

صص ۹۷-۱۱۷

ارزیابی روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین در شناسایی کارست مدفون در ناهمواری‌های شاهو (غار قوری قلعه)

روناک شوکتی

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

امجد ملکی*

دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

فرزاد شیرزادی تبار

استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۱

چکیده

کارست و حفره‌های کارستی یکی از چالش برانگیزترین موضوعات است. با توجه به اینکه مناطق کارستی تقریباً ۲۰٪ از مساحت زمین را پوشش می‌دهند، شناسایی و بررسی موقعیت حفره‌های کارستی می‌تواند در حوزه‌های گوناگونی مانند توسعه گردشگری، جلوگیری از فرونشست و منابع آب کارستی مفید باشد. در ناهمواری‌های شاهو واقع در استان کرمانشاه لند فرم‌های کارستی از جمله غارها و حفره‌های مدفون به خوبی توسعه یافته‌اند. این پژوهش با هدف شناسایی سریع و اولیه حفره‌های کارستی مدفون با استفاده از یک روش آسان و کم‌هزینه در مطالعات ژئومورفولوژی و بررسی گسترش غار قوری قلعه بیشتر از وضعیت موجود انجام گرفته است. بدین منظور در ناهمواری‌های شاهو (غار قوری قلعه و محیط اطراف آن)، دو روش ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) و الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین (VLF) مورد استفاده و مقایسه با هم قرار گرفت. ابتدا با تعیین موقعیت غار در سطح زمین، مسیر برداشت پروفیل‌ها به صورت عمود بر مسیر غار نیز طراحی نیز گردید. سپس ۵ پروفیل به روش VLF و ۴ پروفیل به روش ERT برداشت شد. ۴ پروفیل ERT عمود بر پروفیل‌های شماره ۲، ۴ و ۵ VLF برداشت و در نهایت نتایج حاصل از دو روش ژئوفیزیکی مذکور با هم مقایسه شدند. نتایج حاصل از هر دو روش علاوه بر تعیین موقعیت دقیق غار، بی‌هنجاری‌هایی را خارج از محدوده غار نیز شناسایی کردند که می‌تواند حاکی از گسترش غار یا وجود حفره‌های احتمالی دیگر در اطراف آن باشد. از دیگر یافته‌های پژوهش می‌توان به امکان دستیابی سریع به نتایج و ارزان بودن استفاده از روش VLF نسبت به سایر روش‌های شناسایی اشاره کرد.

واژگان کلیدی: کارست مدفون، ژئوفیزیک، ناهمواری‌های شاهو، غار قوری قلعه، کرمانشاه.

مقدمه

بعضی مناطق در جهان نسبت به مناطق دیگر ذاتاً آسیب‌پذیرتر هستند که به مجموعه‌ای از عوامل مانند زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی، تنوع زیستی، آب و هوا و غیره بستگی دارد. اگر فقط عوامل زمین‌شناسی سطحی و زیرسطحی را در نظر بگیریم، آسیب‌پذیرترین مناطق مناطقی هستند که رابطه مستقیمی بین مورفولوژی سطح و هیدرولوژی زیرسطحی دارند که به‌طور گسترده‌ای تحت عنوان "کارست" شناخته می‌شوند (گوتیرز^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). ویژگی و رفتار سیستم‌های کارستی معمولاً دارای درجه قابل توجهی از ناهمگنی و عدم اطمینان هستند که مکانیسم‌های هیدرودینامیکی را جهت مطالعه و اکتشاف بسیار پیچیده می‌کند (وایت^۲، ۲۰۰۷، کاریر^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). به همین دلیل مناطق کارستی موضوع بسیاری از بررسی‌های ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، باستان‌شناسی، ژئو تکنیکی، زیست‌محیطی و ... است.

کارست و حفره‌های کارستی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی و یک واحد هیدروژئولوژی پیچیده در زیرزمین به حساب می‌آیند که معمولاً توسط فعالیت انحلال آب بر روی سنگ‌بستر کربناته (معمولاً سنگ‌آهک و دولومیت) شکل می‌گیرند (بین^۴، ۲۰۱۷). بر اثر نفوذ آب در سنگ‌های انحلال‌پذیر، سنگ‌ها فرسایش یافته و در آب‌های نفوذی حل می‌شوند و به تدریج حفره ایجاد می‌گردد و این حفره به‌مرور زمان به گذرگاه‌های زیرزمینی تغییر شکل می‌یابند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۴). شناسایی و بررسی حفره‌های مدفون کارستی می‌تواند در موضوعات مختلف کاربردی بسیار حائز اهمیت باشد. یکی از این موضوعات مرتبط، منابع آب زیرزمینی است. مطالعه منابع آب سازنده‌های کارستی، به دلیل تأمین آب مصرفی جمعیت قابل توجهی از مردم مناطق مختلف جهان (حدود ۲۵٪)، دارای اهمیت بسیار زیادی است (افراسیابیان، ۱۳۷۲). از دیگر موضوعات مرتبط وجود فضاها طبیعی و حفره‌ها در سنگ‌های کارستی زیرزمینی می‌باشد که منجر به مشکلات زیادی در مهندسی عمران و مدیریت محیط‌زیست می‌شود. حضور چنین ویژگی‌هایی به‌عنوان یک مانع برای گسترش شهرنشینی در شهرهای بزرگ و روبه رشد تلقی می‌شود (متوالی و الفوزان^۵، ۲۰۱۳). برای ساخت و سازهای مهندسی که در نواحی کارستی به‌خصوص مناطقی که حفره‌ها و اشکال کارستی به‌خوبی توسعه پیدا کرده‌اند، ممکن است اتفاقات غیرمنتظره و مشکلات جدی زمین‌شناسی از جمله هجوم ناگهانی آب، ریزش تونل و فرونشست زمین اتفاق بیفتد (سانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۲)، به همین دلیل تشخیص موقعیت و مکان حفره‌های زیرزمینی برای بررسی خطرات ناشی از فرونشست ضروری است (کارداری^۷ و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین گردشگری در محیط‌های کارستی

1- Gutiérrez

2- White

3- Carrière

4- Bin

5- Metwaly & AlFouzan

6- Song

7- Cardarelli

زیرزمینی نیز تأثیر فراوانی در ابعاد اقتصادی، فرهنگی و سیاسی کشورها می‌گذارد. ایجاد اشتغال، به جریان انداختن سرمایه‌های اقتصادی، افزایش سفر خارجی و به دنبال آن افزایش امنیت از جمله آثار مثبت گردشگری است.

تعداد غارها و حفره‌های شناخته‌شده بسیار محدود بوده و بیشتر آن‌ها قابل رؤیت نمی‌باشند (فورد و ویلیامز^۸، ۲۰۰۷). مطالعات معمول زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی اطلاعات جزئی در مورد درجه توسعه کارست را ارائه می‌دهند، اما نمی‌توانند ساختار داخلی سیستم کارستی را تعیین کنند به همین دلیل برای شناسایی و به دست آوردن اطلاعات در مورد حفره‌های کارستی ناشناخته یا مدفون باید از روش‌های غیرمستقیم استفاده کرد. در حال حاضر روش‌های ژئوفیزیکی به‌طور گسترده‌ای در مطالعات کارست به‌خصوص کارست مدفون استفاده می‌شود. تکنیک ژئوفیزیک برای بررسی و توصیف ویژگی‌های کارست زیرزمینی، شناسایی آب‌های زیرزمینی و حفره‌های کارست زیرزمینی و همچنین برآورد مخاطرات ناشی از فرونشست کاربرد زیادی دارد. در مناطق کارستی، هدف اساسی روش ژئوفیزیکی، بررسی قسمتهایی از سن‌های کربناته است که مشاهده مستقیم آن‌ها امکان ندارد. با روش ژئوفیزیکی، می‌توان در مورد حجم سنگ و تشریح افق‌های حاوی ناپوستگی‌هایی که در مطالعات کارست بسیار اهمیت دارد، اطلاعات بالارزشی به دست آورد (ملکی و اوپسی، ۱۳۹۱).

در بیشتر پژوهش‌ها برای شناسایی کارست مدفون از روش‌های ژئوفیزیکی ترکیبی استفاده می‌شود. کائوفمن^۹ و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از روش‌های گرانی‌سنجی^{۱۰} و تصویربرداری مقاومت ویژه الکتریکی (ERI)^{۱۱} در غار یونی کورن^{۱۲} در جنوب کوه‌های هارز آلمان، مناطقی با تالارهای پر شده توسط هوا و حفره‌های زیر رسوبات خشک که مقاومت بالایی داشتند را شناسایی کردند.

در شهر ساراگوسا، با استفاده از روش‌های رادار قابل نفوذ در زمین و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)^{۱۳}، مطالعه‌ای بر روی یک چاله مدفون (که در زیر یک خیابان واقع شده است و منجر به تخریب ساختمان‌ها شده است) انجام شد و نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از این دو روش؛ درون‌چاهی و تکنیک ترانشه اجازه می‌دهد تا مدل جامعی برای ارزیابی خطرات ناشی از سینک‌هول‌ها ارائه داد (سویل^{۱۴}، ۲۰۱۷).

پژوهشی که توسط عبد آل آل^{۱۵} (۲۰۱۶) انجام شد، کاربرد روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی را برای شناسایی مناطق سست و یا حفره‌های زیرزمینی در مناطق کارستی نشان داد. این مطالعه باهدف شناسایی و ارزیابی ویژگی‌های کارستی انجام شده است.

8- Ford & Williams

9- Kaufmann

10- Gravity Surveying

11- Electrical Resistivity Imaging

12- Unicorn

13- Electrical Resistivity Tomography

14- Sevil

15- Abd El Aal

شکوه سلجوقی و هزار خانی (۱۳۹۳)، در مطالعه‌ای به اکتشاف منابع آب زیرزمینی موجود در زمین‌های سخت با استفاده از مدل‌سازی معکوس دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی پرداختند. در این پژوهش نشان داده شده است که مناسب‌ترین روش ژئو الکتریکی برای اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی در زمین‌های سخت، روش ترکیب یافته از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن است که توسط این روش می‌توان بیشترین اطلاعات درباره توزیع جانبی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین را بدست آورد.

مرادی دشت پاگردی و همکاران (۱۳۹۳)، در حاشیه رودخانه قره‌چای-ساوه، با استفاده از تکنیک‌های ژئوفیزیکی مناطق مناسب جهت تشکیل مخزن‌های آب زیرزمینی را شناسایی کردند.

ملکی و همکاران (۱۳۹۶)، برای بررسی قابلیت منابع آب زیرزمینی در سازند کارستی کوه خورین کرمانشاه از روش مقاومت ویژه الکتریکی و روش منطق فازی استفاده کردند. برای صحت‌سنجی الگوی منطق فازی از روش مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شد که تطبیق نتایج حاصل از مقاومت ویژه الکتریکی و منطق فازی نشان‌دهنده وجود منبع آب غنی، باکیفیت مناسب در بخش میانی دامنه جنوبی و نبود منابع آب، با کمیت و کیفیت مناسب در دامنه شمالی است.

سانگ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۶) در مناطق کارستی محدوده‌ای از کشور اندونزی توانستند با استفاده از روش الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین (VLF)^{۱۷} موقعیت دقیق رودخانه‌های زیرزمینی را شناسایی کنند.

بوش و مولر^{۱۸} (۲۰۰۵) در قسمتی از رشته‌کوه‌های ژورا واقع در سوئیس، برای شناسایی کارست توسعه یافته از روش الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین استفاده نمودند و نتایج را با روش‌های دیگر مقایسه نمودند و نتایج خوبی با استفاده از این روش به دست آوردند.

مراد زاده و همکاران (۱۳۹۱) برای تشخیص منطقه آلودگی حاصل از زه‌آب اسیدی در محدوده کارخانه زغال شویی البرز شرقی، از روش مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین استفاده کردند.

در مطالعه‌ای صفاری و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از روش الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین، موقعیت دقیق گسل‌های مدفون طاق‌دیس شیرز واقع در شرق استان کرمانشاه را مورد مطالعه قرار دادند.

در این زمینه یعنی شناسایی حفره‌های مدفون کارستی، روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه روش مقاومت ویژه الکتریکی به‌عنوان یک روش مناسب برای بررسی حفره‌های زیرسطحی، فضاهای خالی و مناطق کم‌عمق هوازده (فرسوده) استفاده شده است، اما تاکنون از روش الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین برای شناسایی موقعیت این حفره‌ها استفاده نشده است. در این پژوهش سعی شده موقعیت حفره‌های کارستی با دو روش ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین شناسایی کرده و نتایج حاصل از دو روش ژئوفیزیکی مذکور باهم مقایسه و تعیین نمود در مطالعات ژئومورفولوژی متناسب با نیاز و ابزار کار موجود کدام روش جهت مطالعات اولیه حفره‌های کارست

16- Sung

17- Very low frequency

18- Bosch & Müller

زیرزمینی مناسبتر است؟ همچنین یکی دیگر از اهداف این پژوهش بررسی گسترش غار قوری قلعه بیشتر از وضعیت موجود با استفاده از تکنیک ژئوفیزیک می‌باشد.

سازندهای کربناته حدود ۱۱ درصد از وسعت ایران را پوشش می‌دهند و رشته کوه‌های زاگرس حدود ۵۵/۲ درصد از کل سازندهای کارستی ایران را شامل می‌شوند (رئسی، ۲۰۰۲) که سازندهای کارستی حدود ۲۵٪ از مساحت استان کرمانشاه را پوشش می‌دهند. با توجه به وسعت زیاد پهنه‌های کارستی در این استان بررسی و شناسایی کارست مدفون از نظر منابع آب کارستی، پیشگیری و مدیریت مخاطرات محیطی ناشی از حفره‌های کارستی مدفون همچون فرونشست زمین و همچنین توسعه گردشگری بسیار حائز اهمیت است؛ بنابراین با توجه به اهمیت شناسایی کارست مدفون در این منطقه انتخاب یک روش مناسب و در عین حال مقرون به صرفه هم از نظر زمانی و هم مالی بسیار اهمیت دارد.

در ابتدا سعی ما بر این بود که حفره یا حفره‌های ناشناخته را پیدا کرده و آن را مورد بررسی قرار بدهیم اما به دلیل گستردگی و توپوگرافی خشن، دسترسی به هم‌چین مناطقی تقریباً غیرممکن بود و همچنین زمان بر و هزینه‌بر بودن روش‌های ژئوفیزیکی نیز محدودیت‌هایی به همراه داشت، به همین جهت تصمیم بر آن شد که منطقه شناخته‌شده‌ای را جهت پژوهش و پژوهش انتخاب نماییم. در ناهمواری‌های شاهو واقع در استان کرمانشاه که بخشی از زاگرس مرتفع محسوب می‌شود، کارست در قالب دولین‌ها، غارهای عمودی و افقی گسترش پیدا کرده‌اند. غار قوری قلعه که در این ناهمواری‌ها گسترش پیدا کرده شاهد بسیار خوبی به‌عنوان حفره کارست زیرزمینی توسعه‌یافته در استان کرمانشاه است، به همین دلیل در این پژوهش جهت دستیابی به اهداف مورد نظر، این غار آهکی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که تاکنون بررسی‌های ژئوفیزیکی در این غار صورت نگرفته است. شناسایی حفره‌های مدفون در اطراف غار قوری قلعه نه تنها فرصت را برای شکوفایی بیشتر صنعت گردشگری و شناسایی آب زیرزمینی فراهم می‌کند، بلکه از خطرات بالقوه مهندسی در این منطقه نیز جلوگیری می‌کند.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

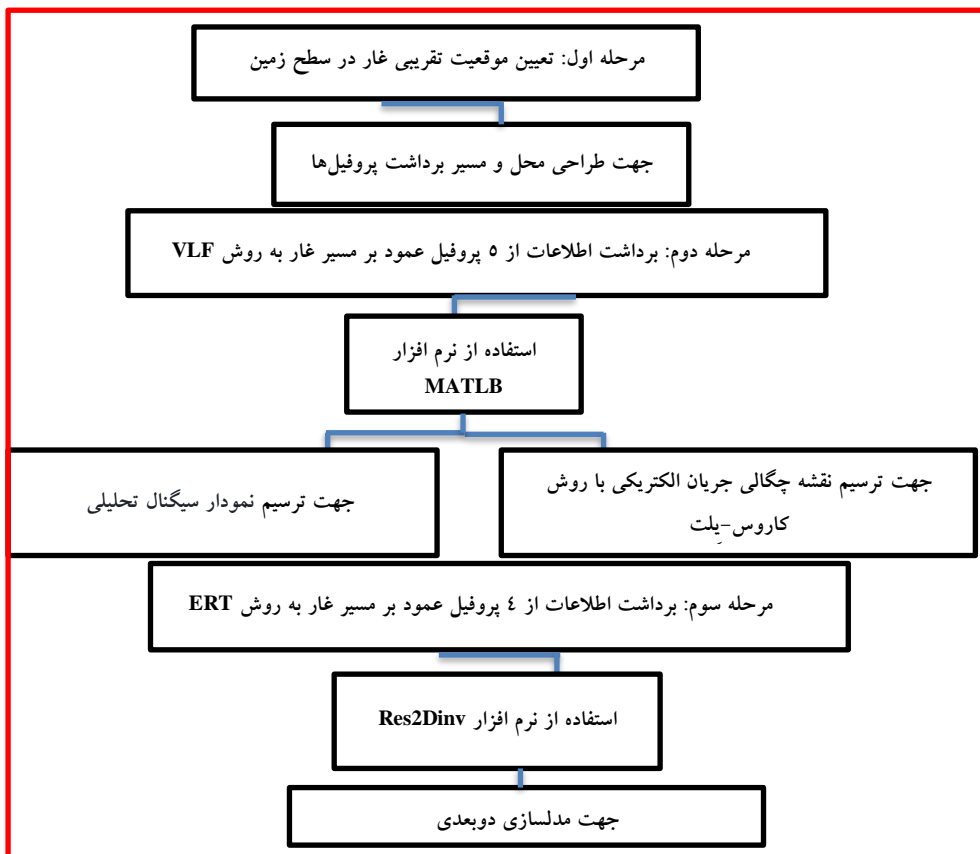
غار قوری قلعه در استان کرمانشاه، در کیلومتر ۲۷ جاده روانسر-پاوه و در مختصات ۳۴ درجه و ۵۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی واقع گردیده است. لازم به ذکر است که این غار بزرگ‌ترین غار آبی آسیا و طولانی‌ترین غار ایران است. محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در توده شاهو در زون زاگرس قرار دارد، این زون به سه قسمت اصلی زاگرس مرتفع، زاگرس چین‌خورده و زون سنندج سیرجان تقسیم می‌شود که محدوده مورد مطالعه جزء زاگرس مرتفع و قسمت پایین دست آن جز زاگرس چین‌خورده است. قسمت اعظمی از منطقه از سازندهای آهک بیستون و رادیولاریت شکل گرفته



شکل ۲: تصویر ورودی (الف) و نمای داخلی (ب) غار قوری قلعه

داده‌ها و روش‌ها

پژوهش حاضر در ۳ مرحله (بازدید میدانی اولیه، تعیین موقعیت غار در سطح زمین و طراحی محل و مسیر برداشت پروفیل‌ها، برداشت ژئوفیزیکی به روش VLF و در نهایت برداشت ژئوفیزیکی به روش ERT) انجام شده است که مراحل انجام آن به شرح زیر بیان می‌گردد (شکل ۳).



مأخذ: نگارندگان

شکل ۳: فلوچارت مراحل انجام پژوهش

برداشت ژئوفیزیکی به روش ژئوفیزیکی الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین (VLF)

این روش یکی از روش‌های شناخته‌شده در ژئوفیزیک و زیرمجموعه روش‌های الکترومغناطیسی است. در این روش، یک فرستنده در فواصل دور، امواج کروی الکترومغناطیسی در گستره فرکانسی ۱۵ تا ۲۵ کیلوهرتز تولید می‌کند و این امواج کروی به امواج تخت تبدیل می‌شوند. این امواج دارای مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند ولی در اکتشاف به روش VLF فقط مؤلفه مغناطیسی به کار می‌آید. مؤلفه مغناطیسی میدان الکترومغناطیسی در زمین نفوذ می‌کند و در رساناهای زیرزمین جریان الکتریکی القاء می‌کند. این جریان الکتریکی به‌نوبه خود یک میدان مغناطیسی ثانویه تولید می‌کند و دستگاه اندازه‌گیری، نسبت میدان ثانویه تولیدشده در توده رسانای زیرزمین به میدان اولیه موجود در محل فرستنده را اندازه می‌گیرد. با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف یک ناحیه می‌توان تغییرات رسانایی در زیر آن ناحیه را تشخیص داد. امواج الکترومغناطیس با فرکانس‌های مختلف هر یک تا عمق خاصی از زمین را مورد کاوش قرار می‌دهد، بنابراین می‌توان با اندازه‌گیری در بیش از یک فرکانس اطلاعات کامل‌تری از زمین در زیر ایستگاه‌های اندازه‌گیری به دست آورد. این روش اکتشافی بیشتر برای تعیین محل و گسترده‌گی توده‌های رسانا کاربرد دارد. گیرنده‌های این روش مؤلفه‌های حقیقی (هم‌فاز) و موهومی (ناهم‌فاز) میدان‌های EM ثانویه القاء شده از توده‌های رسانای مدفون را به کمک امواج EM ارسالی با کمک این فرستنده‌ها ثبت می‌کنند.

اندازه‌گیری‌های VLF در منطقه مورد مطالعه با دستگاه GSM-19 ساخت کشور کانادا صورت گرفت و ایستگاه فرستنده آکسفورد در انگلستان با فرکانس ۱۹٫۶ هرتز به‌عنوان بهترین ایستگاه با قوی‌ترین سیگنال انتخاب شد. سپس ۵ پروفیل تقریباً عمود بر مسیر غار به‌صورت رفت و برگشت برداشت (جدول ۱) و نتایج حاصل از آن قرائت شد. برای به حداقل رساندن عوامل ایجاد کننده نوفه، برداشت در ساعات اولیه صبح انجام گرفت. پس از برداشت داده‌ها به‌منظور تفسیر نتایج حاصل، از نرم‌افزار MATLAB استفاده کرده و نقشه چگالی جریان الکتریکی با روش کاروس-پلت و نیز نمودار سیگنال تحلیلی را برای هر پروفیل به دست آوردیم. توجه داشته باشید که A شروع پروفیل و B پایان پروفیل است (شکل ۴).

جدول ۱: مشخصات پروفیل‌های برداشت شده به روش VLF

پروفیل	مختصات				طول (متر)
۱	A: ۴۶° ۳۰' ۱۳.۳۰"	۴۴° ۵۴' ۶.۱۹"	B: ۴۶° ۳۰' ۲۰.۲۳"	۴۴° ۵۴' ۱.۷۵"	۲۱۰
۲	A: ۴۶° ۳۰' ۲۰.۲۲"	۴۴° ۵۴' ۱.۴۳"	B: ۴۶° ۳۰' ۱۰.۳۷"	۴۴° ۵۴' ۵.۶۴"	۲۸۲
۳	A: ۴۶° ۳۰' ۱۱.۴۵"	۴۴° ۵۴' ۶.۱۴"	B: ۴۶° ۳۰' ۱۹.۸۴"	۴۴° ۵۴' ۰.۰۴"	۲۸۴
۴	A: ۴۶° ۳۰' ۱۹.۶۴"	۴۴° ۵۳' ۵۹.۷۸"	B: ۴۶° ۳۰' ۸.۵۱"	۴۴° ۵۴' ۴.۸۵"	۳۱۲
۵	A: ۴۶° ۳۰' ۸.۱۱"	۴۴° ۵۴' ۴.۵۰"	B: ۴۶° ۳۰' ۱۵.۹۷"	۴۴° ۵۳' ۵۹.۴۱"	۲۵۰

مأخذ: نگارندگان

برداشت ژئوفیزیکی به روش ژئوفیزیکی توموگرافی الکتریکی (ERT)

روش توموگرافی الکتریکی یکی از روش‌های مقاومت ویژه است که آن را می‌توان در دو بخش طراحی شبکه و چگونگی برداشت داده‌ها و نیز مدل‌سازی داده‌های برداشت شده مورد بررسی قرار داد (ژو و گرین هالگ^{۱۹}، ۲۰۰۲). برداشت‌های مرسوم توموگرافی الکتریکی به دو نوع برداشت‌های دوبعدی و سه‌بعدی خلاصه می‌شوند (لوک^{۲۰}، ۲۰۰۴). در این روش، تصویر الکتریکی با قدرت تفکیک بالا در دو یا سه جهت از ساختار زیرسطحی به دست می‌آید (لوک و بارکر^{۲۱}، ۱۹۹۶). در این روش معمولاً تعدادی الکتروود فلزی با فواصل مساوی بر روی یک خط قرار می‌گیرند. در هر قرائت دو الکتروود برای تزریق جریان و دو الکتروود برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل انتخاب می‌شود که با افزایش فاصله بین الکتروودها، بررسی‌های عمیق‌تر ممکن می‌شود. عمق بررسی به آرایه الکتروودی ارتباط دارد، آرایه‌های الکتروودی بر اساس هدف کاوش و حساسیت لازم افقی و یا قائم انتخاب می‌شوند (لوک^{۲۲}، ۲۰۰۱). از میان تمام آرایه‌ها، آرایه‌های ونر، شلومبرژه و دو قطبی - دوقطبی بیشترین کاربرد را دارند (ورکما^{۲۳} و همکاران، ۲۰۰۰). آرایه دوقطبی - دوقطبی هر دو پوشش افقی و عمودی از محیط مورد بررسی را فراهم می‌کند و همچنین برای مطالعات کارست و باستان‌شناسی بیشتر استفاده می‌شود (داهلین و ژو^{۲۴}، ۲۰۰۴). در این نوع آرایه هر چهار الکتروود A, B, M, N در امتداد یک پروفیل قرار داشته و عملاً فاصله الکتروودهای فرستنده AB مساوی فاصله الکتروودهای گیرنده MN و برابر با a است. در هر اندازه‌گیری الکتروودهای AB ثابت بوده و الکتروودهای MN در امتداد پروفیل به اندازه a حرکت می‌کند، در نتیجه اندازه‌گیری برای عمق‌های مختلف انجام می‌گیرد. طی بازدید میدانی از محدوده مورد مطالعه، مسیر ۴ پروفیل، عمود بر مسیر غار از جهت شمال به جنوب طراحی (جدول ۲) و فاصله این ۴ پروفیل از یکدیگر حدود ۲۰ متر تعیین شد. در مرحله بعد با استفاده از GPS موقعیت دقیق سونداژها بر روی سطح مشخص گردید و طی دو روز برداشت‌ها انجام شد. در این مطالعه از دستگاه ABEM SAS 4000 برای اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی به صورت آرایش دو قطبی - دوقطبی استفاده شد و همچنین برای تفسیر نتایج حاصل از مقاومت ویژه الکتریکی از نرم‌افزار Res2Dinv برای مدل‌سازی دو بعدی استفاده گردید.

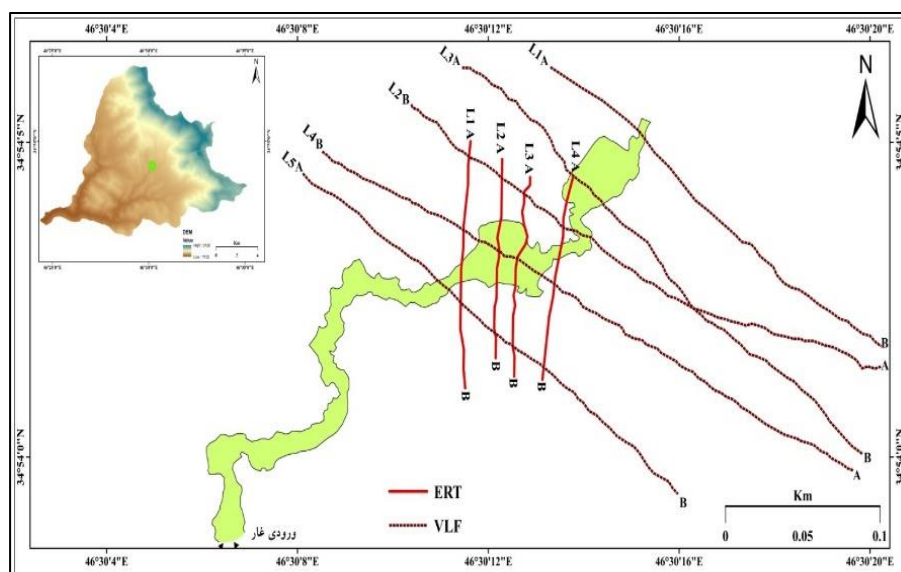
شکل ۴ موقعیت پروفیل‌های برداشتی حاصل از روش ژئوفیزیکی را روی سطح غار نشان می‌دهد. قابل ذکر است که ۴ پروفیل حاصل از روش ERT عمود بر پروفیل‌های ۲، ۴ و ۵ VLF برداشت شد.

-
- 19- Zhou & Greenhalgh
 - 20- Loke
 - 21- Loke & Barker
 - 22- Loke
 - 23- Werkema
 - 24- Dahlin and Zhou

دول ۲: مشخصات پروفیل‌های برداشت شده به روش ERT

پروفیل	مختصات	طول (متر)
۱	A: E ۴۶ ۳۰ ۱۱.۶۲ N ۳۴ ۵۴ ۵.۰۱ B: E ۴۶ ۳۰ ۱۱.۵۱ N ۳۴ ۵۴ ۱.۰۸	۱۲۰
۲	A: E ۴۶ ۳۰ ۱۲.۲۹ N ۳۴ ۵۴ ۴.۷۴ B: E ۴۶ ۳۰ ۱۲.۱۵ N ۳۴ ۵۴ ۱.۵۶	۱۰۰
۳	A: E ۴۶ ۳۰ ۱۲.۲۶ N ۳۴ ۵۴ ۴.۴۵ B: E ۴۶ ۳۰ ۱۲.۵۴ N ۳۴ ۵۴ ۱.۲۷	۱۲۰
۴	A: E ۴۶ ۳۰ ۱۳.۷۸ N ۳۴ ۵۴ ۴.۴۲ B: E ۴۶ ۳۰ ۱۳.۱۳ N ۳۴ ۵۴ ۱.۲۳	۱۰۰

مآخذ: نگارندگان



مآخذ: نگارندگان

شکل ۴: موقعیت پروفیل‌های برداشت شده به روش VLF و ERT. نقشه غار، توسط روش نقشه‌برداری از درون غار در امتداد مناطق در دسترس به دست آمده است.

یافته‌ها

الکترومغناطیس با بسامد بسیار پایین

پروفیل ۱

این پروفیل با طول تقریبی ۲۱۰ متر در بخش شمالی و انتهایی قسمت توریستی غار قوری قلعه از جهت شمال غرب به جنوب شرق برداشت شده است. مهم‌ترین و چشم‌گیرترین بی‌هنجاری‌ها در نقشه چگالی جریان مربوط به این پروفیل (شکل ۵ الف) بی‌هنجاری حدود ۲۵ تا ۴۰ متری از شروع پروفیل در سطح، بی‌هنجاری حدود ۶۰ تا ۷۵ متری در عمق ۱۰ متری و بی‌هنجاری بین فاصله ۱۱۶ تا ۱۷۰ متری در سطح است که تا عمق ۲۰ متری گسترش یافته است و عرض آن از سطح تا عمق متغیر است. در مقایسه با نقشه مناطق در دسترس غار، این پروفیل در بازه در ۵۶/۷۳ تا ۶۳ متری غار قوری قلعه را پوشش می‌دهد که متناظر با بی‌هنجاری دوم است. از آنجا که مقادیر چگالی جریان الکتریکی در این بی‌هنجاری پایین‌ترین

مقادیر است، می‌شود نتیجه‌گیری کرد که این بی‌هنجاری مربوط به مناطقی خالی از موادی مانند سنگ و خاک است طوری که جریان الکتریکی توسط میدان‌های VLF در آنجا القا نشده‌اند و به رنگ آبی روشن تا تیره نشان داده می‌شوند؛ بنابراین این منطقه می‌تواند به‌عنوان حفره یا غار ناشناخته در نظر گرفته شود که موقعیت آن خارج از محدوده در دسترس غار قرار گرفته است.

نمودار سیگنال تحلیلی مربوط به این پروفیل هم در فاصله بین ۱۱۰ تا ۱۷۲ متری بی‌هنجاری‌هایی را نشان می‌دهد که متناظر با بی‌هنجاری سوم نقشه چگالی جریان است. در حقیقت نمودار سیگنال تحلیلی مناطقی را برجسته می‌کند که ویژگی‌های فیزیکی در آن مناطق دچار تغییرات ناگهانی می‌شوند. این برجسته کردن به‌صورت یک مقدار بیشینه در نمودار سیگنال تحلیلی نمایش داده می‌شود؛ به عبارت دیگر این نمودار لبه بی‌هنجاری‌ها را برجسته می‌کند. در صورتی که بی‌هنجاری به شکل کره یا استوانه باشد که دارای لبه مشخص نسبت به اطرافشان نیستند، بیشینه مقدار در وسط کره یا استوانه قرار خواهد گرفت. همچنین بی‌هنجاری حدود ۳۰ متری در این پروفیل در نمودار سیگنال تحلیلی هم نشان داده شده که این هم می‌تواند نشان‌دهنده حفره زیرزمینی ناشناخته خارج از محدوده غار باشد. در نهایت تفسیر نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی این پروفیل علاوه بر شناسایی خود غار، یک حفره کوچک در قسمت شمال غربی و حفره واضح‌تری در قسمت جنوب‌شرق‌وز این پروفیل را نشان می‌دهند.

پروفیل ۲

این پروفیل با طول حدوداً ۲۸۲ متر از جهت جنوب شرق به شمال غرب برداشت شد. مهم‌ترین و چشم‌گیرترین بی‌هنجاری در نقشه چگالی جریان مربوط به این پروفیل (شکل ۵ ب) بی‌هنجاری بین فاصله ۶۰ تا ۱۲۰ متری و ۱۹۰ تا ۲۲۰ متری در سطح است که تا عمق ۲۰ متری هم گسترش یافته است و عرض آن‌ها از سطح تا عمق متغیر می‌باشد. همان‌طور که گفتیم این بی‌هنجاری مربوط به مناطقی خالی از موادی مانند سنگ و خاک است طوری که جریان الکتریکی توسط میدان‌های VLF در آنجا القا نشده‌اند و بارنگ آبی روشن تا تیره مشاهده می‌شوند. نمودار سیگنال تحلیلی مربوط به این پروفیل هم در فاصله ۱۰۰ و ۱۳۰ تا ۲۲۰ قله‌هایی را نشان می‌دهد که نشانگر بی‌هنجاری با ابعاد بزرگی می‌باشند؛ که تا حدودی متناظر با نقشه چگالی جریان می‌باشد. در مقایسه با نقشه مناطق در دسترس غار، این پروفیل در بازه در ۱۶۷ تا ۱۸۲ متری غار قوری قلعه را پوشش می‌دهد که متناظر با بی‌هنجاری دوم نمودار سیگنال تحلیلی است. نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی این پروفیل نیز علاوه بر شناسایی خود غار، حفره واضحی را در قسمت جنوب‌شرق‌وز و بی‌هنجاری کوچکی فراتر از خود غار را در قسمت شمال غربی این پروفیل تأیید می‌کنند.

پروفیل ۳

طول این پروفیل تقریباً ۲۸۴ متر است که در جهت شمال غرب به جنوب شرق برداشت شده است. مهم‌ترین و واضح‌ترین بی‌هنجاری در نقشه چگالی جریان مربوط به این پروفیل (شکل ۵ ج) بی‌هنجاری بین فاصله ۱۷۰ تا ۲۱۰ متری در سطح است که تا عمق ۲۰ متری نیز گسترش یافته‌است و عرض آن از سطح تا عمق متغیر است. همچنین نقشه چگالی جریان در بازه ۵۰ تا ۱۰۰ متری و ۲۲۰ تا ۲۴۰ متری بی‌هنجاری کوچکی را نشان می‌دهد که تأیید کننده وجود حفره زیرزمینی می‌باشد. نمودار سیگنال تحلیلی مربوط به این پروفیل هم تقریباً در فاصله بین ۱۷۰ تا ۲۵۰ متری بی‌هنجاری‌های واضحی را نشان می‌دهد که متناظر با نقشه‌چگالی جریان است. همچنین این نمودار در فاصله بین ۵۰ تا ۹۰ متری نیز بی‌هنجاری را نشان می‌دهد. در مقایسه با نقشه مناطق در دسترس غار، این پروفیل در بازه در ۷۸ تا ۱۰۰ متری غار قوری قلعه را پوشش می‌دهد که متناظر با بی‌هنجاری دوم نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی است. پس نتایج حاصل از تفسیر نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی این پروفیل علاوه بر شناسایی غار، حفره واضحی را در قسمت جنوب‌شرق‌وز و حفره کوچک‌تری را در قسمت شمال غربی این پروفیل تأیید می‌کند.

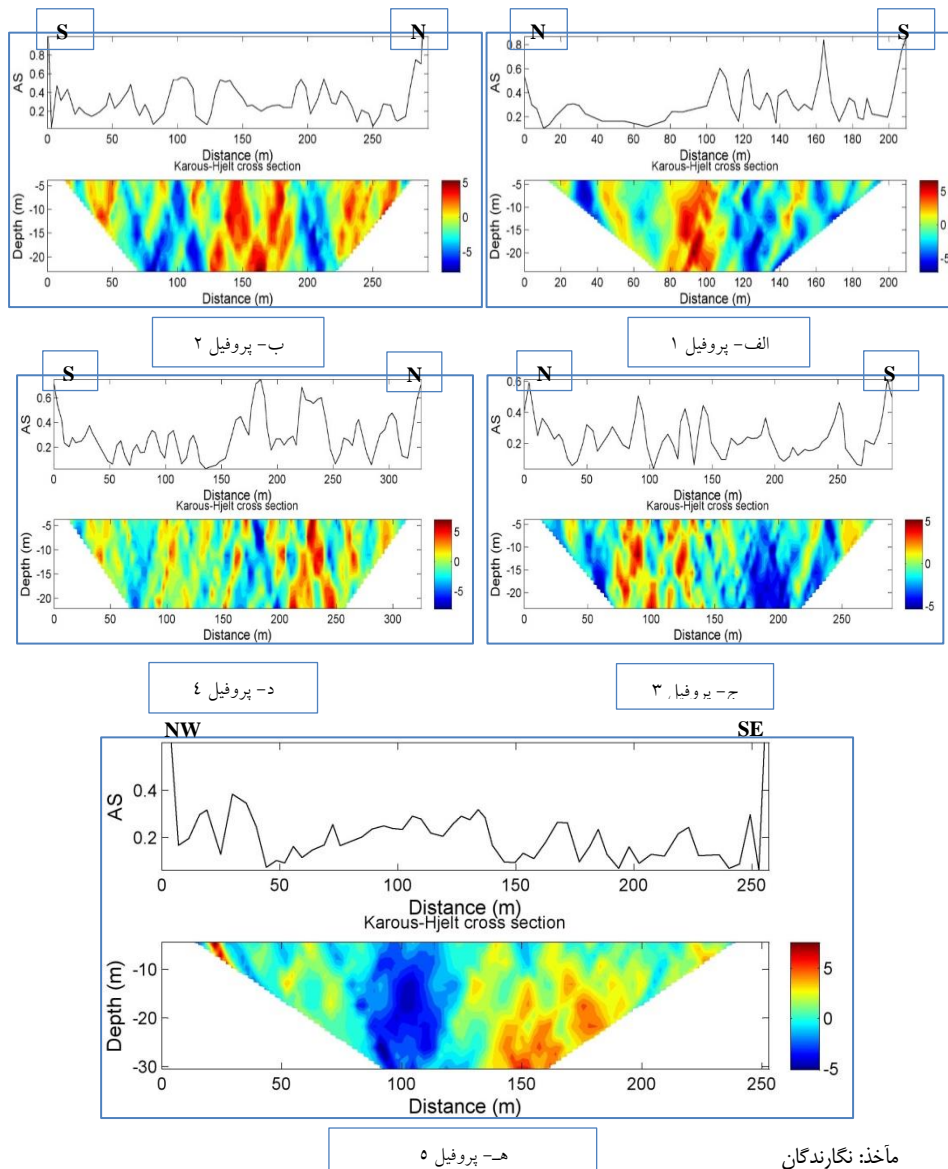
پروفیل ۴

این پروفیل با طول تقریبی ۳۱۲ متر در جهت جنوب شرق به شمال غرب برداشت شده است. مهم‌ترین و چشم‌گیرترین بی‌هنجاری در نقشه چگالی جریان مربوط به این پروفیل (شکل ۵ د) بی‌هنجاری بین فاصله ۱۶۰ تا ۲۱۰ متر در سطح است که تا عمق ۲۰ متری گسترش یافته‌است و از سطح تا عمق متغیر است. همچنین در فاصله ۷۰ تا ۸۰ متری بی‌هنجاری دیگری مشاهده می‌شود؛ بنابراین این مناطق می‌توانند به‌عنوان حفره ناشناخته در نظر گرفته شوند که موقعیت آن‌ها خارج از محدوده غار قرار گرفته است. نمودار سیگنال تحلیلی مربوط به این پروفیل هم در فاصله بین ۱۶۰ تا ۲۴۰ متری یک بی‌هنجاری بسیار واضحی را نشان می‌دهد. در مقایسه با نقشه مناطق در دسترس غار، این پروفیل در بازه در ۱۹۱ تا ۲۲۸ متری غار قوری قلعه را پوشش می‌دهد که متناظر با بی‌هنجاری اول نقشه چگالی جریان و بی‌هنجاری نمودار سیگنال تحلیلی است. نتایج حاصل از نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی علاوه بر شناسایی غار، وجود حفره‌ای در قسمت جنوب‌شرق‌وز و گسترش غار در سمت شمال غربی این پروفیل را نیز تأیید می‌کنند.

پروفیل ۵

طول این پروفیل کمی بیش از ۲۵۰ متر است که داده‌های مربوط به آن از شمال غرب به جنوب شرق برداشت شده است. مهم‌ترین و چشم‌گیرترین بی‌هنجاری در نقشه چگالی جریان مربوط به این پروفیل

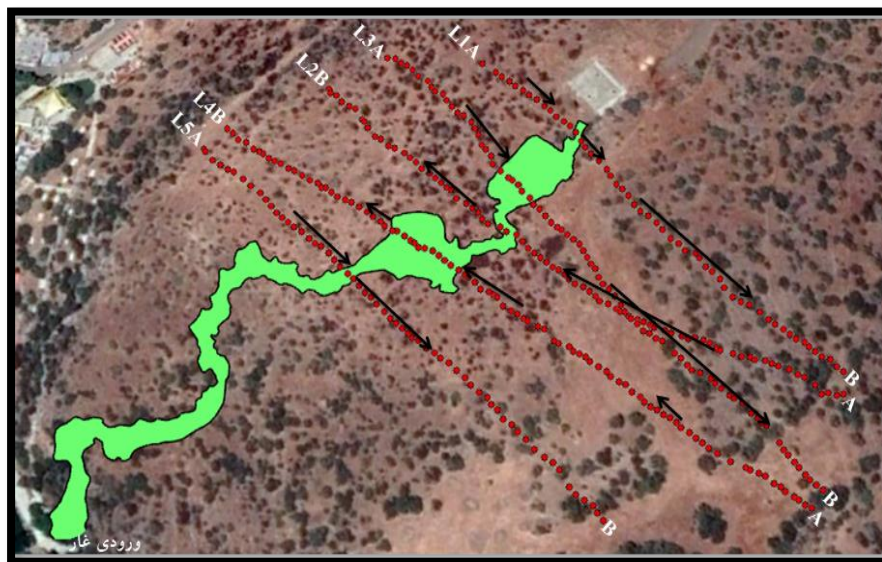
(شکل ۵ هـ) بی‌هنجاری بین فاصله تقریبی ۸۵ تا ۱۲۰ متری در سطح است که تا عمق ۳۰ متری هم گسترش یافته است و عرض آن از سطح تا عمق متغیر است؛ بنابراین این منطقه می‌تواند به‌عنوان حفره یا غار در نظر گرفته شود. نمودار سیگنال تحلیلی مربوط به این پروفیل هم حدوداً در فاصله بین ۵۰ تا ۱۳۵ متری یک منطقه گنبدی شکل، با قله‌ای در حدود ۱۰۰ متری را نمایش داده است که نشانگر وجود یک بی‌هنجاری با ابعاد بزرگ و بدون لبه مشخص است. در مقایسه با نقشه مناطق در دسترس غار، این پروفیل در بازه در ۸۹ تا ۹۶ متری غار قوری قلعه را پوشش می‌دهد که متناظر با بی‌هنجاری نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی است. نتایج حاصل از نقشه چگالی جریان و نمودار سیگنال تحلیلی این پروفیل علاوه بر شناسایی خود غار در واقع گستردگی بیشتر این حفره را به سمت جنوب نیز تأیید می‌کند.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۵: نمودار سیگنال تحلیلی و نقشه چگالی جریان VLF

در شکل ۶ محدوده سبز رنگ نشان از مسیر شناسایی شده و محدوده اصلی غار قوری قلعه می‌باشد و پیکان‌های مشکی نشان‌دهنده بی‌هنجاری‌هایی است که روش VLF خارج از مسیر غار شناسایی کرده است که به احتمال زیاد حاکی از گسترش غار و یا وجود حفره‌های احتمالی می‌باشد.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۶: محل احتمالی حفره‌های مدفون ناشناخته با روش VLF

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

پروفیل ۱

این پروفیل با طول ۱۲۰ متر در جهت شمال به جنوب برداشت شد، فاصله الکترودها در این پروفیل ۱۰ و ۲۰ متری و تعداد الکترودهای مورد استفاده ۱۳ عدد بوده است. دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی لایه‌های زمین‌شناسی در این پروفیل (شکل ۷ الف) از ۶۰ تا بیش از ۲۲۰۰ اهم‌متر متغیر است. مهم‌ترین بی‌هنجاری در این پروفیل در بازه ۹ تا ۹۳ متری مشاهده می‌شود. مقاومت ویژه سنگ‌آهک در این قسمت از ۱۲۹۰ تا بیش از ۲۲۰۰ اهم‌متر هم می‌رسد که تقریباً از عمق ۷ متری ۴۶٫۹ متری ادامه دارد که این مقدار مقاومت بالا می‌تواند نشان‌دهنده توده آهک کارستی و حفره مدفون می‌باشد. این بی‌هنجاری با پیکان مشکی بر روی (شکل ۶ الف) مشخص شده است. با توجه به اینکه این پروفیل در بازه (۵۸٫۷۱ تا ۶۸٫۸۳ متری) سطح غار را پوشش می‌دهد و بی‌هنجاری شاخص از ۹ تا ۹۳ متری ادامه دارد، پس می‌توان گفت که این پروفیل علاوه بر تشخیص خود غار، خارج از محدوده آن بی‌هنجاری واضحی را در قسمت شمالی پروفیل نشان می‌دهد که ممکن است حاکی از گسترش غار یا وجود حفره احتمالی ناشناخته باشد.

پروفیل ۲

این پروفیل با طول ۱۰۰ متر در راستای پروفیل شماره ۱ با جهت شمالی، جنوبی برداشت شد. فاصله الکترودها در پروفیل مذکور ۵،۱۰ و ۲۰ متری انتخاب شد و تعداد ۲۱ الکتروود مورد استفاده قرار گرفت. دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی لایه‌های زمین‌شناسی در این پروفیل (شکل ۷ ب) از حدود ۶۰ اهم‌متر تا بیش از ۲۳۰۰ اهم‌متر متغیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این پروفیل یک بی‌هنجاری بسیار واضح به شکل دو چاله بسته در بازه ۱۰ تا ۹۰ متری مشاهده می‌شود. عمق حفره بزرگ‌تر و واضح‌تر تقریباً از ۴ تا ۴۶/۹ متری و حفره کوچک‌تر که در قسمت جنوبی واقع گردیده است از ۴ تا ۱۴ متری ادامه دارد. مقاومت ویژه سنگ‌آهک در این قسمت از ۱۳۵۴ تا ۲۳۰۰ اهم‌متر می‌رسد که این مقاومت نشان‌دهنده خلأ و حفره مدفون می‌باشد، این بی‌هنجاری‌ها با پیکان مشکی در (شکل ۶ ب) مشخص شده است. قسمت مهمی از این بی‌هنجاری (۳۱ تا ۵۹/۵۲ متری) بر روی غار واقع گردیده است. در واقع می‌توان گفت بی‌هنجاری‌های خارج از محدوده برداشت در قسمت شمالی و جنوبی پروفیل می‌تواند نشان‌دهنده گسترش غار یا وجود حفره‌های احتمالی ناشناخته باشد.

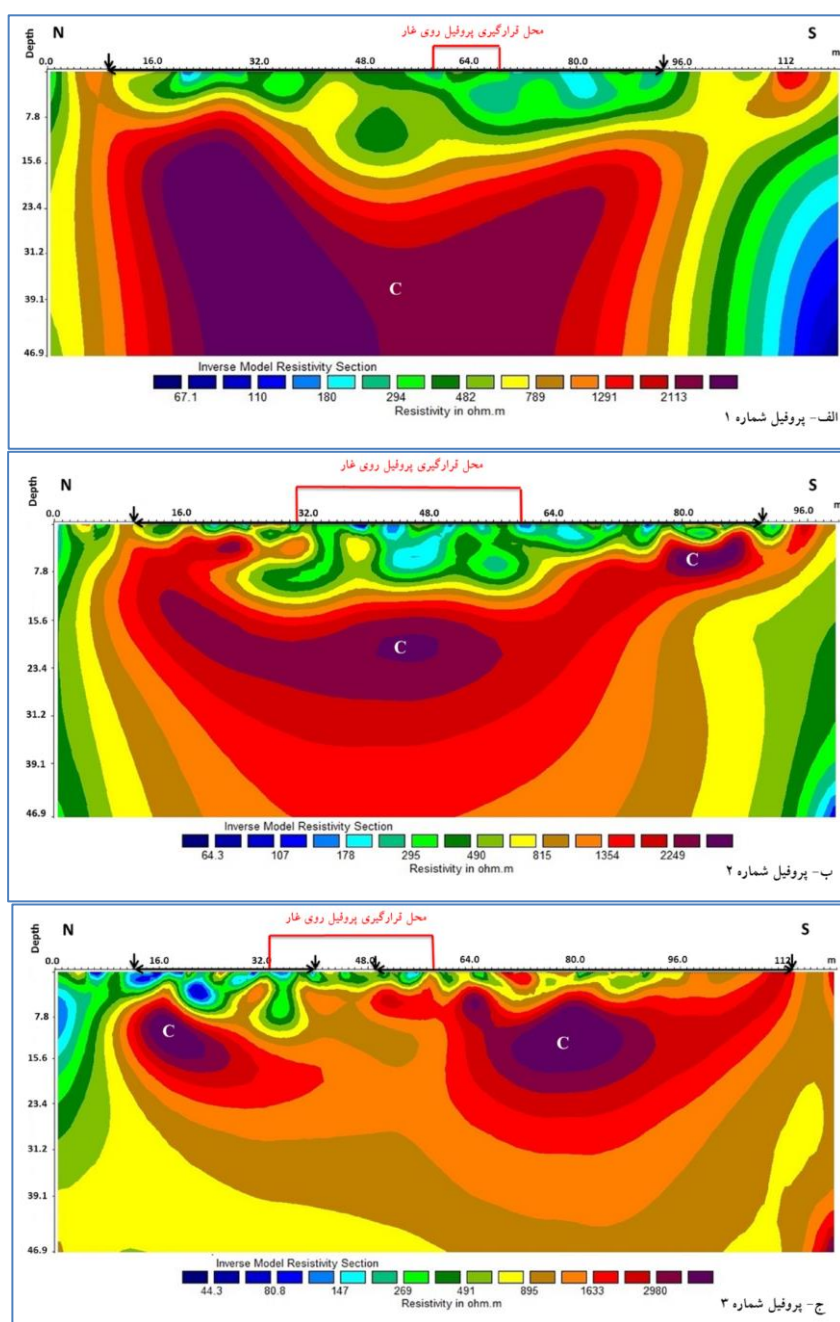
پروفیل ۳

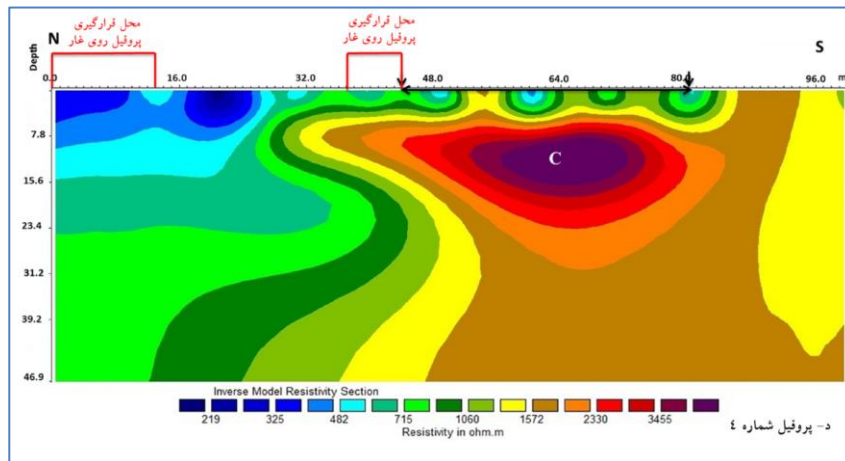
پروفیل شماره سه به طول ۱۲۰ متر به موازات دو پروفیل دیگر با فاصله الکترودهای ۵، ۱۰ و ۲۰ متری و ۲۱ عدد الکتروود برداشت شد. دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی لایه‌های زمین‌شناسی در این پروفیل (شکل ۷ ج) از حدود ۴۰ اهم‌متر تا بیش از ۳۰۰۰ اهم‌متر متغیر است. همان‌طور که مشخص است دو بی‌هنجاری کاملاً واضح و چشم‌گیر در بازه ۱۲ تا ۴۰ متری و ۴۹ تا ۱۱۳ متری با مقاومت ویژه بالا بین ۱۶۳۳ تا ۳۰۰۰ اهم‌متر مشاهده می‌شود که بی‌هنجاری اول تقریباً از عمق ۵ تا ۲۳ متری و بی‌هنجاری دوم از عمق ۵ تا ۳۱ متری ادامه دارد که این بی‌هنجاری‌ها با پیکان مشکی در (شکل ۶ ج) نشان داده شده است. قسمت مهمی از این بی‌هنجاری (۳۲ تا ۵۹ متری) بر روی غار واقع گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این پروفیل نیز در خارج از محدوده غار هم در قسمت شمالی و هم جنوبی غار بی‌هنجاری‌های واضحی را نشان می‌دهد که نشان از گسترش غار یا وجود حفره‌های احتمالی ناشناخته می‌باشد.

پروفیل ۴

طول این پروفیل ۱۰۰ متر می‌باشد که همانند دیگر پروفیل‌ها در جهت شمالی-جنوبی برداشت شد. فاصله الکترودها در این پروفیل ۱۰ و ۲۰ متری انتخاب شد و تعداد الکترودهای مورد استفاده در این برداشت ۱۱ عدد بوده است. دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی لایه‌های زمین‌شناسی در این پروفیل (شکل ۷ د) از حدود

۲۰۰ اهم‌متر تا بیش از ۳۵۰۰ اهم‌متر متغیر است. این پروفیل در بازه ۴۴ تا ۸۰ متری در سمت راست که تقریباً از عمق ۶ تا ۲۳ متری ادامه دارد، دارای مقاومت ویژه بالایی بین ۲۳۳۰ تا بیش از ۳۵۰۰ اهم‌متر می‌باشد و با پیکان مشکی در (شکل ۵۶) نشان داده شده است. این پروفیل از نقطه برداشت تا فاصله ۱۳ متری روی قسمتی از غار برداشت شده است که در این بازه بی‌هنجاری خاصی مشاهده نمی‌شود، همچنین ادامه برداشت نیز از فاصله ۳۷ تا ۴۴ متری بر روی غار واقع شده است که مقاومت ویژه در این بازه حدوداً ۱۶۰۰ تا ۲۳۰۰ اهم‌متر می‌باشد. نتایج حاصل از این پروفیل نشان‌دهنده گسترش غار در قسمت جنوبی پروفیل می‌باشد.

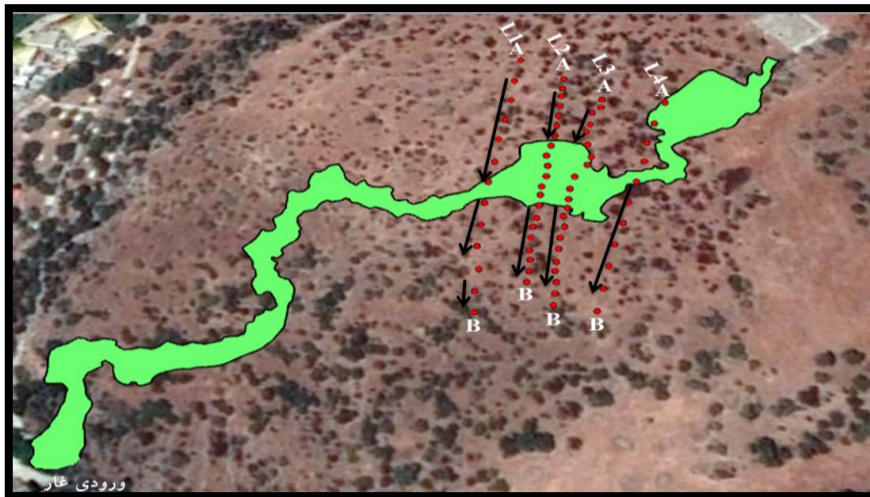




مأخذ: نویسندگان

شکل ۷: مدل سازی دو بعدی حاصل از روش ERT (C: محل احتمالی حفره یا غار)

۴ پروفیل برداشتی حاصل از روش ERT که در جهت شمال به جنوب برداشت شده بودند، ما را در تعیین موقعیت دقیق غار یاری داد. پروفیل شماره یک، دو و سه در قسمت شمالی و جنوبی و پروفیل شماره ۴ در قسمت شمالی مقاومت ویژه بسیار بالایی را نشان می دهند. همان طور در شکل ۸ مشاهده می کنید محدوده سبزرنگ محدوده اصلی غار و مسیر شناسایی شده می باشد و پیکان های مشکی بی هنجاری هایی خارج از این محدوده را به ما نشان می دهد. با توجه به دقت زیاد این روش مطمئن این بی هنجاری نشان از گسترش غار یا حفره های کارستی مدفون دیگری می باشد.

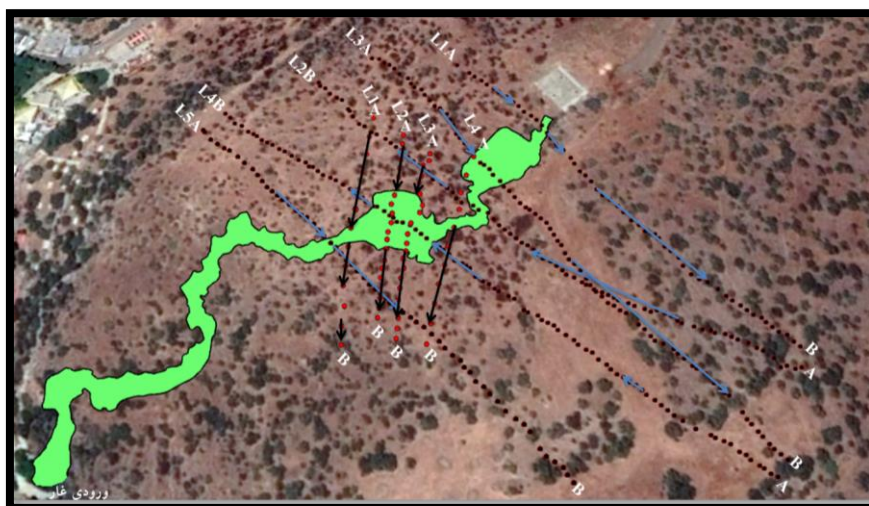


مأخذ: نویسندگان

شکل ۸: محل احتمالی حفره های مدفون ناشناخته با روش ERT

همان طور که گفته شد ۴ پروفیل حاصل از روش ERT عمود بر پروفیل های شماره ۲، ۴ و ۵ حاصل از روش VLF می باشند. با مقایسه این دو روش (شکل ۹) بر سطح غار متوجه می شویم بی هنجاری هایی را که

نتایج حاصل از روش VLF در برخی از مناطق نشان می‌داد منطبق بر بی‌هنجاری‌های حاصل از نتایج ERT می‌باشد؛ بنابراین با توجه به این نتایج می‌توان گفت که روش ERT تأیید کننده روش VLF برای شناسایی موقعیت حفره‌های مدفون در پهنه‌های کارستی باشد. در این شکل پیکان‌های آبی بی‌هنجاری‌های حاصل از VLF و پیکان‌های مشکی بی‌هنجاری‌های حاصل از ERT را نشان می‌دهد.



مآخذ: نویسندگان

شکل ۹: محل احتمالی حفره‌های مدفون ناشناخته با روش ERT و VLF

نتیجه‌گیری

با توجه به پوشش گسترده سازند کربناته در ایران، به‌خصوص استان کرمانشاه و همچنین وجود شرایط لازم برای فرسایش و تشکیل لند فرم‌های کارستی، شناسایی و ارزیابی این لند فرم‌ها به‌ویژه حفره‌های کارستی مدفون در این استان لازم و ضروری است. به‌طور کلی هدف از شناسایی و ارزیابی این حفره‌ها را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

الف: مسائل ژئو تکنیک و مهندسی سازه؛

ب: اهمیت اقتصادی کارست به‌عنوان منبع ذخیره آب؛

ج: اهمیت اقتصادی کارست به‌عنوان محلی برای رونق گردشگری.

در این پژوهش جهت بررسی گسترش غار قوری قلعه بیشتر از وضعیت فعلی خود و همچنین ارزیابی روش VLF برای شناسایی حفره کارستی مدفون و مقایسه آن با روش ERT، محدوده این غار آهکی توسط دو روش مذکور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش VLF، ۵ پروفیل و با استفاده از روش ERT، ۴ پروفیل عمود بر مسیر غار برداشت شد. نتایج حاصل از ERT به‌صورت دقیق و نتایج حاصل از VLF به‌طور تقریبی علاوه بر شناسایی محدوده غار در مسیر برداشت خود نیز بی‌هنجاری‌های دیگری را

نشان دادند که می‌تواند به‌عنوان حفره احتمالی شناسایی شوند. همان‌طور که قبلاً در نوشتار گفته شد تاکنون از روش VLF برای شناسایی حفره‌های مدفون کارستی استفاده نشده است. واضح است که روش ERT یک روش دقیق‌تر و مناسب‌تر برای شناسایی حفره‌های مدفون می‌باشد اما باید توجه داشت که این روش بسیار هزینه‌بردار و زمان‌بر می‌باشد و برداشت دیتاهای این روش با مشکلات خاصی همراه است. اما در مقابل روش VLF علاوه بر اینکه قابلیت حمل بسیار آسانی داشته به‌طوری که یک اپراتور به تنهایی قادر به برداشت می‌باشد، روشی بسیار سریع و مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. با توجه به محدودیت امکانات آزمایشگاهی اکثر گروه‌های جغرافیا این روش می‌تواند برای دانشجویان این رشته به‌خصوص رشته ژئومورفولوژی برای شناسایی کارست مدفون با اهداف مختلف بسیار کاربردی باشد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که در بررسی‌های اولیه و مقدماتی روش VLF با فرکانس بسیار پایین برای شناسایی تداوم حفره‌های زیرزمینی روشی بسیار مناسب است؛ بنابراین علاوه بر مزایای ذکر شده در مورد این روش، برای شناخت حفره‌های مدفون در مناطقی چون استان کرمانشاه که توپوگرافی خشنی دارند بهتر است ابتدا مناطق مورد نظر و احتمالی را با استفاده از روش VLF شناسایی کرده و سپس برای مطالعات دقیق‌تر و بررسی مورفولوژی این حفره‌ها از روش‌های مکمل همچون ERT به‌صورت مدل‌سازی‌های دو بعدی و سه بعدی استفاده شود.

منابع

- ۱- افراسیابیان، احمد (۱۳۷۲): مطالعات هیدرولوژی کارست در حوضه آهکی مهارلو، دومین سمینار علمی مطالعات منابع آب، مجموعه مقالات، صص ۱۳۷-۱۲۶.
- ۲- شکوه سلجوقی، بشیر و هزارخانی، اردشیر، (۱۳۹۳): اکتشاف آب‌های زیرزمینی توسط مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت ویژه، مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۰ تا ۲۳ اردیبهشت‌ماه، صص ۲۸۴-۲۸۰.
- ۳- صفاری، امیر، ملکی، امجد، شیرزادی تبار، فرزاد، احمدآبادی، علی، رحمتی‌پور، فاطمه (۱۳۹۸): تحلیل شواهد ژئومورفیک و قابلیت آن در شناسایی گسل‌های پنهان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۲، صص ۱۲۱-۱۰۳.
- ۴- مرادزاده، علی، زارع، مهدی، دولتی ارده‌جانی، فرامرزی (۱۳۹۱): تشخیص منطقه آلودگی از زه‌آب اسیدی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های ژئو الکتریک در محدوده کارخانه زغال شویی البرز شرقی، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۶، شماره ۲، صص ۹۵-۱۱۱.
- ۵- مرادی دشت پاگردی، مصطفی، نوحه‌گر، احمد، وقار فرد، حسن، پور جنایی، علی، مجیدی، آباذر و هنر بخش، افشین، (۱۳۹۳): شناسایی مناطق مناسب تشکیل مخزن‌های آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک ژئوفیزیک مطالعه موردی: حاشیه رودخانه قره‌چای، ساوه، مجله پژوهش آب ایران، شماره ۱۵، صص ۲۲۲-۲۱۷.
- ۶- ملکی، امجد، اویسی، محسن (۱۳۹۱): شناسایی ساختار گسلی و تحول چشمه‌های کارستی با استفاده از رادار نفوذی (مطالعه موردی: استان کرمانشاه)، جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۳، صص ۱۰-۱.

- ۷- ملکی، امجد، اویسی، محسن، باقری، آرزو (۱۳۹۶): بررسی قابلیت منابع آب زیرزمینی در سازند کارستی کوه خورین کرمانشاه با تکنیک GIS و روش‌های ژئوفیزیکی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲۱، صص ۱۳۵-۱۵۰.
- ۸- ملکی، امجد، قبادی، محمدحسین و کریمی سلطانی، پیمان، (۱۳۹۴): نقش گردشگران در انحلال اشکال کارستی ثانویه درون غارها (مطالعه موردی غار علی‌صدر همدان)، جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۱۶، صص ۱-۱۵.
- 9- Abd El Aal, A. (2016): Length Article Identification And Characterization Of Near Surface Cavities In Tuwaiq Mountain Limestone, Riyadh, Ksa, "Detection And Treatment", Egyptian Journal Of Petroleum, Vol. 26, Pp. 215-223.
- 10- Bin, L. Zhengyu, L. Shuca, L. Lichao, N. Maoxin, S. Huaifeng, S. Kerui, F. Xinxin, Zh. And Yonghao, P. (2017): Comprehensive Surface Geophysical Investigation Of Karst Caves Ahead Of The Tunnel Face: A Case Study In The Xiaoheyuan Section Of The Water Supply Project From Songhua River, Jilin, China, Journal Of Applied Geophysics, 10.1016/J.Jappgeo.2017.06.013.
- 11- Bosch, F.P. Müller, I. (2005): Improved Karst Exploration By VLF-EM-Gradient Survey: Comparison With Other Geophysical Methods, Near Surface Geophysics, PP. 299-310.
- 12- Cardarelli, E. Cercato, M. Cerreto, A. And Di Filippo, G. (2010): Electrical Resistivity And Seismic Refraction Tomography To Detect Buried Cavities, Journal Of Geophysical Prospecting, Vol. 58, Pp. 685-695.
- 13- Carrière, S.D. Chalikakis, K. Sénéchal, G. Danquigny, C. Emblanch, C. (2013): Combining Electrical Resistivity Tomography And Ground Penetrating Radar To Study Geological Structuring Of Karst Unsaturated Zone. Journal Applied Geophysics, 94, 31-41.
- 14- Dahlin, T. And Zhou, B. (2004): A Numerical Comparison Of 2D Resistivity Imaging With 10 Electrode Arrays, Geophysical Prospecting, Vol.52, Pp. 379-398.
- 15- Ford, D. And Williams, P. (2007): Karst Hydrogeology And Geomorphology, John & Sons, Ltd.
- 16- Gutierrez, F. Parise, F. De Waele, J. And Jourde, H. (2014): A Review on Natural And Human-Induced Geohazards And Impacts In Karst, Earth-Science Reviews, Vol. 138, Pp. 61-88.
- 17- Kaufmann, G. Romanov, D. And Nielbock, R. (2011): Cave Detection Using Multiple Geophysical Methods: Unicorn Cave, Harz Mountains, Germany, Journals Of The Society Of Exploration Geophysicists, Vol. 76, Pp. 71-77.
- 18- Loke, M. (2004): 2-D And 3-D Electrical Imaging Surveys, PDF Available From [Http://Www. Geolectrical. Com](http://www.Geolectrical.Com).
- 19- Loke, M. And Barker, R. (1996): Practical Techniques For 3D Resistivity Surveys And Data Inversion1, Geophysical Prospecting, Vol. 44, Pp. 499-523.
- 20- Loke, M.H. (2001): Electrical Imaging Surveys For Environmental And Engineering Studies, A Practical Guide To 2-D And 3-D Surveys: RES2DINV Manual, IRIS Instruments, [Www.Iris-Instrument.Com](http://www.Iris-Instrument.Com).
- 21- Metwaly, M. And Alfouzan, F. (2013): Application Of 2-D Geoelectrical Resistivity Tomography For Subsurface Cavity Detection In The Eastern Part Of Saudi Arabia, Geoscience Frontiers, Vol. 4, Pp. 469-476.
- 22- Raeisi, E. (2002): Carbonate Karst Caves In Iran.
- 23- Sevil, J. Gutierrez, F. Zarroca, M. Desir, G. Carbonel, D. Guerrero, J. Linares, R. Roque, G. And Fabrega, I. (2017): Sinkhole Investigation In An Urban Area By Trenching In Combination With GPR, ERT And High-Precision Leveling, Mantled Evaporite Karst Of Zaragoza City, NE Spain, Journal Of Engineering Geology, Vol. 231, Pp. 9-20.
- 24- Song, K.I. Cho, G.C. Chang, S.B. (2012): Identification, Remediation, And Analysis Of Karst Sinkholes In The Longest Railroad Tunnel In South Korea, Eng. Geol. 135-136, 92-95.

- 25- Sung, K. Santosa, B.J. Bahri, A.S. Santos, F.M. And Iswahyudi, A. (2016): Application Of Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition In VLF-EM Data To Identify Underground River, World Scientific Publishing Company By UNIVERSITY OF LIVERPOOL, Vol. 8, No. 3.
- 26- Werkema, D.D. Atekwana, E. Sauck, W. And Asumadu, J.A. (2000): A Generic Automated/Semiautomated Digital Multi-Electrode Instrument For Field Resistivity Measurements, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, Vol. 49, Pp. 1249-1253.
- 27- White, W.B. (2007): A Brief History Of Karst Hydrogeology: Contributions Of The NSS, J. Cave Karst Stud, Vol. 69, 13-26.
- 28- Zhou, B. And Greenhalgh, S.A. (2002): Rapid 2-D/3-D Crosshole Resistivity Imaging Using The Analytic Sensitivity Function, Geophysics, Vol 67, No 3, Pp. 755-765.