

اکتشاف منابع آب کارستی با ترکیب روش های مغناطیس سنجی و توموگرافی الکتریکی عمیق، مطالعه موردی منطقه زوباران، شمال شرقی ایران

علی رضانی^۱، میر ستار مشین چی اصل^{۲*} و محسن اویسی موخر^۲

^۱دانشجوی دکتری، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲استادیار، گروه ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۵

چکیده

روش های ژئوفیزیک برای مطالعات منابع آب کارستی و فهم بهتر ارتباط تکنونیک منطقه با پدیده کارستی شدن، در روستای زوباران از توابع شهر قوچان و در داخل آهک های سازند تیرگان انجام شد. روش های مغناطیس سنجی کاربردهای گسترده ای در اکتشاف گسل ها و شکستگی ها دارد. گسل ها به عنوان یکی از فاکتورهای فعال کننده پدیده کارستی شدن مورد توجه هستند. در مرحله اول مطالعات مغناطیس سنجی زمینی با رزولوشن بالا خطوارهای مغناطیسی را در منطقه آشکارسازی کردند. در مرحله بعد مطالعات توموگرافی الکتریکی عمیق، بر اساس نتایج مرحله اول انجام شد. سه مقطع توموگرافی الکتریکی دوبعدی با آرایش الکترودی ونر-شلومبرگر و حداکثر عمق اکتشافی ۲۵۰ متر به صورت عمود بر گسل های احتمالی (به دست آمده از نتایج مغناطیس سنجی) برداشت شد. ابتدا با مدل سازی معکوس دوبعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی و سپس با نرم افزارهای درون یابی، نمایش سه بعدی انجام شد. نتایج مطالعات نشان دهنده ۲ منطقه با مقاومت الکتریکی پایین است که مربوط به زون های خرد شده یا انحلالی هستند و موقعیت آنها با گسل های اکتشاف شده در مرحله قبل مطابقت دارد. در این مطالعه هدف معرفی و صحت سنجی یک فرایند اکتشافی بهینه در مطالعات منابع آب کارستی است. در مرحله اول مغناطیس سنجی به عنوان یک روش سریع و ارزان قیمت انجام و موقعیت زون های مستعد احتمالی با دقت بالایی تعیین می شود. در مرحله دوم مطالعات دقیق توموگرافی الکتریکی با صرف زمان و هزینه بالاتر در زون های مستعد متمرکز و عمق و نحوه گسترش نواحی کارستی شده آشکارسازی می شود.

کلیدواژه ها: منابع آب کارستی، مغناطیس سنجی، توموگرافی الکتریکی عمیق، آرایش الکترودی ونر-شلومبرگر.

E-mail: m.meshinchi@srbiau.ac.ir

*نویسنده مسئول: میر ستار مشین چی اصل

۱- پیش نوشتار

فرونشست به دلیل قرارگیری روی حفره های کارستی در یک فضای شهری به خوبی آشکارسازی شد. مطالعات توموگرافی الکتریکی با عمق بالا (بالتر از ۱۰۰ متر) با استفاده از آرایش الکتریکی ونر-شلومبرگر انجام می شود (Orfanos and Apostolopoulos, 2011 and 2012). در مطالعات انجام شده ابتدا برداشت های تکنونیک و سپس مغناطیس سنجی دقیق با هدف تعیین موقعیت پروفیل های ژئوالکتریک انجام و نتایج ارزشمندی حاصل شده است.

روش مقاومت الکتریکی یک تکنیک بسیار کاربردی در اکتشاف مناطق کارستی است. آهک های خرد شده یا حفره های آبدار اختلاف مقاومت الکتریکی بالایی با سنگ آهک متراکم دارند. روش های ژئوالکتریک، توزیع مقاومت الکتریکی زیرسطحی را با استفاده از قانون اهم محاسبه می کنند.

توانایی روش مغناطیس سنجی در آشکارسازی ناهمگنی های زیرسطحی مانند گسل ها، خردشدگی ها، حفره ها، فضاها، خالی زیرسطحی و پدیده هایی مانند کارستی شدن اثبات شده است (Rybakov et al., 2005; Mathe' et al., 2006; Mochales, 2006; Orfanos and Apostolopoulos, 2012; Khalil, 2016). در این مطالعات ابتدا یک روش سریع مانند گرانی سنجی، مغناطیس سنجی، رادار زمینی و یا تلفیقی از این روش ها روی منطقه انجام شد. مناطق خرد شده و کارستی با پذیرفتاری الکتریکی پایین روی نقشه های مغناطیس سنجی مشخص هستند. در مرحله بعد، توموگرافی الکتریکی دو یا سه بعدی روی نواحی مستعد انجام و بی هنجاری هدف روی مقاطع مقاومت ویژه آشکارسازی شد.

آشکارسازی گسل ها توسط مغناطیس سنجی می تواند کلید موفقیت اکتشاف منابع آبی کارستی باشد. به ویژه زمانی که گسل ها در زیر آبرفت مدفون هستند و امکان به نقشه درآوردن آنها توسط برداشت های میدانی زمین شناسی ممکن نیست. به نقشه درآوردن الگوی گسل های منطقه توسط مغناطیس سنجی منجر به انتخاب سایت و موقعیت مناسب برای پروفیل های ژئوالکتریک می شود و در مرحله

بیشتر از ۱۲ درصد از سطح پوسته زمین توسط آهک های مستعد پوشیده شده و حدود ۲۵ درصد از آب مصرفی انسان از منابع کارستی تأمین می شود (Ford and Williams, 2007). منطقه مورد مطالعه در مجاورت تاقدیس زوباران و در حاشیه روستایی با همین نام در شمال شهر قوچان واقع است. ضخامت بالایی از آهک های سازند تیرگان با میان لایه های ضعیفی از شیل، واحدهای اصلی زمین شناسی منطقه هستند. هدف اصلی این مطالعه تعیین وضعیت زون های کارستیک احتمالی در داخل آهک های تیرگان به منظور حفر یک چاه سازندی و تأمین آب شرب منطقه با استفاده از ترکیب روش های ژئوفیزیکی است.

انحلال و خردشدگی سنگ آهک مشخصات فیزیکی مانند مقاومت ویژه الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی آن را تغییر می دهد. به طور کلی این مشخصات فیزیکی با تغییر جنس، بافت و وضعیت سنگ تغییر می کنند. از این رو در صورتی که تباین مشخصات فیزیکی سنگ در پدیده کارستی شدن مناسب و همچنین ابعاد زون ها به اندازه کافی بزرگ باشد، منابع آبی کارستی توسط روش های ژئوفیزیکی مناسب قابل آشکارسازی هستند (McDowell, 2002).

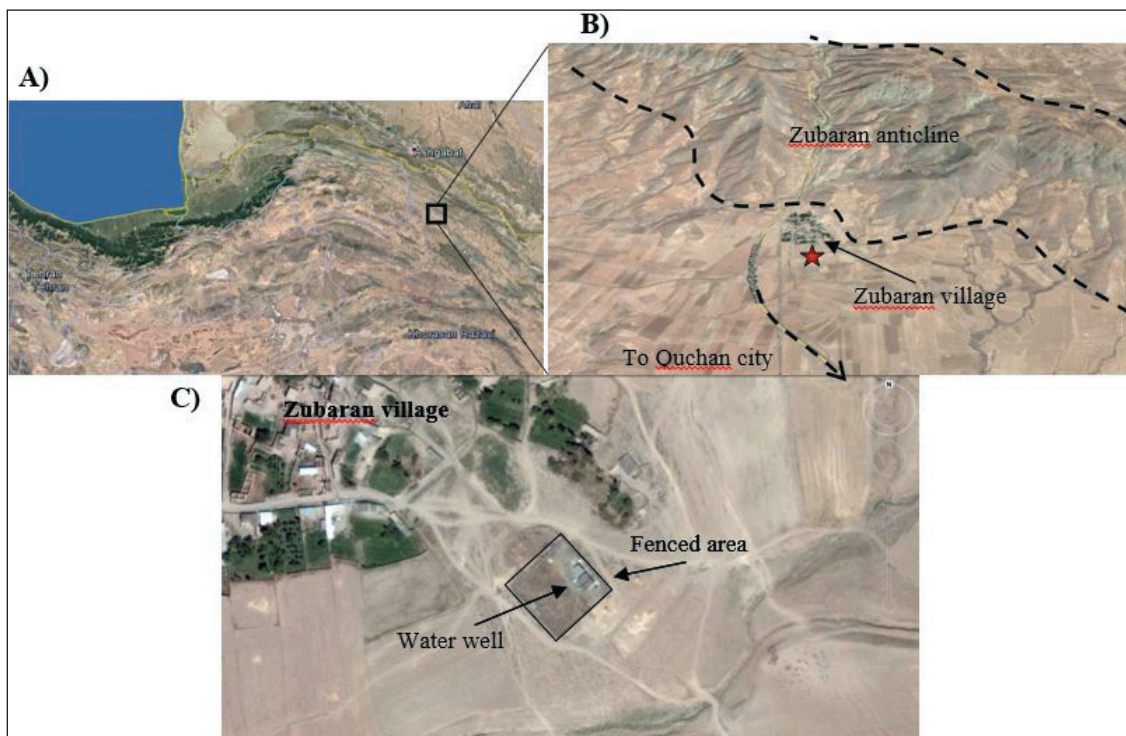
روش های ژئوفیزیکی مختلف بر اساس مشخصات هدف اکتشافی مورد استفاده قرار می گیرند. روش های ژئوفیزیکی مورد استفاده در مطالعات منابع کارستیک شامل لرزه نگاری بازتابی و شکست مرزی (Sloan et al., 2015; Cardarelli et al., 2010)، رادار زمینی (Zieliński et al., 2016; Chromčák et al., 2016) و گرانی سنجی است (Rybakov et al., 2001; Branston and Styles, 2006; Gambetta et al., 2011). یکی از جدیدترین تحقیقات روی حفره های کارستی توسط توموگرافی الکتریکی دو بعدی در ایتالیا انجام شد (Billi et al., 2016). در این تحقیق مناطق دارای پتانسیل

۲- موقعیت و زمین‌شناسی سایت مورد مطالعه

سایت مورد مطالعه در محدوده روستای زوباران از توابع شهرستان قوچان در شمال شرق ایران قرار دارد. (شکل‌های ۱- A و B). مطالعات ژئوفیزیک توسط شرکت صحرا کاوش شرق انجام شد. در محدوده مورد مطالعه یک چاه آب شرب در حال استفاده و تأسیسات پمپاژ و انتقال در داخل یک حصار فلزی قرار دارد (شکل ۱- C). مطالعات با هدف حفر یک چاه رزرو در مجاورت چاه موجود انجام می‌شود. بر طبق نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ فاروج (شکل ۲- A) مهم‌ترین عارضه زمین‌شناسی منطقه تاقدیس زوباران با روند NW-SE و سیستم گسلی با امتداد NW-SE هستند. رخنمون‌های اصلی واحدها در منطقه ضخامت بزرگی از آهک‌های خاکستری با میان‌لایه‌های آهک‌های مارنی و شیل‌های آهکی هستند (شکل ۲- A) که با عنوان سازند تیرگان شناخته می‌شوند (Vaziri et al., 2001). یک لایه نازک آبرفت روی آهک‌های تیرگان را در منطقه پوشانده و موقعیت احتمالی گسل‌ها را پنهان کرده است.

بعد، برداشت‌های توموگرافی الکتریکی، عمق، هندسه و موقعیت زون کارستی را مشخص می‌کند. علاوه بر این هوا و یا آب داخل زون‌های انحلالی و یا خرد شده، پذیرفتاری مغناطیسی صفر دارند و در مقابل سنگ‌آهک پذیرفتاری غیر صفر دارد و این تباین باعث آشکارسازی زون‌های کارستی به وسیله یک مطالعه مغناطیس‌سنجی دقیق می‌شود.

در این تحقیق از یک استراتژی بهینه در ترکیب روش‌های ژئوفیزیک در مطالعات منابع آب کارستی در منطقه قوچان استفاده شده است. مغناطیس‌سنجی به عنوان یک روش کارا، سریع و ارزان‌قیمت نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیک در مرحله اول به کار رفته است. این روش می‌تواند یک محدوده وسیع را در مدت‌زمان کوتاه و با دقت مناسب پیمایش کند و با استفاده از نتایج آن، فاز مطالعاتی توموگرافی الکتریکی با صرف‌زمان و هزینه بالاتر به صورت بهینه و هدفمند اجرایی می‌شود.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه. (A) موقعیت سایت در شمال شرقی ایران؛ (B) تصویر هوایی محدوده روستای زوباران که در ۸ کیلومتری شمال شرقی شهر قوچان واقع شده است. موقعیت تاقدیس زوباران (رخنمون سازند تیرگان) در شکل مشخص است؛ (C) چاه آب موجود در منطقه به همراه محدوده حصار فلزی و تأسیسات چاه.

۳- مطالعات مغناطیس‌سنجی

پی‌هنجاری‌های مغناطیسی توسط برداشت‌های مغناطیسی با رزولوشن بالا قابل آشکارسازی هستند. روش‌های جدید در پردازش، فیلترینگ و تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی اطلاعات ارزشمندی در مورد گسل‌ها در اختیار قرار می‌دهد. در این مطالعه از روش‌های گرادیان میدان مانند سیگنال تحلیلی و مشتق تیلت (Hanafy et al., 2010) برای آشکارسازی خطواره‌های مغناطیسی استفاده شده است. عملگر برگردان به قطب جهت تصحیح و یافتن موقعیت صحیح اهداف اکتشافی و فیلتر ادامه فراسو با هدف حذف نویزهای با فرکانس بالا به کار گرفته شده‌اند.

۳-۱. دامنه سیگنال تحلیلی

عملگرهای مشتقات میدان در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی مورد استفاده هستند (Pesonen et al., 1994). سیگنال تحلیلی با استفاده از مشتقات افقی و عمودی

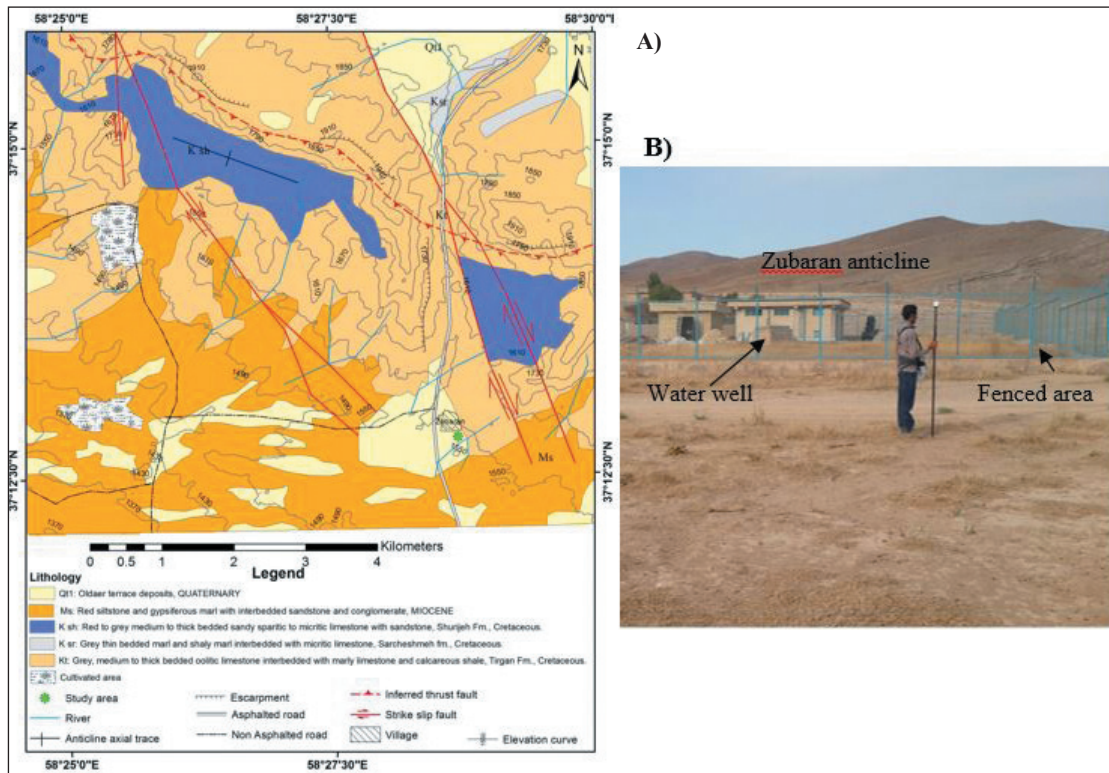
میدان کل، مرز آنومالی‌های مغناطیسی و خطواره‌هایی مانند گسل‌ها را آشکارسازی می‌کند (Jeng et al., 2003). رابطه دامنه سیگنال تحلیلی سه‌بعدی با مشتقات میدان مغناطیسی به صورت زیر است:

$$A(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

که در آن $\frac{\partial T}{\partial x}$ ، $\frac{\partial T}{\partial y}$ و $\frac{\partial T}{\partial z}$ مشتقات افقی و عمودی میدان کل هستند (Pesonen et al., 1994). در این تحقیق عملگر سیگنال تحلیلی روی داده‌های برگردان به قطب (RTP) اعمال شد. برگردان به قطب یک عملگر شیفت فاز است که روی داده مغناطیس‌سنجی عمل می‌کند و اثرات ناشی از دوقطبی بودن میدان را کاهش می‌دهد (Baranov, 1957). این عملگر شکل و موقعیت چشمه مغناطیسی را تصحیح و به تفسیر

کوچک تر به سادگی قابل آشکار سازی نیستند (Cooper and Cowan, 2006). از این رو ضروری به نظر می‌رسد که AS در کنار سایر تکنیک‌های آشکار ساز لیه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق از عملگر مشتق تیلت در کنار AS استفاده شده است.

دقیق نتایج مغناطیس‌سنجی کمک می‌کند (Mendonca and Silva, 1993). علیرغم همه توانمندی‌های عملگر سیگنال تحلیلی در آشکار سازی گسل‌ها، در صورتی که آنومالی‌هایی با دامنه بزرگ در داده‌ها وجود داشته باشند، آنومالی‌های با دامنه



شکل ۲- زمین‌شناسی و تصویر سایت مورد مطالعه. (A) نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه؛ (B) برداشت مغناطیس‌سنجی به عنوان فاز اولیه مطالعات. موقعیت چاه موجود و رخنمون سازند تیرگان (تاقدیس زوباران) در شکل مشخص شده است.

نهایی میدان کل، یک آنومالی خطی با جهت‌گیری NW-SE با حداکثر اختلاف میدان حدود ۱۵۰ نانوتسلا را در قسمت شرقی نقشه نشان می‌دهد (شکل ۳). آنومالی در قسمت شمالی و جنوبی حصار فلزی به وضوح قابل مشاهده است. نقشه دامنه سیگنال تحلیلی در شکل ۴ نشان داده شده است. داده فیلتر شده توسط عملگر سیگنال تحلیلی خطواره مغناطیسی را به صورت شارپ تر نشان می‌دهد. جهت‌گیری شمال غربی - جنوب شرقی خطواره با جهت‌گیری کلی گسل‌های منطقه انطباق دارد (شکل ۲- A).

خطواره به دست آمده در نقشه‌های شدت کل میدان مغناطیسی و دامنه سیگنال تحلیلی یک آنومالی خطی را نشان می‌دهد که احتمالاً مرتبط با یک گسل است که با نام Zون A1 نام‌گذاری شد. در نقشه مشتق تیلت علاوه بر آنومالی A1 یک آنومالی A2 نیز در قسمت شمال شرقی حصار فلزی مشاهده می‌شود (شکل ۵). نتایج مطالعات مغناطیس‌سنجی شواهدی از وجود دو آنومالی خطی هم راستا با گسل‌های منطقه را نشان می‌دهد. بر اساس خروجی نقشه‌های میدان کل، سیگنال تحلیلی و مشتق تیلت احتمالاً دو روند گسل خوردگی در جهت NW-SE در محدوده مورد مطالعه در زیر آبرفت وجود دارد. موقعیت تقریبی خطواره‌های اکتشاف شده در محدوده فانس در شکل ۶ روی تصویر ماهواره‌ای منطقه نشان داده شده است. هدف این مطالعه اکتشاف منابع آبی کارستی در محدوده است. یک احتمال قوی وجود دارد که خوردگی و انحلال آهک، در زون گسلی انجام شده باشد. توپوگرافی الکتریکی نشان خواهد داد که آیا زون کارستی با مقاومت الکتریکی پایین در داخل آهک در زون گسلی وجود دارد، یا شرایط برای کارستی شدن فراهم نشده است.

۳-۲. مشتق تیلت

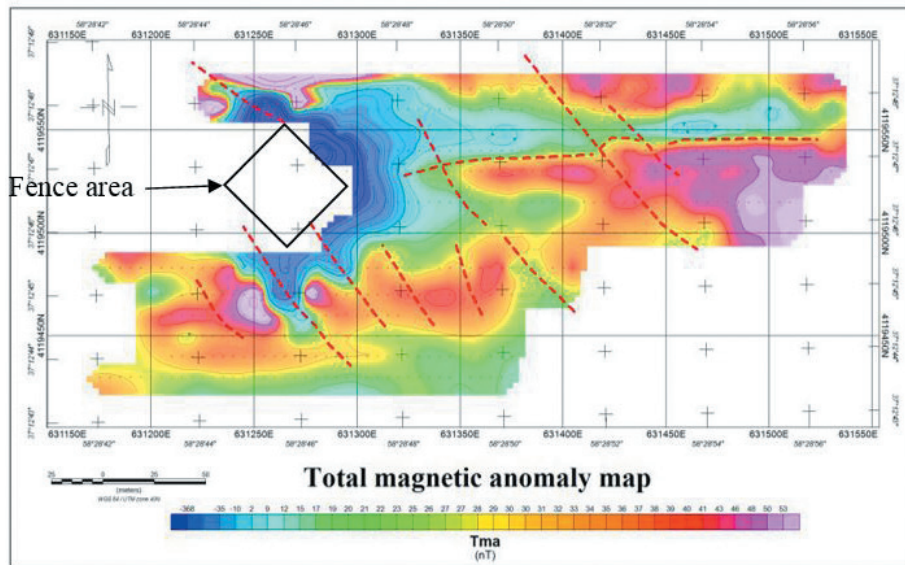
مشتق تیلت به عنوان یک عملگر کاربردی برای تعیین هندسه منشأ مغناطیسی به کار می‌رود (Miller and Singh, 1994) و روی مرزهای آنومالی و خطواره‌های مغناطیسی یک اپتیمم نشان می‌دهد (Salem et al., 2010). مشتق تیلت به صورت رابطه ۲ معرفی می‌شود:

$$T = \tan^{-1} \left[\frac{\partial M / \partial Z}{\sqrt{(\partial M / \partial X)^2 + (\partial M / \partial Y)^2}} \right] \quad (2)$$

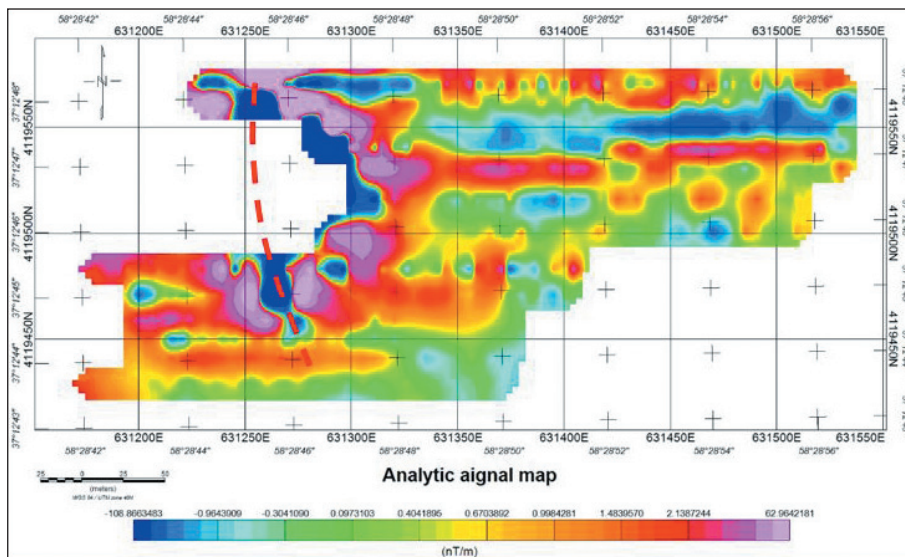
که در آن M میدان مغناطیسی کل است.

۳-۳. نتایج مغناطیس‌سنجی

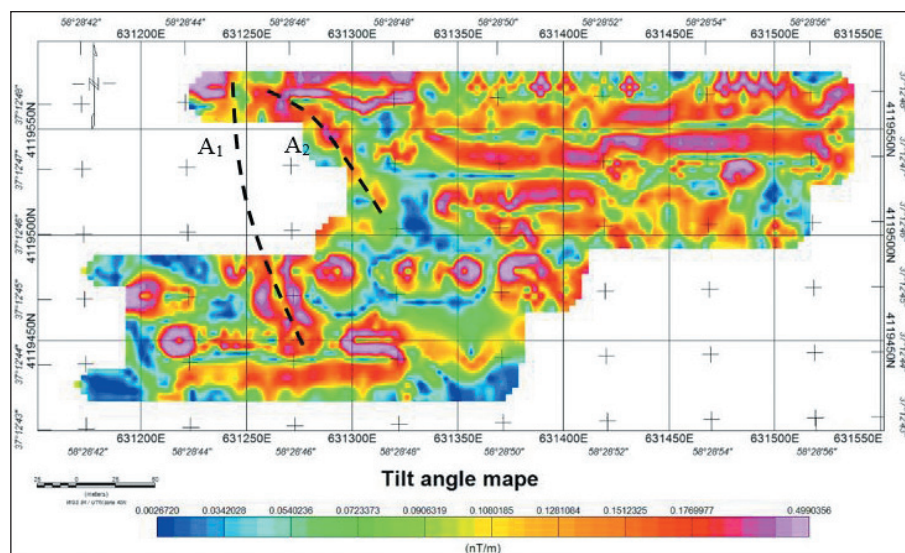
برداشت مغناطیس‌سنجی در منطقه با محدودیت‌هایی همراه است. تأسیسات مرتبط با چاه موجود و محوطه حصار فلزی و همچنین وجود تأسیسات و ابنیه روستایی، فضای داده برداری را محدود می‌کنند. عوارض فوق منشأ نویزهای مغناطیسی هستند و باید در حین داده برداری فاصله منطقی از آنها رعایت شود. شبکه مغناطیس‌سنجی زمینی فضایی به وسعت ۳۵۰×۱۵۰ متر را پوشش می‌دهد (محدوده مجاز برای حفر چاه سازندی). داده برداری شامل ۱۵ پروفیل موازی با فاصله ۱۰ متر و جهت‌گیری شرقی - غربی است. فاصله ایستگاه‌ها روی هر پروفیل ۵ متر انتخاب شد. داده برداری توسط مگنتومتر پروتون با برند تجاری GEM 19T انجام شد. عملگر ادامه فراسو به اندازه ۵ متر به عنوان فیلتر پایین‌گذر برای حذف نویزهای با فرکانس بالا روی داده‌های میدان کل اعمال شد. نقشه نهایی در شکل ۳ نشان داده شده است. به دلیل وجود عوامل تولیدکننده نویز، در داخل و نزدیک حصار فلزی داده مغناطیس وجود ندارد. نقشه



شکل ۳- نقشه میدان کل محدوده مورد مطالعه. در محدوده حصار فلزی داده برداشت نشده. خطواره‌های مخنطیسی روی نقشه مشخص شده‌اند. موقعیت ایستگاه‌های داده برداری مغناطیس‌سنجی روی نقشه نشان داده شده است.



شکل ۴- نقشه دامنه سیگنال تحلیلی. خطواره مغناطیسی با جهت گیری NW-SE مشخص شده است.



شکل ۵- نقشه مشتق تیل. آنومالی‌های A_1 و A_2 روی نقشه مشخص هستند.



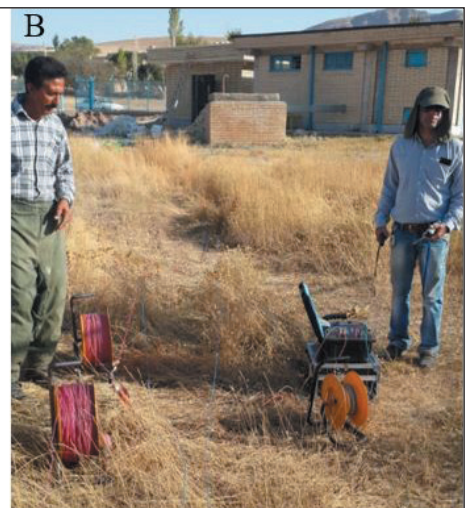
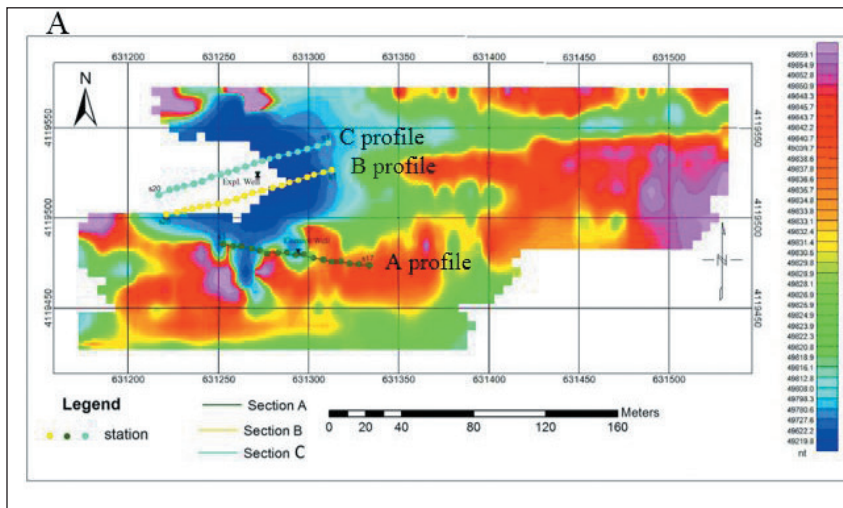
شکل ۶- موقعیت ۳ خطواره در محدوده فنس مورد مطالعه روی تصویر ماهواره‌ای منطقه (خطوط منقطع زرد رنگ). خطوط قرمز رنگ موقعیت و گسترش پروفیل‌های ژئوالکتریک را نشان می‌دهد.

مختلف ویژگی‌های متفاوتی از نظر رزولوشن، حساسیت به اهداف اکتشافی مختلف، عمق کاوش متفاوت و توان سیگنال‌رسانی دارند. آرایش الکترونی دو قطبی-دوقطبی رزولوشن افقی مناسبی به دست می‌دهد، ولی حساسیت به نویز بالایی دارند (Zhou et al., 2002). در این تحقیق از آرایش الکترونی ونر-شلومبرگر (WS) استفاده شده است. این آرایش عمق نفوذ بالا و حساسیت به نویز کمتری نسبت به سایر آرایش‌ها دارد و برای مطالعه منابع کارستی عمیق مناسب است (Dahlin and Zhou, 2004).

از این رو ۳ پروفیل توموگرافی الکتریکی عمیق به صورت عمود بر روند گسل‌های احتمالی طراحی شد. پروفیل‌ها بر اساس نتایج مغناطیس‌سنجی تعیین موقعیت شدند (شکل ۷).

۳-۴. توموگرافی الکتریکی عمیق

در این مطالعه توموگرافی الکتریکی دوبعدی و مدل‌سازی الکتریکی سه‌بعدی به منظور شناخت وضعیت منابع آب کارستی در محدوده انجام شد. یک پارامتر مهم در مطالعات ژئوالکتریک انتخاب آرایش الکترونی مناسب است. آرایش‌های الکترونی



شکل ۷- برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی. (A) موقعیت پروفیل‌ها و ایستگاه‌های توموگرافی الکتریکی دوبعدی روی نقشه شدت میدان کل؛ (B) تجهیزات برداشت میدانی ژئوالکتریک در داخل محدوده حصار فلزی.

توجه به ویژگی‌های منابع آبی کارستی، مطالعات باید با رزولوشن بالا انجام شود، از این رو فاصله نقاط داده روی مقطع ۵ متر در نظر گرفته و حداکثر عمق ۲۵۰ متر برای توموگرافی الکتریکی تعیین شد. داده‌برداری مقاومت ویژه توسط یک دستگاه ژئوالکتریک دو کاناله و مدل‌سازی معکوس دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه توسط نرم‌افزار RES2DINV نسخه 3.59.119 انجام شد (Loke and Barker, 1996). مدل‌سازی مقاطع دوبعدی به صورت دیاگرام فنی و درون‌یابی با هدف نمایش

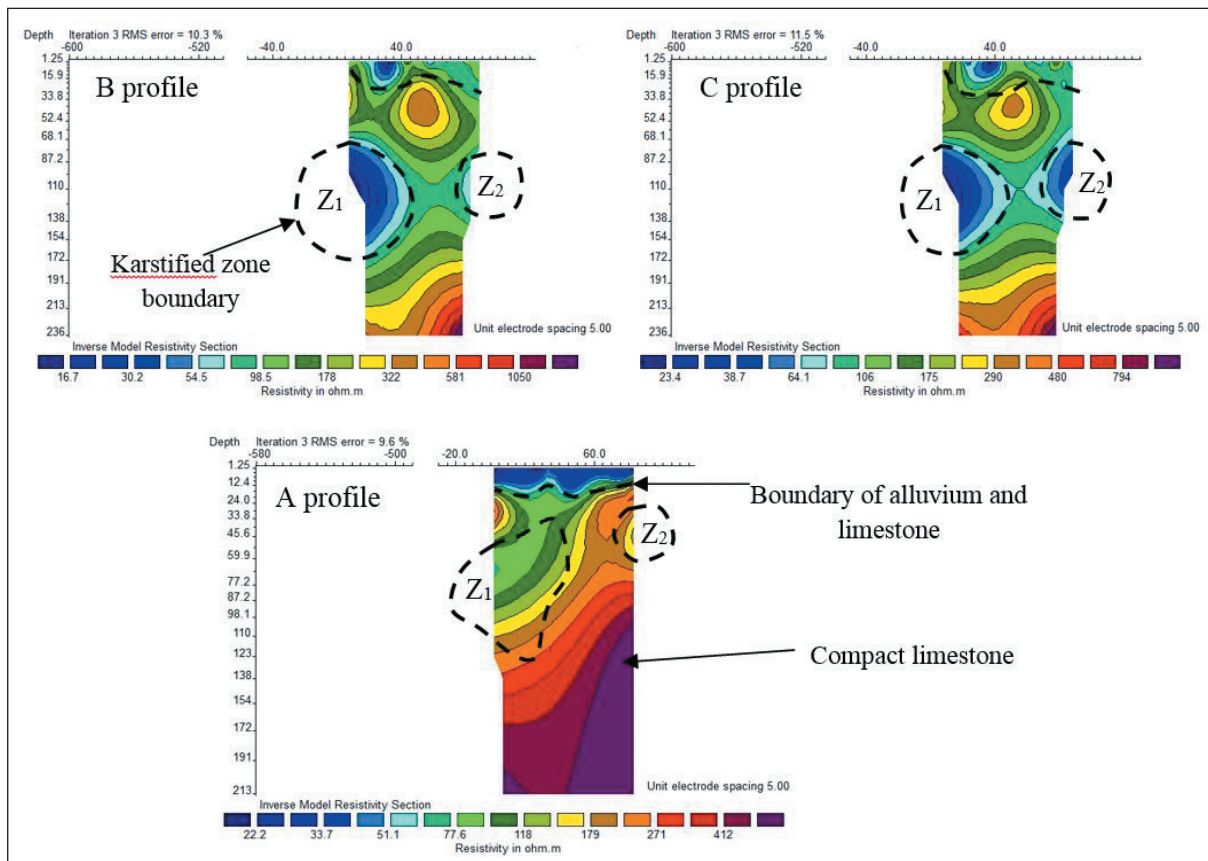
سه پروفیل با جهت‌گیری NE-SW به صورت عمود بر راستای خطواره‌های مغناطیسی طراحی و برداشت شد. حداکثر گسترش فاصله الکترونی برای رسیدن به عمق کاوش مناسب، حدود ۱۴۰۰ متر است. از این رو گسترش الکترونی‌های جریان حداکثر ۱۴۰۰ متر در نظر گرفته شد و جابه‌جایی الکترونی پتانسیل در یک بازه ۱۰۰ متری (با توجه به محدودیت جابه‌جایی چاه) انجام شد که در نتیجه داده‌های مقاومت الکتریکی به دست آمده مربوط به همین بازه ۱۰۰ متری هستند. با

سنگ کف آهکی در زیر رسوباتی با ضخامت حدود ۱۵ تا ۲۰ متر مدفون شده است. رسوبات شامل خاک‌های رسی، شن و ماسه و قطعات ناشی از هوازدگی سنگ کف هستند و مقاومت الکتریکی بین ۳۰ تا ۷۰ اهم‌متر را نشان می‌دهند (شکل ۸). سنگ آهک متراکم با مقاومت الکتریکی بالا روی مقاطع مشخص است. رنج مقاومت الکتریکی ۱۵۰ تا ۸۰۰ اهم‌متر مرتبط با آهک‌های متراکم است. قسمت‌های با عمق بالاتر از حدود ۱۹۰ تا ۲۰۰ متر در هر ۳ مقطع نشانگر مقاومت الکتریکی بالا و پیوسته هستند که نشان‌دهنده محدود شدن عمقی زون کارستی به نواحی با عمق کمتر از ۲۰۰ متر است.

سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده مطالعاتی توسط نرم‌افزار Voxler نسخه ۴ انجام شد. نمایش سه بعدی درک بهتری از چگونگی گسترش زون‌های کارستی شده، عمق و ابعاد این نواحی در اختیار محقق قرار می‌دهد.

۳-۵. نتایج توموگرافی الکتریکی دو بعدی

سه مقطع توموگرافی الکتریکی در محدوده پیشنهاد شده توسط مغناطیس‌سنجی برداشت شد. مقاطع مقاومت ویژه (شکل ۸) در قسمت‌های کم عمق نشان‌دهنده یک محدوده با مقاومت الکتریکی پایین هستند که احتمالاً مربوط به آبرفت سطحی است.



شکل ۸- مقاطع دوبعدی مقاومت الکتریکی. امکان گسترش مقاطع به دلیل موانع و عواملی محلی میسر نبود. هر سه مقطع نشان‌دهنده دو زون با مقاومت الکتریکی پایین (Z_1 و Z_2) هستند که در قسمت شرقی و غربی مقطع و در عمق‌های بیشتر از ۷۰ تا کمتر از ۱۷۰ متر گسترش دارند. نواحی با مقاومت پایین در داخل آهک تیرگان مرتبط با زون‌های کارستی است.

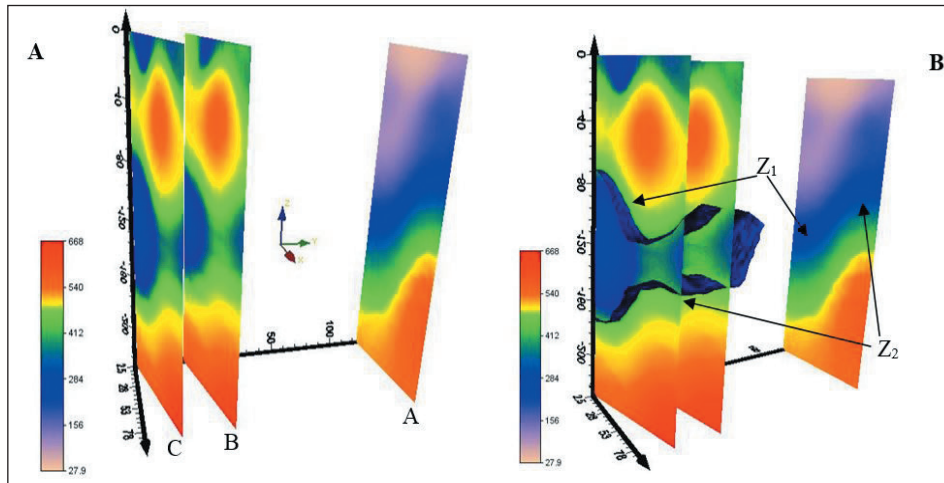
دیاگرام فنی سه بعدی با قرارگیری مقطع‌های مقاومت ویژه در موقعیت صحیح خود به دست آمد. این دیاگرام گام اول در رسم مدل سه بعدی مقاومت ویژه برای کسب یک درک بهتر از چگونگی گسترش نواحی کارستی است (شکل ۹- A). این دیاگرام نتایج اینورژن دوبعدی را تکمیل می‌کند. یک مدل سه بعدی از زون با مقاومت الکتریکی پایین (ناحیه کارستیک) در شکل ۹- B نشان داده شده است. نواحی Z_1 و Z_2 روی مقاطع مشخص هستند.

شکل ۹ نشان می‌دهد که آنومالی رسنا در راستای شمال غربی- جنوب شرقی گسترش دارد و با آنومالی‌های A_1 و A_2 به دست آمده از مطالعات مغناطیس‌سنجی مطابقت دارد (شکل ۵). برای رسیدن به یک درک جامع از نحوه گسترش زون کارستی، یک مدل بلوکی سه بعدی مقاومت ویژه به دست آمد که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰ به خوبی نحوه گسترش نواحی کارستی شده را نشان می‌دهد. نتایج مدل‌سازی‌های ژئوالکتریک با شواهد زمین‌شناسی مانند جهت‌گیری سیستم گسلی در منطقه و یافته‌های مغناطیس‌سنجی مبنی بر وجود دو خطواره مغناطیسی مرتبط با گسل همخوانی دارد. از سوی دیگر اطلاعات چاه قدیمی سازندی موجود در منطقه تأیید کننده توالی زون‌های خرد شده و انحلالی در عمق‌های ۷۰ تا کمتر

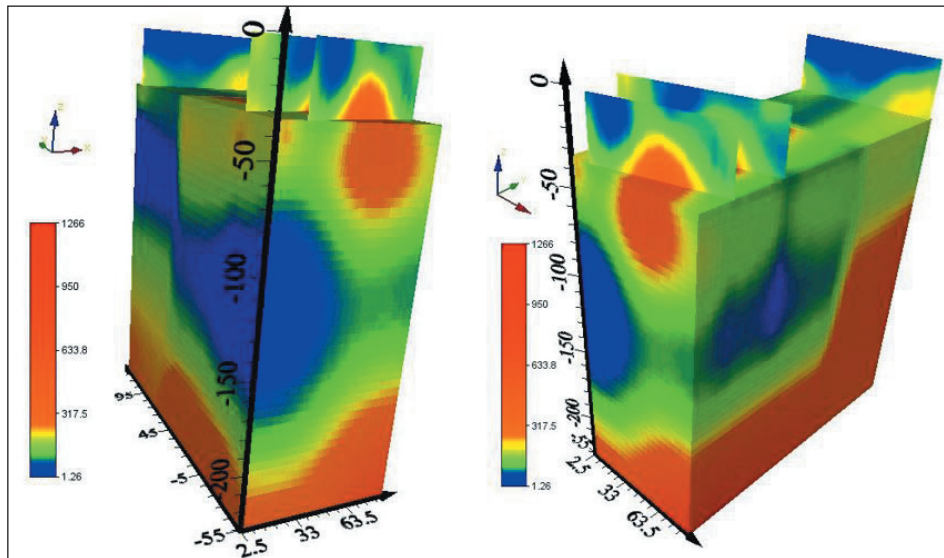
هر سه مقطع مقاومت ویژه شکل ۸ دو ناحیه با مقاومت الکتریکی پایین (Z_1 و Z_2) را در داخل سنگ بستر آهکی منطقه نشان می‌دهند. گسترش عمقی این نواحی تقریباً از حدود ۶۰ تا ۷۰ متر شروع می‌شود و تا عمق ۱۷۰ متر گسترش دارد. رنج مقاومت ویژه این نواحی و قرارگیری آنها در داخل سازند تیرگان این احتمال را تقویت می‌کند که این زون‌ها مرتبط با نواحی کارستی باشند. به دلیل خرد شده بودن و حضور آب در داخل فضاها، انحلال یافته، مقاومت الکتریکی زون کارستی نسبت به آهک متراکم پایین‌تر است. به دلیل محدودیت‌های موجود امکان گسترش محدوده داده‌برداری به منظور تعیین شکل دقیق آنومالی‌های با مقاومت پایین وجود نداشت. ناحیه Z_1 روی مقاطع A، B، و C از نظر موقعیت قرارگیری و جهت گسترش با آنومالی مغناطیس A_1 مطابقت دارد (شکل ۵). به همین ترتیب ناحیه Z_2 با آنومالی مغناطیسی A_2 همخوانی دارد. علاوه بر این، مدل‌سازی سه بعدی زون‌های رسنای Z_1 و Z_2 جهت‌گیری شمال غربی- جنوب شرقی زون کارستی را نشان می‌دهد که هم‌جهت با آنومالی‌های مغناطیسی به دست آمده است.

۳-۶. نتایج نمایش سه بعدی مقاومت ویژه

بعد از مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه سه پروفیل برداشت شده، یک



شکل ۹- نمودار فنیسی یک نمای سه‌بعدی از مقاطع مقاومت ویژه را نمایش می‌دهد. زون‌های رسنا (Z_1 و Z_2) در قسمت‌های میانی مقاطع مرتبط با نواحی کارستی هستند.



شکل ۱۰- بلوک سه‌بعدی مدل مقاومت ویژه الکتریکی محدوده مورد مطالعه. فلش سبز رنگ جهت جنوب و بردار قرمز جهت غرب را نشان می‌دهد. سنگ‌آهک متراکم با رنگ‌های قرمز تا سبز نشان داده شده است. رنگ آبی زون‌های کارستی هستند.

برخی فیلترهای میدان‌های پتانسیل در تعیین مرز آنومالی‌ها و خطواره‌های مغناطیسی کاربرد دارند مانند سیگنال تحلیلی و مشتق تیلت. کاربرد این دو فیلتر روی داده‌های میدان مغناطیسی منجر به آشکارسازی خطواره‌های مغناطیسی A_1 و A_2 شد. شواهد نشان می‌دهند که این خطواره‌های مغناطیسی احتمالاً مسیر خرد گسل‌ها باشند. بنابراین سه پروفیل توموگرافی الکتریکی عمیق در موقعیت خطواره‌های مغناطیسی و در راستای عمود بر امتداد آنها طراحی و برداشت شد.

مقاطع مقاومت ویژه به دست آمده نشان‌دهنده دو زون با مقاومت الکتریکی پایین (زون‌های Z_1 و Z_2) در داخل آهک‌های تیرگان است. رنج مقاومت الکتریکی این آنومالی‌ها نشان می‌دهد که می‌توان آنها را به زون کارستی نسبت داد. از سوی دیگر موقعیت و امتداد آنها بر خطواره‌های A_1 و A_2 منطبق است. مدل‌سازی‌های سه‌بعدی مقاومت ویژه، موقعیت، هندسه و نحوه گسترش زون کارستی را به خوبی نشان می‌دهد (شکل‌های ۹ و ۱۰). این تحقیق توانایی روش توموگرافی الکتریکی را در مطالعات منابع کارستی تأیید می‌کند. چاه موجود در منطقه قدیمی است و اطلاعات دقیقی از آن در دست نیست. در عین حال اطلاعات کلی تأیید کننده برخوردار به توالی زون‌های خرد شده و کارستی از عمق‌های ۷۰ متر تا حدود ۱۷۰ متر است. این نتایج با خروجی مدل‌های مقاومت ویژه همخوانی دارد.

در این تحقیق یک ترکیب کاربردی و بهینه از روش‌های ژئوفیزیکی با هدف مطالعات منابع آبی کارستی ارائه شد. یک برداشت مغناطیس‌سنجی با رزولوشن بالا به عنوان فاز

از ۱۸۰ متر است. به دلیل قدیمی بودن چاه اطلاعات کامل تری از چاه موجود نیست. نتایج به دست آمده، اطلاعات ارزشمندی در مورد توالی روش‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد شده در مطالعات منابع آب کارستی ارائه می‌کند. یک زنجیره سریع، بهینه و کارا از روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج قابل قبولی به دست آمد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه اکتشاف منابع آب کارستی با استفاده از ترکیب روش‌های ژئوفیزیکی است. روش‌های مغناطیس‌سنجی و مقاومت الکتریکی تکنیک‌های کاربردی در اکتشافات زیرسطحی هستند. در این تحقیق از روش مغناطیس‌سنجی به عنوان فاز اولیه مطالعات با هدف اکتشاف عارضه‌های تکنیکی مانند گسل‌ها استفاده شد. مغناطیس‌سنجی کاربردهای وسیعی در اکتشاف ناهمگنی‌ها مانند زون‌های خرد شده، حفره‌ها و گسل‌ها (به عنوان یک فاکتور فعال کننده پدیده کارست) دارد. نقشه شدت میدان مغناطیسی کل، یک خطواره مغناطیسی با جهت شمال غربی - جنوب شرقی را نشان می‌دهد (آنومالی A_1) که با جهت کلی گسل‌های منطقه همخوانی دارد (شکل ۳). فیلترهای مختلف میدان‌های پتانسیل مانند ادامه فراسو و برگردان به قطب با هدف حذف نویز و آشکارسازی بهتر آنومالی‌های پنهان مورد استفاده قرار گرفت.

سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مدیریت آب و فاضلاب روستایی و شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی انجام شده است. همچنین اجرای طرح مطالعاتی توسط شرکت صحرا کاوش شرق انجام شده است. نگارنده برخود لازم می‌داند که کمال تشکر و قدردانی را از عوامل مربوطه داشته باشد.

اولیه مطالعات می‌تواند زون‌های امیدبخش را با صرف زمان و هزینه اندک مشخص کند. مغناطیس‌سنجی می‌تواند در یک منطقه گسترده با صرف زمان نسبتاً کم انجام شود. توموگرافی الکتریکی دوبعدی در فاز بعد با صرف زمان و هزینه بالاتر، مشخصات دقیق‌تری از زون کارستی تعیین می‌کند. در نهایت رسیدن به نمایش سه‌بعدی مقاومت ویژه الکتریکی درک بهتری از موقعیت، گسترش و عمق زون کارستیک را ارائه می‌کند.

References

- Baranov, V., 1957- A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudogravimetric anomalies. *Geophysics* 22, 359-383.
- Billi, A., Filippis, L. D., Poncia, P., Pio Sella, P. and Faccenna, C., 2016- Hidden sinkholes and karst cavities in the travertine plateau of a highly-populated geothermal seismic territory (Tivoli, central Italy). *Geomorphology* 255 (2016) 63–80.
- Branston, M. W. and Styles, P., 2006- Site characterization and assessment using the microgravity technique: a case history, *Near Surface Geophysics*, 4, p. 377-385.
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A. and Di Filippo, G., 2010- Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities: *Geophysical Prospecting*, v. 58, p. 685–695.
- Chromčák, J., Grinč, M., Pánisová, J., Vajda, P. and Kubová, A., 2016- Validation of sensitivity and reliability of GPR and microgravity detection of underground cavities in complex urban settings: Test case of a cellar. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. Volume 46, Issue 1, Pages 13-32.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2006- Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computer and Geosciences*, Vol. 32, pp. 1585-1591.
- Dahlin, T. and Zhou, B., 2004- A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379e398.
- Ford, D. and Williams, P., 2007- *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley & son Ltd, England, pp. 1-562.
- Gambetta, M., Armadillo, E., Carmisciano, C., Stefanelli, P., Cocchi, L. and Tontini, F. C., 2011- Determining geophysical properties of a near-surface cave through integrated microgravity vertical gradient and electrical resistivity tomography measurements: *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 73, no. 1, p. 11–15.
- Hanafy, S. M., Aboud, E. and Mesbah, H. S. A., 2010- Detection of subsurface faults with seismic and magnetic methods. *Arab J Geosci* DOI 10.1007/s12517-010-0255-6.
- Jeng, Y., Lee, Y. L. Chen, C. Y. and Lin, M. J., 2003- Integrated signal enhancements in magnetic investigation in archaeology. *J. Appl. Geophys.* 53, 31–48.
- Kaufmann, R. D. and DeHan, R. S., 2007- Microgravity Mapping of Karst Conduits within the Woodville Karst Plain of North Florida, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP '07), Denver, Colorado, SAGEEP, Vol. 20, p. 1517-1526.
- Khalil, M. H., 2016- Subsurface faults detection based on magnetic anomalies investigation: A field example at Taba protectorate, South Sinai. *Journal of Applied Geophysics* 131 (2016) 123–132.
- Loke, M. H. and Barker, R. D., 1996- Rapid least square inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131e152.
- Mathe, V., Le've`que, F., Mathe, P. E., Chevallier, C. and Pons, Y., 2006- Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. *J Appl Geophys* 58:202–217.
- McDowell, P. W., 2002- *Geophysics in Engineering Investigations*. Geological Society Publishing House.
- Mendonca, C. A. and Silva, B. C., 1993- A stable truncated series approximation of the reduction-to-the-pole operator. *Geophysics* 58, 1084–1090.
- Miller, H. G. and Singh, V., 1994- Potential field tilt — a new concept for location of potential field sources. *J. Appl. Geophys.* 32 (2–3), 213–217.
- Mochales, T., 2006- *Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza*. Unpublished MSc University of Zaragoza, 191 pp.
- Orfanos, C. and Apostolopoulos, G., 2011- 2D–3D resistivity and microgravity measurements for the detection of an ancient tunnel in the Lavrion area, Greece. *Near Surface Geophysics*, 2011, 9, 449-457.
- Orfanos, C. and Apostolopoulos, G., 2012- Analysis of different geophysical methods in the detection of an underground opening at a controlled test site. *Journal of the Balkan Geophysic Society*, Vol. 15, No. 1, March 2012, p. 7-18
- Pesonen, L., Nevanlinna, H., Leon, M. A. H. and Ryno, J., 1994- The earth's magnetic field maps of 1990. *Geophysics* 30, 57–77.
- Rybakov, M., Goldshmidt, V., Fleischer, L. and Rotstein, Y., 2001- Cave detection and 4-D monitoring: a microgravity case history near the Dead Sea. *The Leading Edge (Society of Exploration Geophysicists)* 20(8):896–900
- Rybakov, M., Rotstein, Y., Shirman, B. and Al-Zoubi, A., 2005- Cave detection near the Dead Sea- a micromagnetic feasibility study. *The Leading Edge (Society of Exploration Geophysicists)* 24(6):585–590
- Salem, A., Williams, S., Samson, E., Fairhead, D., Ravat, D. and Blakely, R. J., 2010- Sedimentary basins reconnaissance using the magnetic tilt-depth method. *Explor. Geophys.* 41, 198–209.
- Sloan, S. D., Peterie, Sh. L., Miller, R. D., Ivanov, J., Schwenk, J. T. and McKenna, J. R., 2015- Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques. *Geophysics*, Vol. 80, NO. 5; P. EN127–EN135, 8 FIGS. 10.1190/GEO2014-0529.1
- Vaziri, S. H. Majidifard, M. R. and Saidi, A., 2001- Geological map of Iran 1:100,000 sheet No. 6962, geological survey of Iran.
- Zhou, W., Beck, B. F., Adams, A. L., 2002- Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology* 42, 922-928.
- Zieliński, A., Lyskowski, M. and Mazurkiewicz, E., 2016- Ground Penetrating Radar investigation of limestone karst objects in the Botanical Garden in Kielce. *Geology, geophysics & Environment*. vol. 42 (1): 31–38.

Imaging karst aquifers by combining deep electrical resistivity tomography with magnetic surveys, a case study of the Quchan area, NE Iran

A. Ramezani¹, M. S. Meshinchi Asl² and M. Oveysi Moakhar³

¹Ph.D. Student, Department of Geophysics, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Geophysics, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Geophysics, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 2017 May 16

Accepted: 2017 September 16

Abstract

Geophysical surveys have been carried out to characterize the structure and to better understand the karstic water reservoirs in the Quchan area. Deep 2-D resistivity tomography and magnetic method have been used to detect the most promising zones for new water-well siting. Magnetic method has a common usage in the interpretation of the tectonic framework, faults and fractures that are triggering parameters of karstification phenomena. Therefore a high resolution magnetic survey was carried out as the first detection approach at selected sites in the studied region with the aim of probable buried fault exploration for karstic zone detection. The geomagnetic results detect magnetic anomalies in NW-SE direction agreed with the known faults system in the area. As the second approach, a Deep Electrical Resistivity Tomography (DERT) process has been designed according to magnetic results. Three sections of 2-D electrical tomography using the Wenner-Schlumberger array has been carried out along a survey line of 100 m and an investigation depth of about 250 m with resolution of 5 m. The 2-D inversion modeling provides suitable information about the exploration targets and essential geological formations. The studies illustrate that low resistivity areas on the sections related to karstic zones. We used this combination of geophysical methods in this study to prove that these geological phenomena can be detected by such quick, economic and confident sequence of geophysical methods.

Keywords: Karstic water resources, Magnetic survey, Deep Electrical Resistivity Tomography, Wenner-Schlumberger array

For Persian Version see pages 265 to 272

*Corresponding author: M. S. Meshinchi Asl; E-mail: m.meshinchi@srbiau.ac.ir