



## آشنایی با روش الکتروژئوشیمی با ارائه‌ی 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 الکتروژئوشیمی یکی از روش‌های نوین پی‌جویی مواد معدنی است که دارای بنیان الکتروشیمیایی 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 روباره‌ی کانسارهای فلزی پنهانی، باعث تغلیظ و جریان یافتن یون‌ها به سمت یک کاتد مخصوص خواهد شد. با دو الکتروود جریان، یکی بعنوان آنود 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 بالا به خاک تزریق می‌شود. پس از گذشت زمان معین (حداقل چندین ساعت)، در اثر یونیده شدن کانی‌های فلزی و پدیده‌ی الکتروشیمی، یون‌های فلزی مثبت به سمت کاتد رهسپار شده و در اسید موجود در آن (در اطراف الکتروود گرافیتی) متمرکز می‌شوند. با تجزیه‌ی این اسید به روش جذب اتمی یا پلاسمای القایی، غلظت فلزات پایه مختلف در اسید اندازه‌گیری و تحلیل می‌شود. پیش از پیاده کردن این روش در صحرا، با قرار دادن کانه‌های سولفیدی با مقیاس آزمایشگاهی مختلف در زیر خاک، کارایی 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 به‌عنوان 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 به‌دست آمدند.

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

### مقدمه

بسته به مقیاس عملیات پی‌جویی (ناحیه‌ای یا محلی)، به‌طور معمول می‌توان محیط‌های مختلف ژئوشیمیایی 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 شده فلزات مختلف، کشف نهشته‌های پنهانی با الگوهای پراکندگی اولیه و ثانویه با روش‌های معمولی ژئوشیمیایی به‌تدریج مشکل‌تر شده است. هرچند کاربرد روش‌های غیر معمول ژئوشیمیایی مانند نمونه برداری از جو، گازهای خاک، گیاهان و ... برای

کاربرد ژئوشیمی اکتشافی به‌عنوان یک روش نسبتاً نوین در پی‌جویی نهشته‌های کانساری به خصوص انواع کم عیار آن، هر روز در حال گسترش است. در سال‌های اخیر روش‌های ژئوشیمیایی به‌عنوان ابزاری کارآمد به‌طور گسترده 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.

### معرفی روش الکتروژئوشیمی

مهاجرت عناصر فلزی برون‌زا موضوعی است که اخیراً نظر بسیاری 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 الکترودی گسترده موجود روی زون کانی‌سازی انباشته می‌شود، به‌صورت غلظت‌های در حد بیهنجاری آشکار نماید [۱۰، ۹]. یون‌های فلزی در حالی که به‌وسیله‌ی 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 الکترولیت اسیدی غوطه‌ور است، به دام افتاده و انباشته می‌شوند. در مدل‌های آزمایشگاهی چنین استنباط می‌شود که رسوب گذاری یون‌های فلزی روی میله کاتدی و در الکترولیت اسیدی، در صورتی که جریان الکتریکی به‌طور 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 به‌عنوان حامل یون‌ها یا الکترولیت عمل می‌کند.

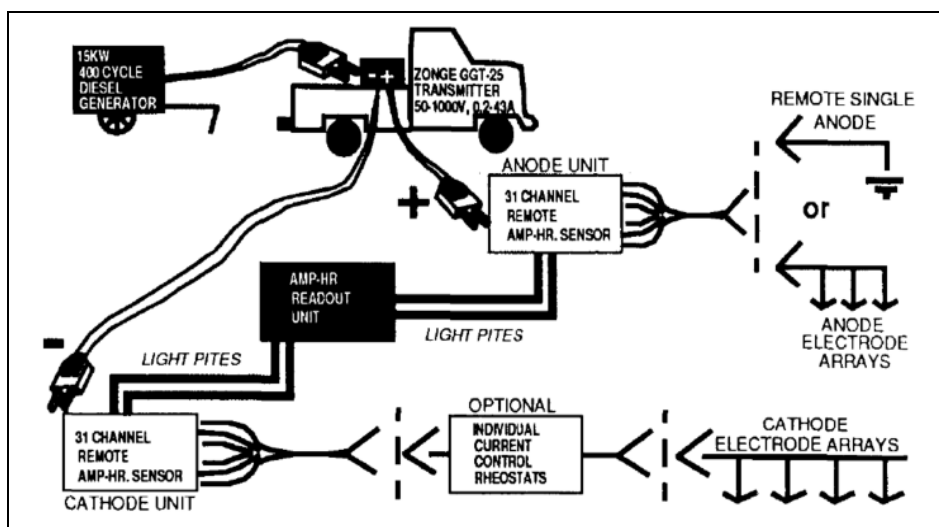
در این روش از جریان الکتریکی مستقیم (DC) و پایدار با ولتاژ بالا به مدت طولانی (در حدود چند ساعت)، بین یک آند و مجموعه‌ای از کاتدها با آرایه‌ی گسترده روی سر تا سر زون کانی‌سازی استفاده می‌شود. جریان الکتریکی باعث ایجاد یک میدان الکتریکی خواهد شد که این میدان موجب بر انگیخته شدن یون‌های مثبت از توده کانساری فلزی و نیز هاله‌های یونی ثانویه و سطحی می‌شود. سپس یون‌های راسب روی کاتد، نمونه‌گیری می‌شوند و به صورت شیمیایی مورد آنالیز قرار می‌گیرد. بنابراین غلظت یون‌های راسب شده می‌تواند بیانگر مکان نهشته‌ی کانساری باشد. این روش حتی برای کانسارهای 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. به‌علاوه با پیشرفت روش‌های تجزیه‌ای، زمینه برای فراگیرتر شدن بعضی از روش‌های خاص که اثر بخشی زیادی دارند نیز هموار شده است. نمونه‌ای از این روش‌ها، روش الکتروژئوشیمی است که دارای بنیان الکتروشیمیایی است.

روش پی‌جویی الکتروژئوشیمی به‌عنوان 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 روباره‌ی کانسارهای فلزی پنهانی، باعث تغلیظ و جریان یون‌ها به سمت یک کاتد مخصوص خواهد شد [۱-۳]. تالاپاترا<sup>۱</sup> و همکارانش مثال‌های موردی از کاربرد این روش برای پی‌جویی نهشته‌های برخی فلزات پایه ارائه کرده‌اند [۲]. گووت<sup>۲</sup> و آتردن<sup>۳</sup> از این روش در پی‌جویی یک ذخیره‌ی پنهانی ماسیو سولفید Zn-Pb-Cu در کوئینزلند استرالیا بهره گرفتند [۱]. بنگلیانگ<sup>۴</sup> و همکارانش و خیانرنگ<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup> و دیگران [۵، ۶]؛ اسمیت<sup>۷</sup> و همکارانش [۷] و نیز در استرالیا توسط کیلینگ<sup>۸</sup> و همکاران [۸] ارائه شده است.

با وجود نقاط قوت این روش نوین، در خصوص به‌کارگیری این روش در ایران و بررسی امکان و چگونگی اجرای آن، تاکنون فعالیت علمی و عملی خاصی صورت نگرفته است. همچنین به‌دلیل 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 کارایی 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



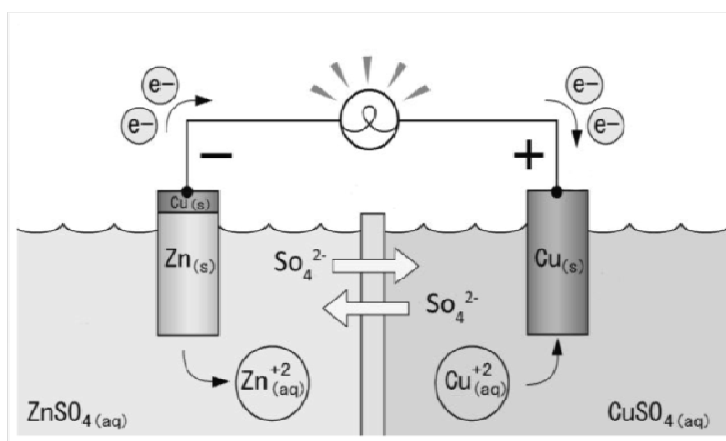
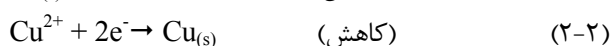
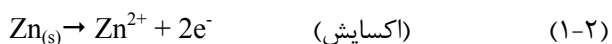
شکل ۱ طرح نموداری از تجهیزات صحرایی مورد استفاده در برداشت الکتروژئوشیمی [۷].

### سلول‌های الکتروشیمیایی

سلول‌های الکتروشیمیایی را به سهولت می‌توان به دو گروه رده-بندی کرد. سلول‌های گالوانی که انرژی تولید می‌کنند و سلول‌های برق‌کافتی (الکترولیزی) که در عمل نیاز به انرژی الکتریکی از یک چشمه‌ی 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 الکتروشیمیایی متشکل از دو رسانا به نام الکتروود است که هر کدام در یک محلول الکترولیت مناسب قرار دارد. برای اینکه الکتریسته جریان یابد، لازم است که؛ اولاً الکتروودها در خارج با یک رسانای فلزی به هم متصل شوند، ثانیاً دو محلول الکترولیت در تماس با یکدیگر باشند تا یون‌ها بتوانند از

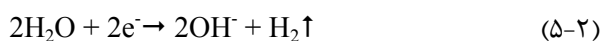
محلولی به محلول دیگر حرکت کنند. یک صفحه‌ی متخلخل میانی به گونه‌ای طراحی شده است که امکان تبادلات یونی را فراهم می‌آورد ولی از مخلوط شدن محلول‌های الکترولیت جلوگیری می‌کند. شکل ۲ یک نمونه از سلول گالوانی را نشان می‌دهد.

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



شکل ۲ نمایی از یک سلول گالوانی.

از اسید نیتریک بعنوان الکترولیت در کاتد استفاده می‌شود [۷]:  
 الف) الکترولیت 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، به‌خصوص در نتیجه افزایش آمپراژ خواهد شد. در نهایت همان طور که محلول قلیایی می‌شود، هیدروکسیل نامحلول فلزات در کاتد رسوب می‌کند که این فرایند باعث پوشیده شدن و نارسا 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 نیترا ته‌ای بدهند، به آن اندازه که نمک‌های دیگر فلزی از محلول رسوب می‌کنند، رسوب نکرده و مزاحمتی ایجاد نمی‌کنند. همچنین اغلب نمک‌های نیترات قابلیت انحلال بالایی دارند.

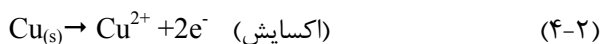
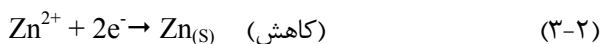
به‌طور مشابه، واکنش دیگری که در اثر تجزیه آب در آند صورت می‌پذیرد، منجر به آزاد شدن گاز اکسیژن در آند و ایجاد یون  $\text{H}^+$  و شدیداً اسیدی شدن اطراف این الکترود می‌شود (شکل ۳).



#### روش بررسی

به‌منظور پیاده سازی روش و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در فرآیند الکتروژنوشیمی، 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 به‌عنوان 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 چشمه‌ی خارجی، تا این سلول می‌تواند به‌صورت معکوس یعنی به‌صورت یک سلول برق‌کافتی عمل کند. در این شرایط واکنش‌های انجام شده در دو الکترود به شکل زیر خواهد بود:



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

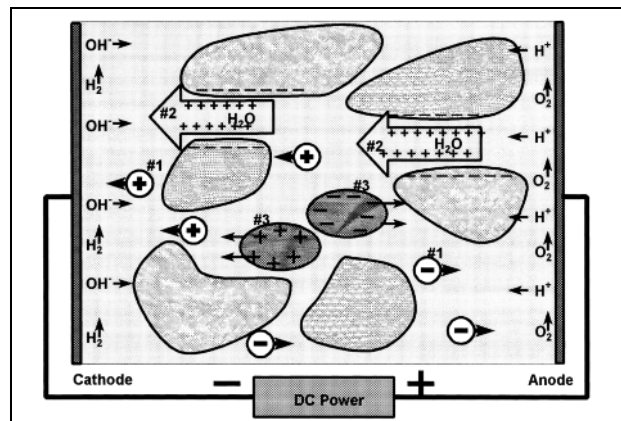
#### الکترودها

الکترودهای مورد استفاده در روش الکتروژنوشیمی بر دو نوع‌اند: الف) الکترودهای کاتدی که از جنس کربن یا گرافیت ساخته شده و به قطب منفی چشمه‌ی جریان الکتریکی وصل می‌شود و به آن الکترود نمونه‌گیر نیز گفته می‌شود.  
 ب) الکترودهای آندی که از جنس فولاد است و به قطب مثبت چشمه‌ی جریان وصل شده و به نام الکترود بی‌نهایت نیز شناخته می‌شود.

چیدمان الکترودها 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 الکترودها 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.

#### الکترولیت

به‌منظور جلوگیری از قطبیده شدن کاتد و امکان تبادل یونی در آن در اطراف الکترود گرافیتی کاتد، از الکترولیت اسیدی استفاده می‌شود. بدین منظور، اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$ ) 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 آنده) [۵].



شکل ۴ الف. تانک پلاستیکی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی ب. آماده سازی خاک با تهیه ی 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 می شود. همچنین با توجه به آنچه که گفته شد و نیمه واکنش های انجام شده در آند، اطراف آند به شدت اسیدی شده و باعث خوردگی شدید آند فلزی می شود (شکل ۶- الف). برای جلوگیری از این مشکل می توان از الکترودهای گرافیتی در آند نیز استفاده کرد. با توجه به اینکه الکترو کاتد باید جمع کننده ی کاتیون های مورد نظر بوده و از طرفی ناقطبیده باشد، بدین منظور از یک میله گرافیتی قرار گرفته در یک الکترولیت (اسید نیتریک) به عنوان الکترو کاتد استفاده شد. برای نگهداری الکترولیت در اطراف میله گرافیتی و برقراری ارتباط الکتریکی بین کاتد و خاک از یک کوزه ی سفالی به عنوان یک ظرف نیمه تراوا استفاده شد تا علاوه بر جلوگیری از تراوش سریع الکترولیت به داخل خاک امکان تبادل یونی بین الکترولیت و خاک براحتی فراهم شود (شکل ۶- ب و پ).

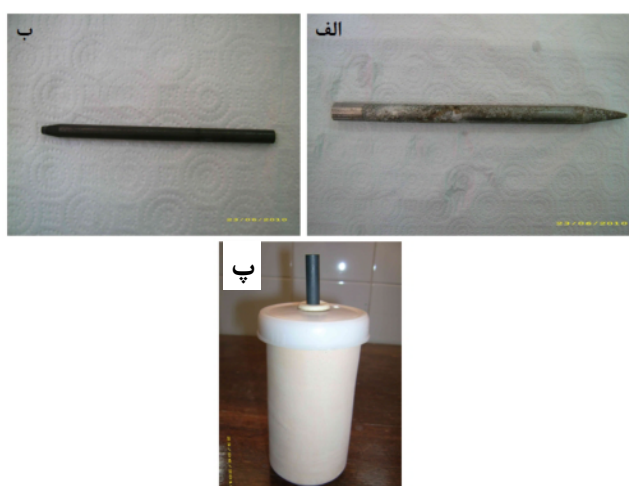
برای تزریق جریان الکتریسیته از یک ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ که مجهز به یک رثوستا بود، استفاده شد. ورودی این دستگاه از برق ۲۲۰ ولت شهر تامین شده و قادر بود تا خروجی متناوب و متغیری از ۰ تا ۲۵۰ ولت را با بیشترین جریانی معادل ۲٫۵ آمپر براحتی تامین کند (شکل ۵- الف).

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).

الکترو کاتد مورد استفاده در آند از جنس فولاد در نظر گرفته شد تا با رسانایی مناسب، امکان تزریق جریان های 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 الکترو کاتد و محل تماس آن با خاک همواره مرطوب نگه داشته شود. رسوب برخی آنیون ها روی آند و عدم ارتباط



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

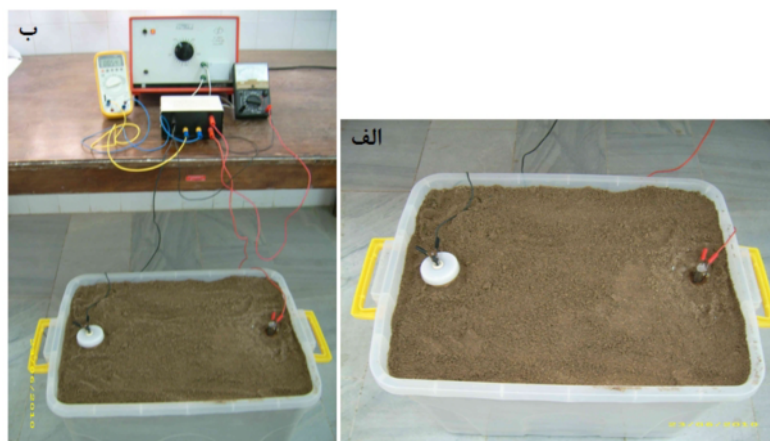


شکل ۶ الف. الکتروود فولادی مورد استفاده در آند و خوردگی سطح آن ناشی از اسیدی شدن محیط آند، ب. میله‌ی گرافیتی مورد استفاده در کاتد، پ. الکتروود کاتدی شامل کوزه‌ی سفالی همراه با میله‌ی گرافیتی که با درپوش مخصوص در مرکز کوزه قرار گرفته و هنگام قرارگیری در درون خاک با الکتروولیت (اسید نیتریک) پر می‌شود.

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  $\text{ppb}$  کاهش یافت. در مرحله‌ی بعد با قرار دادن یک کانسنگ مشخص با ویژگی‌های 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 نرمالیت اسید مصرفی به عنوان الکتروولیت، 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 الکتروودها 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 داراست، 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 ( $220\text{ cm}^3$ ) سی سی از اسید نیتریک (با نرمالیت مشخص) در الکتروود کوزه‌ای ریخته شد. پس از اتمام آزمایش و قطع جریان،  $100$



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 کانستگ               | چگونگی کانستگ           | عمق قرارگیری در خاک (cm) | درصد رطوبت خاک | شدت جریان (mA) | ولتاژ اعمالی (V) | طول زمان تزریق (ساعت) | غلظت اسید (نرمالیت) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| S <sub>1</sub>  | زمینه                    | -                       | -                        | ۲              | ۱۰۰            | ۲۰۰              | ۴                     | ۲                   |
| S <sub>2</sub>  | زمینه                    | -                       | -                        | ۵              | ۵۰۰            | ۱۷۵              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>3</sub>  | کانستگ سرب و روی         | توده‌ای کم عیار         | ۲۰                       | ۲              | ۱۰۰            | ۱۷۵              | ۸                     | ۲                   |
| S <sub>4</sub>  | کانستگ سرب و روی         | توده‌ای کم عیار         | ۲۰                       | ۲              | ۲۰۰            | ۲۲۵              | ۴                     | ۲                   |
| S <sub>5</sub>  | کانستگ سرب و روی         | توده‌ای کم عیار         | ۲۰                       | ۲              | ۱۰۰            | ۱۳۵              | ۴                     | ۲                   |
| S <sub>6</sub>  | کانستگ سرب و روی         | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۲۵                       | ۵              | ۵۰۰            | ۱۹۰              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>7</sub>  | کانستگ سرب و روی         | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۲٫۵                     | ۵              | ۵۰۰            | ۲۰۰              | ۸                     | ۴                   |
| S <sub>8</sub>  | کانستگ سرب و روی         | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۲٫۵                     | ۱۰             | ۵۰۰            | ۹۵               | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>9</sub>  | کانستگ سرب و روی         | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۲٫۵                     | ۱۰             | ۸۰۰            | ۱۵۰              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>10</sub> | کانستگ سرب و روی         | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۲٫۵                     | ۱۰             | ۵۰۰            | ۱۰۰              | ۴                     | ۲                   |
| S <sub>11</sub> | کانستگ سرب و روی         | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۲٫۵                     | ۱۰             | ۸۰۰            | ۱۵۰              | ۴                     | ۲                   |
| S <sub>12</sub> | کانستگ سرب و روی         | پراکنده کم عیار         | ۱۰                       | ۱۰             | ۵۰۰            | ۱۲۰              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>13</sub> | کانستگ سرب و روی         | پراکنده کم عیار         | ۱۰                       | ۱۰             | ۵۰۰            | ۱۱۰              | ۱۰                    | ۴                   |
| S <sub>14</sub> | کانستگ سرب و روی         | پراکنده کم عیار         | ۱۰                       | ۱۰             | ۲۰۰            | ۵۵               | ۱۰                    | ۴                   |
| S <sub>15</sub> | کانستگ سرب و روی         | پراکنده کم عیار         | ۱۵                       | ۱۰             | ۵۰۰            | ۹۰               | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>16</sub> | زمینه                    | -                       | -                        | ۱۰             | ۵۰۰            | ۲۲۵              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>17</sub> | زمینه                    | -                       | -                        | ۱۰             | ۵۰۰            | ۲۲۰              | ۸                     | ۴                   |
| S <sub>18</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۱۰             | ۲۰۰            | ۸۰               | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>19</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۷              | ۵۰۰            | ۱۹۵              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>20</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۸              | ۸۰۰            | ۲۲۵              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>21</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۱۰             | ۸۰۰            | ۱۳۵              | ۸                     | ۴                   |
| S <sub>22</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۱۰             | ۵۰۰            | ۱۰۰              | ۴                     | ۴                   |
| S <sub>23</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۱۰             | ۸۰۰            | ۱۷۵              | ۱۰                    | ۴                   |
| S <sub>24</sub> | پلی متال (سرب، روی و مس) | پودر شده لایه‌ای پرعیار | ۱۵                       | ۱۰             | ۸۰۰            | ۱۷۵              | ۸                     | ۴                   |



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

| شماره نمونه     | Pb (ppb)  | Zn (ppm) | Cu (ppm) |
|-----------------|-----------|----------|----------|
| S <sub>1</sub>  | ۵۰٫۵ ppb  | ۲٫۵۷     | ۰٫۳۰     |
| S <sub>2</sub>  | ۵۹٫۶ ppb  | ۲٫۰۶     | ۰٫۱۹     |
| S <sub>3</sub>  | ۱۰۱٫۴ ppb | ۲٫۱۰     | ۰٫۲۸     |
| S <sub>4</sub>  | ۲۸٫۸ ppb  | ۲٫۰۷     | ۰٫۲۲     |
| S <sub>5</sub>  | ۲۹٫۰ ppb  | ۲٫۰۳     | ۰٫۱۵     |
| S <sub>6</sub>  | ۱٫۴۸      | ۵٫۹۰     | ۰٫۶۶     |
| S <sub>7</sub>  | ۲٫۳۵      | ۷٫۷۶     | ۱٫۰۷     |
| S <sub>8</sub>  | ۲٫۲۹      | ۷٫۹۷     | ۱٫۶۱     |
| S <sub>9</sub>  | ۲٫۴۷      | ۹٫۸۹     | ۱٫۶۲     |
| S <sub>10</sub> | ۱٫۲۴      | ۶٫۷۹     | ۰٫۵۵     |
| S <sub>11</sub> | ۰٫۸۴      | ۶٫۲۴     | ۰٫۳۷     |
| S <sub>12</sub> | ۰٫۹۵      | ۷٫۵۹     | ۰٫۶۷     |
| S <sub>13</sub> | ۱٫۱۲      | ۹٫۶۸     | ۰٫۵۸     |
| S <sub>14</sub> | ۰٫۵۸      | ۳٫۴۵     | ۰٫۲۹     |
| S <sub>15</sub> | ۰٫۱۵      | ۶٫۱۷     | ۰٫۵۵     |
| S <sub>16</sub> | ۰٫۱۸      | ۲٫۴۳     | ۰٫۱۴     |
| S <sub>17</sub> | ۰٫۵۷      | ۳٫۳۶     | ۰٫۱۹     |
| S <sub>18</sub> | ۰٫۲۷      | ۶٫۴۰     | ۰٫۸۱     |
| S <sub>19</sub> | ۱٫۶۷      | ۱۰٫۳۳    | ۱٫۵۸     |
| S <sub>20</sub> | ۰٫۶۳      | ۶٫۱۶     | ۰٫۹۲     |
| S <sub>21</sub> | ۱٫۹۴      | ۹٫۲۸     | ۱٫۵۵     |
| S <sub>22</sub> | ۰٫۶۰      | ۷٫۴۲     | ۱٫۲۵     |
| S <sub>23</sub> | ۰٫۹۲      | ۶٫۷۴     | ۰٫۹۸     |
| S <sub>24</sub> | ۲٫۵۲      | ۹٫۲۷     | ۰٫۶۱     |

### بحث و بررسی

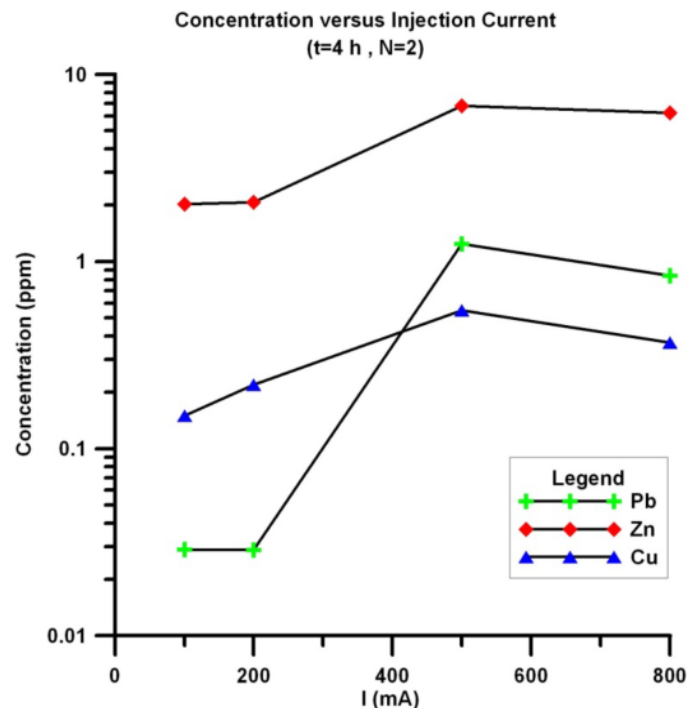
برای بررسی هر یک از پارامترها، تأثیر آن‌ها بر غلظت عناصر استخراجی تعیین شد که برخی از نمودارها و تحلیل‌های انجام شده به‌عنوان نمونه مورد بحث قرار گرفتند. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودار تغییرات غلظت عناصر نسبت به شدت جریان نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، مشاهده می‌شود که غلظت عناصر با افزایش شدت جریان تزریقی نخست با شیب مناسبی افزایش یافته ولی از شدت جریان خاصی به بعد کاهش نشان می‌دهد. بر این اساس شدت جریان ۵۰۰ میلی آمپر به‌عنوان 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 به‌خصوص یون هیدروکسیل در اطراف الکترود کاتد و قلیایی شدن محیط

کاتد در جریان‌های بالا، الکترولیت 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 نرمالیت اسید مصرفی نشان داده شد. چنانکه در شکل مشاهده می‌شود، هر قدر نرمالیت اسید مصرفی افزایش یابد غلظت عناصر محلول نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به شیب 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

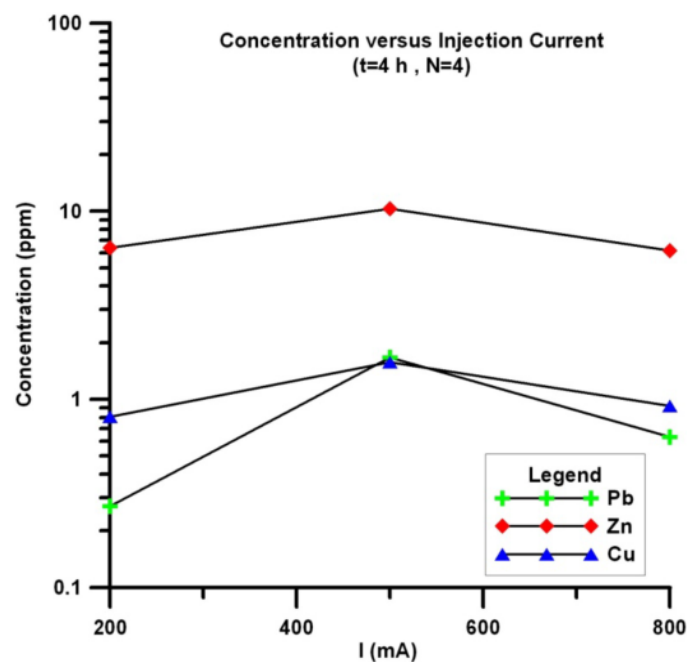


قدرت مهاجرت و عبور یون‌های فلزی مورد بررسی کاهش می‌یابد و با توجه به حل کردن یون‌های مختلف و قلیایی شدن محیط، اسید مصرفی قدرت انحلال خود را از دست داده، لذا غلظت عناصر یاد شده در اسید در زمان بالاتر کاهش می‌یابد.

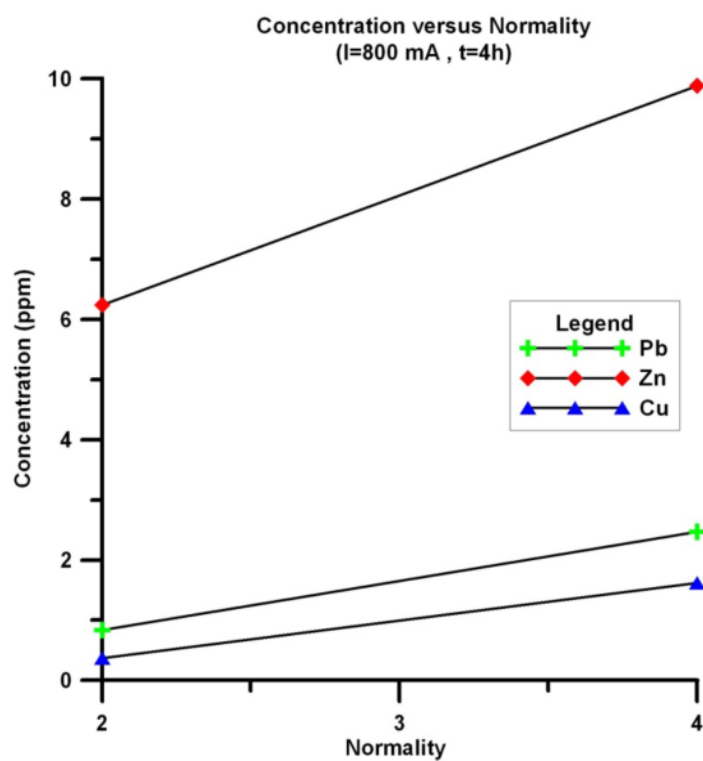
دوباره کاهش می‌یابد. لذا بر اساس آزمایش‌های انجام شده، زمان بهینه برای تزریق جریان ۸ ساعت محاسبه شده است. در زمان‌های بالاتر به دلیل جمع شدن یون‌های مزاحم در اطراف کاتد (کوزه‌ی سفالی) و قلیایی شدن الکترولیت داخل آن،



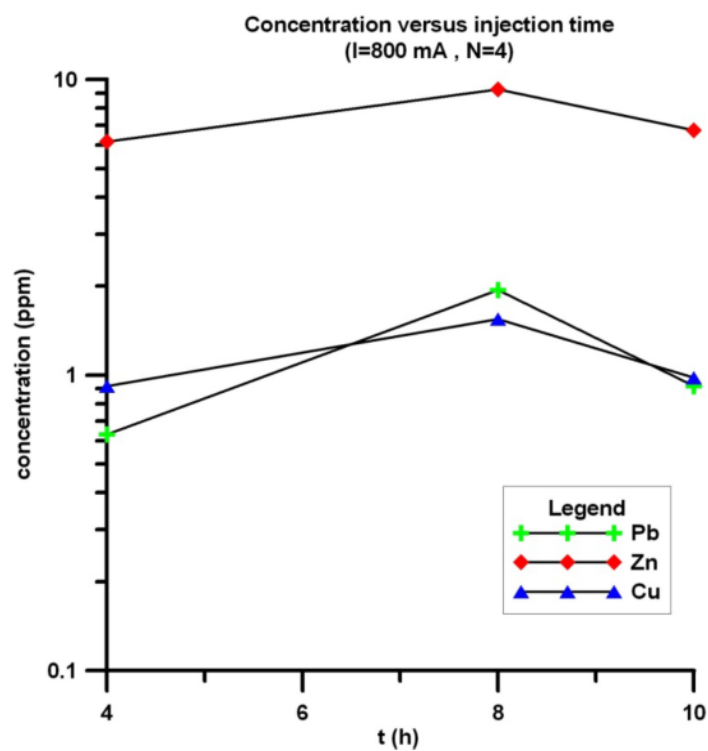
شکل ۸ تغییرات غلظت عناصر نسبت به شدت جریان (در شرایط ثابت نرمالیده اسید مصرفی ۲ و طول زمان تزریق جریان ۴ ساعت).



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



شکل ۱۰ تغییرات غلظت عناصر نسبت به نرمالیت اسید مصرفی (در شرایط ثابت شدت جریان تزریقی  $800 \text{ mA}$  و مدت زمان تزریق جریان ۴ ساعت).



شکل ۱۱ تغییرات غلظت عناصر نسبت به زمان تزریق جریان (در شرایط ثابت نرمالیت اسید مصرفی ۴ و شدت جریان تزریقی  $800 \text{ mA}$ ).

## 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 به‌عنوان الکترولیت از جمله مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر این روش هستند. بنابر نتایج به‌دست آمده، قدرت تحرک عنصر روی (Zn) بیشتر از دو عنصر دیگر (Cu و Pb) بوده و می‌توان از آن به عنوان عنصر ردیاب برای پی جویی کانسارهای سرب و روی ویا پلی متال استفاده کرد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، به ترتیب تأثیر شدت جریان تزریقی، نرمالیت 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 به‌دست آمد. در شدت جریان و طول زمان‌های بالاتر به دلیل جمع شدن یون‌های مزاحم در اطراف الکتروود 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 الکترولیت، اسید مصرفی قدرت انحلال 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-

جویی کانسارهای عمیق، با افزایش فاصله‌ی الکترودها 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-geochemical 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 electro-geochemical 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:

[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.