

اکتشاف آب زیرزمینی در مناطق کارستی جنوب باختر ایذه با استفاده از توموگرافی ژئوالکتریک

حمیدرضا ناصری^{۱*}، فرشاد علیجانی^۲ و محمد نخعی^۳

^۱ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۱۳

چکیده

به منظور شناخت پتانسیل آب زیرزمینی در مناطق کارستی، ژرفایابی مقاومت الکتریکی عمودی در ۶۲ نقطه، تصویربرداری ژئوفیزیکی با توموگرافی مقاومت الکتریکی دو بعدی در سه مقطع آرایه شلومبرژه، هشت مقطع با آرایه دو قطبی - دو قطبی، و دو سایت سه بعدی در کارست جنوب باختر ایذه انجام شد. ژرفای نفوذ جریان در مقاطع توموگرافی حاصل از آرایه شلومبرژه حدود ۱۸۰ متر است که می‌تواند مناطق مختلف کارست و به‌ویژه آبخوان‌های کارستی ژرفایی را نمایش دهد اما به دلیل آن که فاصله میان سونداژها بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است، نمی‌توان تصویر آشکاری از حفرات کارستی به‌ویژه حفرات با اندازه کمتر از ۵۰ متر به دست آورد. نتایج مشخص کرد که توموگرافی ژئوالکتریک دو بعدی با آرایه دو قطبی - دو قطبی و تفکیک پذیری یک و دو متری نسبت به فاصله الکترودی پنج متری، حفرات کارستی را بهتر نمایان می‌سازد اما فاصله الکترودی پنج متر به دلیل ژرفای تجسس بیشتر، بینش جامع‌تری نسبت به مناطق مختلف کارستی به دست می‌دهد، بنابراین قابلیت آن برای تشخیص لایه‌های آبدار و حفرات کارستی ژرفایی بیشتر است. بررسی مقاومت ژئوالکتریک سه بعدی با اندازه‌گیری دو بعدی متراکم نیز قابلیت تشخیص گسترش زیرسطحی عوارض زمین‌شناسی و حفرات کارستی را دارد. بر اساس یافته‌های ژئوالکتریک تعیین محل شش حلقه چاه در کارست منطقه انجام گرفت که آبدهی بالای چهار حلقه چاه در آهک آسماری و آبدهی متوسط دو حلقه چاه دیگر در آهک ایلام - سروک در تطابق با یافته‌های ژئوالکتریک با آرایه‌های متفاوت است.

کلید واژه‌ها: آب زیرزمینی، کارست، ژئوالکتریک، توموگرافی، ایذه

* نویسنده مسئول: حمیدرضا ناصری

E-mail: hamidrezanassery@yahoo.com

۱- مقدمه

اساس منطقه‌های آبی کارست و فراتیک آبخوان کارستی به شدت ناپیوسته و اختلاف مقاومت الکتریکی آنها بسیار آشکار است. مناطق با هدایت الکتریکی زیاد نمایانگر توده‌های سنگی اشباع از آب (مناطق با نفوذپذیری کم و ذخیره آب زیاد یا مجاری پر از آب) هستند (Leucci & De Giorgi, 2005).

تشخیص کانال‌های با جریان سریع آب در صورتی که غیر اشباع باشند، مشکل و نیازمند دقت داده برداری الکتریکی است. غارهای خشک که بیشتر بالای سطح ایستابی قرار دارند، به صورت ناهنجاری با مقاومت الکتریکی قابل تشخیص هستند. در پژوهش انجام شده توسط Miltzer et al. (1979) نتیجه گرفته شد که تشخیص حفرات در حالتی ممکن است که ژرفای سقف غار از سطح زمین بیشتر از چهار برابر شعاع معبر غار نباشد. با این حال پژوهشگران مختلف مانند Loke (1999)، Zhou et al. (2002)، Van Schoor (2002)، Satarugsa et al. (2004) و Radulescu et al. (2007) از بررسی‌های ژئوالکتریک به عنوان ابزاری مناسب برای تشخیص حفرات در مناطق کارستی استفاده نمودند. مقطع زنی (Profiling) مقاومت الکتریکی توسط Panno et al. (1994) برای شناخت فروچاله‌های کارستی در جنوب باختر ایلینویز استفاده و نتیجه گرفته شد که مناطق با مقاومت الکتریکی زیاد با حفرات خشک متصل به مجرای اصلی، منطبق هستند.

از میان همه روش‌های تصویربرداری زیرسطحی، داده برداری مقاومت الکتریکی دوبعدی و سه‌بعدی در دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای برای اهداف زیست محیطی، آب‌شناسی، و زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است (Meads et al., 2003; Nguyen et al., 2005; Sultan & Monteiro Santos, 2008). به منظور ارائه تصویر مناسب از زیرزمین، باید شبه‌مقطع داده‌های مقاومت الکتریکی با استفاده از روش وارون‌سازی مبتنی بر سلول وارون گردند (Loke & Barker, 1996). این بررسی‌ها معمولاً توموگرافی مقاومت الکتریکی (Electrical Resistivity Tomography or ERT)

نواحی کارستی به‌طور معمول همراه با ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده هستند که به روش‌های اکتشافی دقیق نیاز دارند. به دو دلیل روش‌های ژئوفیزیکی نقش مهمی در ساخت مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی زیر سطحی دارند. اولاً بر اساس نتایج ژئوفیزیکی، موقعیت بهینه و تعداد گمانه‌های اکتشافی مورد نیاز تأمین می‌شود که می‌تواند صرفه‌جویی مهمی در هزینه‌های اکتشافی به عمل آورد. ثانیاً روش‌های ژئوفیزیکی می‌توانند پوشش پیوسته‌ای از اطلاعات زیرسطحی ناحیه مورد بررسی به دست آورند که می‌توانند داده‌های حاصل از گمانه‌ها را برای تهیه مدل‌های زمین‌شناسی با مناطق پیرامون پیوند دهند (Schrott & Sass, 2008).

سازندهای کارستی به دلیل آن که منابع آب زیرزمینی مهمی را در زاگرس تشکیل می‌دهند، بسیار مورد توجه هستند. این سازندها ساختارهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی پیچیده‌ای دارند. معمولاً توصیف و شناخت عملکرد سیستم‌های کارستی نیازمند روش‌های غیر مستقیم مختلفی است که بر اساس تفسیر سری‌های زمانی هیدرودینامیک و هیدروشیمی که در خروجی سیستم‌ها اندازه‌گیری می‌شوند، استوار هستند. این روش‌ها قادرند تا درجه کارست شدگی و حجم منابع آب زیرزمینی در منطقه اشباع آبخوان را مورد ارزیابی قرار دهند اما نمی‌توانند برای تعیین ساختار سیستم یا تعیین موقعیت مجاری زیرزمینی به کار روند. به منظور شناخت بیشتر از هندسه و ساختار بخش‌های مختلف سازندهای کارستی (آبی کارست، منطقه غیر اشباع، منطقه اشباع، مجاری، حفرات، و زمینه خرد شده) باید روش‌های مستقیم از همچون مطالعات ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گیرند (Guérin et al., 2009).

روش‌های ژئوالکتریک به‌طور گسترده برای رسم و شناخت ناهمگنی‌های افقی و عمودی در محیط‌های کارستی به کار گرفته می‌شوند. مسیرهای جریان با نفوذپذیری زیاد (شکستگی‌های باز یا کانال‌ها) و سنگ‌آهک زمینه با نفوذپذیری کم در حالت غیر اشباع و یا در زیر منطقه غیر اشباع ناهمگنی‌های شدیدی را ایجاد می‌کنند. بر این

زیرسطحی ژرف، بیشترین فاصله الکترودی جریان میان ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر انتخاب شد. ۵ نیمرخ در آهک آسماری تاقدیس کمردراز، یک نیمرخ در آهک آسماری تاقدیس چال خشک، و دو نیمرخ در آهک ایلام - سروک تاقدیس تنوش با آرایه دو قطبی - دو قطبی با تفکیک پذیری ۵، ۲، و یک متری به ترتیب برای بررسی تا ژرفای ۴۲، ۸، و ۴ متری به منظور شناخت حفرات و مناطق خرد شده با ابعاد متفاوت در مناطق مختلف ژرفاهای کارست داده برداری شده است (شکل ۱). ۵ نیمرخ با فاصله الکترودی ۵ متر دارای طول ۳۵۰ تا ۴۴۰ متر هستند. ۲ نیمرخ با فاصله الکترودی ۲ متر به طول ۸۰ متر و یک نیمرخ با فاصله الکترودی یک متر به طول ۵۰ متر داده برداری شده است. در هر کدام از سازندهای آهکی آسماری و ایلام - سروک یک سایت برای توموگرافی ژئوالکتریک سه بعدی در نظر گرفته شد. داده برداری ژئوالکتریک سه بعدی در ۲ سایت با آرایه دو قطبی - دو قطبی و فاصله الکترودی ۲ متر انجام شد. شبکه الکترودی سه بعدی در سازند آسماری ۸×۸ الکترودی و در سازند ایلام - سروک ۱۰×۶ الکترودی است.

داده‌های اندازه گیری شده نیمرخ‌های دو بعدی مرتب شده و به شکل شبه مقاطع مقاومت الکترودی منحنی بندی شدند. شبه مقاطع مقاومت ویژه الکترودی ظاهری فقط دید عمومی از توزیع مقاومت زیرسطحی به دست می‌دهند و به دلیل هموارشدگی داده‌ها، تغییرات شدید مقاومت الکترودی سنگ‌ها و تأثیر آرایه الکترودی بر اندازه گیری مقادیر مقاومت، نمی‌توانند تصویر آشکاری از زیرزمین به دست دهند. این بدان معنی است که آرایه‌های هندسی الکترودی مختلف، شبه مقاطع متفاوتی به دست می‌دهند. برای آرایه بهتر و واقعی تر توزیع مقاومت الکترودی زیر سطحی، باید وارون سازی شبه مقاطع انجام شود. چندین روش تفسیر، شامل روش‌های نموداری (دستی) و عددی، برای تفسیر داده‌های یک بعدی ژئوالکتریک وجود دارد. تفسیرهای انجام شده در این پژوهش بر اساس منحنی‌های استاندارد سه/چهار لایه‌ای به منظور برآورد اولیه فرایند وارون سازی در نرم افزار IPI2WIN 2001 انجام شده است. برنامه IPI2WIN با تعیین ساختار خودکار منحنی‌های ژرفا پیمایی مقاومت الکترودی (Vertical Electrical Sounding or VES) و تعیین منحنی‌های نظری منطبق با داده‌های صحرایی، مقاومت حقیقی و ستبرای لایه‌های زیرسطحی را تعیین می‌کند. پس از عملیات صحرایی ژئوالکتریک، داده‌های میدانی مقاومت الکترودی به رایانه منتقل و به فرمت قابل قبول برای نرم افزارهای توموگرافی الکترودی مرتب شدند. مدل سازی مقاومت الکترودی وارون با استفاده از برنامه‌های RES2DINV و RES3DINV (Geotomosoftware, 2004) انجام شد. خروجی‌ها به صورت مقاطع عرضی در مدل دو بعدی و به صورت مقاطع عرضی و افقی در ژرفاهای مختلف مورد تجسس در مدل سه بعدی به دست آمد. داده‌های حاصل از VES برای تهیه ۳ مقطع ژئوالکتریک برای شناخت ویژگی‌های زیرسطحی سازندهای کارستی در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شد. بدین منظور داده‌های یک بعدی نیز به فرمت قابل قبول برای نرم افزار RES2DINV در آمدوسپس توموگرافی مقاومت الکترودی بر روی آنها انجام شد. بر اساس نتایج یافته‌های ژئوالکتریک ۶ محل برای حفاری چاه آب در کارست مورد مطالعه پیشنهاد شد. سه حلقه چاه آهکی در آبخوان کارستی کمردراز (سازند آسماری)، یک حلقه چاه آهکی در تاقدیس چال خشک (سازند آسماری)، و ۲ حلقه چاه آهکی در تاقدیس تنوش (سازند ایلام - سروک)، برای تأمین آب آشامیدنی شهر ایذه حفر شده‌اند (شکل ۱). داده‌های حاصل از حفاری چاه‌های آهکی، آزمایش پمپاژ و سطح آب چاه‌ها، و هیدروگراف آبدی چشمه هلايجان برای تدقیق داده‌های ژئوالکتریک و آرایه مدل مفهومی کارست دو تاقدیس مورد استفاده قرار گرفت.

۳- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

از دیدگاه زمین‌شناسی، سازند سروک شامل آهک‌های نازک لایه رسی و میکرایتی

نامیده می‌شوند. پیشرفت‌ها در این روش به صورتی است که داده‌های مقاومت الکترودی در طی چند روز جمع آوری و در چند ساعت مورد پردازش قرار می‌گیرند. در نتیجه توموگرافی مقاومت الکترودی به عنوان ابزاری ارزشمند در مطالعات زیرسطحی شناخته می‌شود (Zhou et al., 1999). اصول روش توموگرافی الکترودی شامل تقسیم بندی سطح دو بعدی به تعدادی سلول به منظور تعیین مقاومت درون هر سلول است به طوری که بتوانند پاسخ مدل را به خوبی با داده‌های اندازه گیری شده مطابقت دهند. فنون توموگرافی مقاومت الکترودی (ERT) به طور موفقیت آمیزی در بررسی عوارض کارستی و اکتشاف حفرات کم ژرفای زیرسطحی (Dahlin et al., 2002; Kaufmann & Romanov, 2009; Slater & Binley, 2003) مورد استفاده قرار گرفته است. در یک تجسس دو بعدی ERT، داده‌های میدانی در طول یک مقطع به صورت شبه مقاطع مقاومت الکترودی ظاهری جمع می‌شوند. توزیع مقاومت الکترودی واقعی زیرسطحی به وسیله فنون وارون سازی به دست می‌آید. در مناطقی همانند نواحی کارستی که ساختارهای مقاومت الکترودی پیچیده‌ای وجود دارد، توموگرافی الکترودی دو بعدی و مدل‌های حاصل از آن ممکن است با ابهامات قابل توجهی همراه باشد. بیشتر مشکلات در ارتباط با اکتشافات ژئوفیزیکی ناشی از اثرات ساختارهای سه بعدی زیرسطحی است.

پژوهشگران مختلف از وارون سازی سه بعدی مقاومت الکترودی برای مطالعات زمین‌شناسی استفاده کردند. در پژوهشی (Slater & Binley, 2003) از تصویر پردازش داده‌های قطبش القایی و مقاومت الکترودی دو بعدی و سه بعدی برای بررسی ارتباط مواد نفوذ پذیر استفاده کردند. وارون سازی سه بعدی داده‌های مقاومت الکترودی برای بررسی‌های زمین‌شناسی معدن توسط (Represas et al., 2005) استفاده شد. وارون سازی سه بعدی مقاومت الکترودی توسط (El-Quady et al., 2005) برای بررسی زمین‌شناسی مناطق باستانی در مصر مورد استفاده قرار گرفت. در مقاله (Soupios et al., 2007) وارون سازی دو بعدی و سه بعدی داده‌های مقاومت الکترودی آرایه دو قطبی - دو قطبی برای بررسی پی یک ساختمان به کار گرفته شد. از تفسیر یک بعدی و سه بعدی داده‌های مقاومت الکترودی برای تشخیص واحدهای زمین‌شناسی مختلف و نمایش مقاطع چینه‌شناسی در زیر یک سازه توسط (Sultan & Monteiro Santos, 2008) و توسط (Neyamadpour et al., 2009) به منظور تشخیص فاضلاب زیرسطحی استفاده شد.

در این پژوهش توموگرافی الکترودی دو بعدی و سه بعدی با آرایه‌های شلومبرژه و دو قطبی - دو قطبی (Schlumberger & Dipole-Dipole arrays) برای اکتشاف کارست زیرسطحی در سازند آهکی آسماری (در تاقدیس‌های کمردراز و چال خشک) و سازند آهکی ایلام - سروک (در تاقدیس تنوش) و تعیین نواحی مناسب حفر چاه، واقع در پنج کیلومتری جنوب باختر ایذه (شکل ۱) انجام و مقایسه شده است. این آبخوان‌ها به دلیل تأمین آب آشامیدنی برای شهر ایذه و استفاده از آب چشمه هلايجان برای کشاورزی اهمیت بسیار زیادی دارند.

۲- مواد و روش‌ها

تصویربرداری ژئوفیزیکی با توموگرافی مقاومت الکترودی (ERT) دو بعدی در سه نیمرخ شلومبرژه و هشت نیمرخ دو قطبی - دو قطبی و توموگرافی سه بعدی در دو بعدی سایت در کارست جنوب باختر ایذه (شکل ۱) انجام شد. مدل‌های ERT به منظور تشخیص و رسم شکستگی‌های اصلی و گسل‌ها، و حفرات مورد تفسیر قرار گرفتند. بررسی‌های ژئوالکتریک برای تشخیص حفرات در بخش‌های مختلف سازندهای کارستی آسماری و ایلام - سروک در جنوب باختر ایذه به منظور تعیین محل‌های مناسب حفر چاه آب به کار گرفته شده است. ۶۲ سونداژ مقاومت الکترودی در هشت خط در تاقدیس‌های کمردراز و تنوش برداشت شده است (شکل ۱). به منظور کسب اطلاعاتی درباره ستبرای و مقاومت کارست

W5 ایذه در آهک ایلام - سروک واقع در تاق‌دیس تنوش حفاری شده است. چاه با دبی ۶۰ لیتر در ثانیه به مدت ۴۳۲۰ دقیقه پمپاژ شد که افت بیشینه منطبق با آن ۰/۹ متر بوده است. چاه W6 ایذه نیز در آهک ایلام - سروک واقع در تاق‌دیس تنوش حفاری شده است. چاه با دبی ۳۶ لیتر در ثانیه به مدت ۴۳۲۰ دقیقه مورد پمپاژ واقع شد و افت بیشینه منطبق با آن ۱/۴۲ متر بوده است. آزمایش پمپاژ انجام شده در چاه‌های یاد شده در سال ۱۳۸۷ و پیش از خشکسالی‌ها انجام شده و نمایانگر آن است که در طی دوره‌های با بارش زیاد، سطح آب در این آبخوان ایلام - سروک بالا آمده و آبدهی چاه‌ها نیز مطلوب است اما در دوره‌های خشکسالی با پایین رفتن سریع آب (حدود ۱۴۰ متر در طی دو سال خشکسالی مداوم در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) آبدهی چاه‌ها نیز تا کمتر از ۲۰ لیتر در ثانیه کاهش یافته است.

با استفاده از داده‌های سطح آب اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای آهکی، افت سطح آب در آبخوان‌های کارستی جنوب باختر ایذه در اثر رخداد خشکسالی‌های مداوم از ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های سطح آب از دیتالاگرهای منصوب در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک چاه‌های بهره‌برداري استخراج شده است. میزان بارش ایستگاه ایذه در سال آبی ۸۶-۸۵ برابر ۶۳۶ میلی‌متر (تقریباً معادل میانگین)، در سال آبی ۸۷-۸۶، ۳۵۱ میلی‌متر (کاهش ۴۳ درصد نسبت به میانگین)، در سال آبی ۸۸-۸۷، ۳۸۸ میلی‌متر (کاهش ۳۸ درصد نسبت به میانگین) بوده است. در سه ماهه پاییز ۱۳۸۸، ۳۵۱ میلی‌متر (برابر ۵۷ درصد میانگین سالانه) بوده است. نمودار ژرفای سطح آب دو پیرومتر معرف آبخوان‌های کارستی جنوب باختر ایذه (شکل ۶) بیانگر افت شدید سطح آب زیرزمینی در کارست سازند ایلام - سروک و روند نسبتاً ثابت سطح ایستابی در آهک آسماری پس از دو سال خشکسالی مداوم است. مقایسه ژرفای سطح آب نمایانگر آن است که آبخوان کارستی آسماری قابلیت ذخیره بسیار زیادی دارد. در حالی که آبخوان کارستی ایلام - سروک ظرفیت ذخیره قابل توجهی در توده آهک ندارد. ژرفای آب زیرزمینی در آبخوان ایلام - سروک به سرعت با خشکسالی افزایش می‌یابد و با رخداد بارش نیز سطح آب در آبخوان با سرعت بیشتری بالا می‌آید. افت سطح آب در آبخوان ایلام - سروک از سال ۱۳۸۶ تا سال ۱۳۸۸، بیش از ۱۰۰ متر بوده در حالی که در این دوره سطح آب در آهک آسماری یک متر افت داشته است. با آغاز بهره‌برداری از آبخوان‌های کارستی از اواخر تابستان ۱۳۸۸، افت شدید سطح آب در سازند ایلام - سروک رخ داده در حالی که افت آبخوان آسماری ناچیز است. با رخداد بارش پاییز ۱۳۸۸، سطح آب در آهک ایلام - سروک به سرعت رو به بالا آمدن کرده است.

در منطقه مورد مطالعه یک دهانه چشمه فصلی در سال ۱۳۸۵ از تاق‌دیس تنوش خارج شده است که پس از خشکسالی و افت شدید آب در آهک ایلام - سروک این چشمه خشک شده است و آماری از آن در دسترس نیست. آب چشمه هلايجان که از سازند آسماری در تاق‌دیس کمردراز تخلیه می‌شود دارای کیفیت مطلوب با هدایت الکتریکی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ میکرومونس بر سانتی‌متر است. دبی مجموع سه دهانه چشمه هلايجان در سال‌های با بارش میانگین بین ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه متغیر بوده است اما رخداد دو سال خشکسالی مداوم در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ باعث خشک شدن و مرگ چشمه برای اولین بار در سالیان اخیر در مرداد ۸۷ شده است (معاونت مطالعات پایه و طرح‌های جامع منابع آب خوزستان، ۱۳۸۸). در طی بارش‌های پاییزه و زمستانه سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ چشمه هلايجان دوباره آبدار شده اما دوباره در خردادماه خشک شده است. به منظور تحلیل سالانه آبدهی چشمه و تعیین ضرایب فرود، هیدروگراف سالانه چشمه برای سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تهیه شده است (شکل ۷). با استفاده از مدل مخزن نمایی ضرایب فروکش تخلیه آبخوان برای دوره مورد مطالعه محاسبه شده‌اند. در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ با رخداد اولین دوره خشکسالی، رژیم جریان متفاوت از آبخوان‌های کارستی بر چشمه هلايجان حاکم می‌شود. در این سال بارش، برابر ۳۵۱ میلی‌متر بوده است که از این مقدار، ۹۳ میلی‌متر

و آهک‌های مارنی به رنگ خاکستری تیره است. بر روی سازند سروک، سازند ایلام شامل از آهک‌های رسی خاکستری دانه‌ریز نازک لایه همراه با لایه‌های نازک شیل سیاه رنگ قرار دارد که به طور معمول در نواحی بیرون‌زده فرسایش آن بیشتر از سازند سروک است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). از نظر هیدروژئولوژی در همه زاگرس اهمیت سازند سروک به دلیل دارا بودن پدیده‌های کارستی و تشکیل آبخوان بیشتر از سازند ایلام است اما در منطقه ایذه تفکیک این ۲ سازند مشکل است و از این رو با نام مشترک ایلام - سروک معرفی می‌شوند. سازند ایلام - سروک در شمال خاور، جنوب خاور و جنوب منطقه ایذه، به صورت هسته تاق‌دیس‌های پیون، شاپوش و تنوش رخنمون دارد. در حوضه آبریز ایذه مساحتی که سازند ایلام سروک پوشش می‌دهد نسبت به بقیه سازندها بیشتر است. بر روی سازند ایلام - سروک، سازند گورپی شامل آهک مارنی سفیدرنگ، شیل‌های تیره آبی‌رنگ و مارن‌های دریایی قرار دارد. سازند پابده با رخساره شیل، مارن‌های آبی و ارغوانی و به‌طور متناوب با میان‌لایه‌های آهک رس‌دار، همراه با سازند گورپی در منطقه رخنمون دارد. در منطقه مورد مطالعه ارتفاعات تاق‌دیس‌های کمردراز و چال‌خشک از سازند آسماری تشکیل شده است (شکل ۱). سازند آسماری شامل سنگ‌های آهکی با بین‌لایه‌های آهک فسیل‌دار کرم رنگ تاق‌قهوه‌ای، هوازده و به‌طور کامل درز و ترک‌دار (شکل ۲) است. سازند آسماری در تاق‌دیس چال‌خشک واقع در باختر ایذه به علت عملکرد راندگی هلايجان (شکل ۳) برگشتگی پیدا کرده است که این برگشتگی به صورت ناودیس در تنگ کرد (شکل ۴) قابل مشاهده است.

آبخوان‌های کارستی منطقه مورد مطالعه شامل آبخوان‌های شاپوش و تنوش (آهک ایلام - سروک) و چال‌خشک و کمردراز (آهک آسماری) هستند. منطقه ایذه با میانگین بارش سالانه حدود ۶۰۰ میلی‌متر و اقلیم نیمه مرطوب معتدل (در طبقه‌بندی آمبرژه) بستر مناسبی را برای توسعه کارست فراهم کرده است. آبخوان کارستی کمردراز دارای یک محل تخلیه اصلی در دماغه شمال باختری تاق‌دیس است که چشمه هلايجان با سه خروجی نزدیک یکدیگر را شامل می‌شود. آبخوان کارستی چال‌خشک در مجاورت بلا فصل شمال خاور آبخوان کمردراز قرار دارد. با توجه به تأثیر راندگی هلايجان، لایه‌های آهک آسماری در تاق‌دیس چال‌خشک برگشتگی پیدا کرده‌اند. همچنین خردشدگی آهک در امتداد راندگی باعث به وجود آمدن محیط مناسبی برای عبور جریان آب و توسعه کارست‌شدگی در کوه‌چال‌خشک شده است. آبخوان کارستی تنوش در آهک ایلام - سروک بر خلاف آبخوان‌های کارستی کمردراز و چال‌خشک دارای ظرفیت ذخیره مناسبی نیست. برای تأمین آب آشامیدنی شهر ایذه و بر اساس نتایج حاصل از مطالعات ژئوالکتریک ۳ حلقه چاه‌آهکی در تاق‌دیس کمردراز، یک حلقه در تاق‌دیس چال‌خشک، و ۲ حلقه در تاق‌دیس تنوش در طی سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ حفاری شد (شکل ۱). بر اساس لوگ حفاری چاه‌های یاد شده (که در مقاطع توموگرافی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند) مشخص می‌شود که کارست‌شدگی در چاه‌های آهک آسماری بسیار شدیدتر از آهک ایلام - سروک است به طوری که در طی حفاری چاه‌های W1 با برخورد به غار در ژرفای ۴۸ متری، برگشتی خرده‌های حفاری قطع شده است. نمودارهای افت - زمان حاصل از آزمایش پمپاژ چاه‌های W1 تا W6 (شکل ۵) مشخص می‌شود که افت ناچیز در چاه‌های W1، W2، و W3 رخ داده است که نمی‌تواند با روش‌های معمول مورد تفسیر قرار گیرد و اختلاف منحنی‌های تپیک روش‌های مرسوم تخلخل دوگانه با منحنی افت واقعی زیاد است. منطبق با آزمایش پمپاژ، تاق‌دیس کمردراز دارای قابلیت انتقال و ذخیره بسیار زیاد زمینه چاه‌های یاد شده است به طوری که با آبکشی ۵۵ تا ۶۰ لیتر در ثانیه از چاه‌های بهره‌برداري، سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای کمتر از ۱۰ سانتی‌متر افت کرده است. چاه W4 در آهک آسماری واقع در تاق‌دیس چال‌خشک حفاری شده است. چاه با دبی ۸۵ لیتر در ثانیه به مدت ۴۶۸۰ دقیقه پمپاژ شد که افت بیشینه منطبق با آن ۳/۷۳ متر بوده است. چاه

سازند آسماری با مرزهای آشکار مقاومت الکتریکی بین توده آهک و حفرات وجود ندارد. در تصاویر مقاومت الکتریکی حفرات به صورت ناهنجاری‌های با مقاومت الکتریکی زیاد مشخص شده‌اند، که نشان دهنده نبود رسوبات پرکننده حفرات بالای سطح ایستابی است. مقطع توموگرافی E (شکل ۹) نشان می‌دهد که سازند ایلام - سروک، سنگ آهک متراکم با تخلخل زمینی کم است. مقاومت الکتریکی آهک آسماری در زمینه سنگی حدود ۲۵۰ و در آهک ایلام - سروک بیش از ۱۷۰۰ اهم متر است. تفسیر مقطع توموگرافی E نشان می‌دهد که آبخوان سازند ایلام - سروک یک آبخوان خرد شده است که بیش از آبخوان‌های کارستی به آبخوان‌های سازند سخت شبیه است. ژرفای نفوذ جریان در مقاطع توموگرافی حاصل از آرایه شلومبرژه حدود ۱۸۰ متر است که می‌تواند مناطق مختلف کارست و به‌ویژه آبخوان‌های کارستی ژرفی را نمایش دهد اما به دلیل آن که فاصله بین سونداژها بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است، نمی‌توان تصویر آشکاری از حفرات کارستی به‌ویژه حفرات با اندازه کمتر از ۵۰ متر به دست آورد. حفرات مشخص شده در مقطع توموگرافی نیز احتمالاً نشان دهنده وجود یک پهنه کارستی با مجاری متصل به هم است که نمی‌توان مرزهای مقاومت الکتریکی در آن را با مرزهای واقعی زیرسطحی منطبق دانست.

مقاطع توموگرافی مقاومت الکتریکی دو قطبی - دو قطبی با فاصله الکترودی ۵ متری (مقاطع A تا E) در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و مقاطع توموگرافی با فاصله الکترودی ۱ و ۲ متری (مقاطع F تا H) در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

مقطع A به طول ۳۵۰ متر در یال جنوب‌باختری تاقدیس کمردراز داده‌برداری شده است به طوری که چاه آهکی W1 در متر ۱۷۰ متری نیم‌رخ یاد شده حفاری شد. مقاومت الکتریکی مقطع توموگرافی شده بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر متغیر است (شکل ۱۰). مقطع یادشده تا متر ۱۴۰ متر، مستقیماً بر روی آهک آسماری قرار دارد. به طوری که منطقه با مقاومت بیش از ۵۰۰ اهم متر از سطح تا ژرفا وجود دارد. در بازه ۹۰ تا ۱۱۰ متر و از ژرفای ۲۵ تا ۳۵ متری ناهنجاری با مقاومت حدود ۲۲۰ اهم متر وجود دارد که احتمالاً می‌تواند بیانگر مجاری کارستی است. افتادگی آهک که به صورت پهنه خردشده منطبق بر گسل احتمالی F1 وجود دارد، به عنوان بهترین محل برای حفاری چاه آب پیشنهاد شد (محل چاه W1). تطابق لایه‌های زیرسطحی در مقطع توموگرافی الکتریکی با لوگ سنگ‌شناسی در محدوده چاه W1 مشخص است. از این متر ۱۱۰ تا انتهای مقطع، ترکیب سنگی چیره از سطح تا ژرفای حدود ۴۰ متری واریزه، مخلوط مارن و خرده سنگ است. با توجه به افتادگی آهک آسماری در بخش مهمی از مقطع A و نبود شناخت کامل از کارست‌شدگی در توموگرافی، مقطع B به طول ۴۶۰ متر و به فاصله ۵۰ متری مقطع A و موازی با آن داده‌برداری شده است. مقاومت الکتریکی مقطع توموگرافی شده که با معیار خطای ۴/۴ و در تکرار ۶ حاصل آمده، بین ۲۰ تا ۸۰۰ اهم متر متغیر است (شکل ۱۰). در توموگرافی مقطع B چهار حفره با مقاومت الکتریکی بیش از ۵۰۰ اهم متر تشخیص داده شده که نشانگر کارست‌شدگی شدید آهک آسماری در تاقدیس کمردراز است. مقاومت الکتریکی بخش زمینه خردشده سنگ آهک بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ اهم متر متغیر است که نمایانگر ذخیره آب زیرزمینی قابل توجه در سیستم یادشده است و می‌تواند توسط مجاری زهکشی شود. مقطع C در یال شمال خاوری تاقدیس کمردراز به طول ۴۳۰ متر داده‌برداری شده که بر اساس آن پیشنهاد حفر چاه آهکی (W2) در متر ۱۲۰ متری مقطع یادشده ارائه شد.

مقطع توموگرافی الکتریکی C با معیار خطای ۳/۱۳ و در تکرار ۶ به دست آمده و دامنه مقاومت الکتریکی در آن بین ۷۰ تا ۱۲۰۰ اهم متر متغیر است (شکل ۱۰). در این مقطع، ۲ حفره با مقاومت بیش از ۱۰۰۰ اهم متر در مترهای ۲۸۰ و ۳۵۰ متری مشخص شده‌اند که به‌عنوان محل‌های مناسب برای حفاری چاه آب پیشنهاد شدند. حفره شماره ۱ تقریباً عمودی است که می‌تواند نمایانگر سیستم کارست مجرای عمودی در پهنه غیر اشباع باشد. حفره شماره ۲، شکل بیضوی دارد که می‌تواند

آن در طی بارش زیاد هفدهم آذر ماه ۱۳۸۶ بوده و تغذیه بسیار کمی در آبخوان کارستی آسماری رخ داده است. با گذشت زمان دبی چشمه از ۵۸۰ لیتر در ثانیه پس از بارش سیل آسا در آذر ماه ۱۳۸۶ تا خشک شدن آن در انتهای دوره کاهش می‌یابد. در طی فرود، ابتدا ۱۸۸ روز رژیم جریان پایه رخ می‌دهد. رژیم جریان در ۴۴ روز پایانی دوره نمایانگر تخلیه نهایی چشمه از راه خالی نمودن مجاری است. بین این دو حالت، رژیم میانه به مدت ۴۸ روز رخ می‌دهد. این نشانگر آن است که در طی منحنی فرود چشمه هلايجان ابتدا آب از ذخیره زمینه سنگ با فرود کم شیب (معادل با محیط متخلخل) رخ می‌دهد. در انتها تخلیه از سیستم مجرای و به سرعت رخ می‌دهد تا آبدهی چشمه به صفر برسد. حجم ذخیره دینامیک در رژیم جریان پایه، جریان میانه، و جریان سریع به ترتیب حدود ۱۳، ۸، و ۰/۰۶ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. این روند وارون در ضرایب فرود احتمالاً در ارتباط با تغذیه دوگانه چشمه هلايجان است، به طوری که افزون بر سیستم مجرای و شکستگی در بخش فراتیک کارست، جریان رو به بالا از راه گسل ژرفایی هلايجان برقرار شده و افت این جریان باعث کاهش شدید و ناگهانی آب چشمه و رخداد فرود وارون شده است.

۴- نتایج و بحث

مطالعات ژئوالکتریک به خوبی می‌تواند برای تشخیص موقعیت و شکل حفرات و مجاری کارستی به‌ویژه در مناطقی که این حفرات خالی و خشک باشند به کار گرفته شوند. در منطقه مورد مطالعه ۳ مقطع با آرایه شلومبرژه، شش مقطع با آرایه دو قطبی - دو قطبی در سازند آهکی آسماری و ۲ مقطع در سازند آهکی ایلام - سروک با فواصل الکترودی ۱، ۲ و ۵ متر مورد توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی قرار گرفته است. موقعیت مقاطع یادشده در شکل ۱ نشان داده شده است.

منحنی‌های تفسیر یک‌بعدی نمونه (در نزدیکی چاه‌های حفر شده) در تاقدیس‌های مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. الگوی مدل‌های یک‌بعدی بر حسب درجه کارست شدگی، تغییرات ترکیب سنگی (لیتولوژیک) سنگ آهک، و شکستگی‌ها به طور ناگهانی تغییر می‌کند. این تغییر ناگهانی در تشخیص مرزها یکی از محدودیت‌های تفسیر ژئوالکتریک با روش سوندینگ است. اصول تفسیر لایه‌های مقاومت الکتریکی یک‌بعدی بر داده‌های لوگ حفاری چاه‌ها و تجربیات حاصل از شناخت مقاومت الکتریکی در مطالعات پیشین در مناطق مختلف کارستی استوار است. بر این اساس در شکل ۸، لایه حفرات خشک منطقه غیر اشباع با مقاومت الکتریکی بسیار زیاد و اصطلاح Karstified limestone، لایه آهک خرد شده خشک در منطقه غیر اشباع با مقاومت الکتریکی متوسط تا زیاد و اصطلاح Fractured limestone، آهک متراکم با مقاومت الکتریکی بسیار زیاد و اصطلاح Compact limestone، آبخوان کارستی آسماری با آبدهی زیاد و مقاومت الکتریکی کم و اصطلاح Karst aquifer، و آبخوان خرد شده آهک ایلام - سروک با مقاومت الکتریکی متوسط و اصطلاح Fractured aquifer تعریف شده‌اند. با فرض مدل زمین لایه‌ای، داده‌های مقاومت ویژه ظاهری VES برای تعیین ستبر و مقاومت لایه‌های زیرین تفسیر قرار شده است. در سازند آسماری پس از لایه آهک خردشده سطحی، لایه کارستی شده حفره‌دار وجود دارد که در ژرفا به آبخوان کارستی برخورد می‌کند در حالی که در سازند ایلام - سروک آبخوان خردشده وجود دارد که در زیر لایه آهک متراکم قرار گرفته است. روش یک‌بعدی توانایی تعیین شکل و اندازه مجاری کارستی را ندارد و تصویر آن به صورت میانگین خطی از نیم کره پتانسیل و جریان القایی است. با توجه به محدودیت‌های ذاتی در تفسیر اولیه یک‌بعدی سونداژهای الکتریکی مناطق کارستی مورد مطالعه، توموگرافی الکتریکی دوبعدی داده‌های VES حاصل از آرایه شلومبرژه در ۳ مقطع C، I، و E انجام شده است. مقاطع توموگرافی I و C (شکل ۹) در دماغه شمال باختری تاقدیس کمردراز در سازند آسماری تهیه شده‌اند. بررسی مقاطع دوبعدی نشان می‌دهد که حفرات خشک در بخش بالایی

است. موقعیت محل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. مقاطع توموگرافی مقاومت الکتریکی دو قطبی - دو قطبی با فاصله الکترودی ۲ متری داده‌برداری شده است. در نمودار سه‌بعدی توموگرافی الکتریکی سازند آهکی آسماری (شکل ۱۳) در لایه‌ای که به شدت حفره‌دار و کارستی است رخداد احتمالی یک پهنه کارستی به طول و عرض تقریبی ۱۲ متر در ۶ متر تا ژرفای ۹ متری مشخص شده است. این ناهنجاری مقاومت الکتریکی در ژرفای گسترش می‌یابد. در نمودار توموگرافی ژئوالکتریک سه‌بعدی آهک ایلام - سروک حفره کارستی یا ناهنجاری خاص مقاومت الکتریکی تشخیص داده نشده است و مطابق با مقاطع توموگرافی الکتریکی دوبعدی پس از عبور از لایه‌های واریزه آبرفتی سطحی به آهک متراکم برخورد می‌کند. مقاطع توموگرافی الکتریکی سه‌بعدی در سازندهای آهکی آسماری و ایلام سروک به خوبی تغییرات مقاومت الکتریکی افقی را با افزایش ژرفا نشان می‌دهند.

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌های صحرایی و تفسیر داده‌های ژئوالکتریک، سازندهای آهکی آسماری و ایلام - سروک در تاقدیس‌های جنوب باختر ایزه از نظر توسعه سیستم‌های کارستی متفاوت هستند. در مقاطع توموگرافی ژئوالکتریک با تفکیک‌پذیری مختلف، حفرات کارستی خشک در آهک آسماری به خوبی مشخص هستند که داده‌های لوگ حفاری و آزمایش پمپاژ چاه‌ها نیز گویای آن است در حالی که آهک ایلام - سروک بدون حفرات قابل تشخیص و دارای تراکم بالا است. در مقطع H که با تفکیک‌پذیری یک‌متری داده‌برداری شده است، افزون بر حفره خشک، حفره‌ای عمودی پر شده از رسوبات تشخیص داده شده که می‌تواند نمایانگر یک فروچاله ژرفایی باشد. در توموگرافی الکتریکی سه‌بعدی انجام شده بر روی آهک آسماری در لایه‌ای که به شدت حفره‌دار و کارستی است رخداد یک حفره عمودی خشک به طول و عرض تقریبی ۱۲ متر تا ژرفای ۹ متری مشخص شده است. در توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی و سه‌بعدی آهک ایلام - سروک حفره کارستی یا ناهنجاری خاص مقاومت الکتریکی تشخیص داده نشده است. آزمایش پمپاژ چاه‌ها نشان داد که افت ناچیز در چاه‌های W1، W2، و W3 رخ داده است به طوری که با آبکشی ۵۵ تا ۶۰ لیتر در ثانیه از چاه‌های بهره‌بردار، سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای کمتر از ۱۰ سانتی‌متر افت کرده است. این نمایانگر قابلیت انتقال و ذخیره بسیار زیاد آبخوان کم‌دراز است. چاه W4 واقع در تاقدیس چال‌خشک (آهک آسماری) با آبدهی ۸۵ لیتر در ثانیه به مدت ۴۶۸۰ دقیقه پمپاژ واقع شد که افت بیشینه منطبق با آن ۳/۳ متر بوده است. هرچند آبدهی چاه‌های آهک آسماری مطلوب است اما با توجه به خشکسالی‌های اخیر، کم آب شدن چشمه هلاجان پیش از آغاز بهره‌برداری از چاه‌های تاقدیس کم‌دراز، و معارضین محلی تصمیم بر آن شد که برداشت از چاه‌های ۱ تا ۴ به ۳۵ لیتر در ثانیه محدود شود و با حفر دو حلقه چاه در سازند ایلام - سروک تاقدیس تنوش، کمبود آب آشامیدنی شهر ایزه به‌ویژه در تابستان برطرف شود. چاه W5 ایزه در آهک ایلام - سروک در سال ۱۳۸۶ با آبدهی ۶۰ لیتر در ثانیه به مدت ۴۳۲۰ دقیقه پمپاژ شد که افت بیشینه منطبق با آن ۰/۹ متر بوده است. چاه W6 که در فاصله حدود ۴۰۰ متری چاه W5 حفاری شده است، در تابستان ۱۳۸۷ دارای آبدهی حداکثر ۳۶ لیتر در ثانیه و افت منطبق با آن ۱/۴۲ متر بوده است. آزمایش پمپاژ انجام شده در چاه‌های یادشده پیش از خشکسالی‌ها انجام شده و نمایانگر آن است که در طی دوره‌های با بارش زیاد سطح آب در این آبخوان ایلام - سروک بالا آمده و آبدهی چاه‌ها نیز مطلوب است، اما در دوره‌های خشکسالی با پایین رفتن سریع آب، آبدهی چاه‌ها نیز تا کمتر از ۲۰ لیتر در ثانیه کاهش یافته است. مقایسه ژرفای سطح آب نمایانگر آن است که آبخوان کارستی آسماری قابلیت ذخیره بسیار زیادی دارد. در حالی که آبخوان کارستی ایلام - سروک ظرفیت ذخیره قابل توجهی

نشان دهنده رخداد غار با منشأ انحلال در امتداد لایه‌بندی باشد. با این حال به علت وجود معارضین محلی، حفاری در نقاط یاد نشده ممکن نبود و یک حلقه چاه در متراژ ۱۲۰ مقطع انجام شد. مقاومت الکتریکی آبخوان کارستی حدود ۲۰۰ اهم متر است که بیانگر تخلخل زمینه‌ای و ذخیره آب زیرزمینی قابل توجه در سیستم یادشده است. مقطع D به طول ۳۸۰ متر در آهک با شیب برگشته سازند آسماری در تاقدیس چال‌خشک داده‌برداری شده است. مقطع توموگرافی یادشده در تکرار ۴ با معیار خطای ۱۱/۸ به دست آمده و دامنه مقاومت الکتریکی در آن بین ۱۸۰ تا ۲۱۰۰ اهم متر متغیر است (شکل ۷). آبخوان کارستی آسماری در این مقطع دارای دو بخش است: بخش به شدت کارستی شده با مقاومت الکتریکی حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ اهم متر و بخش تا حدی کارستی شده با مقاومت الکتریکی ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ اهم متر. در مقطع توموگرافی D دو حفره در میان آهک‌های به شدت خرد شده قابل تشخیص هستند که حفر چاه در موقعیت حفره یک پیشنهاد داده شد. مقطع E (شکل ۱۱) در یال شمال خاوری تاقدیس تنوش و به طول ۳۶۰ متر بر روی آهک ایلام - سروک داده‌برداری شده است. مقاومت الکتریکی در بخش عمده‌ای از مقطع توموگرافی شده بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ اهم متر متغیر است که بیانگر آهک‌های بسیار متراکم با قابلیت ذخیره آب بسیار کم است. در بازه ۱۴۰ تا ۲۰۰ متری مقطع، بخش آهک خرد شده تا ژرفای ۴۰ متری وجود دارد. مقاومت زیاد زمینه آهک ایلام - سروک نمایانگر قابلیت ذخیره آب زیرزمینی کم در این سازند است. با این حال و بر حسب نیاز آب آشامیدنی منطقه، دو حلقه چاه در آهک ایلام - سروک حفاری شد که آبدهی متوسطی دارند. نیمرخ‌های F و G با فاصله الکترودی ۲ متر و نیمرخ H با فاصله الکترودی ۱ متر برای مقایسه کارایی فواصل الکترودی در شناخت عوارض کارستی با اندازه‌های مختلف، مورد توموگرافی الکتریکی قرار گرفته است (شکل ۱۲). مقطع F به طول ۷۴ متر در یال جنوب باختری تاقدیس کم‌دراز داده‌برداری شده و در پای آهک شیب‌دار به شدت کارستی قرار گرفته است. مقاومت الکتریکی مقطع توموگرافی شده بین ۲۰ تا ۲۰۰۰ اهم متر متغیر است. مقطع یادشده از متراژ ۱۶ تا ۶۰ متر به طور مستقیم بر روی آهک آسماری قرار دارد به طوری که منطقه با مقاومت بیش از ۲۰۰ اهم متر در سطح وجود دارد. در بازه ۱۶ تا ۲۰ متر و از ژرفای ۲ تا ۵ متری ناهنجاری با مقاومت بیش از ۱۵۰۰ اهم متر وجود دارد که به احتمال نمایانگر حفر کارستی خشک است. در بازه ۳۴ تا ۳۶ متری ناهنجاری کم ستبرای تقریباً عمودی وجود دارد که منطبق بر پهنه خرد بوده و در سطح نیز در متراژ ۳۶ متری قابل تشخیص است. در بازه ۵۰ تا ۶۰ متری و از ژرفای ۵ متری به بعد نیز ناهنجاری با مقاومت زیاد وجود دارد که می‌تواند نمایانگر حفره زیرسطحی کاملاً خشک باشد.

مقطع H به طول ۵۲ متر در یال جنوب باختری تاقدیس کم‌دراز داده‌برداری شده و در نزدیکی آهک به شدت کارستی و حفره‌دار قرار گرفته است. در توموگرافی مقطع (شکل ۱۲) یک حفره کارستی خشک در ۸ متری و یک حفره عمودی پر شده از رسوبات (که به احتمال نمایانگر یک فروچاله پر شده است) در بازه ۳۶ تا ۴۰ متری وجود دارد. آهک آسماری در بخش اعظم مقطع به شدت خرد شده است. این مقطع که تا ژرفای حدود ۴ متر را پوشش می‌دهد نمایانگر پهنه ایبی کارست با تغذیه سیستم مجرای سریع است.

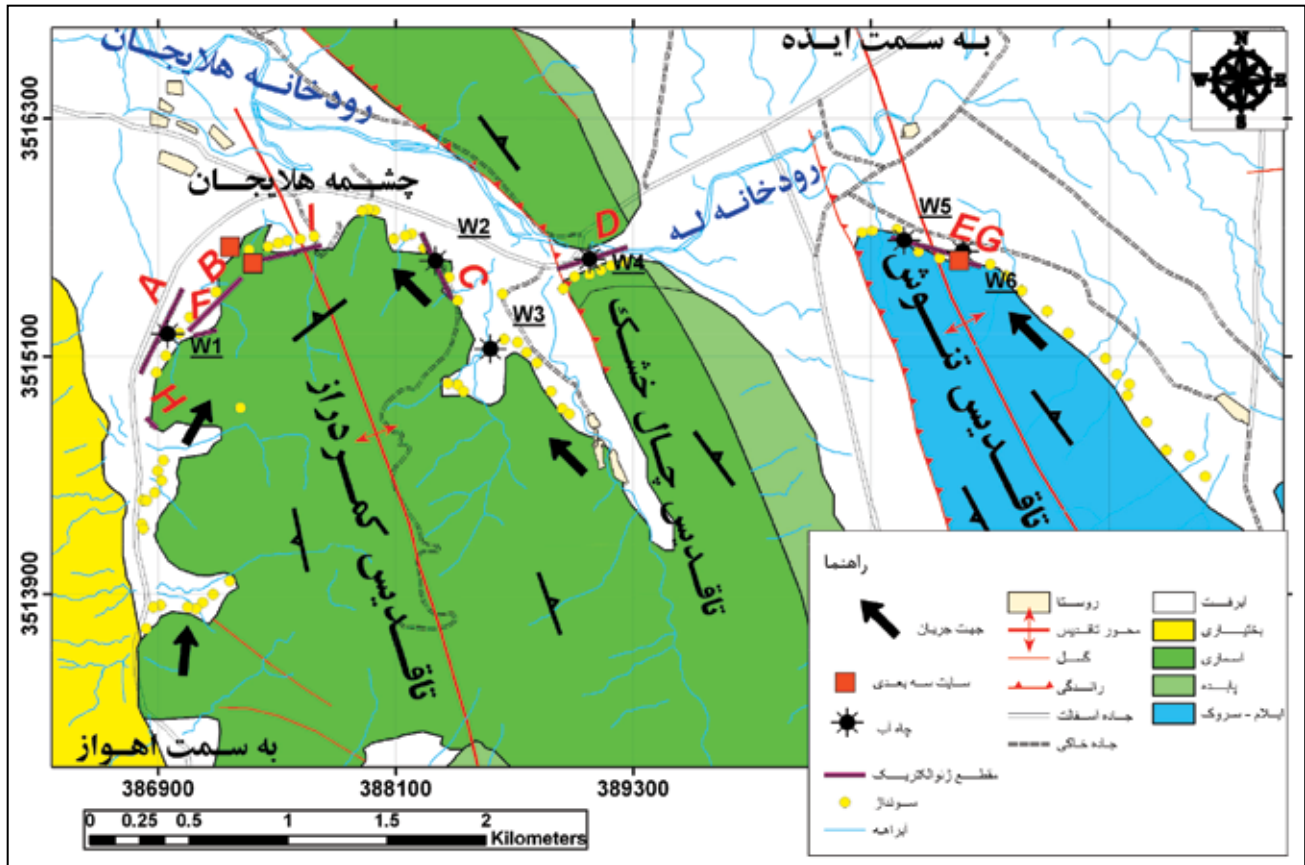
مقطع توموگرافی G (شکل ۱۲) در بخشی از نیمرخ E در نزدیکی آهک ایلام - سروک در تاقدیس شلویش داده‌برداری شده است. مقطع در تطابق با مقطع E است و پس از لایه سطحی واریزه خرد شده سنگی به آهک متراکم با مقاومت زیاد برخورد می‌شود. برخلاف مقاطع داده‌برداری شده با فواصل الکترودی ۱ و ۲ متر در آهک آسماری که به خوبی حفرات کوچک را نمایان ساخته‌اند، مقطع G که در آهک متراکم داده‌برداری شده است ناهنجاری خاصی را نمایان نساخته است.

در منطقه مورد مطالعه یک محل در سازند آهکی آسماری و یک مقطع در سازند آهکی ایلام - سروک مورد توموگرافی ژئوالکتریک سه‌بعدی قرار گرفته

و تنوش ارایه شد (شکل ۱۴). هرچند مدل مفهومی یادشده نمی تواند به خوبی منطبق با تمامی نتایج کمی باشد اما دید کلی حاصل از تفاوت دو سیستم آهک آسماری و ایلام - سروک را نشان می دهد.

پیشنهاد می شود پژوهش جامعی در مورد توان بهره برداری از آبخوان کارستی کمردراز، میزان برداشت مجاز از چاه های آهکی تأمین کننده آب آشامیدنی شهر ایذه و تأثیر برداشت از چاه ها بر آبدی چشمه هلايجان انجام و راهکارهای مدیریت بهینه آبخوان کارستی یادشده، انجام شود.

در توده آهک ندارد. ژرفای آب زیرزمینی در آبخوان ایلام - سروک به سرعت با خشکسالی افزایش می یابد و با رخداد بارش نیز سطح آب در آبخوان با سرعت بیشتر بالا می آید. افت سطح آب در آبخوان ایلام - سروک از سال ۱۳۸۶ تا سال ۱۳۸۸ بیش از ۱۰۰ متر بوده در حالی که در این دوره سطح آب در آهک آسماری یک متر افت داشته است. بر اساس یافته های حاصل از مطالعات زمین شناسی، ساختاری، اطلاعات حفاری و پمپاژ، تحلیل افت سطح آب در آبخوان ها (ناصری و همکاران، ۱۳۸۹)، و یافته های ژئوالکترونیک، مدل مفهومی برای آبخوان های کارستی کمردراز



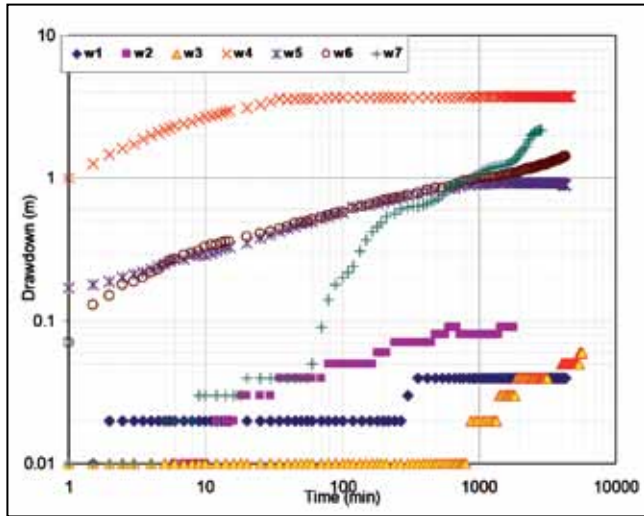
شکل ۱- موقعیت منابع آب، سونداژها و مقاطع ژئوالکترونیک بر روی نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳- تصویری از رانندگی هلايجان



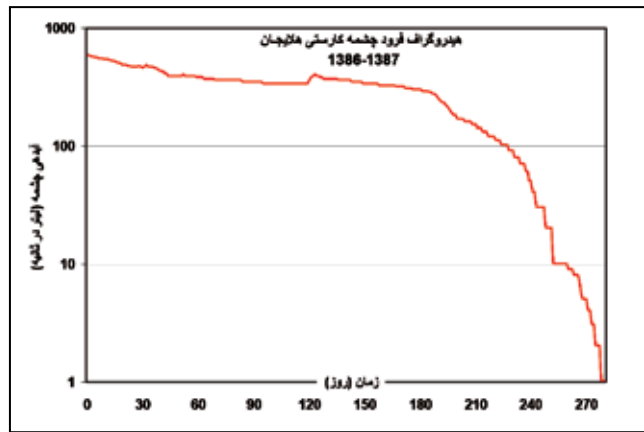
شکل ۲- تصویری از آهک خرد شده گم یک



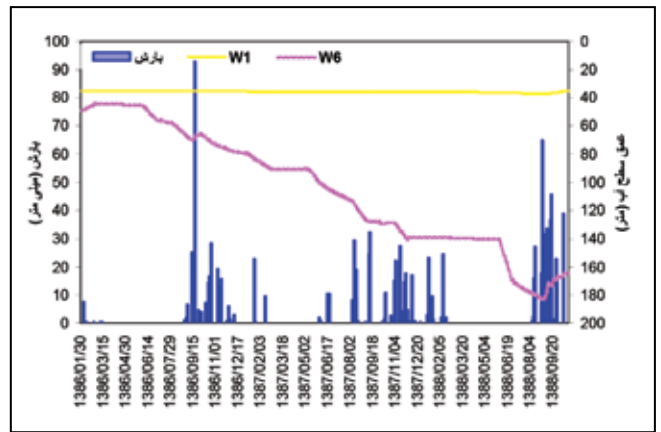
شکل ۵- نمودارهای افت- زمان آزمایش پمپاژ چاه‌های آهکی منطقه مورد مطالعه



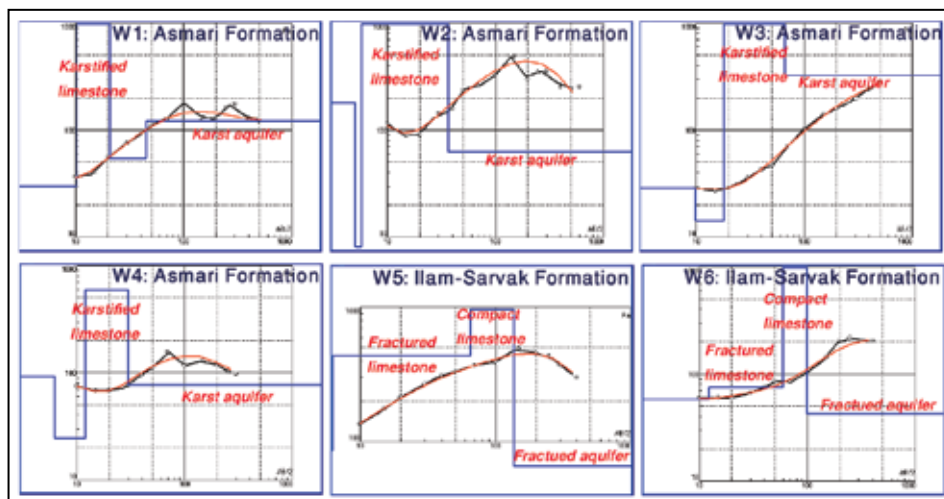
شکل ۴- برگشتگی آهک آسماری در تنگ کرد



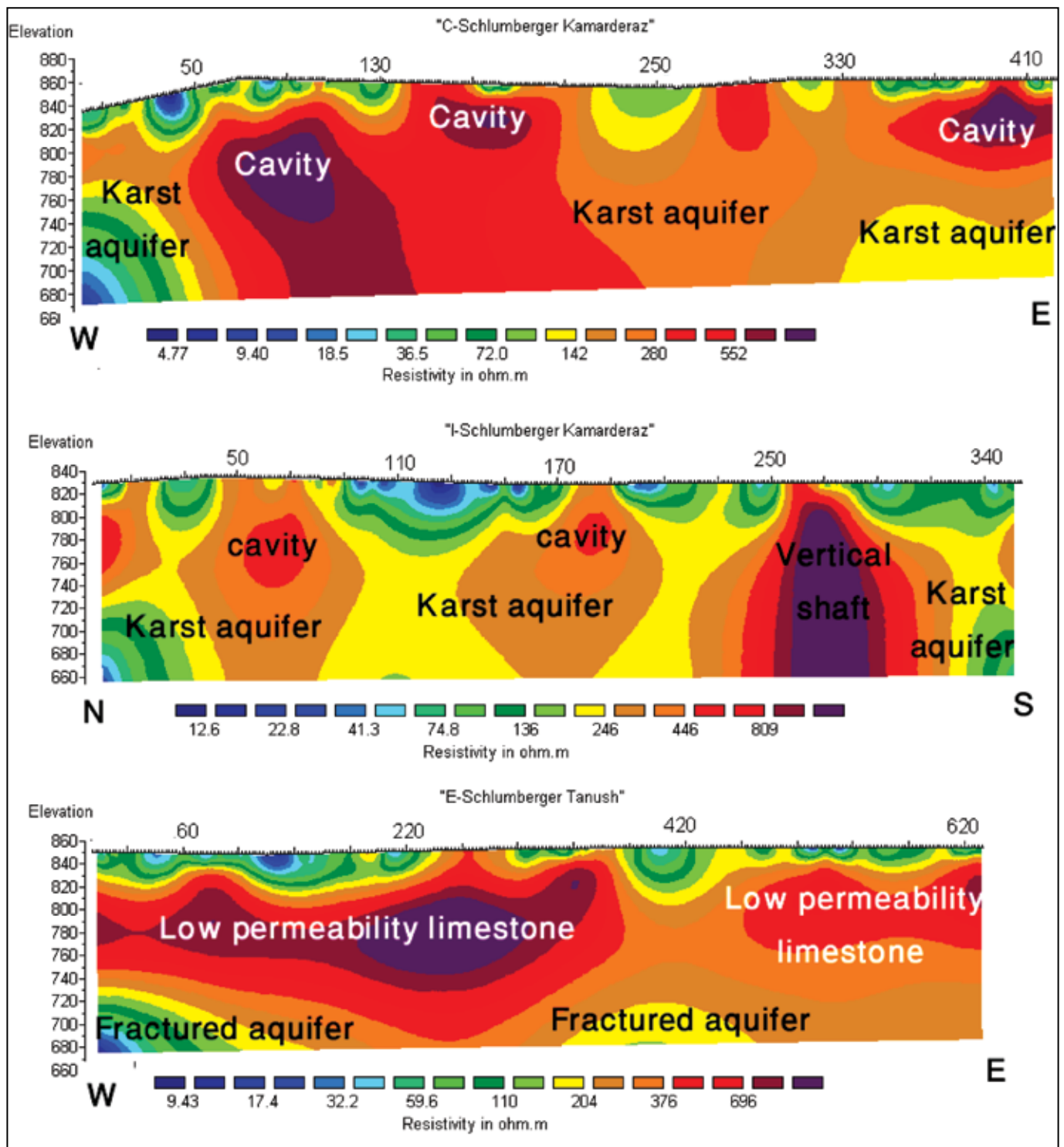
شکل ۷- هیدروگراف فرود چشمه هلاچان در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ (آغاز منحنی فرود در تاریخ ۲۳ آذر ماه ۱۳۸۶ است)



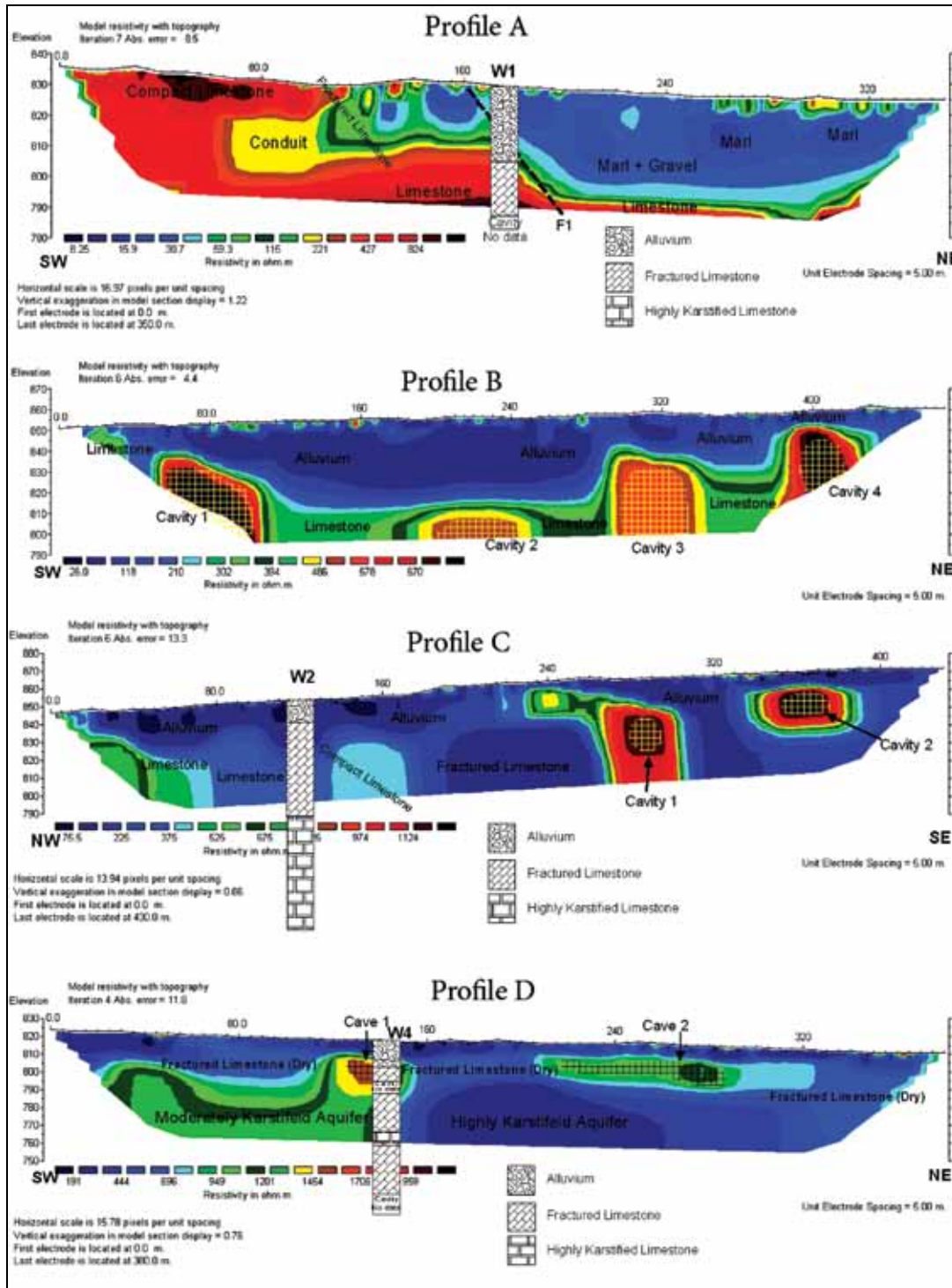
شکل ۶- نمودار ژرفای سطح آب چاه های معرف آبخوان‌های کارستی جنوب باختر ایذه (W1: آسماری تاقدیس کمردراز، W6: ایلام سروک تاقدیس تنوش)



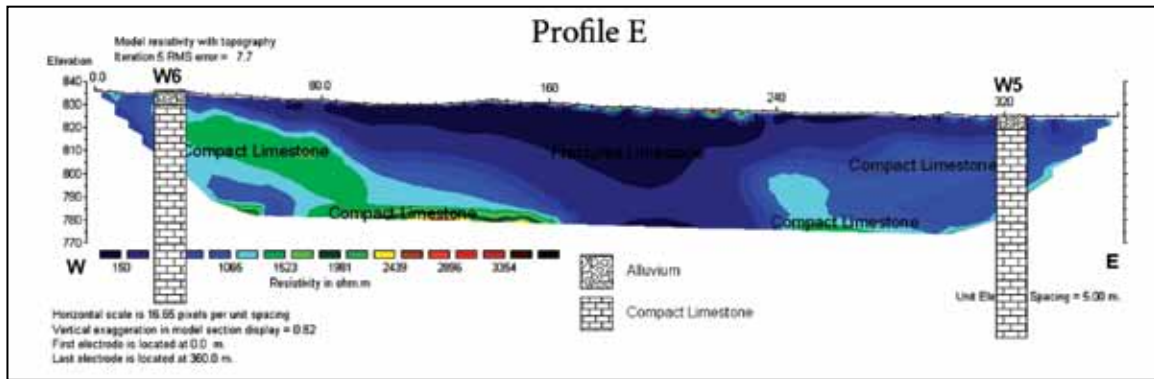
شکل ۸- تفسیر یک بعدی سونداژهای ژئوالکتریک



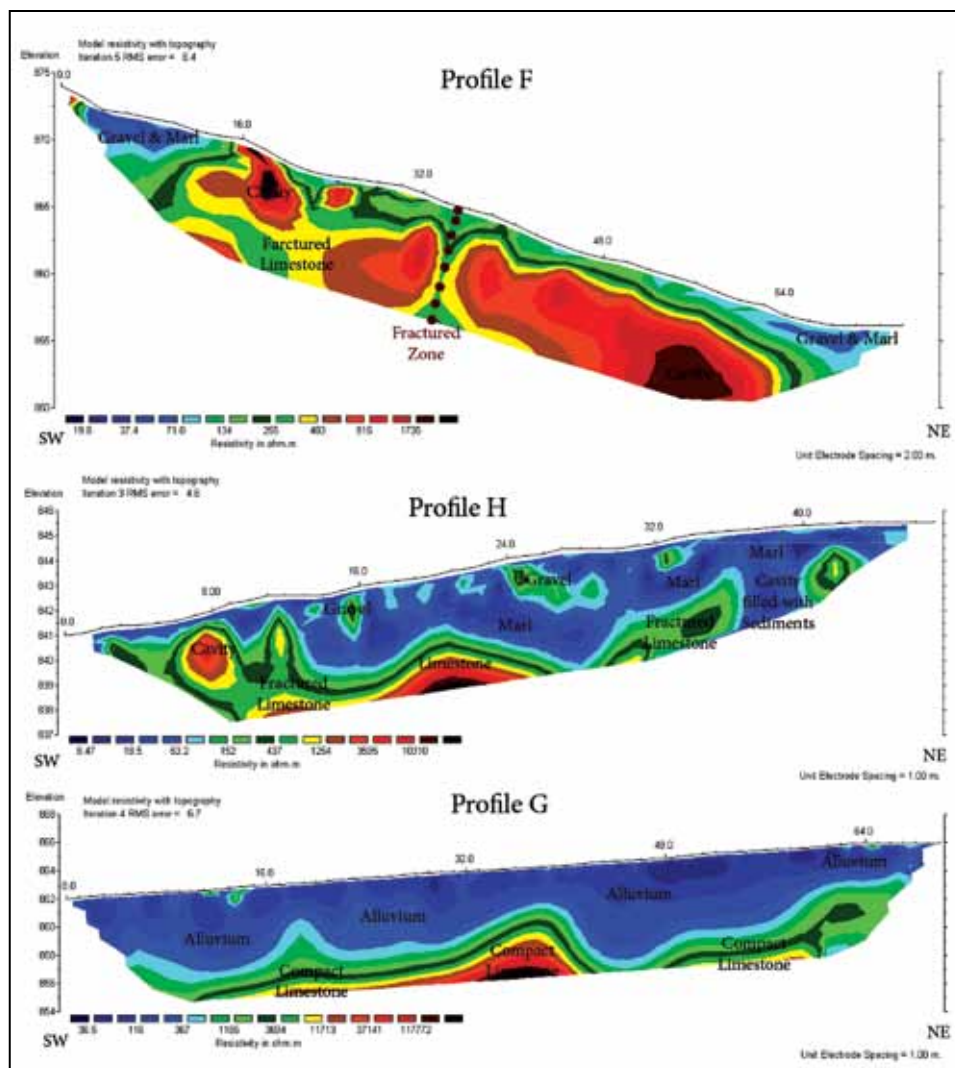
شکل ۹- مقاطع توموگرافی مقاومت الکتریکی حاصل از VES در نیمرخ های C و I (سازند آسماری) و E (سازند ایلام - سروک)



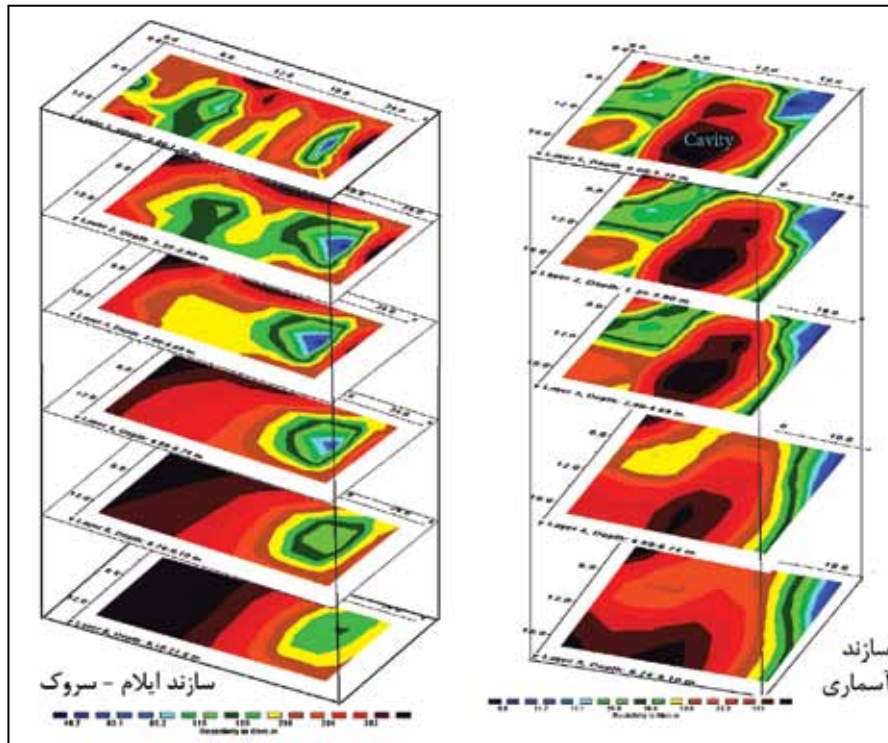
شکل ۱۰- مقاطع توموگرافی مقاومت الکتریکی در نیمرخ‌های A تا D (سازند آسماری)



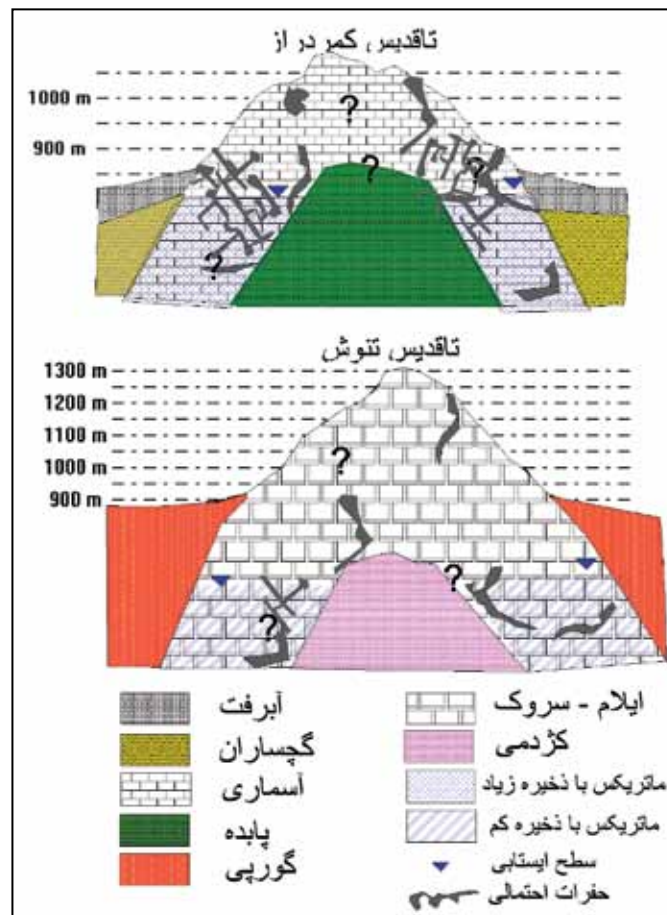
شکل ۱۱- مقطع توموگرافی مقاومت الکتریکی در نیمرخ E (سازند ایلام - سروک)



شکل ۱۲- مقاطع توموگرافی مقاومت الکتریکی F و H (سازند آسماری) و G (سازند ایلام - سروک)



شکل ۱۳- توموگرافی مقاومت الکتریکی سه بعدی در آهک آسماری و آهک ایلام - سروک



شکل ۱۴- مدل مفهومی سیستم‌های کارستی آسماری (جریان پایه چیره با ظرفیت ذخیره زیاد) و آهک ایلام - سروک (جریان سریع چیره و ظرفیت ذخیره کم)

کتابنگاری

درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۰- زمین‌شناسی ایران، نشر دانش امروز.

معاونت مطالعات پایه و طرح‌های جامع منابع آب خوزستان، ۱۳۸۸- گزارش آماربرداری ماهانه منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان.

ناصری، ح. ر.، علیجانی، ف.، و نخعی، م.، ۱۳۸۹- مقایسه خصوصیات هیدرودینامیک سیستم کارست سازندهای آسماری و ایلام - سروک در تاقدیس‌های جنوب غرب ایذه، نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

References

- Dahlin, T., Bernstone, C. & Loke, M. H., 2002- A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, 67, 6, pp. 1692-1700.
- El-Quady, G., Monteiro Santos, F. A., Hassaneen, A. G. & Trindade, L., 2005- 3-D inversion of VES data from Saqqara archaeological area Egypt, *Near Surf. Geophys.*, pp. 227-233
- Geotomosoftware, 2004- RES2DINV and RES3DINV version 3.54 program, Geoelectrical Imaging geotomosoftware. Malaysia.
- Guérin, R., Baltassat, J. M., Boucher, M., Chalikakis, K., Galibert, P.Y., Girard, J. F., Plagnes, V. & Valois, R., 2009- Geophysical characterisation of karstic networks - Application to the Ouyse system (Poumeyssen, France), *C. R. Geoscience*, 341, pp. 810-817.
- Kaufmann, G. & Romanov, D., 2009- Geophysical investigation of a sink in the northern Harz foreland (North Germany). *Environmental Geology*, 58, 2, pp. 401-405.
- Leucci, G. & De Giorgi, L., 2005- Integrated geophysical surveys to assess the structural conditions of a karstic cave of archaeological importance. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, pp. 17-22.
- Loke, M. H. 1999- Electrical imaging survey environment and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys, San Jose, Geometrics.
- Loke, M. H. & Barker, R.D., 1996- Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 131-152.
- Meads, N. L., Bentley, L.R. & Mendoza, C.A., 2003- Application of electrical resistivity imaging to the development of a geologic model for a proposed Edmonton landfill site, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 551-558.
- Militzer, H., Rosler, R. & Losch, W., 1979- Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods, *Geophys Prospect*, 27, pp. 640-652
- Neyamadpour, A., Taib, S. & Abdullahi, W.A.T., 2009- An application of three-dimensional electrical resistivity imaging for the detection of an underground waste-water system, *Stud. Geophys. Geod.*, 53, pp. 389-402.
- Nguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E. & Loke, M. H., 2005- Image processing of 2D resistivity data for imaging faults, *Journal of Applied Geophysics*, 57, pp. 260-277.
- Panno, S. V., Wiebel, C. P., Heigold, P. C. & Reed, P. C., 1994- Formation of regolith collapse sinkholes in southern Illinois: Interpretation and identification of associated buried cavities. *Environmental Geology*, 23, pp. 214-220.
- Radulescu, V., Radulescu, F., Diacopolos, C. & Popescu, M., 2007- Geoelectrical study for delineating underground cavities in karst areas, *Coastal Zone Processes and Management. Environmental Legislation, GEO-ECO-MARINA*, pp. 89-95.
- Represas, P., Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Figueiras, J., Barroso, M., Martins, R., Oliveira, V., Nolasco da Silva, M. & Matos, J.X., 2005- A case study of two and three-dimensional inversion of dipole-dipole data: the Enfermarias Zn-Pb (Ag,Sb,Au) prospect (Moura, Portugal), *Near Surf. Geophys.*, pp. 321-231.
- Satarugsa, P., Meesawat, N., Manjai, D., Yongsanpoo, S. & Arjwech, R., 2004- Man-made cavity imaging with 2D resistivity technique, *International Conference on Applied Geophysics, Chiang Mai, Thailand*, pp. 203-210.
- Schrott, L. & Sass, O., 2008- Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies, *Geomorphology*, 93, pp. 55-73.
- Slater, L. & A., Binley, 2003- Evaluation of permeable reactive barrier (PRB) integrity using electrical imaging methods, *Geophysics*, 68, pp. 911-921.
- Soupios, P. M., Georgakopoulos, P., Papadopoulos, N., Saltas, V., Andeadakis, A., Vallianatos, F., Sarris, A. & Makris, J. P., 2007- Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation, *J. Geophys. Eng.*, 4, pp. 94-103.
- Sultan, S.A. & Monteiro Santos, F.A., 2008- 1D and 3D resistivity inversions for geotechnical investigation, *J. Geophys. Eng.*, 5, pp. 1-11.
- Van Schoor, M., 2002- Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging, *Applied Geophysics Journal*, 50, pp. 393-399.
- Zhou, W., Beck, B. F. & Adams, A. L., 2002- Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography, *Environmental Geology*, 42, pp. 922-928.
- Zhou, W., Beck, B. F. & Stephenson, B. J., 1999- Defining the bedrock/overburden boundary in covered karst terranes using dipole-dipole electrical resistivity tomography, In: Powers M.H., Ibrahim A.B., Cramer L. (eds): *Proc Symp Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Oakland, California, 14-18 March 1999- Environmental and Engineering Geophysical Society, Colorado, pp. 331-339.2.