

شناسایی نشت احتمالی از تکیه‌گاه سد باطله آبگیر معدن مس میدوک با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی

الهام ساعی‌نیا^۱، احمد قربانی^{۲*} و عبدالحمید انصاری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد
۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۶

* نویسنده مسئول مکاتبات: aghorbani@yazd.ac.ir

چکیده

فعالیت‌های معدنکاری با تولید حجم عظیمی باطله همراه است؛ که بخشی از این مواد مربوط به کارخانه فرآوری است و معمولاً در سدهای باطله جمع‌آوری می‌شوند. با توجه به اثرات سوء زیست‌محیطی سدهای باطله و ناپایداری مکانیکی آن‌ها به دلیل فرسایش داخلی ناشی از نشت‌های احتمالی، مطالعه عملکرد این سدها ضروری بوده و عاملی برای مدیریت بهتر فعالیت‌های معدنی است. در این پژوهش با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی (توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا)، مطالعات هیدروشیمی آب و تفسیر این نتایج با در نظر گرفتن زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه سد باطله و ساختار نفوذناپذیر سد آبگیر با هسته آسفالت، احتمال نشت آب از تکیه‌گاه سد آبگیر معدن مس میدوک شهر بابک کرمان بررسی شد. نتایج مطالعات توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی محدوده‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۲۰ اهم‌متر را در تکیه‌گاه شمال شرقی سد آبگیر نشان می‌دهد؛ که می‌تواند نشان‌دهنده احتمال حضور زون آبدار باشد. نتایج پتانسیل خودزا، نشان‌دهنده آنومالی مثبت در محدوده مقادیر نشت و منطبق بر نتایج توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی است. آنومالی مثبت پتانسیل خودزا در محل خروج آب از زمین می‌تواند مرتبط با پتانسیل الکتروسینتیک به دلیل اختلاف ارتفاع سطح آب در جلو و پشت سد باشد. بنابراین، وجود تغییرات پتانسیل خودزا در این تکیه‌گاه تأییدی بر حضور جریان آب است. نتایج مطالعات هیدروشیمی نشان می‌دهد تیپ آب زبرزمینی منطقه بی‌کربناته-کلراته است؛ در حالی که تیپ نمونه آب گمانه پایشی W5 که در پایین دست سد آبگیر و در نزدیکی دیواره شمال شرقی آن واقع شده است، مانند نمونه آب سد سولفات-کلراته است. تلفیق نتایج مطالعات زمین‌شناسی، هیدروشیمی آب و روش‌های ژئوفیزیکی و انطباق آن‌ها با حضور چشمه در این محدوده، نشان‌دهنده وجود نشت در تکیه‌گاه شمال شرقی سد باطله آبگیر معدن مس میدوک است.

واژگان کلیدی

معدن مس میدوک
نشت
سد باطله
توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی
پتانسیل خودزا

۱- مقدمه

استخراج از معادن مانند سایر فعالیت‌های صنعتی می‌تواند بر محیط‌زیست تأثیر منفی بگذارد. سدهای باطله حاصل از فعالیت معدن‌کاری اثرات منفی زیست‌محیطی عمده‌ای ایجاد می‌کنند که برخی جنبه‌ها مانند بی‌ثباتی ژئوتکنیکی، فیزیکی و شیمیایی سدهای باطله می‌تواند منجر به وقایعی با اثرات منفی بسیار زیاد شوند. در حقیقت سدهای باطله نسبت به دیگر ساختارها در معدن آسیب‌پذیرتر هستند و به علت طبیعت ناپایدارشان، محل قرارگیری آن‌ها که اغلب نزدیک به اکوسیستم‌های حساس واقع شده‌اند و عدم وجود نگهداری‌های لازم به خصوص بعد از پایان عمر معدن، یک تهدید مهم به شمار می‌روند.

تلفات و خسارات قابل‌توجهی در نتیجه ورود حجم زیادی باطله به محیط‌زیست اتفاق افتاده است (Vick, 1990). همچنین اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی در سدهای باطله معدن مس، باعث ایجاد شرایط اسیدی و افزایش غلظت فلزات حل شده و سولفات در آب منفذی می‌شود (Yuval and Oldenburg, 1996).

نشت غیرعادی از سدها تهدیدی برای یکپارچگی ساختار سد به حساب می‌آید. از آن‌جا که نشت و اشباع در بدنه سد می‌تواند منجر به فروپاشی سد شود، اهمیت تشخیص مسیر نشت بیشتر می‌شود (Mainaly, 2006).

با بررسی نقش ژئوفیزیکی، روش‌های ژئوفیزیکی و کاربرد آن‌ها، ژئوفیزیک به عنوان یک روش غیرمخرب، بارها در مسائل محیط زیست و به ویژه مصالحات مربوط به باطله معدن استفاده شده است (Poisson et al., 2009). مشخصه‌هایی مانند تغییر اندازه دانه‌ها، تفاوت کانی‌شناسی و خواص شیمیایی باطله‌های آبگیری شده، ضخامت باطله، وضعیت سنگ بستر و ساختار درونی (حفرات)، هدف‌های مناسبی برای روش‌های ژئوالکتریکی هستند و ژئوفیزیک ابزار مؤثری برای توصیف شرایط باطله آبگیری شده و سد باطله می‌باشد (Grangeia et al., 2011). همچنین در شناسایی، به نقشه درآوردن و پایش زون‌ها و آنومالی‌های ناشی از نشت، روش‌های ژئوفیزیکی به ویژه روش‌های الکتریکی نقش مهمی ایفا می‌کنند (Panthulu et al., 2001). از آن‌جا که آنومالی‌های ناشی از نشت یکی از دلایل اصلی برای شکست سدهای باطله است و روش‌های ژئوفیزیکی قابلیت شناسایی نشت را قبل از به خطر افتادن ایمنی سد دارد، این روش‌ها امکان برنامه‌ریزی فنی و اقتصادی ویژه را برای اقدامات ضد نشت فراهم می‌سازد (Chii, 2010).

از میان روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های الکتریکی از شایع‌ترین روش‌های مورد استفاده در شناسایی نشت است. باطله‌های معدنی معمولاً مقاومت ویژه الکتریکی پایین (به عبارت دیگر رسانایی الکتریکی بالا) نشان می‌دهند؛ بنابراین استفاده از روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیس در مطالعات سدهای باطله مرسوم می‌باشند (Campbell and Fitterman, 2000). از میان روش‌های الکتریکی، دو روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) و پتانسیل خودزا (SP) مرسوم‌ترین روش‌ها در شناسایی

زون‌ها و آنومالی‌های ناشی از نشت است (Al-Saigh et al., 1994; Panthulu et al., 2001; Song et al., 2005; Sjoahl et al., 2008; Grangeia et al., 2011; Al-Fares, 2011; Ikard et al., 2012; Bedrosian et al., 2012; Ikard et al., 2014; Martin-Crespo et al., 2018). دیگر روش‌های غیرمخرب مانند لرزه نگاری و نفوذ رادار به زمین نیز در بررسی‌های مربوط به سدهای باطله استفاده شده است؛ اما استفاده از این روش‌ها برای پایش طولانی مدت شرایط سدها، آسان نیست (Sjoahl et al., 2008).

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب و قادر به شناسایی مسیر جریان مرتبط با مکانیسم‌ها فرسایش داخلی است (Titov et al., 2000; Boleve et al., 2011). تکنیک توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به منظور شناخت چند بعدی مقاومت ویژه الکتریکی به کار می‌رود. به عبارت دیگر، با این روش تصویر الکتریکی زیرسطحی تهیه می‌گردد. در این روش توزیع فضایی قائم و افقی مقاومت ویژه الکتریکی در امتداد یک خط روی زمین برداشت می‌شود و فرض بر این است که تغییرات مقاومت ویژه در جهت عمود بر امتداد خط برداشت وجود ندارد. به همین دلیل پروفیل‌های الکتریکی به طور معمول عمود بر امتداد آنومالی‌ها برداشت می‌شود. در روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی معمولاً تعدادی الکتروود فلزی با فواصل مساوی بر روی یک خط قرار می‌گیرند. در هر قرائت، چهار الکتروود برای تزریق جریان الکتریکی (دو الکتروود) و اندازه‌گیری پتانسیل (دو الکتروود) انتخاب می‌شود. افزایش فاصله بین الکتروودها بررسی‌های عمیق‌تر را ممکن می‌سازد. عمق بررسی به توزیع مقاومت ویژه زیرسطحی و آرایه الکتروودی ارتباط دارد. آرایه الکتروودی بر اساس هدف کاوش و حساسیت لازم افقی و یا قائم انتخاب می‌شود (قربانی و همکاران، ۱۳۹۳). اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در موارد بسیاری در بررسی موقعیت و کنترل وضعیت سد استفاده شده است که به منظور کنترل وضعیت سد و برای تعیین موقعیت آنومالی‌های ممکن، معمولاً از پروفیل‌زنی در طول تاج سد یا پایین دست سد استفاده شده است (Sjoahl et al., 2008).

نقشه‌برداری پتانسیل خودزا برای شناسایی مسیر جریان ترجیحی در سدهای خاکی به لحاظ کیفی به کار برده شده است. روش پتانسیل خودزا روشی غیرمخرب در ارتباط با اندازه‌گیری‌های غیرفعال توزیع پتانسیل الکتریکی در یک مجموعه ایستگاه با استفاده از دو الکتروود غیرپلاریزه است. در این روش اختلاف بین ولتاژ ثبت شده از هریک از ایستگاه‌ها و ایستگاه مبنا که الکتروود مرجع در آن قرار دارد؛ با ولت‌متری که دارای حساسیت بیش از ۰/۱ mV و امپدانس ورودی بالاست، اندازه‌گیری می‌شود (Ikard et al., 2014). در دهه اخیر، این روش کیفی به ابزاری قدرتمند برای شناسایی جریان‌های نشت (برای مثال Titov et al., 2000; Panthulu et al., 2001; Rozycki et al., 2006; Boleve et al., 2011; Ikard et al., 2015) و آب زیرزمینی (Jardani and Revil, 2009) تبدیل شده است.

فعالیت‌های انسانی مانند آلودگی ناشی از پساب‌های صنعتی، محل‌های دفن زباله، کود و غیره، ممکن است نقش مؤثری بر ترکیب

برداشت‌های پتانسیل خودزای انجام شده توسط Al-Saigh و همکاران (۱۹۹۴) با هدف شناسایی نشت از یک سد خاکی، آنومالی SP منفی با مقدار بیش از ۱۰۰ میلی‌ولت را نشان داد و در نهایت تکرار نتایج SP منجر به کشف دو حفره به ترتیب با قطر ۳۰ - ۲۵ متر و ۱۵ متر شد و همخوانی خوب موقعیت حفره‌های شناسایی شده با موقعیت گسل نرمال زیرزمین در منطقه نشان داده شد. Titove و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک برای پایش پایداری سد آب، کاربرد موفقیت‌آمیز این روش‌ها را نشان دادند. در سال ۲۰۰۱، Panthulu و همکاران از روش‌های الکتریکی برای تعیین زون‌های نشت چهار سد منطقه Som-Kamla-Amba ایالت راجستان هندوستان استفاده کردند. در این مطالعه برای تعیین مناطق مطلوب نفوذ از روش ERT و برای تعیین مسیر نفوذ از روش SP استفاده شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های SP، آنومالی منفی SP با مقادیر ۲۰ - ۱۰ میلی‌ولت را مشخص کرد که نشان‌دهنده نشت اندک است. Sjudahl و همکاران (۲۰۰۱) تغییرات ساختار سد Halby سوئد را با استفاده از داده‌های مقاومت الکتریکی حاصل از دیده‌بانی روزانه این سد مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، تغییرات فصلی مقاومت الکتریکی مشاهده شده در بخش‌های مختلف سد به ویژه در سمت چپ آن، در ارتباط با یک روند فرسایش درونی تشخیص داده شد. بنابراین، نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد پایش مقاومت الکتریکی می‌تواند فرصتی برای تشخیص فرسایش درونی در مرحله اولیه باشد. Al-Fares (۲۰۱۱) با هدف شناسایی و درک منشأ مشکل تلفات آب در سد Afamia B واقع در حوضه الغاب سوریه از روش‌های الکترومغناطیس سطحی، سونداژ الکتریکی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده کرد. تجزیه و تحلیل نتایج روش‌های مذکور علاوه بر تایید استفاده مؤثر و آسان روش ERT، نشت عمودی مهمی را در طول دریاچه نشان داد. Boleve و همکاران (۲۰۱۱) در یک سایت مطالعاتی در فرانسه، از روش پتانسیل خودزا برای تعیین مسیر جریان ترجیحی استفاده کردند. همچنین با اندازه‌گیری SP در طول زمان تزریق محلول آب نمک در مناطق نشت، نفوذپذیری نواحی نشت را تخمین زدند. Grangeia و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از تلفیق روش‌های ژئوفیزیک (ERT و GPR) و ژئوشیمی در محیط GIS برای سد باطله Rio معدن Panasqueire مرکز پرتغال، کاربرد موفقیت‌آمیز رویکرد چندشاخه‌ای را در بررسی سدهای باطله و کاهش خطرات ناشی از سدها نشان دادند. Bedrosian و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش‌های ERT، لرزه‌نگاری بازتابی و انکساری، سونداژ الکترومغناطیس حوزه زمان و روش مگنتوتلوریک در منطقه سد Martin Creek نشان دادند که توپوگرافی قدیمی بین نهشته‌های رسوبی و روباره‌های آبرفت یخچالی نقش اصلی را در کنترل جریان آب زیرزمینی و توزیع نشت مشاهده شده، ایفا می‌کنند. برداشت‌های انجام شده توسط Ikard و همکارانش (۲۰۱۴) بر روی یک سد خاکی کوچک واقع در کلرادو که آنومالی نشت در پایین‌دست پاشنه آن مشاهده شده است، منجر به مشاهده آنومالی‌های پتانسیل خودزا و مقاومت ویژه الکتریکی جریان مستقیمی شد. همچنین برای تعیین سه

آب‌های زیرزمینی ایفا کند (Pazand and Hazarkhani, 2012). امروزه آلودگی آب زیرزمینی از طریق منبعی چون سدهای باطله معدنی مساله‌ای جهانی است (Sharma, 1994). سدهای باطله معدنی یکی از انواع سدها می‌باشند که به‌منظور انباشت پسماندهای معدنی خطرناک و یا بی‌خطر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع سدها یکی از مهم‌ترین حلقه‌های ارتباطی بین فعالیت‌های معدنی و محیط پیرامون آن‌ها هستند که تا چندین سال پس از اتمام فعالیت‌های مذکور نیز مورد توجه می‌باشند (ناصری و نیک قوجق، ۱۳۹۱).

باطله بزرگ‌ترین بخش از مواد زائد جامد تولید شده در نتیجه فعالیت‌های معدنی می‌باشد. با توجه به این‌که بیش‌تر ذخایر مس در ایران به صورت کالکوپیرت (سولفید آهن - مس) است، یکی از نگرانی‌های عمده‌ای که در رابطه با معادن سولفیدی وجود دارد، اکسیداسیون و هیدرولیز سولفیدی فلزی است. این موضوع سبب افزایش غلظت عناصر سنگین، افزایش غلظت سولفات، افزایش هدایت هیدرولیکی و کاهش pH آب در منطقه معدنکاری می‌شود (Williams and Smith, 2000). نکته قابل توجه این است که آب اسیدی تراوشی از کومه‌های باطله از همان ابتدا به دلیل وجود آهک و کلسیت در ترکیب باطله، خنثی می‌گردد اما با این وجود بعد از خنثی شدن کامل کلسیت و آهک، این آب خاصیت اسیدی پیدا خواهد کرد. تحت شرایط اسیدی، تجزیه کانی‌ها پیشرفت کرده و اکسیداسیون سولفیدها از طریق فعالیت باکتری‌ها انجام می‌شود (کارگر، ۱۳۸۹). نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته روی نمونه‌های آب گرفته شده از محل سد باطله کارخانه فرآوری مس Cliff توسط king و Hynes، رسانایی ویژه آن‌ها را به مقدار ۱۰۰ میلی موهوس بر متر نشان می‌دهد. این در حالی است که رسانایی ویژه آب در رودخانه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی از ۱ تا ۲۰ میلی موهوس بر متر در تغییر است (King and Hynes, 1994). لذا پایش وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی نزدیک به سدهای باطله برای شناسایی احتمال آلودگی و کنترل آن مفید است.

پیچیدگی‌های زمین شناسی و تکتونیک، به ویژه در مناطق معدنی، باعث می‌شود که انتخاب محل‌های مناسب برای ساخت سد باطله با پیچیدگی و عدم قطعیت همراه باشد. بنابراین کنترل‌های بعد از ساخت به منظور آگاهی از ایجاد مسیرهای ترجیحی درون سازه سد و یا تکیه‌گاه‌ها ضروری است. این موارد هم از نظر خطرات زیست‌محیطی و هم از نظر ناپایداری سازه سد دارای اهمیت می‌باشد. از مهم‌ترین کنترل‌های پس از ساخت سد، حفر گمانه‌های مشاهداتی در اطراف سد و کنترل‌های کمی و کیفی آب در آن‌ها، پایش سطح ایستایی درون گمانه‌ها و ارتباط آن با ارتفاع سطح آزاد آب پشت سد است. این گونه کنترل‌ها نیازمند برداشت داده‌های کامل و دقیق در زمان طولانی برای مثال داده‌های تبخیر، بارندگی، دبی خروجی و دبی آب بازگشتی به کارخانه فرآوری، اندازه‌گیری‌های کمی و کیفی مداوم آب‌های زیرزمینی منطقه و غیره هستند. از دیگر روش‌های کنترلی پس از ساخت، مطالعات غیرمستقیم ژئوفیزیکی است (برای مثال Al-Saigh et al., 1994; Panthulu et al., 2001; Sjudahl et al., 2008; Jardani and Revil, 2009; Grangeia et al., 2011; Al-

انجام شده است. در این نوشتار با توجه به ساختار سنگی سد باطله آبگیر معدن مس میدوک و تکیه‌گاه‌های آن، قابلیت استفاده از دو روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا در این نوع سدها بررسی گردیده و در راستای تکمیل مطالعات، اثر این سد باطله بر منابع آب قابل دسترس در منطقه بررسی شد.

۲- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه

معدن مس میدوک در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان شهربابک و ۱۳۲ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه در طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه در استان کرمان واقع شده است. منطقه دارای اقلیم نیمه بیابانی و کوهستانی با حداکثر ارتفاع ۲۸۴۲ متری از سطح دریا است. شکل ۱ نقشه راه‌های دسترسی به معدن مس میدوک را نشان می‌دهد. این منطقه بخشی از کمربند ولکانیکی ارومیه دختر می‌باشد که از غرب تا جنوب شرق ایران گسترش یافته است. محدوده دربرگیرنده کانسار میدوک از ولکانیک‌های انوسن و سنگ‌های آذرآواری تشکیل شده که توسط توده‌های نفوذی متعددی از جنس گرانودیوریت که بعضاً بیش از دو کیلومتر گسترش دارد، قطع شده است. توده‌های نفوذی و سنگ‌های آذرین بیرونی تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال در محدوده نسبتاً وسیعی دگرسان شده است. وجود آلتراسیون و در نتیجه تغییر رنگ آندزیت‌ها خود دلیلی بر وجود عملکرد محلول‌های گرمابی و کانیزایی در منطقه می‌باشد. در این منطقه پوشش رویی تماماً آندزیت است. بالا آمدن توده گرانودیوریتی سبب برآمده شدن آندزیت شده است و در بعضی قسمت‌ها رگه‌هایی از جنس گرانودیوریت مشاهده می‌شود. در آندزیت‌ها محلول‌های هیدروترمال و گازها سبب متراکم شدن و در نتیجه ایجاد فشار عظیمی شده‌اند؛ که موجب خرد، قطعه‌قطعه و برشی شدن آندزیت‌ها گردیده است. همچنین شکستگی‌های ایجاد شده به دلیل فشار بالای محلول‌های گرمابی به وسیله سیلیس، فلوئورین و کانی‌های فلزی مانند پیریت پر شده است (واحد زمین‌شناسی و امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۷۰).

بر اساس زمین‌شناسی ناحیه‌ای، یک طاق‌دیس در بخش شمال شرقی منطقه مورد مطالعه وجود دارد. جهت تقریبی محور طاق‌دیس N130 است؛ بنابراین، منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب غربی یک طاق‌دیس قرار گرفته است. چهار ساختار خطی اصلی N045، N350، N010، N095 در منطقه مورد مطالعه وجود دارد و این روشن است که جهت تراکم اجزا در منطقه مورد مطالعه با جهت ناحیه‌ای منطبق است (Zamiran co., 2001). نقشه زمین‌شناسی شهربابک و موقعیت معدن مس میدوک در شکل ۲ نشان داده شده است.

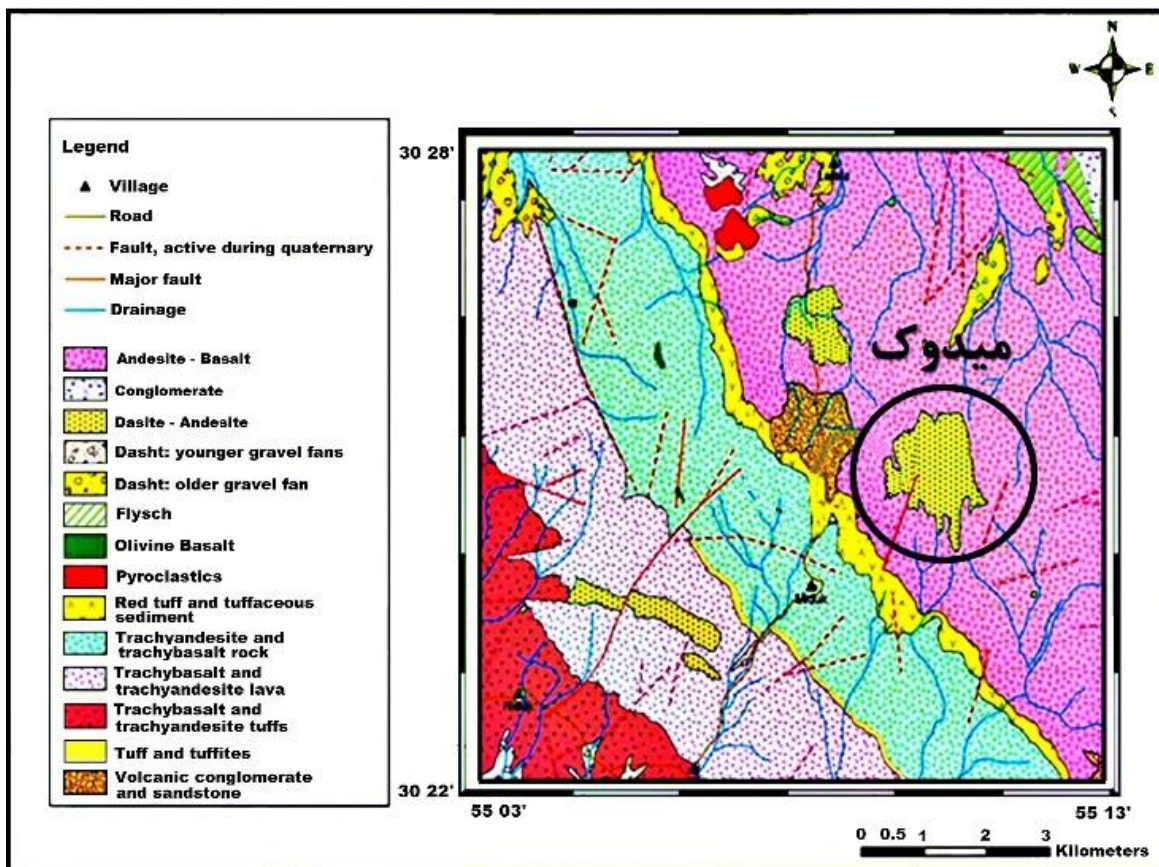
ناحیه آنومالی نشت در طول سد و برآورد منشأ تخلیه نشت محلی از این روش‌ها استفاده کردند. نتایج مطالعات Mainali و همکاران (۲۰۱۵) برای تشخیص آنومالی نشت حاصل از سدهای باطله در سوئد، قابلیت روش مقاومت ویژه الکتریکی و SP را در دیده‌بانی شرایط فیزیکی وابسته به نشت نشان داد. در سال ۲۰۱۸، Martin-Crespo و همکاران از ترکیب روش‌های ژئوفیزیکی (ERT) و ژئوشیمیایی برای توصیف زمین-زیست محیطی باطله‌های معدنی ناپایدار در ناحیه معدنی Cartagena-La اسپانیا با هدف ارزیابی وضعیت کنونی معادن زغال‌سنگ استفاده کردند.

همانطور که ذکر شد، برداشت‌های ژئوفیزیک معمولاً ساده است و در زمان بسیار کوتاه انجام می‌گیرد. برخی از این روش‌ها مانند پتانسیل خودزا به طور مستقیم به جریان آب زیرزمینی وابسته بوده و به خوبی وجود و مسیر جریان زیرسطحی را تخمین می‌زند. برخی دیگر از این روش‌ها مانند مقاومت ویژه الکتریکی به هر دو خصوصیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی وابسته بوده و لذا در کاهش پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی نقش مهمی ایفا نموده و به تفسیر صحیح نتایج پتانسیل خودزا کمک می‌نماید. انجام حفاری برای بررسی و پایش وضعیت سدها همیشه امکان‌پذیر نیست و حتی در صورت وجود امکان حفاری نیز، پوشش کامل منطقه سد باطله با این روش هزینه زیادی به دنبال دارد؛ لذا در این پژوهش، با توجه به خصوصیات روش‌های ژئوفیزیکی از قبیل سرعت بالای برداشت‌ها، پوشش مکانی وسیع در زمان کوتاه، ارزان و غیرمخرب بودن آن‌ها، برای بررسی وضعیت تکیه‌گاه سد باطله آبگیر معدن مس میدوک و شناسایی نشت احتمالی از سد، از دو روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا در پایین دست سد استفاده شد. یحیی‌آبادی و همکاران (۱۳۹۶) اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی در محدوده سد رسوبگیر معدن میدوک را انجام دادند. سد باطله از نوع سدهای خاکی است و به منظور فیلتر کردن دوغاب خروجی از کارخانه تغلیظ و برای ته‌نشست مواد دانه‌ریز احداث شده است؛ که در آنجا مسیرهای ترجیحی نشت از داخل و زیر سد بوده است. این سد بر روی زمین‌های نسبتاً هموار بنا شده است. در مطالعه حاضر، اندازه‌گیری‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا در محل سد آبگیر معدن میدوک انجام شد. این سد نفوذناپذیر با هسته آسفالت می‌باشد. این سد با هدف ذخیره آب و بازگرداندن آب به کارخانه فرآوری احداث شده است. در مطالعه حاضر، دره محل سد، همانند محل ایجاد سدهای نفوذناپذیر، بسیار تنگ و از نظر توپوگرافی تکیه‌گاه خشن می‌باشد. به طور کلی، با توجه به زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه سد آبگیر، جلوگیری از خطرات زیست‌محیطی پیرو نشت احتمالی از سد و تکیه‌گاه‌ها، بررسی نفوذناپذیری سد و تکیه‌گاه‌ها در طول زمان ضروری به نظر می‌رسد. همچنین تاکنون اغلب مطالعات انجام شده برای شناسایی جریان‌های نشت با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، در سدها و محیط‌های خاکی

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۳۹۸.



شکل ۱: نقشه راه‌های دسترسی معدن مس میدوک شهر بابک.



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر بابک). موقعیت معدن مس میدوک بر روی نقشه مشخص شده است (واحد زمین‌شناسی و امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷).

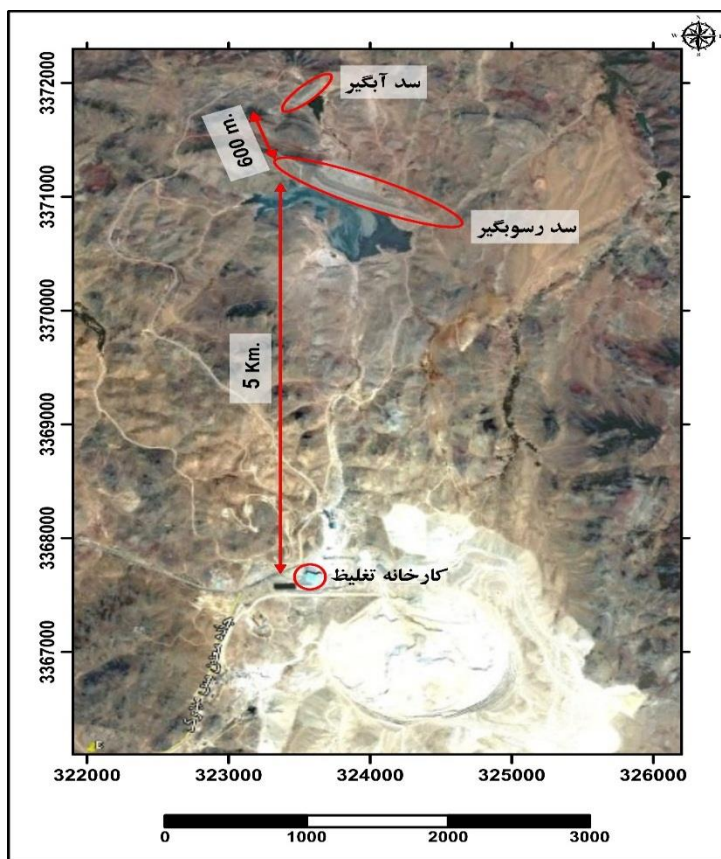
۳- سد باطله آبگیر معدن مس میدوک

مجتمع مس میدوک متشکل از واحدهای معدن، کارخانه تغلیظ (پرعیارکنی) و سدهای باطله (سد رسوبگیر و سد آبگیر) است. موقعیت دو سد مذکور نسبت به یکدیگر و نسبت به کارخانه تغلیظ در شکل ۳ نشان داده شده است. در کارخانه تغلیظ به طور عمده خرد کردن سنگ معدن و جداسازی کانی‌های با ارزش از باطله‌ها در قالب واحدهای آسیا (آسیای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای)، سلول شناورسازی و ته‌نشین کننده کنسانتره، صورت می‌گیرد. عمده‌ترین موادی که در طول فرآیند تغلیظ به سنگ معدن در واحد شناورسازی و با هدف جداسازی کانی‌های با ارزش اضافه می‌شود پنج نوع از واکنش‌گرهای اولیه شامل: جمع‌آوری کننده‌ها، کف‌سازها، بازدارنده، فعال کننده و اصلاح کننده‌ها است. شاخص‌ترین واکنش‌گری که در واحد شناورسازی کارخانه تغلیظ مس این مجتمع اضافه می‌شود، شیرآهک $Ca(OH)_2$ است؛ که به عنوان بازدارنده پیریت (FeS_2) همراه با کالکوپیریت موجود در ترکیب کانسنگ اصلی، عمل می‌کند (کارگر، ۱۳۸۹).

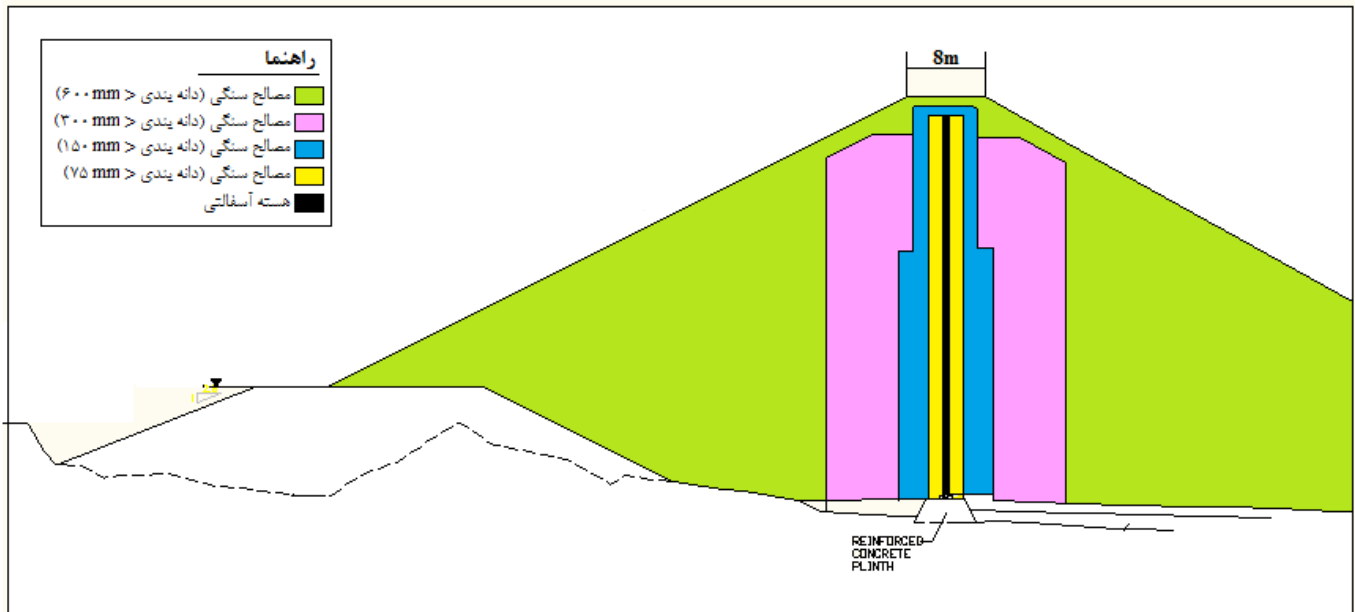
مواد جامد ریزدانه موجود در دوغاب خروجی کارخانه تغلیظ که حاصل از مرحله فرآوری است، در محل سد رسوبگیر ته‌نشین شده و آب باقی‌مانده در محل سد آبگیر ذخیره می‌شود. سد رسوبگیر این معدن با حجم نهایی ۹ میلیون مترمکعب و قابلیت فیلترینگ و تراوش آب از دیواره،

در فاصله ۵ کیلومتری از کارخانه تغلیظ جانمایی شده است. از اهداف ساخت این سد نه تنها ذخیره رسوب حاصل از فرآیند تغلیظ به منظور ممانعت از انتشار آلودگی‌های زیست محیطی، بلکه مدیریت منابع آب مصرفی در کارخانه تغلیظ بوده است. در فاصله ۶۰۰ متری از سد رسوبگیر، سد آبگیر با ظرفیت مخزن ۲ میلیون مترمکعب قرار گرفته است. آب ذخیره شده در این سد به وسیله لوله‌های شناور به حوضچه‌ای که در زیر این سد قرار دارد انتقال یافته و از آنجا به کارخانه فرآوری برگشت داده می‌شود. این سد همچنین دارای یک سرریز اضطراری برای حفاظت از سد در برابر سیلاب‌ها و آب‌های حاصل از بارندگی‌های پیش‌بینی نشده است (Olang mining services co., 2003).

با توجه به اینکه هدف از انجام این پژوهش بررسی نشت از سد آبگیر معدن می‌باشد، مقطع طولی ساختار سد آبگیر معدن مس میدوک در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زون مرکزی ساختار سد آبگیر معدن مس میدوک، ترکیبی از آسفالت و قیر است و زون تکیه‌گاه هسته مرکزی از مصالح سنگی با دانه‌بندی منظم و ابعاد کمتر از ۷۵ میلی‌متر تشکیل شده است. دیگر زون‌های ساختمان سد را مصالح سنگی با دانه‌بندی کمتر از ۶۰۰ میلی‌متر تشکیل می‌دهد. شکل ۴ نشان دهنده مقطع طولی ساختار سد آبگیر است (Olang mining services co., 2003).



شکل ۳: موقعیت سدهای باطله رسوبگیر و آبگیر معدن مس میدوک نسبت به یکدیگر و نسبت به کارخانه تغلیظ بر روی تصویر گوگل ارث



شکل ۴: مقطع طولی ساختار سد آبگیر معدن مس میدوک (Olang mining services co., 2003)

۴- مطالعات انجام شده

در این پژوهش، برای شناسایی نشت احتمالی از سد آبگیر معدن مس میدوک، پیمایش‌های صحرایی به دو دسته مطالعات ژئوالکتریک (دو روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا) و مطالعات هیدروشیمی آب تقسیم شد.

۴-۱- توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)

روش ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی برای تعیین توزیع زیرسطحی مقاومت ویژه الکتریکی، با اندازه‌گیری بر روی سطح زمین، به کار می‌رود. در همه برداشت‌های ژئوالکتریک، هدف تهیه تصویری از زمین برحسب خصوصیات الکتریکی آن است (نوروزی، ۱۳۹۲). در روش توموگرافی، تصویر الکتریکی با قدرت تفکیک بالا در دو یا سه جهت از ساختار زیرسطحی به دست می‌آید (Loke and Barker, 1996).

در انجام مطالعات حاضر، با توجه به ساختار سنگی سد باطله و پوشیده شدن سطح تاج سد و دیواره خارجی شد با مصالح سنگی درشت‌دانه، امکان نصب الکترودها بر روی سطح تاج میسر نبود. همچنین شیب بیش از ۴۵ درجه و آندزیت‌های مقاوم تکیه‌گاه جنوب غربی سد، از موانع انجام عملیات برداشت بر روی این تکیه‌گاه بود؛ بنابراین برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در طول دو پروفیل ۳۶۰ و ۱۰۰ متر و با آرایه دو قطبی - دو قطبی، در پایین دست سد و بر روی تکیه‌گاه شمال شرقی آن انجام شد (شکل ۵). در پروفیل اول با توجه به عدم آگاهی از شرایط زمین‌شناسی عمقی منطقه، به منظور کسب اطلاعات عمقی بیشتر فواصل الکترودی ۲۰ متر و در پروفیل دوم که با هدف تفکیک بهتر و جزئیات بیشتر (اطلاعات عمقی کم‌تر) برداشت گردید، فواصل الکترودی

۵ متر در نظر گرفته شد. خطوط برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی که با نام‌های P1 و P2 نام‌گذاری شده‌اند، دارای امتداد شمال شرق - جنوب غرب می‌باشند. با استفاده از رابطه ۱ (Roy and Apparao, 1971)، عمق بررسی در پروفیل اول در بازه تقریبی ۴ تا ۲۰ و در پروفیل دوم در بازه تقریبی ۱۵ تا ۷۰ متر قرار می‌گیرد. بنابراین، برداشت‌های کم‌تر از ۴ و ۱۵ متر به ترتیب در پروفیل اول و دوم، عدم قطعیت بیش‌تری دارند. جدول ۱ مشخصات پروفیل‌ها و ایستگاه‌های برداشت در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

$$A=0.195 \times L$$

(۱)

در رابطه ۱، A عمق بررسی و L طول کل آرایه است.

جدول ۱: مشخصات پروفیل‌ها و ایستگاه‌های برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در محل سد باطله آبگیر معدن مس میدوک

شماره	نام خط برداشت	طول خط برداشت (m)	امتداد	فواصل الکترودی	تعداد ایستگاه
۱	P1	۳۶۰	NE-SW	۲۰	۱۹
۲	P2	۱۰۰	NE-SW	۱۰	۲۰

تجهیزات مورد استفاده در برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی شامل: یک دستگاه ژئوالکتریک WDDS-2 با قدرت ۳۵۰۰ وات و کابل هوشمند به منظور برداشت نیمه اتوماتیک مقاومت ویژه الکتریکی و مجموعه‌ای از الکترودهای فلزی است. لازم به ذکر است به منظور کاهش مقاومت تماسی از محلول آب و نمک استفاده شد. با توجه به جریان الکتریکی (I) ارسال شده و مقادیر اختلاف پتانسیل (ΔV) اندازه‌گیری شده،

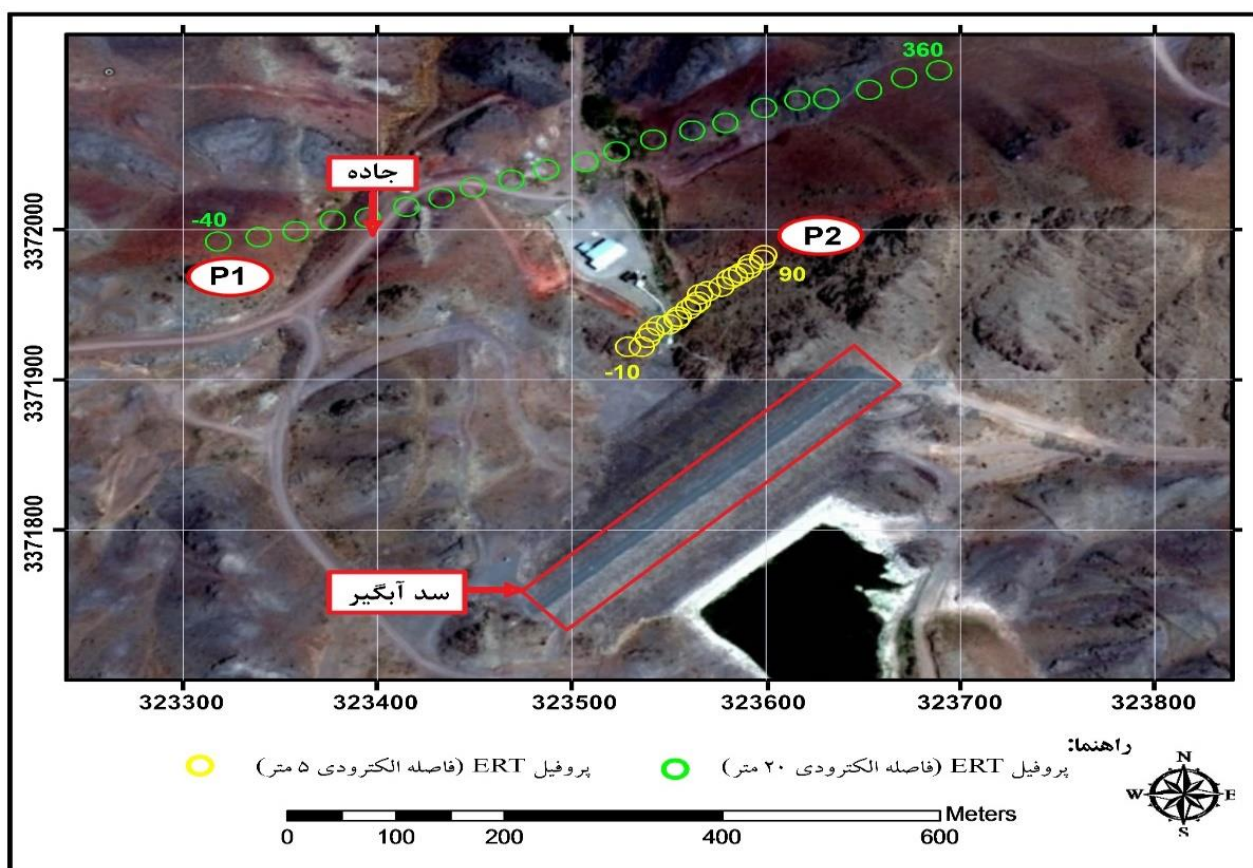
مقادیر اختلاف پتانسیل کمتر از ۰/۰۸ میلی‌ولت در هر خط برداشت حذف شد. همچنین در پروفیل P2 داده‌های خارج از رده که به تنهایی ایجاد آنومالی کرده‌اند، شناسایی و حذف شد. سرانجام عمل مدل‌سازی معکوس دوباره انجام شد و مقدار خطای مدل‌سازی به مقدار قابل قبولی کاهش یافت. بدین ترتیب برای هر پروفیل دو مقطع مقاومت ویژه ظاهری و یک مدل بلوکی مقاومت ویژه الکتریکی بدست آمده از مدل‌سازی معکوس ترسیم گردید. پس از اعمال اثر توپوگرافی مدل‌های بلوکی خروجی ترسیم شد. به عنوان مثال برای خط برداشت P1 نمودارهای مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده و محاسباتی (ظاهری) به همراه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس در شکل ۶ نشان داده شده است.

قانون اهم (رابطه ۲) در نظر گرفته شد و مقاومت الکتریکی (R) اندازه‌گیری شد و از حاصل ضرب مقاومت الکتریکی در فاکتور هندسی آرایش $(k=2\pi/(1/AM-1/AN-1/BM+1/BN))$ ، مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری (ρ_a) به دست آمد (رابطه ۳).

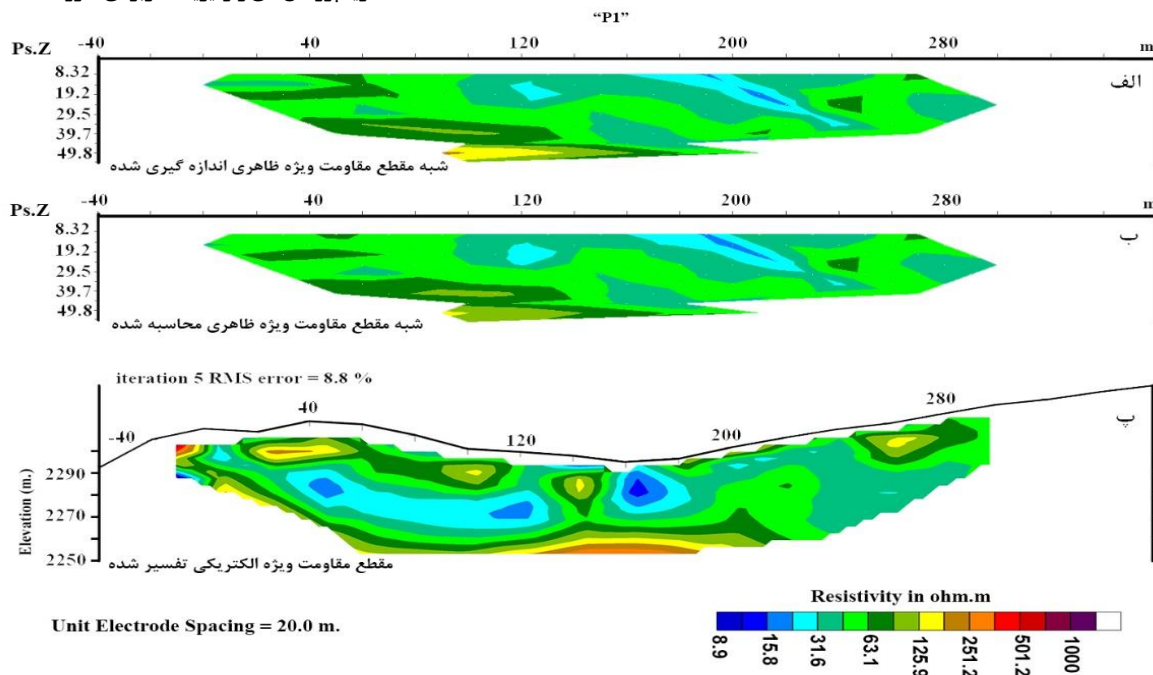
$$R = \Delta V / I \quad (2)$$

$$\rho_a = kR \quad (3)$$

در نهایت برای تفسیر کمی داده‌ها، از روش کمترین مربعات خطا در نرم‌افزار Res2Dinv استفاده شد. با توجه به این‌که مقادیر خطای مدل‌سازی معکوس نسبتاً بالا بوده، مقادیر مربوط به bad points و داده‌های با



شکل ۵: موقعیت پروفیل‌های توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به یکدیگر و نسبت به محل قرارگیری سد آبگیر بر روی تصویر گوگل ارث. موقعیت جاده و پروفیل P1 با فاصله الکترودی ۲۰ متر نشان داده شده است. اعداد کنار هر پروفیل معرف موقعیت الکترود ابتدا و انتهای آن است.



شکل ۶: الف- شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده. ب- شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده. پ- مقطع مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده برای خط برداشت P1 با فاصله الکترودی ۲۰ متر.

آب سطحی منطبق است؛ اما عمق پیشروی و گسترش آن احتمال حضور زون گسله خردشده و اشباع را نشان می‌دهد. موقعیت گسل احتمالی در شکل ۷ نشان داده شده است. در بخش شرقی مقطع نیز، مقادیر مقاومت ویژه نشان دهنده زون آلتزه شده و نیمه آلتزه است.

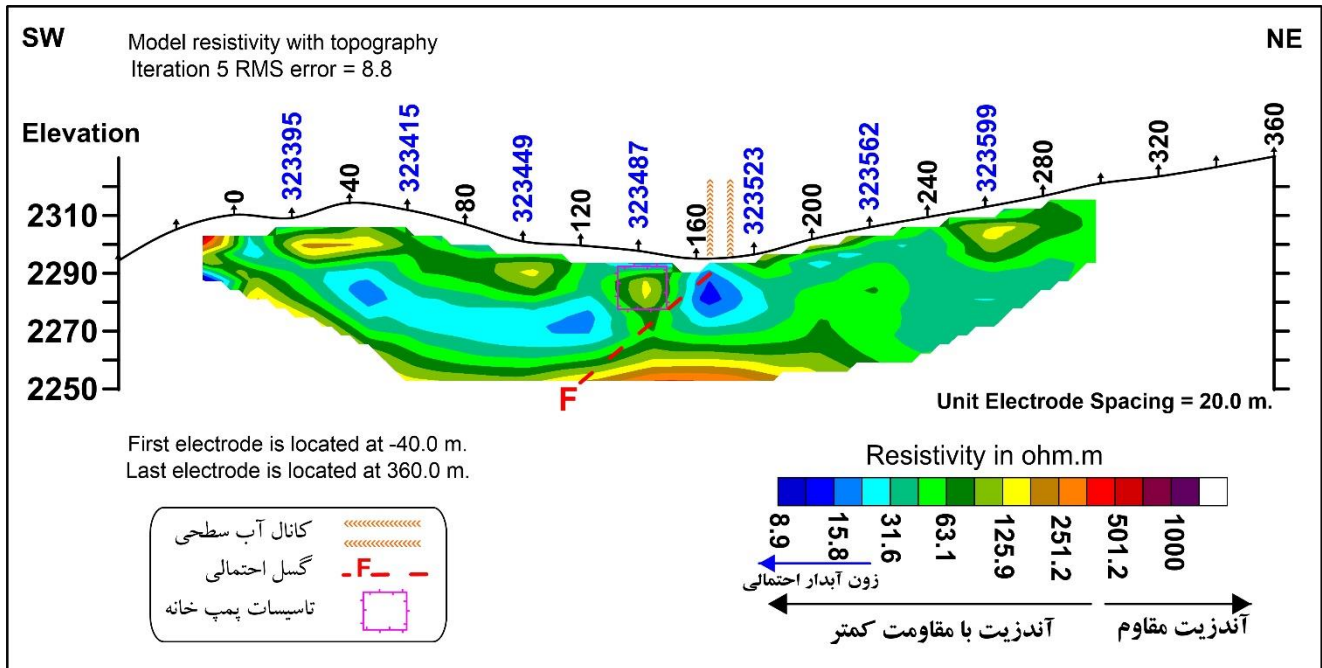
پروفیل P2 (شکل ۸) در فاصله بین الکترود ۰ تا ۱۰ مقادیر مقاومت ویژه بالا را نشان می‌دهد؛ که در سطح منطبق بر بتن‌ریزی انجام شده برای لوله‌های زهکش است و در عمق با توجه به زمین‌شناسی منطقه، آندزیت‌های مقاوم را نشان می‌دهد. در مرکز و شرق مقطع نیز مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی نشان دهنده حضور آندزیت-بازالت‌های مقاوم و با مقاومت کمتر است. زون آبی رنگ با مقاومت ویژه کمتر از ۱۵ اهم‌متر مشاهده شده در مقطع نیز می‌تواند احتمال حضور لایه آندزیتی آلتزه شده و یا اشباع را نشان دهد.

یکی از پیچیدگی‌های زمین‌شناسی در این مطالعه، انطباق مقاومت ویژه الکتریکی آلتراسیون‌های رسی و محدوده‌های دارای آب زیرزمینی می‌باشد (مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۲۰ اهم متر). محدوده آلتراسیون‌ها نفوذناپذیر بوده و با گسترش زیاد همراه است؛ در صورتی که محدوده‌های دارای آب زیرزمینی به محدوده‌های گسله محدود شده و در مقایسه با محدوده‌های آلتراسیونی وسعت بسیار کم‌تری دارند.

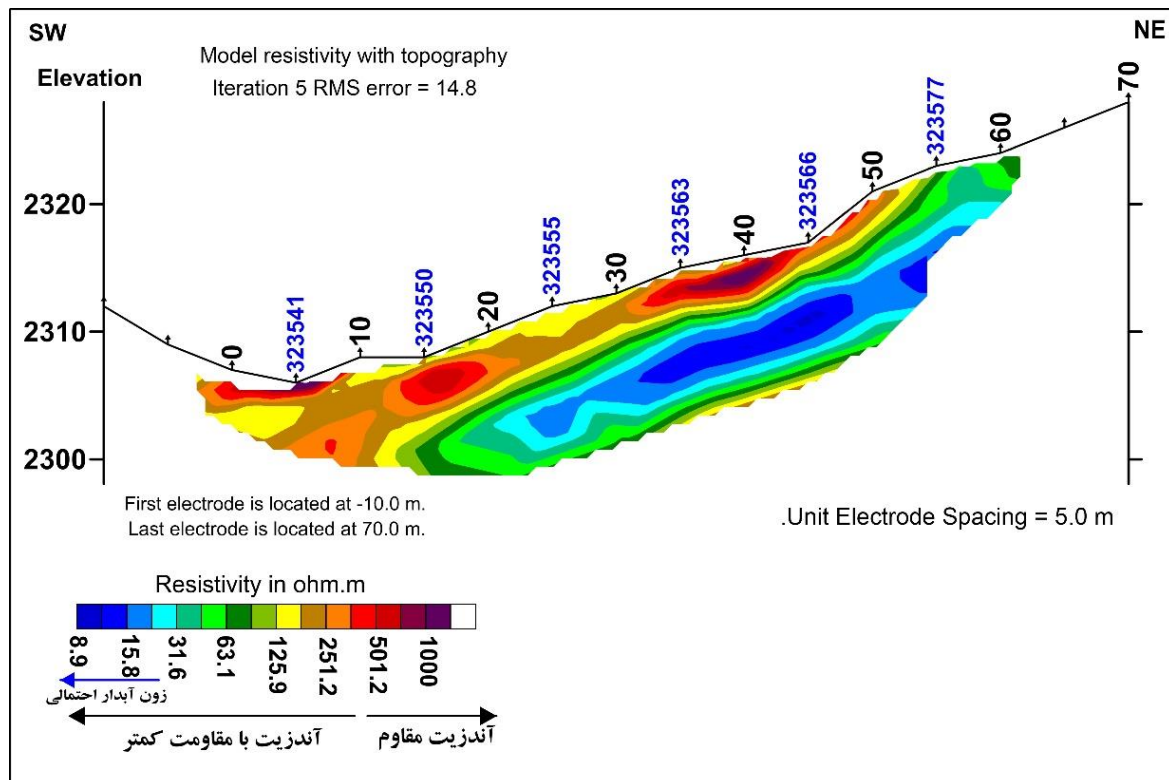
۱-۱-۴- تفسیر مقاطع توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده P1 و P2 به ترتیب در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به این‌که از نظر زمین‌شناسی منطقه از سطح به عمق آندزیت وجود دارد (Zamiran co. report, 2001)، این آندزیت‌ها از نظر مقاومت به دو دسته آندزیت مقاوم با مقاومت ویژه بیش از ۵۰۰ اهم‌متر و آندزیت با مقاومت کمتر با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۵۰۰ اهم‌متر تقسیم می‌شوند. با توجه به مشاهدات زمین‌شناسی انجام شده همزمان با برداشت‌های ژئوالکتریک در محل، می‌توان گفت آندزیت مقاوم به آندزیت بکر و آندزیت با مقاومت کمتر به آندزیت آلتزه شده نزدیک شده است. هم‌چنین نواحی با مقاومت ویژه بسیار کم می‌توانند با فرآیند آلتزه شدن، خردشدگی و یا وجود آب در ارتباط باشند.

با توجه به زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات صحرائی، در مقطع حاصل از پروفیل P1 (شکل ۷) آندزیت‌های مقاوم در عمق و آندزیت‌های با مقاومت کمتر در سطح دیده می‌شوند. زون با مقاومت ویژه بالای مشاهده شده در بخش غربی و در سطح مقطع نیز منطبق بر جاده است. مقادیر مشاهده شده با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۲۰ اهم متر در بخش مرکزی مقطع (حداصل الکترود ۱۶۰ تا ۱۸۰) هرچند در سطح با کانال



شکل ۷: مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P1 با فاصله الکترودی ۲۰ متر. محل الکترودها، گسل احتمالی، تاسیسات پمپ خانه و موقعیت کانال آب سطحی روی مقطع نشان داده شده است. اعداد با رنگ سیاه بر روی توپوگرافی مقطع (مانند ۰، ۴۰ تا ۳۶۰) موقعیت الکترودها بر اساس فاصله الکترودی و اعداد آبی رنگ (مانند ۳۲۳۳۹۵) مختصات UTM الکترود است. راهنمای رنگی با تفکیک لگاریتمی برای هر دو مقطع یکسان سازی شده است.



شکل ۸: مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی معکوس داده‌های پروفیل P2. اعداد با رنگ سیاه بر روی توپوگرافی مقطع (مانند ۰، ۱۰ تا ۷۰) موقعیت الکترودها بر اساس فاصله الکترودی و اعداد آبی رنگ (مانند ۳۲۳۵۴۱) مختصات UTM الکترود است. راهنمای رنگی با تفکیک لگاریتمی برای هر دو مقطع یکسان سازی شده است.

۴-۲- پتانسیل خودزا (SP)

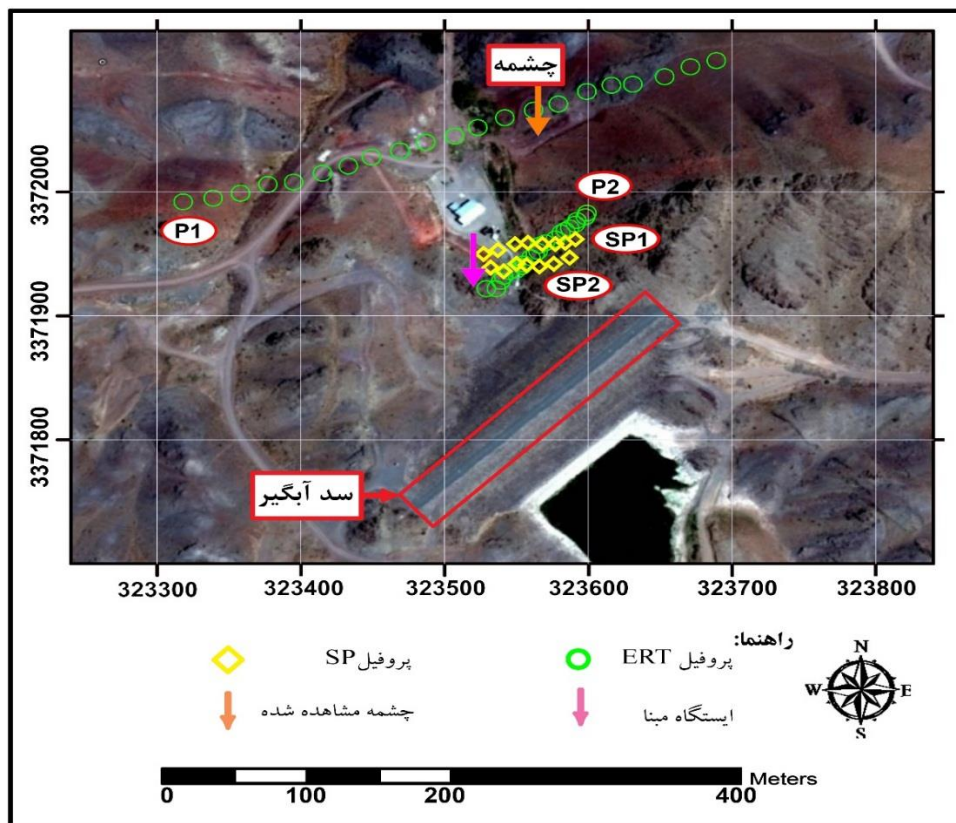
روش پتانسیل خودزا به طور طبیعی یک روش مکمل برای توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در مطالعات ژئوفیزیکی بررسی نشت از سدها است (Ikard et al., 2014). اساس این روش اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل طبیعی ایجاد شده از واکنش‌های شیمیایی داخل زمین است (Abdelrahman and El-Araby, 1997). این روش یک تکنیک ژئوفیزیکی است و مستقیماً به جریان آب زیرزمینی حساس است. در واقع جریان آب در زمین باعث ایجاد پتانسیل‌های خودزا شده و به همین دلیل، روش SP در مطالعات هیدروژئولوژیکی مورد توجه واقع شده است (Ikard et al., 2014).

روی تکیه‌گاه شمال شرقی سد و در محدوده نشت پیش‌بینی شده، براساس مطالعات توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده و با توجه به این‌که وجود جریان آب در زمین باعث ایجاد پتانسیل‌های خودزا می‌شود، اندازه‌گیری‌های پتانسیل خودزا در طول دو پروفیل SP1 و SP2 به طول‌های ۸۰ و ۷۰ متر انجام شد. علت برداشت تنها دو پروفیل در این محدوده، توپوگرافی خشن و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بوده است. تجهیزات مورد استفاده شامل دو الکتروود پلاریزه نشو مس - سولفات مس و یک اهم‌متر است. برای تعیین محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری، در هر پروفیل - که در هر پروفیل با فواصل الکتروودی ۱۰ متر و فاصله دو پروفیل ۱۵ متر است. ابتدا گودالی به

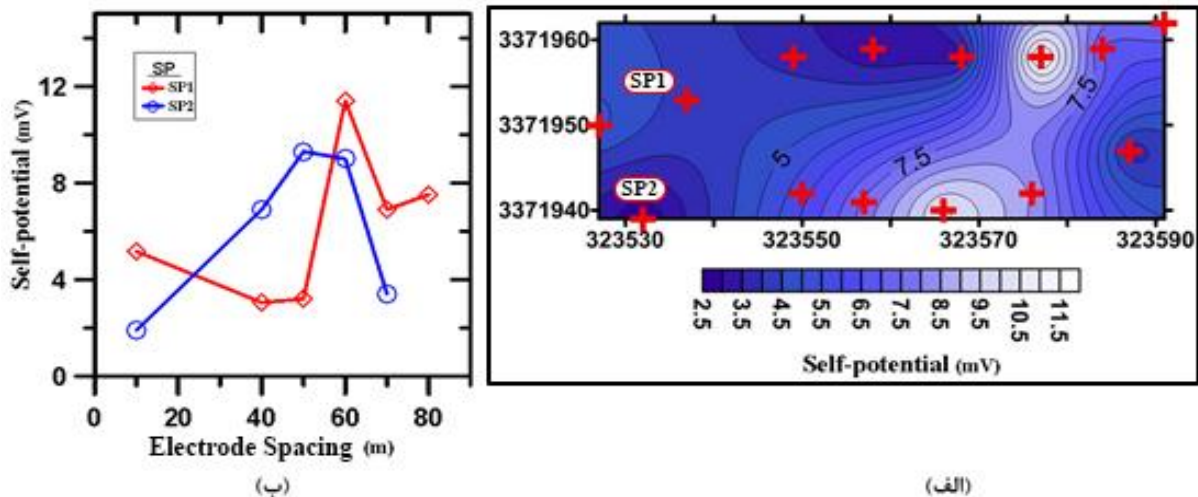
عمق ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر برای عبور از ریشه گیاهان حفر شد. همچنین به منظور افزایش کیفیت داده‌ها، کنترل مقاومت ویژه تماسی الکترودها با زمین و کنترل پلاریزاسیون الکتروودی انجام شد. برای کاهش مقدار مقاومت تماسی در هر گودال مقداری آب ریخته و تا زمان اندازه‌گیری (۱۲ ساعت بعد) رها شد و به این ترتیب، مقاومت تماسی به طور چشم‌گیری کاهش یافت. اندازه‌گیری پتانسیل خودزا با روش دامنه پتانسیل انجام شد. در این راستا، الکتروود ثابت در ایستگاه مبنا و خارج از منطقه آنومالی مورد انتظار واقع شد. برای اطمینان از تکرار پذیری مقادیر قرائت شده، اندازه‌گیری‌ها در هر ایستگاه ۳ بار انجام شد. لازم به ذکر است مقادیر پتانسیل پس از هر ۱ ساعت (پس از پایان هر پروفیل) برای انجام تصحیحات قرائت شد. محل ایستگاه مبنا و سایر ایستگاه‌های برداشت در شکل ۹ نشان داده شده است.

۴-۲-۱- تفسیر داده‌های SP

مقادیر پتانسیل قرائت شده برای هر ایستگاه پس از حذف نوفه‌های تصادفی حاصل مانند عبور لوله‌های زهکش، به صورت منحنی و نقشه پتانسیل ترسیم شد (شکل ۱۰). نتایج حاصل از هر دو پروفیل SP1 و SP2، آنومالی مثبت پتانسیل خودزا را به ترتیب با مقادیر ۱۲ و ۱۰ میلی‌ولت نشان می‌دهد؛ که مقادیر آن می‌تواند نشان‌دهنده اختلاف پتانسیل حاصل از نشت باشد (برای مثال Panthulu et al., 2001).



شکل ۹: پروفیل‌های پتانسیل خودزا و موقعیت آن‌ها نسبت به پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و سد آبگیر بر روی تصویر گوگل ارث.



شکل ۱۰: الف- نقشه هم‌پتانسیل داده‌های پتانسیل خودزا محورهای نشان‌دهنده مختصات یو تی ام ایستگاه‌های برداشت می‌باشند. ب- منحنی پتانسیل خودزا (محور افقی فاصله الکترودی (بر حسب متر) و محور عمودی مقدار پتانسیل قرائت شده (بر حسب میلی‌ولت) است. مقادیر پتانسیل قرائت شده در ایستگاه‌های ۲۰ و ۳۰ به علت وجود نوفه حاصل از لوله‌های زهکش حذف شده‌اند. پروفیل پتانسیل خودزا روی تکیه‌گاه شمال شرقی سد باطله آبگیر معدن مس میدوک برداشت شده است. نقاط قرمز رنگ روی نقشه محل ایستگاه‌های برداشت را نشان می‌دهد.

منطقه پایین دست سد آبگیر وجود دارد. پیکان‌های قرمز رنگ بر روی شکل ۱۱ مسیر جریان آب را نشان می‌دهند.

در نهایت، برای جمع‌آوری نمونه‌ها از بطری‌های پلی اتیلن ۱۰۰۰ cc استفاده شد و طبق استاندارد نمونه‌برداری آب، قبل از نمونه‌برداری هر یک از ظروف نمونه‌برداری یک مرتبه با آب مقطر و دو مرتبه با آبی که قرار بود نمونه‌برداری از آن انجام شود، شسته شد. در مجموع ۱۷ نمونه از ۱۵ ایستگاه جمع‌آوری گردید.

برای هر نمونه، مقدار اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC) است. مقادیر pH، EC و دما برای هر یک از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه pH سنج و EC سنج به صورت درجا قرائت شد. برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی شامل: کاتیون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، K^+ ، Na^+ و آنیون‌های Cl^- ، HCO_3^- ، CO_3^{2-} ، SO_4^{2-} و NO_3^- نمونه‌ها در دمای $4^{\circ}C$ نگهداری و به آزمایشگاه آب مجتمع مس سرچشمه ارسال شد. برای کنترل نتایج، دو نمونه تکراری از گمانه‌های شماره W1 و W6 در نمونه‌های ارسالی قرار داده شد؛ که در مقادیر بدست آمده برای نمونه‌ها دقت آنالیز را تأیید کردند. همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج آنالیز، میزان خطای بالانس یونی (CBE) برای هر نمونه از رابطه ۴ محاسبه شد و مقادیر با خطای کم‌تر از $\pm 10\%$ درصد، صحت نتایج را تأیید کردند (نخعی و همکاران، ۱۳۹۰).

$$\%CBE = \frac{\sum Cations - \sum Anions}{\sum Cations + \sum Anions} * 100 \quad (4)$$

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها، در جدول ۲ ارائه شده است. همان گونه که مشخص است، در تمام نمونه‌های آب برداشت شده از دو سد باطله آبگیر و رسوبگیر معدن مس میدوک غلظت یون سولفات بسیار بالا است. نمودارهای مختلفی برای نشان دادن و طبقه‌بندی نتایج تجزیه

۳-۴- مطالعات هیدورشیمی آب

تجزیه شیمیایی تعداد زیادی نمونه آب، انبوهی از داده‌ها را فراهم می‌آورد که برای هدف‌های معین باید مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. این تجزیه و تحلیل‌ها از نظر حل بسیاری از مسائل علمی از قبیل مطالعه اختلاط آب‌ها از منابع مختلف، وضع کیفی آب‌های زیرزمینی در یک منطقه، تأثیر سازندهای مختلف بر روی کیفیت آب، بررسی منشأ شوری آب، تغییرات کیفیت آب در مسیر حرکت آن و در طول زمان و بسیاری مسائل دیگر مفید است (صدافت، ۱۳۸۷). از آنجا که مطالعات ژئوفیزیک انجام شده در منطقه پایین دست سد آبگیر معدن مس میدوک نشان‌دهنده وجود نشت احتمالی از تکیه‌گاه شمال شرقی سد آبگیر می‌باشد؛ به‌منظور تأیید و بسط تفسیرهای ژئوفیزیک، از منابع آبی منطقه نمونه‌برداری شد. جدول ۲ موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری از منابع آبی منطقه سد آبگیر را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های نمونه‌برداری عبارتند از: ۶ گمانه پایشی حفرشده در پایین دست سد آبگیر (W1-W6)، لوله‌های زهکش سد آبگیر (P1 و P2)، آب سد آبگیر و سد رسوبگیر (D1-D4)، آب خروجی قنات دو روستای روگوشیه (RW) و کم‌سفید (KW) به عنوان نزدیک‌ترین روستاها به محل سد آبگیر و استخر آب تازه ورودی به کارخانه تغلیظ (P).

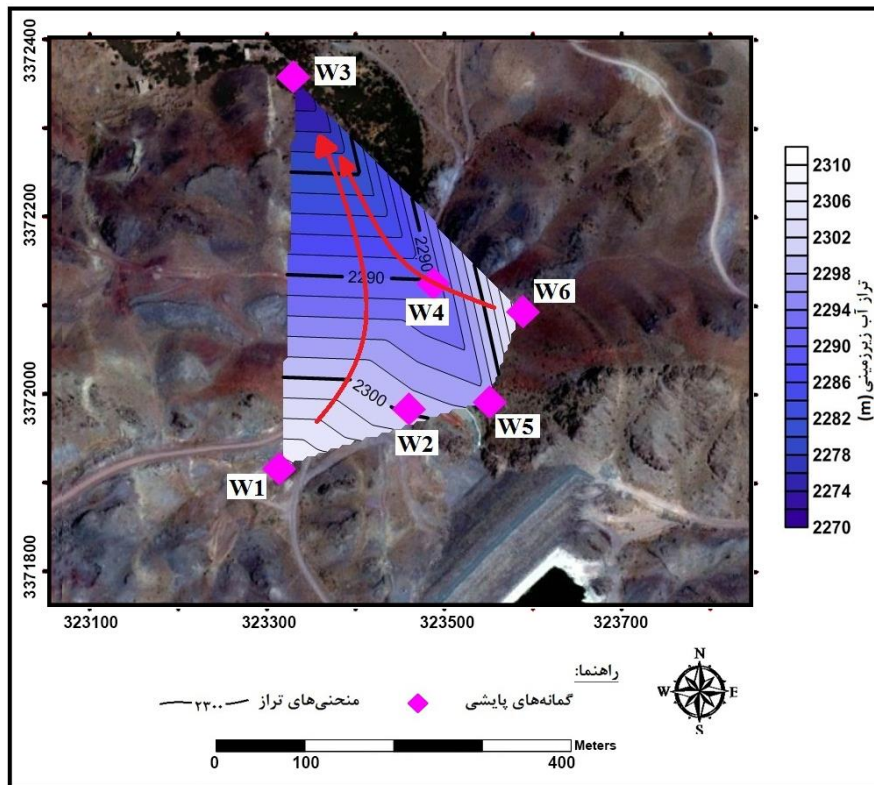
نمونه‌برداری از گمانه‌های پایشی با استفاده از سیستم نمونه‌بردار درون‌چاهی انجام شد و عمق سطح آب در هر گمانه با متر عمقیاب الکتریکی با هدف تعیین سطح تراز آب زیرزمینی در منطقه قرائت گردید. با اندازه‌گیری عمق آب در ۶ گمانه پایشی سطح تراز ایستابی آب منطقه به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، سطح تراز آب در منطقه بین تراز ۲۳۱۰ - ۲۲۷۰ متر (در عمق ۱ تا ۱۵ متری از سطح زمین) است و با توجه به بالا بودن سطح تراز آب در منطقه، در صورت وجود نشت احتمالی از سد آبگیر، احتمال آلوده شدن منابع زیرزمینی

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۵، شماره ۲، ۱۳۹۸.

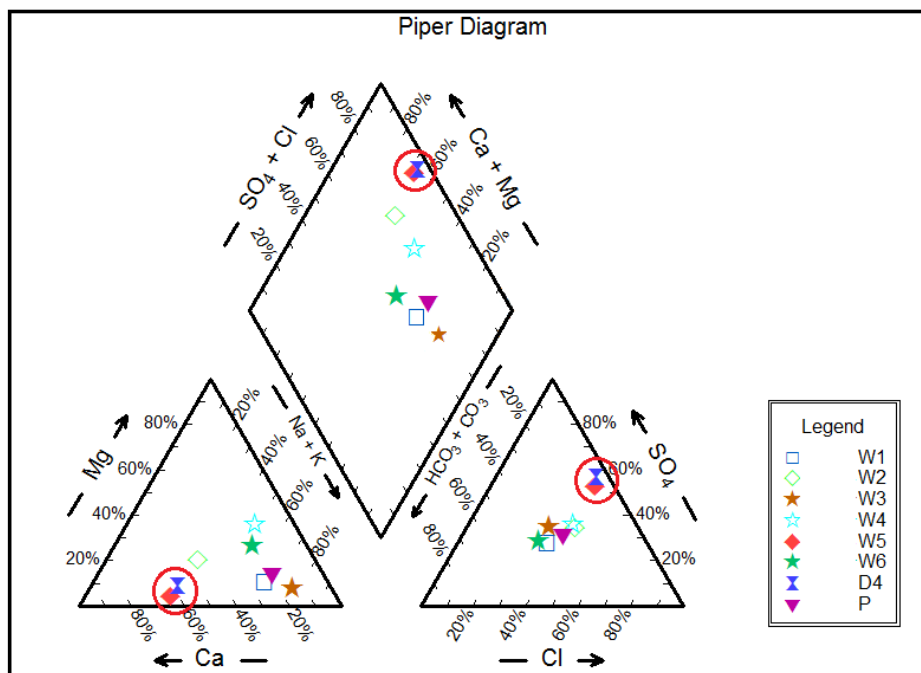
مرکز نمودار واقع شده است و توزیع آنیون یکنواختی دارند. غلظت کلر در نمونه آب سد و گمانه W5 مقادیر نزدیک به هم را نشان می‌دهند. غلظت یون کربنات و بی‌کربنات در تمام نمونه‌ها ناچیز است. در تقسیم‌بندی جزئی میدان لوزی شکل نمودار پایپر، نمونه آب سد و گمانه پایشی W5 در منطقه سختی کربناتی متجاوز از ۵۰ درصد، نمونه آب گمانه‌های W1، W3 و نمونه آب P در منطقه قلیایی غیرکربناتی بیش از ۵۰ درصد واقع شده‌اند. همچنین در منطقه قرارگیری نمونه‌های آب دو قنات RW و KW و گمانه‌های W2 و W4 هیچ زون کاتیون - آنیونی از ۵۰ درصد تجاوز نمی‌کند. در نهایت، تیپ آب در محدوده لوزی پایپر نشان داد که نمونه‌های آب سد آبگیر و گمانه پایشی W5 تیپ سولفات و سایر نمونه‌ها تیپ کلراته - بی‌کربناته دارند.

با توجه به نتایج بدست آمده، کیفیت نمونه آب برداشت شده از گمانه پایشی W5 که روی تکیه‌گاه شمال شرقی سد آبگیر واقع شده است، بسیار نزدیک و شبیه به کیفیت آب موجود سد آبگیر است. این مسأله در جدول ۲ نیز با مقایسه نتایج آنالیز نمونه‌ها، قابل تشخیص است. از آن‌جا که موقعیت گمانه W5 به محل پروفیل P2 مقاومت ویژه الکتریکی و پروفیل‌های پتانسیل خودزا نزدیک است، موضوع شباهت کیفیت آب این گمانه به آب سد، تأیید کننده وجود نشت از تکیه‌گاه سد آبگیر و ورود آن به منابع آب زیرزمینی منطقه پایین دست است.

شیمیایی نمونه‌های آب پیشنهاد شده است. در اغلب این نمودارها، آب زیرزمینی را محلولی شامل سه جزء کاتیونی کلسیم، منیزیم و فلزات قلیایی (سدیم و پتاسیم) و سه جزء آنیونی سولفات، کلراید و بی‌کربنات همراه با کربنات در نظر می‌گیرند. نمودار پایپر مشخصات شیمیایی آب را برحسب غلظت نسبی کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی نشان می‌دهد؛ به طوری که با استفاده از آن به سرعت می‌توان به نوع آب و فراوانی اجزا محلول آن پی‌برد. این نمودار از ترکیب سه میدان مجزا تشکیل شده است که درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها در میدان‌های مثلثی و موقعیت ترکیبی آن‌ها در میدان لوزی شکل پیاده می‌شود (صداقت، ۱۳۸۷). به منظور ارزیابی بهتر و تجزیه و تحلیل پارامترهای شیمیایی بدست آمده از آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب در محدوده مورد مطالعه، نقشه‌های هم‌میزان ترسیم و مطالعات کیفی انجام شد. پس از رسم نمودار پایپر نمونه آب‌های منطقه سد باطله آبگیر معدن مس میدوک در محیط نرم‌افزار Aq.Qa (شکل ۱۲) مشخص شد که اغلب نمونه‌ها روی نمودار کاتیون‌ها نزدیک به رأس سدیم - پتاسیم قرار دارند؛ اما نمونه‌های سد آبگیر و گمانه پایشی W2 و W5 نزدیک به رأس کلسیم می‌باشند و میزان یون کلسیم در این نمونه‌ها بیش از ۵۰ درصد است. همچنین غلظت یون منیزیم در تمام نمونه‌ها کم‌تر از ۴۰ درصد است. بر روی نمودار آنیون‌ها نیز مشاهده می‌شود که به جز دو نمونه آب سد آبگیر و گمانه پایشی W5 که نزدیک به رأس سولفات می‌باشند؛ بقیه نمونه‌ها در



شکل ۱۱: نقشه تراز آب زیرزمینی منطقه پایین دست سد باطله آبگیر معدن مس میدوک. موقعیت گمانه‌های پایشی نسبت به سد باطله آبگیر بر روی تصویر گوگل ارث نشان مشخص شده است. پیکان‌های قرمز رنگ جهت حرکت آب زیرزمینی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲: نمودار پایپر نمونه‌های آب محدوده سد باطله آبگیر معدن مس میدوک (دایره قرمز رنگ انطباق نتایج کیفیت نمونه آب برداشت شده از گمانه پایشی W5 که روی تکیه‌گاه شمال شرقی سد آبگیر واقع شده است و کیفیت آب موجود سد آبگیر (نمونه D4) را نشان می‌دهد).

Sample ID	Location		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	CO_3^{2-}	EC	pH	CBE	
	Easting	Northing	mg/L						mho/μ	---	%				
گمانه‌های پایشی	W1	۳۳۳۳۱۲	۳۳۷۱۹۱۰	۵۲	۱۴	۱۴۰	۴۰	۲۸۰	۱۶۰	۱۴۰	۶/۷	ND	۸۰۱	۷/۴۶	-۵/۱
	W2	۳۳۳۴۵۸	۳۳۷۱۹۷۸	۱۳۶	۳۸	۱۰۰	۴۰	۲۱۰	۲۱۰	۱۹۰	۵/۶	ND	۱۰۸۰	۷/۱۲	۶/۷۱
	W3	۳۳۳۳۲۸	۳۳۷۲۳۵۲	۳۲	۱۰	۱۷۰	۴۰	۲۶۰	۱۹۰	۱۳۰	۵/۸	ND	۹۴۲	۷/۲۳	-۵/۳۳
	W4	۳۳۳۴۸۶	۳۳۷۲۱۱۹	۴۸	۷۱	۱۶۰	۴۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۵۰	۱۱/۲	ND	۱۱۱۶	۷/۰۵	۱۸/۰۶
	W5	۳۳۳۵۴۹	۳۳۷۱۹۸۶	۲۹۲	۱۲	۱۴۰	۶۰	۱۰۰	۴۷۰	۲۷۰	۱۲/۲	ND	۱۸۹۶	۶/۸۹	۹/۲۲
	W6	۳۳۳۵۸۷	۳۳۷۲۰۸۷	۳۸	۳۰	۹۰	۴۰	۲۳۰	۱۲۵	۱۰۰	۱۰/۶	ND	۵۳۶/۵	۷/۹۱	-۱/۲۶
سد آبگیر و رسوبگیر	D1	۳۳۳۵۰۶	۳۳۷۷۰۴	۲۸۰	۱۰	۱۶۰	۱۱۰	۱۷	۵۷۰	۲۸۰	۵/۷	۲۸	۲۸۰۰	۸/۷۵	۷/۱۸
	D2	۳۳۳۶۱۲	۳۳۷۰۶۱۵	۲۹۰	۱۴	۱۷۵	۱۱۰	۳۶	۶۶۰	۲۹۰	۶/۲	۱۱	۲۷۳۰	۸/۵۹	۸/۱۰
	D3	۳۳۳۷۵۶	۳۳۷۱۳۹۸	۲۷۰	۲۴	۱۲۰	۴۰	۱۰۴	۶۹۰	۲۷۰	۶/۷	ND	۲۴۹۰	۷/۴۵	۶/۵۱
	D4	۳۳۳۵۲۳	۳۳۷۱۷۳۵	۲۹۰	۲۶	۱۵۰	۷۰	۶۵	۵۷۰	۲۹۰	۷/۴	ND	۲۵۱۰	۷/۲۴	۹/۸
آب ورودی کارخانه تغلیظ	P	۳۳۳۲۱۴	۳۳۶۷۵۱۳	۴۴	۱۹	۱۵۰	۴۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۴۰	۶/۷	ND	۷۱۲	۷/۳۳	۳/۶۴
	لوله‌های زهکش	P1	۳۳۳۵۲۵	۳۳۷۱۹۸۰	۲۸۰	۵۵	۱۳۰	۵۰	۸۳	۶۵۰	۲۸۰	۸/۳	ND	۱۷۶۸	۷/۱۸
P2		۳۳۳۵۲۵	۳۳۷۱۹۸۲	۲۸۰	۳۸	۱۴۰	۵۰	۸۰	۴۷۰	۲۸۰	۹/۳	ND	۱۸۱۱	۷/۰۸	۱۷/۹۷
روستای روگوشیه	RW	۳۳۴۴۲۵	۳۳۷۳۶۵۶	۲۷۲	۱۷	۲۱۰	۴۰	۳۹۰	۳۶۰	۲۶۰	۷/۳	ND	۲۴۲۰	۷/۵۰	۸/۰۵
روستای کم سفید	KW	۳۳۱۷۲۳	۳۳۷۲۸۲۱	۱۴۰	۱۹	۶۰	۴۰	۲۵۰	۲۳۰	۱۴۰	۲/۷	ND	۱۱۰۰	۷/۱۱	۵/۳۰

جدول ۲: نتایج آنالیز شیمیایی تعدادی از نمونه‌های آب منطقه سد آبگیر معدن مس میدوک (ND = Not Detectable).

آندزیتی - بازالتی تشکیل شده است و مطالعات تکتونیکی نشان دهنده تکتونیزه بودن و حضور زون گسله در منطقه است. از نظر سطح ایستابی منطقه، به علت عدم وجود اطلاعات سطح ایستابی منطقه سد آبگیر، عمق آب در ۶ گمانه پایشی حفر شده در منطقه پایین دست سد باطله با استفاده از متر عمق یاب قرائت شد که نتایج حاصل حاکی از بالا بودن سطح آب در

۵- نتیجه گیری

مطالعات زمین‌شناسی منطقه سد آبگیر معدن مس میدوک که در زون ارومیه - دختر قرار گرفته است، نشان می‌دهد که این منطقه از دایک‌های

۶- سپاس‌گزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب قدردانی خود را از حمایت‌های مرکز تحقیق و توسعه مجتمع مس شهر بابک شرکت ملی صنایع مس ایران برای انجام این مطالعه ابراز نمایند.

۷- منابع

صداقت، م.، ۱۳۸۷، زمین و منابع آب (آب‌های زیرزمینی)، تهران: دانشگاه پیام نور.

قربانی، ا.، بمانی، م.، انصاری، ع.، قاری، ح.، ۱۳۹۳، کاربرد مقاومت‌ویژه الکتریکی دو بعدی در شناسایی هندسه زمین لغزش نقل سمیرم، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۶ (۳-۴)، ۳۲-۱۷.

کارگر، م.، ۱۳۸۹، بررسی اثر باطله کارخانه‌ی تغلیظ مجتمع مس میدوک بر آلودگی آبهای زیرزمینی پایین دست منطقه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران

ناصری، ح.، نیک قوجق، ی.، ۱۳۹۱، نقش کارست ژیبسی در انتقال آلاینده‌ها از سد باطله معدنی آق دره - تکاب، مجله محیط‌شناسی، ۶، ۴۱-۴۸.

نخعی، م.، موسانی، ف.، رضانی، ا.، امیری، و.، ۱۳۹۰، ارزیابی کیفی رودخانه کارون و سرشاخه‌های آن در استان چهارمحال و بختیاری، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۷۲-۵۹.

نوروزی، غ. ح.، ۱۳۹۲، روش‌های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

واحد زمین‌شناسی و امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۷۰، گزارش مطالعات اکتشافی در محدوده معدن مس میدوک توسط شرکت اتوکمپو فنلاند، آرشیو فنی معدن مس میدوک.

واحد زمین‌شناسی و امور اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷، گزارش نقشه زمین‌شناسی - معدنی ۱:۱۰۰۰ بخش‌های غربی و شرقی معدن مس پورفیری میدوک توسط شرکت پارس اولنگ، آرشیو فنی معدن مس میدوک.

یحیی‌آبادی، س.، قربانی، ا.، انصاری، ع.، ا.، ساعی‌نیا، ا.، ۱۳۹۶، استفاده از روش‌های ژئوالکتریک در بررسی وضعیت نشت آب از محدوده سد رسوب‌گیر معدن مس میدوک، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱ (۲)، ۱۳۴-۱۱۹.

Abdelrahman, E. M., and El-Araby, T. M., 1997, An iterative approach to depth determination from moving average residual self-potential anomalies: King Abdul-Aziz University, Earth Science, 9(3), 26-97.

Al-Fares, W., 2011, Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria, Journal of Applied Geophysics, 75(3), pp.464-471.

Al-Saigh, N. H., Mohammed, Z. S., & Dahham, M. S., 1994, Detection of water leakage from dams by self-potential method, Engineering Geology, 37(2), 115-121.

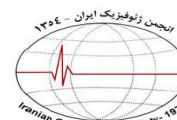
این منطقه بوده است؛ لذا در صورت وجود نشت از سد آبگیر احتمال آلوده شدن منابع آبی منطقه وجود دارد.

در مطالعات ژئوالکتریک انجام شده با هدف شناسایی نشت احتمالی از سد آبگیر معدن مس میدوک، با توجه به این که مصالح به کار برده شده در دیواره خارجی و تاج سد آبگیر، بسیار درشت‌دانه بوده (با میانگین ابعادی حدود ۶۰۰ میلی‌متر) و مقاومت تماسی بین مصالح و الکترودها بسیار بالا است، برداشت‌های ژئوالکتریکی از نظر تئوری قابل اجرا نبود. با این حال، پروفیلی جهت بررسی بر روی تاج سد برداشت گردید که نتایج به دست آمده تکرارناپذیر و غیرقابل قبول بودند. همچنین شیب بیش از ۴۵ درجه و آندزیت‌های مقاوم تکیه‌گاه جنوب غربی سد، از موانع انجام عملیات برداشت بر روی این تکیه‌گاه بوده است. بنابراین دو پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی روی تکیه‌گاه شمال شرقی و پایین دست سد آبگیر برداشت شدند. در مقاطع حاصل از برداشت دو پروفیل ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، زونی با مقاومت ویژه کم‌تر از ۲۰ اهم‌متر مشاهده شده است و احتمال حضور زون آبدار را در تکیه‌گاه شمال شرقی نشان می‌دهد. در نتایج برداشت داده‌های پتانسیل خودزا، آنومالی مثبت پتانسیل خودزا و در محدوده مقادیر نشت با مقدار عددی ۱۲ و ۱۰ میلی‌ولت به ترتیب در پروفیل ۱ و ۲ در این تکیه‌گاه و منطبق بر نتایج توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، مشاهده شد که نتایج برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی را تأیید می‌کند. همچنین با توجه به هد هیدرولیکی ناشی از اختلاف سطح آب در پشت و جلوی سد، عامل احتمالی ایجاد پتانسیل خودزا در این مطالعه، پتانسیل الکتروستاتیک است.

نمونه‌برداری انجام شده از منابع آبی منطقه سد به منظور بررسی آلودگی احتمالی منابع پایین دست سد در صورت وجود نشت از سد آبگیر، نشان می‌دهد که تیپ آب منطقه سد باطله بی‌کربناته - کلراته است؛ در حالی که گمانه پایش W5 که در پایین دست سد آبگیر و در نزدیکی این سد در تکیه‌گاه شمال شرقی واقع شده است، همانند نمونه آب سد، تیپ آب سولفات - کلراته را نشان می‌دهد؛ که بیانگر احتمال آلودگی این گمانه در اثر نشت احتمالی از سد می‌باشد.

تلفیق نتایج حاصل از مطالعات هیدروژئوشیمیایی و روش‌های ژئوالکتریکی نشان‌دهنده وجود نشت در دیواره شمال شرقی سد باطله آبگیر است. در نهایت، با دو دلیل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تکیه‌گاه شمال شرقی سد آبگیر جریان آب وجود دارد؛ (۱) وجود آنومالی مثبت در محل خروجی مورد انتظار در تکیه‌گاه سد. (۲) وجود چشمه آب در تکیه‌گاه مربوطه. همچنین نتیجه می‌شود که ترکیب دو روش ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (تشخیص زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی) و پتانسیل خودزا (ردگیری مسیرهای نشت زیرسطحی)، برای دیده‌بانی زیست‌محیطی سدهای باطله در محیط‌های سنگی روشی مناسب است.

- A., 2018, Geoenvironmental characterization of unstable abandoned mine tailings combining geophysical and geochemical methods (Cartagena-La Union district, Spain), *Engineering Geology*, 232, pp.135-146.
- Olang mining services co., 2003, Technical specification for construction of coffer dam - water retaining dam. Miduk copper mine technical archive, No: 3.
- Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., & Shirke, J. M., 2001, Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods, *Engineering Geology*, 59(3), 281-295.
- Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2012, Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Bukan basin, Northwest of Iran, *Applied Water Science*, 2(4), pp.309-315.
- Poisson, J., Chouteau, M., Aubertin, M., & Campos, D., 2009, Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile, *Journal of Applied Geophysics*, 67(2), 179-192.
- Roy, A., and Apparao, A., 1971, Depth of investigation in direct-current methods, *Geophysics*, 36, 943-959.
- Rozycki, A., Fonticiella, J. R., & Cuadra, A., 2006. "Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method". *Engineering Geology*, 82(3), 145-153.
- Sharma, R. S., 1994, Some aspects of liquefaction of tailing dams, Master's Thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicine, University of London.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H., 2008, Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam, *Journal of Applied Geophysics*, 65(3), 155-164.
- Song, S.H., Song, Y. and Kwon, B.D., 2005, Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam, *Exploration Geophysics*, 36(1), pp.92-96.
- Titov, K., Loukhmanov, V., & Potapov, A., 2000, Monitoring of water seepage from a reservoir using resistivity and self-polarization methods: Case history of the Petergoph fountain water supply system, *First Break*, 18(10), 431-435.
- Vick, S.G., 1990, Planning, design, and analysis of tailings dams, *BiTech*.
- Williams, T.M. and Smith, B., 2000, Hydrochemical characterization of acute acid mine drainage at Iron Duke Mine, Mazowe, Zimbabwe, *Environmental Geology*, 39(3-4), pp.272-278.
- Yuval, D. and Oldenburg, W., 1996, DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: results from the Copper Cliff mine tailings impoundments, *Journal of Applied Geophysics*, 34(3), pp.187-198.
- Zamiran Co., 2001, Water storage, tailing dam and thickener area: Miduk copper mine. Miduk copper mine technical archive.
- Bedrosian, P. A., Burton, B. L., Powers, M. H., Minsley, B. J., Phillips, J. D., & Hunter, L. E., 2012, Geophysical investigations of geology and structure at the Martis Creek Dam, Truckee, California, *Journal of Applied Geophysics*, 77, 7-20.
- Boleve, A., Janod, F., Revil, A., Lafon, A. and Fry, J.J., 2011, Localization and quantification of leakages in dams using time-lapse self-potential measurements associated with salt tracer injection, *Journal of Hydrology*, 403(3-4), pp.242-252.
- Campbell, D.L. and Fitterman, D.V., 2000, May, Geoelectrical methods for investigating mine dumps, In *Proceedings of the 5th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD 2000)*, Denver, Colorado (Vol. 2, pp. 1513-1523).
- Chii, C. E., 2010, An Integrated Two-Dimensional Geophysical Investigation of an Earth Dam in Zaria Area Nigeria, *Nature and Science*, 8(10), 358-368.
- Grangeia, C., Ávila, P., Matias, M., & Da Silva, E. F., 2011, Mine tailings integrated investigations: the case of Rio tailings (Panasqueira Mine, Central Portugal), *Engineering Geology*, 123(4), 359-372.
- Ikard, S. J., Revil, A., Jardani, A., Woodruff, W. F., Parekh, M., & Mooney, M., 2012, Saline pulse test monitoring with the self-potential method to non-intrusively determine the velocity of the pore water in leaking areas of earth dams and embankments, *Water Resources Research*, 48(4).
- Ikard, S. J., Revil, A., Schmutz, M., Karaoulis, M., Jardani, A., & Mooney, M., 2014, Characterization of focused seepage through an earthfill dam using geoelectrical methods, *Groundwater*, 52(6), 952-965.
- Ikard, S. J., Rittgers, J., Revil, A., & Mooney, M. A., 2015, Geophysical investigation of seepage beneath an earthen dam, *Groundwater*, 53(2), 238-250.
- Jardani, A., & Revil, A., 2009, Stochastic joint inversion of temperature and self-potential data, *Geophysical Journal International*, 179(1), 640-654.
- King, A.R. and Hynes, T., 1994, Applications of Geophysical Methods for Monitoring Acid Mine Drainage, In *International land reclamation and mine drainage conference and International conference on the abatement of acidic drainage, 3rd, Proceedings: US Bureau of Mines Special Publication SP 06A-94* (pp. 317-326).
- Loke, M. H., and Barker, R. D., 1996, Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion, *Geophysical Prospecting* 44, 499-523.
- Mainaly, G., 2006, Monitoring of tailings dams with geophysical methods, Patent No. 7. Lulea University of Technology. 93 p.
- Mainali, G., Nordlund, E., Knutsson, S. and Thunehed, H., 2015, Tailings Dams Monitoring in Swedish Mines using Self-Potential and Electrical Resistivity Methods. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20, pp.5859-5875.
- Martín-Crespo, T., Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martínez-Pagán, P., De Ignacio, C., Lillo, J. and Faz,



Investigation of possible leakage from wastewater dam walls of the Miduk copper mine using geophysical methods

Elham Saeinia¹; Ahmad Ghorbani^{2*}; Abdolhamid Ansari²

1. MSc Student, Mining and Metallurgical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.
2. Associate Professor, Mining and Metallurgical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 27 December 2018; Accepted: 6 May 2019

Corresponding author: aghorbani@yazd.ac.ir

Keywords

Miduk copper mine

Leakage

Tailings dam (wastewater)

Electrical resistivity tomography (ERT)

Self-potential

Extended Abstract

Summary

During wet mineral processes in mines, a large amount of wastewater is produced and stored in tailing dams. In Miduk copper mine, Shahr-e-Babak, Kerman, Iran, there are tailing dams and wastewater dams as a result of mineral processing. The wastewater dam normally is constructed in order to separate and to reserve the water content of tailings, and finally, to reuse it for mineral processing. In this study, we have used the geophysical methods (electrical resistivity tomography (ERT) and

self-potential (SP)) to investigate the seepage from the wastewater dam of the Miduk copper mine. The ERT surveys show a low electrical resistivity zone (less than 20 Ω m). It can be as a result of a clayey alteration zone or fractured zone. In addition, SP measurements show a positive anomaly in the same area due to the seepage from the dam walls. It can be due to an electrokinetic source origin. The observed natural source in the same zone, confirmed the geological, hydrogeological and geophysical interpretations. These results show the ability of ERT and SP methods to investigate the seepage zones related to wastewater dam walls.

Introduction

Mining like other industrial activities can affect the environment negatively. Tailing dams have long been associated with mining activities and have formed a major negative impact. Excessive seepage in the foundation of the dam threatens the integrity of the structure. Geophysics has been used intensively in environmental problems, in particular in the study of mine tailings problems. In fact, geophysical surveys especially electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods constitute a comprehensive methodology for assessment of anomalous seepage conditions by detecting, mapping and monitoring the zones.

Methodology and Approaches

The field survey to detect the seepage in Miduk wastewater dam was composed of a geophysical survey and a hydrogeological study. The hydrological study was performed in order to identify water table, surface water and groundwater quality, and to understand the relation between water collected in dam and water resources. Such a study is very common in environmental geochemical investigations. The ERT survey was carried out along 2 survey lines, called P1 and P2, using the dipole-dipole array with an electrode spacing of 20 m in the survey line P1 that has a total length of 400 m, however, the survey along the survey line P2 has been carried out using an electrode spacing of 5 m. The survey line P2 is 100 m long. A maximum n value of 11 was used for both P1 and P2 ERT profiles. All data were acquired by a WDDS-2 resistivity meter using multi-electrodes cable. The SP survey along SP1 and SP2 survey lines was carried out on the northeast abutment of the dam. The SP measurements were taken using two non-polarizing electrodes (Cu-CuSO₄), one electrode was located at the base station as a stationary electrode and the other moving along the desired line at pre-fixed stations. The base-station was chosen at a point convenient for operation but away from the expected anomaly. Electrodes polarization was controlled between measurements using two constant points in the site. In order to identify the water table, in a part of the hydrological study, water depth in 6 observation wells, located downstream of the water retention dam, was measured. In the second part of the hydrological study, hydrochemical investigation was carried out by taking 17 water samples collected from 15 stations. The hydrogeochemical characteristics of water were obtained through physicochemical analysis of the water samples.

Results and Conclusions

The ERT survey shows a low electrical resistivity zone (less than 20 Ω m). It can be the result of a clayey alteration zone or fractured zone. The SP measurements show a positive anomaly in the same area due to the seepage from the dam wall.

JRAG, 2019, Vol 5, No 2.

According to the hydrochemical study, the water type of this area is bicarbonate-chlorate while the water type of one borehole and the dam water sample are both sulfate-chlorate. The obtained information from the survey area confirms the geological, the hydrogeological and the geophysical interpretations
