

گوگردزدایی سنگ آهن گل گهر با کنترل الکتروشیمیایی پالپ

حسین فرجی^۱؛ بیژن طاهری^{۲*}؛ علی اکبر عبدالله زاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، faraji1380@gmail.com

۲- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، bijan.taheri@kashanu.ac.ir

۳- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشگاه کاشان، abdzad@kashanu.ac.ir

(دریافت ۱۲ اسفند ۱۳۹۵، پذیرش ۱۷ شهریور ۱۳۹۶)

چکیده

در خط سولفورزدایی مجتمع معدنی سنگ آهن گل گهر واقع در شهر سیرجان، پیریت به صورت فلوتاسیون معکوس و با استفاده از امیل گزنتات پتاسیم (KAX) به عنوان کلکتور و MIBC به عنوان کف ساز در pH طبیعی و $Eh=50-100\text{mV}$ (Ag/AgCl) حذف می شود که نتیجه آن کاهش عیار گوگرد در کنسانتره سنگ آهن از ۰/۸۵ درصد تا میزان ۰/۲ تا ۰/۳ درصد است. اما حداکثر مقدار مجاز گوگرد ۰/۱ درصد است که این امر بیان گر عدم شرایط بهینه فلوتاسیون پیریت می باشد. عامل اصلی فلوتاسیون پیریت با استفاده کلکتور گزنتات، تشکیل یک لایه آبران از دی گزنتوژن در سطح پیریت می باشد که طی یک فرآیند الکتروشیمیایی روی سطح پیریت تشکیل می شود. بنابراین با مطالعات الکتروشیمیایی می توان این فرآیند را بررسی کرده و پتانسیل بهینه برای فلوتاسیون پیریت را به دست آورد. در این تحقیق ابتدا مطالعات الکتروشیمیایی با روش ولتامتری چرخه ای انجام شده و سپس با توجه به نتایج، آزمایش های فلوتاسیون طراحی و انجام شده است. مطالعات الکتروشیمیایی پیریت با روش ولتامتری چرخه ای در حضور و غیاب کلکتورهای اتیل گزنتات پتاسیم (KEX) و امیل گزنتات پتاسیم (KAX)، در pH های ۴ و ۷ و ۹ انجام شد و محدوده مناسب پتانسیل برای فلوتاسیون پیریت با کلکتورهای KEX و KAX در $pH=4$ در حدود $50-65\text{mV}$ در مقیاس (Ag-AgCl)، در $pH=7$ حدود $400-550\text{mV}$ (Ag/AgCl) و در $pH=9$ حدود $250-350\text{mV}$ (Ag/AgCl) به دست آمد. به منظور بررسی رفتار شناورسازی پیریت در محدوده های الکتروشیمیایی مذکور، ۲۴ آزمایش فلوتاسیون با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح-پاسخ (روش CCD) طراحی و انجام شد. در تمام آزمایش ها میزان مصرف کلکتور و کف ساز مشابه شرایط فعلی کارخانه و به میزان 100g/t در نظر گرفته شد. در شرایط بهینه نرم افزار، $pH=5$ ، $Eh=380\text{mV}$ (Ag/AgCl) و کلکتور از نوع KAX و بازیابی و عیار گوگرد به ترتیب ۳۳/۵ و ۸۹/۹ درصد به دست آمد. در شرایط مناسب تر برای عملیات صنعتی فلوتاسیون یعنی در $pH=6$ (Ag/AgCl) و $Eh=300\text{mV}$ و کلکتور KAX کاهش عیار گوگرد در کنسانتره سنگ آهن به حد مجاز ۰/۱ درصد به دست آمد که به عنوان شرایط بهینه الکتروشیمیایی فلوتاسیون پیریت پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی

پیریت، فلوتاسیون، سولفورزدایی، گزنتات، ولتامتری چرخه ای، روش سطح-پاسخ

۱- مقدمه

تشکیل می‌شود و باعث آبران شدن آن می‌شود. واکنش پیریت با گزنتات در pHهای اسیدی تا خنثی به خوبی انجام می‌شود و بازیابی فلوتاسیون پیریت مناسب است [۷-۹].

با توجه به این که پارامتر پتانسیل پالپ نقش مهم و مؤثری در تشکیل دی‌گزنوتوزن و فلوتاسیون پیریت دارد، بررسی آن در مدار سولفورزدایی معدن سنگ آهن گل‌گهر ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه بهینه‌سازی خط سولفورزدایی شرکت مذکور انجام شده [۱۴-۱۰] اما در رابطه با رفتار الکتروشیمیایی کانی پیریت در حضور کلکتورها به-خصوص در حضور امیل‌گزنتات پتاسیم و شرایط بهینه حذف پیریت از کنسانتره سنگ آهن از نظر پارامترهای الکتروشیمیایی (کنترل Eh و pH) مطالعه‌ای انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق مطالعات ولتامتری چرخه‌ای پیریت با استفاده از الکتروود نقره-کلرید نقره در pHهای مختلف در حضور امیل‌گزنتات پتاسیم (KAX) و اتیل‌گزنتات پتاسیم (KEX) و عدم حضور آنها بررسی شده است و پتانسیل بهینه به‌دست آمده است. سپس به منظور بررسی رفتار شناورسازی پیریت در محدوده‌های الکتروشیمیایی مذکور، ۲۴ آزمایش فلوتاسیون با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح-پاسخ (روش CCD) با در نظر گرفتن pH و Eh به‌عنوان متغیرهای ورودی عددی و کلکتورهای KAX و KEX به‌عنوان متغیرهای ورودی کیفی و میزان بازیابی و عیار گوگرد بعنوان پاسخ، طراحی و انجام شده و در ادامه با انجام آزمایش‌های تکمیلی، شرایط بهینه الکتروشیمیایی فلوتاسیون پیریت پیشنهاد شده است.

۲- تجهیزات و مواد شیمیایی

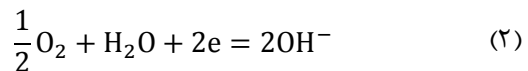
۲-۱- مواد شیمیایی و نمونه

در این تحقیق از نمونه‌های بلوری پیریت با خلوص بالا برای مطالعات ولتامتری استفاده شد که آنالیز شیمیایی و مینرالوژیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است. این نمونه‌ها با استفاده از آسیای دیسکی به ابعاد زیر ۱۰۰ میکرون رسانده شده است.

نمونه مورد استفاده برای آزمایش‌های فلوتاسیون، کنسانتره هماتیت واحد فرآوری شرکت گل‌گهر قبل از سولفورزدایی می‌باشد. بدین منظور از بخش سولفورزدایی خط بازیابی باطله خشک (DTP)، قبل از ورود به آماده‌ساز، در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه‌ای، پنج بار نمونه‌گیری شد که آنالیز شیمیایی و مینرالوژیکی آن در جدول (۲) و منحنی دانه‌بندی آن در شکل

مجتمع معدنی سنگ آهن گل‌گهر واقع در شهر سیرجان یکی از قطب‌های اصلی تأمین‌کننده مواد اولیه صنایع فولاد کشور محسوب می‌شود. عمده‌ترین مشکل این مجتمع وجود گوگرد به شکل کانی پیریت در کانسنگ این معدن است که همراه کنسانتره آهن بازیابی می‌شود. در خط سولفورزدایی این شرکت، پیریت به‌صورت فلوتاسیون معکوس و با استفاده از امیل‌گزنتات پتاسیم (KAX) به‌عنوان کلکتور و MIBC به‌عنوان کف‌ساز در pH طبیعی و $Eh = 50 - 100 \text{ mV}$ حذف می‌شود که نتیجه آن کاهش عیار گوگرد در کنسانتره سنگ آهن از ۰/۸۵ درصد تا میزان ۰/۲ تا ۰/۳ درصد است [۱]. اما حداکثر مقدار مجاز گوگرد، ۰/۱ درصد می‌باشد که این امر بیانگر عدم شرایط بهینه فلوتاسیون پیریت است.

عامل اصلی فلوتاسیون پیریت با استفاده از کلکتور گزنتات، تشکیل یک لایه آبران از دی‌گزنوتوزن در سطح پیریت است [۲]. دی‌گزنوتوزن طی یک فرآیند الکتروشیمیایی به‌وسیله اکسایش آندی یون گزنتات به‌همراه احیاء کاتدی اکسیژن، طبق واکنش‌های (۱) و (۲) روی سطح پیریت تشکیل می‌شود و چون پیریت از نظر الکتروشیمیایی یک ماده نیمه رسانا است، انتقال الکترون درون جامد صورت می‌گیرد [۳].



بنابراین فرآیند تشکیل دی‌گزنوتوزن را می‌توان با روش‌های الکتروشیمیایی بررسی کرد. یکی از روش‌های الکتروشیمیایی پر کاربرد در این زمینه، ولتامتری چرخه‌ای (CV) است. با این روش می‌توان واکنش‌های اکسایش و کاهش در سطح کانی را پیش‌بینی کرده و شرایط بهینه پتانسیل پالپ برای تشکیل دی‌گزنوتوزن را به‌دست آورد.

مطالعات نشان داده که در شرایط مختلف محیط از نظر pH و Eh، محصولات اصلی اکسیداسیون الکتروشیمیایی پیریت شامل Fe^{2+} ، Fe^{3+} ، S، SO_3^{2-} ، SO_4^{2-} است [۴،۵]. ولتامتری چرخه‌ای پیریت در غیاب کلکتور و در pH=۵ نشان داده که در پتانسیل‌های بالای ۲۰۰mV سطح پیریت به $Fe(OH)_3$ و SO_4^{2-} اکسید می‌شود [۶،۷] اما با حضور امیل‌گزنتات پتاسیم یک لایه از دی‌گزنوتوزن روی سطح پیریت

(۱) ارائه شده است.

جدول ۱: آنالیزهای شیمیایی و مینرالوژیکی نمونه پیریت

نوع کانی		پیریت	کالکوپیریت	غیره			
ترکیب شیمیایی		FeS ₂	CuFeS ₂	-			
درصد وزنی		۹۸/۱۸	۰/۰۱	۱/۸۱			
آنالیز شیمیایی (%)							
غیره	S	SiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CuO	Fe	Cu
۰/۲۷	۵۲/۳۹	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۶۸	۰/۰۰	۴۵/۸۲	۰/۲۸

جدول ۲: آنالیزهای شیمیایی و مینرالوژیکی نمونه کنسانتره هماتیت

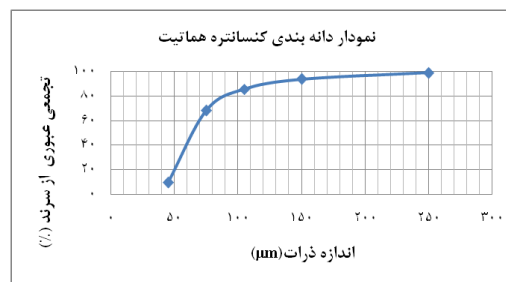
نوع کانی		هماتیت	منیتیت	گوتیت	کلسیت	غیره			
ترکیب شیمیایی		Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeOOH	CaCO ₃	-			
درصد وزنی		۷۹/۶۵	۴/۳۲	۷/۴۵	۶/۲۳	۲/۳۵			
آنالیز شیمیایی (%)									
غیره	S	TiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃
۳/۱۸	۰/۸۵	۰/۴۲	۰/۷۵	۴/۳۴	۰/۹۵	۰/۶۲	۲/۰۸	۰/۷۸	۸۵/۴۳

الکترومد مرجع^۴، انجام شده است. لازم به ذکر است که برای بیان پتانسیل بر حسب الکترومد مرجع استاندارد هیدروژن (SHE)، باید مقادیر اندازه‌گیری شده با عدد ۲۲۸mV جمع شود. برای ساخت الکترومد کانی، طبق روش ارائه شده توسط گوکتپه^۵ [۱۵] از بلورهای پودر شده پیریت با خلوص بالا و پودر گرافیت خالص به نسبت ۲۰٪ پودر کانی و ۸۰٪ پودر گرافیت و پارافین به عنوان ماده چسباننده^۶ برای تهیه الکترومد خمیر کربنی^۷ استفاده شد.

برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر (مدل WTW) و برای تنظیم pH و جلوگیری از تغییرات آن در برابر Eh، از محلول‌های بافر پایه فسفات، تهیه شده از اسید فسفریک (H₃PO₄) و سود سوزآور (NaOH) استفاده شد.

در همه آزمایش‌های ولتامتری در این تحقیق، روبش پتانسیل از -۱۰۰۰mV تا +۱۰۰۰mV در جهت جریان آندیک و سپس روبش عکس در جهت جریان کاتدیک و با نرخ ۱۰۰mV/s، اعمال شده است و نتایج روبش سوم به دلیل تکرارپذیری ارائه شده است. آزمایش‌ها با حضور کلکتورهای KEX و KAX به میزان یک گرم برلیتر و عدم حضور آن‌ها و در pHهای ۴ و ۷ و ۹ انجام شده است.

آزمایش‌های فلوتاسیون در یک سلول به حجم دو لیتر و با ماشین فلوتاسیون آزمایشگاهی انجام شد. در این تحقیق

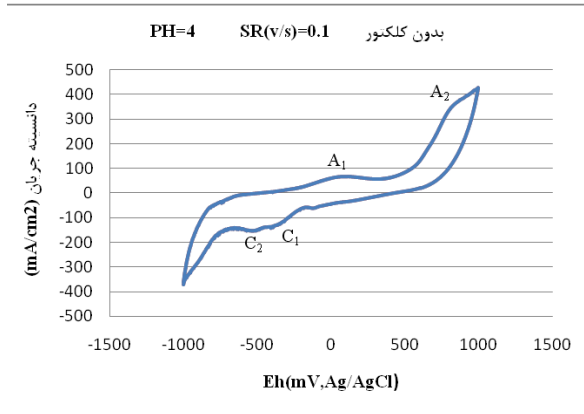


شکل ۱: منحنی دانه‌بندی نمونه کنسانتره هماتیت

مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق شامل کلکتورهای اتیل‌گزنات‌پتاسیم (KEX) و امیل‌گزنات‌پتاسیم (KAX)، اسید فسفریک (H₃PO₄) و سودسوزآور (NaOH) برای تهیه محلول‌های بافر و پارافین و گرافیت با خلوص بالا، برای تهیه الکترومد کار (پیریت) است. همچنین از اسید سولفوریک (H₂SO₄) جهت تنظیم pH و آب اکسیژنه (H₂O₂) و سولفید سدیم (Na₂S) برای کنترل پتانسیل پالپ استفاده شد.

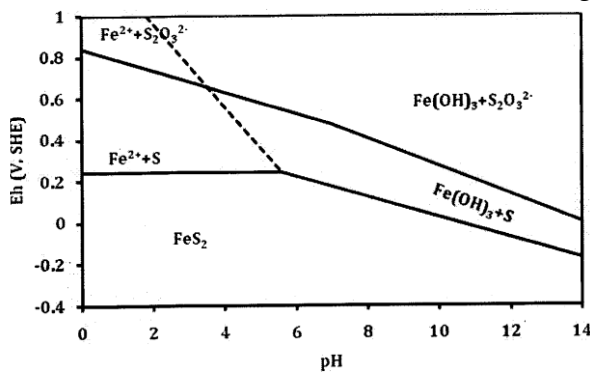
۲-۲ روش کار و تجهیزات مورد استفاده

مطالعات ولتامتری با استفاده از دستگاه پتانسیوستات (مدل SAMA) متصل به کامپیوتر و به همراه نرم‌افزار مربوطه و با استفاده از یک سلول سه الکترومدی شامل الکترومد کانی (پیریت) به عنوان الکترومد کار^۲، الکترومد پلاتین به عنوان الکترومد مخالف^۳ و الکترومد Ag/AgCl به عنوان

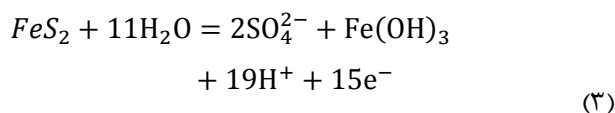


شکل ۲: ولتاموگرام چرخه ای پیریت در $\text{pH}=4$ و نرخ روبش 100 mV/s در غیاب کلکتور

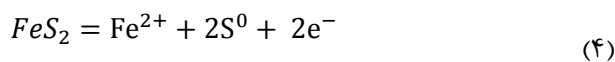
در روبش آندیک پیک‌های اکسیداسیون A_1 و A_2 و در روبش کاتدیک پیک‌های احیای C_1 و C_2 مشاهده می‌شود. پیک A_2 در محدوده بالای 700 mV مربوط به اکسیداسیون سطح پیریت به SO_4^{2-} و $\text{Fe}(\text{OH})_3$ طبق نمودار Eh-pH پیریت (شکل ۳) و واکنش (۳) است و پیک A_1 در محدوده صفر میلی ولت بیان‌گر اکسید شدن FeS_2 به گوگرد عنصری طبق واکنش (۴) و نمودار Eh-pH پیریت (شکل ۳) است [۷].



شکل ۳: نمودار Eh-pH پیریت [۵، ۱۸]



$$\text{Eh} = 0.402 - 0.07473\text{pH} + 7.78 \times 10^{-3} \log[\text{SO}_4^{2-}]$$



$$\text{Eh} = 0.41 + 0.029 \log[\text{Fe}^{2+}]$$

پیک‌های C_1 و C_2 تا حدودی با همدیگر همپوشانی داشته و نتیجه چندین واکنش احیا می‌باشند که

از روش سطح-پاسخ (روش CCD) برای طراحی آزمایش‌های فلوتاسیون استفاده شده است. با توجه به این که برهم‌کنش‌های بین پیریت و کلکتورهای گزینتات از نوع واکنش‌های الکتروشیمیایی است، برای مطالعه رفتار فلوتاسیون پیریت در حضور این واکنش‌گرها، دو عامل pH و پتانسیل الکتروشیمیایی پالپ (Eh) که تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای الکتروشیمیایی فلوتاسیون پیریت دارند، به عنوان متغیرهای ورودی عددی در طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شدند. همچنین با توجه به این که کلکتور مصرفی در خط سولفورزدایی شرکت گل‌گهر KAX بوده، و یکی از اهداف این تحقیق امکان بررسی امکان جایگزینی آن با کلکتور KEX است، این دو نوع کلکتور به عنوان متغیرهای ورودی کیفی در نظر گرفته شدند. با توجه به این که هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان بازیابی گوگرد و عیار آن در شرایط مختلف الکتروشیمیایی و تعیین شرایطی است که حداکثر بازیابی و عیار گوگرد حاصل می‌شود، میزان بازیابی و عیار گوگرد به عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. ترتیب انجام آزمایش‌ها، طبق طرح ارائه شده توسط نرم‌افزار DX7 بوده و برای تنظیم pH پالپ از اسید سولفوریک به عنوان کاهنده pH و از سودسوزآور برای افزایش pH و برای تنظیم پتانسیل الکتروشیمیایی پالپ (Eh) از آب‌اکسیژنه و سولفیدسدیم به مقدار لازم استفاده شد. میزان مصرف کلکتورهای KAX و KEX و کف ساز MIBC به میزان 100 g/t مطابق شرایط فعلی فلوتاسیون پیریت در خط سولفورزدایی شرکت گل‌گهر، در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

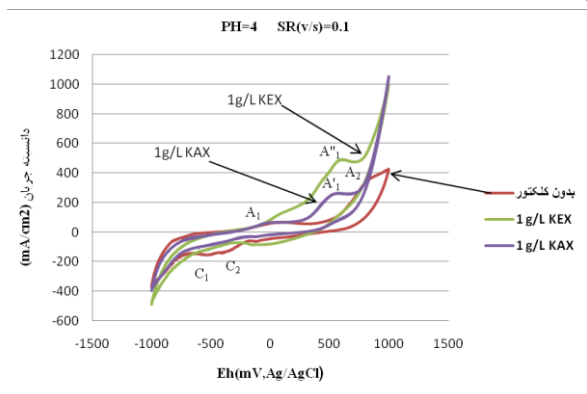
۳-۱ مطالعات ولتامتری چرخه‌ای پیریت در غیاب کلکتور

نتایج آزمایش‌های ولتامتری چرخه‌ای الکتروود پیریت در $\text{pH}=4$ و در غیاب کلکتور در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$Eh = 0.579 - 0.0509pH$$

۳-۲ مطالعات ولتامتری چرخه‌ای پیریت در حضور کلکتورها

نتایج آزمایش‌های ولتامتری چرخه‌ای الکتروپیریت در pH=4 و در حضور کلکتورهای KEX و KAX در شکل (۵) نشان داده شده است.

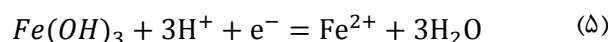


شکل ۵: ولتاموگرام چرخه‌ای پیریت در pH=4 و نرخ روبش 100 mV/s در حضور کلکتور

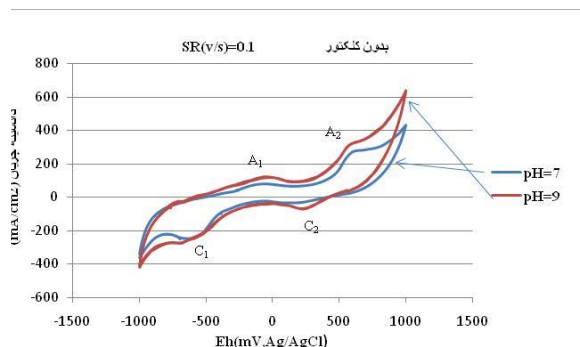
پیک‌های A_1' و A_1'' در شکل ۵ مربوط به ولتاموگرام پیریت در حضور به ترتیب کلکتورهای KEX و KAX می‌باشد. این پیک‌ها ناشی از اکسیداسیون گزنتات به دی‌گزنوتون است که در پتانسیلی بالاتر از پتانسیل برگشت‌پذیری اکسایش دی‌گزنوتون (130 mV) است [7]. مطالعات نشان داده در پتانسیل کمتر از پتانسیل برگشت‌پذیری X_2/X ، گزنتات بی‌تاثیر بوده و باعث شناورسازی پیریت نمی‌شود [18]. پیک‌های A_1' و A_1'' در محدوده پتانسیل 650-550 mV و کمتر از پیک A_2 که ناشی از تشکیل گونه‌های آبران است، اتفاق افتاده‌اند که این امر نشان می‌دهد پتانسیل مذکور برای شناورسازی پیریت مناسب است چرا که قبل از اکسیداسیون پیریت به گونه‌های آب‌پذیر، سطح پیریت با دی‌گزنوتون پوشیده شده و قابلیت شناور شدن پیدا می‌کند [7 و 18].

شکل‌های ۶ و ۷ ولتاموگرام چرخه‌ای پیریت را در pHهای ۷ و ۹ در حضور کلکتورهای KEX و KAX نشان می‌دهند. پیک‌های A_1' و A_1'' در شکل‌های ۵ و ۶ به دلیل اکسیداسیون گزنتات و تشکیل دی‌گزنوتون است [18]. همان‌طور که از شکل مشخص است در این‌جا هم پیک‌های مذکور قبل از پیک A_2 واقع شده‌اند و مانع اکسیداسیون پیریت به گونه‌های آب‌پذیر شده‌اند و عدم

محتمل‌ترین آن‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

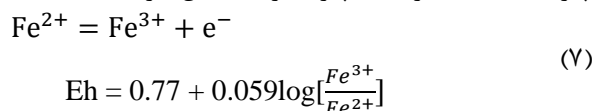


شکل ۴ ولتاموگرام پیریت را در pHهای ۷ و ۹ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیریت در این دو pH و در غیاب کلکتور تقریباً رفتار مشابهی دارد.

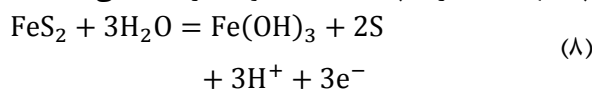


شکل ۴: ولتاموگرام چرخه‌ای پیریت در pH=7 و pH=9 و نرخ روبش 100 mV/s در غیاب کلکتور

پیک اکسیداسیون A_1 در محدوده صفر میلی‌ولت به واکنش اکسیداسیون پیریت و تشکیل گوگرد عنصری طبق واکنش (۴) نسبت داده می‌شود و پیک اکسیداسیون دوم (A_2) در محدوده 650 mV احتمالاً بدلیل اکسیداسیون بخشی از Fe^{2+} ناشی از واکنش (۴) به Fe^{3+} طبق واکنش (۷) است و نتیجه آن رسوب هیدروکسید آهن بر روی سطح پیریت است که بازداشت پیریت را به دنبال دارد [16].



همچنین پیک A_2 می‌تواند ناشی از واکنش اکسیداسیون (۸) باشد که گوگرد عنصری و هیدروکسید آهن به‌طور هم‌زمان تشکیل می‌شود. اما با وجود گونه آبران گوگرد عنصری در واکنش مذکور، گونه‌های آب‌پذیر هیدروکسید آهن باعث بازداشت پیریت در غیاب کلکتور می‌شوند که این به دلیل قابلیت جذب قوی‌تر هیدروکسید آهن و پوشش‌دهی کامل آن در سطح پیریت است [17]. نمودار Eh-pH پیریت ارائه شده در شکل ۳، گونه‌های پیشنهاد شده برای پیک‌های A_1 و A_2 را تایید می‌کند.



مشکل است، بنابراین در طراحی، حداکثر مقدار پتانسیل 450 mV و حداقل آن 150 mV - در نظر گرفته شد.

جدول ۳: متغیرهای ورودی و سطوح آن‌ها

علامت	A	B	C
نام عامل	pH	Eh	کلکتور
محوری پایین ($-\alpha=2$)	۵	-۱۵۰	-
سطح پایین (-۱)	۶	۰	KEX
مرکزی (۰)	۷	۱۵۰	-
سطح بالا (+۱)	۸	۳۰۰	KAX
محوری بالا ($+\alpha=2$)	۹	۴۵۰	-

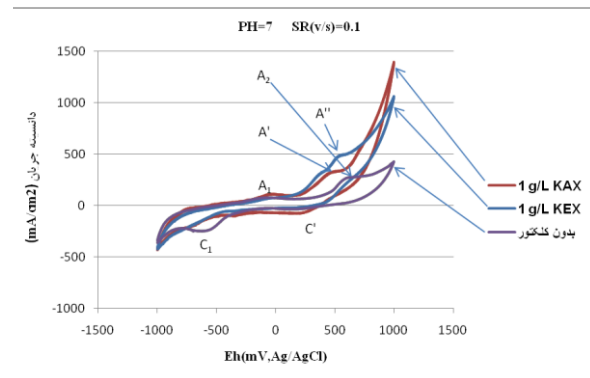
نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون در نرم‌افزار طراحی آزمایش DX7 وارد شد و نرم‌افزار مدل درجه دوم را برای هر دو پاسخ پیشنهاد کرد. آنالیز واریانس نشان داد که مدل‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بوده و برای بازیابی گوگرد و عیار گوگرد به ترتیب تنها ۰/۰۱٪ و ۰/۰۷٪ احتمال دارد که معنی‌دار بودن مدل در اثر خطای آزمایش بوده باشد. بررسی مدل‌ها نشان داد در صورت استفاده از اتیل‌گزنات پتاسیم بیشترین مقدار بازیابی گوگرد در pH حدود ۵ تا ۵/۵ و پتانسیل ۴۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌ولت و به میزان ۸۳٪ به دست می‌آید. با توجه به این‌که حد مجاز گوگرد (۰/۱٪) در کنسانتره سنگ آهن با حداقل بازیابی ۸۸٪ به دست می‌آید، کلکتور KEX کارایی لازم را ندارد. مطالعات نشان داد که با استفاده از امیل‌گزنات پتاسیم، در محدوده pH=۵-۷ و پتانسیل بالای 350 mV ، بازیابی گوگرد به مقدار ۸۸٪ قابل دسترسی است.

با استفاده از کلکتور KEX، بیشترین عیار گوگرد حدود ۳۲ درصد و در محدوده $5/5 - 6/5$ pH و 375 mV - در مورد کلکتور KAX، حداکثر عیار تقریباً ۳۳ تا ۳۴ درصد و در بازه $5-7$ pH و $300-450\text{ mV}$ حاصل شد. مقایسه این نتایج با محدوده‌های به دست آمده برای حداکثر و حداقل بازیابی گوگرد، نشان می‌دهد که میزان راه‌یابی ذرات باطله به کنسانتره فلوتاسیون در تمام آزمایش‌ها، به نسبت تقریباً یکسانی اتفاق افتاده است.

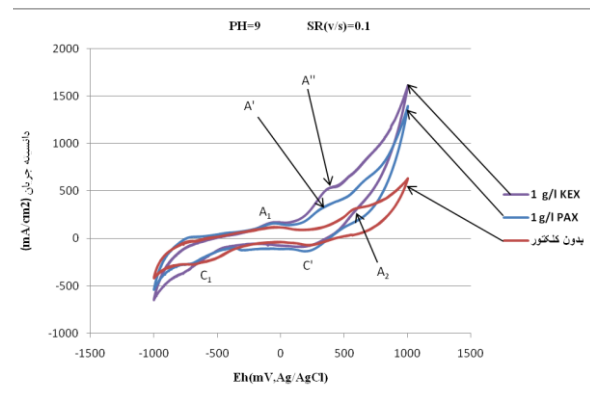
در این تحقیق بهینه‌سازی توسط نرم افزار DX7 در برای بهینه کردن بازیابی گوگرد انجام شد و به منظور اعتبار سنجی شرایط بهینه، دو آزمایش در این شرایط انجام

وجود پیک احیای C_1 در حضور گزنات به همین دلیل است. پیک احیای دی‌گزناتون به گزنات (C') خیلی کوچک‌تر از پیک اکسیداسیون آن است که این امر نشان می‌دهد برگشت پذیری واکنش اکسیداسیون گزنات کم بوده و بنابراین مقدار کمی از دی‌گزناتون به گزنات احیا می‌شود.

با توجه به این‌که تشکیل دی‌گزناتون در $\text{pH}=7$ در محدوده $450-550\text{ mV}$ است (طبق پیک‌های A' و A'' در شکل (۶) این محدوده برای فلوتاسیون پیریت در $\text{pH}=7$ مناسب می‌باشد. همچنین طبق ولتاموگرام شکل ۷، محدوده مناسب برای فلوتاسیون پیریت در $\text{pH}=9$ حدود $250-300\text{ mV}$ است.



شکل ۶: ولتاموگرام چرخه ای پیریت در $\text{pH}=7$ و نرخ روبش 100 mV/s در حضور کلکتور



شکل ۷: ولتاموگرام چرخه ای پیریت در $\text{pH}=9$ و نرخ روبش 100 mV/s در حضور کلکتور

۳-۳ آزمایش‌های فلوتاسیون

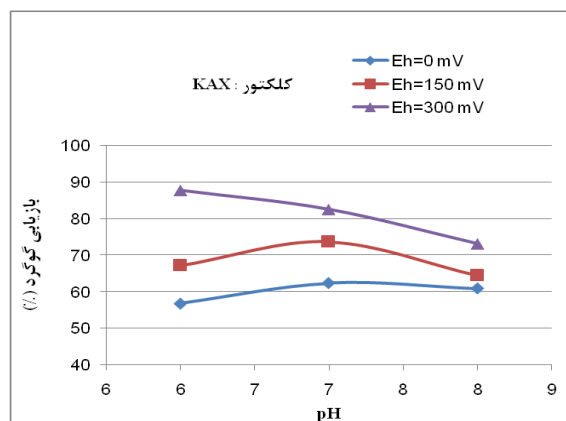
با توجه به مطالعات ولتامتری انجام شده، متغیرهای ورودی و سطوح آنها در طراحی آزمایش‌های فلوتاسیون، مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که فلوتاسیون در پتانسیل بیشتر از 450 mV ، در عمل خیلی

شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: نتایج حاصل از آزمایش‌های بهینه‌سازی

شماره	pH	Eh(mV)	کلکتور	بازیابی گوگرد(%)	عیار گوگرد(%)
۱	۵	۳۸۰	KEX	۸۹/۰۳	۳۳/۹۱
۲	۵	۳۸۰	KAX	۹۰/۸۶	۳۳/۱۲
		میانگین		۸۹/۹۴	۳۳/۵۱

به‌منظور بررسی دقیق‌تر شرایط بهینه الكتروشيميائي فلوتاسیون پیریت، چند آزمایش دیگر با استفاده از کلکتور KAX و در شرایط مختلف طراحی و انجام شد و نمودار تغییرات بازیابی گوگرد نسبت به pH در سطوح مختلف پتانسیل طبق شکل ۸ به‌دست آمد.



شکل ۸: نمودار تغییرات بازیابی گوگرد نسبت به pH در

سطوح مختلف پتانسیل در حضور KAX

بر اساس این نمودار، بازیابی گوگرد به میزان ۸۸ درصد در شرایط الكتروشيميائي pH=۶ و Eh=۳۰۰ قابل دستیابی است. بنابراین به‌نظر می‌رسد این شرایط به‌عنوان شرایط بهینه برای عملیات صنعتی فلوتاسیون مناسب‌تر باشد. چرا که شرایط بهینه پیشنهادی توسط مدل، در محیط نسبتاً اسیدی انجام می‌شود که از لحاظ صنعتی مطلوب نیست. همچنین کنترل پتانسیل پالپ در محدوده ۳۸۰ mV کار سختی است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این مقاله را می‌توان به شرح ذیل خلاصه کرد:

- ✓ اکسیداسیون پیریت در pHهای ۴ و ۷ و ۹ و در غیاب کلکتور، در محدوده پتانسیل 0 mV منجر به

تشکیل گوگرد عنصری و هیدروکسید آهن می‌شود. گوگرد عنصری می‌تواند باعث فلوتاسیون بدون کلکتور پیریت شود. اما در پتانسیل‌های بالای ۷۰۰ mV گونه‌های سولفات و هیدروکسید آهن تشکیل می‌شود که آب‌دوست بوده و باعث بازداشت پیریت می‌شوند.

✓ با توجه به نتایج ولتامتری چرخه‌ای، محدوده مناسب برای فلوتاسیون پیریت با کلکتورهای KEX و KAX در pH=۴ حدود ۶۵۰ mV-۵۵۰ و در pH=۷ حدود ۴۵۰-۵۵۰ mV و در pH=۹ حدود ۲۵۰-۳۵۰ mV است. علت این پدیده اکسیداسیون کلکتور در سطح پیریت و تشکیل دایمر کلکتور (دی‌گزن‌توزن) است.

✓ در صورت استفاده از اتیل‌گزنات پتاسیم بیشترین مقدار بازیابی در pH حدود ۵ تا ۵/۵ و پتانسیل ۴۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌ولت و به میزان ۸۳٪ و بیشترین عیار گوگرد حدود ۳۲ درصد و در محدوده Eh=۱۷۵-۳۷۵ mV و pH = ۵/۵ - ۶/۵ بدست می‌آید

✓ با استفاده از کلکتور KAX در محدوده pH=۵-۷ و پتانسیل بالای ۳۵۰ mV، بازیابی گوگرد به مقدار بیشتر از ۸۸٪ و عیار گوگرد تقریباً ۳۳ تا ۳۴ درصد و در بازه pH=۵-۷ و Eh=۳۰۰-۴۵۰ mV بدست می‌آید.

✓ با توجه به این‌که حد مجاز گوگرد (۰/۱٪) در کنسانتره سنگ آهن با حداقل بازیابی ۸۸٪ به دست می‌آید، کلکتور KEX کارایی لازم را ندارد.

✓ شرایط بهینه الكتروشيميائي فلوتاسیون پیریت، که در صنعت قابل دست‌یابی است، استفاده از کلکتور KAX و در شرایط الكتروشيميائي pH=۶ و Eh=۳۰۰ است.

مراجع

- سنگ آهن معدن گل گهر بروش فلوتاسیون معکوس" سمپوزیم فولاد، اصفهان
- [۱۱]. عزت آبادی پور، جواد؛ سام، عباس؛ کازرانی نژاد، رضا؛ (۱۳۹۱) "امکان سنجی حذف اسید در فرآیند فلوتاسیون مرحله سولفورزدایی از کنسانتره آهن معدن گل گهر" فصل نامه پژوهشگر، شماره ۵، صفحه ۲۲-۱۸
- [۱۲]. حجازی، رسول؛ سام، عباس؛ رضایی، بهرام؛ زمانی فرشید؛ (۱۳۸۴) "افزایش راندمان مدار فراوری مجتمع سنگ آهن گل گهر" بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین
- [۱۳]. سلطان محمدی، وحید؛ (۱۳۸۵) "تعیین رفتار بازایی سنگ آهن کنسانتره پر سولفور گل گهر" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد
- [۱۴]. شهریاری، محمد علی؛ سام، عباس؛ نخعی، فردیس؛ عزت آبادی پور، جواد؛ (۱۳۹۱) "بهینه سازی عوامل مؤثر در مدار فاوتاسیون خط فرآوری سولفورزدایی شرکت سنگ آهن گل گهر" اولین کنفرانس ملی فناوری های معدنکاری ایران [15] Goktepe. F.; (2002) "Effect of pH on Pulp Potential and Sulphide Mineral Flotation", Turkish J. Eng. Env. Sci. 26: p. 309-318
- [۱۶]. طاهری، بیژن؛ عبدالمهدی، محمود؛ شفایی تنکابنی، سیدضیاءالدین؛ جوادیان فرزانه، سهیلا؛ (۱۳۹۳) "مطالعه رفتار شناورسازی کالکوپیریت در حضور سولفید سدیم با کنترل پتانسیل" نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، شماره ۲۴، صفحه ۱۵-۱
- [۱۷]. شهابی آذر، علی؛ (۱۳۹۰)؛ "مطالعه و بررسی الکتروشیمیایی فلوتاسیون پیریت" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- [18]. Yuehua Hu; Wei Sun and Dianzuo Wang; (2009); "Electrochemistry of Flotation of Sulphide Minerals" Tsinghua University Press
- [۱]. نوریان، محمد؛ عبدالله زاده، علی اکبر؛ اربابیان، محمد علی؛ (۱۳۹۱)؛ "بهینه سازی شرایط فلوتاسیون در کارخانه سولفورزدایی مجتمع معدنی گل گهر" فصل نامه پژوهشگر، شماره ۶، صفحه ۴۰-۳۴
- [۲]. رضایی، بهرام؛ (۱۳۷۸)؛ "فلوتاسیون"، انتشارات دانشگاه هرمزگان
- [۳]. عبدالمهدی، محمود؛ (۱۳۸۲)؛ "شیمی فلوتاسیون"، جهاد دانشگاهی واحد تربیت مدرس- واحد صنعتی امیرکبیر
- [4]. B.F. Giannetti; S.H. Bonilla; C.F. Zinola; T. Rabóczkay; (2001); "A study of the main oxidation products of natural pyrite by voltammetric and photoelectrochemical responses" Hydrometallurgy 53: p.41-60
- [5]. G.H. Kelsall a; Q. Yin a; D.J. Vaughan b; K.E.R. England b; N.P. Brandon; (1999) "Electrochemical oxidation of pyrite (FeS₂) in aqueous electrolytes" Journal of Electroanalytical Chemistry 471: p. 116-125
- [6]. M.Eghbali; (2012) "Electrochemical and Raman Investigation of Pyrite and Chalcopyrite Oxidation"
- [7]. Yufan Mua; Yongjun Penga; Rolf Andreas Lautenb ; (2015); "Electrochemistry aspects of pyrite in the presence of potassium amyl xanthate and a lignosulfonate-based biopolymer depressant" Electrochimica Acta 174: p. 133-142
- [8]. N.D. Janetski; S.I. Woodburn; R. Woods; (1977); "An Electrochemical Investigation Of Pyrite Flotation And Depression"
- [9]. A. LópezValdivieso; A.A. Sánchez López; S. Song; (2005); "On the cathodic reaction coupled with the oxidation of xanthates at the pyrite/aqueous solution interface" International Journal of Mineral Processing 77: p. 154-164.
- [۱۰]. پناهی، ابراهیم؛ عبدالله زاده، علی اکبر؛ سام، عباس؛ مهرانی، امیر پرویز؛ (۱۳۹۰)؛ "سولفورزدایی از کنسانتره هماتیتی

¹Cyclic Voltammetry²Working Electrode³Counter Electrode⁴Reference Electrode⁵Goktepe⁶Binder⁷Carbon Paste