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

حمیدرضا ناصری^(و^۳)، 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

چکیدہ

منطقه کارستی سوسن بهصورت ناودیس یلانژ 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 کارست شدگی، 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 بهصورت 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 الكتريكي كمتر، شكل هموارتر و دامنه مقاومت كمتر نسبت به سازند ايلام - سروك ميباشند كه مي توان وجود آبخوان با آبدهی زیاد را بر روی آن با توجه به شیب ملایم کاهش مقاومت آبخوان مشخص نمود. تفسیر مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی مشـخص نمود که آهک ایلام- سروک در مناطق خردشده یتانسیل 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 یهنههای 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 بررسے های هیدروژئوالکتریک مشخص کرد که آبخوان آهکی آسماری علی رغم نبود چشمه مهم در آن در ناودیس سوسین، وضعیت بسیار مناسبی دارد. در سازند ایلام - سروک، چشمهها از طریق مناطق خردشده تخلیه می شوند. آهک های این سازند در عمق متراکم می باشند که می تواند نمایان گر تخلخل زمینه ای کم آهک مذکور باشد، در حالی که به دلیل تخلخل ذخیره ای بیشتر، مقاومت الکتریکی آهک آسماری كمتر مى باشد.

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 زمین شناسی تعیین میکنند (Goldscheider and Drew, 2007). نقش سازندهای زمین شناسی بستگی به خلوص و انحلال پذیری 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 مناطـق خردشـده متاثر از گسـلها و شکسـتگیهای بزرگ، جریان ترجیحی متمرکز رخ داده و به مرور زمان انحلال و توسعه کارست تشدید شود، هر چند در بعضی موارد گسلها بهعنوان محدودكنندههای هیدرولیكی عمل مینمایند (Herold et al., 2000). ساختارهای چین خورده، مسیرهای اصلی جریان آب زیرزمینی را در آبخوان های کارستی مشخص مینمایند. جریان آب کارستی در ناودیس هـا به مـوازات روند تاقدیس و به سـمت محور متمرکز می شود، در حالی که محور تاقدیس ها اغلب به عنوان خط تقسیم محلی آب زیرزمینی عمل میکنند و آبهای کارســتی تمایل دارند تا در امتـداد پالهای تاقدیس تمرکز یابند (Goldscheider and Drew, 2007).

آبخوان های 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 انجام شده 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 مجرایی غالب و ظرفیت ذخیره کم تشخیص داده شده است مجرایی غالب و ظرفیت ذخیره کم تشخیص داده شده است این حال، وجود چشمههای کارستی دائمی با آبدهی زیاد که از این حال، وجود چشمههای کارستی دائمی با آبدهی زیاد که از سازند ایلام- سروک در منطقه سوسن، واقع در ۲۰ کیلومتری شمال ایذه تخلیه می شوند، نمایانگر وجود آبخوان کارستی با ظرفیت ذخیره زیاد در این سازند در مقایسه با سازند آسماری

هیدروژئوالکتریک آهکهای آسـماری و ایلام- سـروک در ناودیس سوسن میتواند کمک شایانی در شناخت پتانسیل آب زیرزمینی آبخوان های کارستی نماید. محققین بسیاری از روشهاى ژئوالكتريك براى تعيين مشخصات هيدروژئولوژى آبخوان های کارستی استفاده کردهاند (Gowd, 2004) .Skinner and Heinson, 2004; Nathalie et al., 2007) امروزه با توسعه روشهای توموگرافی، شاخت 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 (Nguyen et al., 2005; Zonge et al., 2005; است Sultan and Monteiro Santos, 2008; Kaufmann and Romanov, 2009. توموكرافي مقاومت الكتريكي أشامل وارونسازی مبتنی بر مدلسازی در شبکه دوبعدی دادههای مقاومت الكتريكي مي باشد (Loke and Barker, 1996). ناصری و همکاران (۱۳۸۷) توموگرافی ژئوالکتریک را بهعنوان روش مكمل مطالعات هيدروژئولوژي كارست توصيه كردهاند وبا مقایسه نتایج حاصل از مطالعات زمین شناسی سطحی و ژئومورفولوژی با مطالعات ژئوالکتریک در تاقدیس آسماری، عدم همبستگی بین نمایان گرهای سطحی و کارستشدگی عمقى را تعيين نمودهاند.

در این مقاله، به منظ ور تعیین دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی آهکهای خشک و آبدار، میزان کارست شدگی، 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 شلومبرژه در مجاورت حد تماس آهکها با آبرفت دادهبرداری شده و تفسیرهای یک بعدی و دوبعدی در مقاطع انتخابی شده و تفسیرهای یک بعدی و دوبعدی در مقاطع انتخابی مورد تحلیل قرار گرفته است. دشت سوسن با مساحت حدود ممال 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

میانگین بارش سالیانه ۸۰۰ میلیمتر، درجه حرارت ۱۹ درجه سانتیگراد و متوسط تبخیر سالیانه ۱۶۰۰ میلیمتر دارای آب و هوای نیمه مرطوب می باشد.

زمینشناسی و هیدروژئولوژی

منطقه مورد مطالعه بخشى از پهنه زاگرس چين خورده و پهنه زاگرس مرتفع بهشمار میرود. زمین شناسی ساختمانی منطقه متأثر از زمین ساخت یهنه ایذه می باشد. تاقدیس ها و ناودیس های موازی با هم با روند شهال غربی - جنوب

محور از پلانژ شـمال غربی خارج می شود. دشت سوسن با شرقی، گسـلهای عادی و معکوس، سیمای پریکلین در آهکها، تاقدیسهای پشت نهنگی و ناودیسهای باز از جمله ویژگیهای منطقه سوسن میباشند. سازندهای زمین شناسی رخنمون یافته بهترتیب از قدیم به جدید شامل ســنگ آهــک و دولومیت داریـان- فهلیان، مارن و شــیل کژدمی، سینگ آهیک و دولومیت ایلام- سروک، مارن و شیل پابده- گورپی و سنگ آهک و دولومیت آسماری- جهرم می باشند (شکل ۲).



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



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

گسل های راستالغز راستگرد اغلب در سازند ایلام- سروک دارای درز و شکستگی و حفرات انحلالی فراوان می باشند در محدوده مورد مطالعه مشاهده می شوند (شکل۲). روند کلی و میتوانند پتانسیل آب زیرزمینی بالایی داشته باشند. گسل های منطقه شمال غربی- جنوب شرقی است، در حالی که سازندهای شیل و مارنی کژدمی و پابده- گورپی را میتوان 🤍 گسل های با روند عمود بر آن ها نیز وجود دارند که بازشدگی واحدهای با اهمیت هیدروژئولوژیک ناچیز در نظر گرفت. بیشتری نشان میدهند. روند رودخانه کارون در منطقه بهطور رسوبات آبرفتی دشت سوسن از رسوبات دانه درشت تا 🦳 کلی از محور ناودیس تبعیت می نماید، هر چند که تغییرات ناگهانی مسیر رودخانه، احتمالا ناشی از شکستگیها است، دیده میشـود. ناودیس سوسن در میان دو تاقدیس پیون در غرب و کمستان در شرق واقع شده است.

ســازندهای آهکــی ایلام- سـروک و آســماری- جهرم رسوبات دانه ریز تپهماهوری میباشند. رسوبات دانهدرشت شــامل ماسه، شن و قلوهســنگهایی 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 چشـمههای موجود در محدوده مورد مطالعه از سازند ایلام- سروک منشا میگیرند. جدول ۱ دبی، درجه حرارت و هدایت الکتریکی این چشمهها که در دو فصل خشک و مرطوب در سال ۱۳۹۰ اندازه گیری شدهاند را نشان میدهد. چشمه سیاه چال جریان آب زیرزمینی افشان را در سیستم کارست نشان میدهد ولی بقیه چشمهها، سیستم غالب مجرایی را نشان میدهند و سازند ایلام- سروک مخصوصا در نزدیکی این چشـمهها پتانسیل آب زیرزمینی مناسبی دارد (زیدعلی نژاد، ۱۳۹۰). چشمههای 2P3،SP2 مالایـه ۱۹-۹۰ کاملا خشـک بودند. شـکل ۳ تصاویری از مطالعـه ۱۹-۹۰ کاملا خشـک بودند. شـکل ۳ تصاویری از کارنها و غارها از اشکال ژئومورفولوژیک کارست موجود در محدوده مورد مطالعه در سازند آسماری، در یال شمال شرقی ناودیس می باشند. 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 شامه زردی (SP8) و در مجاورت دماغه ناودیس انجام می شود، ولی در یال جنوب غربی تخلیه عمده از طریق چشمه چال شه (SP1) با فاصله از پلانژ ناودیس و در حوالی تنگ رشید رخ می دهد. به دلایلی همچون بیشتر بودن مساحت رخنمون، دارا بودن چشامهای پرآب و شکستگیهای بزرگ انتظار بر آن

جدول ۱. دبی، دما و هدایت الکتریکی برای چشـ مههای مهم موجود در منطقه سوســن (دبی بر حسـب لیتر بر ثانیه، دما برحسب درجه سانتیگراد و هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر سانتیمتر میباشد)

فصل مرطوب سال آبی ۹۱-۹۰			فصل خشک سال آبی ۹۱-۹۱			
هدايت الكتريكي	دما	دبى	هدايت الكتريكي	دما	دبى	چسمه –
۵۱۶	۱۹	۱۰۰۰	۳۹۶	19/19	٨	چال شه (SP۱)
۴۳۵	۲.	٨٠٠	۳۸۹	۲۳/۰	۵۰	ده حوض (SP۶)
۴۳۸	١٩	۴	417	۲۲/۰	۴.	آب دانیال (SP۷)
44.	۲۲	18.	47.	۲۴/۰	٣٠	شلمه زردی (SPA)



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

خصوصیات هیدرو ژئوالکتریک سازندهای آسماری...

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 سیستم های

کارستی محدوده نشان میدهد. ضخامت زیاد لایههای نفوذناپذیر و تفاوت قابل ملاحظه بین نفوذپذیری آبخوان و

لايههای نفوذناپذير باعث ايجاد الگوی آب زيرزمينی بهموازات

لایهبندی می شود. بنابراین، الگوی آب زیرزمینی در مدل

مفهومی ارائه شده از لایهبندی بسیار متاثر است و به همین

دلیل ساختارهای چین، اثر اصلی را بر الگوی زهکشی آب زیرزمینی دارند. فروافتادگی ناودیس سوسان مسیر جریان آب زیرزمینی اصلی را تشاکیل می دهاد، در حالی که محور تاقدیس های پیون و کمساتان به عنوان خط تقسایم آب زیرزمینی در پهنه های کارساتی بالاتر عمل می کنند. جهت جریان آب زیرزمینی نیز با استفاده از تراز نقاط تخلیه اصلی سیساتم کارست یعنی چشمه ها تعیین شد. تراز ارتفاعی چشمه های کارساتی در ناودیس سوسن که نمایانگر سطح آب کارست می باشد، بالاتر از رودخانه کارون است.



دادهها و روش تحقیق

بررسیهای ژئوالکتریک جهت تشخیص خصوصیات هیدروژئولوژی در بخشهای مختلف سازندهای کارستی آسماری و ایلام- سروک 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 مطمئن بهطور مرتب مورد بازبینی واقع گردید. بهمنظور حصول اطلاعاتی در باره ضخامت و مقاومت کارست

زیرسطحی عمیق، حداکثر فاصله الکترودی جریان بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر انتخاب شد.

دادههای اندازه گیری شده پروفیل های دوبعدی مرتب شدند و به شکل شبه مقاطع مقاومت الکترودی منحنی بندی شدند. شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری فقط دید عمومی از توزیع مقاومت زیر سطحی به دست می دهند و به دلیل هموار شدگی داده ها، تغییرات شدید مقاومت الکتریکی سنگ ها و تاثیر آرایه الکترودی بر اندازه گیری مقادیر مقاومت، نمی توانند تصویر واضحی از زیرزمین ارائه نمایند (ناصری و همکاران، الف-۱۳۹۱). این بدان معنی است که آرایه های هندسی الکترودی مختلف، شبه مقاطع متفاوتی حاصل می کنند. جهت ارایه بهتر و واقعی تر توزیع

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 ارايه بهتر و واقعى تر توزيع مقاومت الكتريكي زيرسطحى، مىبايست معكوسسازى شبهمقاطع انجام شـود. چندین روش تفسـیر، شـامل روشهـای نموداری (دستی) و عددی برای تفسیر دادههای یک بعدی ژئوالکتریک وجود دارد. تفسیرهای انجامشده در این تحقیق براساس منحنیهای استاندارد سه/ چهار لایهای بهمنظور تخمین اولیه فرآیند معکوس سازی در نرم افزار IPI2WIN 2001 انجام شده است. برنامه IPI2WIN با تعیین ساختار خودکار منحنیهای عمق پیمایی مقاومت الکتریکی و تعیین منحنیهای نظری منطبق با دادههای صحرایی، مقاومت حقیقی و ضخامت لایههای زیرسطحی را تعیین مینماید. پـس از عملیات صحرایـی ژئوالکتریـک، دادههای میدانی مقاومت الکتریکی به رایانه انتقال داده شد و به فرمت قابل قبول بـراى نرمافزارهاى توموگرافـى الكتريكى مرتب شد. مدل سازی مقاومت الکتریکی معکوس با استفاده از نرمافـزار (Geotomo Softwatre, 2009) نرمافـزار انجام گردید و خروجی ها به صورت مقاطع عرضی در مدل دو بعدی بهدست آمد. دادههای حاصل از VES جهت تهیه سه مقطع ژئوالکتریکی برای شناخت خصوصیات زیرسطحی سازندهای کارستی در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد. بدین منظور دادههای یک بعدی نیز به فرمت قابل قبول برای نرمافزار RES2DINV درآمد و ســيس توموگرافی مقاومت الکتریکی بر روی آن ها انجام گردید. با توجه به خصوصیات هیدرودینامیک سازندها، موقعیت چشمهها و الگوی زهکشی آب زیرزمینی، چهار پروفیل در یال جنوب غربی ناودیس سوسین 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 سـونداژهای در نظر گرفته شـده در هر مقطع (که در بحث آمده است)، در شکل ۲ ارائه شده است.

تشـخیص کانالهای با جریان سریع آب در محیطهای كارستى مشكل است و نيازمند دقت دادهبردارى الكتريكي می باشد. حفرات خشک که اغلب بالای سطح ایستابی قرار دارند، به صورت ناهنجاري با مقاومت الكتريكي قابل تشخيص می باشند. از میان همه تکنیکهای تصویر برداری زیر سطحی، دادهبرداری مقاومت الکتریکی دوبعدی و سهبعدی در دهه اخیر به طور فزاینده ای برای اهداف زیست محیطی، آب شناسی و زمین شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. بهمنظور ارائه تصویر مناسب از زیرزمین، می ایست شبه مقطع دادههای مقاومت الكتريكي با استفاده از روش معكوسسازي وارون گردند. این بررسےها معمولاً توموگرافی مقاومت الکتریکی نامیده میشوند. پیشرفتها در این روش بهصورتی است کـه دادههای مقاومت الکتریکی در طی چند روز جمع آوری و در چند ساعت مورد پردازش قرار می گیرند. در نتیجه، توموگرافی مقاومت الکتریکی بهعنوان ابزاری ارزشـمند در مطالعات زيرسطحي كارست شناخته مي شود. اصول روش توموگرافی الکتریکی شامل تقسیمبندی سطح دو بعدی به تعدادی سلول بهمنظور تعیین مقاومت درون هر سلول می باشد به طوری که بتوانند پاسخ مدل را به خوبی با داده های اندازه گیری شده مطابقت دهند. در یک تجسس دوبعدی ERT، دادههای میدانی در طول یک مقطع به صورت شبهمقاطع مقاومت الكتريكي ظاهري جمع آوري مي شوند و توزيع مقاومت الكتريكي واقعى زيرسطحي بهوسيله فنون معکوس سازی بهدست می آید. در مناطقی همانند نواحی کارستی که ساختارهای مقاومت الکتریکی پیچیدهای وجود دارد، توموگرافی الکتریکی دوبعدی و مدل های حاصل از آن ممکن است با ابهامات قابل توجهی همراه باشد که در این حال می توان با صحت سنجی مقاطع ژئوالکتریک با یافته های زمین شناسی 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)

^{1.} Vertical electrical sounding or VES

مورد تفسیر قرار گرفتند. در این مقاله، تفسیرهای مربوط به شش سونداژ از میان سونداژهای داده برداری شده، که تیپیک 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 ایال جنوبغربی ناودیس سوسن بر روی آهک ایلام- سروک (مقاطع بر روی سوسن بر روی آهک ایلام- سروک ایلام- سروک (مقاطع بر روی سونداژهای T در شکل ۲)، دو پروفیل 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 پروفیل ها در تراز ارتفاعی کم انتخاب گردید تا مشکل ۲ حداکثر احتمال، وجود آب زیرزمینی در آهکها را مشخص نمود.

تفسير يكبعدي سونداژهاي ژئوالكتريك

با نگاهی کلی بر روی تفسیر یک بعدی سونداژهای ژئوالکتریک منطقه سوسن (شکل ۵) مشخص می شود که منحنی های سونداژ سازند آسماری دارای مقاومت الکتریکی کمتر، شکل هموارتر، و دامنه مقاومت کمتر می باشند که می توان 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

ملایم می باشد و حداکثر مقاومت الکتریکی در آن همواره کمتر از ۲۰۰ اهممتر است. در آهک ایلام- سروک، تغییرات يرشيب مقاومت الكتريكي از بخش بدون آب تا بخش آبدار، تفسیر یکبعدی سونداژها را مشکل ساخته است. مقاومت آهک خشـک ایلام- سروک در حالت خردشـده حدود ۶۰۰ تـا ۲۰۰ اهممتر و در حالت متراکم تا بیـش از ۱۰۰۰ اهممتر می سد. مقاومت الکتریکی لایه ای آبدار که عموما 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 - سـروک، بهسختی بخش آبدار تفسـیر می شود. به طور مثال در سونداژ T11 که مجاور دو چشمه با آبدهی زیاد واقع شـده است، تشخیص پهنه خردشده آبدار که در عمق کمتر از ۵۰ متری قرار دارد از آهک متراکم زیرین به سختی ممکن می باشد، و شاید در صورتی که چشمه ها به عنوان شاخص آب زیرزمینی در تفسیر مورد استفاده قرار نمی گرفت، این سونداژ بهعنوان منطقه با پتانسیل ضعیف آب زیرزمینی در نظر گرفته می شد. به طور مشابه، سونداژ R34 که در مجاورت تنگ رشید و در بالادست چشمه بزرگ چالشه واقع شده است، نیز وجود آب زیرزمینی را در تفسیر یک بعدی مشخص نمی نماید. در اکثر سونداژهای آهک ایلام- سروک، منحنی مقاومت الکتریکے صحرایے در عمق رو به بالا است در حالی که در آهك آسماري با افزايش عمق، مقاومت الكتريكي صحرايي کاهش و احتمالا توسعه کارست و آبدهی افزایش مییابد.



شــکل ۵. تفســیر یک بعدی سونداژهای ژئوالکتریک منتخب منطقه سوسن. سـونداژهای 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 دادهبرداری شــدهاند. محور افقی AB/2 یا معادل دو برابر عمق نفوذ و محور عمودی مقاومت الکتریکی اسـت، خطوط قرمز منحنی مقاومت ظاهری مدل، خطوط مشــکی منحنی مقاومت صحرایی دادهبرداری شـده و خطوط آبی، لایههای تفسیر شده با ضخامت و مقاومت الکتریکی

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) بهمنظور ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در آبخوانهای کارستی ناودیس سوسن، مورد توموگرافی ژئوالکتریک قرار گرفتند. در ناودیس سوسن بهعلت ماهیت کارستی منطقه، تفاوت خصوصیات ژئوالکتریکی قابل توجه و ابهاماتی در تفسیر یک بعدی مشاهده گردید. در این حال میتوان مشخصات زیرسطحی منطقه

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 صورتکه سنگ آهک و دولومیت با مقاومت الکتریکی بالاتر نسبت به مارن در نظر گرفته شدهاند. در مناطق آهکی خردشده در صورتیکه فضای بین شکستگیها باز باشد نسبت به حالتیکه فضای بین شکستگیها توسط رسوبات پرشده میباشد، انتظار مقاومت الکتریکی بیشتری وجود دارد. حفرات در صورتیکه در بخش غیر اشباع و خالی

خصوصیات هیدرو ژئوالکتریک سازندهای آسماری...

باشند، بیشترین مقاومت الکتریکی را در مناطق کارستی دارند. در صورتیکه مناطق با توسعه کارستی زیاد در زیر سطح ایستابی و کاملا پر از آب باشند، کمترین مقاومت الکتریکی را در مقاطع ژئوالکتریک دارا میباشند. مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک تهیه شــده در ناودیس سوسن با در نظر گرفتن این مبانی، مدل زمینشناسے ممکن برای هر مقطع و تراز آب زیرزمینی احتمالی (که براساس تراز ارتفاعی نزدیکترین چشمهها 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 اهممتر متغیر میباشد. در مقطع مذكور لايه سطحى شامل سيلت و خرده سنگ به ضخامت یک تا پنج متر میباشد. مقاومت آبخوان در طرفین و مرکز مقطع، بین ۵۰ تا ۱۰۰ اهممتر میباشد که نشان دهنده وجود آبخوان کارستی با پتانسیل مناسب میباشد. در محل ۱۰۰ تا ۱۵۰ اهممتر میرسد که مبین وجود کمتر آب زیرزمینی نسبت به بقیه مقطع میباشد.

مقطع توموگرافی PR2 (شـکل ۶) در امتداد شمال به جنوب به طول ۷۶۶ متر قرار دارد که شامل سونداژهای R13 تــا R19 مى باشــند. مقاومت الكتريكــى مقطع از ١٩ تا بیش از ۲۴۱ اهممتر متغیر می باشد. در مقطع مذکور، لایه سطحی شامل سیلت و خردهسنگ به ضخامت یک تا ســه متر میباشد. در بازه ۱۴۰ تا ۲۸۰ متری پروفیل مذکور، منطقه کارستی با پتانسیل آب زیرزمینی زیاد و مقاومت الكتريكي حدود ١٠٠ متر قابل تشخيص است. در بازه ۴۴۰ تا ۶۶۰ متری در عمق آهک متراکم با مقاومت الکتریکی بیش از ۲۵۰ اهممتر وجود دارد که احتمالا پتانسیل آب زیرزمینی در این منطقه کم است. در بازههای ۲۰۰ و ۷۰۰ متری، دو منطقه با مقاومت کمتر از ۱۰۰ اهممتر تا عمق ادامه می ابند که می تواند نمایان گر مناطق خردشدهای باشد که فضای میان شکستگیها توسط رسوبات ریزدانه رسی پر شده است. مقطع توموگرافی PR3 (شکل ۶) در امتداد شمال غرب-

جنوب شرق به طول ۱۴۵۹ متر بر روی آهک ایلام - سروک دادهبرداری شده است و شامل سونداژهای R20 تا R35 تا R35 می باشند. مقاومت الکتریکی مقطع از ۳۰ تا بیش از ۴۳۵ اهممتر متغير ميباشد. در مقطع مذكور لايه سطحي شامل سیلت و خردهسنگ به ضخامت یک تا پنج متر میباشد. در این مقطع حداکثر پتانسیل آب زیرزمینی در بازه ۲۰۰ تا ۲۸۰ مترى وجود دارد كه مقاومت الكتريكي آن حدود ١٥٠ اهم متر است و تغییرات مقاومت الکتریکی بین منطقه غیراشباع و آبخوان ملایم است. در بازه ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متری منطقهای با روند عمودي و مقاومت الکتریکی کم دیدہ می شود که مبین زون برشی منطقه گسل خورده میباشد. از بازه ۱۰۰۰ تا ۱۲۵۰ مترى مقاومت الكتريكي آهك به حدود ٧٠ اهممتر مى سد که بیانگر حفرهای پر آب میباشد.

مقطع توموگرافی PR4 (شکل ۶) در امتداد شمال غرب- جنوب شـرق به طول ۷۶۶ متر در حاشـیه سـازند ایلام- سروک قرار دارد که شامل سونداژهای R41 تا R50 می باشد. مقاومت الکتریکی مقطع ۳۱/۹ تا بیش از ۴۶۰ اهم سونداژهای R9 و R11 نیز مقاومت الکتریکی در عمق بین متر متغیر میباشد. در مقطع مذکور لایه سطحی شامل سیلت و خردهسنگ به ضخامت یک تا ینج متر می باشد. با توجه به شکل، مقاومت آبخوان در کل طول این مقطع، بالا می باشد که نشان دهنده وجود آهک حفرهدار یا آهک متراکم در این سری سونداژها می باشد. مقاومت کم در محل R41، به پهنه خردشده نسبت داده شده است. سه ناهنجاری در بازههای ۱۲۰، ۴۴۰ و ۵۶۰ متری پروفیل به صورت نقاط تمرکز با مقاومت بسیار زیاد دیده می شود که با توجه به تغییرات ملايم نسبت به زمينه بهعنوان آهک با متراکم تفسير 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 سوسین به موازات امتداد لایههای سازند ایلام- سروک تهیه شده است. شکل ۷ این پروفیل را با اغراق عمودی ۱/۷ نشان میدهد. در محل مربوط به نقطه T10 (در متراژ ۱۸۰۰ مقطع/ چشـمه SP8) (شــكل ۱) لايه با مقاومت كمتـر از ۲۰۰ اهممتر قرار دارد که از عمق حدود ۱۰۰ متر شـروع میشـود و میتواند

بیان گر سنگ آهک شدیدا خردشده باشد که احتمالا آب این چشــمه را تامین میکند. تغییرات زیاد مقاومت ویژه در سيطح مقطع بهوضوح مشاهده مي شود كه مي تواند مربوط به واریزه آهکی باشــد. بهدلیـل آن که این یروفیل به موازات امتداد لايهها مي باشد، ضخامت اين واريزهها تقريباً يكسان است. در فاصله ۸۰۰ تا ۱۷۰۰ متر و در عمق یک یهنه 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 بسـیار متراکم باشد. از ابتدای یروفیل 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 اهممتر 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 کے در مجاورت پلانے دماغه ناودیس سوسن به موازات امتداد لایههای سازند ایلام- سروک تهیه شده است. شکل ۷ این مقطع را با اغراق عمودی ۱/۱ نشان می باشد. در فاصله حدود ۵۸۰ تا ۷۲۰ متر و از سطح زمین می دهد. به دلیل قرار گرفتن چندین چشــمه در این راســتا 🔪 تـا عمق حدود ۴۰ متری نیز مقاومــت ویژه کم و احتمالا از و چندیـن شکســتگی در مجاورت این مقطـع، توموگرافی الکتریکی مقاطع PT حائز اهمیت است. در بعضی بخشها از سطح زمین تا عمق کم، حدود ۵۰ متری، لایههایی با تغييرات زياد مقاومت ويژه مشاهده مى شود كه مىتواند بیان گر واریزه های سطحی و مارن باشند. چشمه SP۶ در ابتدای مقطع و در محل تماس، دو یهنه 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

شديدا خردشده باشد. افزايش عمق مقاومت الكتريكي تا حدود ۵۰۰ اهممتر افزایش می یابد که می تواند بیان گر متراکم شدن آهک باشد. لایه آهک متراکم با پتانسیل ضعیف آب زیرزمینی تا ۵۰۰ متری مقطع ادامیه مییابد و از این عمق به بعد مقاومـت الكتريكي بهتدريج كاهش مي يابد. احتمالا یک گسل در فاصله حدود ۸۰۰ متر وجود دارد که دو لایه با جنس و یتانسیل آب زیرزمینی کاملا 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 متراژ ۶۸۰ متری تشخیص داد.

مقطع PW1 با طول ۷۵۶ متر منطبق بر سونداژهای W1 تا W7 می باشد (شکل ۸). به دلیل عدم اختلاف توپوگرافی در این مقطع، تاثیر توپوگرافی 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 بیان گر مارن جنس مارن می باشد ولی از عمق مذکور مقاومت افزایش مییابد که نشان دهنده برخورد به آهک آسماری است. در این بازه، مقاومت الکتریکی در عمق بیش از ۸۰ متری حدود ۱۰۰ اهممتر میباشد که بیان گر 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 اهممتر میرسد. این دامنه مقاومتی در عمق کاهش نمی یابد و می تواند نشان دهنده نبود آب زیرزمینی قابل توجه در عمق باشد.



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



شکل ۲. توموگرافی ژئوالکتریک پروفیل های 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 بیان گر 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 ۰۰۵ تا ۰۰۰ 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 سونداژهای W8 تا PW2 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، نمایان گر 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



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

نتيجهگيرى

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. آهک ایالام- 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 درحالیکه در آهک آسماری با افزایش عمق، مقاومت الکتریکی صحرایی کاهش و احتمالا توسعه کارست و آبدهی افزایش میابد.

تفسیر مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی مشخص نمود که آهک ایلام- سروک در مناطق خردشده، پتانسیل آب زیرزمینی قابلتوجهی 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. دامنه تغییرات مقاومت ژئوالکتریک در آهک ایلام- سروک نسبت به آهک آسماری بیشتر ولی ناهنجاریهای لیتوژئوالکتریک منتسب به مناطق کارستی در آن کمتر است. گسلها و شکستگیهای اصلی نقش بسیار مهمتری نسبت به چینخوردگی در هیدروژئولوژی کارست سوسن ایفا مینمایند. موقعیت ظهور چشمه پرآب چال شه (با آب دهی متغیر از ۱۰۰ تا بیش از ۴۰۰۰ لیتر در ثانیه) در مجاورت گسل تنگرشید، و چشمههای دمحوض و دانیال (با آب دهی متغیر از ۵۰ تا بیش از ۱۰۰۰ لیتر در ثانیه) در مجاورت شکستگیهای پلانژ دماغه ناودیس، در ثانیه) در مجاورت شکستگیهای پلانژ دماغه ناودیس،

از لحاظ هیدروژئولوژی، سازندهای ایلام- سروک و آسماری را میتوان به عنوان مهمترین مخازن آب زیرزمینی در محدوده ناودیس سوسن درنظر گرفت. هر چندکه وجود چشمههای با آبدهی زیاد در سازند ایلام- سروک و نبود چشمه بزرگ در آهک آسماری، میتواند نمایان گر پتانسیل

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 حالیکه آهک آسماری به دلیل تخلخل ذخیرهای بیشتر، مقاومت الکتریکی کمتری دارد. شاید بتوان قابلیت ذخیره 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 سنگ کف نفوذناپذیر (احتمالا شیل کژدمی) نسبت به تراز دامنه چین خوردگی عمل می کنند.

نتایـج بررسـیها نشـان داد کـه دادهبرداری بـا آرایه شـلومبرژه در مقاطع با فاصله سـونداژ کمتـر از ۵۰ متر در مناطق کارسـتی بهدلیل سـهولت دادهبـرداری صحرایی، حساسیت نسبت به تغییرات مقاومت الکتریکی بین حفرات و شکستگیها، زمینه آهکی و عمق نفوذ زیاد نسبت به سایر روشها ارجحیت دارد. براسـاس یافتهها، قدرت توموگرافی ژئوالکتریک در نمایش حفرات و مجاری کارسـتی و تعیین آبدار بودن و یا خشکبودن آنها، شناسایی تودههای بههم پیوسـته آهک متراکم و ارائه تصویر زیرسـطحی از سیستم ژئوالکتریک برخلاف تفسیرهای یک بعدی، محدودیت تعریف لایهها وجود ندارد و این مهم بهویژه در شناسایی زیرسطحی مناطق کارسـتی که تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی به

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. پایان نامه کارشناسی ارشد
هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۲۰.

شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۴۵. نقشه زمینشناسی
کوهآسماری و کوهکمستان. 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 آسیاری.
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 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. Resitivity, induced polarization, and complex resistivity. Investigations in Geophysics. 13, 265-299.