

۱- مقدمه

که در فصل مشترک کانی- محلول وجود دارد. جونز و دکوک پیش قدم اندازه گیری پتانسیل، Eh، در یک کارخانه فلوتاسیون در استرلیا شده اند [۳]. امکان پذیری استفاده از اندازه گیری Eh مورد توجه بسیاری از گروه های تحقیقاتی دیگر در جهان بوده است رالستون Eh و اثرات آن را در فلوتاسیون سولفیدها بررسی کرد. اکنون مشخص شده است که Eh یک پارامتر تأثیرگذار، در مطالعات آزمایشگاهی و کارخانه ای است [۴].

اولین بررسی ها در زمینه برهم کنش کلکتورها در فلوتاسیون با الکتروکاتیون های سولفیدی در سیستم (گالن-اتیل-اگزنتات)، در سیستم (کالکوسیت-اتیل اگزنتات) و (کالکوسیت-دی اتیل تیوفسفات) انجام شد [۵]، [۶]، [۷]. هر چند یافته های دیگر نشان داد که رفتار مخلوط کانی ها را نمی توان از رفتار کانی های منفرد پیش بینی کرد، اما رفتار کانی های منفرد می تواند راهنمای خوبی برای بررسی رفتار آن ها در محیطی متشکل از چندین کانی باشد [۹]، [۱۰]، [۱۱].

۲-۲- فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل غلظت مواد

شیمیایی

افزودن یک سری مواد شیمیایی اکسیدکننده یا احیاءکننده به محیط پالپ می تواند باعث تغییر پتانسیل پالپ شود. با کنترل این پتانسیل فرآیند فلوتاسیون و مصرف مواد شیمیایی از قبیل کلکتور یا بازداشت کننده و غیره بهینه می شود. مثال بارز این فرآیند جدایش مولیبدن از محصول آراسته مس در خط تولید مولیبدن در مجتمع مس سرچشمه است. در این فرآیند با افزودن سولفید سدیم پتانسیل پالپ تا حدود ۶۵۰- تا ۵۵۰- میلی ولت پایین آورده می شود. در این پتانسیل، کانی های مس از جمله کالکوپیریت بازداشت و مولیبدنیت شناور می شود.

محققان گزارش کرده اند که با تنظیم پتانسیل پالپ در محدوده ۳/۰+ ولت و با اضافه کردن گسترده هیدروژن می توان فلوتاسیون کالکوپیریت را از کانسنگ کمپلکس پیریتی ریزدانه انجام داد. همچنین می توان در فلوتاسیون گالن به بهبودهای متالورژیکی قابل ذکری دست یافت [۱۳].

۲-۳- فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل pH

کنترل pH یکی از روش های با کاربرد بسیار وسیع برای مدل کردن فلوتاسیون کانی ها است. در مطالعه ای که توسط فریهان گوکتیه انجام شده است تأثیر pH بر پتانسیل پالپ در محلول فلوتاسیون کانی های سولفید ه با الکترودهای مختلف مورد بحث قرار گرفته است [۱۴]. شکل ۲-۶ فلوتاسیون کالکوپیریت را در pH متفاوت نشان می دهد.

مکانیزم فلوتاسیون الکتروشیمیایی^۱ مانند سایر روش های فلوتاسیون از جمله الکتروفلوتاسیون^۲، آئروفلوتاسیون^۳ و فلوتاسیون ستونی^۴ تغییر رفتار آبرانی یا آب دوستی کانی های هدف در یک پالپ آماده سازی شده برای فلوتاسیون است. تفاوت اصلی این روش با سایر روش ها در این است که در اینجا به جای این که از مواد شیمیایی (کلکتور و سایر سطح سازها) برای آبران کردن یا بازداشت کانی ها استفاده شود، فرآیند آماده سازی با کنترل پارامترهای الکتروشیمیایی انجام می شود. اصلی ترین پارامترهای الکتروشیمیایی قابل کنترل در این فرآیند پتانسیل پالپ (Eh)، پتانسیل سطح کانی و غلظت یون هیدروژن (pH) است. همه این پارامترها بر فعالیت الکتروشیمیایی کانی ها در محیط فلوتاسیون تأثیر گذارند. فعالیت های الکتروشیمیایی شامل واکنش های اکسیداسیون/احیاء است. بنابراین با کنترل پارامترهای ذکر شده می توان واکنش های اکسیداسیون/احیاء را به مسیر دلخواه هدایت و کانی های مورد نظر را شناور یا بازداشت کرد.

۲-انواع روش های فلوتاسیون الکتروشیمیایی

مهم ترین روش های فلوتاسیون الکتروشیمیایی عبارت است از فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ، فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل غلظت مواد شیمیایی، فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل pH، فلوتاسیون-الکتروشیمیایی خودالقای یا بدون کلکتور، فلوتاسیون-الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی. توضیف مختصر این روش ها در ادامه آمده است.

۲-۱- فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل

پالپ

پتانسیل پالپ (Eh) بیانگر شدت فعالیت های اکسیداسیون-احیاء در محیط پالپ است. در یک سلول الکتروشیمیایی پتانسیل آزاد (Eh) بیانگر اختلاف انرژی الکتریکی بین دو نیم واکنش در حال انجام در سلول است. با توجه به این که در یک سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی بیش از یک واکنش در حال انجام است بنابراین پتانسیل اندازه گیری شده پتانسیل مخلوط نامیده می شود [۱]. این پتانسیل برآیند تمام واکنش های اکسیدی و احیائی در محیط پالپ است مطالعات الکتروشیمیایی سیستم های فلوتاسیون به خوبی نشان داده است که بازیابی فلوتاسیون تابع پتانسیلی است

بسیار ناچیزی دارد [۲۲]. این کانی‌ها در بسیاری از کانسنگ‌ها با هم ظاهر می‌شوند و بنابراین همراهی این کانی‌ها مشکلات جدی ایجاد می‌کند.

۲-۵- فلوتاسیون الکتروشیمیایی با پتانسیل خارجی

دو روش عمده برای کنترل پتانسیل پالپ در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی وجود دارد. یکی اضافه کردن مواد شیمیایی و دیگری استفاده از یک پتانسیل خارجی. استفاده از پتانسیل خارجی برای کنترل پتانسیل پالپ در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۳]. در عمل ذرات ماده معدنی در داخل پالپ پتانسیل خارجی را از الکتروود در حال کار که در تماس است دریافت می‌کند. جدیدترین ایده‌های که در فلوتاسیون الکتروشیمیایی مطرح است، فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی است. در این روش با شناسایی دامنه مؤثر پتانسیل اکسیداسیون و احیاء کانی‌های مورد نظر، پتانسیل لازم برای رسیدن به چنین شرایطی، بر روی الکتروود کار که با یک الکتروود کمکی یک مدار بسته را می‌سازند اعمال می‌شود و بدین وسیله شرایط لازم برای انجام فرآیند اکسیداسیون احیاء در مسیر دلخواه فراهم می‌شود.

هدف کاربرد پتانسیل خارجی، کنترل برخی فعل‌انفعالات الکتروشیمیایی حاکم بر محیط پالپ است. فعل‌انفعالاتی که به صورت خود بخودی در پالپ اتفاق می‌افتد همیشه با کاهش سطح انرژی سیستم همراه است. در یک نقطه معین در درون سیستم برای یک فعل‌انفعال معین می‌توان نوشت:

$$E_{in} = (V_{pulp} - V_{reaction}) \times I_{charge} \quad (1)$$

که در آن E_{in} انرژی وارده شده به سیستم توسط پتانسیل خارجی، V_{pulp} پتانسیل اکسایش-کاهش در آن نقطه معین، $V_{reaction}$ پتانسیل اکسیداسیون احیاء فعل‌انفعال الکتروشیمیایی (نیم واکنش) تحت کنترل و I_{charge} جریان اعمالی به محیط فلوتاسیون توسط الکتروود پتانسیل خارجی است که می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$I_{charge} = C \times I_0 \quad (2)$$

که در آن C ضریب تأثیر جریان است.

پتانسیل پالپ می‌تواند به عنوان پتانسیل اکسیداسیون احیاء یک فعل‌انفعال الکتروشیمیایی، که در آن نقطه تعادل ترمودینامیکی برقرار است تعریف شود. بنابراین می‌توان نوشت:

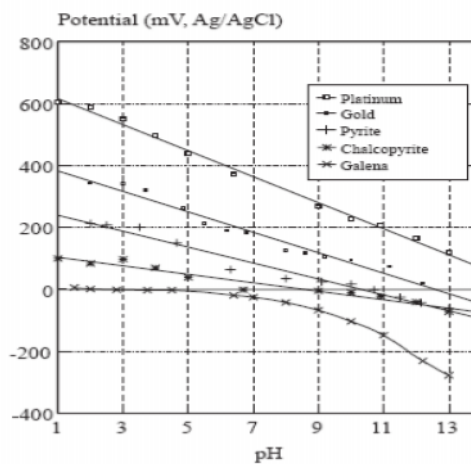
$$E_{in} = (V_{pulp} - V_{reaction}) \times C \times I_0 \quad (3)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که کارایی پتانسیل خارجی اعمال شده که برای کنترل یک واکنش معین مورد استفاده قرار می‌گیرد، نه تنها با مقدار پتانسیل اعمال شده قابل محاسبه است، که به

مطالعات اندازه‌گیری پتانسیل به عنوان تابعی از pH در یک محلول خالص توسط ناتارجان و ایواسکی، (۱۹۷۲)، گبهارد و شدد، (۱۹۸۸)، رز و وندونتر،^۵ (۱۹۸۵) و احمد، (۱۹۷۸) گزارش شده است. منحنی‌های Eh/pH که از اندازه‌گیری با الکترودهای کانی و فلزات نجیب بدست می‌آید، به طور مسلم به شرایط سطحی مربوط می‌شود [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸].

شکل ۱ تغییرات پتانسیل الکتروودهای مختلف را نسبت به pH نشان می‌دهد. فرآیند فلوتاسیون و حلالیت کانی‌های سولفیدی تحت شرایط هوادهی با مراجعه به منحنی‌های Eh/pH قابل استنباط است.

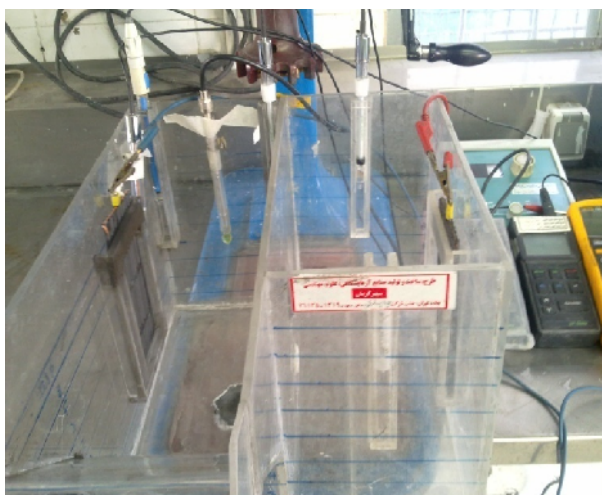
اندازه‌گیری پتانسیل پالپ در ارتباط با اندازه‌گیری نسبی pH در سال‌های اخیر در مدارهای فلوتاسیون در مقیاس صنعتی به طور وسیعی فراگیر شده است. جمع‌آوری داده‌های Eh/pH اندازه‌گیری شده برای یک فرآیند عملیاتی ممکن است مواد شیمیایی اضافه شده به سیستم را کاهش دهد و اطلاعات ارزشمندی را در جهت حل مشکلات عملیاتی کارخانه فلوتاسیون در اختیار قرار دهد [۱۹]، [۲۰]. اندازه‌گیری pH-Eh در ارتباط فلوتاسیون پیرویت بررسی و مشخص شد که Eh یک نشانگر خوب برای خاصیت شناور-پذیری کانی‌ها است [۲۱].



شکل ۱: پتانسیل‌های مختلف الکتروود به عنوان تابعی از pH

۲-۴- فلوتاسیون الکتروشیمیایی خودالقایی

فلوتاسیون خودالقایی یا بدون کلکتور تعدادی از کانی‌های سولفیدی در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه شده است. یکی از مشکلات اصلی در فلوتاسیون خودالقایی اختلاف رفتار کانی‌های مختلف یک فلز در یک کانسنگ است. برای مثال کالکوپریت به طور مؤثری در غیاب کلکتور فلوته می‌شود، در حالی که کالکوسیت در شرایط مشابه قابلیت شناوری



شکل ۲: سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی

مقدار جریان فیزیکی عبوری از آن واکنش معین هم مربوط است. مفهوم دیگر رابطه فوق این است که پتانسیل حجم معینی از پالپ در یک پتانسیل معین قابل کنترل نیست اما در یک محدوده پتانسیل، مبین جریان مورد نیاز برای پتانسیل مؤثر است [۲۴].

۳- مطالعات تجربی

با توجه به اینکه تمام تحقیقات انجام شده تا کنون بر روی تک‌کانی‌ها و در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است، در این تحقیق تلاش شده است تا فرضیه فلوتاسیون الکتروشیمیایی با روش کنترل پتانسیل پالپ و با روش اعمال پتانسیل خارجی بر روی نمونه‌های صنعتی به‌دست آمده از مدار فرآوری مولیبدن در مجتمع مس سرچشمه مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. هدف این تحقیق بررسی امکان‌سنجی انجام فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی بر روی نمونه‌های چند فلزی (بازداشت‌کانی‌های مس به‌خصوص کالکوپیریت در مدار فرآوری مولیبدن در مجتمع مس سرچشمه) برای دسترسی به یک فرآیند بدون مواد شیمیایی یا کاهش مصرف مواد شیمیایی بوده است. در ادامه فعالیت‌های انجام شده تشریح می‌شود.

۳-۱- سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی مورد استفاده

طرح اولیه سلول الکتروشیمیایی براساس مطالعات انجام شده توسط آقای ین و همکاران اقتباس و پس از تغییرات لازم سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی مورد نظر طراحی و ساخته شد [۲۵]. این سلول دارای دو بخش الکترولیتی و فرآیند است، که توسط یک غشای تراوای یونی به همدیگر ارتباط پیدا می‌کند. در هر بخش نگره‌دارنده‌هایی برای قراردادن الکتروود نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی نحوه هوادهی به بخش فرآیند و کنترل آن، یک مجرای دمش هوا در بخش زیرین آن تعبیه شده است. این سیستم همچنین امکان اکسیژن‌زدایی بخش فرآیند توسط تزریق نیتروژن به داخل سلول را فراهم کرده است. شکل ۲ سلول ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳-۲- تهیه دستگاه پتانسیواستات

اعمال پتانسیل باید توسط یک منبع پتانسیل با نرخ ثابت بر روی الکتروود کار اعمال شود. برای این کار از یک دستگاه پتانسیوگالوانواستات استفاده شد.

۳-۳- کالیبراسیون و پاک‌سازی الکتروودهای پلاتین

مقدار ۳۹/۲۱ گرم فرسولفات آمونیوم به همراه ۴۸/۲۲ گرم سولفات آمونیوم فریک در محلولی متشکل از ۵۶/۲۰ میلی-لیتر (۱۰۳/۴ گرم) اسیدسولفیدیک غلیظ و یک لیتر آب-مقطر (حد اقل دو بار تقطیر) حل شد. برای کالیبراسیون الکتروود پلاتین آن را در یک مدار بسته با الکتروود مرجع $Ag/AgCl-KCl \propto n$ در داخل این محلول قرار می‌دهند. پتانسیلی که بین این دو الکتروود با ولت‌متر دیجیتال قرائت می‌شود باید عدد ۴۶۵ تا ۴۷۵ میلی‌ولت را نشان بدهد. برای پاک‌سازی شیمیایی الکتروود پلاتین باید آن را برای مدت ۳۰ دقیقه در محلول به نسبت ۳ به ۱ آب مقطر (حد اقل دو بار تقطیر) و اسید نیتریک غلیظ قرار داد تا بتوان آن را به روش گفته شده کالیبره کرد.

۳-۴- تهیه محلول الکتروولیت و آماده‌سازی تجهیزات

برای تهیه محلول الکتروولیت مورد نظر از نمک کلرور پتاسیم استفاده شد. کار این محلول فقط تبادل یونی است و نقش مستقیمی در فرآیند ندارد. در این آزمایش‌ها از محلول ۰/۱ نرمال محلول کلرور پتاسیم استفاده شد.

قبل از انجام آزمایش‌ها تجهیزات آزمایش شامل دستگاه پتانسیواستات، کامپیوتر، الکتروودهای کار و مرجع و کمکی، pH متر، Eh متر، سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی، هدایت-سنج یا Ec متر، دماسنج، ولت‌متر دیجیتال، مواد شیمیایی و

عیارسنجی و آنالیز مینرالوژی (کانی شناسی و تعیین درصد - هر کدام از کانی ها در کل نمونه) به آزمایشگاه ارسال شد.

۳-۷- آزمایش ها و آنالیز نمونه ها

آزمایش ها به منظور امکان سنجی فرآیند فلوتاسیون - الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ و با اعمال پتانسیل خارجی و شناسایی پارامترهای مؤثر در فرآیند انجام شد. پارامترهای قابل کنترل در این فرایند شامل پتانسیل پالپ یا Eh، pH، هدایت الکتریکی پالپ یا EC، پتانسیل سطح کانی، درجه حرارت محیط پالپ، پتانسیل اعمالی روی الکتروود کار و پتانسیل بین الکتروود کار و الکتروود مرجع (که بیانگر ضریب نفوذ جریان در پالپ) است. جنس، شکل، مساحت سطح و چیدمان الکتروودها، عوامل دیگری است که می تواند بر فرآیند تأثیرگذار باشد. همچنین باید به یک سری عوامل اجرایی دیگر از جمله دور رتور، درصد جامد پالپ، زمان آماده سازی، حرارت دادن نمونه قبل از آزمایش و نظایر آن اشاره کرد. با در نظر گرفتن این پارامترها و عوامل دستورالعمل آزمایش ها تهیه شده است. پس از انجام هر آزمایش اطلاعات در فرم ثبت داده ها درج شد.

همان گونه که پیش از این عنوان شد هدف تحقیق امکان - سنجی فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ و با اعمال پتانسیل خارجی بر روی یک نمونه چندکانی سولفید ه صنعتی (کنسانتره مس مولیبدن) است. در این فرآیند هدف بازداشت کانی های مس (علی الخصوص کالکوپیریت) و دستیابی به یک محصول پرعیار مولیبدن است. در اکثر گزارش ها و مقالات مورد مطالعه روش های اسپکتروسکوپی از جمله روش های IC^۶، XPS^۷، TOF-SIMS^۸، برای شناسایی محصولات فرآیند مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل در دسترس نبودن این روش ها، در این تحقیق برای کنترل نتایج حاصل آزمایش ها از روش فابل دسترس آنالیز مینرالوژی استفاده شد. به این ترتیب که پس از انجام هر آزمایش محصولات آن پس از خشک کردن و آماده سازی برای عیارسنجی و مطالعات میکروسکوپی به آزمایشگاه مرکزی ارسال شد. در آزمایشگاه پس از عیارسنجی، از نمونه ها مقطع نازک صیقلی تهیه و توسط متخصصین مینرالوژی مورد مطالعه قرار گرفته و بر اساس دستورالعمل استاندارد که قبلا تهیه شده است، مشخصات مینرالوژیکی نمونه، از جمله درجه آزادی، درصد هر یک از کانی های تشکیل دهنده نمونه و درصد اکسیدشدگی تعیین می شود. با مقایسه درصد کانی کالکوپیریت در نمونه خوراک و محصولات آزمایش میزان موفقیت آن آزمایش در بازداشت

سایر لوازم مورد نیاز آماده شد. مواد شیمیایی فرآیند از مواد شیمیایی مورد مصرف در خط تولید مولیبدن در مجتمع مس سرچشمه تهیه شد. سایر مواد شیمیایی مورد مصرف ساخت کارخانه مرک است.

۳-۵- تکنیک الکتروشیمیایی مورد استفاده

از روش های متداول در آزمایش های الکتروشیمیایی می توان به روش های ولتامتری سیکلی، ولتامتری پله پتانسیل، کرنوآمپمتری و کرنوولتامتری اشاره کرد. با توجه به مطالعات کتابخانه ای مشخص شد که در فلوتاسیون - الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی روش کرنو - آمپمتری مناسب تر است. بنابراین از این روش برای انجام آزمایش ها بهره گرفته شد. در این روش با اعمال یک مقدار مشخص پتانسیل بر روی الکتروود کار در یک زمان معین منحنی تغییرات جریان نسبت به زمان ثبت می شود. در این روش از سیستم سه الکتروودی استفاده می شود. یک الکتروود کار برای اعمال پتانسیل و یک الکتروود کمکی برای برقراری جریان در یک مدار بسته و یک الکتروود مرجع برای اندازه - گیری پتانسیل پالپ سیستم سه الکتروودی را تشکیل می - دهد. علاوه بر این که تغییرات جریان نسبت به زمان ثبت می شود، می توان با استفاده از یک ولت متر دیجیتالی وضعیت لحظه ای پتانسیل را در مدار بین الکتروودها اندازه گیری کرد.

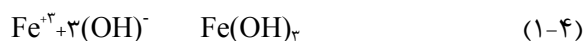
۳-۶- نمونه مورد مطالعه و شناسائی آن

در راستای مطالعه و شناخت اثر پتانسیل خارجی در فلوتاسیون الکتروشیمیایی، امکان سنجی بازداشت کالکوپیریت در مدار فرآوری مولیبدن در مجتمع مس سرچشمه مورد - بررسی قرار گرفته است. برای انجام این کار پس از مطالعه اولیه مدار فرآوری، نحوه نمونه برداری، نقاط نمونه برداری، زمان و مدت نمونه برداری و حجم و وزن نمونه مشخص شد. نمونه ها به صورت پالپ از کارخانه به آزمایشگاه منتقل و پس از فیلتر کردن و آبگیری برای خشک شدن به داخل آون منتقل شد. نمونه های روزانه پس از مخلوط شدن به یک نمونه کلی تبدیل شد و سپس با تقسیمات متوالی، تعداد ۱۲۰ نمونه به وزن تقریبی ۱۵۰۰ گرم تهیه شد.

به منظور آگاهی از مشخصات نمونه مورد مطالعه یکی از نمونه ها انتخاب و مشخصات فیزیکی آن از جمله وزن مخصوص (با استفاده از پیکنومتر) و دانه بندی (با استفاده از الک های آزمایشگاهی برای اندازه های تا ۴۰ میکرون و سیکلوسایزر برای ذرات کمتر از ۴۰ میکرون) تعیین شد. سپس هر بخش دانه بندی به همراه یک نمونه کلی برای

برقراری جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند شامل یک الکترود پلاتین (تیغه پلاتینی) باشد. سیستم سه الکترودی شامل یک الکترود مرجع^{۱۱} یک الکترود نشان‌گر و یک الکترود کار است. الکترود مرجع می‌تواند یک الکترود Ag/AgCl، الکترود نشانگر می‌تواند یک الکترود صفحه‌ای یا توری از جنس پلاتین یا الکترود صفحه‌ای از جنس گرافیت و الکترود کار نیز می‌تواند همانند الکترود کمکی یک الکترود از جنس کانی یا یک الکترود فناپذیر از جنس پلاتین و یا الکترود صفحه‌ای از جنس گرافیت باشد. برای افزایش ضریب نفوذپذیری جریان از صفحات پلاتینی به ابعاد ۱۰×۱۰ یا ۱۵×۱۵ سانتیمتر نیز می‌توان استفاده کرد. الکترود در حال کار روی دیواره سلول در بخش فلوتاسیون و الکترود نشانگر روی دیواره سلول در بخش الکترولیت نصب می‌شود. برخی از نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

در پتانسیل‌های مثبت برای رسیدن به pH مناسب در حد ۱۲ تا ۱۲/۵ مصرف آهک زیاد می‌شود. دلیل این مسئله انجام فعل-انفعالاتی است که محصولات آن‌ها به صورت هیدروکسید یا هیدروکسیدکربنات است. مهم‌ترین این واکنش‌ها به صورت زیر است:



در پتانسیل‌های به شدت منفی (۳- تا ۶-) عیار مولیبدن در کنسانتره افزایش می‌یابد. اما به دلیل مغشوش بودن محیط سلول به دلیل بالا بودن درصد جامد پالپ و بالا بودن دور رتور، تمرکز کانی‌های مس در داخل کف و سطح سلول زیاد بوده و همراه کف به کنسانتره راه می‌یابند و باعث می‌شود که عیار مس در کنسانتره زیاد شود. پتانسیل مناسب برای بازداشت کانی‌های مس به خصوص کالکوپیریت در این فرآیند ۳- تا ۰ است. البته برای افزایش ضریب نفوذ جریان و بالا بردن احتمال برخورد ذرات کانی با سطح الکترود کار استفاده از الکترودهای صفحه‌ای ضروری است.

با توجه به اینکه در پتانسیل‌های مثبت با مقدار متعارف آهک نمی‌توان به pH مورد نظر رسید، از سود (NaOH) برای تنظیم pH استفاده شد. با توجه به اکتیویته بالای سدیم شاید یون Na^{+} بتواند در فرآیند تأثیر گذار باشد. اما استفاده از سود به دلیل آزادسازی یون OH^{-} درجه احیایی بودن محیط را کاهش داده باعث افزایش Eh محیط می‌شود. بنابراین در ادامه آزمایش‌ها از آهک برای تنظیم pH استفاده شد.

زمان اعمال پتانسیل را نیز به عنوان یک عامل تأثیر گذار باید مد نظر قرار داد. زمان اعمال پتانسیل در حقیقت همان زمان

کالکوپیریت در روش فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی مشخص می‌شود. این نتایج همراه با محاسبات متالورژیکی که با استفاده از نرم‌افزار موازن انجام می‌شود می‌تواند صحت فرضیات تحقیق را در فلوتاسیون-الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ با اعمال پتانسیل خارجی ثابت کند. رسم منحنی‌های بازیابی-پتانسیل نیز می‌تواند محقق را در پاسخگویی به این سوال که روش فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی برای نمونه‌های صنعتی و پلی‌متال تا چه حد موفقیت‌آمیز است، کمک می‌کند. نگارنده نیز از این روش استفاده کرده است که در بخش نتایج به آن اشاره خواهد شد.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- پارامترهای مورد مطالعه

آزمایش‌ها بر مبنای تغییر در پارامترهای عملیاتی از جمله مقدار پتانسیلی اعمالی بر روی الکترود کار، تغییر نوع الکترودهای کار و کمکی، تغییر در درصد جامد پالپ به منظور افزایش ضریب نفوذ جریان و بالا بردن احتمال برخورد ذرات کانی با سطح الکترود کار، تغییر در دور رتور (به منظور کاهش اغتشاش در محیط سلول)، استفاده از نیتروژن به جای هوا، استفاده از گازوئیل (به عنوان کلکتور مولیبدن) و استفاده از سولفید سدیم برای پاک‌سازی سطح کانی‌های مس که در مرحله پر عیارسازی تجمعی آبران شده‌اند انجام شده است. مهم‌ترین این پارامترها به شرح ذیل است:

الف- نوع الکترودها (پلاتینی، گرافیتی، استیل)

ب- شکل الکترودها (صفحه‌ای بزرگ در حد ۷ در ۱۰ سانتیمتر،

صفحه‌ای کوچک در حد ۸ در ۸ میلیمتر و میله‌ای)

ج- شدت جریان عبوری (کمتر از ۰/۱ آمپر و کمتر از ۱/۰ آمپر)

الف- پتانسیل پالپ

ب- شناسایی فرآیندهای اکسیداسیون احیاء در پتانسیل‌های

مختلف در محیط فلوتاسیون با استفاده از منحنی‌های

کرنوآمپرمتری

ج- بازیابی مس در باطله (موفقیت در بازداشت) و بازیابی

مولیبدن در کنسانتره

بر اساس مطالعات انجام شده از دو سیستم چیدمان الکترود

یعنی سیستم دو الکترودی و سیستم سه الکترودی می‌توان

استفاده کرد. سیستم دو الکترودی شامل یک الکترود کار^۹ و

یک الکترود نشانگر^{۱۱} یا کمکی است. الکترود کار می‌تواند

برای مثال یک الکترود از جنس کانی یا یک الکترود فناپذیر

از جنس پلاتین و یا الکترود صفحه‌ای از جنس گرافیت

باشد [۶]. الکترود نشانگر یا کمکی که برای بستن مدار و

۹۴٪ بوده است. که نشان‌دهنده یک فرآیند موفق بازداشت کانی‌های مس است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود هرچند نتایج اعمال پتانسیل در حضور سولفید سدیم رضایت‌بخش‌تر است، اما آزمایش‌ها در غیاب سولفید سدیم با تنظیم پتانسیل پالپ با استفاده از اعمال پتانسیل خارجی نیز به نتایج قابل قبولی رسیده‌است. برای مثال در آزمایش T۰۴۶ بدون استفاده از سولفید سدیم بیش از ۹۰٪ کانی‌های مس بازداشت شده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده این واقعیت است که با بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در مقیاس آزمایشگاهی می‌توان به امکان‌سنجی فرآیند فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ با اعمال پتانسیل خارجی امیدوار بود و پس از آن با به مقیاس رسانی نتایج برای استفاده در مقیاس صنعتی تلاش کرد.

۴-۳- تأثیر درصد جامد بر بازداشت کانی‌های مس

موفقیت فرآیند فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ با اعمال پتانسیل خارجی به مقدار زیادی تابع ضریب نفوذ جریان در داخل محیط پالپ است. تمام عواملی که بر این پارامتر اثر مثبت داشته باشند می‌توانند بر نتایج فرآیند فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ با اعمال پتانسیل خارجی نیز نتیجه مثبت داشته باشد. یکی از این عوامل درصد جامد پالپ است. نتایج بررسی اثر درصد جامد بر فرآیند فلوتاسیون الکتروشیمیایی با کنترل پتانسیل پالپ با اعمال پتانسیل خارجی در جدول ۳ و شکل ۵ درج شده است.

این نتایج نشان‌دهنده این است که با کاهش درصد جامد اثر بازدارندگی پتانسیل خارجی بر بازداشت کانی‌های مس افزایش می‌یابد. دلیل اصلی آن هم این است که با کاهش درصد جامد ضریب نفوذ جریان الکتریکی در محیط پالپ افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش درصد جامد در پالپ بازیابی مولیبدن کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این مسئله خاصیت آبرانی طبیعی مولیبدن است.

آماده‌سازی الکتروشیمیایی است. هرچقدر زمان آماده‌سازی الکتروشیمیایی بیشتر باشد احتمال برخورد ذرات کانی با سطح الکتروود بیشتر و در نتیجه فعل انفصالات پیش‌بینی شده بیشتر انجام و فرآیند بازداشت کانی‌های مس به‌خصوص کالکوپیریت بیشتر می‌شود. حداکثر زمان اعمال پتانسیل در آزمایش‌های انجام شده ۱۸۰۰ ثانیه بوده است.

۴-۲- تأثیر مقدار پتانسیل خارجی بر بازداشت کانی‌های مس

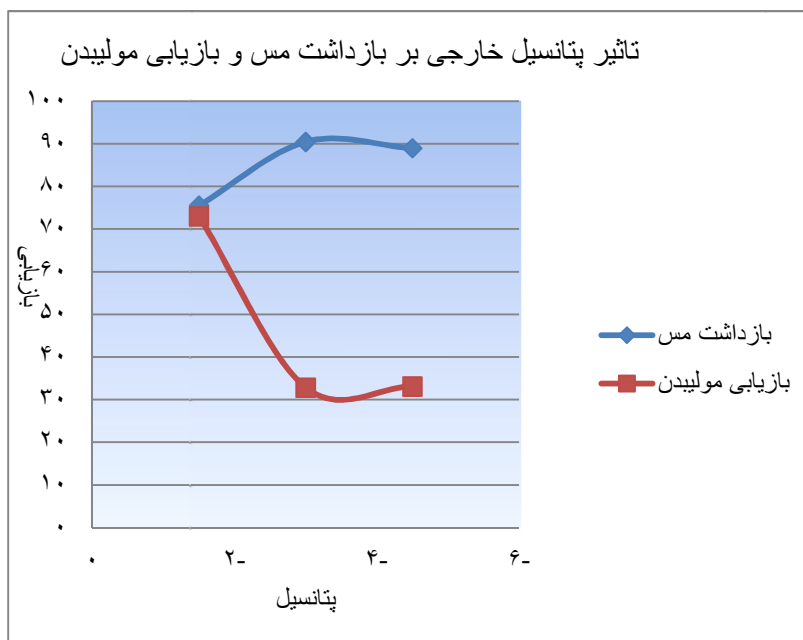
در تمام آزمایش‌ها زمینه اصلی انجام فلوتاسیون - الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی بوده‌است، که اثر سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه این تحقیق به صورت موردی بر روی نمونه‌هایی از مدار فرآوری مولیبدن در مجتمع مس سرچشمه انجام شده‌است، تلاش شده تا آزمایش‌ها بر اساس شرایط کارخانه فرآوری مولیبدن تنظیم شود. با توجه به این‌که در این واحد بازداشت کانی‌های مس با استفاده از سولفید سدیم به عنوان بازداشت‌کننده انجام می‌شود، بنابراین اثر پتانسیل خارجی در حضور و غیاب سولفید سدیم مورد بررسی قرار گرفته است تا مشخص شود که آیا از این روش می‌توان سولفید - سدیم را به‌عنوان بازداشت‌کننده کانی‌های مس به‌خصوص کالکوپیریت (با توجه به اینکه کنسانتره تولیدی در واحد فرآوری مس در مجتمع سرچشمه یک کنسانتره کالکوپیریتی است) از مدار فرآوری حذف کرد. نتایج بررسی تأثیر پتانسیل خارجی در حضور و غیاب سولفید سدیم در جداول ۱ و ۲ و اشکال ۳ و ۴ درج شده است.

ملاحظه می‌شود که پتانسیل خارجی به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار چه در غیاب و چه در حضور سولفید سدیم در فرآیند فلوتاسیون الکتروشیمیایی ایفای نقش می‌کند. در پتانسیل ۱/۵- ولت و در غیاب سولفید سدیم (یعنی بدون پاک‌سازی سطح کانی‌های مس) که پتانسیل پالپ ۵۶- میلی ولت است، بازیابی مولیبدن حدود ۷۳٪ است و بیش از ۷۵٪ مس بازداشت شده و وارد باطله شده است. با پاک‌سازی سطح کانی‌های مس (با اضافه کردن سولفید سدیم) در پتانسیل ۴/۵- ولت که پتانسیل پالپ ۵۶۴- میلی ولت بوده است، بازیابی مولیبدن بالای ۸۵٪ و بازداشت مس افزون بر

جدول ۱: تأثیر مقدار پتانسیل خارجی (پتانسیل منفی) بر بازداشت کانی های مس و بازیابی مولیبدن در غیاب سولفید سدیم

شماره آزمایش	پتانسیل اعمالی	سولفید سدیم مصرفی	محصول	وزن گرم	عیار %				بازیابی %	
					Cu	Mo	CuO	Fe	Cu	Mo
T۰۴۵ Eh= -۷۲ pH=۱۱,۶۸	-۴,۵۷	بدون سولفید	F ۶۲۱۳	۷۵۰,۰	۲۸,۶۳	۰,۶۰۹		۲۶,۷۸	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۱۴	۸۴,۰	۳۳,۲۷	۱,۷۹۸	۰,۷۳	۲۴,۱۹	۱۳,۰۲	۳۳,۰۷
			T ۶۲۱۵	۶۶۶,۰	۲۷,۹۶	۰,۴۵۹	۰,۶۲	۲۶,۹۳	۸۶,۹۸	۶۶,۹۳
T۰۴۶ Eh= -۷۰ pH=۱۱,۹۸	-۳,۰۷	بدون سولفید	F	۷۵۰,۰	۲۸,۶۳	۰,۶۰۹		۲۶,۷۸	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۱۶	۶۱,۸	۳۳,۱۷	۲,۴۲۵	۰,۶۸	۲۲,۲۸	۹,۵۵	۳۲,۸۱
			T ۶۲۱۷	۶۸۸,۲	۲۸,۱۵	۰,۴۴۶	۰,۶۱	۲۶,۷۲	۹۰,۴۵	۶۷,۱۹
T۰۴۷ Eh= -۸۰ pH=۱۲,۰۴	-۳,۰۷	بدون سولفید	F ۶۲۱۸	۷۵۰,۰	۲۸,۳۰	۰,۵۹۳	۰,۵۷	۲۶,۳۲	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۱۹	۱۷۴,۶	۳۲,۲۱	۱,۲۸۲	۰,۶۵	۲۴,۶۵	۲۶,۵۰	۵۰,۳۲
			T ۶۲۲۰	۵۷۵,۴	۲۷,۰۲	۰,۳۸۴	۰,۵۱	۲۷,۰۳	۷۳,۵۰	۴۹,۶۸
T۰۴۸ Eh= -۵۶ pH=۱۱,۴۱	-۱,۵۷	بدون سولفید	F ۶۲۲۱	۷۵۰,۰	۲۷,۳۹	۰,۵۶۸	۰,۵۶	۲۶,۸۰	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۲۲	۱۷۴,۲	۲۸,۷۰	۱,۷۸۵	۰,۷۸	۲۳,۲۵	۲۴,۳۶	۷۲,۹۹
			T ۶۲۲۳	۵۷۵,۸	۲۶,۹۵	۰,۲۰۰	۰,۵۵	۲۷,۵۵	۷۵,۵۴	۲۷,۰۱

درصد جامد = ۲۰٪ - دور رتور = ۱۰۰۰ - کفساز = ۲ قطره MIBC - کلکتور مولیبدن = ۰/۶ گرم گازویئل - درجه حرارت پالپ = ۲۳ - هوای مصرفی = نیتروژن - آهک = ۴ گرم

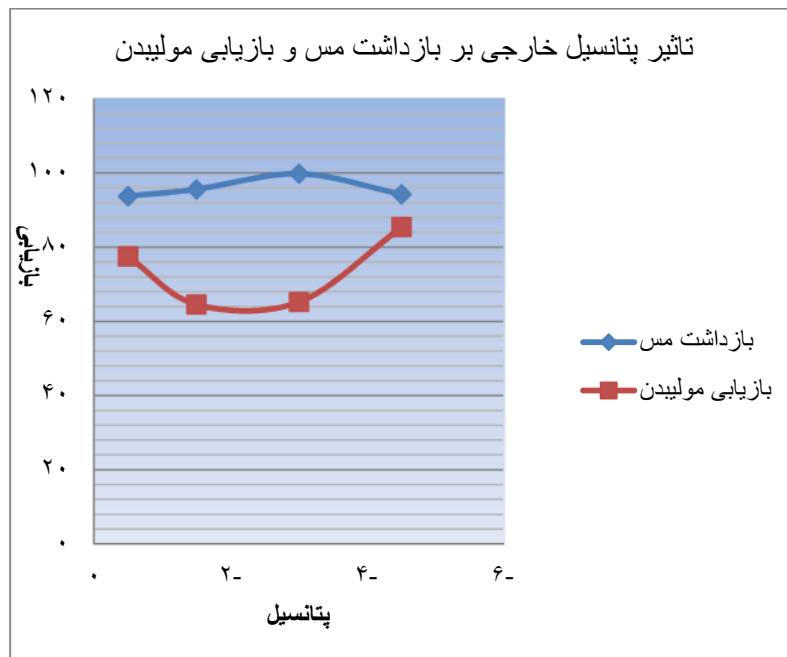


شکل ۳: بازداشت مس و بازیابی مولیبدن در پتانسیل های مختلف در غیاب سولفید سدیم

جدول ۲- تأثیر مقدار پتانسیل خارجی (پتانسیل منفی) بر بازداشت کانی های مس و بازیابی مولیبدن در حضور سولفید سدیم

شماره آزمایش	پتانسیل اعمالی	سولفید سدیم مصرفی	محصول	وزن گرم	عیار %				بازیابی %	
					Cu	Mo	CuO	Fe	Cu	Mo
T۰۴۹ Eh=-۳۷۰ pH=۱۱,۷۵	-۱,۵۷	۱۲gr	F ۶۲۲۴	۷۵۰,۰	۲۷,۷۷	۰,۵۷۷	۰,۶۳	۲۶,۷۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۲۵	۳۳,۴	۲۷,۳۱	۸,۳۶۵	۰,۸۳	۲۱,۶۲	۴,۳۸	۶۴,۵۶
			T ۶۲۲۶	۷۱۶,۶	۲۷,۷۹	۰,۲۱۴	۰,۵۶	۲۶,۷۷	۹۵,۶۲	۳۵,۴۴
T۰۵۰ Eh=-۵۷۲ pH=۱۲,۱۲	-۳,۰۷	۱۲gr	F ۶۲۲۷	۷۵۰	۲۶,۳۸	۰,۵۶۴	۰,۵۱	۲۵,۶۶	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۲۸	۴۱,۵	۲۴,۱۴	۶,۶۵	۰,۹۴	۲۱,۳۰	۵۰,۶۳	۶۵,۲۴
			T ۶۲۲۹	۷۰۸,۵	۲۷,۸۸	۰,۳۲۵	۰,۵۴	۲۶,۹۵	۹۹,۸۴	۴۲,۳۰
T۰۵۱ Eh=-۵۶۴ pH=۱۱,۷۶	-۴,۵۷	۱۲gr	F ۶۲۳۰	۷۵۰,۰	۲۸,۰۴	۰,۵۸۲	۰,۵۰	۲۶,۷۶	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۳۱	۵۱,۸	۲۳,۱۸	۷,۲۰	۰,۹۱	۲۱,۷۴	۵,۰۳	۸۵,۴۴
			T ۶۲۳۲	۶۹۸,۲	۲۸,۴۰	۰,۰۹۱	۰,۵۶	۲۶,۷۲	۹۴,۲۹	۱۴,۵۶
T۰۵۲ Eh=-۵۶۵ pH=۱۱,۶۴	-۰,۵۷	۱۲gr	F ۶۲۳۳	۷۵۰,۰	۲۸,۷۱	۰,۶۱۳	۰,۵۳	۲۶,۷۸	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۳۴	۵۴,۵	۲۴,۶۲	۶,۵۴	۰,۸۰	۲۰,۸۳	۶,۲۳	۷۷,۵۳
			T ۶۲۳۵	۷۰۵,۵	۲۸,۶۲	۰,۱۴۶	۰,۵۲	۲۷,۲۶	۹۳,۷۷	۲۲,۴۷

درصد جامد = ۲۰٪ - دور رتور = ۱۰۰۰ - کفساز = ۲ قطره MIBC - کلکتور مولیبدن = ۰/۶ گرم گازوئیل - درجه حرارت پالپ = ۲۳ - هوای مصرفی = نیتروژن - آهک = ۴ گرم

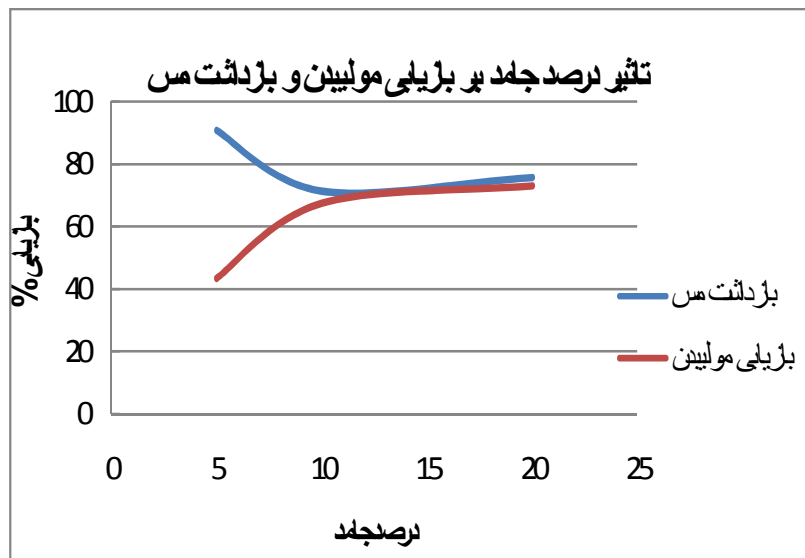


شکل ۴- بازداشت مس و بازیابی مولیبدن در پتانسیل های مختلف در حضور سولفید سدیم

جدول ۳: تأثیر درصد جامد بر بازداشت کانی های مس و بازیابی مولیبدن درغیاب سولفید سدیم

شماره آزمایش	پتانسیل اعمالی	سولفید سدیم مصرفی	محصول	وزن گرم	عیار %				بازیابی %	
					Cu	Mo	CuO	Fe	Cu	Mo
T۰۵۳ Eh= -۶۳ pH=۱۱,۶۷	-۱,۵۷	بدون سولفید P.D.=۵%	F ۶۲۳۶	۲۰۰,۰	۲۸,۵۱	۰,۶۱۶		۲۶,۶۲	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۳۷	۱۷,۵	۳۰,۶۰	۳,۰۵۷		۲۰,۴۲	۹,۳۹	۴۳,۴۳
			T ۶۲۳۸	۱۸۲,۵	۲۸,۳۰	۰,۳۸۲	۰,۵۴	۲۶,۶۶	۹۰,۶۱	۵۶,۵۷
T۰۵۴ Eh= -۶۴ pH=۱۱,۴۵	-۱,۵۷	بدون سولفید P.D.=۱۰%	F ۶۲۳۹	۴۰۰,۰	۲۸,۵۵	۰,۶۰۷	۰,۵۶	۲۶,۸۵	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۴۰	۱۲۱,۱	۲۷,۰۲	۱,۳۵۲	۰,۶۵	۲۴,۵۲	۲۸,۸۴	۶۷,۴۳
			T ۶۲۴۱	۲۷۸,۹	۲۹,۱۴	۰,۲۸۶	۰,۵۱	۲۷,۱۸	۷۱,۱۶	۳۲,۵۷
T۰۵۵ Eh= -۵۴ pH=۱۱,۷۵	-۱,۵۷	بدون سولفید P.D.=۱۵%	F ۶۲۴۲	۵۵۰,۰	۲۸,۴۷	۰,۵۹۸	۰,۵۸	۲۶,۸۶	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۴۳	۹۴,۷	۲۶,۹۵	۱,۷۴۶	۰,۶۸	۲۴,۰۱	۱۶,۱۵	۵۰,۲۷
			T ۶۲۴۴	۴۵۵,۳	۲۹,۱۱	۰,۳۵۹	۰,۵۲	۲۷,۶۲	۸۳,۲۵	۴۹,۷۳
T۰۴۸ Eh= -۵۶ pH=۱۱,۴۱	-۱,۵۷	بدون سولفید P.D.=۲۰%	F ۶۲۲۱	۷۵۰,۰	۲۷,۳۹	۰,۵۶۸	۰,۳۶	۲۶,۸۰	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
			C ۶۲۲۲	۱۷۴,۲	۲۸,۷۰	۱,۷۸۵	۰,۵۳	۲۳,۲۵	۲۴,۳۶	۷۲,۹۹
			T ۶۲۲۳	۵۷۵,۸	۲۶,۹۵	۰,۲۰۰	۰,۳۶	۲۷,۵۵	۷۵,۵۴	۲۷,۰۱

دور رتور=۱۴۰۰-کفساز=۲قطرهMIBC- کلکتور مولیبدن =۰/۶ گرم گازویئل-درجه حرارت پالپ=۲۳-هوای مصرفی=نیتروژن-آهک=۴گرم



شکل ۵: تأثیر درصد جامد بر بازداشت و بازیابی مولیبدن

شده بود. بر اساس بررسی‌های به‌عمل آمده و براساس نتایج آزمایش‌ها مشخص شد که این دریچه‌ها کارایی لازم را نداشته و ضریب نفوذ جریان مابین بخش الکترولیتی و فلوتاسیون کم است. بنابراین در سلول جدید این دریچه‌ها با یک صفحه کامل تعویض شدند. برای بررسی اثر این غشا بر ضریب نفوذ جریان آزمایش ساده‌ای ترتیب داده شد. به این صورت که پس از آماده‌سازی سلول فلوتاسیون

۴-۴- تأثیر غشای تراوای یونی بر بازداشت کانی های مس

در سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی طراحی شده ارتباط بخش الکترولیتی و فلوتاسیون به توسط غشای تراوای یونی انجام می‌شود. در این تحقیق از صفحات سرامیکی به عنوان غشای تراوای یونی استفاده شده است. در سلول اولیه این غشا به صورت دریچه‌هایی به قطر ۳ سانتیمتر در نظر گرفته

تنظیم پتانسیل پالپ از اعمال پتانسیل خارجی استفاده می‌شود. درمقیاس آزمایشگاهی این کار با استفاده از یک دستگاه پتانسیواستات انجام می‌شود. روش اعمال پتانسیل خارجی هر چند هنوز کاربرد صنعتی پیدا نکرده است ولی به طور گسترده در مقیاس آزمایشگاهی و به صورت تحقیقاتی در دست بررسی است. این روش هم‌اکنون توسط نگارنده در مجتمع مس سرچشمه برای بازداشت کانی‌های مس در کنسانتره تجمعی مس مولیبدن به روش فلوتاسیون - الکتروشیمیایی انجام شده است. در روش کنترل پتانسیل پالپ با اعمال پتانسیل خارجی فعل‌انفعالات و واکنش‌های اکسیداسیون احیاء در محیط پالپ کنترل و به سمت دلخواه یعنی به سمت تشکیل مواد آبدوست یا آبران هدایت می‌شود تا با رسوب این مواد بر روی سطح کانی‌های مورد نظر آنها را بازداشت یا شناور کنند. (در حقیقت این مواد نقش کلکتور را به عهده می‌گیرند). کنترل پتانسیل در این روش با استفاده از الکترودهای کار و کمکی انجام می‌شود. خصوصیات الکترودهای کار که معمولاً پتانسیل روی آنها اعمال می‌شود باید به گونه‌ای باشد که امکان نفوذ و گسترش جریان و در نتیجه پتانسیل در سراسر محیط پالپ فراهم شود. مناسب - ترین الکترودها برای این کار از نظر جنس الکترودهای فلزات نجیب و به خصوص پلاتین است البته از الکترودهای گرافیتی هم می‌توان استفاده کرد. برای افزایش ضریب نفوذ جریان شکل الکترودها باید صفحه‌ای باشد تا احتمال برخورد ذرات کانی با آن به حداکثر ممکن برسد. در این پژوهش از الکترودهای پلاتین و صفحات استیل و صفحات گرافیتی استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش با هر یک از این الکترودها در جداول ۴ و ۵ و اشکال ۶ و ۷ درج شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر چند استفاده از الکترودهای پلاتینی نتایج بهتر و قابل قبول‌تری را ارائه می‌کنند ولی اگر ملاحظات اقتصادی را در نظر بگیریم الکترودهای گرافیتی با توجه به کارایی و قیمت مناسب نسبت به الکترودهای پلاتینی ارجح‌تر است. ایده استفاده از بدنه سلول و رتور نیز در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج خوبی داشته است. این ایده در صنعتی کردن فرضیه فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی می‌تواند مد نظر قرار گیرد.

الکتروشیمیایی و اعمال پتانسیل روی الکترودها کار و برقراری جریان، الکترودها E_h در داخل بخش فلوتاسیون حرکت داده - شد. زمانیکه الکترودها به غشای تراوای یونی نزدیک می‌شد پتانسیل به مقادیر پیش‌بینی شده نزدیک می‌شد و زمانیکه از این غشا دور می‌شد پتانسیل به‌طور ناگهانی افزایش می‌یافت (آزمایش‌ها در پتانسیل‌های منفی انجام می‌شد). این آزمایش در هر دو حالت یعنی در سلول با غشای به قطر ۳ سانتیمتر و در سلول با صفحه جداکننده سرامیکی انجام شد. در سلول با غشای به قطر ۳ سانتیمتر نوسانات بسیار شدید بود، درحالی‌که در سلول با دیواره سرامیکی (به عنوان غشای تراوای یونی) این نوسانات بسیار کم بود.

۴-۵- تأثیر نوع الکترودها بر بازداشت مس

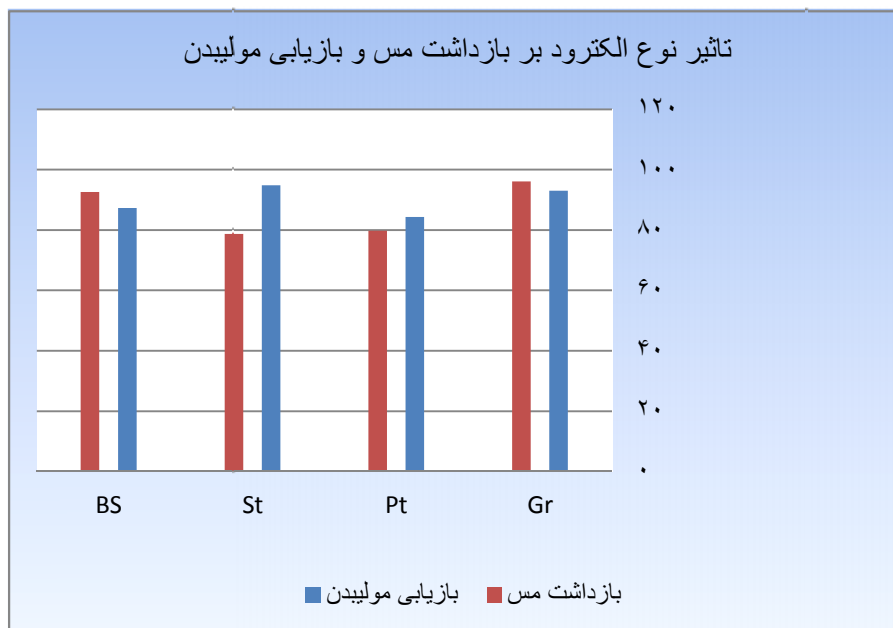
الکترودها به طور مستقیم در واکنش‌های الکتروشیمیایی نقش ندارند ولی اگر فرآیندهای الکتروشیمیایی را یک سیستم ترمودینامیکی در نظر بگیریم الکترودها هم می‌توانند واسطه اعمال انرژی به سیستم باشند و هم می‌توانند به عنوان یک حسگر نشان‌دهنده وضعیت تعادل ترمودینامیکی سیستم باشند. اگر در نظر باشد که یک پتانسیل خارجی به سلول فلوتاسیون الکتروشیمیایی اعمال شود، معمولاً این کار توسط الکترودها انجام می‌شود. محل قرارگیری، شکل و جنس الکترودها از جمله عواملی است که بر عملکرد ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی سیستم‌های در دست مطالعه تأثیرگذار است. شکل الکترودها یک عامل بسیار مهم در اندازه‌گیری E_h است.

زمانی که واسطه پایش محلول باشد تأثیر شکل الکترودها بر مقادیر E_h اندازه‌گیری شده ناچیز است. ناتراجان و ایواساکی^{۱۲} در سال ۱۹۷۰ گزارش کرده‌اند که شکل الکترودها بر مقادیر پتانسیل اکسیداسیون احیاء اندازه‌گیری شده در محلول تأثیر ندارد. نتایج مربوط به مطالعات با هر سه نوع الکترودها دیسکی، سوزنی و کروی مشابه و یکسان بوده است. زمانی که واسطه پایش پالپ باشد، مقادیر E_h اندازه‌گیری شده از شکل الکترودها تأثیر می‌پذیرد. الکترودها که احتمال برخورد ذرات با آن بیشتر است مقادیر پتانسیل نزدیک‌تری را به پتانسیل سطح ذره نشان می‌دهد. در مطالعات ولتامتری و آمپرمتری شکل الکترودها تأثیر بسیار زیادی بر نتایج دارد. زیرا ضریب نفوذ جریان به‌خصوص در مطالعات فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی تابع سطح مقطع الکترودها است. نگارنده در آزمایش‌های فلوتاسیون الکتروشیمیایی با اعمال پتانسیل خارجی در مجتمع مس سرچشمه این مسئله را مشاهده و گزارش کرده است. برای

جدول ۴: تأثیر جنس الکتروود بر بازداشت کانی های مس و بازیابی مولیبدن در حضور سولفید سدیم

شماره آزمایش	پتانسیل اعمالی	سولفید سدیم مصرفی	محصول	وزن گرم	عیار %				بازیابی %	
					Cu	Mo	CuO	Fe	Cu	Mo
T.۰۶۰ Eh=-۴۵۲ pH=۱۱,۶۷	-۳,۰۷	۶gr صفحه گرافیتی	F ۶۲۵۶	۷۵۰,۰	۲۷,۰۹	۰,۵۸۵	۰,۵۸	۲۶,۳۹	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۵۷	۶۴,۹	۲۱,۹۸	۶,۵۰	۰,۷۸	۲۰,۷۴	۷,۰۲	۹۶,۱۵
			T ۶۲۵۸	۶۸۵,۱	۲۷,۵۷	۰,۰۲۵	۰,۴۴	۲۶,۵۹	۹۲,۹۸	۳,۸۵
T.۰۶۱ Eh=-۴۵۸ pH=۱۱,۴۵	-۳,۰۷	۶gr پلاتین تیغه ای	F ۶۲۵۹	۷۵۰,۰	۲۷,۳۵	۰,۵۸۹	۰,۶۰	۲۶,۴۳	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۶۰	۱۱۷,۹	۲۷,۶۱	۲,۹۹	۰,۷۴	۲۵,۴۲	۱۵,۸۷	۷۹,۸۰
			T ۶۲۶۱	۶۳۲,۱	۲۷,۳۰	۰,۱۴۱	۰,۴۸	۲۶,۹۳	۸۴,۱۳	۲۰,۲۰
T.۰۶۲ Eh=-۵۱۲ pH=۱۱,۷۵	-۳,۰۷	۶gr صفحه استیل	F ۶۲۶۲	۷۵۰,۰	۲۷,۳۷	۰,۵۷۴	۰,۵۳	۲۶,۶۰	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۶۳	۴۵,۸	۲۲,۹۷	۷,۴۰۰	۰,۸۱	۲۱,۳۵	۵,۱۲	۷۸,۷۳
			T ۶۲۶۴	۷۰۴,۲	۲۷,۶۶	۰,۱۳۰	۰,۴۵	۲۶,۶۴	۹۴,۸۸	۲۱,۲۷
T.۰۶۳ Eh=-۵۷۲ pH=۱۱,۴۱	-۳,۰۷	۶gr بدنه سلول رتور استاتور	F ۶۲۶۵	۷۵۰,۰	۲۷,۸۵	۰,۶۰۷	۰,۵۰	۲۶,۶۱	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۶۶	۱۱۲,۴	۲۳,۶۴	۳,۷۵	۰,۷۵	۲۳,۶۰	۱۲,۷۰	۹۲,۵۸
			T ۶۲۶۷	۶۳۷,۶	۲۸,۶۰	۰,۲۰۳	۰,۴۵	۲۶,۷۷	۸۷,۳	۷,۴۲

درصد جامد = ۲۰٪ - دور رتور = ۱۰۰۰ - کفساز = ۲ قطره MIBC - کلکتور مولیبدن = ۰/۶ گرم گازوئیل - درجه حرارت پالپ = ۲۳ - هوای مصرفی = نیتروژن - آهک = ۴ گرم



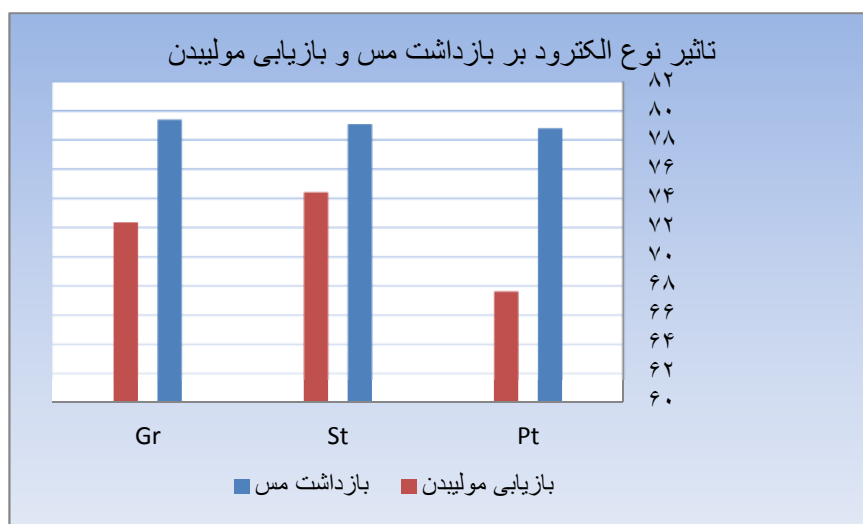
(Gr گرافیت) (Pt پلاتین) (St استیل) (BS بدنه سلول و استاتور)

شکل ۶: تأثیر نوع الکتروود بر بازداشت مس و بازیابی مولیبدن در حضور سولفید سدیم

جدول ۵: تأثیر جنس الکتروود بر بازداشت کانی های مس و بازبایی مولیبدن در غیاب سولفید سدیم

شماره آزمایش	پتانسیل اعمالی	سولفید سدیم مصرفی	محصول	وزن گرم	عیار %				بازبایی %	
					Cu	Mo	CuO	Fe	Cu	Mo
T۰۶۴ Eh= -۵۵ pH=۱۱,۹۱	-۳,۰۷	بدون سولفید سدیم پلاتین تیغه ای	F ۶۲۶۸	۷۵۰,۰	۲۶,۶۷	۰,۶۲۳	۰,۵۲	۲۸,۱۲	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۶۹	۱۷۰,۸	۲۴,۸۴	۱,۸۵۰	۰,۵۸	۲۷,۱۹	۲۱,۲۱	۶۷,۶۳
			T ۶۲۷۰	۵۷۹,۲	۲۷,۰۱	۰,۲۶۱	۰,۵۶	۲۶,۹۷	۷۸,۸	۳۲,۳۷
T۰۶۵ Eh= -۴۶ pH=۱۱,۷۰	-۳,۰۷	بدون سولفید سدیم صفحه استیل	F ۶۲۷۱	۷۵۰,۰	۲۶,۸۲	۰,۵۷۵	۰,۵۲	۲۷,۴۲	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۷۲	۱۸۸,۸	۲۲,۲۸	۱,۷۰	۰,۵۹	۲۴,۷۸	۲۰,۹۱	۷۴,۴۲
			T ۶۲۷۳	۵۶۱,۲	۲۷,۰۱	۰,۱۹۶	۰,۵۷	۲۶,۴۷	۷۹,۰۹	۲۵,۵۸
T۰۶۶ Eh=-۷۵ pH=۱۱,۷۵	-۳,۰۷	بدون سولفید سدیم صفحه گرافیتی	F ۶۲۷۴	۷۵۰,۰	۲۶,۵۳	۰,۵۸۴	۰,۵۴	۲۷,۲۹	۱۰۰,۰	۱۰۰,۰
			C ۶۲۷۵	۱۶۸,۵	۲۴,۳۴	۱,۸۸۱	۰,۷۵	۲۸,۰۳	۲۰,۶۱	۷۲,۳۶
			T ۶۲۷۶	۵۸۱,۵	۲۷,۳۲	۰,۱۷۸	۰,۵۶	۲۶,۰۷	۷۹,۳۹	۲۳,۶۴

درصد جامد = ۲۰٪ - دور رتور = ۱۰۰۰ - کفساز = ۲ قطره MIBC - کلکتور مولیبدن = ۰/۶ گرم گازوئیل - درجه حرارت پالپ = ۲۳ - هوای مصرفی = نیتروژن - آهک = ۴ گرم



(Gr گرافیت) (Pt پلاتین) (St استیل)

شکل ۷: تأثیر نوع الکتروود بر بازداشت مس و بازبایی مولیبدن در غیاب سولفید سدیم

کردن آنها کارهایی است که در ادامه باید انجام شود. نگارنده در ادامه کار و در مقالات آتی در این خصوص دستاوردهای بیشتری را ارائه خواهد کرد.

[۱] مفیدی جمشید، ۱۳۷۷، اصول الکتروشیمی

(الکتروشیمی ۱)، انتشارات دانشگاه تهران

[۲] عبداللهی محمود، "تعیین جایگزین مناسب برای سولفید سدیم جهت مصرف در کارخانه پریکار کنی مولیبدن مجتمع مس سرچشمه"، دانشگاه تربیت مدرس،

مجتمع مس سرچشمه، گزارش فنی، ۱۳۷۸

[۳] Jones, M.H., Woodcock, J.T., ۱۹۷۱. *Some possible method for control of chemical environment in flotation plants. Proc. Symp. Automatic Control System in Mineral Processing Plants*, Brisbane,

۶- تشکر و قدردانی

از مجتمع مس سرچشمه به دلیل تأمین منابع مالی تحقیق و مدیران بخش‌های مختلف واحد تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه به دلیل همکاری مستقیم در انجام تحقیق، در وهله اول سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- [۱۴] Ferihan, G., ۲۰۰۲, *Effect of pH on Pulp Potential and Sulphide Mineral Flotation*. ,Turkish j. Eng. Env. Sci. ۲۶(۲۰۰۲), ۳۰۹-۳۱۸
- [۱۵] Natarajan K.A. Iwasaki I., ۱۹۷۲, *Eh/pH Response of Noble Metal and Sulphide Mineral Electrode*", AIME, Transactions, ۲۵۲, ۴۳۷-۴۳۹,
- [۱۶] Gebhardt, J.E. Shedd, K.B., ۱۹۸۸, *Efect of Solution Composition on Redox Potentials of Pt and Sulphide Mineral Electrodes*", Proc. Int. Sym. on Electrochemistry in Mineral and Metal Processing II, (eds. Richardson P.E. and Woods R.), Electrochemical Society, ۸۴-۱۰۰,
- [۱۷] Ross, V.E., Van Deventer, J.S.J., ۱۹۸۵, *The Interactive Efects of the Sulphite Ion, pH and Dissolved Oxygen on the Flotation of Chalcopyrite and Galena from Black Mountain Ore*", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, ۸۵, ۱۱۳-۲۱.
- [۱۸] Ahmed, S.M., ۱۹۷۸, *Electrochemical Studies of Sulphides in the Electrocatalytic Activity of Galena, Pyrite and Cobalt Sulphide for Oxygen Reduction in Relation to Xanthate Adsorption and Flotation*", Int. J. Miner. Proc., ۵, ۱۶۳-۱۷۴.
- [۱۹] Johnson, N.W., Munro P.D., ۱۹۸۸. *Application of electrochemical concepts to four sulfide flotation separations*. In: The Aus IMM Bulletin and Proceedings, ۲۹۳, ۳, ۵۳-۵۸.
- [۲۰] Senior, G.D., Trahar, W.J., ۱۹۹۱. *The influence of metal hydroxides and collector on the flotation of chalcopyrite*. Int. J. Miner. Process. ۳۳, ۳۲۱- ۳۴۱.
- [۲۱] Grano, S.R., Sollaart, M., Skinner, W., Prestidge, C.A., Ralston, J., ۱۹۹۷. *Surface modifications in the chalcopyrite - sulphite ion system: ۱. Collectorless flotation, XPS and dissolution study*. Int. J. Miner. Process. ۵۰, ۱- ۲۶.
- [۲۲] Arbiter, N., Gebhardt, J.E., ۱۹۹۲. *Requirements for industrial collectorless flotation of sulfide minerals*. In: Barahona, C. (Eds.), Mineral Processing and Process Control. Copper ۸۷, vol. ۲. Universidad de Chile, Santiago, pp. ۱۵۵-۱۶۹.
- [۲۳] Gardner, J.R., Woods, R., ۱۹۷۹. *An electrochemical investigation of the natural floatability of chalcopyrite*. International Journal of Mineral Processing ۶, ۱-۱۶.
- [۲۴] Panayatov, V., Kivacher, K., Koonal, G., Dolgan, Z., Dincer, H., Bulut, G., Panayotova, M., Ninova, V., ۲۰۰۰. Australia. Aust. IMM, Parkville, Australia, pp ۲۵۳-۲۷۲
- [۴] Ralston, J., ۱۹۹۱, *Eh and its consequences in Sulphide mineral flotation*. Miner. Eng. ۴, ۸۵۹-۸۷۸
- [۵] Woods, A., ۱۹۷۱, *The oxidation of ethyl xanthate on platinum, gold, copper, and galena electrodes: relation to mechanism of mineral flotation*. J. Phys. Chem. ۷۵, ۳۵۴-۳۶۲.
- [۶] Kowal, A., Pomianowski, A., ۱۹۷۳. *Cyclic voltametry of ethyl xanthate on a natural copper sulfide electrode*. J. Electroanal. Chem. ۴۶, ۴۱۱-۴۲۰
- [۷] Chander, S., Fuerstenau, D.W., ۱۹۷۴, *The effect of potassium diethyldithiophosphate on the electrochemical properties of platinum, copper, and sulfide in aqueous solutions*. J. Electroanal. Chem. ۵۶, ۲۱۷-۲۲۴
- [۸] Chander, S., Fuerstenau, D.W., ۱۹۸۳, *Electrochemical flotation separation of Chalcocite from Molybdenite*. Int. J. Miner. Process. ۱۰, ۸۹-۹۴
- [۹] Guy, P.J., Trahar, W.J., ۱۹۸۵. *The effect of oxidation and mineral interaction on sulphide flotation*. In: Forssberg, K.S.E. (Ed). Flotation of Sulphide Minerals, The Netherlands, pp. ۹۱-۱۱۰
- [۱۰] Gebhardt, J.E., Dewsnap, N.F., Richardson, P.E., ۱۹۸۵, *Electrochemical conditioning of a mineral particle bed electrode for flotation*. Rep. Invest. -U.S. Bur. Mines (R1 ۸۹۵۱), ۱۴ pp.).
- [۱۱] Gebhardt, J.E., Richardson, P.E., ۱۹۸۷, *Differential flotation of chalcocite - pyrite particle bed by electrochemical control*. Miner. Metall. Process. ۴, ۱۴۰-۱۴۵.
- [۱۲] Guohua, G., Yuehua, H., Guanzhou, Q., Dianzuo, W., ۲۰۰۰, *Potential control flotation of galena and its industrial application*. In: Woods, R., Doyle, F.M. (Eds), Pros. Int. Symp. Electrochemistry in Mineral and Metal processing V. Electrochem. Soc. Pennington, NJ, pp. ۱۳۱-۱۴۹, PV ۲۰۰۰-۱۴
- [۱۳] Uribe-Salas, A., Martinez-Cavazos, T.E., Nava-Alonso, F.C., Mendez-Nonell, J., Lara-Valenzuela, C., ۲۰۰۰. *Metallurgical improvement of lead/copper flotation stage by pulp potential control*. Int. J. Miner. Process. ۵۹, ۶۹-۸۳.

Technology for copper-zinc flotation by electrochemical treatment. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, vol. B1b, pp. 103-108-

[۲۵] Guo, H., Yen, W.T., ۲۰۰۳. *Pulp potential and floatability of chalcopyrite.*, Minerals Engineering. ۱۶ (۳), ۲۴۷-۲۵۷.

-
- ^۱ Electrochemical Flotation
 - ^۲ Electroflotation
 - ^۳ Aeroflotation
 - ^۴ Column flotation
 - ^۵ Rose and Vondeventer
 - ^۶ Ione Cromatography
 - ^۷ XPS
 - ^۸ Time Of Secount Fly Electron
 - ^۹ Working electrod
 - ^{۱۰} Counter electrod
 - ^{۱۱} Reference Electrode
 - ^{۱۲} Natarajan and Iwasaki