

خصوصیات هیدروژئوالکتریک سازندهای آسماری و ایلام - سروک در ناودیس سوسن، شمال ایذه

حمیدرضا ناصری^{۱*}، نجات زیدعلی نژاد^۲، فرشاد علیجانی^۳

۱. دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۲. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

۳. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۷

چکیده

منطقه کارستی سوسن به صورت ناودیس پلانژ داری در شمال دشت ایذه و در حوضه کارون میانی قرار گرفته است. در این مقاله، خصوصیات هیدروژئوالکتریک سازندهای آهکی آسماری و ایلام- سروک با هدف تعیین دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی آهک‌های خشک و آب‌دار، میزان کارست‌شدگی، وجود شکستگی‌ها و در نهایت تعیین مناطق با بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی مورد بررسی گرفته است. بدین منظور، ۲۴۵ سونداژ ژئوالکتریک با آرایه شلومبرژه در مجاورت حد تماس آهک‌ها با آبرفت داده‌برداری شده و به صورت یک‌بعدی مورد تفسیر قرار گرفته است. سپس توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی در هشت مقطع انتخابی با استفاده از مدل RES2DINV انجام و مورد تحلیل واقع شده است. منحنی‌های سونداژ سازند آسماری دارای مقاومت الکتریکی کمتر، شکل هموارتر و دامنه مقاومت کمتر نسبت به سازند ایلام - سروک می‌باشند که می‌توان وجود آبخوان با آبدی زیاد را بر روی آن با توجه به شیب ملایم کاهش مقاومت آبخوان مشخص نمود. تفسیر مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی مشخص نمود که آهک ایلام- سروک در مناطق خردشده پتانسیل آب زیرزمینی قابل توجهی دارند و توسعه کارست و حفرات در آن‌ها نسبت به آهک آسماری کمتر است. وجود آهک متراکم ایلام - سروک در مجاور پهنه‌های خردشده‌ای که هدایت آب زیرزمینی را برعهده دارند، باعث شده است که حرکت رو به بالای آب زیرزمینی و در نتیجه ظهور چشمه‌ها در این سازند در منطقه سوسن رخ دهد. نتایج بررسی‌های هیدروژئوالکتریک مشخص کرد که آبخوان آهکی آسماری علی‌رغم نبود چشمه مهم در آن در ناودیس سوسن، وضعیت بسیار مناسبی دارد. در سازند ایلام - سروک، چشمه‌ها از طریق مناطق خردشده تخلیه می‌شوند. آهک‌های این سازند در عمق متراکم می‌باشند که می‌تواند نمایانگر تخلخل زمینه‌ای کم‌آهک مذکور باشد، در حالی که به دلیل تخلخل ذخیره‌ای بیشتر، مقاومت الکتریکی آهک آسماری کمتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هیدروژئوالکتریک، توموگرافی، پتانسیل آب زیرزمینی، کارست سوسن و ایذه.

* نویسنده مرتبط: H-Nassery@sbu.ac.ir

مقدمه

در نواحی کارستی، جریان آب زیرزمینی را سازندها و ساختارهای زمین‌شناسی تعیین می‌کنند (Goldscheider and Drew, 2007). نقش سازندهای زمین‌شناسی بستگی به خلوص و انحلال‌پذیری سنگ دارد. سیلیکات‌ها و کانی‌های رسی مهم‌ترین ناخالصی‌های موجود در سنگ‌های کربناته هستند. توسعه کارست در آهک‌های حاوی بیش از ۲۰ تا ۳۰ درصد رس یا سیلت، اندک است (Ford and Williams, 2007). با این حال ممکن است در مناطق خردشده متاثر از گسل‌ها و شکستگی‌های بزرگ، جریان ترجیحی متمرکز رخ داده و به مرور زمان انحلال و توسعه کارست تشدید شود، هر چند در بعضی موارد گسل‌ها به‌عنوان محدودکننده‌های هیدرولیکی عمل می‌نمایند (Herold et al., 2000). ساختارهای چین‌خورده، مسیرهای اصلی جریان آب زیرزمینی را در آبخوان‌های کارستی مشخص می‌نمایند. جریان آب کارستی در ناودیس‌ها به موازات روند تاقدیس و به سمت محور متمرکز می‌شود، در حالی که محور تاقدیس‌ها اغلب به‌عنوان خط تقسیم محلی آب زیرزمینی عمل می‌کنند و آب‌های کارستی تمایل دارند تا در امتداد یال‌های تاقدیس تمرکز یابند (Goldscheider and Drew, 2007).

آبخوان‌های کارستی اصلی در شمال شرق خوزستان، مشابه با دیگر مناطق زاگرس در سازندهای آسماری و ایلام-سروک شکل گرفته‌اند که مهمترین منبع تامین آب شرب برای ساکنین منطقه می‌باشند. مطالعات انجام‌شده در تاقدیس‌های جنوب غرب ایذه نشان داده است که به لحاظ هیدروژئولوژی، سازند آهکی آسماری با ظرفیت ذخیره زیاد و جریان غالب پایه و آهک‌های ایلام-سروک با جریان سریع مجرای غالب و ظرفیت ذخیره کم تشخیص داده شده است (Nassery et al., 2013؛ ناصری و همکاران، ب-۱۳۹۱). با این حال، وجود چشمه‌های کارستی دائمی با آبدهی زیاد که از سازند ایلام-سروک در منطقه سوسن، واقع در ۲۰ کیلومتری شمال ایذه تخلیه می‌شوند، نمایانگر وجود آبخوان کارستی با ظرفیت ذخیره زیاد در این سازند در مقایسه با سازند آسماری است که چشمه‌ای از آن تخلیه نمی‌شود. تعیین خصوصیات

هیدروژئوالکتریک آهک‌های آسماری و ایلام-سروک در ناودیس سوسن می‌تواند کمک شایانی در شناخت پتانسیل آب زیرزمینی آبخوان‌های کارستی نماید. محققین بسیاری از روش‌های ژئوالکتریک برای تعیین مشخصات هیدروژئولوژی آبخوان‌های کارستی استفاده کرده‌اند (Gowd, 2004؛ Skinner and Heinson, 2004؛ Nathalie et al., 2007). امروزه با توسعه روش‌های توموگرافی^۱، شناخت ناهنجاری‌های مربوط به حفرات زیرسطحی، نوع آبخوان و مناطق خردشده زیرزمینی با استفاده از روش ژئوالکتریکی یک نسبت به روش‌های محاسباتی تک بعدی تسهیل شده است (Nguyen et al., 2005؛ Zonge et al., 2005؛ Sultan and Monteiro Santos, 2008؛ Kaufmann and Romanov, 2009). توموگرافی مقاومت الکتریکی^۲ شامل وارون‌سازی مبتنی بر مدل‌سازی در شبکه دوبعدی داده‌های مقاومت الکتریکی می‌باشد (Loke and Barker, 1996). ناصری و همکاران (۱۳۸۷) توموگرافی ژئوالکتریک را به‌عنوان روش مکمل مطالعات هیدروژئولوژی کارست توصیه کرده‌اند و با مقایسه نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی سطحی و ژئومورفولوژی با مطالعات ژئوالکتریک در تاقدیس آسماری، عدم همبستگی بین نمایان‌گرهای سطحی و کارست‌شدگی عمقی را تعیین نموده‌اند.

در این مقاله، به‌منظور تعیین دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی آهک‌های خشک و آبدار، میزان کارست‌شدگی، وجود شکستگی‌ها و در نهایت تعیین مناطق با بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای آهکی آسماری و ایلام-سروک ناودیس سوسن، ۲۴۵ سونداژ ژئوالکتریک با آرایه شلومیرزه در مجاورت حد تماس آهک‌ها با آبرفت داده‌برداری شده و تفسیرهای یک‌بعدی و دوبعدی در مقاطع انتخابی به‌منظور شناخت خصوصیات هیدروژئوالکتریک سازندی مورد تحلیل قرار گرفته است. دشت سوسن با مساحت حدود ۸۰ کیلومترمربع در بخش شمال شرقی استان خوزستان، شمال شهرستان ایذه قرار گرفته است (شکل ۱). رودخانه کارون با میانگین دبی ۲۳۴ مترمکعب بر ثانیه از جنوب شرق وارد ناودیس سوسن شده و سپس با حرکت در امتداد

1. tomography

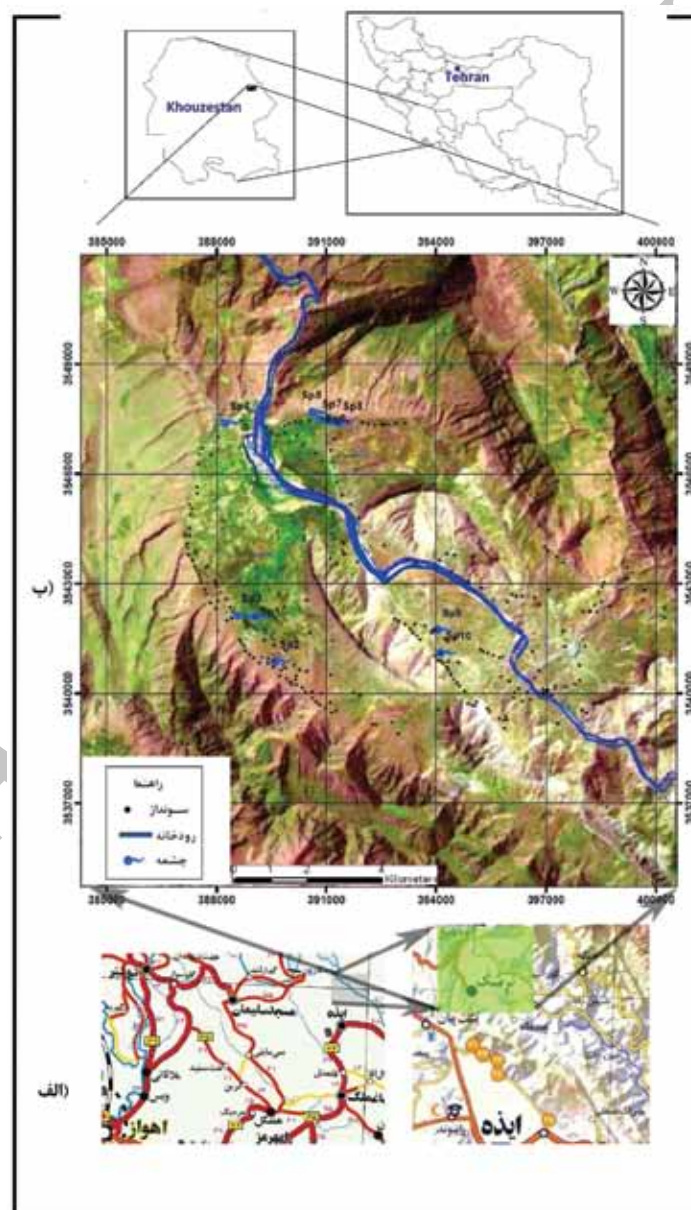
2. ERT

شرقی، گسل‌های عادی و معکوس، سیمای پری‌کلین در آهک‌ها، تاقدیس‌های پشت‌نهنگی و ناودیس‌های باز از جمله ویژگی‌های منطقه سوسن می‌باشند. سازندهای زمین‌شناسی رخنمون‌یافته به‌ترتیب از قدیم به جدید شامل سنگ آهک و دولومیت داریان- فهلیمان، مارن و شیل کژدمی، سنگ آهک و دولومیت ایلام- سروک، مارن و شیل پایده- گورپی و سنگ آهک و دولومیت آسماری- چهارم می‌باشند (شکل ۲).

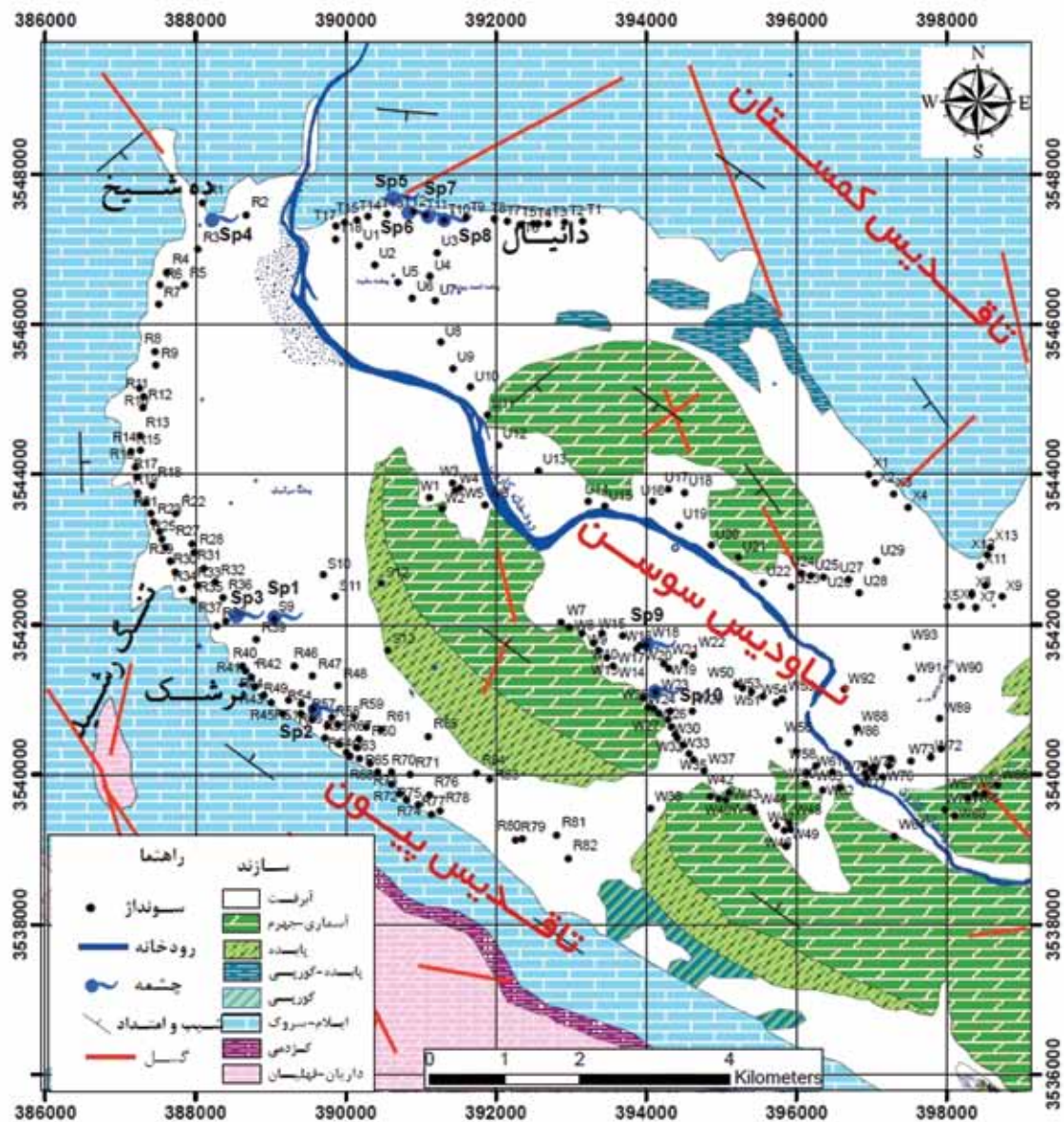
محور از پلانژ شمال غربی خارج می‌شود. دشت سوسن با میانگین بارش سالیانه ۸۰۰ میلی‌متر، درجه حرارت ۱۹ درجه سانتیگراد و متوسط تبخیر سالیانه ۱۶۰۰ میلی‌متر دارای آب و هوای نیمه مرطوب می‌باشد.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

منطقه مورد مطالعه بخشی از پهنه زاگرس چین‌خورده و پهنه زاگرس مرتفع به‌شمار می‌رود. زمین‌شناسی ساختمانی منطقه متأثر از زمین‌ساخت پهنه ایزده می‌باشد. تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موازی با هم با روند شمال غربی - جنوب



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی، ب) تصویر ماهواره‌ای ناودیس سوسن (اقتباس از موسسه گیتاشناسی، ۱۳۸۸)



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت سونداژهای ژئوالکترونیک ناودیس سوسن (تصحیح شده براساس شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۵)

گسل‌های راست‌الغز راستگرد اغلب در سازند ایلام- سروک در محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شوند (شکل ۲). روند کلی گسل‌های منطقه شمال غربی- جنوب شرقی است، در حالی که گسل‌های با روند عمود بر آن‌ها نیز وجود دارند که بازشدگی بیشتری نشان می‌دهند. روند رودخانه کارون در منطقه به‌طور کلی از محور ناودیس تبعیت می‌نماید، هر چند که تغییرات ناگهانی مسیر رودخانه، احتمالاً ناشی از شکستگی‌ها است، دیده می‌شود. ناودیس سوسن در میان دو تاقدیس پیون در غرب و کمستان در شرق واقع شده است.

سازندهای آهکی ایلام- سروک و آسماری- جهرم دارای درز و شکستگی و حفرات انحلالی فراوان می‌باشند و می‌توانند پتانسیل آب زیرزمینی بالایی داشته باشند. سازندهای شیپل و مارنی کژدمی و پابده- گورپی را می‌توان واحدهای با اهمیت هیدروژئولوژیک ناچیز در نظر گرفت. رسوبات آبرفتی دشت سوسن از رسوبات دانه درشت تا رسوبات دانه ریز تپه‌ماهوری می‌باشند. رسوبات دانه‌درشت شامل ماسه، شن و قلوه‌سنگ‌هایی می‌باشند که بیش‌تر نتیجه فرسایش سنگ‌های آهکی هستند.

است که سازند ایلام- سروک در منطقه سوسن، پتانسیل آب زیرزمینی بالاتری نسبت به سازند آسماری داشته باشد (شکل ۲). مهم‌ترین چشمه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه از سازند ایلام- سروک منشأ می‌گیرند. جدول ۱ دبی، درجه حرارت و هدایت الکتریکی این چشمه‌ها که در دو فصل خشک و مرطوب در سال ۱۳۹۰ اندازه‌گیری شده‌اند را نشان می‌دهد. چشمه سیاه‌چال جریان آب زیرزمینی افشان را در سیستم کارست نشان می‌دهد ولی بقیه چشمه‌ها، سیستم غالب مجرای را نشان می‌دهند و سازند ایلام- سروک مخصوصاً در نزدیکی این چشمه‌ها پتانسیل آب زیرزمینی مناسبی دارد (زیدعلی نژاد، ۱۳۹۰). چشمه‌های SP3، SP2، SP4، SP5، SP9 و SP10 (شکل ۱) در سال آبی مورد مطالعه ۹۰-۹۱ کاملاً خشک بودند. شکل ۳ تصاویری از چشمه‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

کارن‌ها و غارها از اشکال ژئومورفولوژیک کارست موجود در محدوده مورد مطالعه در سازند آسماری، در یال شمال شرقی ناودیس می‌باشند. سازندهای ایلام- سروک و آسماری را می‌توان مهم‌ترین مخازن آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در نظر گرفت. در سازند آسماری ناودیس سوسن، چشمه قابل توجهی وجود ندارد. سازند ایلام- سروک در دو یال ناودیس سوسن، آبخوان کارستی مهمی را تشکیل داده است. در یال شمال شرقی، عمده تخلیه توسط چشمه‌های ده حوض (SP6)، آب دانیال (SP7) و شلمه زردی (SP8) و در مجاورت دماغه ناودیس انجام می‌شود، ولی در یال جنوب غربی تخلیه عمده از طریق چشمه چال شه (SP1) با فاصله از پلانژ ناودیس و در حوالی تنگ رشید رخ می‌دهد. به دلایلی همچون بیشتر بودن مساحت رخنمون، دارا بودن چشمه‌های پرآب و شکستگی‌های بزرگ انتظار بر آن

جدول ۱. دبی، دما و هدایت الکتریکی برای چشمه‌های مهم موجود در منطقه سوسن (دبی بر حسب لیتر بر ثانیه، دما بر حسب درجه سانتیگراد و هدایت الکتریکی بر حسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد)

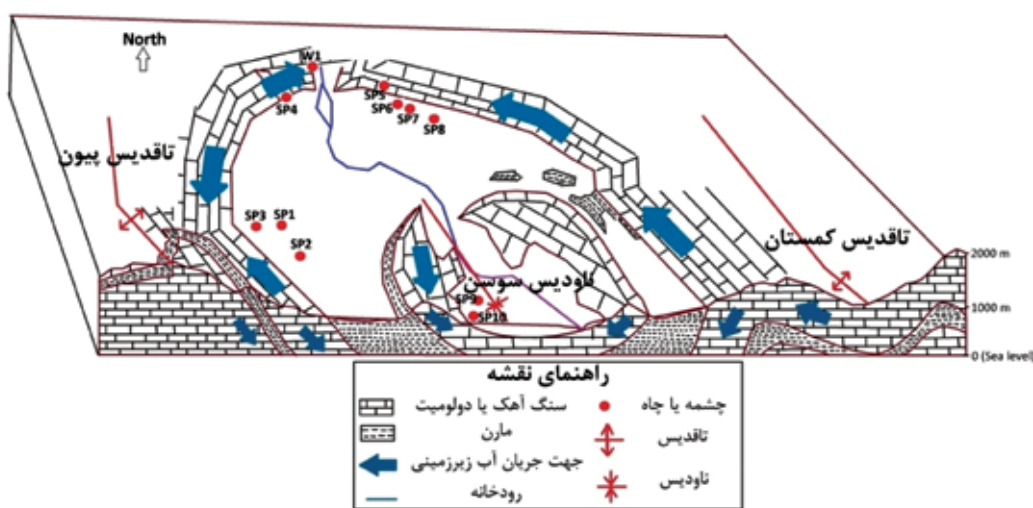
چشمه	فصل خشک سال آبی ۹۰-۹۱			فصل مرطوب سال آبی ۹۰-۹۱		
	دبی	دما	هدایت الکتریکی	دبی	دما	هدایت الکتریکی
چال شه (SP1)	۸۰۰	۱۹/۴	۳۹۶	۱۰۰۰	۱۹	۵۱۶
ده حوض (SP۶)	۵۰	۲۳/۰	۳۸۹	۸۰۰	۲۰	۴۳۵
آب دانیال (SP۷)	۴۰	۲۲/۰	۴۱۸	۴۰۰	۱۹	۴۳۸
شلمه زردی (SP۸)	۳۰	۲۴/۰	۴۲۰	۱۶۰	۲۲	۴۴۰



شکل ۳. تصاویری از چشمه‌ها. الف) ده حوض، ب) چال شه در منطقه سوسن

دلیل ساختارهای چین، اثر اصلی را بر الگوی زهکشی آب زیرزمینی دارند. فروافتادگی ناودیس سوسن مسیر جریان آب زیرزمینی اصلی را تشکیل می‌دهد، در حالی که محور تاقدیس‌های پیون و کمستان به‌عنوان خط تقسیم آب زیرزمینی در پهنه‌های کارستی بالاتر عمل می‌کنند. جهت جریان آب زیرزمینی نیز با استفاده از تراز نقاط تخلیه اصلی سیستم کارست یعنی چشمه‌ها تعیین شد. تراز ارتفاعی چشمه‌های کارستی در ناودیس سوسن که نمایانگر سطح آب کارست می‌باشد، بالاتر از رودخانه کارون است.

با توجه به ناودیس بودن محدوده مورد مطالعه، تاثیر ساختارهای چین بر الگوی زهکشی جریان آب زیرزمینی حائز اهمیت است. شکل ۴ نمای کلی از ارتباط بین ساختارهای چین خورده و الگوی زهکشی آب زیرزمینی را در سیستم‌های کارستی محدوده نشان می‌دهد. ضخامت زیاد لایه‌های نفوذناپذیر و تفاوت قابل ملاحظه بین نفوذپذیری آبخوان و لایه‌های نفوذناپذیر باعث ایجاد الگوی آب زیرزمینی به‌موازات لایه‌بندی می‌شود. بنابراین، الگوی آب زیرزمینی در مدل مفهومی ارائه شده از لایه‌بندی بسیار متاثر است و به همین



شکل ۴. مدل تفهیمی آب زیرزمینی در سیستم‌های کارستی ناودیس سوسن

زیرسطحی عمیق، حداکثر فاصله الکترودی جریان بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر انتخاب شد. داده‌های اندازه‌گیری شده پروفیل‌های دوبعدی مرتب شدند و به شکل شبه مقاطع مقاومت الکترودی منحنی‌بندی شدند. شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری فقط دید عمومی از توزیع مقاومت زیرسطحی به‌دست می‌دهند و به‌دلیل هموارشدگی داده‌ها، تغییرات شدید مقاومت الکتریکی سنگ‌ها و تاثیر آرایه الکترودی بر اندازه‌گیری مقادیر مقاومت، نمی‌توانند تصویر واضحی از زیرزمین ارائه نمایند (ناصری و همکاران، الف-۱۳۹۱). این بدان معنی است که آرایه‌های هندسی الکترودی مختلف، شبه‌مقاطع متفاوتی حاصل می‌کنند. جهت آرایه بهتر و واقعی‌تر توزیع

داده‌ها و روش تحقیق

بررسی‌های ژئوالکتریک جهت تشخیص خصوصیات هیدروژئولوژی در بخش‌های مختلف سازندهای کارستی آسماری و ایلام- سرک در منطقه سوسن به‌منظور تعیین پتانسیل آب زیرزمینی به‌کار گرفته شده است. تعداد ۲۴۵ سونداژ مقاومت الکتریکی در پای آهک‌ها و محور ناودیس سوسن برداشت شده است (شکل ۲). عملیات داده‌برداری صحرایی ژئوالکتریک توسط مهندسین مشاور کمیاب گستر جنوب (۱۳۹۰) و با دستگاه GEOB انجام شد که موقعیت سونداژها و انجام عملیات صحرایی به‌منظور حصول نتایج مطمئن به‌طور مرتب مورد بازبینی واقع گردید. به‌منظور حصول اطلاعاتی در باره ضخامت و مقاومت کارست

تشخیص کانال‌های با جریان سریع آب در محیط‌های کارستی مشکل است و نیازمند دقت داده‌برداری الکتریکی می‌باشد. حفرات خشک که اغلب بالای سطح ایستایی قرار دارند، به‌صورت ناهنجاری با مقاومت الکتریکی قابل تشخیص می‌باشند. از میان همه تکنیک‌های تصویربرداری زیرسطحی، داده‌برداری مقاومت الکتریکی دوبعدی و سه‌بعدی در دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای برای اهداف زیست‌محیطی، آب‌شناسی و زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور ارائه تصویر مناسب از زیرزمین، می‌بایست شبه مقطع داده‌های مقاومت الکتریکی با استفاده از روش معکوس‌سازی وارون گردند. این بررسی‌ها معمولاً توموگرافی مقاومت الکتریکی نامیده می‌شوند. پیشرفت‌ها در این روش به‌صورتی است که داده‌های مقاومت الکتریکی در طی چند روز جمع‌آوری و در چند ساعت مورد پردازش قرار می‌گیرند. در نتیجه، توموگرافی مقاومت الکتریکی به‌عنوان ابزاری ارزشمند در مطالعات زیرسطحی کارست شناخته می‌شود. اصول روش توموگرافی الکتریکی شامل تقسیم‌بندی سطح دو بعدی به تعدادی سلول به‌منظور تعیین مقاومت درون هر سلول می‌باشد به‌طوری‌که بتوانند پاسخ مدل را به‌خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت دهند. در یک تجسس دوبعدی ERT، داده‌های میدانی در طول یک مقطع به‌صورت شبه‌مقاطع مقاومت الکتریکی ظاهری جمع‌آوری می‌شوند و توزیع مقاومت الکتریکی واقعی زیرسطحی به‌وسیله فنون معکوس‌سازی به‌دست می‌آید. در مناطقی همانند نواحی کارستی که ساختارهای مقاومت الکتریکی پیچیده‌ای وجود دارد، توموگرافی الکتریکی دوبعدی و مدل‌های حاصل از آن ممکن است با ابهامات قابل توجهی همراه باشد که در این حال می‌توان با صحت‌سنجی مقاطع ژئوالکتریک با یافته‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بهترین مدل را انتخاب نمود.

بحث

به‌منظور شناسایی رفتار هیدروژئوالکتریک آبخوان‌های کارستی ناودیس سوسن تمامی ۲۴۵ سونداژ داده‌برداری شده با آرایه شلومبرژه به‌صورت یک بعدی (با افزایش عمق)

مقاومت الکتریکی زیرسطحی، می‌بایست معکوس‌سازی شبه‌مقاطع انجام شود. چندین روش تفسیر شامل روش‌های نموداری (دستی) و عددی، برای تفسیر داده‌های یک بعدی ژئوالکتریک وجود دارد.

جهت ارایه بهتر و واقعی‌تر توزیع مقاومت الکتریکی زیرسطحی، می‌بایست معکوس‌سازی شبه‌مقاطع انجام شود. چندین روش تفسیر، شامل روش‌های نموداری (دستی) و عددی برای تفسیر داده‌های یک‌بعدی ژئوالکتریک وجود دارد. تفسیرهای انجام‌شده در این تحقیق براساس منحنی‌های استاندارد سه/چهار لایه‌ای به‌منظور تخمین اولیه فرآیند معکوس‌سازی در نرم افزار IPI2WIN 2001 انجام شده است. برنامه IPI2WIN با تعیین ساختار خودکار منحنی‌های عمق‌پیمایی مقاومت الکتریکی^۱ و تعیین منحنی‌های نظری منطبق با داده‌های صحرائی، مقاومت حقیقی و ضخامت لایه‌های زیرسطحی را تعیین می‌نماید. پس از عملیات صحرائی ژئوالکتریک، داده‌های میدانی مقاومت الکتریکی به رایانه انتقال داده شد و به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزارهای توموگرافی الکتریکی مرتب شد. مدل‌سازی مقاومت الکتریکی معکوس با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV (Geotomo Software, 2009) انجام گردید و خروجی‌ها به‌صورت مقاطع عرضی در مدل دو بعدی به‌دست آمد. داده‌های حاصل از VES جهت تهیه سه مقطع ژئوالکتریک برای شناخت خصوصیات زیرسطحی سازندهای کارستی در منطقه مورد مطالعه به‌کار گرفته شد. بدین منظور داده‌های یک‌بعدی نیز به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزار RES2DINV درآمد و سپس توموگرافی مقاومت الکتریکی بر روی آن‌ها انجام گردید. با توجه به خصوصیات هیدرودینامیک سازندها، موقعیت چشمه‌ها و الگوی زهکشی آب زیرزمینی، چهار پروفیل در یال جنوب غربی ناودیس سوسن بر روی آهک ایلام- سروک، دو پروفیل در یال شمال شرقی ناودیس و حوالی پلانژ بر روی آهک ایلام- سروک، و دو پروفیل در آهک آسماری جهت توموگرافی ژئوالکتریک در نظر گرفته شد. موقعیت مقاطع بر اساس سونداژهای در نظر گرفته شده در هر مقطع (که در بحث آمده است)، در شکل ۲ ارائه شده است.

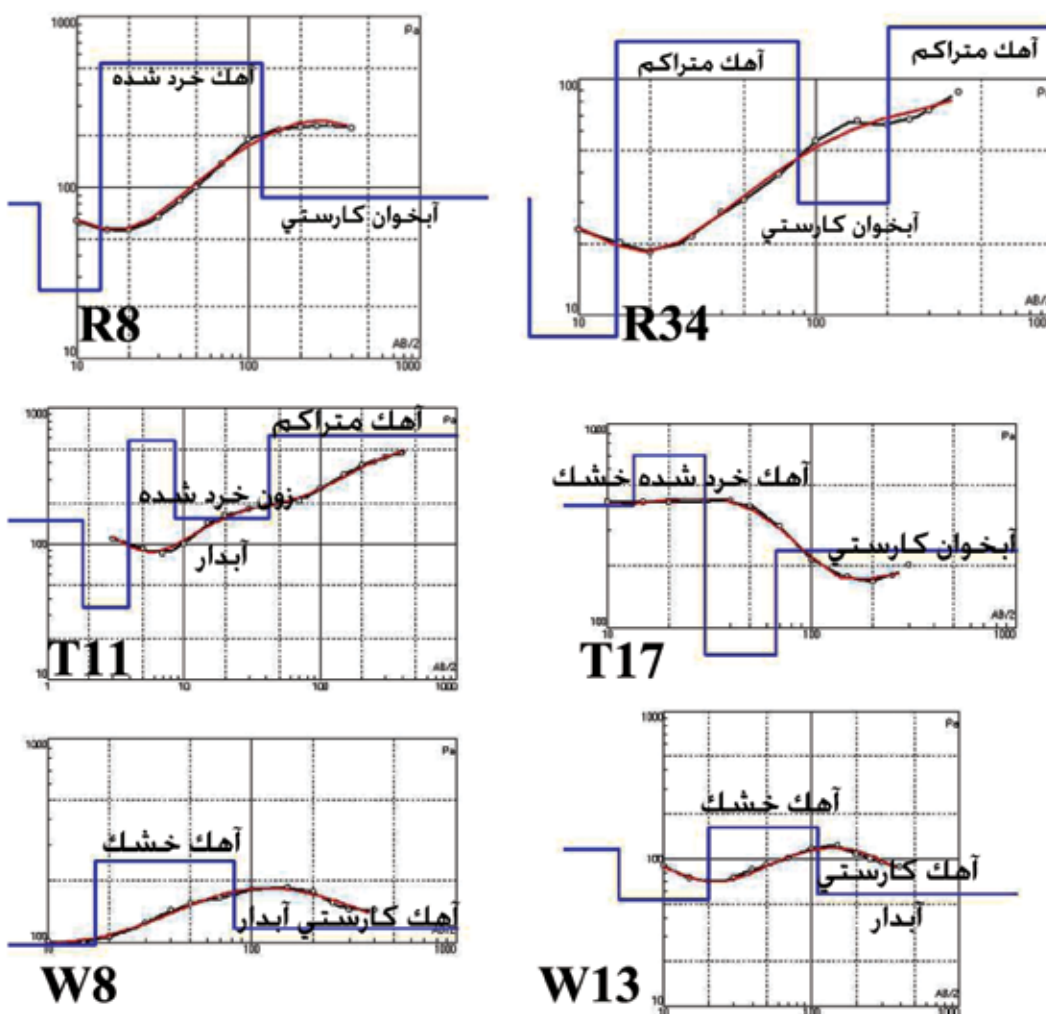
1. Vertical electrical sounding or VES

ملایم می‌باشد و حداکثر مقاومت الکتریکی در آن همواره کمتر از ۲۰۰ اهم‌متر است. در آهک ایلام- سروک، تغییرات پرشیب مقاومت الکتریکی از بخش بدون آب تا بخش آبدار، تفسیر یک‌بعدی سونداژها را مشکل ساخته است. مقاومت آهک خشک ایلام- سروک در حالت خردشده حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ اهم‌متر و در حالت متراکم تا بیش از ۱۰۰۰ اهم‌متر می‌رسد. مقاومت الکتریکی لایه‌های آبدار که عموماً در مناطق خردشده آهک ایلام- سروک رخ می‌دهند، بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ اهم‌متر است. در سازند آسماری وجود آب زیرزمینی در سونداژها به خوبی قابل تشخیص است ولی در آهک ایلام - سروک، به‌سختی بخش آبدار تفسیر می‌شود. به طور مثال در سونداژ T11 که مجاور دو چشمه با آبدهی زیاد واقع شده است، تشخیص پهنه خردشده آبدار که در عمق کمتر از ۵۰ متری قرار دارد از آهک متراکم زیرین به سختی ممکن می‌باشد، و شاید در صورتی که چشمه‌ها به‌عنوان شاخص آب زیرزمینی در تفسیر مورد استفاده قرار نمی‌گرفت، این سونداژ به‌عنوان منطقه با پتانسیل ضعیف آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شد. به‌طور مشابه، سونداژ R34 که در مجاورت تنگ رشید و در بالادست چشمه بزرگ چالسه واقع شده است، نیز وجود آب زیرزمینی را در تفسیر یک‌بعدی مشخص نمی‌نماید. در اکثر سونداژهای آهک ایلام- سروک، منحنی مقاومت الکتریکی صحرائی در عمق رو به بالا است در حالی که در آهک آسماری با افزایش عمق، مقاومت الکتریکی صحرائی کاهش و احتمالاً توسعه کارست و آبدهی افزایش می‌یابد.

مورد تفسیر قرار گرفتند. در این مقاله، تفسیرهای مربوط به شش سونداژ از میان سونداژهای داده برداری شده، که تیبیک آبخوان‌های کارستی منطقه می‌باشند و بر روی مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی قرار دارند ارایه شده است. با توجه به خصوصیات هیدرودینامیک سازندها، موقعیت چشمه‌ها و الگوی زهکشی آب زیرزمینی چهار پروفیل در یال جنوب‌غربی ناودیس سوسن بر روی آهک ایلام- سروک (مقاطع بر روی سونداژهای R در شکل ۲)، دو پروفیل در یال شمال شرقی ناودیس و حوالی پلانژ بر روی آهک ایلام- سروک (مقاطع بر روی سونداژهای T در شکل ۲) و دو پروفیل در آهک آسماری (مقاطع سونداژهای W در شکل ۲) جهت توموگرافی ژئوالکتریک در نظر گرفته شده‌اند. موقعیت این پروفیل‌ها در تراز ارتفاعی کم انتخاب گردید تا بتوان با حداکثر احتمال، وجود آب زیرزمینی در آهک‌ها را مشخص نمود.

تفسیر یک‌بعدی سونداژهای ژئوالکتریک

با نگاهی کلی بر روی تفسیر یک‌بعدی سونداژهای ژئوالکتریک منطقه سوسن (شکل ۵) مشخص می‌شود که منحنی‌های سونداژ سازند آسماری دارای مقاومت الکتریکی کمتر، شکل هموارتر، و دامنه مقاومت کمتر می‌باشند که می‌توان وجود آبخوان با آبدهی زیاد را بر روی آن با توجه به شیب ملایم کاهش مقاومت آبخوان مشخص نمود. افزایش مقاومت الکتریکی سازند آسماری در منطقه غیراشباع نیز



شکل ۵. تفسیر یک بعدی سونداژهای ژئوالکتریک منتخب منطقه سوسن. سونداژهای R در یال جنوب غربی ناودیس بر روی سازند ایلام- سروک، سونداژهای T در مجاورت دماغه ناودیس بر روی آهک ایلام- سروک و سونداژهای W در یال جنوب غربی ناودیس بر روی آهک آسماری داده برداری شده‌اند. محور افقی AB/2 یا معادل دو برابر عمق نفوذ و محور عمودی مقاومت الکتریکی است، خطوط قرمز منحنی مقاومت ظاهری مدل، خطوط مشکی منحنی مقاومت صحرایی داده برداری شده و خطوط آبی، لایه‌های تفسیر شده با ضخامت و مقاومت الکتریکی واقعی هستند (موقعیت سونداژها در شکل ۲ نشان شده است)

را با روش توموگرافی الکتریکی در دو بعد با دقت بیشتری تعیین نمود. تفسیر لیتوژئوالکتریک مقاطع توموگرافی شده با مبنای تغییرات نسبی دامنه مقاومت الکتریکی انجام شد، بدین صورت که سنگ آهک و دولومیت با مقاومت الکتریکی بالاتر نسبت به مارن در نظر گرفته شده‌اند. در مناطق آهکی خرد شده در صورتی که فضای بین شکستگی‌ها باز باشد نسبت به حالتی که فضای بین شکستگی‌ها توسط رسوبات پر شده می‌باشد، انتظار مقاومت الکتریکی بیشتری وجود دارد. حفرات در صورتی که در بخش غیر اشباع و خالی

توموگرافی دوبعدی ژئوالکتریک

چهار مقطع PR1 تا PR4 (سازند ایلام- سروک)، دو مقطع PT1 و PT2 (سازند ایلام- سروک) و دو مقطع PW1 و PW2 (سازند آسماری) به منظور ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی ناودیس سوسن، مورد توموگرافی ژئوالکتریک قرار گرفتند. در ناودیس سوسن به علت ماهیت کارستی منطقه، تفاوت خصوصیات ژئوالکتریکی قابل توجه و ابهاماتی در تفسیر یک بعدی مشاهده گردید. در این حال می‌توان مشخصات زیرسطحی منطقه

جنوب شرق به طول ۱۴۵۹ متر بر روی آهک ایلام - سروک داده برداری شده است و شامل سونداژهای R20 تا R35 می باشند. مقاومت الکتریکی مقطع از ۳۰ تا بیش از ۴۳۵ اهم متر متغیر می باشد. در مقطع مذکور لایه سطحی شامل سیلت و خرده سنگ به ضخامت یک تا پنج متر می باشد. در این مقطع حداکثر پتانسیل آب زیرزمینی در بازه ۲۰۰ تا ۲۸۰ متری وجود دارد که مقاومت الکتریکی آن حدود ۱۵۰ اهم متر است و تغییرات مقاومت الکتریکی بین منطقه غیراشباع و آبخوان ملایم است. در بازه ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متری منطقه ای با روند عمودی و مقاومت الکتریکی کم دیده می شود که مبین زون برشی منطقه گسل خورده می باشد. از بازه ۱۰۰۰ تا ۱۲۵۰ متری مقاومت الکتریکی آهک به حدود ۷۰ اهم متر می رسد که بیانگر حفره ای پر آب می باشد.

مقطع توموگرافی PR4 (شکل ۶) در امتداد شمال غرب- جنوب شرق به طول ۷۶۶ متر در حاشیه سازند ایلام- سروک قرار دارد که شامل سونداژهای R41 تا R50 می باشد. مقاومت الکتریکی مقطع ۳۱/۹ تا بیش از ۴۶۰ اهم متر متغیر می باشد. در مقطع مذکور لایه سطحی شامل سیلت و خرده سنگ به ضخامت یک تا پنج متر می باشد. با توجه به شکل، مقاومت آبخوان در کل طول این مقطع، بالا می باشد که نشان دهنده وجود آهک حفره دار یا آهک متراکم در این سری سونداژها می باشد. مقاومت کم در محل R41، به پهنه خردشده نسبت داده شده است. سه ناهنجاری در بازه های ۱۲۰، ۴۴۰ و ۵۶۰ متری پروفیل به صورت نقاط تمرکز با مقاومت بسیار زیاد دیده می شود که با توجه به تغییرات ملایم نسبت به زمینه به عنوان آهک با متراکم تفسیر گردد و توسعه کارست در این پروفیل کم می باشد. برخورد به مناطق حاوی آب زیرزمینی قابل توجه در این پروفیل دیده نمی شود. مقطع PT1 با طول ۲۰۵۲ متر منطبق بر سونداژهای T1 تا T11 در مجاورت پلانژ دماغه ناودیس سوسن به موازات امتداد لایه های سازند ایلام- سروک تهیه شده است. شکل ۷ این پروفیل را با اغراق عمودی ۱/۷ نشان می دهد. در محل مربوط به نقطه T10 (در متر از ۱۸۰۰ مقطع) چشمه SP8 (شکل ۱) لایه با مقاومت کمتر از ۲۰۰ اهم متر قرار دارد که از عمق حدود ۱۰۰ متر شروع می شود و می تواند

باشند، بیشترین مقاومت الکتریکی را در مناطق کارستی دارند. در صورتی که مناطق با توسعه کارستی زیاد در زیر سطح ایستابی و کاملاً پر از آب باشند، کمترین مقاومت الکتریکی را در مقاطع ژئوالکتریک دارا می باشند. مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک تهیه شده در ناودیس سوسن با در نظر گرفتن این مبانی، مدل زمین شناسی ممکن برای هر مقطع و تراز آب زیرزمینی احتمالی (که براساس تراز ارتفاعی نزدیکترین چشمه ها تقریب زده شده است) مورد تفسیر قرار گرفته است.

مقطع توموگرافی PR1 در ناودیس سوسن (شکل ۶) در امتداد شمالی- جنوبی به طول ۷۷۴ متر قرار دارد که شامل سونداژهای R8 تا R12 می باشند. مقاومت الکتریکی مقطع از ۱۳/۹ تا بیش از ۱۴۴ اهم متر متغیر می باشد. در مقطع مذکور لایه سطحی شامل سیلت و خرده سنگ به ضخامت یک تا پنج متر می باشد. مقاومت آبخوان در طرفین و مرکز مقطع، بین ۵۰ تا ۱۰۰ اهم متر می باشد که نشان دهنده وجود آبخوان کارستی با پتانسیل مناسب می باشد. در محل سونداژهای R9 و R11 نیز مقاومت الکتریکی در عمق بین ۱۰ تا ۱۵۰ اهم متر می رسد که مبین وجود کمتر آب زیرزمینی نسبت به بقیه مقطع می باشد.

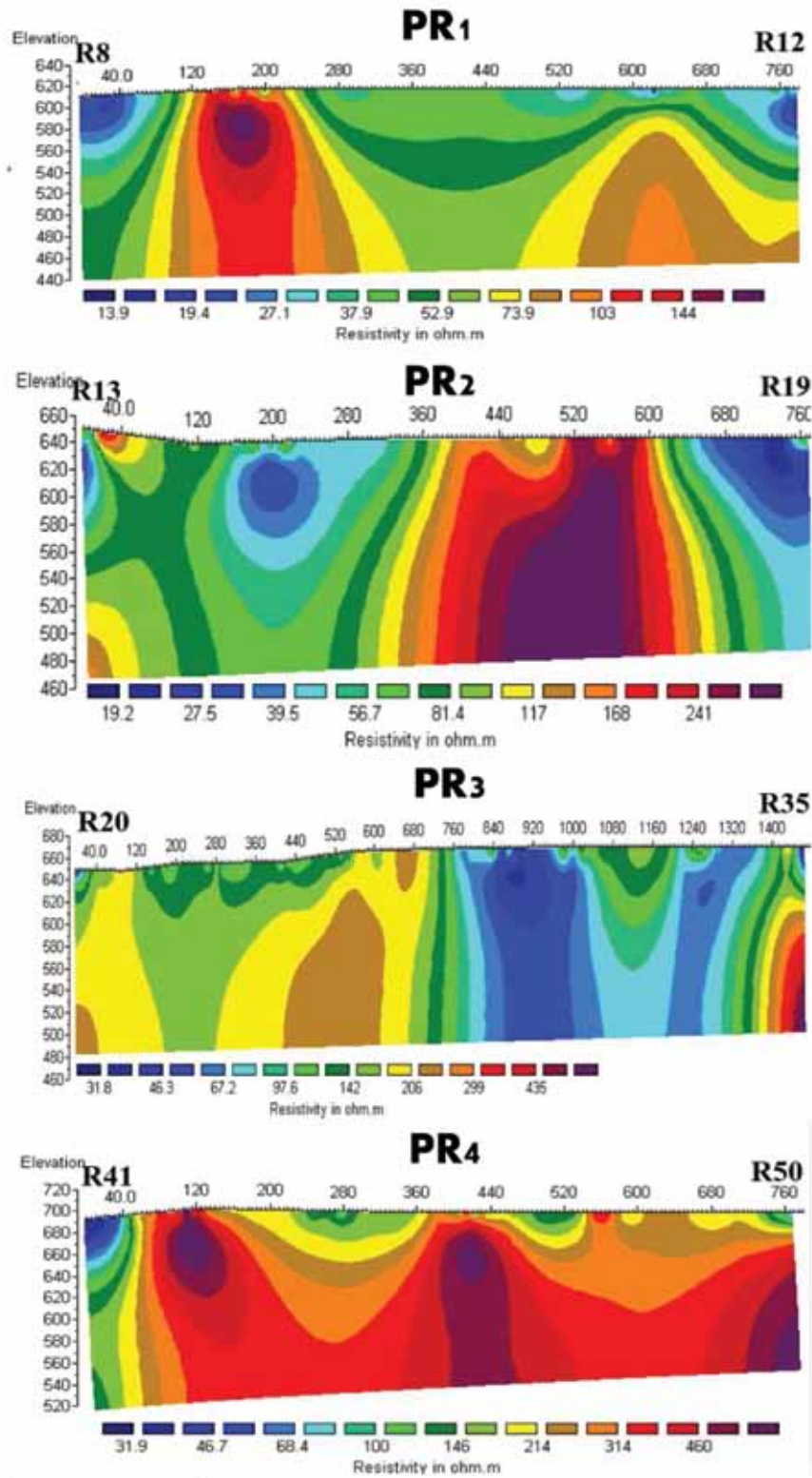
مقطع توموگرافی PR2 (شکل ۶) در امتداد شمال به جنوب به طول ۷۶۶ متر قرار دارد که شامل سونداژهای R13 تا R19 می باشند. مقاومت الکتریکی مقطع از ۱۹ تا بیش از ۲۴۱ اهم متر متغیر می باشد. در مقطع مذکور، لایه سطحی شامل سیلت و خرده سنگ به ضخامت یک تا سه متر می باشد. در بازه ۱۴۰ تا ۲۸۰ متری پروفیل مذکور، منطقه کارستی با پتانسیل آب زیرزمینی زیاد و مقاومت الکتریکی حدود ۱۰۰ متر قابل تشخیص است. در بازه ۴۴۰ تا ۶۶۰ متری در عمق آهک متراکم با مقاومت الکتریکی بیش از ۲۵۰ اهم متر وجود دارد که احتمالاً پتانسیل آب زیرزمینی در این منطقه کم است. در بازه های ۲۰۰ و ۷۰۰ متری، دو منطقه با مقاومت کمتر از ۱۰۰ اهم متر تا عمق ادامه می یابند که می تواند نمایان گر مناطق خردشده ای باشد که فضای میان شکستگی ها توسط رسوبات ریزدانه رسی پر شده است. مقطع توموگرافی PR3 (شکل ۶) در امتداد شمال غرب-

شدیدا خردشده باشد. افزایش عمق مقاومت الکتریکی تا حدود ۵۰۰ اهم متر افزایش می‌یابد که می‌تواند بیان‌گر متراکم شدن آهک باشد. لایه آهک متراکم با پتانسیل ضعیف آب زیرزمینی تا ۵۰۰ متری مقطع ادامه می‌یابد و از این عمق به بعد مقاومت الکتریکی به تدریج کاهش می‌یابد. احتمالاً یک گسل در فاصله حدود ۸۰۰ متر وجود دارد که دو لایه با جنس و پتانسیل آب زیرزمینی کاملاً متفاوت را در کنار هم قرار داده است که بر روی توموگرافی می‌توان به صورت مبهم، موقعیت ظاهری آن را با عمودی شدن پربندهای مقاومت الکتریکی در متر ۶۸۰ متری تشخیص داد.

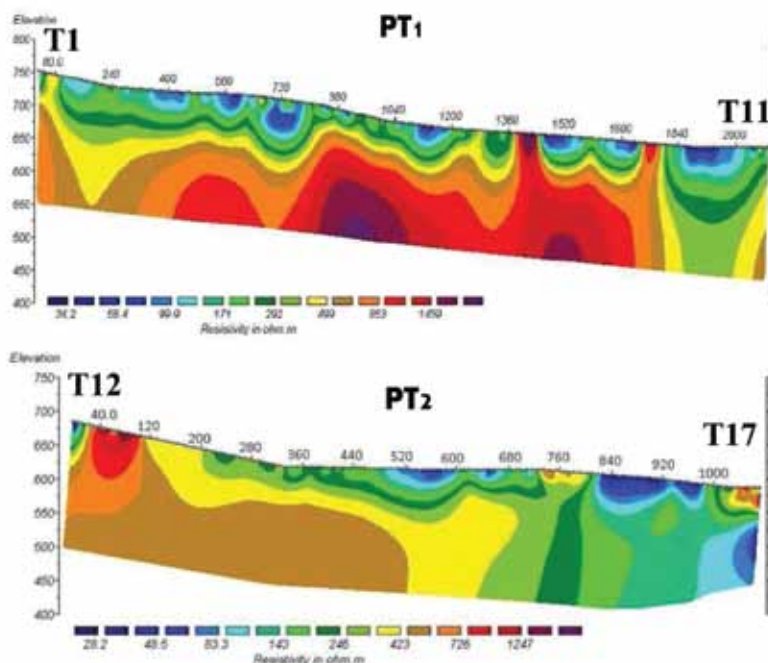
مقطع PW1 با طول ۷۵۶ متر منطبق بر سونداژهای W1 تا W7 می‌باشد (شکل ۸). به دلیل عدم اختلاف توبوگرافی در این مقطع، تاثیر توبوگرافی اعمال نشده است. این پروفیل به موازات امتداد لایه‌های سازند آسماری در یال جنوب غربی ناودیس سوسن قرار گرفته است. در فاصله صفر تا حدود ۴۰ متری و از سطح زمین تا آخرین عمقی که پروفیل نشان می‌دهد مقاومت ویژه کم و بیان‌گر مارن می‌باشد. در فاصله حدود ۵۸۰ تا ۷۲۰ متر و از سطح زمین تا عمق حدود ۴۰ متری نیز مقاومت ویژه کم و احتمالاً از جنس مارن می‌باشد ولی از عمق مذکور مقاومت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده برخورد به آهک آسماری است. در این بازه، مقاومت الکتریکی در عمق بیش از ۸۰ متری حدود ۱۰۰ اهم متر می‌باشد که بیان‌گر پتانسیل زیاد آب زیرزمینی آهک آسماری در این بازه است. در بخش میانی پروفیل و در بازه ۱۰۰ تا ۳۵۰ متری، مقاومت ویژه زیاد و به بیش از ۴۰۰ اهم متر می‌رسد. این دامنه مقاومتی در عمق کاهش نمی‌یابد و می‌تواند نشان‌دهنده نبود آب زیرزمینی قابل توجه در عمق باشد.

بیان‌گر سنگ آهک شدیدا خردشده باشد که احتمالاً آب این چشمه را تامین می‌کند. تغییرات زیاد مقاومت ویژه در سطح مقطع به وضوح مشاهده می‌شود که می‌تواند مربوط به واریزه آهکی باشد. به دلیل آن که این پروفیل به موازات امتداد لایه‌ها می‌باشد، ضخامت این واریزه‌ها تقریباً یکسان است. در فاصله ۸۰۰ تا ۱۷۰۰ متر و در عمق یک پهنه بزرگ با مقاومت ویژه بسیار بالا وجود دارد که به طرف مرکز این پهنه، مقاومت ویژه افزایش می‌یابد و می‌تواند بیان‌گر سنگ آهک یا دولومیت بسیار متراکم باشد. از ابتدای پروفیل تا ۸۰۰ متری، برخورد به آهک در عمق حدود ۴۰ متری رخ می‌دهد و در عمق بیش از ۱۰۰ متر، مقاومت الکتریکی به حدود ۸۰۰ اهم متر می‌رسد که بیان‌گر عدم توسعه کارست و وجود آب زیرزمینی کم تا متوسط در ذخیره درزه و شکافی است.

مقطع PT2 با طول ۱۰۶۸ متر منطبق بر سونداژهای T12 تا T17 است که در مجاورت پلانژ دماغه ناودیس سوسن به موازات امتداد لایه‌های سازند ایلام- سروک تهیه شده است. شکل ۷ این مقطع را با اغراق عمودی ۱/۱ نشان می‌دهد. به دلیل قرار گرفتن چندین چشمه در این راستا و چندین شکستگی در مجاورت این مقطع، توموگرافی الکتریکی مقاطع PT حائز اهمیت است. در بعضی بخش‌ها از سطح زمین تا عمق کم، حدود ۵۰ متری، لایه‌هایی با تغییرات زیاد مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که می‌تواند بیان‌گر واریزه‌های سطحی و مارن باشند. چشمه SP۶ در ابتدای مقطع و در محل تماس، دو پهنه با مقاومت کم (آهک خردشده آب‌دار) و مقاومت بالا (آهک متراکم) قرار گرفته است. آب این چشمه از منطقه‌ای تا عمق حدود ۵۰ متری تامین می‌شود که می‌تواند بیان‌گر سنگ‌های آهکی



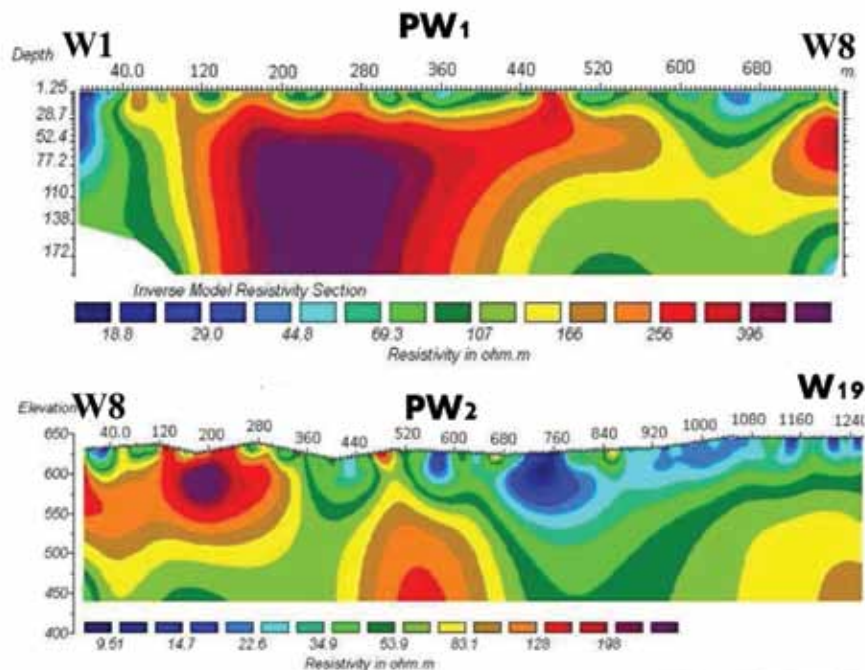
شکل ۶. توموگرافی ژئوالکتریک پروفیل‌های PR در یال جنوب غربی ناودیس سوسن، آهک ایلام- سروک (ارتفاع برحسب متر می‌باشد)



شکل ۷. توموگرافی ژئوالکتریک پروفیل‌های PT در مجاور پلانژ دماغه ناودیس سوسن، آهک ایلام- سروک (ارتفاع برحسب متر می‌باشد)

لایه‌های آبرفتی در نزدیک سطح زمین به‌وضوح مشخص است که این لایه‌ها در اکثر بخش‌ها مقاومت کمی را نشان می‌دهند و بیان‌گر لایه‌های مارن و کمی خرده‌آهک می‌باشند و در فاصله حدود ۷۶۰ متری بیش‌ترین ضخامت را دارند. به‌نظر می‌رسد، در این پروفیل به‌جز بخش کوچکی در بازه ۵۰۰ تا ۶۰۰ متری، در بقیه مقطع می‌توان مکان‌های مناسبی جهت حفر چاه پیشنهاد نمود. بهترین نقاط برای حفر چاه فاصله‌های حدود ۲۰۰ و ۱۱۰ متری می‌باشند. در این نقاط با توجه به مقادیر مقاومت ویژه انتظار بر آن است که در عمق، سازند آسماری با پتانسیل آب زیرزمینی بالا وجود داشته باشد.

مقطع PW2 با طول ۱۲۵۷ متر منطبق بر سوندازهای W8 تا W19 می‌باشد. در این مقطع به‌دلیل اختلاف توپوگرافی، تاثیر توپوگرافی اعمال شده است. این پروفیل به موازات محور لایه‌های سازند آسماری در یال جنوب غربی ناودیس سوسن قرار گرفته است. شکل ۸، مقطع توموگرافی این پروفیل را با اغراق عمودی ۱/۳ نشان می‌دهد. ناهنجاری‌های شدید مقاومت الکتریکی در این مقطع، نمایان‌گر شاخص توسعه کارست و پتانسیل زیاد آب زیرزمینی در حفرات می‌باشد. در فاصله ۱۲۰ تا ۲۸۰ متری و از سطح زمین تا ارتفاع حدود ۵۵۰ متری، مقاومت ویژه بالا است که می‌تواند بیانگر یک پهنه آهکی حفره‌دار باشد. تاثیر



شکل ۸. توموگرافی ژئوالکتریک پروفیل های PW در یال جنوب غربی ناودیس سوسن، آهک آسماری (ارتفاع و عمق برحسب متر می باشند)

نتیجه گیری

رو به بالای آب زیرزمینی و در نتیجه ظهور چشمه ها در این سازند در منطقه سوسن رخ دهد. دامنه تغییرات مقاومت ژئوالکتریک در آهک ایلام- سروک نسبت به آهک آسماری بیشتر ولی ناهنجاری های لیتوژئوالکتریک متناسب به مناطق کارستی در آن کمتر است. گسل ها و شکستگی های اصلی نقش بسیار مهم تری نسبت به چین خوردگی در هیدروژئولوژی کارست سوسن ایفا می نمایند. موقعیت ظهور چشمه پرآب چال شه (با آب دهی متغیر از ۱۰۰ تا بیش از ۴۰۰۰ لیتر در ثانیه) در مجاورت گسل تنگ رشید، و چشمه های ده حوض و دانیال (با آب دهی متغیر از ۵۰ تا بیش از ۱۰۰۰ لیتر در ثانیه) در مجاورت شکستگی های پلانژ دماغه ناودیس، می تواند موید این مسئله باشد.

از لحاظ هیدروژئولوژی، سازندهای ایلام- سروک و آسماری را می توان به عنوان مهم ترین مخازن آب زیرزمینی در محدوده ناودیس سوسن در نظر گرفت. هر چندکه وجود چشمه های با آب دهی زیاد در سازند ایلام- سروک و نبود چشمه بزرگ در آهک آسماری، می تواند نمایان گر پتانسیل

منحنی های سونداژ سازند آسماری دارای مقاومت الکتریکی کمتر، شکل هموارتر و دامنه مقاومت کمتر می باشند که می توان وجود آبخوان با آب دهی زیاد را بر روی آن با توجه به شیب ملایم کاهش مقاومت آبخوان مشخص نمود. آهک ایلام- سروک، تغییرات پرشیب مقاومت الکتریکی از بخش بدون آب تا بخش آبدار، تفسیر یک بعدی سونداژها را مشکل ساخته است. در اکثر سونداژهای آهک ایلام- سروک، منحنی مقاومت الکتریکی صحرایی در عمق رو به بالا است در حالی که در آهک آسماری با افزایش عمق، مقاومت الکتریکی صحرایی کاهش و احتمالاً توسعه کارست و آب دهی افزایش می یابد.

تفسیر مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی مشخص نمود که آهک ایلام- سروک در مناطق خردشده، پتانسیل آب زیرزمینی قابل توجهی دارند و توسعه کارست و حفرات در آن ها نسبت به آهک آسماری کمتر است. وجود آهک متراکم ایلام - سروک در مجاور پهنه های خردشده ای که هدایت آب زیرزمینی را برعهده دارند، باعث شده است که حرکت

سپاسگزاری

لازم است از معاونت مطالعات پایه و طرح‌های جامع منابع آب سازمان آب و برق خوزستان و مدیریت مطالعات پایه که حمایت مالی عملیات داده‌برداری صحرایی این تحقیق را بر عهده داشته اند، صمیمانه سپاسگزاری شود.

منابع

- زیدعلی نژاد، ن.، ۱۳۹۰. ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در کارست سوسن، شمال ایذه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۲۰.

- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۵. نقشه زمین‌شناسی کوه‌آسماری و کوه‌کمرستان. مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران.

- مهندسین مشاور کمیاب گستر جنوب، ۱۳۹۰. مطالعات ژئوالکتریک محدوده ده‌شیخ - سوسن. سازمان آب و برق خوزستان.

- موسسه گیتاشناسی، ۱۳۸۸. اطلس راه‌های ایران.

- ناصری، ح.ر.، علیجانی، ف. و میرزایی، س.ی.، ۱۳۸۷. توموگرافی ژئوالکتریک کارست تاقدیس آسماری. مجله علوم دانشگاه شهید چمران، ۱۹، ب، ۱۱۰-۱۰۰.

- ناصری، ح.ر.، علیجانی، ف. و نخعی، م.، الف-۱۳۹۱. اکتشاف آب زیرزمینی در مناطق کارستی جنوب باختر ایذه با استفاده از توموگرافی ژئوالکتریک. فصلنامه علوم زمین، ۸۶، ۱۱۱-۱۰۷.

- ناصری، ح.ر.، علیجانی، ف. و نخعی، م.، ب-۱۳۹۱. مقایسه اثرات خشکسالی بر هیدروژئولوژی کارست سازندهای آسماری و ایلام - سروک در جنوب غرب ایذه. مجله پژوهش آب ایران، ۶، ۱۱، ۴۵-۳۵.

- Ford, D. and Williams, P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley and Sons Publications, 562.

- Geotomo Software, 2009. Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. Geoelectrical Imaging 2D and 3D, Malaysia.

- Goldscheider, N. and Drew, D., 2007. Methods in Karst Hydrogeology. International

بالای آب زیرزمینی در سازند ایلام- سروک نسبت به آهک آسماری باشد، ولی نتایج بررسی‌های هیدروژئوالکتریک مشخص نمود که آبخوان آهکی آسماری نیز در ناودیس سوسن وضعیت بسیار مناسبی دارد. در سازند ایلام - سروک، چشمه‌ها از طریق مناطق خردشده تخلیه می‌شوند و در عمق، آهک متراکم می‌شود. مقاومت الکتریکی زیادتر سازند ایلام - سروک در مناطقی که آهک متراکم است، می‌تواند نمایان‌گر تخلخل زمینه‌ای کم آهک مذکور باشد، در حالی که آهک آسماری به دلیل تخلخل ذخیره‌ای بیشتر، مقاومت الکتریکی کمتری دارد. شاید بتوان قابلیت‌ذخیره بیشتر آهک آسماری را در عدم سرریز این آبخوان کارستی در منطقه سوسن موثر دانست.

با این حال، الگوی آب زیرزمینی در مدل تفهیمی ارائه شده از لایه‌بندی بسیار متاثر است و به همین دلیل ساختارهای چین اثر اصلی را بر الگوی آب زیرزمینی دارند. فروافتادگی ناودیس سوسن مسیر جریان آب زیرزمینی اصلی را تشکیل می‌دهد، در حالی که محور تاقدیس‌های پیون و کمستان به‌عنوان خط تقسیم آب زیرزمینی با تراز بیشتر سنگ‌کف نفوذناپذیر (احتمالاً شیل کزدمی) نسبت به تراز دامنه چین خوردگی عمل می‌کنند.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که داده‌برداری با آرایه شلومبرژه در مقاطع با فاصله سونداژ کمتر از ۵۰ متر در مناطق کارستی به دلیل سهولت داده‌برداری صحرایی، حساسیت نسبت به تغییرات مقاومت الکتریکی بین حفرات و شکستگی‌ها، زمینه آهکی و عمق نفوذ زیاد نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد. براساس یافته‌ها، قدرت توموگرافی ژئوالکتریک در نمایش حفرات و مجاری کارستی و تعیین آبدار بودن و یا خشک بودن آن‌ها، شناسایی توده‌های به هم پیوسته آهک متراکم و ارائه تصویر زیرسطحی از سیستم کارست عمقی مشخص شده است. در مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک برخلاف تفسیرهای یک بعدی، محدودیت تعریف لایه‌ها وجود ندارد و این مهم به‌ویژه در شناسایی زیرسطحی مناطق کارستی که تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی به تناوب رخ می‌دهد، می‌تواند کمک شایانی نماید.

- Association of Hydrogeologists, editor book, Taylor and Francis Group, 264 .
- Gowd, S., 2004. Electrical resistivity surveys to delineate groundwater potential aquifers in Peddavanka watershed, Anantapur District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Geology Journal*, 46, 118-131.
 - Herold, T., Jordan, P. and Zwahlen, F., 2000. The influence of tectonic structures on karst flow patterns in karstified limestones and aquitards in the Jura Mountains, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 93, 349-362.
 - Kaufmann, G., and Romanov, D., 2009. Geophysical investigation of a sink in the northern Harz foreland (North Germany). *Environmental Geology Journal* 58, 2, 401- 405.
 - Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131- 152.
 - Nassery, H.R., Alijani, F. and Nakhaei, M., 2013. The comparison of hydrodynamic characteristics of karst aquifers: application on two karst formations in Zagros (Asmari and Ilam-Sarvak), southwest Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s12517-013-1017-z, 7, 11, 4809-4818.
 - Nathalie, V., David, J., Martin, H., Simon, L., Philippe, A. and Pezard, L., 2007. Characterizing flow zones in a fractured and karstified limestone aquifer through integrated interpretation of geophysical and hydraulic data., *Hydrogeology Journal*, 15, 225-240.
 - Nguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E. and Loke, M.H., 2005. Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *Journal of Applied Geophysics*, 57, 4, 260-277.
 - Skinner, D. and Heinson, G., 2004. A comparison of electrical and electromagnetic methods for the detection of hydraulic pathways in a fractured rock aquifer, Clare Valley, South Australia. *Hydrogeology Journal*, 12, 5, 576-590.
 - Sultan, S.A. and Monteiro Santos, F.A., 2008. 1D and 3D resistivity inversions for geotechnical investigation. *Journal of Geophysics Engineering*, 5, 1-11.
 - Zonge, K., Wynn, J. and Urquhart, S., 2005. Resistivity, induced polarization, and complex resistivity. *Investigations in Geophysics*. 13, 265- 299.