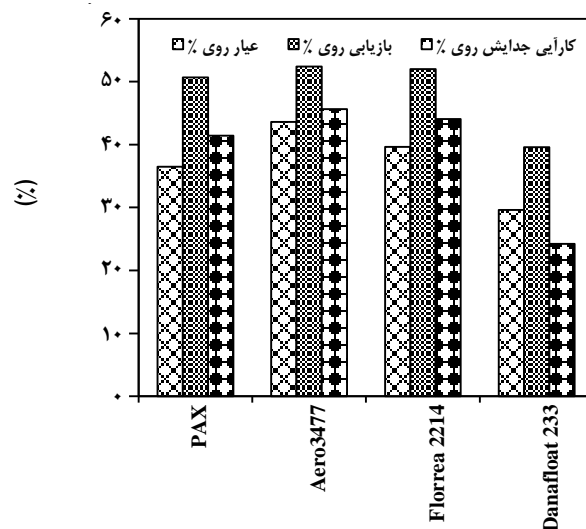


شکل ۷ - تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در pH طبیعی پالپ با مقدارهای مختلف کلکتور Aero 3477.

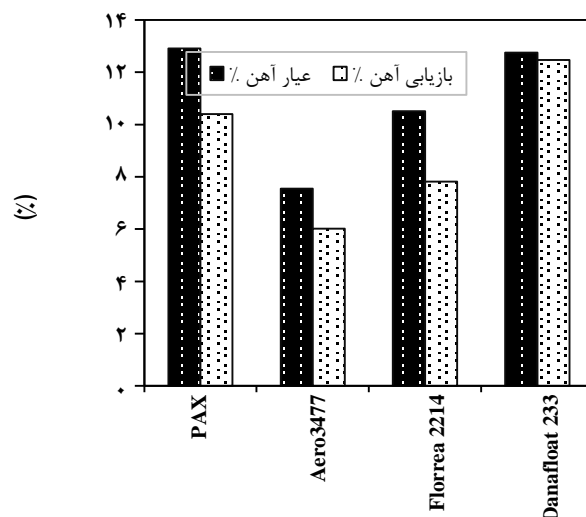
همچنان که از شکل ۷ مشخص است، با افزایش مقدار کلکتور از ۱۵ گرم بر تن به ۲۰ گرم بر تن، عیار روی از ۴۳/۶۲٪ به ۴۰/۰۲٪ کاهش و بازیابی از ۵۲/۴۱٪ به ۵۶/۵۳٪ افزایش یافت، کارایی جدایش روی نیز تغییر چندانی نکرد؛ همچنین با افزایش مقدار کلکتور به ۳۰ گرم بر تن، عیار روی نسبت به مقدار ۱۵ گرم بر تن کلکتور، حدود ۸٪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

#### تأثیر میزان pH و نوع تنظیم‌کننده pH

برای بررسی تأثیر pH بر روی عیار و بازیابی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر، آزمایش‌های شناورسازی با ۱۵ گرم بر تن از کلکتور Aero 3477 در شرایط یکسان و در pHهای گوناگون انجام شد که در این آزمایش‌ها از شیر آهک برای تنظیم pH استفاده شد. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که برخلاف انتظار با قلیایی کردن محیط شناورسازی 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.



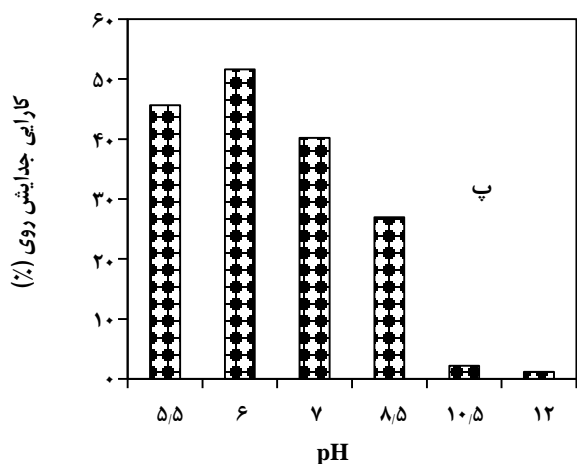
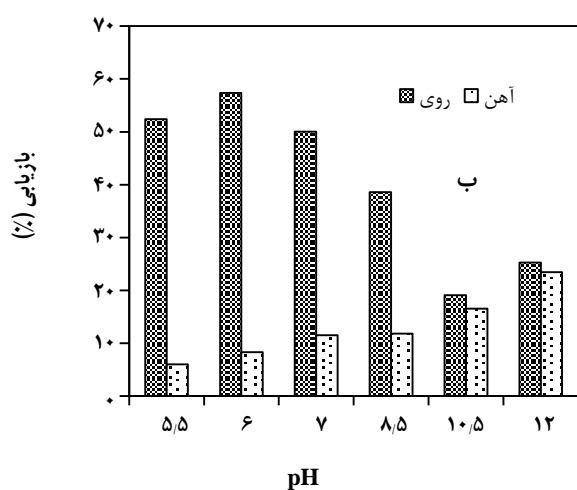
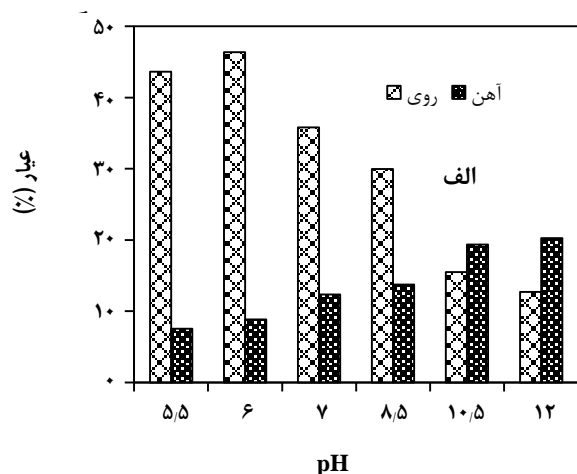
شکل ۸ - تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای گوناگون در pH طبیعی پالپ.



شکل ۹ - تغییر عیار و بازیابی آهن با ۱۵ گرم بر تن از کلکتورهای گوناگون در pH طبیعی پالپ.

۷/۵۵٪ و ۶/۰۱٪ به دست آمد. نتیجه‌های به دست آمده از کلکتور Florrea 2214 نیز از نظر بازیابی روی، نزدیک به کلکتور Aero 3477 به دست آمد ولی عیار روی و کارایی جدایش به نسبت پایین تری در مقایسه با کلکتور Aero 3477 را نشان داد. از سویی کم‌ترین عیار و بازیابی روی با بازداشت کننده Danafloat 233 به ترتیب ۲۹/۶۴٪ و ۳۹/۵۷٪ به دست آمد.

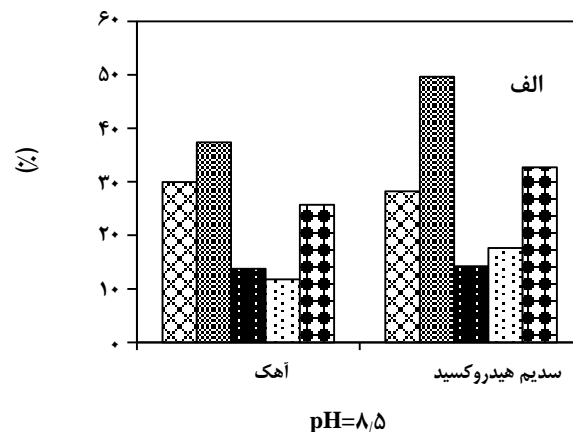
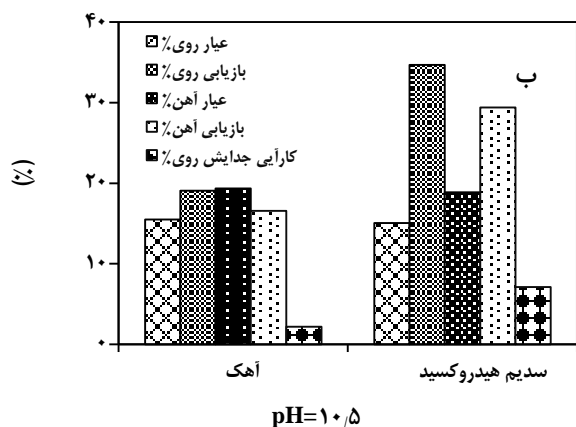
تأثیر مقدار کلکتور Aero 3477 بر روی عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در pH طبیعی پالپ، بررسی شد که نتیجه‌های تغییر مقدار این کلکتورها در شکل ۷، نشان داده شده است.



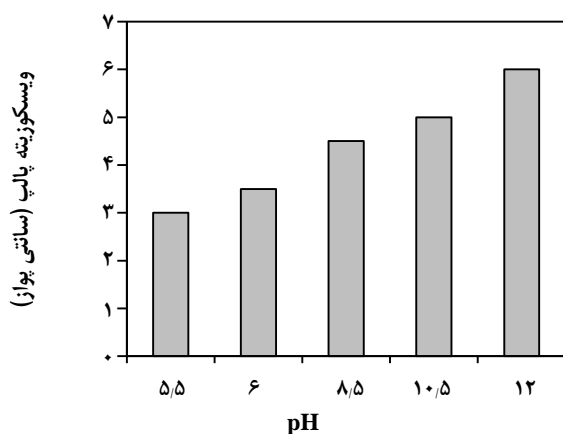
شکل ۸ - تغییر عیار روی و آهن، بازیابی روی و آهن و کارایی جدایش روی با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور Aero 3477 در pH های گوناگون؛ الف: عیار، ب: بازیابی، پ: کارایی جدایش روی.

از سویی در محیط‌های قلیایی (pH بالای ۸/۵) بازیابی روی نسبت به محیط اسیدی به شدت افت می‌کند. به طوری که بیش‌ترین عیار روی، بازیابی روی و کارایی جدایش روی در pH=6 به ترتیب ۴۶/۳۸٪، ۵۷/۳۸٪ و ۵۱/۶٪ به دست آمد. همچنین در pH های ۵/۵ و ۶ کم‌ترین عیار آهن و شناورشدگی پیریت به دست آمد. کمترین کارایی جدایش روی در محیط‌های بازی در pH های بالای ۷ به ویژه در pH برابر ۱۰/۵ و ۱۲ به ترتیب حدود ۲٪ و ۱٪ به دست آمد. براساس مطالعه‌ها و پژوهش‌های انجام گرفته، یکی از روش‌های بازداشت ناخالصی پیریت در حضور سایر کانی‌های سولفیدی با ارزش، استفاده از آهک و افزایش pH پالپ بالای ۱۰/۵ می‌باشد که در این شرایط به دلیل تشکیل فازهای آبدوست هیدروکسیدهای آهن، ناپایداری لایه هیدروفوب 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 [۴-۵۹]. ولی در این نمونه‌ی مورد مطالعه با توجه به نتیجه‌های به دست آمده و آنالیزهای صورت گرفته، رفتار عکس دیده شد.

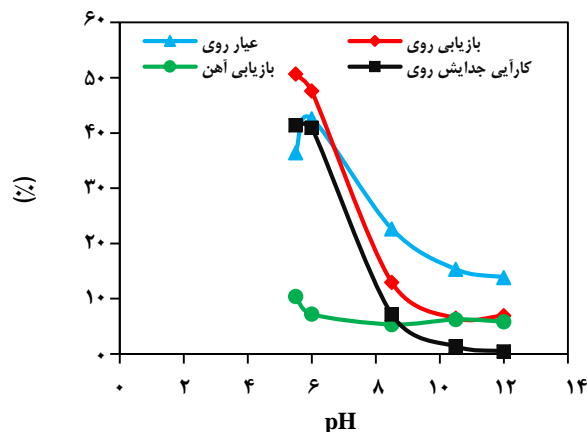
این احتمال داده شد که با افزایش pH با استفاده از آهک، اثر نامطلوب قلیایی کردن محیط شناورسازی، مربوط به یون‌های کلسیم باشد؛ به همین دلیل، به منظور افزایش pH تا pH های ۸/۵ و ۱۰/۵ از سدیم هیدروکسید نیز استفاده و نتیجه‌ها مقایسه شد. نتیجه‌ها نشان داد که در pH=8.5 و با استفاده از تنظیم‌کننده‌ی سدیم هیدروکسید، عیار روی و آهن در مرحله‌ی رافر نسبت به تنظیم‌کننده‌ی 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 تنظیم‌کننده‌ی سدیم هیدروکسید، عیار روی و آهن در مرحله‌ی رافر نسبت به تنظیم‌کننده‌ی 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). نتیجه‌ها 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 وارون پیریت در pH های قلیایی نسبت به pH اسیدی مربوط به نوع کلکتور باشد؛ بنابراین، آزمایش‌هایی با کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات در شرایط همانند آزمایش‌های انجام شده با کلکتور Aero 3477 در pH های ۵/۵، ۸/۵، ۱۰/۵ و ۱۲ انجام شد.



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 گوناگون pH: الف: pH=8.5، ب: pH=10.5



شکل ۱۱- تغییر گرانروی پالپ در pHهای گوناگون.

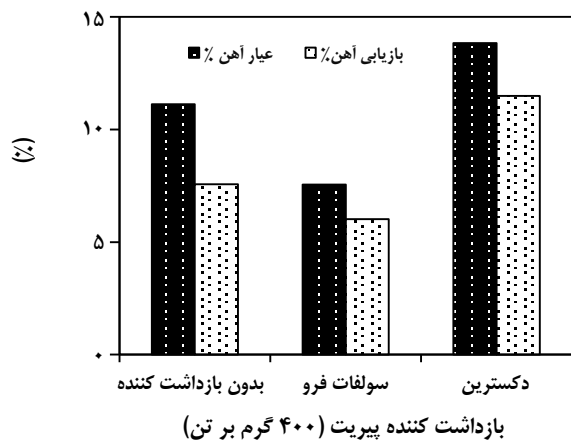


شکل ۱۰- تغییر عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی و بازیابی آهن با استفاده از ۱۵ گرم بر تن کلکتور پتاسیم آمیل گزنات در pHهای گوناگون.

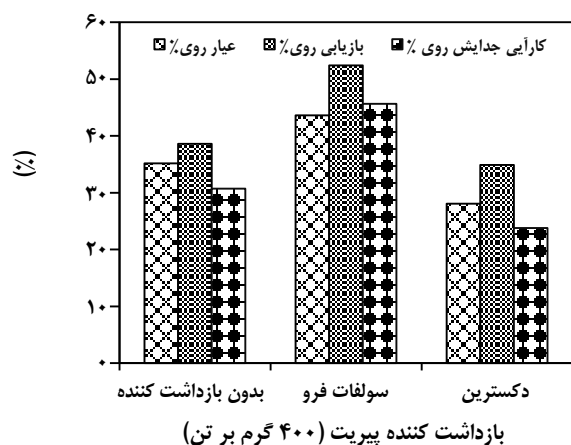
پالپ افزایش می‌یابد. گرانروی بالای پالپ، باعث نبود پراکندگی حباب‌های هوا در پالپ و نیز کاهش اتصال حباب-ذره شناورسازی می‌شود [۱۶]. کارهای پژوهشی انجام شده بر روی کانی‌های مس و طلا نیز نشان داده است که افزایش گرانروی پالپ، باعث کاهش شناورشدگی کانی‌های مس و طلا می‌شود [۱۷]. بنابراین، اندازه‌گیری گرانروی مطلق پالپ در pHهای گوناگون با استفاده از ویسکومتر چرخشی انجام شد که نتیجه‌ها در شکل ۱۱، آورده شده است. با توجه به نتیجه‌های آورده شده در شکل ۱۱، می‌توان گفت که با افزایش pH، به تدریج گرانروی پالپ افزایش می‌یابد؛ افزایش گرانروی می‌تواند ناشی از وجود ژلیس یا کانی رسی مسکویت و ایلیت باشد که در آنالیز XRD نمونه شناسایی شده اند. افزایش گرانروی توسط کانی‌های رسی می‌تواند مربوط به قدرت جذب آب

نتیجه‌ها 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 pHهای قلیایی نسبت به pH اسیدی کاهش یافت که به احتمال زیاد، کاهش شناورشدگی پیریت در pHهای قلیایی ناشی از تجزیه‌ی دی‌گزناتوزن (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 مقدار تنظیم‌کننده‌ی pH بیش‌تری نیاز است که با مصرف تنظیم‌کننده‌ی pH و افزایش pH، پالپ به صورت فزاینده‌ای چسبناک شده و گرانروی



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



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

ذره‌های کلوییدی نشاسته و دکسترین ممکن است سطح کانی را بپوشانند 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 پیش‌شناورسازی و شستشوی مجدد بخش شناور شده

با توجه به این که در مرحله‌ی شیل‌گیری شناورسازی آزمایشگاهی، ناگزیر، حدود ۱۳٪ هدرروی فلز روی وجود داشت، به گونه‌ای که در سرریز پیش‌شناورسازی، عیار روی تا ۲۰٪ نیز می‌رسید؛ سعی شد به جای مرحله‌ی پیش‌شناورسازی، از بازداشت کننده‌ی

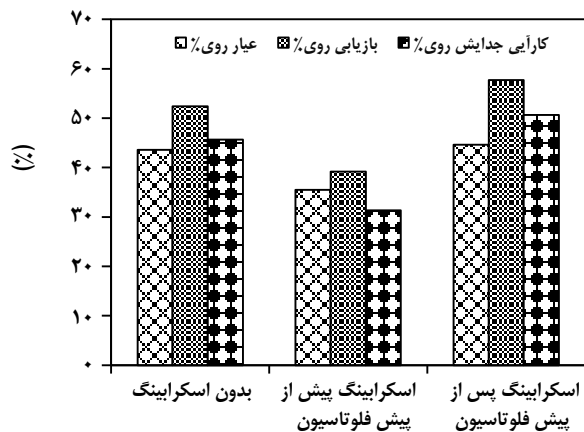
توسط برخی رس‌ها و نیز تغییرات بار سطحی و ساختار قرارگیری رس‌ها باشد. به طوری که با افزایش pH، پتانسیل سطح کانی‌های رسی تغییر یافته و با توجه به نوع رس و وضعیت قرارگیری آن گرانروی پالپ می‌تواند افزایش یابد [۱۹-۱۸].

این احتمال نیز داده می‌شود که کاهش شناورشدگی اسفالریت در pHهای قلیایی ناشی از تأثیر ژپیس بر روی سطح اسفالریت باشد. کارهای پژوهشی انجام شده نیز، نشان می‌دهد که اسفالریت و ژپیس هر دو در pHهای قلیایی، بار سطحی منفی دارند حضور یون‌های کلسیم، سولفات و نیز ژپیس می‌تواند باعث تغییر پتانسیل زتای اسفالریت شده و 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 بازیابی اسفالریت را کاهش می‌دهد. در واقع، در سطح اسفالریت بین ژپیس، یون  $Cu^{2+}$  و کلکتور جذب رقابتی وجود دارد که جذب ژپیس در سطح اسفالریت، مکان‌های احتمالی جذب یون  $Cu^{2+}$  و کلکتور را پوشش داده و باعث کاهش زاویه‌ی تماس، شناورشدگی اسفالریت و کاهش جدایش انتخابی در فرایند شناورسازی می‌شود [۲۰، ۲۱].

#### تأثیر بازداشت کننده‌ی پیریت

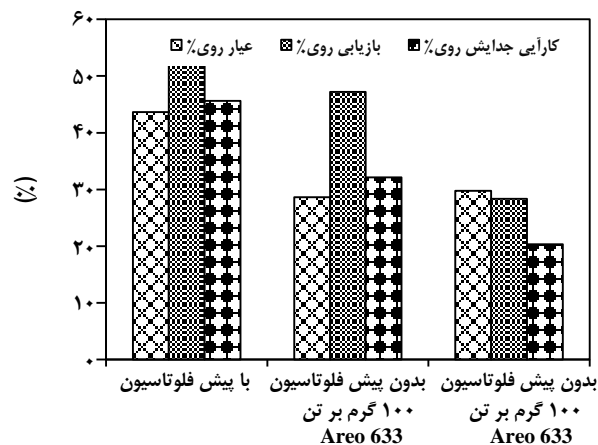
سولفات فرو یکی از بازداشت کننده‌های معدنی پیریت می‌باشد. بر اساس کار پژوهشی انجام گرفته بر روی خوراک شناورسازی معدن کوشک، گزارش شده بود که در برخی شرایط استفاده از سولفات فرو تأثیر چندانی در بازداشت پیریت ندارد و استفاده از آن به همراه سیانید سدیم مؤثر است [۸، ۲۲]؛ به همین منظور در چند آزمایش از سولفات فرو استفاده نشد. نتیجه‌های 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.





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 پیش‌شناورسازی و بعد از مرحله‌ی پیش‌شناورسازی.

در شرایط یکسان با آزمایش پایه انجام شد با این تفاوت که خوراک شناورسازی، پیش از مرحله‌ی پیش‌شناورسازی به مدت ۲۰ دقیقه با استفاده از ۲۰۰ گرم بر تن سولفوریک اسید و پره‌ی ویژه اسکرابینگ در سلول ۲ لیتری با درصد وزنی جامد ۵۰٪، شستشوی سطحی شد. پس از فرایند اسکرابینگ، عیار روی در مرحله‌ی پیش‌شناورسازی نسبت به آزمایش پایه که بدون فرایند 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 پیش‌شناورسازی 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 پیش از مرحله‌ی پیش‌شناورسازی باعث زدودن آلودگی و نرمه‌ها از سطح اسفالریت و فعال شدن آن شده است؛ بنابراین، پیش از مرحله‌ی شیل‌گیری، استفاده از اسکرابینگ مناسب نمی‌باشد. با توجه به این نتیجه‌ی به دست آمده، احتمال داده شد که فرایند اسکرابینگ پس از مرحله‌ی پیش‌شناورسازی، مؤثر واقع شود؛ به همین منظور در آزمایش دیگر، پس از مرحله‌ی پیش‌شناورسازی، تهریز پیش‌شناورسازی، شستشوی سطحی شد؛ نتیجه‌ها نشان داد که فرایند اسکرابینگ باطله‌ی پیش‌شناورسازی، تأثیر مطلوبی 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).



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 پیش‌شناورسازی و بدون پیش‌شناورسازی.

جدول ۱ - نتیجه‌های به دست آمده از کلینر سرریز پیش‌شناورسازی.

فرآورده	بازیابی وزنی (%)	عیار روی (%)	بازیابی روی (%)
سرریز پیش‌شناورسازی	۱۰۰	۱۹/۴	۱۰۰
سرریز کلینر پیش‌شناورسازی	۳۵/۶۶	۲۴/۴۶	۴۴/۹۷
تهریز کلینر پیش‌شناورسازی	۶۴/۳۴	۱۶/۵۹	۵۵/۰۳

Aero 633 استفاده شود ولی با توجه به نتیجه‌های نشان داده شده در شکل ۱۴، حذف مرحله پیش‌شناورسازی و استفاده از بازداشت کننده 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 دیده شد. بنابراین، در ادامه، انجام کلینر بخش سرریز پیش‌شناورسازی با هدف برگرداندن روی از سرریز پیش‌شناورسازی به مدار شناورسازی بررسی شد. نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۱، نشان می‌دهد با کلینر کردن سرریز پیش‌شناورسازی حدود ۵۵٪ از فلز روی شناور شده در بخش سرریز پیش‌شناورسازی را می‌توان به مدار شناورسازی برگشت داد و از هدرروی آن به باطله جلوگیری کرد.

#### تأثیر فرایند اسکرابینگ اسیدی خوراک شناورسازی

با توجه به دانه‌بندی، درصد ذره‌های ریز و کربن آلی، این احتمال داده شد که اسکرابینگ و حذف ذره‌های چسبیده به ذره‌های درشت می‌تواند مؤثر باشد؛ به منظور بررسی تأثیر اسکرابینگ اسیدی خوراک شناورسازی بر روی عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی، آزمایشی

## نتیجه گیری

• در حضور کلکتورهای PAX و Aero 3477 با افزایش pH و قلیایی شدن محیط شناورسازی، 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 پیش‌شناورسازی، حدود ۵۵٪ از روی در رفتی به بخش سرریز پیش‌شناورسازی، برگشت داده شد و از هدرروی آن جلوگیری شد.

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

• آزمایش‌های مقدماتی انجام گرفته بر روی باطله پر عیار انباشت شده در معدن کوشک، نشان می‌دهد که امکان جدایش انتخابی اسفالریت از سایر کانی‌های گانگ (به طور عمده پیریت) و تهیه کنسانتره روی مناسب در مرحله رافر وجود دارد. البته انجام آزمایش‌های تکمیلی و کلینر و نیز آزمایش‌های نیمه صنعتی برای تولید کنسانتره در مقیاس صنعتی نیاز است.

## قدردانی

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

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

نمونه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش از باطله‌های پرعیار دپو شده در معدن سرب و روی کوشک یزد تهیه شد و امکان فرآوری روی از این باطله‌ها به روش شناورسازی بررسی شد. میزان عنصرهای 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 پیش‌شناورسازی و تأثیر فرایند اسکرابینگ اسیدی خوراک شناورسازی پیش و پس از مرحله‌ی شیل‌گیری بر روی عیار، بازیابی و کارایی جدایش روی در مرحله‌ی رافر، مورد بررسی قرار گرفت و در این ارتباط آزمایش‌های گوناگونی برای تعیین اثر پارامترها صورت پذیرفت که نتیجه‌ها به صورت زیر ارائه می‌شود:

• در شناورسازی آزمایشگاهی با استفاده از کلکتورهای PAX (پتاسیم آمیل گزنتات)، Aero 3477، Florrea 2214 و Danafloat 233 در pH طبیعی پالپ، بیش‌ترین عیار بازیابی و کارایی جدایش روی با کلکتور Aero 3477 به دست آمد. نتیجه‌های به دست آمده 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 انتخابی تر عمل نمود

## مراجع

- [1] Bulatovic S. M., "Handbook of Flotation Reagents- Chemistry, Theory and Practice- Flotation of Sulfide Ores", Vol. 1, Elsevier Science & Technology, (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., Fornasier D., Ralston, J., Depression of Iron Sulfide 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*, **65**: 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).
- [15] 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).