



آشنایی با روش الکتروزئوژنیکی با ارائهٔ یک مدل آزمایشگاهی در پی جویی کانسارهای پنهانی فلزات پایه

فرهاد محمدتراب^{*}، افشین نمیرانیان

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت مقاله: ۹۱/۲/۳، نسخه نهایی: ۹۱/۴/۱۸)

چکیده: روش الکتروزئوژنیکی یکی از روش‌های نوین پی‌جویی مواد معدنی است که دارای بنیان الکتروزئوژنیکی است. این روش توانایی پی‌جویی کانسارهای پنهانی را که با قشری از خاک یا رسوب‌های آبرفتی سطحی پوشیده شده‌اند، فراهم می‌آورد. در این روش با ایجاد یک میدان الکتریکی جریان مستقیم بر فراز روباهی کانسارهای فلزی پنهانی، باعث تغليظ و جریان یافتن یون‌ها به سمت یک کاتد مخصوص خواهد شد. با دو الکترود جریان، یکی بعنوان آند معمولاً از جنس فولادی و دیگری کاتد معمولاً از جنس گرافیتی که در یک ظرف نیمه تراوا حاوی اسید قرار می‌گیرد، جریان مستقیم با ولتاژ بالایه خاک تزریق می‌شود. پس از گذشت زمان معین (حداقل چندین ساعت)، در اثر یونیده شدن کانی‌های فلزی و پدیده‌ی الکتروزئوژنیکی، یون‌های فلزی مثبت به سمت کاتد رهسپار شده و در اسید موجود در آن (در اطراف الکترود گرافیتی) مرکز می‌شوند. با تجزیه‌ی این اسید به روش جذب اتمی یا پلاسمای القایی، غلظت فلزات پایه مختلف در اسید اندازه‌گیری و تحلیل می‌شود. پیش از پیداده کردن این روش در صحراء، با قرار دادن کانه‌های سولفیدی با مقیاس آزمایشگاهی مختلف در زیر خاک، کارآیی این روش در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در این روش عواملی چون عمق قرارگیری کانه، میزان رطوبت خاک، شدت جریان و ولتاژ تزریقی، طول زمان تزریق و غلظت اسید مصرفی به عنوان الکتروولیت از جمله مهم‌ترین فاکتورهای مهم و مؤثر در این روش هستند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل، شدت جریان و طول زمان بهینه برای تزریق به ترتیب ۵۰۰ میلی آمپر و ۸ ساعت به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: الکتروزئوژنیکی؛ پی‌جویی فلزات پایه؛ کانسارهای پنهان؛ مهاجرت عناصر؛ یونش.

بسته به مقیاس عملیات پی‌جویی (ناحیه‌ای یا محلی)، به‌طور معمول می‌توان محیط‌های مختلف ژئوژنیکی شامل سنگ بستر، رسوب‌های آبراهه‌ای، خاک‌ها، آبهای سطحی و زیرزمینی و غیره را مورد بررسی، نمونه برداری و تجزیه قرار داد. امروزه با استخراج سریع نهشته‌های شناخته شده‌ی فلزات مختلف، کشف نهشته‌های پنهانی با الگوهای پراکندگی اولیه و ثانویه با روش‌های معمولی ژئوژنیکی به تدریج مشکل تر شده است. هرچند کاربرد روش‌های غیر معمول ژئوژنیکی مانند نمونه برداری از جو، گازهای خاک، گیاهان و ... برای

مقدمه
کاربرد ژئوژنیکی اکتشافی به عنوان یک روش نسبتاً نوین در پی‌جویی نهشته‌های کانساری به خصوص انواع کم عیار آن، هر روز در حال گسترش است. در سال‌های اخیر روش‌های ژئوژنیکی به عنوان ابزاری کارآمد به طور گستردگی در پی‌جویی‌های ناحیه‌ای و محلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها به علت صرفه‌ی اقتصادی (در مقایسه با روش‌های دیگر پر هزینه همچون حفاری‌های اکتشافی)، سرعت در عمل و گستردگی مناطق تحت پوشش از اهمیت زیادی برخوردارند.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۴۵۰۱۹۷۸، نمایر: ۸۲۱۰۹۹۵ (۰۳۵۱)، پست الکترونیکی: fmitorab@yazduni.ac.ir

معرفی روش الکتروژئوشیمی

مهاجرت عناصر فلزی بر عنوان موضعی است که اخیراً نظر سیاری از ژئوشیمیست‌های پی‌جو را به خود جلب کرده است [۹]. برخی از پژوهشگران، امکان تشکیل هاله‌ی یونی فلزات پیرامون توده‌های کانساری و تشدید آنرا در اثر برقراری یک میدان الکتریکی جریان مستقیم و حرکت یون‌های حاصله به سمت کاتد بررسی کرده و در نهایت با موفقیت به این نتیجه رسیدند که این امکان وجود دارد. لذا هنگامی که روباره از لحاظ الکتریکی بر انگیخته می‌شود، این روش قادر است تا یون‌های فلزی استخراج شده از توده‌ی کانسار را که در کاتدهای واقع در مدار الکتریکی و در یک آرایه الکتروودی گسترده موجود روی زون کانی‌سازی انباسته می‌شود، به صورت غلظت‌های در حد بیهنجاری آشکار نماید [۱۰، ۹]. یون‌های فلزی در حالی که به وسیله‌ی یک جریان مستقیم حمل می‌شوند، در داخل خاک مرطوب پیرامون توده‌ی کانساری فلزی عبور می‌کنند و سپس در مخزنی که همان کاتد تلقی می‌شود و در داخل الکتروولیت اسیدی غوطه ور است، به دام افتاده و انباسته می‌شوند. در مدل‌های آزمایشگاهی چنین استنبط می‌شود که رسوب گذاری یون‌های فلزی روی میله کاتدی و در الکتروولیت اسیدی، در صورتی که جریان الکتریکی به طور مداوم و پایدار در طول آزمایش عبور کند، کاملاً قابل توجه و در گستره‌ی آشکارسازی به روش‌های معمول آنالیز شیمیایی است. در آزمایش‌های صحرایی نیز شرایط مشابهی حاکم است که در آن رطوبت موجود در فضاهای منفذی به عنوان حامل یون‌ها یا الکتروولیت عمل می‌کند.

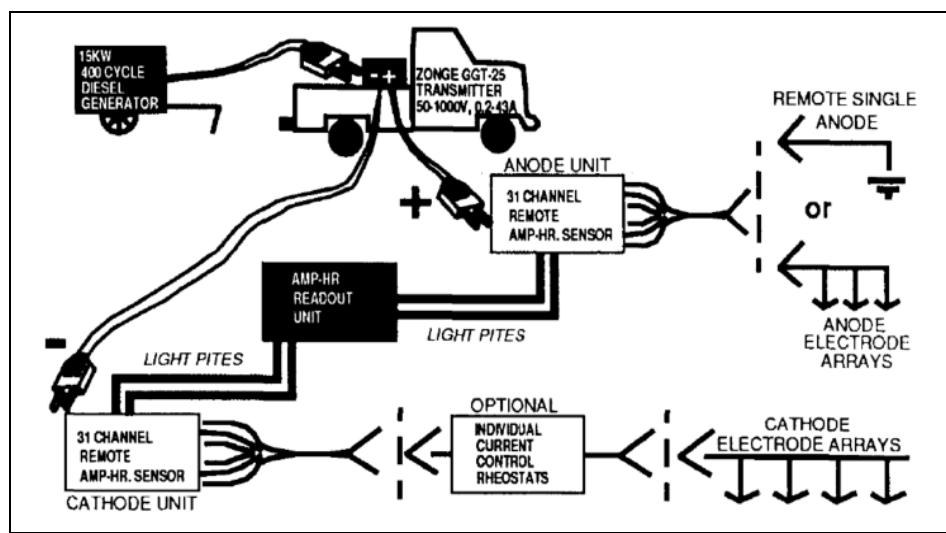
در این روش از جریان الکتریکی مستقیم (DC) و پایدار با ولتاژ بالا به مدت طولانی (در حدود چند ساعت)، بین یک آند و مجموعه‌ای از کاتدها با آرایه‌ی گسترده روی سر تا سر زون کانی‌سازی استفاده می‌شود. جریان الکتریکی باعث ایجاد یک میدان الکتریکی خواهد شد که این میدان موجب بر انگیخته شدن یون‌های مثبت از توده کانساری فلزی و نیز هاله‌های یونی ثانویه و سطحی می‌شود. سپس یون‌های راسب روی کاتد، نمونه گیری می‌شوند و به صورت شیمیایی مورد آنالیز قرار می‌گیرد. بنابراین غلظت یون‌های راسب شده می‌تواند بیانگر مکان نهشته‌ی کانساری باشد. این روش حتی برای کانساهای قرار گرفته تا اعماق ۱۰۰ متری خاک نیز قابل استفاده است [۱۱]. در شکل ۱ طرح نموداری از تجهیزات یک دستگاه صحرایی برای برداشت‌های الکتروژئوشیمی مشاهده می‌شود.

پی‌جویی نهشته‌های فلزی پنهانی در سال‌های اخیر گسترش یافته است. به علاوه با پیشرفت روش‌های تجزیه‌ای، زمینه برای فرآگیرتر شدن بعضی از روش‌های خاص که اثر بخشی زیادی دارند نیز هموار شده است. نمونه‌ای از این روش‌ها، روش الکتروژئوشیمی است که دارای بنیان الکتروژئوشیمیایی است.

روش پی‌جویی الکتروژئوشیمی به عنوان یکی از روش‌های نوین در دنیا مطرح شده است که توانایی پی‌جویی کانسارهای پنهانی را که به وسیله‌ی قشری از خاک یا رسوب‌های آبرفتی سطحی پوشیده شده‌اند، فراهم می‌آورد. در این روش با ایجاد یک میدان الکتریکی جریان مستقیم بر فراز روباره کانسارهای فلزی پنهانی، باعث تغییض و جریان یون‌ها به سمت یک کاتد مخصوص خواهد شد [۱-۳]. تالاپاترا^۱ و همکارانش مثال‌های موردی از کاربرد این روش برای پی‌جویی نهشته‌های برخی غلظت‌های در حد بیهنجاری آشکار نماید [۲]. گووت^۲ و آتردن^۳ از این روش در Zn-Pb-Cu کوئینزلند استرالیا بهره گرفتند [۱]. بنگلیانگ^۴ و همکارانش و خیاترانگ^۵ و دیگران این روش را برای پی‌جویی رگه‌های طلا پوشیده با رسوب‌های آبرفتی در چین مورد استفاده قرار دادند [۴، ۳]. بررسی‌های مشابه و متعدد دیگری از بهره‌گیری این روش در پی‌جویی نهشته‌های پنهانی در آمریکا توسط لینز^۶ و دیگران [۵، ۶]؛ اسمیت^۷ و همکارانش [۷] و نیز در استرالیا توسط کیلینگ^۸ و همکاران [۸] ارائه شده است.

با وجود نقاط قوت این روش نوین، در خصوص به کارگیری این روش در ایران و بررسی امکان و چگونگی اجرای آن، تاکنون فعالیت علمی و عملی خاصی صورت نگرفته است. همچنین به دلیل کاربردی بودن آن بخصوص در زمینه پی‌جویی کانسارهای فلزی پنهانی که به دلیل پائین بودن عیار و عدم وجود رخنمون آشکار، اکتشاف آن‌ها با روش‌های معمول میسر نیست و به دلیل مبهم بودن فاکتورهای واقعی موثر بر روش در حین اجرا، انجام چنین پژوهشی در مقیاس آزمایشگاهی ضروری به نظر رسید تا کارآیی این روش در شرایط مختلف صحرایی، مورد ارزیابی قرار گیرد.

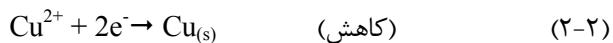
-
- 1- Talapatra
 - 2- Govett
 - 3- Atherden
 - 4- Bangliang
 - 5- Xianrong
 - 6- Leinz
 - 7- Smith
 - 8- Keeling



شکل ۱ طرح نموداری از تجهیزات صحرایی مورد استفاده در برداشت الکتروژئوشیمی [۷].

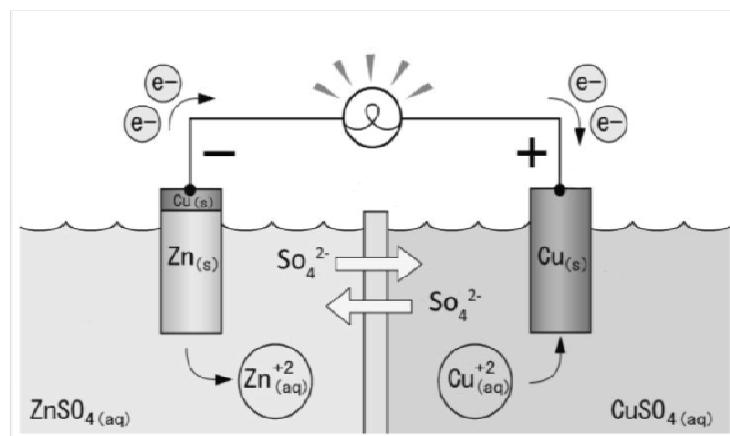
محلولی به محلول دیگر حرکت کنند. یک صفحه‌ی متخلخل میانی به گونه‌ای طراحی شده است که امکان تبادلات یونی را فراهم می‌آورد ولی از مخلوط شدن محلول‌های الکترولیت جلوگیری می‌کند. شکل ۲ یک نمونه از سلول گالوانی را نشان می‌دهد.

در داخل دو محلول، جریان الکتریسیته شامل مهاجرت کاتیون‌ها و آنیون‌های است؛ کاتیون‌ها از الکترود روی (Zn) دور می‌شوند و به سمت مس (Cu) می‌روند و آنیون‌ها در جهت عکس حرکت می‌کنند. فرآیندهای دو الکترود با معادلات زیر داده شده‌اند:



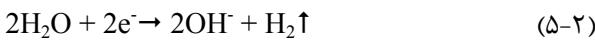
سلول‌های الکتروژئوپیمیا

سلول‌های الکتروژئوپیمیا را به سهولت می‌توان به دو گروه رد-بندی کرد. سلول‌های گالوانی که انرژی تولید می‌کنند و سلول‌های برقکافتی (الکترولیزی) که در عمل نیاز به انرژی الکتریکی از یک چشمی خارجی دارند. هر دو نوع این سلول‌ها در شیمی تجزیه به کار می‌آیند. شایان توجه است که بسیاری از سلول‌ها می‌توانند با تغییر در شرایط آزمایش، هم به صورت سلول گالوانی و هم به صورت سلول برقکافتی عمل کنند. یک پیل الکتروژئوپیمیا متشکل از دو رسانا به نام الکترود است که هر کدام در یک محلول الکترولیت مناسب قرار دارد. برای اینکه الکتریسیته جریان یابد، لازم است که؛ اولاً الکترودها در خارج با یک رسانای فلزی به هم متصل شوند، ثانیاً دو محلول الکترولیت در تماس با یکدیگر باشند تا یون‌ها بتوانند از



شکل ۲ نمایی از یک سلول گالوانی.

از اسید نیتریک بعنوان الکتروولیت در کاتد استفاده می‌شود [۷]:
 الف) الکتروولیت باید اسید باشد زیرا اصولاً در کاتد فرآیند کاهش صورت می‌پذیرد که این فرآیند باعث آزاد شدن گاز هیدروژن، افزایش یون هیدروکسیل و افزایش pH، به خصوص در نتیجه افزایش آمپراژ خواهد شد. در نهایت همان طور که محلول قلیایی می‌شود، هیدروکسیل نامحلول فلزات در کاتد رسوب می‌کند که این فرآیند باعث پوشیده شدن و نارسانا شدن میله گرافیتی کاتد خواهد شد و در نتیجه جریان به شدت کاهش خواهد یافت و در اثر بالا رفتن مقاومت در کاتد، دمای محلول به شدت بالا می‌رود. واکنش تجزیه‌ای آب در کاتد که منجر به قلیایی شدن محیط و آزاد شدن گاز هیدروژن می‌شود، تابع رابطه‌ی زیر است:



غلظت ۴ نرمال برای اسید نیتریک مصرفی، باعث اطمینان از پایین بودن pH محلول حتی در اثر عبور جریان بالا می‌شود.
 ب) بیشتر کاتیون‌ها می‌توانند تشکیل نمک‌های نیترات‌های بدنه‌ند، به آن اندازه که نمک‌های دیگر فلزی از محلول رسوب می‌کنند، رسوب نکرده و مزاحمتی ایجاد نمی‌کنند. همچنین اغلب نمک‌های نیترات‌ات احلاط بالایی دارند.

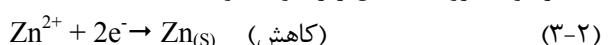
به طور مشابه، واکنش دیگری که در اثر تجزیه آب در آند صورت می‌پذیرد، منجر به آزاد شدن گاز اکسیژن در آند و ایجاد یون H^+ و شدیداً اسیدی شدن اطراف این الکترود می‌شود
 (شکل ۳).



روش بررسی

به منظور پیاده سازی روش و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در فرآیند الکتروولیتی، لازم بود تا شرایط مختلف کانه و خاک در مقیاس آزمایشگاهی پیاده شده و با طراحی یک سیستم آزمایشگاهی امکان بررسی این پارامترها فراهم شود. بدین منظور از یک تانک مخصوص پلاستیکی شفاف به ابعاد ۶۰ در ۴۰ سانتی متر و عمق ۵۰ سانتی متر برای نگهداری خاک استفاده شد. سپس از ترکیب ماسه و رس به عنوان خاک سطحی استفاده شد. به گونه‌ای که خاکی با نسبت ۲ به ۱، ماسه به رس تهیه شده و با اضافه کردن درصد مشخصی رطوبت به آن، شرایط مختلف صحرایی فراهم شد (شکل ۴-الف و ب).

با اعمال یک پتانسیل به اندازه کافی بزرگ از یک چشم‌های خارجی، تا این سلول می‌تواند به صورت معکوس یعنی به صورت یک سلول برق‌کافته عمل کند. در این شرایط واکنش‌های انجام شده در دو الکترود به شکل زیر خواهد بود:



در اینجا نقش الکتروودها معکوس شده است، الکترود مس آند و الکترود روی کاتد است.

الکتروودها

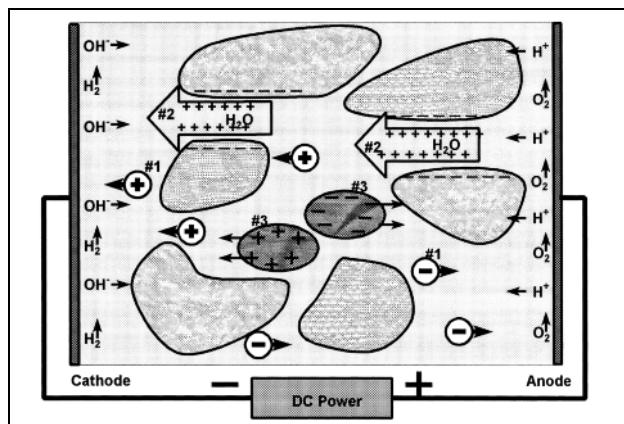
الکتروودهای مورد استفاده در روش الکتروولیتی بر دو نوع اند:
 الف) الکتروودهای کاتدی که از جنس کربن یا گرافیت ساخته شده و به قطب منفی چشم‌های جریان الکتریکی وصل می‌شود و به آن الکترود نمونه‌گیر نیز گفته می‌شود.

ب) الکتروودهای آندی که از جنس فولاد است و به قطب مثبت چشم‌های جریان وصل شده و به نام الکترود بی‌نهایت نیز شناخته می‌شود.

چیدمان الکتروودها باید به گونه‌ای باشد که فاصله‌ی الکترود بی‌نهایت تا هر یک از کاتدها پنج برابر عمق مورد نظر برای بررسی نهشته باشد. این فاصله میزان اطمینان مناسبی است که جریان به عمق مورد نظر می‌رسد [۴]. به منظور برقراری اتصال مطمئن بین کاتد و خاک سطحی، باید خاک اطراف الکتروودها مرطوب بوده و کلوخه نشده باشد. همچنین لازم است تا الکترود کاتد از نوعی الکترود غیر قطبیده اختیار شود به گونه‌ای که کاتد در یک ظرف نیمه تراوا قرار گیرد تا ضمن تبادل یونی، رطوبت خاک اطراف آن نیز تأمین شود. لازم به یادآوری است که کاتدها باید در عمق بیش از ۲۰ سانتی متر از خاک مدفون شوند. هر چه کاتد در عمق بیشتری مدفون باشد تأثیر کمتری از لایه‌ی سطحی می‌پذیرد و مقاومت مدار پایدارتر خواهد بود. نکته قابل توجه هنگام برقراری جریان، پایداری و تقسیم کاملاً مساوی جریان الکتریکی بین کاتدهاست.

الکتروولیت

به منظور جلوگیری از قطبیده شدن کاتد و امکان تبادل یونی در آن در اطراف الکترود گرافیتی کاتد، از الکتروولیت اسیدی استفاده می‌شود. بدین منظور، اسید نیتریک (HNO_3) مناسب‌ترین اسید مورد استفاده در این زمینه است. به دو دلیل



شکل ۳ نقش آب و فرایندهای مهم در الکتروژئوشیمی (آزاد شدن گاز هیدروژن و ایجاد یون هیدروکسیل در کاتد و آزاد شدن گاز اکسیژن و اسیدی شدن آند) [۵].



شکل ۴ الف. تانک پلاستیکی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی ب. آماده‌سازی خاک با تهیه‌ی مخلوط با نسبت مشخص از ماسه و رس.

مناسب آند با خاک باعث بالا رفتن مقاومت آند در محل تماس آن با خاک شده و در این صورت آند به شدت گرم می‌شود. همچنین با توجه به آنچه که گفته شد و نیمه واکنش‌های انجام شده در آند، اطراف آند به شدت اسیدی شده و باعث خوردگی شدید آند فلزی می‌شود (شکل ۶-الف). برای جلوگیری از این مشکل می‌توان از الکترودهای گرافیتی در آند نیز استفاده کرد. با توجه به اینکه الکترود کاتد باید جمع کننده کاتیون‌های موردنظر بوده و از طرفی ناقطبیه باشد، بدین منظور از یک میله گرافیتی قرار گرفته در یک الکتروولیت (اسید نیتریک) به عنوان الکترود کاتد استفاده شد. برای نگهداری الکتروولیت در اطراف میله گرافیتی و برقراری ارتباط الکتریکی بین کاتد و خاک از یک کوزه‌ی سفالی به عنوان یک ظرف نیمه تراوا استفاده شد تا علاوه بر جلوگیری از تراوش سریع الکتروولیت به داخل خاک امکان تبادل یونی بین الکتروولیت و خاک براحتی فراهم شود (شکل ۶-ب و پ).

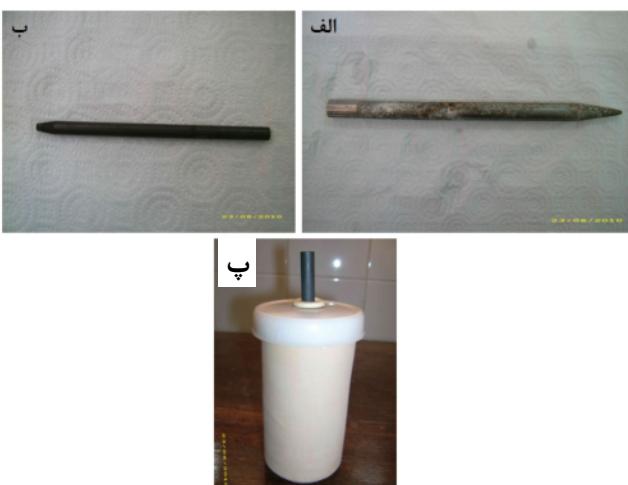
برای تزریق جریان الکتریسیته از یک ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ که مجهز به یک رؤستا بود، استفاده شد. ورودی این دستگاه از برق ۲۲۰ ولت شهر تامین شده و قادر بود تا خروجی متناوب و متغیری از ۰ تا ۲۵۰ ولت را با بیشترین جریانی معادل ۲/۵ آمپر براحتی تامین کند (شکل ۵-الف).

با توجه به اینکه جریان الکتریکی مورد استفاده در الکتروژئوشیمی باید جریان مستقیم و یکنواخت باشد، بدین منظور از یک مبدل جریان مستقیم (AC → DC) با خروجی کاملاً یکنواخت شده استفاده شد. همچنین جریان و ولتاژ خروجی با دو مولتی متر جدا از هم کنترل و ثبت شود (شکل ۵-ب).

الکترود مورد استفاده در آند از جنس فولاد در نظر گرفته شد تا با رسانایی مناسب، امکان تزریق جریان‌های بالا در خاک را براحتی فراهم آورد (شکل ۶-الف). باید توجه داشت که هنگام تزریق، به منظور برقراری جریان پایدار لازم است تا اطراف این الکترود و محل تماس آن با خاک همواره مرتبط نگه داشته شود. رسوب برخی آنیون‌ها روی آند و عدم ارتباط



شکل ۵ الف. ترانسفورماتور کنترل کننده ولتاژ تزریقی. ب. مبدل جریان مستقیم و چگونگی ارتباط آن با ترانسفورماتور، ولت متر و آمپر متر.

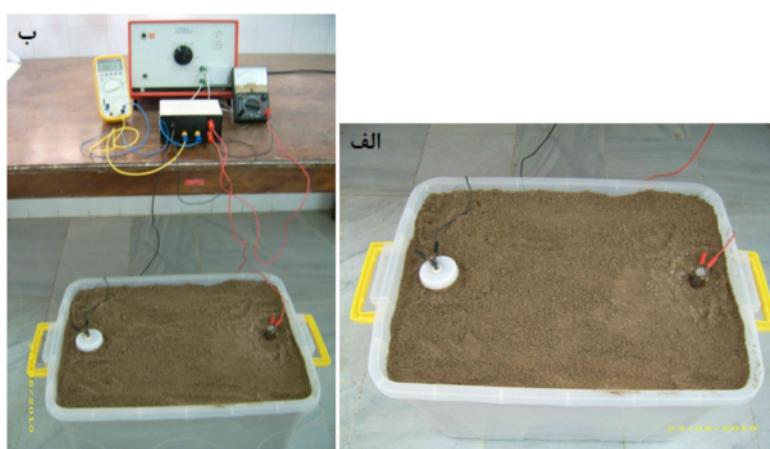


شکل ۶ الف. الکترود فولادی مورد استفاده در آند و خوردگی سطح آن ناشی از اسیدی شدن محیط آند، ب. میله‌ی گرافیتی مورد استفاده در کاتد، پ. الکترود کاتدی شامل کوزه‌ی سفالی همراه با میله‌ی گرافیتی که با درپوش مخصوص در مرکز کوزه قرار گرفته و هنگام قرارگیری در درون خاک با الکترولیت (اسید نیتریک) پر می‌شود.

سی سی از اسید مذکور از کوزه به ظروف مخصوص پلی پروپیلن منتقل و برای بررسی به آزمایشگاه شیمی دانشگاه یزد منتقل شد. کلیه نمونه‌ها برای سه عنصر مس، سرب و روی به روش جذب اتمی (AAS) تجزیه شدند. در مواردی که غلظت عناصر از میزان حد قابل ثبت دستگاه کمتر بود (نمونه‌های زمینه) از سیستم جذب اتمی مجهز به کوره‌ی گرافیتی برای آنالیز نمونه‌ها استفاده شد. با این روش حد قابل ثبت آنالیز عناصر یاد شده تا حد ppb کاهش یافت. در مرحله‌ی بعد با قرار دادن یک کانسنگ مشخص با بویژگی‌های ثابت در زیر خاک و با چند بررسی اولیه، تاثیر پارامترهای مؤثر بر روش از جمله: عمق قرارگیری کانسنگ، ولتاژ و شدت جریان تزریقی، درصد رطوبت خاک، طول زمان تزریق جریان، غلظت یا نرمالیته اسید مصرفی به عنوان الکترولیت، مورد بررسی قرار گرفتند. در جدول ۱ حالت‌های مختلف نمونه و خاک و نمونه‌ای از شرایط مختلف آزمایش‌های انجام شده با توجه به پارامترهای یاد شده، در جدول ۲ نتایج آنالیز این نمونه‌ها به تفکیک ارائه شده‌اند.

با قرار دادن کانسنگ‌های سولفیدی مختلف در زیر خاک، شرایط مختلفی برای بررسی‌های آزمایشگاهی فراهم شد. بدین منظور با نصب الکترودها در درون خاک و تزریق جریان (شکل ۷-الف و ب) در شرایط و زمان‌های مختلف، و با تغییر پارامترهای مؤثر که در بخش بعدی به آن‌ها اشاره می‌شود، تاثیر هریک از پارامترها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

نخست با تهیه‌ی خاک مناسب (خاکی با نسبت ۲ به ۱ ماسه به رس) که حتی الامکان خاصیت یک خاک سطحی طبیعی را دارد، بدون وجود هرگونه کانسنگ، شرایط زمینه تدارک دیده شد. سپس با تزریق جریان در این خاک، میزان زمینه‌ی سه عنصر فلزی پایه (مس، سرب و روی) در این شرایط اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش سعی شد تا میزان جریان تزریقی به درون خاک در طول آزمایش ثابت نگه داشته شود. برای اندازه‌گیری کلیه نمونه‌ها، ابتدا حجم مشخصی (۲۲۰ سی سی) از اسید نیتریک (با نرمالیته مشخص) در الکترود کوزه‌ای ریخته شد. پس از اتمام آزمایش و قطع جریان، ۱۰۰



شکل ۷ الف. چگونگی قرارگیری الکترودها در خاک ب- تزریق جریان به درون خاک و اندازه‌گیری هم زمان و دقیق ولتاژ و آمپراژ تزریقی.

جدول ۱ نمونه‌ای از آزمایش‌های انجام شده نشان دهنده چگونگی نمونه و شرایط مختلف آزمایش.

شماره نمونه	نوع کانسنس	چگونگی کانسنس	عمق کانسنس (cm)	درصد رطوبت خاک	شدت جریان (mA)	ولتاژ اعمالی (V)	طول زمان تزریق (ساعت)	غلظت اسید (نمایلته)
S ₁	زمینه	-	-	2	100	200	4	2
S ₂	زمینه	-	-	5	500	175	4	4
S ₃	کانسنس سرب و روی	توده‌ای کم عبار	20	2	100	175	8	2
S ₄	کانسنس سرب و روی	توده‌ای کم عبار	20	2	200	225	4	2
S ₅	کانسنس سرب و روی	توده‌ای کم عبار	20	2	100	135	4	2
S ₆	کانسنس سرب و روی	پودر شده لایه‌ای پرعیار	25	5	500	190	4	2
S ₇	کانسنس سرب و روی	پودر شده لایه‌ای پرعیار	12.5	5	500	200	8	2
S ₈	کانسنس سرب و روی	پودر شده لایه‌ای پرعیار	12.5	10	500	95	4	2
S ₉	کانسنس سرب و روی	پودر شده لایه‌ای پرعیار	12.5	10	800	150	4	2
S ₁₀	کانسنس سرب و روی	پودر شده لایه‌ای پرعیار	12.5	10	500	100	4	2
S ₁₁	کانسنس سرب و روی	پودر شده لایه‌ای پرعیار	12.5	10	800	150	4	2
S ₁₂	کانسنس سرب و روی	پراکنده کم عبار	10	10	500	120	4	2
S ₁₃	کانسنس سرب و روی	پراکنده کم عبار	10	10	500	110	10	2
S ₁₄	کانسنس سرب و روی	پراکنده کم عبار	10	10	200	55	10	2
S ₁₅	کانسنس سرب و روی	پراکنده کم عبار	15	10	500	90	4	2
S ₁₆	زمینه	-	-	-	500	225	4	2
S ₁₇	زمینه	-	-	-	500	220	8	2
S ₁₈	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	10	200	80	4	2
S ₁₉	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	7	500	195	4	2
S ₂₀	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	8	800	225	4	2
S ₂₁	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	10	800	135	8	2
S ₂₂	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	10	500	100	4	2
S ₂₃	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	10	800	175	10	2
S ₂₄	پلی متال (سرب، روی و مس)	پودر شده لایه‌ای پرعیار	15	10	800	175	8	2

جدول ۲ نتیجه آنالیز نمونه‌ها برای سه عنصر مس، سرب و روی با توجه به شرایط آزمایش در جدول ۱.

Cu (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	شماره نمونه
۰,۳۰	۲,۵۷	۵۰,۵ ppb	S ₁
۰,۱۹	۲,۰۶	۵۹,۶ ppb	S ₂
۰,۲۸	۲,۱۰	۱۰,۱,۴ ppb	S ₃
۰,۲۲	۲,۰۷	۲۸,۸ ppb	S ₄
۰,۱۵	۲,۰۳	۲۹,۰ ppb	S ₅
۰,۶۶	۵,۹۰	۱,۴۸	S ₆
۱,۰۷	۷,۷۶	۲,۳۵	S ₇
۱,۶۱	۷,۹۷	۲,۲۹	S ₈
۱,۶۲	۹,۸۹	۲,۴۷	S ₉
۰,۵۵	۶,۷۹	۱,۲۴	S ₁₀
۰,۳۷	۶,۲۴	۰,۸۴	S ₁₁
۰,۶۷	۷,۵۹	۰,۹۵	S ₁₂
۰,۵۸	۹,۶۸	۱,۱۲	S ₁₃
۰,۲۹	۳,۴۵	۰,۵۸	S ₁₄
۰,۵۵	۶,۱۷	۰,۱۵	S ₁₅
۰,۱۴	۲,۴۳	۰,۱۸	S ₁₆
۰,۱۹	۳,۳۶	۰,۵۷	S ₁₇
۰,۸۱	۶,۴۰	۰,۲۷	S ₁₈
۱,۵۸	۱۰,۳۳	۱,۶۷	S ₁₉
۰,۹۲	۶,۱۶	۰,۶۳	S ₂₀
۱,۵۵	۹,۲۸	۱,۹۴	S ₂₁
۱,۲۵	۷,۴۲	۰,۶۰	S ₂₂
۰,۹۸	۶,۷۴	۰,۹۲	S ₂₃
۰,۶۱	۹,۲۷	۲,۵۲	S ₂₄

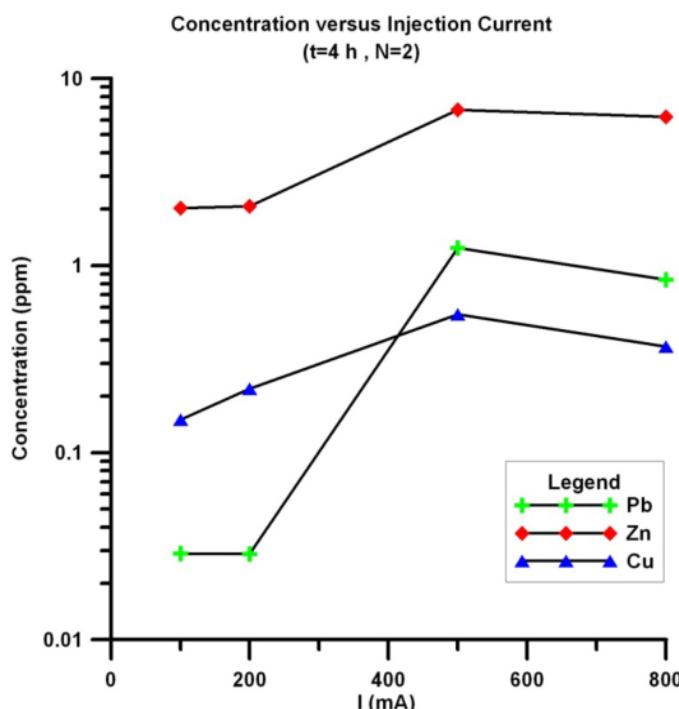
کاتد در جریان‌های بالا، الکتروولیت مصرفی اطراف آن قدرت انحلال خود را از دست داده و در نتیجه غلظت عناصر یاد شده، در اسید در شدت جریان‌های بسیار بالا، کاهش می‌یابد. در شکل شماره‌ی ۱۰ نمودار تغییرات غلظت عناصر نسبت به نرمالیته اسید مصرفی نشان داده شد. چنانکه در شکل مشاهده می‌شود، هر قدر نرمالیته اسید مصرفی افزایش یابد غلظت عناصر محلول نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به شبیه بالای منحنی روی (Zn)، دیده می‌شود که این عنصر از تحرک بالاتری نسبت به دو عنصر دیگر برخوردار است. در شکل شماره‌ی ۱۱ نمودار تغییرات غلظت عناصر نسبت به زمان تزریق جریان نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که، با گذشت زمان تزریق مشابه جریان، ابتدا غلظت عناصر مهاجر افزایش و پس از گذشت زمان خاصی

بحث و بررسی

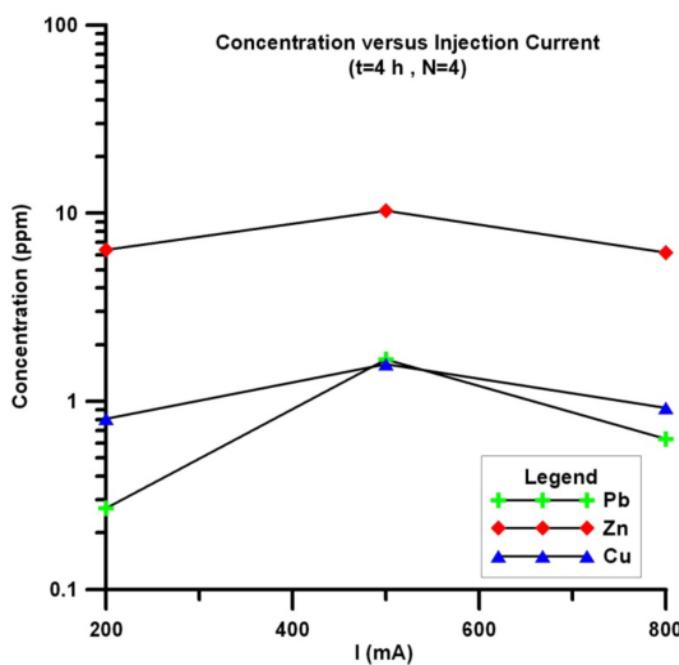
برای بررسی هر یک از پارامترها، تأثیر آن‌ها بر غلظت عناصر استخراجی تعیین شد که برخی از نمودارها و تحلیل‌های انجام شده به عنوان نمونه مورد بحث قرار گرفتند. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودار تغییرات غلظت عناصر نسبت به شدت جریان نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، مشاهده می‌شود که غلظت عناصر با افزایش شدت جریان تزریقی نخست با شبیه مناسبی افزایش یافته ولی از شدت جریان خاصی به بعد کاهش نشان می‌دهد. بر این اساس شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر به عنوان شدت جریان بهینه محاسبه می‌شود. در شدت جریان بالاتر به شدت جریان بهینه محاسبه می‌شود. در شدت جریان بالاتر به دلیل جمع شدن یون‌های مزاحم در اطراف کاتد (کوزه سفالی) قدرت مهاجرت و عبور یون‌های فلزی مورد بررسی، کاهش می‌یابد. ضمناً با توجه به حل شدن یون‌های مختلف به خصوص یون هیدروکسیل در اطراف الکترود کاتد و قلیایی شدن محیط

قدرت مهاجرت و عبور یون‌های فلزی مورد بررسی کاهش می‌یابد و با توجه به حل کردن یون‌های مختلف و قلیایی شدن محیط، اسید مصرفی قدرت انحلال خود را از دست داده، لذا غلظت عناصر یاد شده در اسید در زمان بالاتر کاهش می‌یابد.

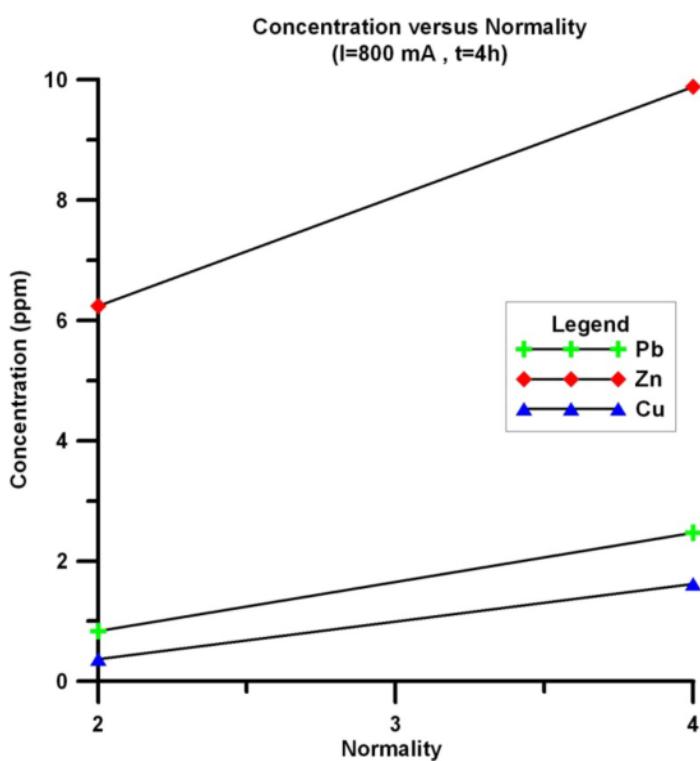
دوباره کاهش می‌یابد. لذا بر اساس آزمایش‌های انجام شده، زمان بهینه برای تزریق جریان ۸ ساعت محاسبه شده است. در زمان‌های بالاتر به دلیل جمع شدن یون‌های مزاحم در اطراف کاتد (کوزه‌ی سفالی) و قلیایی شدن الکتروولیت داخل آن،



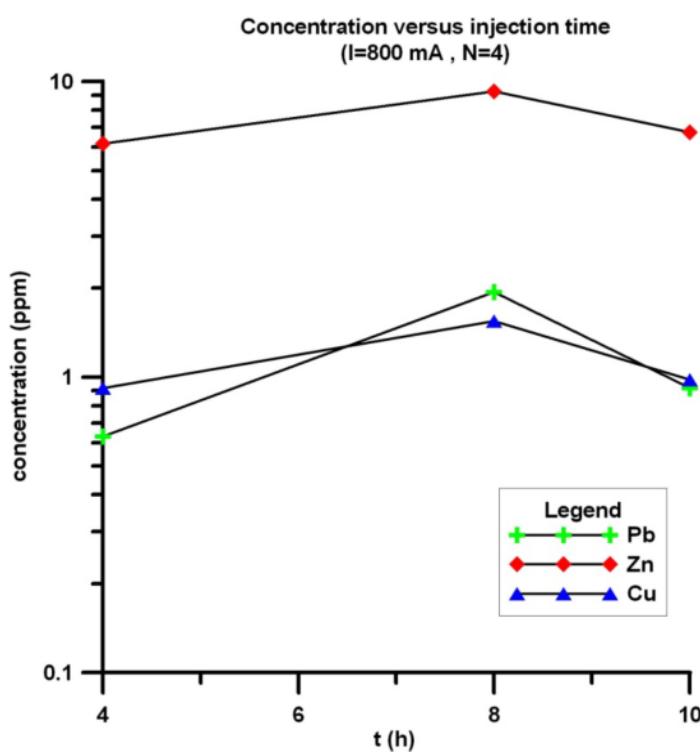
شکل ۸ تغییرات غلظت عناصر نسبت به شدت جریان (در شرایط ثابت نرمالیته اسید مصرفی ۲ و طول زمان تزریق جریان ۴ ساعت).



شکل ۹ تغییرات غلظت عناصر نسبت به شدت جریان (در شرایط ثابت نرمالیته اسید مصرفی ۴ و طول زمان تزریق جریان ۴ ساعت).



شکل ۱۰ تغییرات غلظت عناصر نسبت به نرمالیته اسید مصرفی (در شرایط ثابت شدت جریان تزریقی 800 mA و مدت زمان تزریق جریان 4 ساعت).



شکل ۱۱ تغییرات غلظت عناصر نسبت به زمان تزریق جریان (در شرایط ثابت نرمالیته اسید مصرفی 4 و شدت جریان تزریقی 800 mA).

جویی کانسارهای عمیق، با افزایش فاصله‌ی الکتروودها می‌توان عمق نفوذ جریان را افزایش داد.

مراجع

- [1] Govett G.J.S., Atherden P.R., "Electrogeochemical patterns in surface soils - Detection of blind mineralization beneath exotic cover, Thalanga, Queensland, Australia", Journal of Geochemical Exploration 28 (1987) 201-218.
- [2] Talapatra A. K., Talukdar R. C., De P. K., "Electrochemical technique for exploration of base metal sulphides", Journal of Geochemical Exploration 25 (1986) 389-396.
- [3] Xianrong L., Baohong H., Meilanna W., Nanshi Z., Keeling J., Fidler R. and Fabris A., "CHIM-geoelectrochemical method in search of concealed mineralisation in China and Australia", Chin. J. Geochem. 27 (2008) 198–202.
- [4] Bangliang X., Xiquan F., Heping W., "Electrogeochemical extraction technique in the prospecting of buried gold deposits", Journal of Geochemical Exploration 33 (1989) 99-108.
- [5] Leinz R. W., Hoover D. B., Fey D. L., Smith D. B., Patterson T., "Electrogeochemical sampling with NEOCHIM — results of tests over buried gold deposits", Journal of Geochemical Exploration 61 (1998) 57–86.
- [6] Leinz R.W., Hoover D.B., Meier A.L., "NEOCHIM: an electrochemical method for environmental application", Journal of Geochemical Exploration 64 (1998) 421–434.
- [7] Smith D. B., Hoover D. B., Sanzolone R. F., "Preliminary studies of the CHIM electrogeochemical method at the Kokomo Mine, Russell Gulch, Colorado", Journal of Geochemical Exploration 46 (1993) 257-278.
- [8] Keeling J. L., Luo X., Fidler R. W., Fabris A. J., Hou B., and Zeng N., "CHIM electrogeochemical trials: results from Challenger gold mine", MESA Journal 43 (2006) 26-29.
- [9] Mann A.W., Birrell R.D., Fedikow M.A.F., De Souza H.A.F., "Vertical ionic migration: mechanisms, soil anomalies, and sampling depth for mineral exploration", Geochemistry:

برداشت

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روش الکتروژئوشیمی قادر خواهد بود در شرایط مناسب، در کشف کانی‌سازی‌های پنهانی فلزی (کانسنگ سولفیدی مس، سرب و روی) که به وسیله‌ی قشری از خاک سطحی پوشیده شده‌اند، بسیار مفید واقع شود. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده نشان داد که با استفاده از این روش میزان فلزات استخراج شده تا چند برابر مقدار زمینه افزایش نشان می‌دهد. در این ارتباط عواملی چون عمق قرارگیری کانه، میزان رطوبت خاک، شدت جریان و ولتاژ تزریقی، طول زمان تزریق و غلظت اسید مصرفی به عنوان الکتروولیت از جمله مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر این روش هستند. بنابر نتایج بدست آمده، قدرت تحرک عنصر روی (Zn) بیشتر از دو عنصر دیگر (Cu و Pb) بوده و می‌توان از آن به عنوان عنصر ردیاب برای بی‌جویی کانسارهای سرب و روی و یا پلی متال استفاده کرد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، به ترتیب تأثیر شدت جریان تزریقی، نرمایی‌ته اسید مصرفی و طول زمان تزریق جریان نسبت به پارامترهای دیگر در ایجاد تحرک و انتقال یون‌ها بیشترند. بر اساس آزمایش‌های متعدد و نمودارهای ترسیم شده، شدت جریان و طول زمان بهینه برای تزریق جریان به ترتیب ۵۰۰ میلی آمپر و ۸ ساعت به دست آمد. در شدت جریان و طول زمان‌های بالاتر به دلیل جمع شدن یون‌های مزاحم در اطراف الکترود کاتد (کوزه سفالی)، قدرت مهاجرت و عبور یون‌های فلزی مورد بررسی کاهش می‌یابد. ضمناً با توجه به حل کردن یون‌های مختلف و تجزیه آب و آزاد شدن یون هیدروکسیل و قلیایی شدن الکتروولیت، اسید مصرفی قدرت اتحال خود را از دست داده، لذا غلظت عناصر یاد شده در اسید در زمان بالاتر کاهش می‌یابد.

گرچه توانایی این روش در مناطق بسیار خشک و حاره‌ای کاهش می‌یابد، ولی می‌توان در خاک‌های خشک با اضافه کردن ولتاژ تزریقی بر این مشکل فائق آمد. همچنین در مورد پی-

- [11] Fabris A., Lou X., Zeng N., Hou B., Fidler R., Keeling J., Scott K., "Chinese CHIM – the Australian expedition", In: Roach I.C. ed. 2005. Regolith 2005 – Ten Years of CRC LEME. CRC LEME, pp. 95-96.
- Exploration, Environment, Analysis 5 (2005) 201–210.
- [10] Li Y., Cheng H., Yu X., Xu W., "Geochemical exploration for concealed nickel-copper deposits", Journal of Geochemical Exploration 55 (1995) 309-320.