

## استفاده از روش‌های ژئوالکتریک در بررسی وضعیت نشت آب از محدوده سد رسوب‌گیر معدن مس میدوک

سحر یحیی آبادی<sup>۱</sup>، احمد قربانی<sup>۲\*</sup>، عبدالحمید انصاری<sup>۲</sup> و الهام ساعی نیا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>۳</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۲)

### چکیده

با توجه به اثرات سوء زیست‌محیطی سدهای باطله و ناپایداری مکانیکی آن‌ها به دلیل فرسایش داخلی ناشی از نشت‌های احتمالی، دیدبانی عملکرد این سدها بسیار ضروری است و عاملی برای مدیریت بهتر فعالیت‌های معدنی به حساب می‌آید. در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت نشت آب از سد رسوب‌گیر معدن مس میدوک و شناسایی عامل نشت، از روش‌های ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا استفاده شده است. برداشت توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی بر روی ۳ پروفیل ۲۰۰ متری با فاصله الکترودی ۱۰ متر و ۱ پروفیل ۴۰۰ متری با فاصله الکترودی ۲۰ متر و برداشت پتانسیل خودزا با اندازه‌گیری ۲۰۸ نقطه بر روی ۷ پروفیل با فاصله الکترودی ۱۰ متر، در پایین‌دست سد رسوب‌گیر انجام گرفت. لازم به ذکر است به علت ساختار سنگی سد و پوشش تاج آن با مصالح سنگی درشت‌دانه، برداشت‌های ژئوفیزیکی بر روی تاج امکان‌پذیر نبود. نتایج برداشت توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی در پایین‌دست سد رسوب‌گیر، دو زون رسانا، یکی در یال شرقی و دیگری در یال اصلی سد رسوب‌گیر را نشان می‌دهد که بیانگر خردشدگی بستر سد در این محل‌هاست. در یال شرقی در حال حاضر، نشت از روی بستر سد قابل مشاهده است. پیش‌بینی می‌شود با افزایش سطح آب و رسوبات در پشت سد، نشت از بستر یال اصلی نیز اتفاق بیفتد. نتایج نشان می‌دهد عوامل زمین‌شناسی و وجود زون خرد شده در بستر سد، عامل اصلی نشت است. همچنین در نتایج برداشت پتانسیل خودزا، وجود آنومالی مثبت پتانسیل خودزا در پایین‌دست سد، دو مسیر نشت زیر سطحی را نشان می‌دهد که تأییدی بر نتایج توموگرافی است. انطباق نتایج حاصل از دو روش، نشان‌دهنده وجود نشت از بستر سد در یال شرقی و اصلی آن است. با افزایش سطح آب و رسوبات در پشت سد، امکان افزایش دبی نشت از زون‌های مشاهده شده و ایجاد مسیرهای جدید وجود دارد. این موضوع علاوه بر کاهش مقدار آب برگشتی به کارخانه فرآوری، مخاطرات زیست‌محیطی نیز در پی خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** پتانسیل خودزا، توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی، دیدبانی، سد رسوب‌گیر، معدن مس میدوک، نشت.

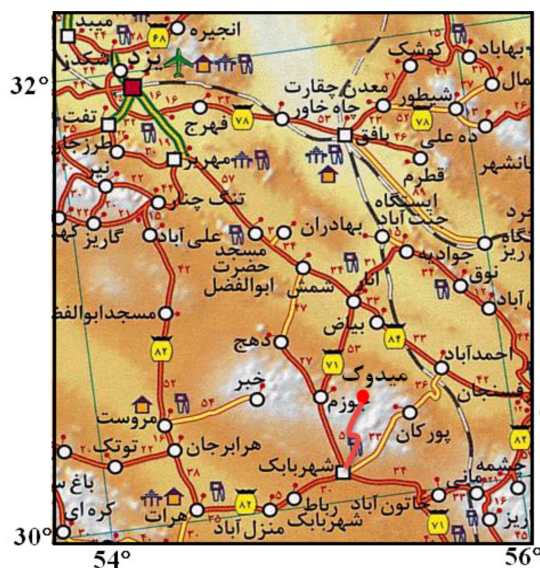
## ۱ مقدمه

استخراج از معادن مانند سایر فعالیت‌های صنعتی می‌تواند بر محیط‌زیست تأثیر منفی بگذارد. سدهای باطله در مقایسه با دیگر ساختارها در معادن آسیب‌پذیرتر بوده و تأثیرات منفی عمده‌ای ایجاد می‌کنند. این سدها به علت طبیعت ناپایدار، محل قرارگیری که اغلب نزدیک به اکوسیستم‌های حساس است و نبود نگه‌داری‌های لازم به‌خصوص بعد از پایان عمر معدن، تهدیدی مهم برای مالکین صنایع و محیط‌زیست به شمار می‌آیند (گرنجیا و همکاران، ۲۰۱۱). سدهای باطله مستعد ابتلا به نشست غیرعادی در هسته و پایه هستند که یک کاتالیزور برای فرسایش داخلی سد است و می‌تواند منجر به فروپاشی آن شود (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۵). شناسایی فرسایش داخلی آسان نیست، اما با توجه به اینکه در اثر فرسایش داخلی و نشست آب از سد، خواص فیزیکی مواد تغییر می‌کند، ژئوفیزیک قادر به آشکارسازی فرسایش داخلی و نشست‌های بی‌هنجار در مراحل اولیه شکل‌گیری آن‌ها است (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴). توانایی روش‌های ژئوالکتریکی توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی (ERT) و پتانسیل خودزا (SP)، در شناسایی مسیرهای جریان ترجیحی در ارتباط با مکانیسم‌های فرسایش داخلی سدهای باطله، در مطالعات انجام‌گرفته اثبات شده است (تلفورد و همکاران، ۱۹۸۹).

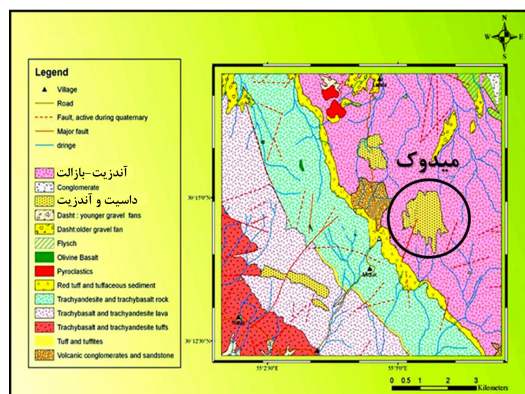
آلسی و همکاران (۱۹۹۴) از روش پتانسیل خودزا برای تشخیص نشست آب در سدها، استفاده و توانایی این روش را در مکان‌یابی مناطق نشست و تعیین شدت نسبی تخلیه (دشارژ) اثبات کردند. پاتولو و همکارانش (۲۰۰۱) به‌منظور شناسایی مسیرهای نشست در سدهای خاکی، روش‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا را به کار بردند و نشان دادند روش ERT در شناسایی مناطق مساعد برای نشست و روش SP در ترسیم مسیرهای نشست نتایج بسیار خوبی به دست می‌دهد. نتایج

کار وانهاالا و همکارانش (۲۰۰۵) در توصیف ژئوفیزیکی آبگیر سد باطله معدن سرب و روی شرق فنلاند، نشان داد نتایج حاصل از مقاومت‌ویژه الکتریکی در این نواحی در مقایسه با خاک و رسوبات طبیعی مقدار کمتری را به خود اختصاص داده است و استفاده از رسانندگی الکتریکی که عکس مقاومت‌ویژه است، نه تنها برای تعیین ضخامت بستر سد باطله و محتوی رطوبت و سطح ایستایی در آبگیر، بلکه در تعیین ترکیب شیمیایی سد باطله نیز اطلاعاتی به دست می‌دهد. مینلی (۲۰۰۶) از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا برای شناسایی نشست غیرعادی در یک سد باطله و دیدبانی شرایط فیزیکی سد در زمان‌های مختلف استفاده کرد و قابلیت این روش‌ها را در بررسی تغییرات زمانی شرایط سد باطله نشان داد. اگیلوی و همکارانش (۲۰۰۹) نشان دادند شناسایی و ردیابی آلودگی آب ناشی از سایت‌های معادن متروکه (دپوها و سد باطله) با استفاده از روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی امکان‌پذیر است. مور و همکارانش (۲۰۱۱) از روش‌های پتانسیل خودزا و مقاومت‌ویژه الکتریکی به منظور بررسی ساختار داخلی و وضعیت نشست یک سد یخی در کالیفرنیا استفاده کردند و جهت جریان نشست را تعیین کردند و پس از تجزیه و تحلیل ترکیبی داده‌ها به این نتیجه رسیدند که فرسایش حاصل از نشست، سد یخی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. آیکارد و همکارانش (۲۰۱۴) با استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی پتانسیل خودزا و توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی، وضعیت نشست یک سد خاکی در ایالت کلرادو را بررسی کرده و سه منطقه نشست غیر عادی درون سد باطله را تعیین و منبع ترشحات نشست را مشخص کردند. به علاوه، آیکارد و همکارانش (۲۰۱۵) جهت بررسی ارتباط هیدرولیکی بین مخزن و منطقه نشست پایین‌دست یک سد خاکی واقع در دامنه کوه‌های راکی کلرادو نیز از این دو روش ژئوالکتریکی استفاده

آن گردیده است. منطقه سد باطله نیز از دایک های آندزیتی بازالتی تشکیل شده است (واحد زمین شناسی و اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۷۰). شکل ۲ نقشه زمین شناسی شهر بابک و موقعیت کانسار مس میدوک را بر روی آن نشان می دهد.



شکل ۱. نقشه راه های دسترسی معدن مس میدوک.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی شهر بابک با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و موقعیت کانسار مس میدوک بر روی آن (واحد زمین شناسی و اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۷).

### ۳ مطالعات هیدروشیمی منطقه

به منظور مطالعات هیدروژئولوژی در محدوده سد رسوب گیر معدن مس میدوک، تعیین پارامترهای کیفی

کردند. در این مطالعه توپوگرافی سطح سنگ بستر به وسیله داده های توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و الگوی ویژگی های جریان آب با داده های پتانسیل خودزا ترسیم شد و با تفسیر نتایج، وضعیت این سد خاکی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت.

بر این اساس در این پژوهش نیز به منظور بررسی وضعیت نشت آب از سد رسوب گیر معدن مس میدوک، از روش های ژئوالکتریک توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا استفاده شده است. با توجه به این که نشت می تواند هم در نتیجه تأثیرات زمین شناسی و گسل خوردگی و هم در اثر نفوذپذیری خود سد از غیر از محل زهکش آن اتفاق افتاده باشد، هدف اصلی این پژوهش، تعیین عامل نشت و نیز بررسی ارتباط هیدرولیکی بین آب موجود در مخزن سد رسوب گیر و منابع آبی پایین دست سد است.

### ۲ مطالعات جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

معدن مس میدوک در ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهر بابک 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 است و سیمای ظاهری آن در اغلب نقاط شامل تپه ماهورهای نسبتاً مدوری است که با شیب ملایم به دره های کم عمق منتهی می گردد (واحد زمین شناسی و اکتشافات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۷۰). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی کانسار میدوک و نقشه راه های دسترسی به منطقه را نشان می دهد.

از نظر زمین شناسی، کانسار مس میدوک در کمربند فلززایی - متالورژی کرمان در زون ارومیه - دختر واقع شده و سنگ های سطحی منطقه تماماً از جنس آندزیت است که بالا آمدن توده گرانودیوریتی سبب برآمده شدن

الکتریکی، با اندازه‌گیری بر روی سطح زمین، به کار می‌رود. در همه برداشت‌های ژئوفیزیکی، 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 (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). در واقع در این روش تصویرهای دو یا سه‌بعدی از تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی تولید می‌شود که شناخت کامل تری از لایه‌ها و ساختارهای زیرسطحی به دنبال دارد (راکر و همکاران، ۲۰۰۹). تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در مقطع، مرتبط با تغییرات زمین‌شناسی و سیالات موجود در منافذ و شکستگی‌های زیرسطحی است. معمولاً روش توموگرافی دو بعدی در مقایسه با توموگرافی سه‌بعدی به دلیل سرعت برداشت زیاد و عملیات صحرائی راحت‌تر، کاربرد وسیع‌تری دارد (لپنا و همکاران، ۲۰۰۵).

در این روش معمولاً تعدادی الکتروود فلزی با فواصل مساوی بر روی یک خط قرار می‌گیرند. در هر قرائت دو الکتروود برای تزریق جریان و دو الکتروود برای اندازه‌گیری پتانسیل انتخاب می‌شود که با افزایش فاصله بین الکتروودها، بررسی‌های عمیق‌تر ممکن می‌شود. عمق بررسی به آرایه الکتروودی ارتباط دارد؛ آرایه‌های الکتروودی بر اساس هدف کاوش و حساسیت لازم افقی و یا قائم انتخاب می‌شوند (لوک، ۲۰۰۱). از میان تمام آرایه‌ها، آرایه‌های ونر، شولمبرگر و دوقطبی-دوقطبی بیشترین کاربرد را دارند (ورکما و همکاران، ۲۰۰۰).

در تفسیر کیفی داده‌های برداشت‌شده، شبه‌مقاطع مقاومت ویژه ظاهری تهیه می‌گردد. شبه‌مقطع از کنار هم قراردادن مقاومت ویژه‌های ظاهری به دست می‌آید. مقاومت ویژه ظاهری نیز از حاصل ضرب مقاومت ویژه الکتریکی در فاکتور هندسی آرایه الکتروودی محاسبه می‌شود (لوک، ۲۰۰۱). مرحله نهایی در تفسیر داده‌های

آب و نیز بررسی آلودگی احتمالی در منابع پایین دست رسوب‌گیر، از منابع آبی منطقه (شامل چشمه‌ها، آب‌های سطحی و آب‌های عمقی) نمونه‌برداری به عمل آمد و در مجموع ۲۴ نمونه از ۲۲ ایستگاه جمع‌آوری گردید. این نمونه‌ها مطابق استانداردهای هیدروشیمی تهیه و نگهداری و آنالیز شد. مقادیر اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (Conductivity) و غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی موجود در آب در آنالیز شیمیایی نمونه‌ها تعیین گردید. پس از آن نتایج آنالیز صحت‌سنجی شد و مقدار خطای آنالیز کمتر از ۵ درصد به دست آمد. به عنوان مثال، نتایج آنالیز نمونه‌های مربوط به محل‌های نشت مستقیم از سد رسوب‌گیر و چشمه‌های روبه‌روی سد که ارتباط بیشتری با موضوع بحث حاضر دارند، در جدول ۱ آورده شده است. چنانچه مشخص است در تمام نمونه‌ها غلظت یون سولفات بسیار زیاد است؛ بررسی‌های تکمیلی‌تر نشان داد تمام نمونه‌های آب برداشت‌شده در اطراف سد باطله معدن دارای تیپ سولفات هستند.

به منظور ارزیابی بهتر نتایج آنالیز و پردازش مکانی پارامترهای شیمیایی در محدوده مورد مطالعه، اقدام به رسم نقشه‌های هم‌میزان و مطالعات گرافیکی بر روی نمونه‌ها گردید. با توجه به نتایج تفسیرها، کیفیت نمونه‌های آب برداشت‌شده از محل‌های نشت مستقیم از سد رسوب‌گیر، بسیار نزدیک و شبیه به کیفیت آب موجود در چشمه‌های روبه‌روی سد است؛ در جدول ۱ نیز با مقایسه نتایج آنالیز نمونه‌ها، این مسئله قابل تشخیص است. این موضوع وجود نشت از سد رسوب‌گیر به سمت چشمه‌ها و ورود آن به منابع آب زیرزمینی منطقه پایین دست را تأیید می‌کند.

#### ۴ روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی یک روش ژئوفیزیکی است که برای تعیین توزیع زیرسطحی مقاومت ویژه



جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی تعدادی از نمونه‌های آب منطقه سد رسوب‌گیر معدن مس میدوک (S1 و S2 مربوط به چشمه‌های روبه‌روی سد رسوب‌گیر و S3 و S4 مربوط به محل‌های نشت مستقیم از سد هستند. موقعیت این نمونه‌ها به صورت نمادهای مثلثی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است).

MEASURING UNIT		$\mu\text{s/cm}$	ppm	ppm	ppm	ppm	Ppm	Ppm	Ppm
SAMPLE NAME	pH	Conductivity	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$
S1	۷/۶	۱۸۷۱	۳۰۱	۵۱/۳	۹۱۴	۱۴۰	۴۰	۶۲/۳	۷/۷
S2	۷/۷	۱۹۴۲	۳۰۷	۵۶/۰	۹۲۰	۱۴۰	۴۰	۶۲/۴	۷/۷
S3	۷/۵	۲۰۵۳	۳۱۸	۶۳/۰	۱۰۲۴	۱۳۰	۵۰	۶۱/۱	۷/۷
S4	۷/۵	۲۰۶۲	۳۲۴	۵۸/۰	۱۰۲۶	۱۳۰	۵۰	۶۱/۱	۷/۷

وضعیت آب‌های زیرزمینی دارد (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴)، بنابراین در این پژوهش به عنوان اولین روش در بررسی وضعیت سد رسوب‌گیر به کار گرفته شده است.

#### ۴-۱ عملیات صحرائی و برداشت داده‌های ERT

برداشت داده‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی با استفاده از دستگاه ژئوالکتریک WDDS-2 با قدرت ۳۵۰۰ وات و کابل هوشمند جهت برداشت نیمه‌اتوماتیک مقاومت‌ویژه الکتریکی، در محدوده سد رسوب‌گیر معدن مس میدوک انجام گرفت. بر اساس بازدید صحرائی از منطقه اطراف سد و مشاهده مناطق نشت احتمالی مانند چشمه‌ها، دره‌های عمیق تری که سازندها را قطع کرده‌اند و ... راستای پروفیل‌ها انتخاب گردید. بر این اساس پروفیل‌ها به موازات یال شرقی و اصلی سد رسوب‌گیر و نیز عمود بر یال شرقی انتخاب شدند. بدین ترتیب داده‌ها با استفاده از آرایه دوقطبی-دوقطبی در طول سه پروفیل ۲۰۰ متری با فواصل الکترودی ۱۰ متر و یک پروفیل ۴۰۰ متری با فاصله الکترودی ۲۰ متر و  $\Pi$  از ۱ تا ماکزیمم ۱۲ برداشت شد. همه حالات مختلف از چهار الکتروود انتخابی در آرایه، یک سکانس اندازه‌گیری را تشکیل می‌دهد و منظور از  $\Pi$  تعداد سکانس‌های اندازه‌گیری است. دلیل انتخاب فاصله الکترودی بالا در پروفیل ۴۰۰ متری، نفوذ به عمق بیشتر و بررسی روند تغییرات در لایه‌های زیرسطحی بوده است. اما سه پروفیل دیگر به دلیل نزدیک بودن به محل‌های نشت و اهمیت بیشتر، به منظور

مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی، وارون‌سازی است. به منظور تهیه تصویر از توزیع مقاومت‌ویژه واقعی زیرسطحی باید به وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی پرداخت. از میان نرم‌افزارهای وارون‌سازی، Res2Dinv کاربرد زیادی یافته است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۳). در مجموع، روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی کاربرد گسترده‌ای در مطالعات هیدروژئوفیزیک، مطالعات زیست‌محیطی و بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی دارد (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴)، بنابراین در این پژوهش به عنوان اولین روش در بررسی وضعیت سد رسوب‌گیر به کار گرفته شده است.

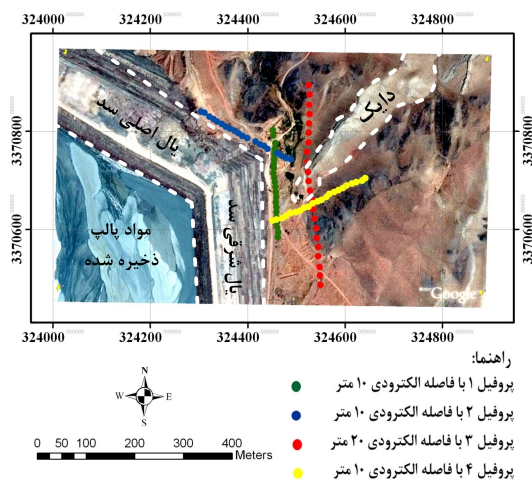
در تفسیر کیفی داده‌های برداشت‌شده، شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه ظاهری تهیه می‌گردد. شبه‌مقطع از کنار هم قراردادن مقاومت‌ویژه‌های ظاهری به دست می‌آید. مقاومت‌ویژه ظاهری نیز از حاصل ضرب مقاومت‌ویژه الکتریکی در فاکتور هندسی آرایه الکترودی محاسبه می‌شود (لوک، ۲۰۰۱). مرحله نهایی در تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی، وارون‌سازی است. به منظور تهیه تصویر از توزیع مقاومت‌ویژه واقعی زیرسطحی باید به وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی پرداخت. از میان نرم‌افزارهای وارون‌سازی، Res2Dinv کاربرد زیادی یافته است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۳). در مجموع، روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی کاربرد گسترده‌ای در مطالعات هیدروژئوفیزیک، مطالعات زیست‌محیطی و بررسی

حداقل می‌گردد (کمترین مربعات خطا). در واقع روش وارون‌سازی حداقل مربعات سعی در مینیم کردن مربع اختلاف بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده و اندازه‌گیری شده دارد. در این فرآیند تکراری، مدل اولیه معمولاً نیم‌فضای هموزن است و مدل نهایی معمولاً در کمتر از ۵ تکرار به دست می‌آید. در نهایت مقطع مقاومت ویژه واقعی، وضعیت ناهمگن مقاومت ویژه زیرسطحی را نشان می‌دهد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۳). عملیات مدل‌سازی معکوس تغییرات پارامترهای مدل را با حل رابطه ۱ مشخص می‌کند (لوک، ۲۰۰۱):

$$(J^T J + uF) d = J^T g \quad (1)$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T,$$

که  $J$  ماتریس مشتقات جزئی،  $u$  فاکتور رطوبت،  $d$  بردار جابه‌جایی مدل،  $g$  بردار اختلافات،  $f_x$  فیلتر هموارسازی افقی و  $f_z$  فیلتر هموارسازی عمودی است.



شکل ۳. موقعیت پروفیل‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به یکدیگر و نسبت به محل قرارگیری سد رسوب‌گیر بر روی تصویر گوگل ارث (به جز موارد مشخص شده بر روی شکل، تمام محدوده از جنس آندزیت است؛ رنگ‌های تیره‌تر آندزیت متخلخل‌تر را نشان می‌دهند).

بدین ترتیب برای هر پروفیل دو شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری و یک مدل بلوکی مقاومت ویژه الکتریکی

کسب جزئیات دقیقی در نقاط نزدیک‌تر به سطح زمین، با فاصله الکترودی ۱۰ متر برداشت شدند. طول کل پروفیل‌های برداشت شده در مجموع یک کیلومتر است. این پروفیل‌ها با نام‌های P1 تا P4 مشخص شده‌اند و مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۳ نیز موقعیت چهار پروفیل برداشت شده را نسبت به هم و نسبت به محل قرارگیری سد رسوب‌گیر نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات پروفیل‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و ایستگاه‌های برداشت.

نام ایستگاه‌ها	امتداد پروفیل	فاصله الکترودی (متر)	طول پروفیل (متر)	تعداد ایستگاه‌ها
P1	N-S	۱۰	۲۰۰	۲۱
P2	NW-SE	۱۰	۲۰۰	۲۲
P3	N-S	۲۰	۴۰۰	۲۲
P4	NE-SW	۱۰	۲۰۰	۲۲

#### ۲-۴ تفسیر داده‌های توموگرافی الکتریکی

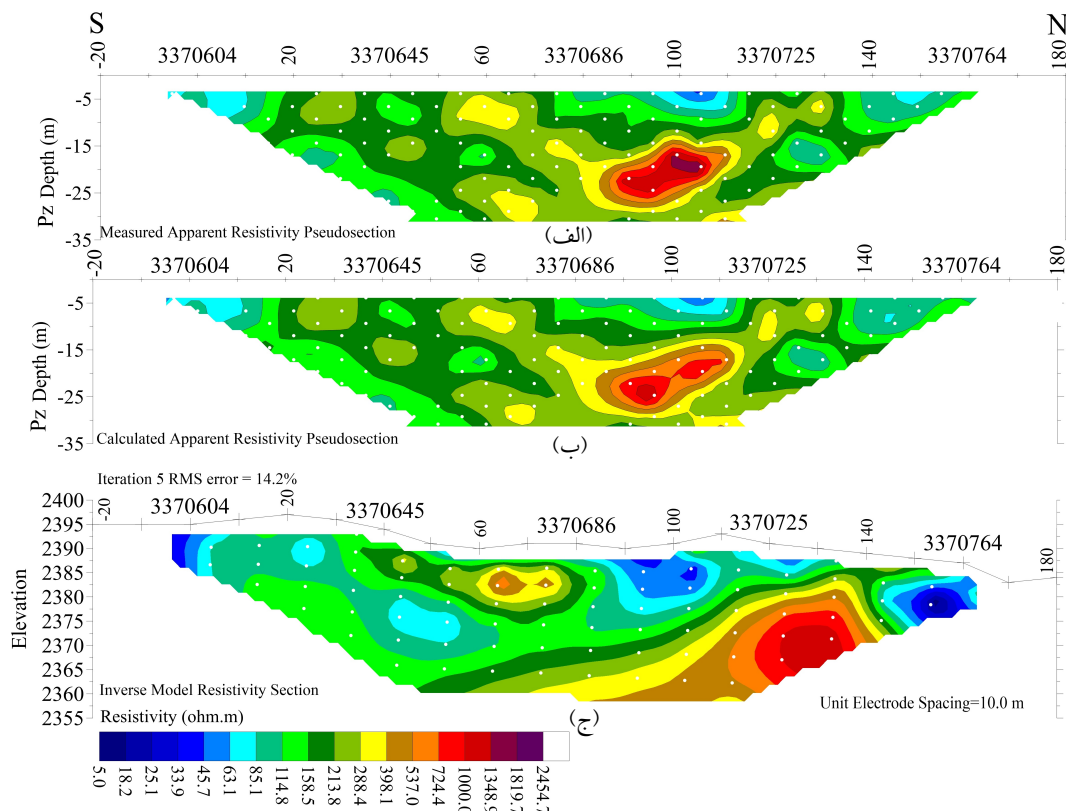
پس از آماده‌سازی داده‌ها و حذف داده‌های پرت و غیرمتعارف، کلیه داده‌های خام مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده، به منظور ترسیم اولیه شبه‌مقاطع مقاومت ویژه، وارد نرم‌افزار Res2Dinv شد. در این نرم‌افزار به منظور تفسیر کمی داده‌ها، از عملیات مدل‌سازی معکوس با روش کمترین مربعات خطا استفاده شد. در فرآیند وارون‌سازی، به دنبال مدل ریاضی هستیم، به طوری که مقاومت ویژه‌های ظاهری محاسبه شده از مدل و اندازه‌گیری شده کمترین اختلاف را داشته باشند. هسته اصلی برنامه وارون‌سازی مدل مستقیم است. مدل‌سازی مستقیم ارتباط ریاضی بین پارامترها و پاسخ مدل (مقاومت ویژه ظاهری) است. برای حل مدل مستقیم از روش‌های عددی تفاضل محدود یا اجزای محدود استفاده می‌شود. مدل مستقیم در یک فرآیند تکراری قرار می‌گیرد که طی آن ریشه مربعات اختلاف داده‌ها و مدل

مقاومت ویژه به دو دسته آندزیت مقاوم با مقاومت ویژه بیشتر از ۶۰۰ اهم متر و آندزیت کمتر مقاوم با مقاومت ویژه کمتر از ۶۰۰ اهم متر تقسیم می شود. زون های با مقاومت ویژه کم می توانند با فرآیند آلتزه شدن، خردشدگی یا وجود آب در ارتباط باشند. در واقع با توجه به مشاهدات صحرائی می توان گفت آندزیت مقاوم به آندزیت بکر و آندزیت کمتر مقاوم به آندزیت آلتزه شده نزدیک است.

پروفیل PI (شکل ۵-الف) به موازات یال شرقی سد رسوب گیر برداشت شده است. چنانچه گفته شد از نظر زمین شناسی در کل منطقه آندزیت وجود دارد، بر این اساس در این مقطع یک زون آندزیت مقاوم و یک زون آندزیت کمتر مقاوم تشخیص داده شده است. حفاصل

به دست آمده از مدل سازی معکوس، ترسیم گردید. به منظور کاهش خطای مدل سازی، مقادیر داده های پرت در هر چهار پروفیل، حذف شد و عمل مدل سازی معکوس مجدداً انجام گرفت و به این ترتیب مقدار خطای مدل سازی به مقدار قابل قبولی کاهش یافت. به عنوان نمونه، در شکل ۴ شبه مقاطع نهایی تولید شده توسط نرم افزار برای پروفیل PI نمایش داده شده است. پس از ترسیم شبه مقاطع و اعمال اثر توپوگرافی بر روی مقاطع مدل سازی شده، تفسیر پروفیل ها انجام گرفت؛ در ادامه نتایج حاصل از آن ها آورده شده است.

لازم به ذکر است از نظر زمین شناسی کلی منطقه، از سطح به عمق آندزیت وجود دارد که بخشی از آن ها توسط دایک ها قطع شده اند. این آندزیت بر اساس مقدار



شکل ۴. شبه مقاطع و مقطع مدل سازی شده پروفیل PI در راستای شمالی جنوبی با فاصله الکترودی ۱۰ متر. (الف) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهداتی؛ (ب) شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسباتی؛ (ج) مقطع مقاومت ویژه الکتریکی (از هر دو مختصات یوتی ام و محلی در شکل استفاده شده است. نقاط سفید رنگ موجود در شبه مقاطع شکل نیز نقاط برداشت هستند).

یک زون آندزیت مقاوم و یک زون آندزیت کمتر مقاوم تشخیص داده شده است. ابتدای این پروفیل زونی مرطوب با مقاومت ویژه کم نمایان شده که بر اساس مشاهدات صحرایی می‌تواند به علت درختکاری و آبیاری درختان در این ناحیه باشد. در محدوده بین الکترودهای ۱۴۰ تا ۲۰۰ مجدداً همان دایک عمیق موجود در پروفیل P1 ظاهر شده که بر اساس پیمایش‌های زمین‌شناسی تشخیص داده شده است. در تصاویر ماهواره‌ای نیز وجود آن با همین مشخصات و به صورت خطواره‌ای با رنگ روشن‌تر و ظاهری برآمده‌تر از محدوده اطراف قابل مشاهده است. بین الکترودهای ۲۶۰ تا ۳۲۰ زون سطحی خشک و مقاوم است، در صورتی که مقادیر مقاومت ویژه در عمق، در رنج مقاومت ویژه زون آبدار، یعنی حدود ۳۰ اهم‌متر قرار دارد. در این ناحیه افتادگی زمین‌شناسی نیز قابل مشاهده است. این زون ممکن است دربرگیرنده آندزیتی باشد که در اثر گسل خوردگی خرد شده است و از این رو آب قابلیت نفوذ بیشتری درون آن یافته و باعث کم‌شدن مقاومت ویژه آن تا حدود ۳۰ اهم‌متر گردیده است. به علاوه، ممکن است سطح ایستابی واقعی منطقه بر روی این زون قرار گرفته باشد و از آنجا که این زون خردشده بوده و زیر سطح ایستابی واقع شده است، مقاومت ویژه پایینی را نشان می‌دهد. در نهایت، این زون، به عنوان یک زون خردشده و آبدار تفسیر شده است.

پروفیل P4 (شکل ۵-د) تقریباً عمود بر یال شرقی سد رسوب‌گیر و پروفیل‌های P1 و P3 برداشت شده است. این مقطع در محدوده بین الکترودهای ۲۰ تا ۸۰، یک زون خردشده سطحی آبدار را نشان می‌دهد. با توجه به چشمه مشاهده شده در نزدیکی پروفیل برداشت شده، حضور این زون مورد انتظار است. بر اساس زمین‌شناسی غالب منطقه که آندزیت است، به نظر می‌رسد محدوده مورد مطالعه کاملاً سخت، محکم و ناتراوا است که در بعضی نواحی به صورت موضعی خرد و از آب پر شده است. بنابراین

۱۰۰ الکترودهای ۱۰ تا ۳۰ نیز دایکی با مقاومت ویژه حدود ۱۵۰ اهم‌متر ظاهر شده است که تصاویر ماهواره‌ای نیز وجود آن را تأیید می‌کند. انتهای مقطع در نزدیکی دره و زمین کشاورزی واقع شده است که چون زمین آن دست‌خورده و آبدار بوده، به صورت زونی با مقاومت ویژه پایین ظاهر شده است. در محدوده بین دو الکتروده ۹۰ و نیز زونی آبی‌رنگ با مقاومت ویژه کم با گسترش طولی و عمق تقریبی ۱۰ متر وجود دارد که می‌تواند حاکی از حضور آب باشد. بر اساس مشاهدات صحرایی، این محدوده منطبق بر محل نشست سد رسوب‌گیر است که چون با آب در تماس است، مقاومت ویژه کمی دارد و در مقطع به وضوح دیده می‌شود. با توجه به وجود نشست در سطح و پایین‌رفتن این زون به صورت قائم، احتمالاً در این محل یک زون گسله یا خردشده وجود دارد. در نتیجه احتمالاً ساختار سد عامل نشست نیست، بلکه عوامل زمین‌شناسی و وجود زون خردشده در زیر سد عامل نشست می‌باشد.

پروفیل P2 (شکل ۵-ب) به موازات یال اصلی سد رسوب‌گیر است. با توجه به اینکه این پروفیل در ادامه پروفیل P1 است، بنابراین باید انتهای پروفیل P1 و ابتدای پروفیل P2 شبیه به هم باشند. با توجه به شکل ۵ نواحی مورد نظر کاملاً با یکدیگر هم‌خوانی دارند. محدوده مورد مطالعه در این مقطع کاملاً از جنس آندزیت بوده و هر دو نوع آندزیت مقاوم و کمتر مقاوم در آن مشاهده می‌شود. بین الکترودهای ۱۵۰ تا ۱۸۰، زونی با رنج مقاومت ویژه آب ظاهر شده است. در تصاویر ماهواره‌ای نیز در این بخش خردشدگی و ریزش وجود دارد که می‌تواند مرتبط با یک شکستگی باشد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود با افزایش سطح آب و رسوبات در پشت سد، نشست در این قسمت نیز اتفاق بیفتد.

پروفیل P3 (شکل ۵-ج) به موازات پروفیل P1 و یال شرقی سد رسوب‌گیر برداشت شده است. در این مقطع نیز

طبیعی دارد (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴). خطوط برداشت در این روش نیز مانند دیگر روش های ژئوفیزیکی، عمود بر امتداد هدف های مورد نظر یا ساختارهای زمین شناسی انتخاب می شود. به دلیل تغییرات SP با توپوگرافی منطقه مورد بررسی، بهتر است تا حد امکان از خط برداشت با تغییرات ارتفاعی کم استفاده شود (نوروزی، ۱۳۹۲). فاصله ایستگاه ها نیز معمولاً بین ۳۰-۳ متر در نظر گرفته می شود (تلفورد و همکاران، ۲۰۰۴).

در مطالعات SP به طور معمول دو پارامتر را اندازه گیری می کنند که نیازمند دو آرایش الکترودی متفاوت است؛ یکی گرادیان پتانسیل و دیگری شدت یا دامنه پتانسیل. پارامتر دامنه پتانسیل که در این پژوهش اندازه گیری شده است، با در نظر گرفتن یکی از الکترودها به طور ثابت در نقطه ای خارج از محدوده بی هنجاری احتمالی SP و جابه جایی الکتروود دیگر در محدوده اکتشافی، بر حسب میلی ولت اندازه گیری می شود (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش از این روش به منظور تعیین و به نقشه درآوردن مسیر نشت از سد رسوب گیر استفاده شده است.

**۵-۱ عملیات صحرائی و برداشت داده های SP**  
برداشت داده های پتانسیل خودزا در آذر ماه ۱۳۹۴ طی سه روز عملیات صحرائی با استفاده از یک جفت الکتروود غیرپلاریزه مس-سولفات مس، کابل و ولت متری با دقت ۰/۱ میلی ولت انجام گرفت. به منظور عملیات برداشت، ۷ پروفیل به فاصله حدوداً ۱۰ متر از یکدیگر و با فاصله ایستگاهی ۱۰ متر، به موازات دیواره سد رسوب گیر در راستای عمود بر امتداد احتمالی آنومالی پتانسیل خودزا، در نظر گرفته شد. برای اینکه برداشت SP کل محدوده بین سد رسوب گیر تا چشمه روبه روی آن را پوشش دهد، محل اولین پروفیل در کنار دیواره سد و محل آخرین پروفیل بعد از چشمه انتخاب شد. جهت برداشت داده ها،

می توان گفت زون های آبدار موجود در منطقه، شکستگی های کوچکی هستند که با آب پر شده اند. با توجه به اطلاعات زمین شناسی، غیر از این زون آبدار، سراسر این مقطع آندزیت کمتر مقاوم را نشان می دهد. رخنمون های زمین شناسی نیز آلتزه بودن را تأیید می کنند.

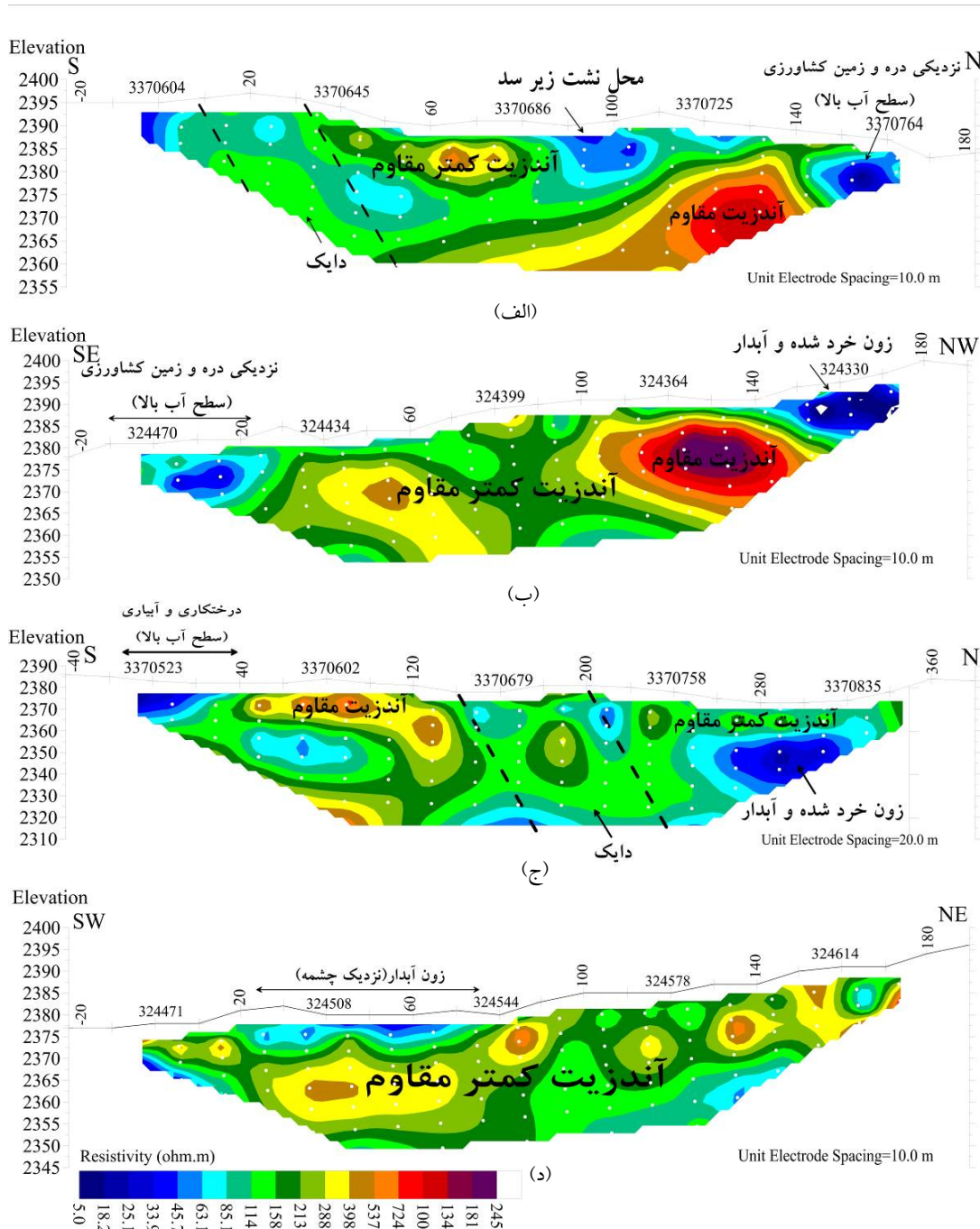
## ۵ روش پتانسیل خودزا

در مطالعات ژئوفیزیکی مرتبط با تراوش از سدها، روش پتانسیل خودزا به طور طبیعی یک روش مکمل برای توپوگرافی مقاومت ویژه الکتربیکی محسوب می شود (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴). این روش همان طور که از نام آن پیدا است، بر اساس اندازه گیری اختلاف پتانسیل طبیعی ایجاد شده از واکنش های شیمیایی داخل زمین پایه ریزی شده است (عبدالرحمان و العربی، ۱۹۹۷). مقدار پتانسیل خودزای ایجاد شده معمولاً از کمتر از یک میلی ولت تا صدها میلی ولت متغیر است (مارتی و هاریچاران، ۱۹۸۵). این روش یک تکنیک ژئوفیزیکی است که مستقیماً به جریان آب زیرزمینی حساس است. در واقع جریان آب در زمین باعث ایجاد پتانسیل های خودزا می شود و به همین دلیل، روش SP در مطالعات هیدروژئولوژیکی مورد توجه فراوان قرار دارد (آیکارد و همکاران، ۲۰۱۴). مثال های زیادی از کاربرد اندازه گیری های SP در مسائل مرتبط با هیدروژئولوژی وجود دارد که از جمله آن ها می توان به بررسی نشت آب در محل سدها، به نقشه درآوردن جریان نشت مربوطه، تراوش آب های زیرزمینی شیرین از گراول های کوارتزی و مطالعه حرکت آب های یاد کرد (رینولدز، ۲۰۰۰).

یکی از ویژگی های روش SP اجرای ساده و کم هزینه بودن آن در مقایسه با دیگر روش های ژئوفیزیکی است (نوروزی، ۱۳۹۲)؛ چرا که برداشت SP تنها نیاز به یک ولت متر با امپدانس داخلی بالا ( $> 10 \text{ M}\Omega$ )، یک حلقه کابل و دو الکتروود غیرپلاریزه برای اندازه گیری ولتاژهای

ایستگاه مینا و سایر ایستگاه‌های برداشت در شکل ۶ نشان داده شده است.

روش دامنه پتانسیل انتخاب و یک ایستگاه مینا در محل خارج از بی‌هنجاری احتمالی در نظر گرفته شد. محل



شکل ۵. مقاطع نهایی مدل‌سازی شده پروفیل‌ها با توجه به تغییرات ارتفاعی هر پروفیل؛ (الف) پروفیل P1، (ب) پروفیل P2، (ج) پروفیل P3، (د) پروفیل P4 (به منظور راحتی در مقایسه نتایج با نتایج پتانسیل خودزا، از هر دو مختصات محلی (اعدادی مانند ۲۰ و -۲۰ که موقعیت الکترودها را بر اساس فاصله الکترودی نمایش می‌دهند) و یو تی ام (اعدادی مانند ۳۳۷۰۶۰۴ که در سیستم WGS 98 تعیین شده‌اند) استفاده شده است. دایک‌های مشخص شده در مقاطع بر اساس پیمایش‌های زمین‌شناسی و تصاویر گوگل ارث تشخیص داده شده است. راهنمای رنگی نیز با تفکیک لگاریتمی برای همه مقاطع یکسان تهیه شده است).



## ۵-۲ تفسیر داده‌های SP

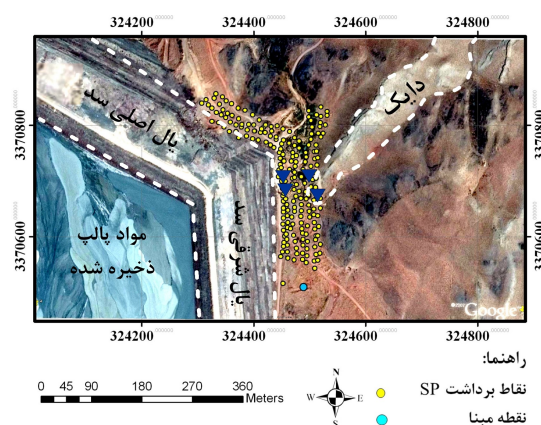
تعداد ۲۰۸ داده پتانسیل خودزا برداشت شد و با استفاده از نرم‌افزار Geosoft نقشه هم پتانسیل آن‌ها ترسیم گردید (شکل ۷-الف). چنانچه ملاحظه می‌شود، مقادیر SP برداشت شده از ۱۲- تا ۲۳+ میلی‌ولت متغیر هستند. این مقادیر به اختلاف هد هیدرولیکی ارتباط پیدا می‌کنند. رنگ‌های قرمز و یاسی، مقادیر آنومالی مثبت SP و به عبارتی محل خروج آب و وجود نشت را نشان می‌دهند. با توجه به این مقادیر، دو مسیر جریان به وضوح در نقشه SP تشخیص داده شده است. به منظور بررسی هم‌خوانی یا عدم هم‌خوانی این مسیرهای جریان با شرایط و زمین‌شناسی منطقه، نقشه هم‌پتانسیل حاصل بر روی نرم‌افزار گوگل ارث جانمایی گردید (شکل ۷-ب).

چیزی شبیه مسیر جریان در گوشه سمت چپ بالای نقشه نیز نمایان شده که منطبق بر محلی است که در پروفیل P2 توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، به صورت زون آبدار مشاهده شد و پیش‌بینی شد با افزایش سطح آب و رسوبات در پشت سد رسوب گیر، نشت سطحی در این نقطه نیز اتفاق خواهد افتاد. با توجه به شکل ۷، نتایج حاصل از برداشت SP نیز این مسأله را تأیید می‌کند.

با توجه به تشابه نتایج آنالیزهای هیدروشیمی نمونه‌های آب برداشت شده از محل‌های نشت مستقیم از سد و چشمه‌های روبه‌روی سد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که احتمالاً منشأ تغییرات SP در تغییرات الکتروشیمیایی سیال و محیط آن کمتر اهمیت دارد و تغییرات SP بیشتر مرتبط با پتانسیل الکتروسیستیک و به عبارتی اختلاف ارتفاع آب در پشت سد و پایین‌دست سد است. وجود آنومالی مثبت SP در خروجی آب (پایین‌دست سد) می‌تواند معرف این امر باشد (برای مثال آیکارد و همکارانش، ۲۰۱۵).

## ۶ بحث

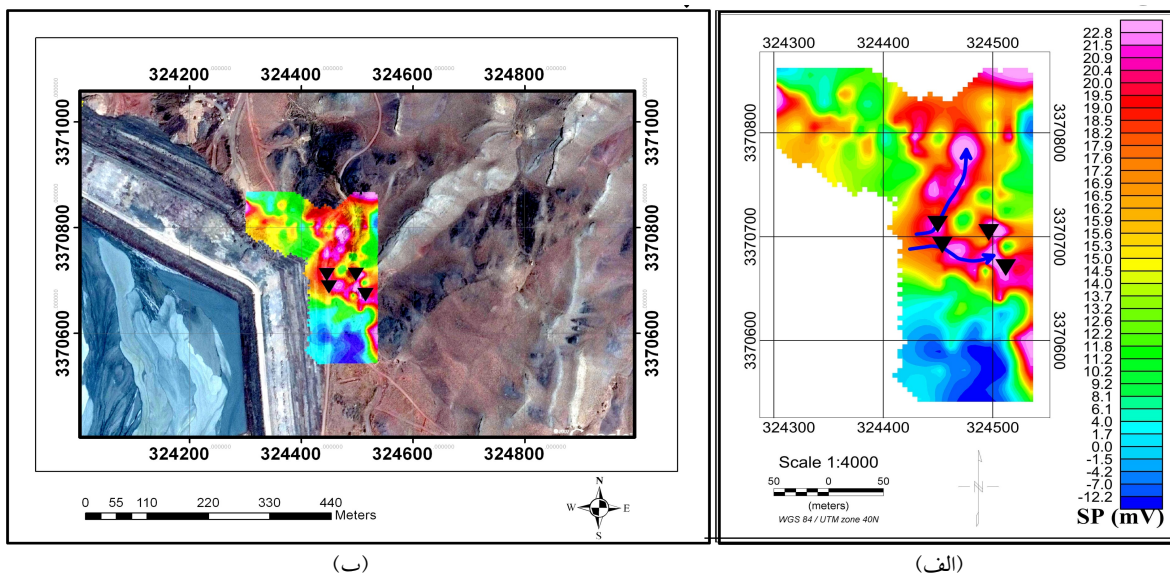
به منظور تشخیص هم‌خوانی یا عدم هم‌خوانی مسیرهای جریان نشان داده‌شده در نقشه SP با محل‌های دارای مقاومت ویژه کم و به عبارتی زون‌های آبدار در مقاطع توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، نتایج SP و ERT با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۸ موقعیت پروفیل‌های برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی را نسبت به نقشه هم‌پتانسیل حاصل از برداشت SP نشان می‌دهد. انطباق نتایج نیز در شکل‌های ۹ تا ۱۲ برای هر پروفیل به صورت جداگانه آورده شده است. انطباق نتایج حاصل از دو روش، تأییدی بر وجود نشت آب از یال شرقی سد رسوب‌گیر معدن مس میدوک به سمت چشمه‌های روبه‌روی سد و منابع آبی پایین‌دست سد است؛ به علاوه نشان می‌دهد در صورت بالا آمدن سطح آب و رسوبات



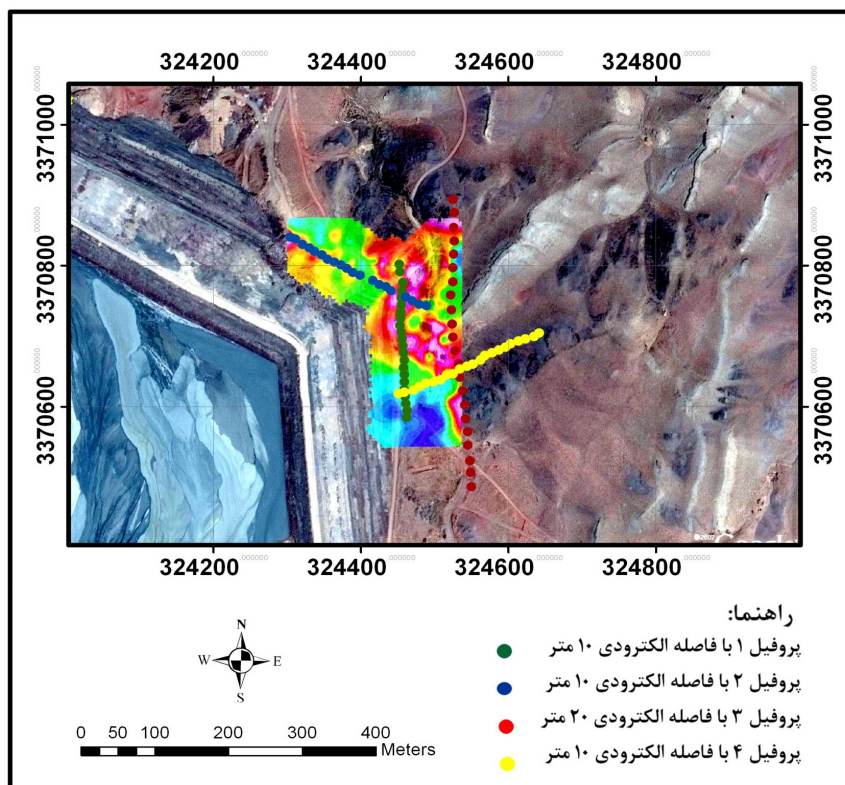
شکل ۶. موقعیت ایستگاه‌های برداشت پتانسیل خودزا (نمادهای مثلثی) محل‌های نشت مستقیم از سد و محل چشمه‌های روبه‌روی سد را نشان می‌دهند.

با توجه به نمادهای مثلثی موجود در شکل، که محل‌های نشت مستقیم از سد و محل چشمه‌های روبه‌روی سد را نشان می‌دهند، مسیرهای جریان دقیقاً از محل نشتی‌های سد شروع شده و به سمت چشمه‌های روبه‌روی سد و منابع آبی پایین‌دست در جریان هستند. بر این اساس، ارتباط آب مخزن سد رسوب‌گیر و منابع آبی پایین‌دست سد اثبات گردید.

در پشت سد رسوب گیر، نشت در یال اصلی سد نیز اتفاق خواهد افتاد.

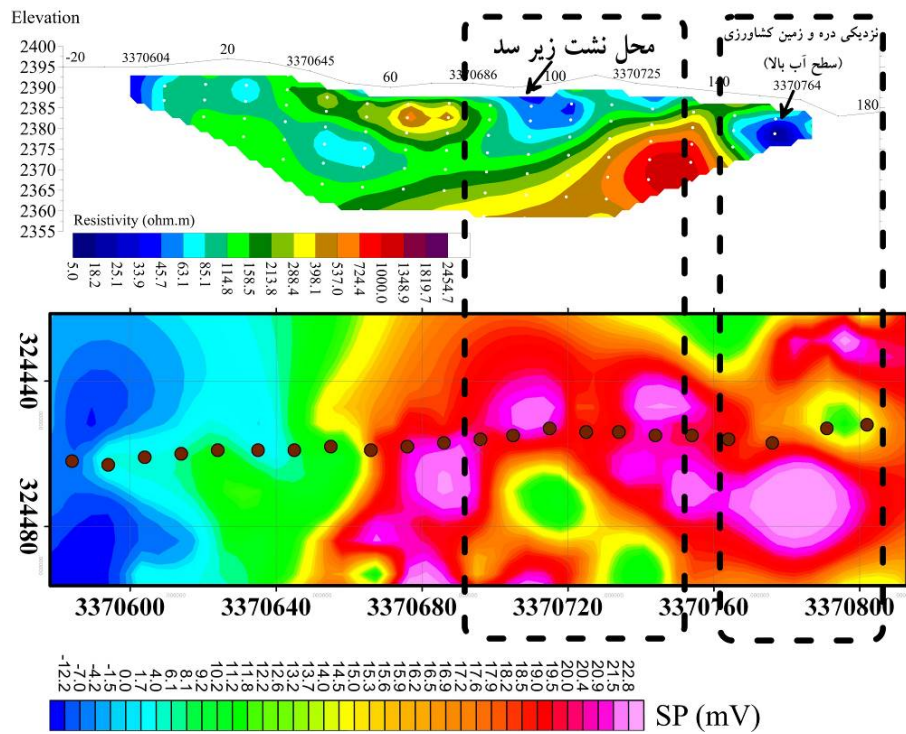


شکل ۷. (الف) نقشه همپتانسیل حاصل از داده‌های برداشت‌شده پتانسیل خودزا. (ب) جانمایی نقشه همپتانسیل بر روی نرم‌افزار گوگل ارث (نمادهای مثلثی محل‌های نشت مستقیم از سد و محل چشمه‌های روبه‌روی سد را نشان می‌دهند).

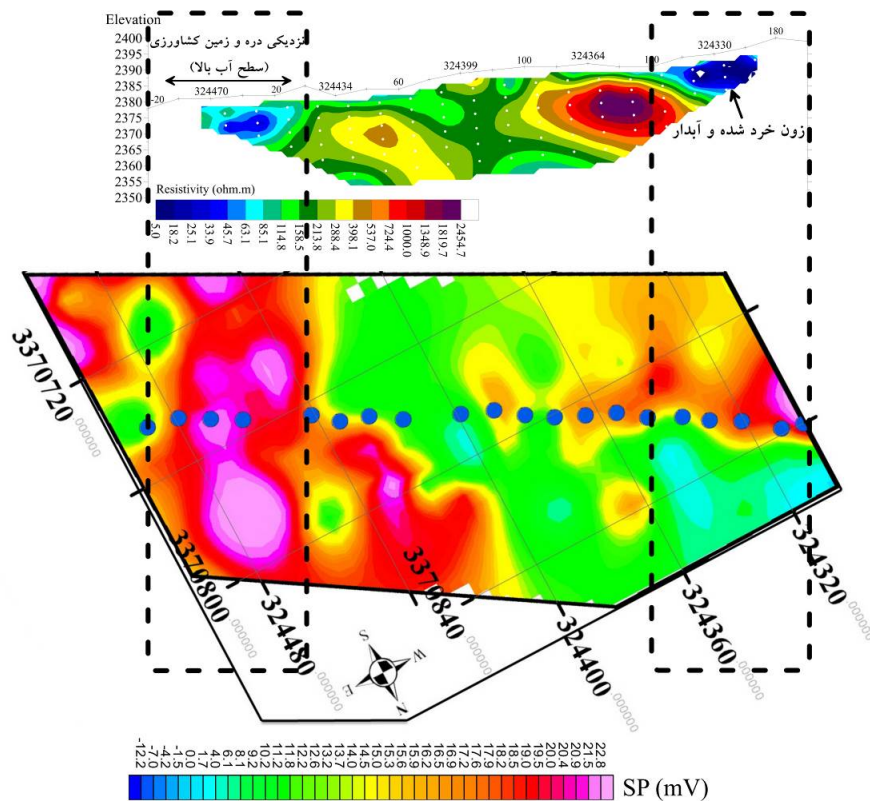


شکل ۸. نمایش موقعیت پروفیل‌های توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به نقشه همپتانسیل حاصل از برداشت SP.

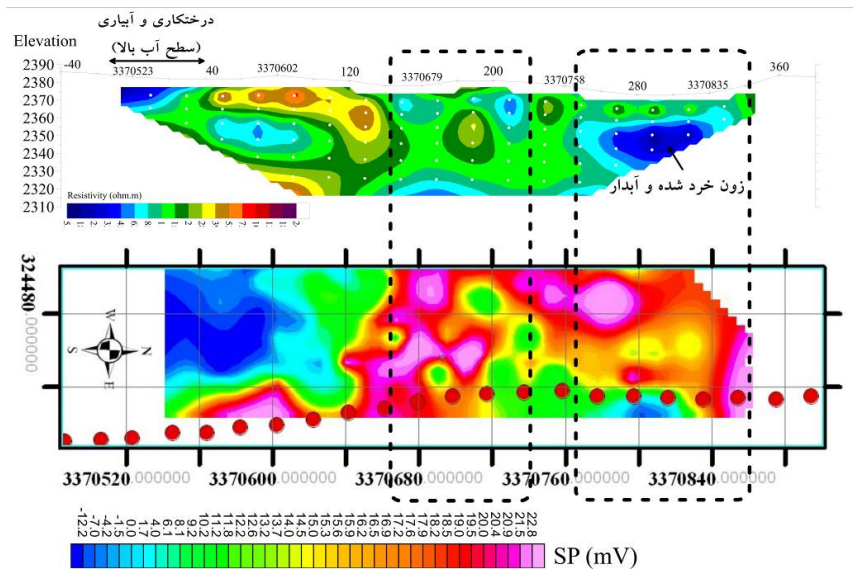




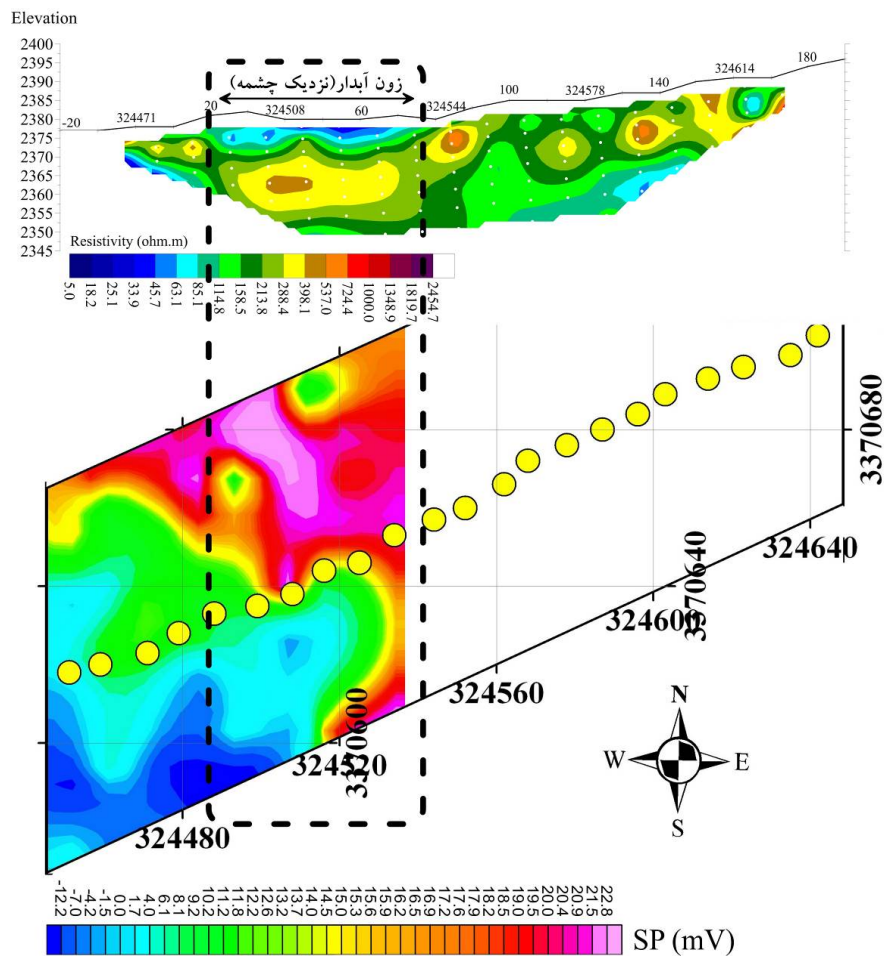
شکل ۹. انطباق نتایج حاصل از برداشت پتانسیل خودزا و پروفیل P1 توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی.



شکل ۱۰. انطباق نتایج حاصل از برداشت پتانسیل خودزا و پروفیل P2 توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی.



شکل ۱۱. انطباق نتایج حاصل از برداشت پتانسیل خودزا و پروفیل P3 توמוگرافی مقاومت ویژه الکتریکی.



شکل ۱۲. انطباق نتایج حاصل از برداشت پتانسیل خودزا و پروفیل P4 توמוگرافی مقاومت ویژه الکتریکی.

## ۷ نتیجه گیری

با توجه به اینکه مصالح به کاررفته در دیواره خارجی سد رسوب گیر، بسیار درشت دانه بوده (با میانگین ابعادی حدود ۶۰۰ میلی متر) و مقاومت تماسی بین مصالح و الکترودها بسیار زیاد است، برداشت های ژئوالکتریک از نظر تئوری بر روی دیواره قابل اجرا نبود. با این حال، پروفیلی جهت بررسی بر روی دیواره سد برداشت گردید که نتایج تکرارناپذیر و غیرقابل قبول بودند؛ از این رو اندازه گیری بر روی دیواره سد از نظر عملی نیز قابل اجرا نبود اما شروع پروفیل ها از نزدیک ترین فاصله به دیواره سد انتخاب شد.

نتایج برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریک وجود دو زون رسانا را یکی در یال شرقی و دیگری در یال اصلی سد رسوب گیر نشان می دهد که بیانگر خردشدگی بستر سد در این محل هاست. در یال شرقی در حال حاضر، نشت از روی بستر سد قابل مشاهده است.

پیش بینی می شود با افزایش سطح آب در پشت سد، عوامل نشت در یال اصلی نیز اتفاق بیفتد. نتایج نشان می دهد زمین شناسی و وجود زون خردشده در بستر سد عامل اصلی نشت است. اما با توجه به وجود نشت دقیقاً در جلوی سد، در تماس سد با زمین، احتمال نشت از درون دیواره سد نیز وجود دارد. در نتایج برداشت پتانسیل خودزا نیز وجود آنومالی مثبت SP در پایین دست سد، دو مسیر نشت زیرسطحی را نشان می دهد که نتایج حاصل از برداشت توموگرافی مقاومت ویژه الکتریک را تأیید می کند. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات هیدروشیمی نیز، کیفیت نمونه های آب برداشت شده از محل های نشت مستقیم از سد رسوب گیر، بسیار نزدیک و شبیه به کیفیت آب موجود در چشمه های روبه روی سد است؛ این موضوع تأیید کننده وجود نشت از سد رسوب گیر به سمت چشمه ها و ورود آن به منابع آب زیرزمینی منطقه پایین دست است. انطباق نتایج مطالعات هیدروشیمی و دو

روش ژئوفیزیکی، تأیید کننده وجود نشت از بستر سد در چند محل در یال شرقی و اصلی آن است. پیش بینی می شود افزایش سطح آب و رسوبات در پشت سد، باعث افزایش دبی نشت از نقاط مشاهده شده و ظهور مسیرهای جدید نشت گردد. بنابراین با توجه به محل های نشت و بروزدهای قابل مشاهده در چند نقطه از دیواره سد و بیرون آمدن آب از نقاطی در داخل چشمه روبه روی سد که منشأ آن همان سد رسوب گیر است و نیز با توجه به همخوانی نتایج حاصل از دو روش ژئوفیزیکی به کار رفته با یکدیگر و با این مشاهدات صحرائی، نتیجه می شود ترکیب دو روش ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریک (تشخیص زمین شناسی و هیدروژئولوژی) و پتانسیل خودزا (ردگیری مسیرهای نشت زیرسطحی)، روشی مناسب برای دیدبانی زیست محیطی سدهای باطله است.

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مرکز تحقیق و توسعه مجتمع مس شهر بابک شرکت ملی صنایع مس ایران که پژوهشگران را در اجرای این پژوهش یاری نمودند، صمیمانه قدردانی و سپاس گذاری می شود.

## منابع

تلفورد، دبلیو ام، جلدارت، ال پی، شریف، آر ای، و کیز، دی ای، ۱۹۸۹، ژئوفیزیک کاربردی، ترجمه حاجب حسینی، ح، و زمردیان، ح، انتشارات دانشگاه تهران.

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

- 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 7, Lulea University of Technology, 93 pp.
- Moore, J. R., Boleve, A., Sanders, J. W., and Glaser, S. D., 2011, Self-potential investigation of moraine dam seepage: *Journal of Applied Geophysics*, **74**, 277-286.
- Murthy, S. B. V., and Haricharan, P., 1985, Nomogram for the spontaneous potential profile over sheet-like and cylindrical two-dimensional sources: *Geophysics*, **50**, 1127-1135.
- Ogilvy, R. D., Kuras, O., Palumbo-Roe, B., Meldrum, P. I., Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., and Klinck, B. A., 2009, The detection and tracking of mine-water pollution from abandoned mine using electrical tomography: *International Mine Water Conference*, 917-925.
- Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., and Shirke, J. M., 2001, Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods: *Engineering Geology*, **59**(3), 281-295.
- Reynolds, J. M., 2000, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*: John Wiley and Sons Ltd.
- Rucker, D. F., Schindler, A., Levitt, M. T., and Glaser, D. R., 2009, Three-dimensional electrical resistivity imaging of a gold heap: *Hydrometallurgy* **98**(3-4), 267-275.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., 2004, *Applied geophysics*: Digital Printing, Published by Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Vanhala, H., Raisanen, M. L., Suppala, I., Huotari, T., Valjus, T., and Lehtimaki, J., 2005, Geophysical characterizing of tailings impoundment – a case from the closed Hammaslahti Cu-Zn mine, Eastern Finland: *Geological Survey of Finland*, 49-60.
- Werkema, D., Atekwana, Jr. E., Sauck, W., and Asumadu, J.A., 2000, A generic automated/semiautomated digital multi-electrode instrument for field resistivity measurements: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **49**(6), 1249-1253.
- نوروزی، غ.، ۱۳۹۲، روش‌های الکتریکی در ژئوفیزیک اکتشافی، 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.
- Abdelrahman, E. M., and El-Araby, T. M., 1997, An iterative approach to depth determination from moving average residual self-potential anomalies: *King Abdulaziz Univ, Earth Science*, **9**(3), 26-97.
- Al-Saigha, N. H., Mohammed, Z. S., and Dahham, M. S., 1994, Detection of water leakage from dams by self-potential method: *Engineering Geology*, **37**(2), 115-121.
- Grangeia, C., Avila, P., Matias, M., Ferreira, D., and Silva, E., 2011, An integrated investigation of the Rio tailings Panasqueria mine (central Portugal): *Engineering Geology*, **123**(4), 359-372.
- Ikard, S. J., Revil, A., Schmutz, M., Karaoulis, M., Jardani, A., and 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., and Mooney, M. A., 2015, Geophysical investigation of seepage beneath an earthen dam: *Groundwater*, **53**(2), 238-250.
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitelli, S., Rizzo, E., and Sdao, F., 2005, Case history: 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in Lucanian Apennine (Southern Italy): *Geophysics*, **70**(3), B11-B18.
- Loke, M.H., 2001, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys: *Geotomo Software*: Penang, Malaysia. <http://www.geoelectrical.com>.

## Geoelectrical investigation of seepage beneath the tailing dam areas of Miduk Copper Mine

Sahar Yahyaabadi<sup>1</sup>, Ahmad Ghorbani<sup>2\*</sup>, Abdolhamid Ansari<sup>2</sup>, and Elham Saeinia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M. Sc. Student, Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>3</sup>M. Sc., Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 01 May 2016, Accepted: 12 March 2017)

### Summary

A tailing dam or confining embankment is constructed to enable the deposited tailings to settle and retain processed water. Tailing dams are susceptible to different kinds of pressures such as water pressure and the load of the tailings themselves. Miduk tailing dam was originally constructed with a fine silty sand layer to retain water covered by coarse grains. It was constructed in stages according to the downstream method, filter and support fill.

Tailing dams and downstream areas must be monitored as they undergo internal erosion, during which, the fine grains in the core of a dam are flushed away by seeping water and, as a consequence, the hydraulic conductivity in the remaining material increases. High velocity flows through the dam embankment can cause progressive erosion and piping. Moreover, the saturation of embankment soils, abutments, differential settlements in foundations, local stress relaxation in the soil and locally increased hydraulic gradient generally reduce soil strengths. The seepage issue in a tailing dam is the cause of reservoir loss to groundwater. Furthermore, it causes environmental problems such as the diffusion of heavy metals, acid drainage and so forth. Reversed water from the tailing dam is particularly important in desert areas.

Resistivity and self-potential (SP) monitoring has been widely applied for solving environmental and engineering problems of embankment dams by studying the changes in the subsurface properties with time. SP changes are caused by water movements through (or under) the dam and resistivity changes reflect the changes in the electrical properties of the dam materials.

Self-potential (SP) is a method where naturally occurring electrical potentials are measured. There are a number of different electro-chemical processes that can create such potentials. The type that is of interest in dam investigations is the so-called streaming potential which is the voltage difference parallel to the direction of flow. The streaming potential is manifested by a shearing of the diffuse layer caused by the hydraulic gradient. The field equipment for SP measurements is simple and inexpensive. It requires a pair of non-polarized electrodes, a high impedance voltmeter and cables to connect them. Electrode drifts were controlled during SP measurements. Electrode drift is primarily caused by variations in temperature or soil moisture or by contamination of the electrolyte by ions introduced from the soil. Changes in the telluric currents induce substantial changes in the potential distribution in the subsurface, an effect accounted for by making regular measurements of the SP difference between the reference point and the base point within the survey area.

The Resistivity method involves the measurement of the apparent resistivity of soil and rocks as a function of depth or position. The resistivity of the ground is measured by injecting a current with two electrodes and measuring the resulting potential difference with two other electrodes. The readings are usually converted into an apparent resistivity of the sub-surface. From these measurements, the true resistivity of the subsurface can be estimated. The investigated volume can be changed by moving the electrodes. The data are usually inverted to a vertical resistivity section, assuming a 2D geometry perpendicular to the profile. Most commonly, the local variability is minimized, resulting in smooth models compatible with the measured data, meaning that sharp resistivity borders such as the ground water surface is visualized as a smooth transition in such inverted sections.

The principle objective of the present study was to evaluate the electrical resistivity and the self-potential methods used to detect anomalous seepage through mine tailing dams. In this regard, field measurements of resistivity and self-potential were carried out on the downstream grounds of tailing dam so as to identify the SP-responses related to seepage. The hydro-stratigraphy was mapped with the resistivity data (4 profiles of ERT) and groundwater flow patterns were specified with self-potential data (208 SP measurement points). The groundwater flow pattern was controlled by the geological and tectonic history of bedrock and the preferential flow pathway existing beneath the dam.

**Keywords:** seepage, tailing dam, electrical resistivity tomography (ERT), self-potential (SP), monitoring, Miduk Copper Mine

\*Corresponding author: