

معرفی و کاربرد روش کمی توموگرافی الکتریکی دو بعدی در آشکارسازی حرکت آب و ارزیابی عملکرد اقدامات آبخیزداری، مطالعه موردی: بخشی از حوزه آبخیز وردیج، شمال غرب تهران

فرود شریفی^{۱*}، مهدی رحمانی جوینانی^۲ و حمید داودی^۳

^۱دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، ^۲آرژ کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴

چکیده

معرفی و ارزیابی روش آشکارسازی حرکت آب به وسیله تغذیه واداری که یکی از ضرورت‌های ارزیابی اقدامات آبخیزداری است، هدف اصلی این تحقیق می‌باشد. در محدوده مورد پژوهش پنج پروفیل دوقطبی-دوقطبی، طراحی و داده برداری شد. پروفیل A در راستای محور خاکریز تاج سد در جهت شرقی-غربی انجام شد. پروفیل B و C در جهت شمالی-جنوبی به ترتیب در ساحل راست بالادست و پایین دست برداشت شد. پروفیل D و E عمود بر رودخانه به ترتیب در پایین دست و بالادست محور سد زیرزمینی و چکدم احداثی به انجام رسید. مدل سازی دو بعدی بر اساس داده‌های برداشت شده با استفاده از نرم افزار RES2DINV و تدقیق سازی نتایج مدل با استفاده از مطالعات زمین شناسی انجام گرفت. در این تحقیق دو محدوده حرکت آب یکی مسیر مدفون با تراوایی قابل توجه و دیگری از امتداد نمای ناودیس شکل در ساحل راست رودخانه آشکارسازی شد. نتایج حاصل از پروفیل A حاکی از تشکیل شدن زون تخریب گسل شمالی-جنوبی و حرکت آب از سکوی سمت راست از ارتفاع ۱۴۵۷ (ارتفاع تاج خاکریز) تا ارتفاع ۱۴۵۰ متر است. مقاومت ویژه الکتریکی بدنه حاکی با بیش از ۱۰۰ اهم متر، حاکی از خشک بودن بافت رسی آن است. در پروفیل B در فاصله ۵۰ متری محور خاکریز در تراز ارتفاعی ۱۴۲۸ تا ۱۴۴۳ متری، منطقه‌ای با مقاومت ویژه کم به ابعاد ۲۰ در ۱۵ متر در یک نمای ناودیسی شکل بیانگر محیطی مرطوب است که با توجه به ابعاد و عمق آن، قسمت اعظم حرکت آب از این محل می‌باشد. پروفیل D تاییدی بر وجود و آشکارسازی مسیری مدفون با تراوایی قابل توجه می‌باشد که با نتایج پروفیل‌های A و B همخوانی دارد. پروفیل E تاییدی بر گسل شمالی-جنوبی و هدایت جریانات زیرقشری به سمت ساحل راست می‌باشد. در مجموع کاربرد روش یاد شده به عنوان ابزاری کارآمد می‌تواند در زمان کم و هزینه قابل قبول، ارزیابی میزان و جهت جریان آب را شناسایی نماید. نتیجه کمی این مطالعه موید عملکرد مثبت اقدامات انجام شده است که منجر به ایجاد ذخیره‌ای به حجم ۱۲۰ هزار مترمکعب طی چندین مرحله در سال، در مدیریت سیلاب‌ها و تغذیه واداری در افزایش توان سفره‌های سمت راست رودخانه در طول ۵۰۰ و عرض ۲۰۰ و ضخامت ۲۰ متر شده که این میزان آب در شکستگی‌های یاد شده با سرعتی حدود ۱۰ متر در روز در حال حرکت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پروفیل دوقطبی-دوقطبی، تغذیه واداری، جریانات زیرقشری، مدل سازی دو بعدی، نرم افزار RES2DINV

مقدمه

ارزیابی بنا به تعریف در مفهوم وسیع آن به فرایند تشخیص، تعیین و کمی نمودن اثرات احتمالی یک اقدام یا یکسری از اقدامات اطلاق می‌شود، که برخی از اثرات به‌عنوان منافع و بعضی دیگر به‌عنوان هزینه منظور می‌شود. ارزیابی، پروژه‌های آبخیزداری به‌منظور تجزیه و تحلیل عملکرد اقدامات و تدوین راه‌کارهای اساسی از ضروریات است. بنابراین لازم است تا روش‌های کمی به‌منظور ارزیابی عملکرد اقدامات مورد استفاده قرار گیرد. وجود آب در مناطق محتمل و ذخیره آب باعث ایجاد یک زون با مقاومت ویژه پایین-تر نسبت به محیط اطراف می‌شود. بنابراین، با کمک مطالعات ژئوالکتریکی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای و سپس در محدوده

سد می‌توان نواحی با پتانسیل و مسیر حرکت آب را شناسایی کرد و با به‌کارگیری روشی مناسب، آب بیشتری را مورد بهره‌برداری قرار داد (Karami و همکاران، ۲۰۱۲). این پژوهش به بررسی حرکت و ذخیره آب در تغذیه واداری سفره‌های آبی در دو سمت چپ و راست مکان احداث چکدم و سد زیرزمینی، به‌ویژه ساحل راست سد خاکی در حوزه آبخیز وردیج (شمال غرب تهران) می‌پردازد. شکل ۱ و ۲ بیانگر اقدامات آبخیزداری از قبیل احداث چکدم، سد زیرزمینی و برخی اقدامات صورت گرفته در ساحل راست و چپ در تغذیه واداری است که در طی یک ماه حجمی برابر با ۱۲۰ هزار مترمکعب آب به زمین تزریق می‌کند.



شکل ۱- محل مورد مطالعه، نمایی از آب بندان، سد ترکیبی سطحی-زیرزمینی و چکدم آبخیزداری در تاریخ ۹۵/۰۲/۲۴



شکل ۲- محل مورد مطالعه، نمایی از آب بندان، سد ترکیبی سطحی-زیرزمینی و چکدم آبخیزداری در تاریخ ۹۵/۰۳/۲۴

ناپیوستگی‌های لیتولوژی، زون‌هایی با تراوایی متفاوت و همچنین مسیرهایی که در نقشه هم مقادیر مقاومت ویژه به‌عنوان مسیرهای اصلی حرکت آب زیرزمینی شناسایی می‌شوند، بیان نموده است. حرکت آب از این

نشریه ۵۶۱ (Ministry of Energy, Bureau of Engineering and Technical Criteria for Water and Wastewater, ۲۰۱۲) چگونگی حرکت آب پس از احداث بندها و سدها را تحت تاثیر: زون‌های گسلی،

تعیین ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه از قبیل تعیین عمق سنگ بستر، حجم آبرفت، سطح ایستابی، احتمال وجود گسل و لایه نفوذپذیر بسیار سودمند است (Loke, 2004). از این روش می‌توان در آشکارسازی مناطق آلوده به مشتقات نفتی (Daily و همکاران، 1998؛ Meekes و Goes، 2004)، تعیین خصوصیات زمین‌شناسی (Meads و همکاران، 2003)، ساختارهای زمین‌شناسی (Daily و Ramires، 2000) و همچنین مطالعات هیدروژئولوژی (Binley و همکاران 2002) بهره گرفت.

با توجه به هدف اکتشاف و نوع ساختار زمین‌شناسی، می‌توان از آرایه‌های الکترودی متفاوتی از قبیل آرایه مربعی^۱، دوقطبی-دوقطبی^۲، قطبی-دوقطبی^۳، ونر^۴ و شلومبرژه^۵ استفاده کرد که هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌های مربوط به خود می‌باشند (Habberjam، 1972؛ Loke و Barker، 1996) (شکل ۳). Boleve و Revil (2009) روش توموگرافی پتانسیل خودزا را برای تعیین حرکت آب در سدهای خاکی در جنوب فرانسه مورد مطالعه قرار دادند. Namaki و همکاران (2013) برای مطالعه و شناسایی ساختارهای زیرسطحی قبل از احداث سد از روش توموگرافی ونر در منطقه دره سور کردستان عراق استفاده نمودند. Eshaghi و همکاران (2013) از روش توموگرافی دوقطبی-دوقطبی به منظور بررسی قنات و ساختارهای زیرسطحی کم عمق استفاده کردند. Lashkaripoor و همکاران (2008) از سه پروفیل موازی با مجموع 19 سونداژ شلومبرژه در حوضه آمودریا در شمال شرق افغانستان به ردیابی مسیرهای قدیمی رودخانه آمودریا پرداختند. در این پژوهش از روش توموگرافی دوقطبی-دوقطبی استفاده شده است. دلیل انتخاب آرایه دوقطبی-دوقطبی، به سبب حساسیت بالای این آرایه به تغییرات افقی مقاومت ویژه بوده که باعث شده این آرایه در به نقشه در آوردن ساختارهای قائم مانند دایک‌ها و حفرات، نسبت به دیگر آرایه‌ها قوی‌تر باشد (Look، 2004).

قبیل مسیرها بعد از آب‌گیری مخزن به علت افزایش بار هیدرولیکی به طور قابل ملاحظه‌ای تشدید خواهد شد. با توجه به این امر، پدیده تزریق و تغذیه آب مربوط به یک یا چند حالت از موارد ذکر شده است.

به طور کلی، گسل‌ها و درزه‌ها سطوح ضعیف در سنگ‌ها بوده و این گاهی منجر به جریان در آمدن آب در سنگ‌ها می‌شود. در مناطقی که دو یا چند گسل همدیگر را قطع کنند و یا بهم برسند معمولاً فصل مشترک این‌ها برای تجمع و انتقال آب مناسب‌تر می‌باشد.

عموما همراه با گسل در اثر تنش‌های برشی یک زون تخریب یا زون برشی به وجود می‌آید که می‌تواند بخش تراوای زون گسلی را تشکیل دهد. مسیرهایی با تراوایی قابل توجه به سبب رسوبات آبرفتی و تغییرات بافت و دانه‌بندی با محیط مجاور مجرای مناسبی برای انتقال آب است. وجود آب در زون‌های تخریب شده و یا با تراوایی بالاتر در اثر حضور آب منجر به ایجاد یک زون با مقاومت ویژه پایین شده و یک تباین بالای مقاومت ویژه با سنگ‌های میزبان و دست نخورده ایجاد می‌کند (Karami و همکاران، 2012). بنابراین، هدف از این پژوهش، معرفی و ارزیابی روش آشکارسازی حرکت آب به وسیله تغذیه واداری است.

دو روش مرسوم قدیمی در ژئوالکتریک عبارتند از: ۱- روش سونداژزنی (حفاری الکتریکی) و ۲- پروفیل‌زنی، هر کدام از این دو روش در نوع خود ضعف‌هایی دارند، روش سونداژزنی فقط اطلاعات عمقی در یک نقطه را می‌دهد در حالی که روش پروفیل‌زنی اطلاعات مقاومت ویژه را در یک راستا و عمق ثابت می‌دهد. روش جدیدی که امروزه در امور مهندسی کاربرد زیادی پیدا کرده است، روش توموگرافی الکتریکی دو بعدی می‌باشد. که این روش هم به صورت جانبی و هم به صورت قائم اطلاعات زیرسطحی مقاومت ویژه را نشان می‌دهد (Loke و همکاران، 2013).

روش توموگرافی الکتریکی بر اساس خصوصیات فیزیکی مواد زیرسطحی، مدل‌های دو بعدی و سه بعدی از ساختارهای زیرسطحی فراهم می‌کند که برای

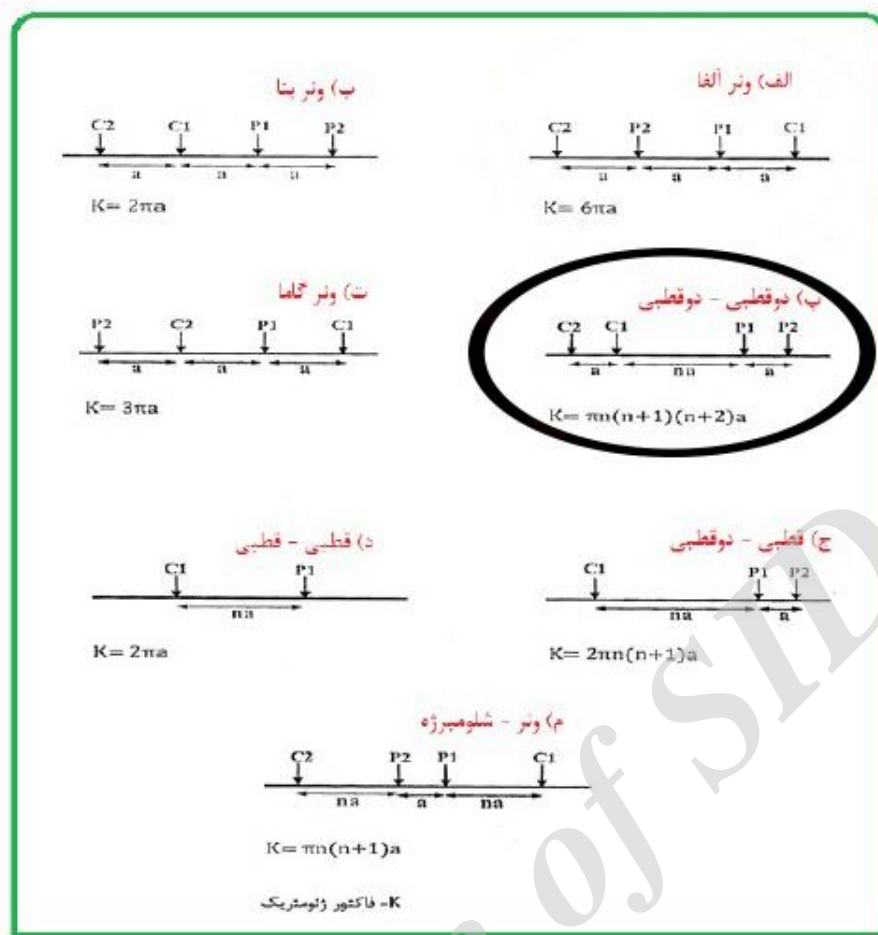
¹ Square array

² Dipole-dipole

³ Pole-dipole

⁴ Wenner

⁵ Schlumberger



شکل ۳- چیدمان الکترودها در آرایش‌های مختلف (Milsom, ۲۰۰۳)

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: محل مورد مطالعه، در حاشیه شمال باختری تهران، بین شهرستان کرج و سنگان، در چهار کیلومتری شمال باختری روستای وردیج و در موقعیت $51^{\circ} 7'$ طول باختری و $35^{\circ} 49'$ عرض شمالی (با ۴۵۰ هکتار عرصه آبخیز) واقع شده است. مهمترین روستاهای اطراف این محدوده، واریش و سنگان در باختر، کندر در شمال و ازگی در جنوب آن است. شکل ۴ موقعیت جغرافیایی محل مورد پژوهش در ایران و استان را نشان می‌دهد.

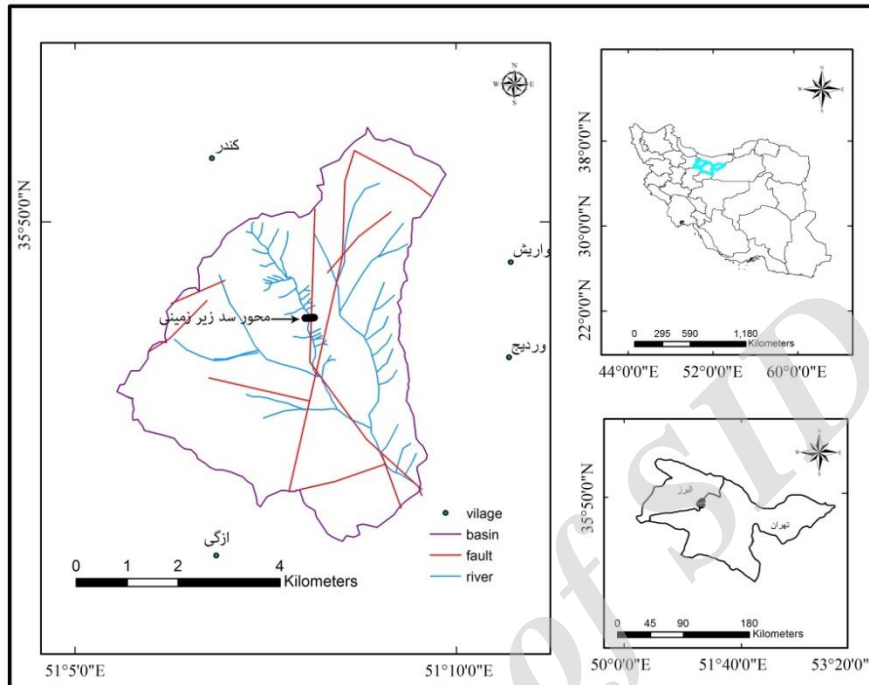
منطقه وردیج از نظر اقلیمی جزء مناطق نیمه‌خشک به حساب می‌آید. بر اساس ایستگاه هواشناسی مستقر در منطقه مورد پژوهش متوسط بارندگی در حدود ۳۶۰ میلی‌متر است که طی چند بارش در فصول پاییز، زمستان و اوایل بهار بوده و ظرف مدت کوتاهی به دلیل لیتولوژی و شیب اراضی از دسترس خارج شده و عمدتاً بلا استفاده به حوض

سلطان وارد و تبخیر می‌شود. بنابراین مدیریت، ذخیره‌سازی آب‌های سطحی حاصل از بارش، به‌منظور افزایش توان سفره‌های زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از راهکارهای ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و ایجاد تاخیر در تخلیه سریع حوزه آبخیز با احداث چکدم کاهش دهنده شیب و سرعت جریان و افزایش نفوذ و با احداث سد زیرزمینی در مسیر آبراهه‌ها می‌باشد (شکل ۱ و ۲). شناخت ظرفیت نگهداری و چگونگی حرکت آب زیرقشری و حجم ذخیره آب یکی از مسایل مهم در شناخت و ارزیابی کارایی و عملکرد پروژه‌های آبخیزداری و سدهای ترکیبی سطحی-زیرزمینی می‌باشد.

زمین‌شناسی منطقه: حوضه مورد پژوهش بخشی از دیواره جنوبی البرز مرکزی، در سازند زمین‌شناسی کرج و بین ترازهای ارتفاعی ۲۶۰۰ تا ۱۶۰۰ متر واقع شده است. این سازند از لحاظ لیتولوژیکی شامل توالی به نسبت ستبری از توف‌های سبز رنگ، سنگ‌های

از پایین به بالا عبارتند از: بخش شیل پایینی، بخش توف میانی، شیل آسارا، بخش توف بالایی و شیل کندوان است (Darvishzadeh, ۱۹۹۱).

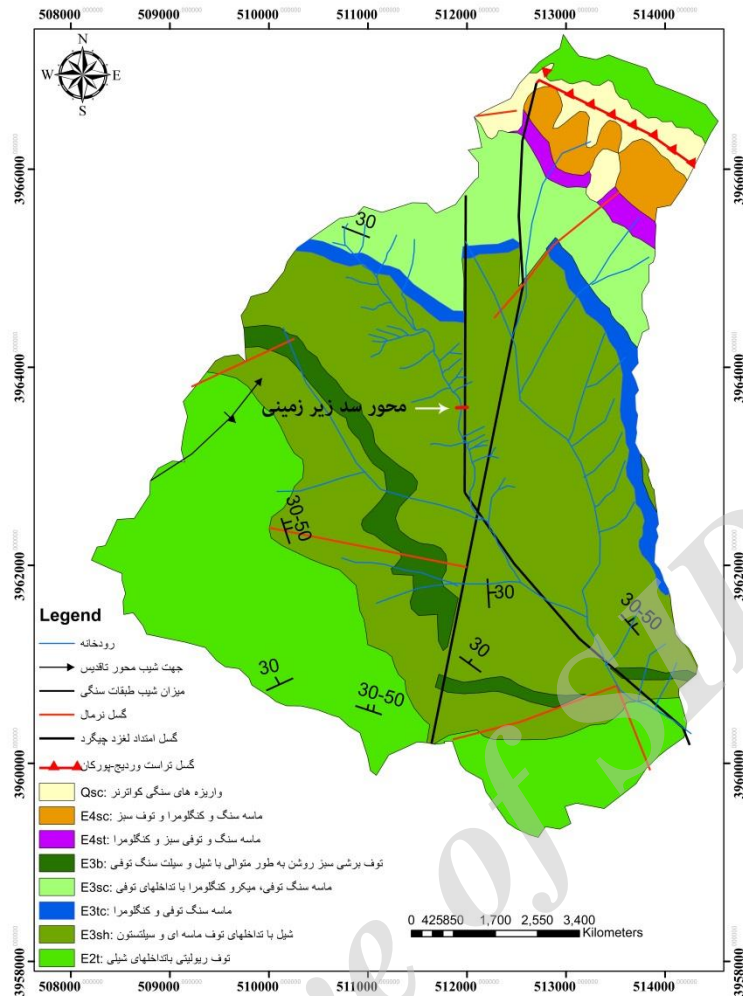
رسوبی و گدازه‌های آتشفشانی و به ندرت تبخیری است. این سازند ترکیب سنگ‌شناسی همگن ندارد و به همین رو در برش الگو به پنج عضو تقسیم شده که



شکل ۴- موقعیت جغرافیایی محل مورد پژوهش در ایران و استان

واحد سنگی توف برشی سبز روشن به‌طور متوالی با شیل و سیلت سنگ توفی (E_3^{sb}) به‌عنوان تحتانی‌ترین واحد بخش آسارا در منطقه مورد مطالعه همچون نواری با روند شمال غربی-جنوب شرقی رخمون دارد. گسل خوردگی به شدت امتداد آن را گسسته و با سازوکار چپگرد جابه‌جا کرده است. سنگ‌شناسی آن متشکل از توف برش به حالت توده-ای، کریستال توف سبز رنگ و در برخی نقاط همراه با کنگلومرا و ماسه‌سنگ توفی است. این واحد نسبت به واحدهای زیرین و زبرین رنگ روشن‌تر و رخمون برجسته‌تری دارد. ضخامت این واحد در دره وردیج ۵۷ متر اندازه‌گیری شده که به‌طور هم شیب بر روی شیل واحد سنگی توف ماسه‌ای و سیلتستون (E_3^{sh}) قرار گرفته است (شکل ۶). وسیع‌ترین واحد سنگی بخش شیل آسارا در حوضه وردیج واحد E_3^{sh} می‌باشد. این واحد سنگی متشکل از شیل با میان لایه‌های ماسه‌سنگ و توفیت است (Darvishzadeh, ۱۹۹۱).

واحدهای سنگی دوران ائوسن در منطقه در قالب سازند کرج به‌ترتیب شیل با تداخل‌های توف ماسه‌ای و سیلتستون (E_3^{sh})، ماسه‌سنگ توفی و کنگلومرا (E_3^{tc})، ماسه‌سنگ توفی، میکرو کنگلومرا با تداخل‌های توفی (E_3^{sc})، توف برشی سبز روشن به‌طور متوالی با شیل و سیلت سنگ توفی (E_3^{sb})، ماسه‌سنگ، توف سبز و کنگلومرا (E_4^{st}) و ماسه‌سنگ، کنگلومرا و توف سبز که در حوضه وردیج رخمون دارند، همگی (E_4^{sc}) متعلق به بخش شیل آسارا می‌باشند. بخش شیل آسارا در منطقه مورد مطالعه در واقع در یال شرقی تاقدیسی قرار دارند که پلانچ آن متمایل به شمال شرق است. شیب لایه‌ها نیز بین ۲۵ تا ۳۰ درجه به سمت شمال شرق تا شرق تغییر می‌کند (شکل ۵). از واحدهای سنگی یاد شده، واحد سنگی توف ماسه‌ای و سیلتستون (E_3^{sh}) و توف برشی سبز روشن به‌طور متوالی با شیل و سیلت سنگ توفی (E_3^{sb}) در محدوده سد خاکی نمود سطحی دارند (Darvishzadeh, ۱۹۹۱).



شکل ۵- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت محور سد خاکی (Gharibreza, ۲۰۱۴)



شکل ۶- رخنمون واحد سنگی E_3^{sh} با لایه‌بندی نازک تا متوسط در یال شرقی، شیب لایه‌ها ۲۵-۳۰ درجه به شرق

امتداد جابه‌جا کرده است. گسل‌های امتداد لغز، نقش تعیین کننده‌ای در ایجاد دره‌ها و جابه‌جایی طبقات سنگی در حوضه داشته‌اند (شکل ۵).

در حوضه مورد پژوهش، یک گسل امتداد لغز چپگرد در راستای شمال-جنوب نمود سطحی دارد که واحدهای سنگی بخش زیرین و شیل آسارا را در این

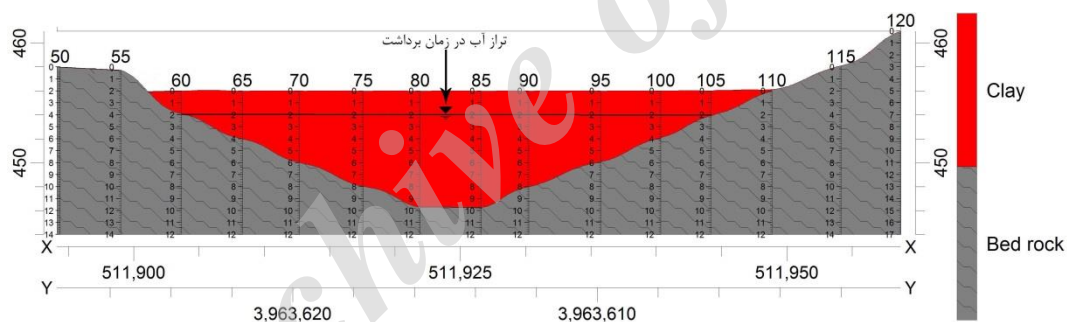
راست بالادست خاکریز به منظور آشکارسازی مسیر حرکت آب زیرقشری از این ساحل، پروفیل C به طول ۳۹۰ متر در جهت شمالی-جنوبی در پایین دست خاکریز با فاصله الکترودی ۱۰ متر به منظور پی جویی مسیر حرکت آب از بالادست، پروفیل D به طول ۱۳۰ متر عمود بر رودخانه و در ساحل راست آن با فاصله الکترودی ۱۰ متر به منظور آشکارسازی مسیری مدفون با تراوایی قابل توجه (امکان پهن‌شدگی آرایش به دلیل شیب ۵۰ الی ۶۰ درجه‌ای ساحل سمت چپ امکان پذیر نبود)، پروفیل E به طول ۱۵۰ متر در جهت شرقی-غربی در ۲۰۰ متری بالادست محور خاکریز با فاصله الکترودی پنج متر به منظور آشکارسازی گسل شمالی-جنوبی داده برداری شد. اطلاعات توپوگرافی نقاط برداشت شده در پروفیل‌ها از نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱/۵۰۰ در مختصات محلی لحاظ شده است.

روش پژوهش: در این تحقیق داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به وسیله دستگاه Terrameter SAS4000 و سیستم درزه و شکاف واحد سنگی E_3^{sh} برداشت شد.

عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها

برداشت داده‌های ژئوالکتریک: در زمان برداشت داده‌های ژئوالکتریک (به استثنای پروفیل E) سطح تراز آب در ارتفاع ۴۵۶ متر (دو متر پایین تر از تاج سد) قرار داشت. شکل ۷، مقطع طولی و عرضی سازه سد ترکیبی سطحی-زیرزمینی را نشان می‌دهد.

در محدوده مورد مطالعه، پنج پروفیل دوقطبی-دوقطبی برداشت شد (شکل ۸). پروفیل A به طول ۱۵۰ متر در راستای محور سد در جهت شرقی-غربی با فاصله الکترودی پنج متر به منظور آشکارسازی گسل شمالی-جنوبی، حرکت و تزریق آب از دیواره و تکیه‌گاه‌های سد، پروفیل B به طول ۲۰۰ متر با فاصله الکترودی ۱۰ متر در جهت شمالی-جنوبی در ساحل



شکل ۷- مقطع طولی و عرضی سازه سد ترکیبی سطحی-زیرزمینی

اولیه در این نوع از مدل‌سازی سلیقه‌ای بوده و بسته تجربه کارشناس ژئوفیزیک بهبود می‌یابد. در روش معکوس‌سازی برخلاف مدل‌سازی مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین تخمین زده می‌شود و روشی پر کاربرد در بررسی‌های ژئوفیزیکی

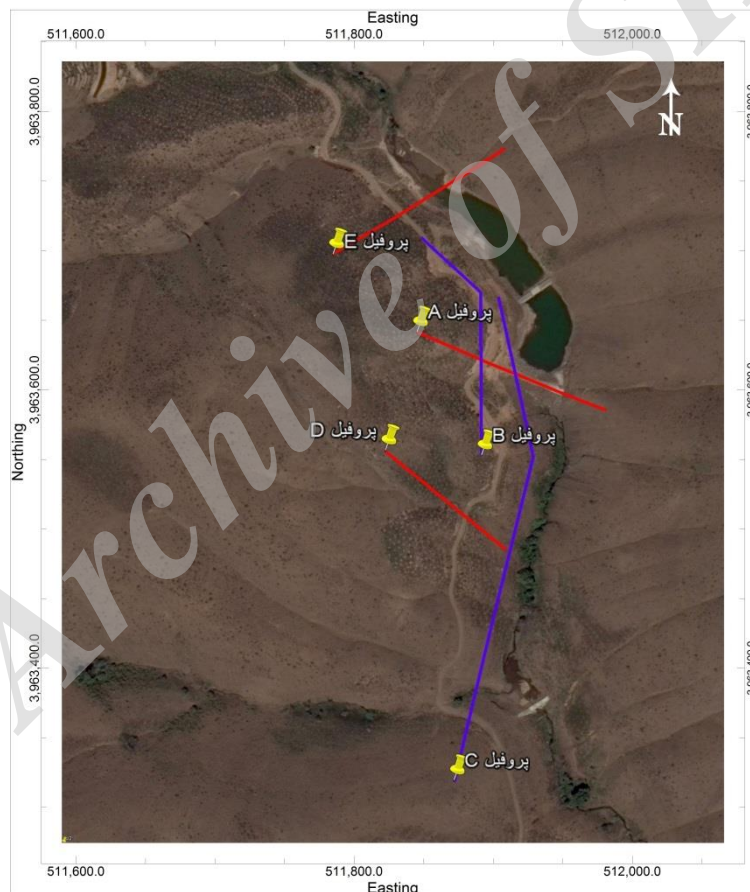
مرحله مهم دیگر در این روش مدل‌سازی است که به دو صورت مدل‌سازی مستقیم و مدل‌سازی معکوس انجام می‌گیرد. مدل‌سازی مستقیم بر مبنای آزمون و خطا با مدل‌های زمینی دو بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود یا تفاضل محدود صورت می‌پذیرد. مدل

جزئی و در نهایت J^T ترانهاده ماتریس مشتقات جزئی است (Marescot, ۲۰۰۹). در روش گوس-نیوتن ماتریس ژاکوبین در هر تکرار باید محاسبه شود. این عمل باعث افزایش میزان محاسبات و زمان گیر شدن مدل سازی می شود (Rahmani Jevinani, ۲۰۰۹). روش های شبه نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به روز رسانی اجتناب می کنند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد. مشتقات جزئی می تواند به طور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن به عنوان مدل اولیه محاسبه شوند.

است. در مدل سازی معکوس در ابتدا به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل سازی نیاز است (Loke, ۲۰۰۴). برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه دو روش معمول کمترین مربعات گوس-نیوتن و روش شبه نیوتن مورد استفاده قرار می گیرد. در روش گوس-نیوتن برای بهبود بخشیدن به مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می شود.

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

که در آن، d بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت ویژه و ضخامت لایه ها، g بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسباتی، u عامل کنترلی، F تابع فیلترهای افقی و عمودی، J ماتریس ژاکوبین مشتقات



شکل ۸- موقعیت پروفیل ها در منطقه مورد پژوهش

$$u_i = (\Delta y_i - B_i P_i) / P_i^T P_i \quad (3)$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (4)$$

که در آن ها، y_i پاسخ مدل برای نامین تکرار، B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $(i + 1)$ امین تکرار، با

روش شبه نیوتن از معادله به روز رسانی که در زیر آمده است، استفاده می کند.

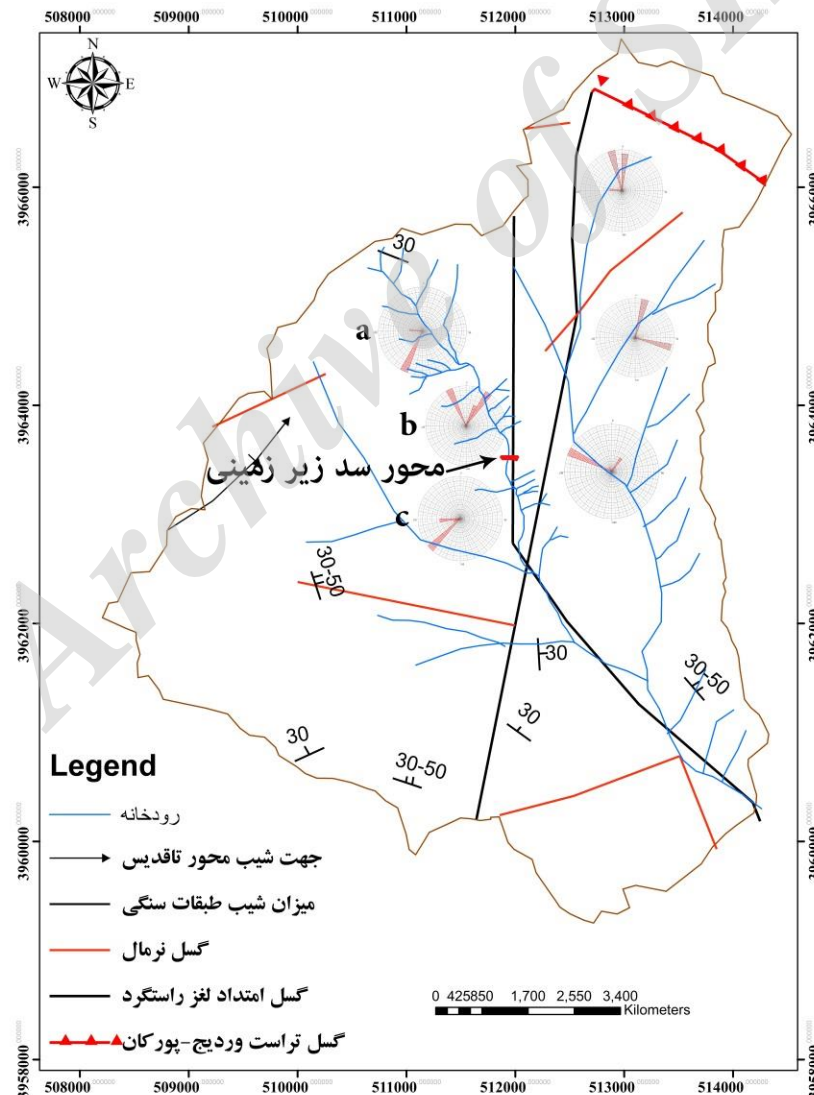
$$B_{i+1} = B_i + u_i P_i^T \quad (2)$$

که در آن،

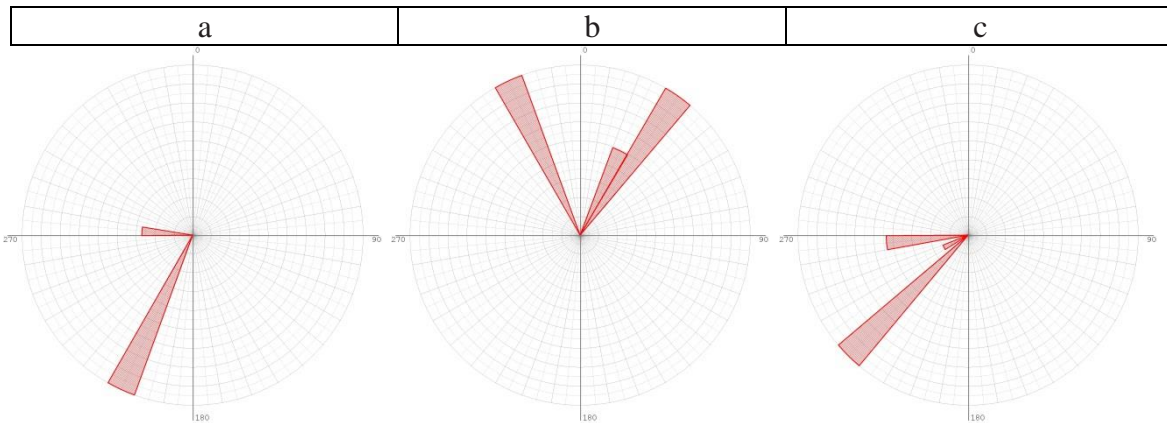
سنگی در امتداد رودخانه در شکل ۱۰ (a, b, c) نشان داده شده است.

عملکرد گسل‌های با سازوکارهای متفاوت باعث ایجاد روندهای مختلف درزه و شکاف در بخش شیل آسارا شده است. در شمال منطقه مورد مطالعه درزه و شکاف‌ها عمدتاً تابع گسل‌های نرمال و امتداد لغز در دو راستای NE-SW و NW-NE به شکل متقاطع توسعه یافته‌اند. فراوانی درزه‌های با روند شمال شرق-جنوب غرب بیشتر بوده که تقریباً عمود بر روند لایه‌بندی ایجاد شده‌اند. شیب دسته درزه و شکاف‌های یاد شده به ترتیب ۷۰ و ۸۰ درجه به سمت شمال غرب و جنوب غرب به ثبت رسیده است (شکل ۱۰a).

استفاده از ماتریس ژاکوبین B_i و بردار انحراف است (Loke, ۲۰۰۴). به‌طور کلی به دلیل عدم محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گوس-نیوتن، روش سریع‌تری است و در معکوس‌سازی بیشتر روش شبه نیوتن استفاده می‌شود (Loke, ۲۰۰۴). در مدل‌سازی پروفیل‌ها در این پژوهش از روش شبه نیوتن با فیلترهای افقی و عمودی یکسان و مدل‌سازی بلوکی استفاده شده است. اندازه‌گیری سیستم درزه و شکاف واحد سنگی E_3^{sh} : نظر به اهمیت این واحد سنگی و وسعت آن در منطقه مورد مطالعه، سیستم درزه و شکاف در هفت نقطه از بروزدهای سنگی آن برداشت شد (شکل ۹). راستا و فراوانی سیستم‌های درزه و شکاف این واحد



شکل ۹- پراکنش و نوع گسل‌های رورانده، نرمال، راستالغز و سیستم درزه و شکاف در حوضه مورد مطالعه (Garibrez, ۲۰۱۴).



شکل ۱۰- روند و فراوانی سیستم‌های درزه و شکاف در واحد سنگی E_3^{sh} (a: شمال، b: میانه، c: پایین دست حوضه)

۲۰۰ متر عمق را فراهم می‌نماید مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده که متکی بر حفاری چاهک‌های شناسایی است، وجود آب‌های زیرقشری در محل برخی از این گسل‌ها و شکستگی‌ها را به اثبات رسانده است.

همان‌طور که ذکر شد، پس از برداشت پروفیل‌ها، مدل‌سازی سه بعدی با نرم‌افزار RES 2DINV انجام گرفت و مقاطع حاصل از مدل‌سازی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۵) و مطالعه سیستم درزه و شکاف (شکل ۹) تقریباً از محور خاکریز، گسل امتداد لغز شمالی-جنوبی می‌گذرد. در مقطع ژئوالکتریک پروفیل A (شکل ۱۲)، با توجه به تشکیل شدن زون تخریب (زون خرد شده) اثر آن مبنی بر تغییرات مقاومت ویژه در زیر جاده دیده می‌شود. محور سد از نوع هسته رسی می‌باشد. حرکت آب از بدنه سد در تکیه‌گاه راست از ارتفاع ۴۵۷ (ارتفاع تاج) تا ارتفاع ۴۵۰ باعث کاهش مقاومت ویژه الکتریکی در این قسمت شده است. به استثناء ۱۰ متر اول طول محور سد (تکیه‌گاه راست)، مقاومت ویژه الکتریکی بدنه حاکی با بیش از ۱۰۰ اهم متر حاکی از خشک بودن بافت رسی آن است. نقطه N در تکیه‌گاه چپ با توجه به مقادیر مقاومت ویژه آن می‌تواند احتمال حرکت آب از این تکیه‌گاه باشد. نقطه M در تراز ارتفاعی بین ۴۵۲ تا ۴۶۰ با توجه به نحوه رسوب‌گذاری در ترانشه کنار جاده می‌تواند مسیری مدفون با تراوایی قابل توجه

در میانه عرصه نیز سه دسته درزه و شکاف به ثبت رسیده است که به ترتیب فراوانی در راستای N30، N35 و N30 می‌باشند و شیب دسته اول تقریباً عمودی و شیب دسته‌های بعد حدود ۸۰ درجه به سمت جنوب شرق است (شکل ۱۰b).

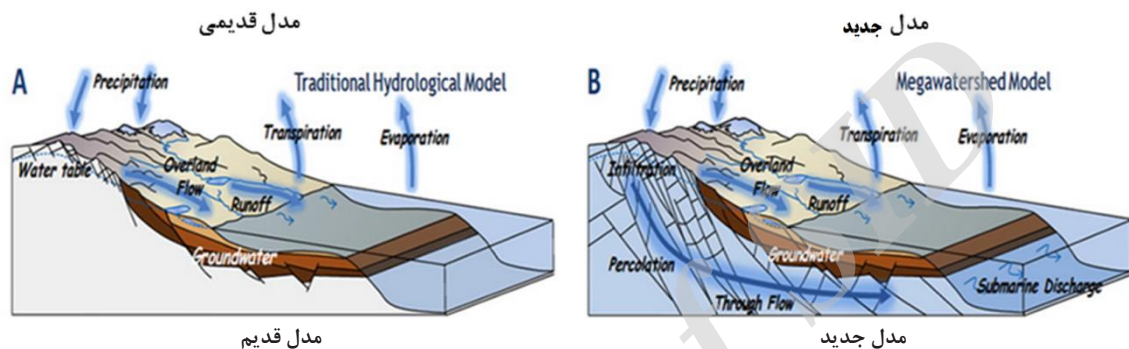
در انتهای عرصه پروژه سه دسته درزه و شکاف به ثبت رسیده است که در دو راستای NE-SW و NW-NE به شکل متقاطع توسعه یافته‌اند. شیب دسته اول تقریباً عمودی و شیب دسته‌های بعد حدود ۸۰ درجه به سمت جنوب غرب است (شکل ۱۰c).

نتایج و بحث

در حوزه آبخیز کوهستانی مورد مطالعه، به دلیل شکستگی، وجود درزه و شکاف در پوسته زمین، جریان آب در مجاری بسته به وجود آمده و با اقدامات آبخیزداری تقویت شده است. این مفهوم که در شکل ۱۱ نشان داده شده، در انطباق با مدل مفهومی نوین در برابر مدل قدیمی حرکت آب در حوزه‌های آبخیز کوهستانی است (Lehr و Bisson، ۲۰۰۴). گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش اساسی در انتقال و تشکیل آبخوان‌ها و حرکت آب زیرقشری دارند. این تحقیق استفاده از روش‌های توموگرافی الکتریکی دو بعدی در شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌ها و تشخیص چگونگی حرکت آب در حوزه‌های آبخیز کوهستانی (یا برج‌های آبی)، متمرکز شده است. در این مطالعه، شناسایی حرکت آب‌های زیرقشری تجدیدپذیر مورد توجه بوده و در مرحله اول آن قابلیت فناوری که امکان اکتشاف تا

همگی در تراز ارتفاعی بین ۴۵۰ تا ۴۵۷ قرار گرفته‌اند. نقطه G محل احتمال حرکت آب از طریق مسیری مدفون با تراوایی قابل توجه معرفی شده است که در تراز ارتفاعی بین ۴۴۶ تا ۴۵۶ قرار دارد. محل H در تراز ارتفاعی ۴۲۸ تا ۴۴۳ در نمای ناودیسی شکل قرار گرفته و با توجه به بزرگ‌تر و عمیق‌تر بودن آن نسبت به محل‌های قبلی، قسمت اعظم مسیر آب در محدوده مخزن بالادست از این محل می‌باشد.

باشد (شکل ۱۳). این موضوع در پروفیل D که عمود بر مسیر فرضی این کانال زده شده بررسی می‌شود. محل A در مقطع ژئوالکتریک پروفیل B (شکل ۱۲) بیانگر محل حرکت آب در پایین‌دست محور سد و آب بندان سطحی-زیرزمینی است که با واقعیت همخوانی دارد. در بالادست محور سد، دو نقطه B و C محل احتمالی فرار آب و دو نقطه D و E با توجه به توپوگرافی می‌تواند محل احتمالی زهکش آب زیرزمینی از دامنه و یا مسیر جریان آب باشد که



فرض می‌شود، کوهستان بدون درزه و شکاف است. تمام بارندگی از کوهستان به صورت رواناب جاری می‌شود. بیشتر آب زیرزمینی در آبخوان‌های زیرزمینی کم عمق یافت می‌شوند. تغذیه آبخوان‌های کم عمق از رواناب کوهستان و بارندگی است. آب زیرزمینی یافت شده در درزه و شکافها محلی است یا به صورت ضعیف تغذیه می‌شود یا آب فسیلی است.

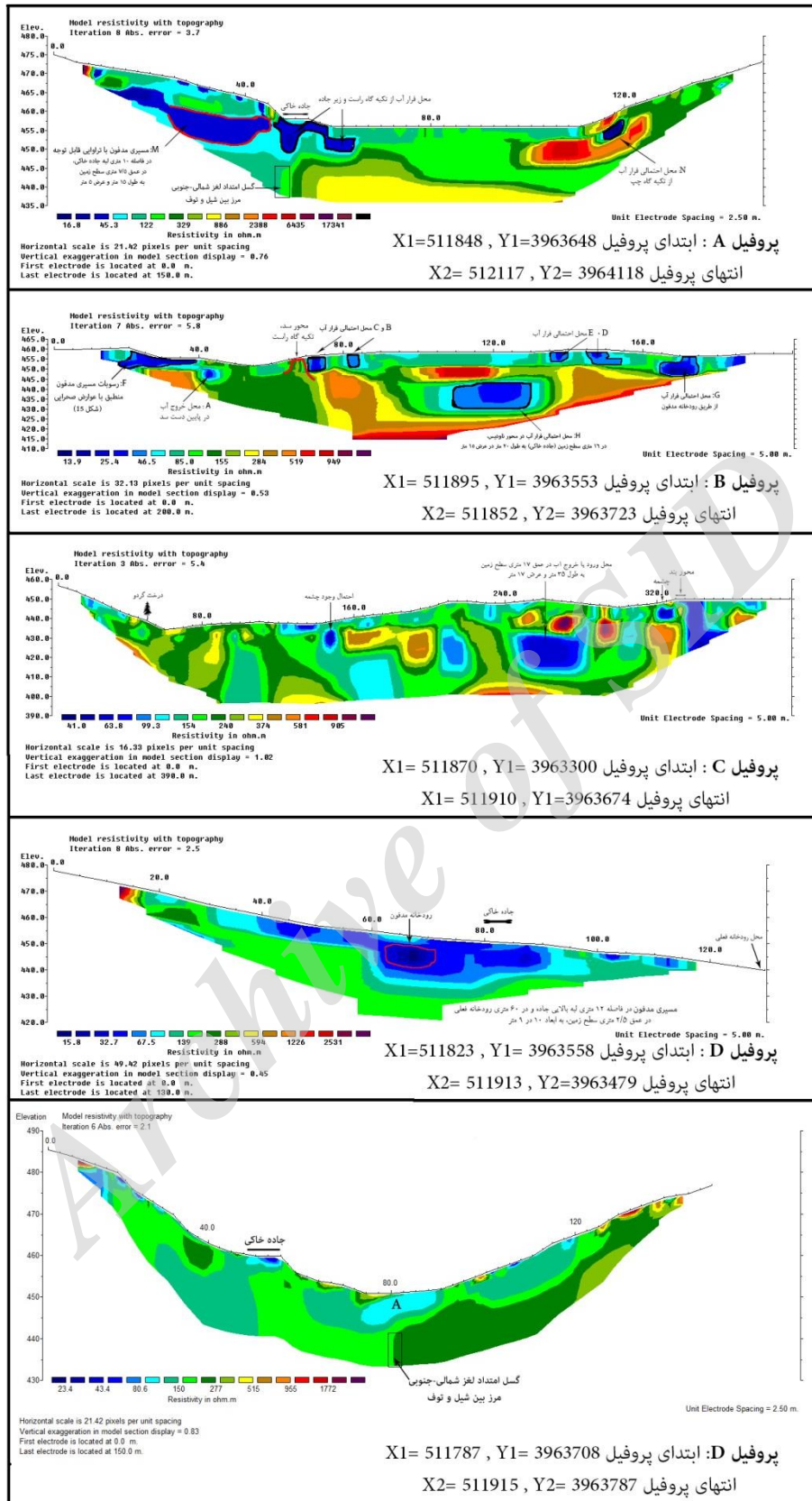
کوهستان دارای درزه و شکاف و جریان آب نشستی است. بیشتر بارش به سیستم درزه و شکافی و دیگر حوضه‌های زیرین مجاور نفوذ می‌کند. بارش کوهستان به ندرت اندازه‌گیری می‌شود و به طور وسیعی دست کم گرفته می‌شود. آب مسافت طولانی را در درزه و شکاف‌های پوسته زمین از بارش در کوهستان تا تخلیه در اقیانوس و تبخیر در صحرا طی می‌کند.

شکل ۱۱- تفاوت بین مفهومی نوین و مدل قدیمی در حوزه‌های آبخیز کوهستانی

پروفیل E جدای از دیگر پروفیل‌ها، در زمانی که مخزن خالی از آب بود، برداشت شد. در پروفیل E دقیقاً در مرکز رودخانه (محل A)، مقاومت ویژه نسبت به نقاط اطراف آن کاهش یافته و این بیانگر وجود جریانات زیرقشری در مرکز رودخانه است که تا حدودی به سمت ساحل راست جریان دارند. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در مرکز رودخانه و حدوداً پنج متر پایین‌تر از کف رودخانه، یک تباین مقاومت ویژه بین ۱۵۰ تا ۲۷۷ اهم متر به صورت یک مرز قائم وجود دارد و این بیانگر گسل شمالی- جنوبی امتداد لغزی است که باعث قطع‌شدگی بین توف و شیل شده است.

در پروفیل C (شکل ۱۲) محل چشمه در پایین‌دست محور سد به خوبی در این مقطع مشهود است. محل P در این مقطع به مانند محل H در پروفیل B در یک نمای ناودیسی شکل در تراز ارتفاعی ۴۱۵ تا ۴۳۲ قرار دارد که می‌تواند محل حرکت آب از بالادست و یا تزریق آب به درون زمین باشد با توجه به پیمایش میدانی محل P احتمالاً مجرای ورود آب به داخل زمین است.

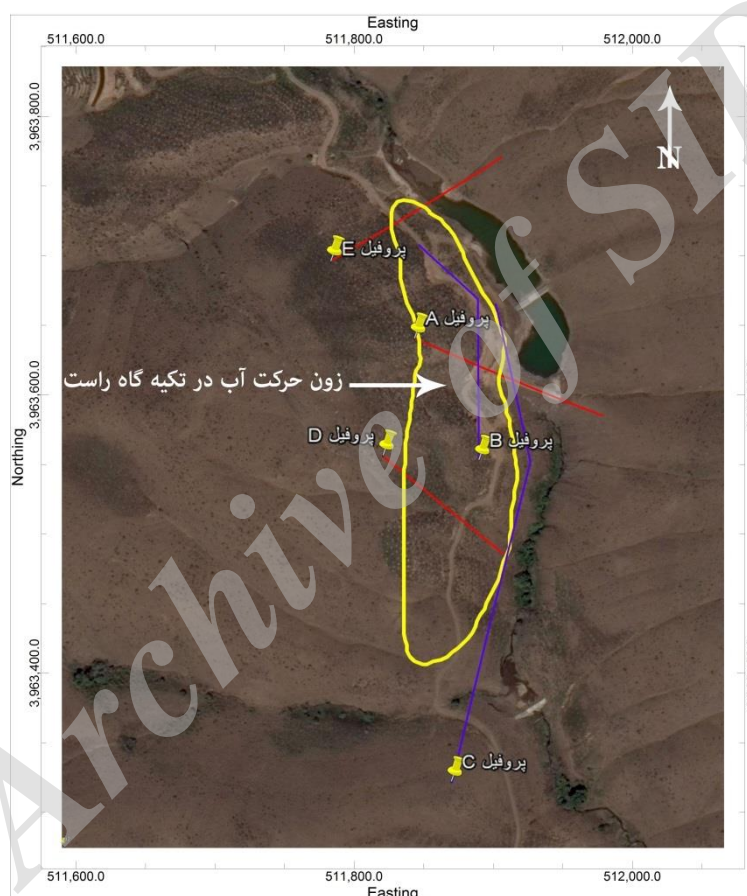
محل مشخص شده در مقطع ژئوالکتریک پروفیل D (شکل ۱۲) بیانگر مسیر مدفون می‌باشد که از لحاظ ارتفاعی (تراز ارتفاعی ۴۴۰ تا ۴۵۰) و مسیر حرکت با نقطه M در پروفیل A و نقاط F و G در پروفیل B همخوانی دارد.



شکل ۱۲- مقاطع حاصل از مدل سازی پروفیل های A, B, C, D, E



شکل ۱۳- نحوه رسوب‌گذاری در ترانشه کنار جاده در نزدیکی تکیه‌گاه راست



شکل ۱۴- موقعیت زون‌های حرکت آب (محدوده زرد رنگ) در تکیه‌گاه راست سد و آب‌بندان سطحی-زیرزمینی

ذخیره آب در سفره‌های کرانه راست رودخانه شده است. نتیجه این مطالعه موید عملکرد مثبت اقدامات انجام شده است که منجر به ایجاد حجم ذخیره‌ای حدود ۱۲۰ هزار مترمکعب شده، که با مدیریت روانابها و تغذیه واداری منجر به افزایش توان سفره‌های سمت راست رودخانه در طول ۵۰۰ و عرض ۲۰۰ و ضخامت ۲۰ متر شده (شکل ۱۴) که این

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق، نشان داد که به‌کارگیری روش توموگرافی دوقطبی-دوقطبی با هزینه و زمان نسبتاً کوتاه، به خوبی قادر به آشکارسازی مسیر حرکت آب، ارزیابی میزان و جهت جریان آب در پوسته زمین در حوزه‌های آبخیز کوهستانی می‌باشد. سد ترکیبی سطحی-زیرزمینی و چکدم‌های سبب افزایش

و روش ژئورادار می‌تواند با سرعت و هزینه نسبتاً کم اثر بخشی اقدامات آبخیزداری را با دقت مناسبی کمی نموده و توصیه می‌شود.

میزان آب در شکستگی‌های یاد شده با سرعتی حدود ۱۰ متر در روز در حال حرکت می‌باشد. استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر روش توموگرافی الکتریکی

منابع مورد استفاده

1. Binley, A., G. Cassiani, R. Middleton and P. Winship. 2002. Vadose zone flow model parameterization using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 267: 147-159.
2. Bisson, R. and J. Lehr. 2004. *Modern groundwater exploration*. A John Wiley and Sons Publication, 317 pages.
3. Boleve, A. and A. Revil. 2009. Preferential fluid pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. *Near Surface Geophysics*, 1: 447-462.
4. Daily, W., A. Ramirez and R. Johnson. 1998. Electrical impedance tomography of a perchloroethylene release. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2: 189-201.
5. Daily, W. and A.L. Ramirez. 2000. Electrical imaging of engineered hydraulic barriers. *Geophysics*, 65: 83-94.
6. Darvishzadeh, A., 1991. *Geology of Iran, Tehran*. Amirkabir Press, 434 pages (in Persian).
7. Eshaghi, E., A. Kamkarrohani and A.R. Arabamiri. 2013. Two and Three dimensional modeling of electrical tomography data applied for studying qanat and subsurface shallow structures. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 17: 107-112 (in Persian).
8. Goes, B.J.M. and J.A.C. Meekes. 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 9: 127-141.
9. Habberjam, G.M. 1972. The effects of anisotropy on square array resistivity measurements. *Geophysical Prospecting*, 20: 249-266.
10. Karami, G., A.R. Efteghari, G.A. Kazemi and M. Kamali Nesiyan. 2012. *Guideline for using tracers in evaluation of leakage from dam's reservoir and Abutments*, No. 561. Office of Deputy for Stratgic Supervision-Department of Technical Affairs Press, 126 pages (in Persian).
11. Loke, M.H. and R.D. Barker. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1): 131-152.
12. Loke, M.H. 2004. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys: RES2DINV Manual*, IRIS Instruments, www.iris-instrument.com.
13. Loke, M.H., J.E. Chambers, D.F. Rucker, O. Kuras and P.B. Wilkinson. 2013. Recent developments in direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95: 135-156.
14. Marescot, L. 2009. *Electrical surveying: part 2*. Course given at the University of Fribourg.
15. Meads, L.N., L.R. Bentley and C.A. Mendza. 2003. Application of electrical resistivity imaging to the development of a geological model for a proposed Edmonton landfill site. *Canadian Geotechnical Journal*, 40: 551-559.
16. Milsom, J. 2003. *Field geophysics*. Wily, University College London, 220 pages.
17. Namaki, L., M.A. Panah Tatehrashid and M.A. Ahmadi. 2013. Application of 2-D electrical resistivity tomography (ERT) for studying and detecting subsurface in dam construction site, Darrasar, Chamchamal, Iraqi Kurdistan. 16th Geophysics Conference of Iran, 221-229 (in Persian).
18. *Guideline for using tracers in evaluation of leakage from dam's reservoir and abutments*, No. 561, 2012. Ministry of Energy, Iran, Available online at: <http://shaghool.ir/abfa.php>, Accessed 2017.
19. Rahmani Jevinani, M. 2009. *The comprehensive self-study for RES2DINV engineering software*. Tehran, Imam Ali Military University Press, 175 pages (in Persian).

Introducing and applying a two-dimensional electrical tomography method in detection of water movement and evaluating the effects of watershed management measures, case study: Vardij Catchment

Forod Sharifi^{*1}, Mehdi Rahmani Jevinani² and Hamid Davoodi³

¹ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, ^{2 and 3} MSc, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 23 January 2017

Accepted: 10 June 2017

Abstract

The objective of this paper is introducing and applying a two-dimensional electrical tomography method in detection of water movement and evaluating the effects of watershed management measures. For these, four Dipole–Dipole profiles were designed operated and the data were recorded. These profiles included; profile A in the east-west direction, profile B and C in the north- south on the right bank upstream and downstream of the dam site and the D and E profiles, perpendicular to the river, on the right bank of the river valley. The RES2DINV software was used for two dimensional modeling. The results checked and calibrated using geological survey. Two water leakage path of a buried river channels and other stalagmites along the right bank of the river were detected. Results from profiles A indicated that fault damage zone North-South and seepage from the right abutment. The recorded resistivity of dam embankment was high; so the clay, which is used for construction of dam, is dry and shows a stable condition. The profile B was recorded at the distance of 50 meters from dam axis. A zone of low resistivity (with a dimension of 20*15 meters) was detected. This zone represents a pore space containing a high percentage of recharged water. The stored water flow slowly into other fracture zones down gradient along the watercourse. The D profile indicates the presence of buried river is the path that hydraulic gradient and direction with corresponding points A and B is consistent in the profiles. In conclusion, application of a two-dimensional electrical tomography method showed promise as a low cost and relatively quick methodology in evaluation of water movement in catchments. All in all, the effectiveness of the implemented watershed management activities was quantitatively approved by applying the aforesaid technique.

Key words: Artificial recharge, Dipole–dipole profiles, Fracture flow, RES2DINV software, Two dimensional modeling

* Corresponding author: fs1338@yahoo.com