JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دوره ۱، شماره ۱، ۱۳۹۴، صفحات ۱-۹

بررسی ویژگی‌های زیرسطحی سازه فروشویی توده‌ای با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی؛ مورد مطالعاتی: معدن مس سرچشمه

مصیب مرادی‌پور[۱]، حجت‌اله رنجبر[۲]، آزاده حجت[۳*]، سعید کریمی‌نسب[۴]، هاشم رنجی رودپشتی[۵] و شهرام دانش‌پژوه[۶]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- استاد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۳- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۴- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۵- کارشناس ارشد، شرکت مهندسین مشاور زمین آب پی
۶- مرکز تحقیق و توسعه هیدرومتالورژی، مجتمع مس سرچشمه

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۰۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: **ahojat@uk.ac.ir**

واژگان کلیدی

سازه فروشویی توده‌ای
مقاومت ویژه الکتریکی
پلاریزاسیون القایی
رادار نفوذی به زمین
معدن مس سرچشمه

چکیده

از مسائل مهمی که در رابطه با عملیات فروشویی توده‌ای وجود دارد، نیاز به آگاهی از سطح محلول باردار مس در قسمت‌های مختلف سازه، تعیین مناطق اشباع و غیراشباع و بررسی کیفیت و غلظت محلول در قسمت‌های مختلف سازه است. در این مقاله، با استفاده از برداشت‌های صحرایی ترکیبی ژئوفیزیک (شامل روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، پلاریزاسیون القایی (IP) و رادار نفوذی به زمین (GPR))، به بررسی ساختار داخلی سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ معدن مس سرچشمه پرداخته شد. هدف اصلی، تعیین مناطق اشباع از محلول و همچنین بررسی مسیرهای احتمالی جریان ترجیحی محلول بوده است. بدین منظور، پس از قطع پاشش بر روی محدوده شماره ۹۰۳ سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ به مدت ۱۰ روز، برداشت‌های صحرایی در طول پنج پروفیل موازی انجام شد. حداکثر عمق بررسی در برداشت‌های مقاومت ویژه و IP به دلیل مساحت کم محدوده شماره ۹۰۳ برای گسترش آرایه الکترودی، به ۲۰ متر محدود شد. همچنین جذب امواج رادار در محیط‌های با رسانندگی بالا، باعث کاهش عمق نفوذ در برداشت‌های GPR گردید. در نهایت، با استفاده از نتایج حاصل از تفسیر داده‌های صحرایی و با کمک گرفتن از نتایج مطالعات آزمایشگاهی که قبل از برداشت‌های صحرایی انجام شده بود، مناطق اشباع از محلول باردار مس، مناطق خشک و مسیرهای عبور محلول مشخص گردید. با توجه به نتایج حاصل، از میان روش‌های ژئوفیزیکی انجام شده، روش مقاومت ویژه الکتریکی بهترین روش برای پایش سازه فروشویی توده‌ای تشخیص داده شد.

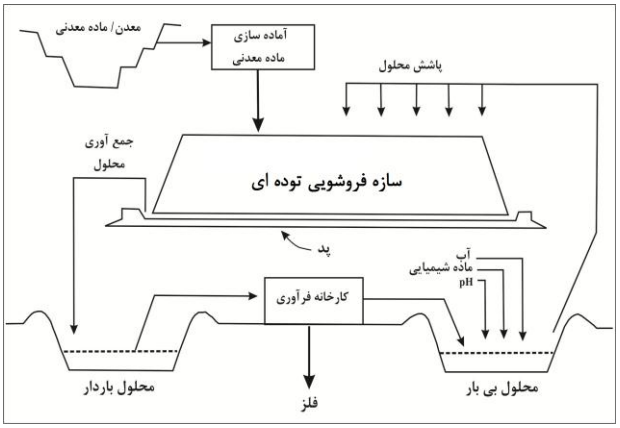
۱- مقدمه

امروزه رویکرد صنعت تولید مس به سوی روش‌های هیدرومتالورژی است. این روش‌ها با توجه به معایب روش پیرومتالورژی، همچون: هزینه‌های سنگین مواد اولیه، سرمایه‌گذاری بالا، نیروی انسانی و وجود مشکلاتی نظیر آلودگی زیست‌محیطی، مصرف بالای انرژی و عدم استفاده مجدد از مواد مصرفی، روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند (آزاد، ۱۳۹۰). در روش هیدرومتالورژی، کانسنگ‌های معدنی پس از استخراج، تحت عملیات خردایش قرار گرفته، با انجام عملیات انحلال بر روی آن، محلول حاوی عنصر معدنی حاصل می‌شود.

در روش هیدرومتالورژی جهت استخراج مس از کانه‌های اکسیدی یا سولفیدی کم‌عیار (که استخراج مس از آن به روش پیرومتالورژی مقرون به صرفه نیست)، با پاشش اسید سولفوریک بر روی کانسنگ، محلولی به‌صورت $CuSo_4$-$FeSo_4$ و به نام محلول باردار مس (PLS: Pregnant Leaching Solution) وارد حوضچه انحلال می‌شود. در مرحله بعد، به روش الکتروشیمیایی و همانند روش تصفیه الکترولیتی در روش پیرومتالورژی، مس به روش الکترولیز استحصال می‌شود؛ با این تفاوت که در اینجا یون مس داخل محلول را بر روی آندی از جنس «سرب» رسوب می‌دهند و پس از رسیدن لایه رسوب به ضخامت کافی، آن را برش زده و جدا می‌کنند. این روش به خاطر حذف مرحله ذوب، انرژی بسیار کمتری مصرف می‌کند؛ ولی بخش کوچکی از مس در دنیا از این طریق تولید می‌شود.

در روش سازه فروشویی توده‌ای (Heap leaching)، ماده معدنی پس از استخراج، خرد شده، پس از نرمه‌گیری و آگلومراسیون، بر روی یک بستر ضد اسید و نفوذناپذیر، پهن می‌شود. محلول تصفیه‌شده (Raffinate)، به سطح توده پاشیده می‌شود. محلول باردار جمع‌آوری شده از زیر توده فروشویی به حوضچه PLS هدایت می‌شود. بیشتر محل‌های انتخاب شده جهت سازه فروشویی توده‌ای، به‌گونه‌ای هستند که شیب مناسبی برای خروج مایع باردار از پایین سازه داشته باشند. محلول باردار از حوضچه PLS برای استخراج مس به واحد استخراج با حلال پمپ می‌شود. اگر غلظت مس در حوضچه PLS پایین باشد، این محلول دوباره روی توده فروشویی برگشت داده می‌شود تا عیار مس آن برای استخراج با حلال قابل قبول باشد. بعد از استحصال مس از محلول باردار، محلول بی‌بار به حوضچه رافینیت برگشت داده می‌شود (Van Zyl et al., 1988). در شکل ۱ نمای شماتیک عملیات سازه فروشویی توده‌ای نشان داده شده است.

در عملیات فروشویی توده‌ای، نتایج حاصل از اجرا در عمل، به‌ندرت با تئوری منطبق است. ممکن است مشکل عدم نفوذپذیری یا نفوذپذیری بیش از حد یا ترکیبی از این دو ایجاد شود (آزاد، ۱۳۹۰). یکی از دلایل اصلی شکست اکثر پروژه‌های فروشویی توده‌ای، نفوذپذیری نامناسب آن است. حرکت محلول فروشویی توسط نفوذپذیری مواد انباشته شده (که خود به عملیات اجرایی، مشخصات و ویژگی‌های ماده معدنی و چگونگی آماده‌سازی ماده معدنی بستگی دارد) کنترل می‌شود. به عنوان مثال، وجود مناطق با نفوذپذیری کم باعث می‌شود که محلول از بخش قابل‌توجهی از ماده معدنی عبور نکرده و مسیرهای با نفوذپذیری زیاد را ترجیح دهد. در حقیقت، محلول فروشویی از محدوده‌های با حداکثر نفوذپذیری عبور کرده و پس از زمان کوتاهی، این مناطق کاملاً تحت فروشویی قرار می‌گیرند؛ اما مقدار قابل‌توجهی فلز در مناطقی که محلول عبور نکرده باقی می‌ماند. این پدیده که جریان ترجیحی (Preferential flow) نام دارد، باعث کاهش بازدهی عملیات فروشویی توده‌ای می‌شود (Rucker et al., 2009). بنابراین، از مسائل مهمی که در رابطه با عملیات فروشویی توده‌ای وجود دارد، نیاز به آگاهی از سطح محلول باردار مس در قسمت‌های مختلف سازه، تعیین مناطق اشباع و غیراشباع، تعیین محل‌های نشت محلول و بررسی کیفیت و غلظت محلول در قسمت‌های مختلف است.



شکل ۱: نمای شماتیک عملیات فروشویی توده‌ای (Van Zyl et al., 1988).

اگرچه با روش‌های متداول حفاری و نمونه‌گیری نیز می‌توان تا حدودی به بررسی رفتار محلول پرداخت، اما معمولاً این روش‌ها بسیار پرهزینه بوده و انجام آن‌ها عملاً مدت زمان زیادی به طول می‌انجامد. علاوه بر این ارتباط بین نقاط حفاری می‌تواند با ابهام همراه باشد. نکته بسیار مهم دیگر این است که روش‌های حفاری می‌تواند به پارگی آستر و آلودگی‌های زیرزمینی منجر شوند. در مقایسه، روش‌های غیرمخرب ژئوفیزیکی دارای مزایای فوق‌العاده و قابل‌توجهی از جمله، سادگی، سرعت بالا، هزینه کم، غیرمخرب و غیرتهاجمی بودن می‌باشند. بسیاری از خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها و سنگ‌ها (به عنوان مثال چگالی، تخلخل، نفوذپذیری و غیره) را می‌توان به‌طور غیرمستقیم با استفاده از اندازه‌گیری‌های

ژئوفیزیکی تعیین کرد (حجت و رنجبر، ۱۳۹۰).

از میان روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، روش‌های الکتریکی کاربرد وسیعی در تعیین خصوصیات سنگ‌شناسی، تفکیک سازندهای زیرسطحی، بررسی‌های هیدروژئوفیزیکی و همچنین تعیین و پایش اشباع و املاح سیال موجود در فضاهای خالی سنگ دارند. با توجه به وجود تباین الکتریکی بین محلول PLS و ماده معدنی، انتظار می‌رود روش‌های الکتریکی از جمله روش مقاومت ویژه الکتریکی، روش IP و روش GPR در این مطالعات نتایج قابل‌قبولی فراهم آورند. با توجه به اختلاف مقادیر مقاومت ویژه مناطق اشباع و غیراشباع در سازه‌های فروشویی توده‌ای، روش مقاومت ویژه الکتریکی روشی مناسب، سریع و کم هزینه برای انجام چنین بررسی‌هایی است. با اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه می‌توان به توزیع محلول در سازه فروشویی و تا حدودی نیز کانی‌سازی پی برد. با توجه به کاربردهای بسیار متنوع و مزایای فوق‌العاده روش GPR، با استفاده از این روش در مطالعه شرایط سازه فروشویی توده‌ای می‌توان به نتایج مورد نظر با دقت مناسب دست یافت.

علی‌رغم گستردگی روش‌های ژئوفیزیکی و کاربردهای مختلف آن در بررسی مسائل زیرسطحی، در زمینه بررسی ویژگی‌های زیرسطحی سازه‌های فروشویی توده‌ای، به ندرت مطالعاتی انجام شده است. چنین تحقیقی تاکنون در ایران انجام نشده است و پژوهش حاضر، برای اولین بار در ایران انجام شد. طبق بررسی‌های انجام شده و با توجه به سوابق موجود، نمونه چنین کاری در دنیا نیز به‌ندرت گزارش شده است.

از محدود مطالعات این قبیل می‌توان به برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی در ناحیه شمالی عملیات فروشویی توده‌ای طلا در معدن Newmont، آمریکا، به‌منظور بررسی وضعیت محلول اشاره کرد. بستر شمالی این سازه در سال ۱۹۸۷ و به‌منظور فرآوری کانی‌های کم‌عیار اکسید طلا با استفاده از محلول رقیق سیانید سدیم ساخته شده است. نتایج حاصل از تحقیق مذکور، الگوی پیچیده‌ای از مقادیر کم و زیاد مقاومت ویژه (از ۷/۸ تا ۵۰۰ اهم- متر) را نشان داد. مقادیر کم مقاومت ویژه، به محتوای رطوبت بالا، آب درون حفره‌ای با تمرکز یونی زیاد، ذرات خاک ریزدانه و تا حدودی نیز کانی‌سازی نسبت داده شد (Rucker et al., 2009). " Rucker (2010)" در ادامه کار قبلی خود بر روی سازه فروشویی توده‌ای طلا در معدن نیومونت، با داده‌های به دست آمده از عملیات حفاری و برداشت‌های زمینی مقاومت ویژه الکتریکی، به بررسی پتانسیل بازیابی ثانویه (Secondary recovery) طلا از سازه فروشویی متروکه، با استفاده از روش هیدروجت پرداخت. بدین منظور، با استفاده از داده‌های حاصله، مناطق پر عیار و کم‌عیار و نیز چگونگی توزیع رطوبت در سازه را شناسایی کرد و در نهایت محل‌هایی جهت تزریق پرفشار محلول شستشو دهنده، پیشنهاد داد.

اهمیت تعیین سطح محلول PLS در سازه‌های فروشویی توده‌ای در معدن مس سرچشمه، مسئله‌ای غیرقابل انکار است. با توجه به وجود تباین الکتریکی بین محلول PLS و ماده معدنی، در این پژوهش با کاربرد ترکیبی روش‌های ژئوفیزیکی شامل روش مقاومت ویژه الکتریکی، روش IP و روش GPR به تصویربرداری ساختار درونی بخشی از سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ پرداخته شد.

در حالی که تحقیقات بسیار گسترده‌ای در رابطه با جنبه‌های مختلف مطالعات صحرایی مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است، محققین بسیار اندکی به اندازه‌گیری مقاومت ویژه نمونه‌های خاک در آزمایشگاه پرداخته‌اند. با توجه به عدم وجود اطلاعات جانبی مناسب و به‌منظور تسهیل تفسیر داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرایی، قبل از انجام تحقیق حاضر، "مرادی‌پور و همکاران (۱۳۹۲)" به بررسی تغییرات مقاومت ویژه نمونه‌های خاک مس سولفیدی کم‌عیار معدن مس سرچشمه در حضور اسید سولفوریک صنعتی (pH=2) با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقاومت ویژه پرداختند.

۲- منطقه مورد مطالعه

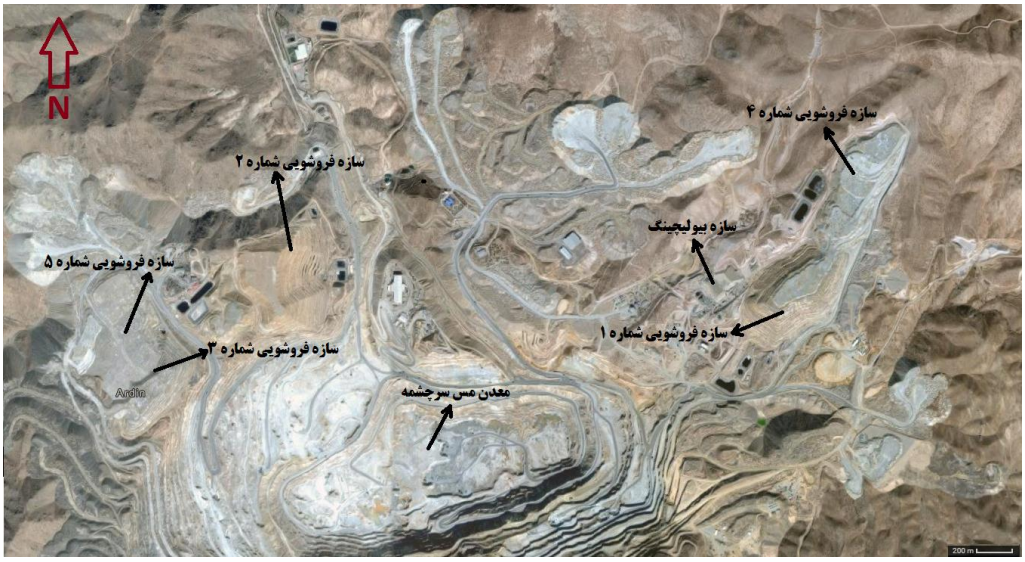
در ابتدای بهره‌برداری از معدن مس سرچشمه، کارخانه‌های تغلیظ، ذوب و پالایشگاه جهت استحصال مس از خاک‌های سولفوری طراحی و ساخته شدند. پس از گذشت چند دهه، عملیات فروشویی (Leaching) به‌منظور استحصال مس از خاک‌های اکسیدی ذخیره شده در دامپ‌ها، در دهه ۱۹۹۰ مورد توجه قرار گرفت. مطالعات فنی و مقایسه روش‌های مختلف فروشویی نشان داد که روش فروشویی توده‌ای، تنها روش مناسب جهت استحصال مس مذکور است (Karimi Nasab et al., 2007). بدین ترتیب، سازه فروشویی توده‌ای شماره ۱ به همراه کارخانه استخراج با حلال و واحد الکتروونینگ و بعد از چند سال در پی آن سازه فروشویی توده‌ای شماره ۲ ساخته شد. پس از انجام آنالیزها و آزمایش‌های مختلف، طراحی و ساخت سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ نیز از تیرماه ۱۳۸۵ شروع شد (گزارش امور تحقیقات و مطالعات هیدرومتالورژی، ۱۳۸۶). بعد از آن نیز عملیات ساخت سازه‌های فروشویی توده‌ای شماره ۴ و ۵ به ترتیب با استفاده از خاک‌های سولفیدی کم‌عیار و خاک‌های اکسیدی، شروع شد. در حال حاضر معدن مس سرچشمه دارای شش سازه فروشویی توده‌ای است. بهره‌برداری از سازه فروشویی توده‌ای شماره ۱ به اتمام رسیده و سازه فروشویی توده‌ای شماره ۲ نیز رو به اتمام است؛ اما سازه‌های فروشویی توده‌ای شماره ۳، ۴ و ۵ در حال خاک‌ریزی و بهره‌برداری می‌باشند. پروژه سازه شماره ۶ به‌صورت بیولیچینگ است و در حال حاضر راکد است. موقعیت سازه‌های فروشویی توده‌ای معدن مس سرچشمه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۱- برداشت‌های ژئوفیزیکی

به منظور بررسی ویژگی‌های زیرسطحی بخشی از سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ معدن مس سرچشمه (محدوده ۹۰۳)، با همکاری واحد لیچینگ، پاشش بر روی محدوده مذکور به مدت ۱۰ روز قطع شد. سپس، برداشت‌های ژئوفیزیکی شامل روش‌های مقاومت ویژه، IP و GPR بر روی منطقه مورد نظر انجام شد. با توجه به مساحت کم محدوده شماره ۹۰۳، پنج پروفیل ۱۰۰ متری به فاصله ۱۰ متر از هم طراحی شد که برداشت‌های مقاومت ویژه و IP در امتداد سه پروفیل و برداشت‌های GPR در امتداد هر پنج پروفیل انجام شد. در شکل ۳، موقعیت پروفیل‌های ژئوفیزیکی بر روی سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳، در تصویر ماهواره‌ای با خطوط قرمز رنگ نشان داده شده است.

برداشت‌های دوبعدی مقاومت ویژه و IP با استفاده از دستگاه‌های فرستنده ASTRA-100 و گیرنده Mary-24 با آرایه ترکیبی ونر- شلومبرژر با فاصله الکترودی پنج متر انجام شد. لازم به ذکر است که برداشت داده‌های IP در حوزه فرکانس (در دو فرکانس ۰/۶۱ و ۹/۸ هرتز) صورت گرفت و پارامتر درصد اثر فرکانس (PFE) محاسبه شد.

داده‌های GPR توسط سیستم LOZA و با استفاده از آنتن سه متری با فرکانس ۵۰ مگاهرتز جمع‌آوری شد. با توجه به اینکه انتظار می‌رفت به دلیل حضور اسید سولفوریک در درون سازه، مقادیر مقاومت ویژه کاهش یافته و عمق نفوذ روش GPR محدود شود، جهت دست‌یابی به عمق نفوذ قابل‌قبول، فرکانس ۵۰ مگاهرتز انتخاب شد. داده‌های GPR، با فاصله ایستگاهی ۳۰ سانتی‌متر و به صورت پروفیل‌زنی پیوسته، برداشت شدند. در شکل ۴، نحوه جمع‌آوری داده‌های ژئوفیزیکی در سطح سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ نشان داده شده است.

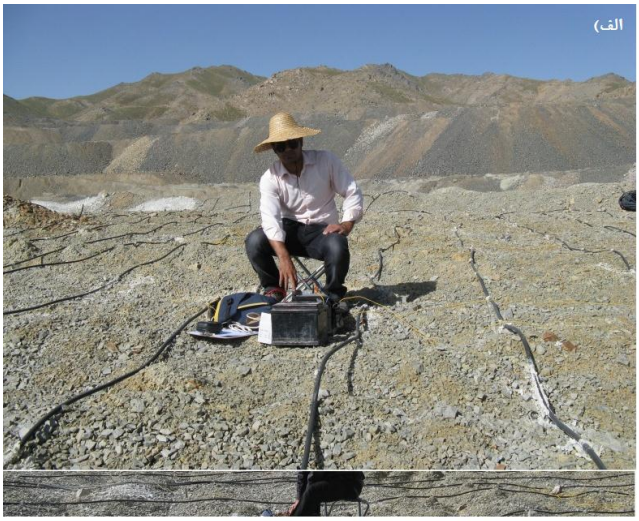


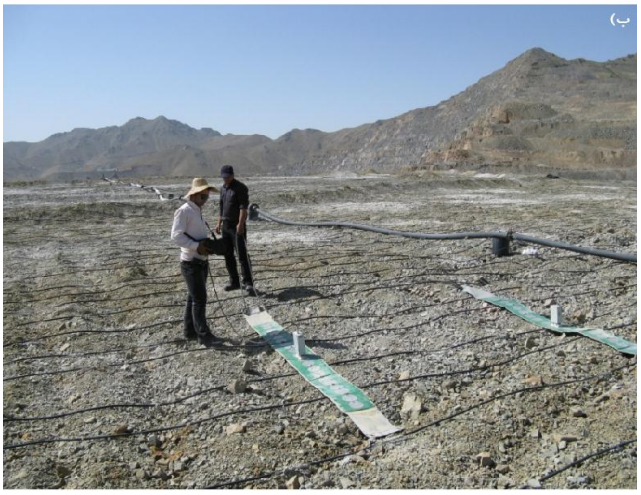
شکل ۲: موقعیت سازه‌های فروشویی توده‌ای معدن مس سرچشمه (Google Earth).

شکل ۳: موقعیت پروفیل‌های برداشت‌های ژئوفیزیکی بر روی سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳.

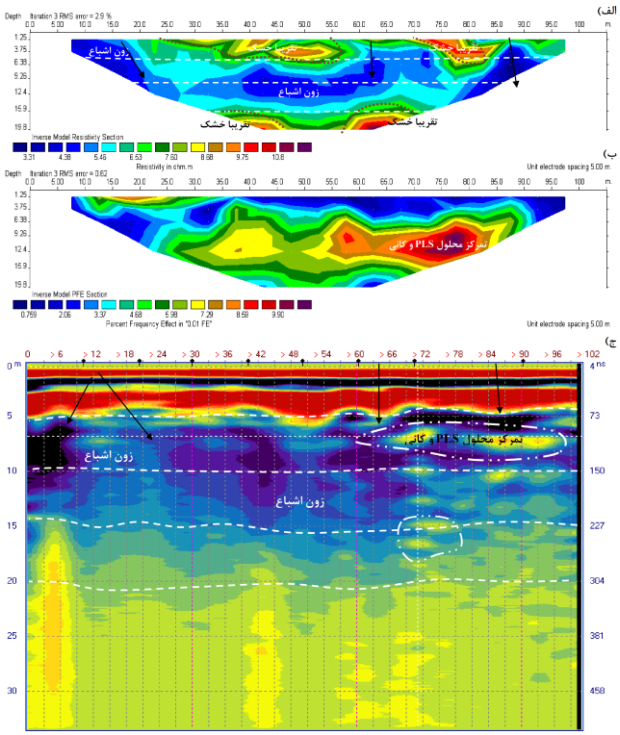
۲-۲- بحث و نتایج

برای وارون‌سازی دوبعدی داده‌های ژئوالکتریک، نرم‌افزار Res2dinv به کار گرفته شد و مقاطع نهایی GPR با استفاده از نرم‌افزار KROTT مورد پردازش قرار گرفت. در شکل‌های ۵ تا ۷، نتایج برداشت‌های انجام شده توسط هر سه روش در طول پروفیل‌های شماره ۱، ۳ و ۵ نشان داده شده است.

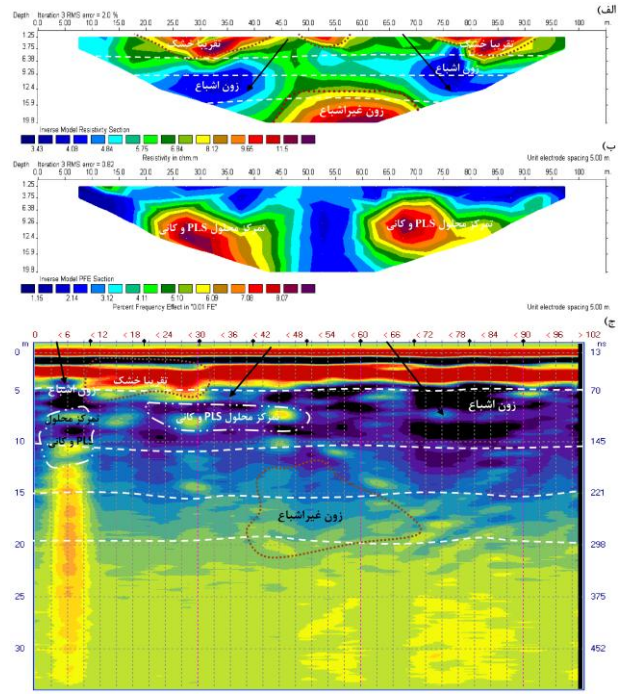




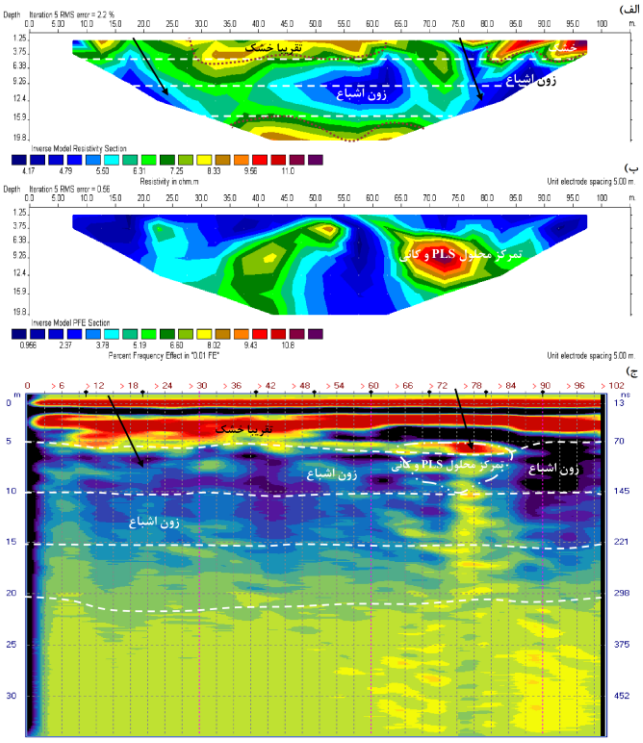
شکل ۴: الف) برداشت‌های ژئوالکتریک؛ ب) برداشت‌های GPR در سطح سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ معدن مس سرچشمه (بعد از قطع پاشش اسید).



شکل ۵: نتایج تفسیر داده‌ها در طول پروفیل شماره ۱. الف) مقطع مقاومت ویژه. ب) مقطع IP. ج) مقطع GPR.



شکل ۶: نتایج تفسیر داده‌ها در طول پروفیل شماره ۳. الف) مقطع مقاومت ویژه. ب) مقطع IP. ج) مقطع GPR.



شکل ۷: نتایج تفسیر داده‌ها در طول پروفیل شماره ۵. الف) مقطع مقاومت ویژه. ب) مقطع IP. ج) مقطع GPR.

در کلیه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی مشخص شد که مقادیر مقاومت ویژه بین ۲ تا ۱۳ اهم- متر متغیر است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳، دارای مناطق با رطوبت کم تا کاملاً اشباع است. همان‌طور که اشاره شد، قبل از انجام برداشت‌های صحرایی، مطالعات آزمایشگاهی مقاومت ویژه بر روی نمونه‌های خاک سولفیدی تهیه شده از سازه فروشویی شماره ۳ انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد که با اشباع شدن خاک سولفیدی از اسید سولفوریک، مقاومت ویژه نمونه‌ها به مقادیر کمتر از ۵ اهم- متر کاهش می‌یابد. با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی و با علم به اینکه مناطق اشباع از اسید مقاومت ویژه پایینی دارند، مناطق اشباع و مناطق غیراشباع و کم رطوبت، در تمامی پروفیل‌ها به‌خوبی مشخص گردید.

در مقاطع مقاومت ویژه در شکل‌های ۵ تا ۷، مناطق اشباع با رنگ آبی تیره و مناطق غیر اشباع و کم رطوبت با رنگ‌های زرد و قرمز، در تمامی پروفیل‌ها به خوبی مشخص هستند. همچنین در تمامی مقاطع، مسیرهای احتمالی عبور محلول با پیکان نشان داده شده‌اند.

مقاطع IP پروفیل‌های برداشت شده، محدوده تغییرات بین ۰/۵ تا ۱۴ درصد را نشان داد که مقادیر بالای IP نشان‌دهنده تمرکز کانی‌های فلزی و سولفیدی است. با مقایسه مقاطع مقاومت ویژه و IP در کلیه پروفیل‌های برداشت شده، مشخص شد که در اغلب مناطقی که مقاومت ویژه بالا است، IP مقدار کمی نشان می‌دهد. در مقطع IP نشان داده شده در شکل ۵، مقادیر بالای IP به تمرکز کانی‌های فلزی نسبت داده شده است.

نتایج حاصل از پردازش پروفیل‌های GPR نشان داد که به دلیل رسانندگی زیرسطحی سازه فروشویی توده‌ای، عمق نفوذ پروفیل‌ها به حدود ۳۰ متر محدود شده است. همانند پروفیل‌های ژئوالکتریک، تمامی پروفیل‌های مربوط به رادار نفوذی به زمین نیز همبستگی بسیار خوبی نشان داد. در پروفیل‌های مذکور، مناطق اشباع از محلول و همچنین مناطق با رطوبت کم قابل تفکیک بود. مناطق اشباع با رنگ‌های تیره و مناطق با رطوبت کم با رنگ‌های روشن‌تر مشخص هستند.

۳- نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج حاصل از تلفیق سه روش ژئوفیزیکی و با در نظر گرفتن نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقاومت ویژه، مناطق اشباع از محلول، مناطق با رطوبت کم و نیز جریان‌های ترجیحی درون سازه فروشویی توده‌ای شماره ۳ معدن مس سرچشمه، مشخص شدند. به طور کلی، در سازه مذکور، بالاترین پله (پله شماره ۹) دارای رطوبت کمی است؛ اما پله‌های شماره ۸، ۷ و ۶ که در عمق پنج تا ۲۰ متری از سطح سازه قرار دارند، اشباع از محلول هستند. در بالاترین محدوده، بعد از قطع پاشش به علت تبخیر و تعرق شدید در فصل تابستان و نیز زهکش شدن سریع محلول پاشش شده به دلیل درشت دانه بودن کانسنگ، مناطق تقریباً خشک و با رطوبت کم دیده می‌شود. در عمق حدود ۲۰ متر از سطح سازه، در اثر شسته شدن و حرکت ذرات ریز به سمت پایین، یک لایه تقریباً نفوذناپذیر و متراکم تشکیل شده است که دارای رطوبت کمی است.

در بین روش‌های ژئوفیزیکی انجام گرفته، روش مقاومت ویژه الکتریکی با تعیین توزیع زیرزمینی مقاومت ویژه الکتریکی، بهترین روش برای پایش سازه فروشویی توده‌ای است. همچنین با انجام هم‌زمان برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی و IP می‌توان تفسیرهای دقیق‌تری از نتایج صحرایی به دست آورد. با استفاده از روش IP می‌توان تمرکز کانی‌ها و محلول PLS را درون سازه فروشویی توده‌ای مشخص کرد.

مهم‌ترین جنبه ارزشی تحقیق حاضر، برداشتن اولین گام در راستای پایش سازه‌های فروشویی توده‌ای در ایران با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی است. به‌منظور توسعه این مطالعات و درک هرچه بیشتر نقاط قوت و ضعف هر روش، پیشنهاد می‌شود با فراهم آوردن شرایط عملیاتی مناسب، برداشت‌های سه‌بعدی جهت پایش بهتر این سازه انجام شود و با حفر تعدادی گمانه و نمونه‌گیری از اعماق مختلف، نسبت به اعتبارسنجی بهتر نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی اقدام شود. همچنین با توجه مقاطع GPR پیشنهاد می‌شود اندازه‌گیری‌های GPR با استفاده از یک آنتن با

فرکانس بیشتر (مانند ۱۰۰ مگاهرتز) جهت دست‌یابی به رزولوشن بهتر برداشت شود.

۴- سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از مساعدت‌های بی‌دریغ مسئولین و مهندسین محترم مجتمع مس سرچشمه جهت فراهم آوردن شرایط انجام این تحقیق و همچنین از مدیر عامل محترم شرکت مهندسین مشاور زمین آب پی، جناب آقای مهندس علیاری، به دلیل در اختیار گذاشتن تجهیزات برداشت‌های ژئوفیزیکی، قدردانی می‌گردد.

۵- منابع

آزاد، ع.، ۱۳۹۰، طراحی واحدهای لیچینگ مس، انتشارات نگارنده دانش.

حجت، آ. و رنجبر، ح.، ۱۳۹۰، اصول ژئوالکتریک کاربردی، موسسه انتشارات ستایش.

گزارش امور تحقیقات و مطالعات هیدرومتالورژی، ۱۳۸۶، پروژه اجرای هیپ شماره ۳، مجتمع مس سرچشمه.

مرادی‌پور، م.، کریمی نسب، س.، حجت، آ. و رنجبر، ح.، ۱۳۹۲، امکان‌سنجی تعیین زون‌های اشباع سازه فروشویی توده‌ای مس با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقاومت ویژه الکتریکی، اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی معدن، فرآوری مواد معدنی، متالورژی و محیط زیست، دانشگاه زنجان، ۷۲-۶۷.

Karimi Nasab, S., Hojat, A. and Mollaei Fard, M.R., 2007, Technical factors for selecting optimum heap leach pad sites, Engineering and Mining Journal (E&MJ), 54-59.

Rucker, D.F., 2010, Moisture estimation within a mine heap, An application of cokriging with assay data and electrical resistivity, Geophysics, 75 (1), B11-B23.

Rucker, D.F., Schindler, A., Levitt, M.T. and Glaser, D.R., 2009, Three-dimensional electrical resistivity imaging of a gold heap, Hydrometallurgy, 98, 267-275.

Van Zyl, D.J.A., Hutchison, I.P. and Kiel, J.E., 1988, Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects, Society of Mining Engineers, Inc., Littleton, Colorado.

Shahrood University of Technology

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)

2015, VOL 1, NO 1

Subsurface Characterization of Heap Leaching Pads using Geophysical Surveys; Case Study: Sarcheshmeh Copper Mine

Mosayyeb Moradipour[1], Hojjatollah Ranjbar[2], Azadeh Hojat[3*], Saeed Karimi Nasab[4], Hashem Ranjy Roodposhti[5] and Shahram Daneshpajouh[6]

1- M.Sc. Student, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2- Professor, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
4- Associate Professor, Department of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
5- Z.A.P. Consulting Engineers Company, Tehran, Iran
6- Hydrometallurgy Research and Development Center, Sarcheshmeh Copper Mine, Kerman, Iran

Received: 1 September 2015; Accepted: 28 January 2016

Corresponding author: ahojat@uk.ac.ir

Keywords

Heap Leaching
Electrical Resistivity
Induced Polarization
Ground Penetrating Radar
Sarcheshmeh Copper Mine

Extended Abstract

Summary

There are several important factors to be determined in heap leaching operations such as the depth of pregnant leach solution (PLS) within the heap, saturated and unsaturated zones, and the quality of the solution in different parts of the heap. In this paper, integrated geophysical surveys including electrical resistivity, induced polarization (IP) and ground penetrating radar (GPR) methods were used to investigate the internal structure of heap No. 3 at Sarcheshmeh copper mine. The main purpose was to determine acid saturated zones and investigate the preferential flow paths within the heap. To do this, acid sprinkling on pad No. 903 of heap No. 3 in Sarcheshmeh copper mine was stopped for ten days before doing geophysical surveys. Geophysical field data were collected along five parallel lines. Due to the small area of pad No. 903, spreading of the electrode array for resistivity and IP measurements was limited, thus, that maximum depth of 20 m was investigated. The depth of investigation in the GPR method was also reduced as a result of radar wave attenuation in high conductive subsurface material. PLS saturated zones of the heap, dry zones and solution paths were finally determined based on the results of field data interpretation and the results obtained from laboratory resistivity measurements carried out before making geophysical surveys.

Introduction

Considering the advantages of the hydrometallurgical methods, copper production industry is growingly using these methods. In heap leaching process, low-grade copper ores are exposed to sulfuric acid percolating down through the heap and solving the copper. The PLS is then collected at the bottom of the heap to be processed for the extraction of the metals. Knowledge of the saturated and unsaturated zones within theses heaps is one of the most important problems to be understood. Geophysical surveys, considering their great advantages such as being non-destructive, efficient, rapid and cost effective, are a very good alternative compared to the expensive and local drilling operations. Electrical methods are especially useful in such application because there is an electrical contrast between saturated and non-saturated zones. Therefore, in this research, electrical resistivity, IP and GPR methods have been used on a test part of heap No. 3 at Sarcheshmeh copper mine to investigate subsurface solution behavior.

Methodology and Approaches

Application of the heap leaching technology to extract low-grade copper ores was decided by the National Iranian Copper Industries Company (NICICO) in the 1990s. There are now six heap leaching utilities constructed at Sarcheshmeh copper mine and the copper is being leached with dilute sulfuric acid.

In order to provide favorable electrical measurements, acid sprinkling on pad No. 903 of heap No. 3 was stopped for ten days before acquiring the electrical data, comprising of resistivity, IP and GPR data, along five parallel profiles on the heap surface. 2D resistivity and frequency-domain IP surveys employing the Wenner-Schlumberger electrode array were carried out using ASTRA-100 transmitter and Mary-24 receiver. The electrode spacing of 5 m was selected for these surveys. Frequency values of 0.61 and 9.8 Hz were applied for the IP data acquisition and as a result, the percent frequency effect (PFE) was calculated. In order to have a good GPR penetration, the 50 MHz LOZA GPR system with

the antenna length of 3 m was used in the GPR surveys.

Results and Conclusions

1. The electrical resistivity values were obtained in the range of 2-13 Ω-m, in which the higher values were likely related to low moisture and dry zones. The acid saturated zones were determined as the areas having the lower electrical resistivity values in the range.
2. Low resistivity values extending to the deeper parts of the pad revealed the preferential flow paths of the leaching solutions
3. PFE values were in the range of 0.5-14 % in which the higher IP values were the result of mineral concentration and saturation in the area.
4. Due to the small area of pad No. 903, spreading of the electrodes used for resistivity and IP measurements was limited, and as a result, maximum depth of 20 m was obtained.
5. Maximum GPR depth of investigation of about 30 m was obtained as a result of radar wave attenuation in high conductive material within the heap.
6. Among the performed geophysical methods, the electrical resistivity method was determined as a superior one in comparison to the IP and GPR methods used for monitoring of the heap leaching in the subsurface.