

بررسی و پردازش مقاطع رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی مناطق پرخطر فرونشست و فروچاله در دشت رسوبی آبرفتی ابرکوه، یزد

پیمان امین^۱، محمد اخوان قالیباف^{۲*}، احمد روحی مرموت^۳ و علی دلاورخلفی^۴

^۱ دانشجوی دکتری رشته مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استادیار گروه علوم خاک، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ استاد گروه علوم خاک، دانشگاه ساسکاچوان، کانادا

^۴ دانشیار، بخش ریاضی کاربردی، گروه علوم ریاضی، دانشگاه یزد

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸)

چکیده

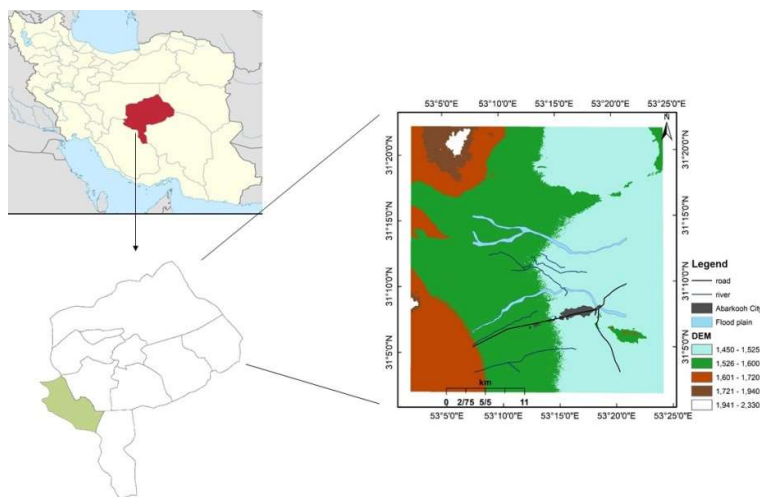
فروچاله که اغلب به دنبال فرونشست زمین حاصل شده است امروزه مشکلات زیادی را در کاربری اراضی ایجاد نموده است. منطقه مورد مطالعه دشت ابرکوه به مساحت حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع بخشی از حوزه آبخیز اقلید - ابرکوه است. این منطقه شامل رسوبات مخروط افکنه اقلید به ابرکوه است که از رأس آن در اقلید تا دشت و کویر ابرکوه به تدریج ریزدانه تر گردیده است. هدف از این تحقیق استفاده از روش رادار نفوذی زمین (GPR) جهت دستیابی به الگویی است که بیشترین تطابق را با واقعیت‌های زمین‌شناختی طبیعی منطقه دارد تا بتوان در خصوص ویژگی‌های رفتار خاک و رسوب در برابر امواج راداری به شناسایی ناحیه دارای عارضه و استعداد فرونشست دست یافت. روش GPR یک روش آسان و کم‌هزینه و بسیار کاربردی در حوزه منابع طبیعی می‌باشد و در حوزه‌های دیگر علمی هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور تعیین منطقه پرخطر و کم‌خطر در ناحیه مورد مطالعه با شناسایی حفره‌های زیرسطحی و آثار شکستگی در خاک، رسوبات و چینه‌شناسی در زیر زمین تا عمق ۵ متر از GPR استفاده شد. نتایج نشان داد که در مناطقی که آثار فروچاله وجود دارد در فواصل تعیین شده اطراف فروچاله، در سیگنال برگشتی رادار نفوذ به زمین آثار حفرات زیرسطحی و شکستگی چینه‌شناسی قابل شناسایی بود. با افزایش ارتفاع از سطح دریا و به سمت رأس مخروط افکنه در بالادست، سیگنال‌های ثبت شده یکنواخت‌تر و آثار شکستگی یا حفره را نشان نداد. با شناسایی نواحی خطر می‌توان به موقع و قبل از هرگونه کاربری از حوادث ناخواسته و تخریب سازه‌های انسان‌ساز جلوگیری نمود. با الگوهای داده نگار GPR بر اساس ویژگی‌های خاک و رسوب در ناحیه مورد مطالعه مناطق پرخطر و کم‌خطر مشخص شد. در تحقیق حاضر با استفاده از داده نگارهای GPR، نواحی بدون خطر که به عنوان شاهد در مسیر شمال غرب به غرب برای اقدامات زیرساختی مانند خطوط انتقال نیرو، سوخت و احداث راه‌آهن مسافری و باری مشخص گردید.

واژه‌های کلیدی: مخروط افکنه، فروچاله، فرونشست زمین، رادار نفوذ زمین، کاربری‌های عمرانی، راه‌آهن

۱ مقدمه

در دشت‌های آبرفتی پدیده فرونشست زمین و فروچاله که این پدیده‌ها به عنوان رفتار ریخت شناسی و مخاطره‌آمیز در سطح زمین منتج از عملکرد عوامل طبیعی و انسانی به دنبال دارد (گالووی، ۲۰۱۱). بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی منجر به پدیده‌های مذکور می‌شود. فروچاله به عنوان مشخصه‌ای تعریف می‌شود که ناگهان اتفاق می‌افتد و به صورت یک سوراخ در زمین ظاهر می‌شود که به طور دایره‌ای در منطقه در اثر حرکت مواد زمین ایجاد می‌شود (سنس، ۱۹۳۶، ۲۰۱۲؛ بهاتارای و همکاران، ۲۰۱۷). برخی از اثرات جدی فرونشست زمین شامل تغییر شیب در امتداد کانال‌های انتقال و ریزش جداره‌های لوله چاه آب، خرابی جاده‌ها، خسارت به تأسیسات انسان‌ساخت مانند ساختمان و خیابان‌ها و اختلال در الگوی جریان‌های هیدرولوژیک بوده است (امینی حسینی، ۱۳۷۳؛ چن‌چیه و همکاران، ۲۰۱۰؛ پاچکومارتینز، ۲۰۱۳ و فالتون، ۲۰۱۴). تشکیل فروچاله‌ها در مناطق آسیب دیده و مناطق اطراف از نظر اجتماعی و مالی پیامدهای منفی را دارد که منجر به جابجایی کل جوامع به مناطق امن‌تر می‌شود، آسیب شدید به زیرساخت‌ها یا حتی از دست دادن جان انسان‌ها می‌شود (بوتریک و همکاران، ۲۰۱۱؛ والسام و همکاران، ۲۰۰۵). یکی از فروچاله‌های مهم که در فلات مرکزی ایران، فروچاله‌های دشت ابرکوه می‌باشد. این فروچاله‌ها در روستاهای فیض‌آباد و هوروک به تعداد ۲۸ عدد گزارش شده است و بزرگترین و شاخص‌ترین فروچاله در آنجا به ابعاد طول، عرض و عمق ۱۵ متر می‌باشد. اخوان قالیباف و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی رس در فرونشست زمین‌های دشت ابرکوه یزد به این نتیجه دست یافتند که وجود رس‌های ایلیت و اسمکتیت به صورت بین لایه‌ای توانسته است شدت فرونشست زمین را در این ناحیه افزایش دهد همچنین وجود نوسانات سطح آب زیرزمینی

می‌تواند تأثیر رس‌ها را در رانش زمین در این ناحیه افزایش بدهد. اخوان قالیباف و رضوی (۱۳۹۷) با پیدا نمودن معیار ساده از چند شاخص محدود با نمونه‌برداری از سطح زمین جهت تشخیص استعداد زمین به فروچاله در دشت ابرکوه یزد توانستند مناطق پرخطر را در منطقه مذکور با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر به دست بیاورند. یکی از مطالعات برجسته در مورد فروچاله‌ها، آشکارسازی حفره‌های زیرسطحی در مناطقی که فروچاله ایجاد شده است (کافمن و همکاران، ۲۰۰۶). یکی از روش‌های عملی و کم‌هزینه روش ژئوفیزیکی برای کشف حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی و بررسی رسوبات روش رادار نفوذی به زمین (GPR) می‌باشد. در این روش، امواج الکترومغناطیسی با فرکانسی در محدوده ۲۵ مگاهرتز تا ۱ گیگاهرتز از طریق آنتن فرستنده به داخل زمین ارسال شده و بازتاب این امواج از فصل مشترک لایه‌ها، توسط گیرنده GPR دریافت می‌شود. GPR به عنوان یک روش با توان تفکیک بالا در مطالعه اهداف کم‌عمق (از چند سانتیمتر تا نهایتاً ۵ متر) بسیار موفق می‌باشد (کالو و همکاران، ۲۰۱۷). این روش به دلیل سرعت بالای برداشت داده‌ها در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (عشقی و کامکار روحانی، ۲۰۱۶). اویسی مؤخر (۲۰۰۷) از روش رادار نفوذی زمین برای آشکار سازی شکستگی‌ها و تاقدیس‌های نزدیک سطح در منطقه سراب قنبر در جنوب کرمانشاه استفاده کرد. سویل و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی فروچاله‌ها که در زمین کارست تبخیری در شهر Zaragoza واقع در شمال شرق اسپانیا به وجود آمده است با استفاده از دو روش رادار نفوذی به زمین (GPR) و توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) توانستند حفرات زیرسطحی در منطقه کشف کنند و مقدار جابجایی عمودی فرونشست و فروچاله را در سال به دست بیاورند. از دیگر مطالعات و



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، دشت ابرکوه.

دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه شامل مخروط افکنه‌ها و دشتهایی است که از غرب، جنوب و جنوب غربی به ارتفاعات و از شرق به پلایای ابرکوه با فروچاله‌های بزرگ منتهی می‌شود. وضعیت ریخت شناسی منطقه نشان داد که شیب عمومی دشت از غرب به شرق است (ذبیحی افروز، ۱۳۹۶).

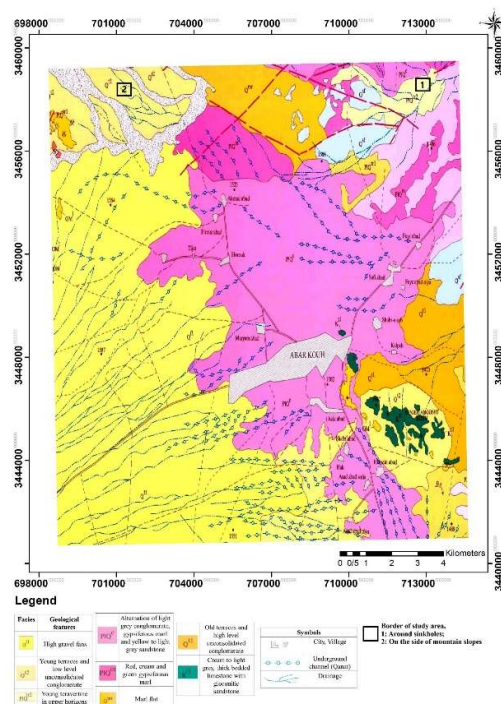
شکل ۲ بر اساس نقشه زمین‌شناسی ابرکوه (۱:۱۰۰۰۰۰) از خبازنیا (۱۳۸۴)، وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان داده است. رسوبات کواترنر با آبرفت‌های قدیمی و جوان از ویژگی‌های بارز منطقه مورد مطالعه است. از این رو، مناطق اصلی کواترنر در منطقه مورد مطالعه شامل مخروط افکنه سیلابی (Q^1) در اکثر نقاط منطقه مورد مطالعه با آبرفت‌های قدیمی تر درشت‌دانه و در تراس‌های جوان و پایینی (Q^2) و نیز در برخی از قسمت‌ها تراورتن‌های جوان با نام محلی شرتِه در افق‌های بالایی ($PIQ^{1/2}$) مشخص شده است. با توجه به گسترش و شدت فعالیت‌های کشاورزی و متعاقب آن برداشت آب از سفره‌های آب زیرزمینی، بیشترین فروچاله‌ها در بخش ($PIQ^{1/2}$) مشاهده گردید و این ناحیه مشخص گردید و

پژوهش‌های دیگر در زمینه GPR می‌توان به آشکارسازی طاق‌های باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک سطح در قصر شیرین (اویسی مؤخر و همکاران، ۱۳۸۴)، آشکارسازی قنات و لوله‌های مدفون زیرسطحی (محمدی ویژه، ۱۳۸۷ و حسینی، ۱۳۸۸) و تعیین ضخامت آسفالت (مزیانی، ۱۳۸۹) اشاره کرد. هدف از تحقیق حاضر کشف و آشکارسازی حفرات زیرسطحی و شکستگی‌های چینه‌شناسی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین و تشخیص توسعه فرونشست و فروچاله در منطقه مورد مطالعه است.

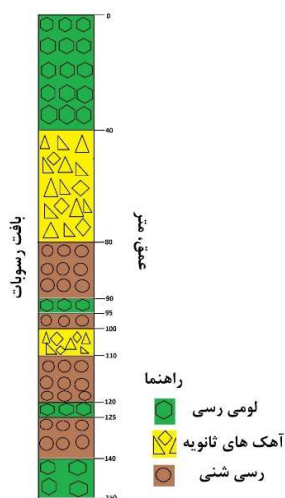
۲ داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱ معرفی منطقه مورد مطالعه

مخروط افکنه ابرکوه به مساحت حدود ۲۵۰ کیلومتر مربع بخشی از حوزه آبخیز اقلید - ابرکوه است. مناطق پست توسط رسوبات آبرفتی کواترنر و برخی از آبرفت‌های قدیمی مانند رسوبات کنگلومرای تجمیع نشده، مناطق رسی، شنی و شور پوشیده شده است. منطقه مورد مطالعه بر اساس موقعیت جغرافیایی، در محدوده جغرافیایی ۵۳ درجه تا ۵۳ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵۰



شکل ۲. بخشی از نقشه زمین‌شناسی دشت ابرکوه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ با تعیین موقعیت‌های مطالعاتی.



شکل ۳. رسوبات آبرفتی متعلق به عصر حاضر در موقعیت جاه‌های آبیاری منطقه مورد مطالعه.

کشاورزی در گزارش شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد ارائه شده است (محمودی سیوند، ۱۳۸۸). حداکثر عمق رسوبات در منطقه مورد مطالعه ۱۵۰ متر و بافت رسوبات شامل لومی رسی، آهک‌های ثانویه و رسی شنی می‌باشد.

برای تعیین منطقه امن در سمت دامنه‌های کوه ناحیه (Q¹²) انتخاب گردید (شکل ۲). شکل ۳، حداکثر ضخامت و عمق رسوبات آبرفتی در سمت فروچاله‌های دشت ابرکوه در محدوده چاه‌های آب

۲-۲ روش GPR

روش GPR بر اساس انتقال امواج الکترومغناطیسی به زیرزمین و سپس دریافت امواج بازتابی از اجسام یا رابطها با اندازه‌گیری زمان سپری شده و قدرت امواج منعکس شده در هنگام دریافت مجدد در سطح زمین است (رینولدز، ۱۹۹۷). یک سیستم رادار شامل یک مولد سیگنال، آنتن‌های انتقال و دریافت و گیرنده است. این سیستم دارای یک رایانه داخلی است که پردازش داده‌ها را هم در حین جمع‌آوری داده‌ها در منطقه و هم ضبط پس از آن تسهیل می‌کند. همان‌طور که آنتن در بالای سطح زمین حرکت می‌کند، سیگنال‌های دریافتی به عنوان تابعی از زمان سفر دو طرفه آن‌ها، یعنی زمان صرف شده از لحظه ارسال تا زمان شناسایی توسط گیرنده به شکل رادارگرام نمایش داده می‌شود. چنین رادارگرام تصویر دو بعدی را در امتداد خط اسکن نشان می‌دهد (رونن و همکاران، ۲۰۱۹). برای کاربردهای خاکشناسی و زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه از سیستم Zond-12e ساخت کشور لتونی استفاده شد. شکل ۴ طرح‌واره دستگاه مورد استفاده شده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای تشخیص آثار شکستگی چینه‌شناسی و فروچاله‌ها در زیرسطح تا عمق ۵ متر از آنتن‌های با فرکانس ۷۵ مگاهرتز و برای پردازش تصاویر GPR منطقه مورد مطالعه از نرم‌افزار REFLEXW (سندمیر، ۲۰۱۶) استفاده شد. فیلترهای مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب شامل ۱- فیلتر تصحیح ایستا (Static Correction)، ۲- تصحیح اشباع سیگنال (Dewow)، ۳- کنترل خودکار بهره (Automatic Gain Control (AGC))، ۴- فیلتر باندگذر (Bandpass Butterworth) و ۵- حذف پس‌زمینه (Background removal) می‌باشد.

شکل ۵ مسیرهای تعیین شده برای اندازه‌گیری GPR را نشان می‌دهد. در شکل ۵، مسیرهای ۱، ۲، ۳ و ۴ در اطراف فروچاله‌های ایجاد شده به منظور کشف حفره‌های

زیرسطحی و مسیرهای ۵، ۶، ۷ و ۸ در سمت دامنه‌های کوه به منظور تعیین منطقه کم‌خطر و مسیر امن مشخص شد. طول مسیرهای تعیین شده ۳۰۰ متر و فاصله بین مسیرها به ترتیب ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر می‌باشد. طبق مطالعات پژوهشگران در مورد کشف فروچاله‌های زیر سطح زمین به روش GPR از آنتن‌های با فرکانس ۲۵، ۴۰، ۷۵ و ۱۰۰ مگاهرتز استفاده کرده‌اند، هرچه مقدار فرکانس کمتر باشد، عمق نفوذ امواج به زمین بیشتر ولی کیفیت تصویر ضعیف‌تر می‌باشد و بالعکس (جیا و همکاران، ۲۰۲۱؛ فابریگات و همکاران، ۲۰۱۷؛ کادیوگلو و اولوگرگلی، ۲۰۱۴ و گابالاه و الحربی، ۲۰۲۲).

شکل ۶ نمونه‌ای از فروچاله ایجاد شده که در شکل ۵ موقعیت آن مشخص شده است، نشان می‌دهد.

پس از برداشت مقاطع خام رادار نفوذی به زمین در مسیرهای تعیین شده دو مقطع به عنوان شاهد در معرفی منطقه پرخطر و کم‌خطر برای بررسی و پردازش فیلترهای اعمال شده انتخاب شد.

۳ نتایج و بحث

در شکل‌های ارائه شده الف) مقطع عمقی در منطقه فروچاله در مسیر ۲ و ب) مقطع عمقی در سمت دامنه‌های کوه در مسیر ۶ می‌باشد.

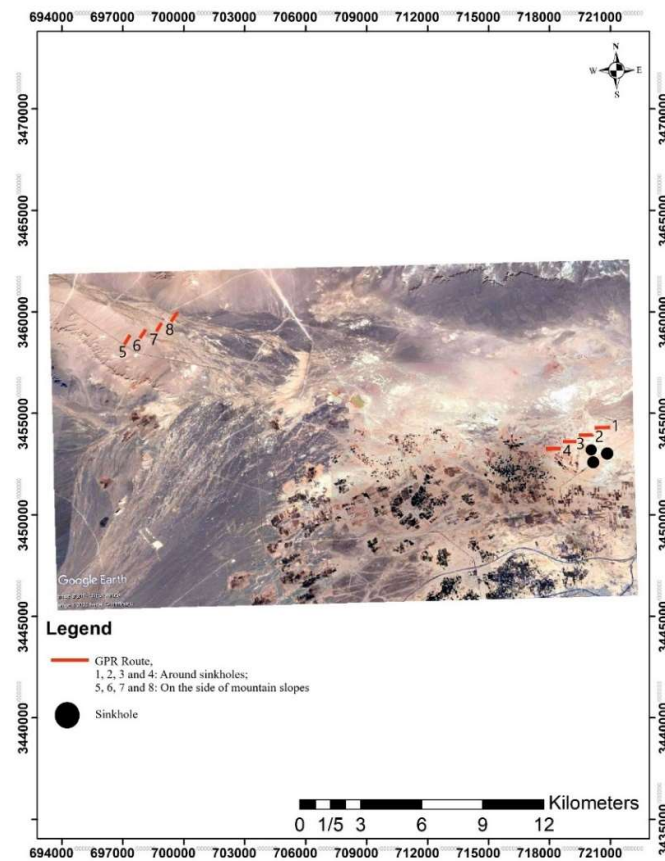
شکل ۷ مقطع عمقی خام GPR را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود هیچ آثار مشخصی در تصویر نمی‌توان پیدا کرد و لازم است فیلترهای مناسب برای کشف آثار مدنظر اعمال کرد.

شکل ۸ فیلتر تصحیح ایستا اعمال شده با فاصله ۰/۱۲ متر و زمان ۱۷/۳ نانو ثانیه بر مقطع اولیه عمقی خام موجود در شکل ۷ را نشان می‌دهد. این فیلتر فاصله آنتن دستگاه با سطح زمین که در این فاصله هوا باعث تداخل امواج گیرنده می‌شود را حذف کرده و باعث می‌شود که بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان به نمایش در آیند (محمدی

ویژه، (۱۳۸۷).



شکل ۴. طرح‌واره دستگاه GPR Zond-12e.



شکل ۵. موقعیت مسیرهای GPR و فروچاله در منطقه مورد مطالعه.



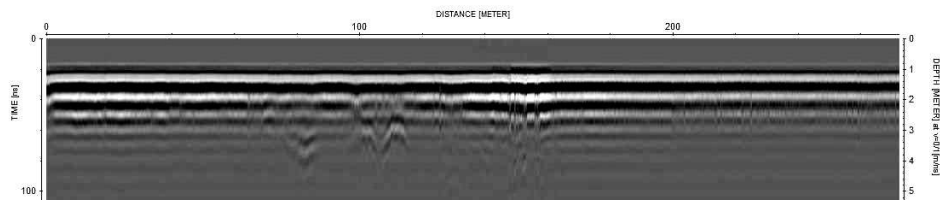
شکل ۶. فروچاله تشکیل شده در منطقه مورد مطالعه.

علت است که توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش به طور تصاعدی کاهش می‌یابد؛ بنابراین پاسخ دریافت شده از توده‌های عمیق‌تر ضعیف‌تر می‌باشد.

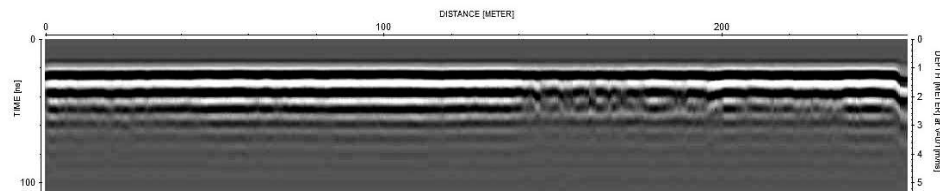
شکل ۱۱ مقطع عمقی نهایی پس از اعمال دو فیلتر باندگذر برای حذف نویزهای با فرکانس پایین و بالا به ترتیب به مقدار ۴۵/۰۹۵ و ۱۳۵/۲۸ مگاهرتز در هر بخش پروفایل به منظور وضوح در آوردن اثرات در تصویر و حذف پس زمینه می‌باشد. حذف پس زمینه به منظور افزایش کیفیت مقطع به دست آمده استفاده می‌شود بدین منظور که بر اساس انتخاب و میانگین‌گیری تعداد مشخصی از ردها (اثر یا تریس) و کاستن رد میانگین از بخش مورد نظر پردازشگر در راستای محورهای زمان و جابجایی، سعی بر متمایز کردن هدف مورد نظر و افزایش کیفیت رادارگرام دارد (قنبری و حفیظی، ۲۰۱۶).

شکل ۹ مقطع عمقی پس از اعمال فیلتر تصحیح اشباع سیگنال با پنجره زمانی ۸ نانو ثانیه را نشان می‌دهد. نیل (۲۰۰۴) اشاره کرد که به دلیل فاصله‌های زمانی کوتاه بین تپ‌های ارسالی توسط فرستنده و تپ‌هایی که به طور مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین وجود بازتاب‌هایی که از توده‌های کم‌عمق نشات می‌گیرند، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود که باعث به وجود آمدن یک زوال آهسته با بسامد پایین موسوم به wow بر روی ردها می‌شود و بر روی بسامدهای بالا قرار گرفته و آن‌ها را مغشوش می‌کند. برای حذف بسامد پایین از پایین بالاگذر بر داده‌ها اعمال می‌شود که در نرم‌افزار فیلتر به اسم Dewow برای حذف این اثر استفاده می‌شود (حسگرها و نرم‌افزارها، ۱۹۹۹). کنترل خودکار بهره با بیشینه بهره ۷۰ در شکل ۱۰ ارائه شده است. این گزینه به منظور افزایش توان سیگنال در اعماق می‌باشد که آثار عمقی به وضوح مشاهده شود. علت لزوم این بهره به این

(الف)

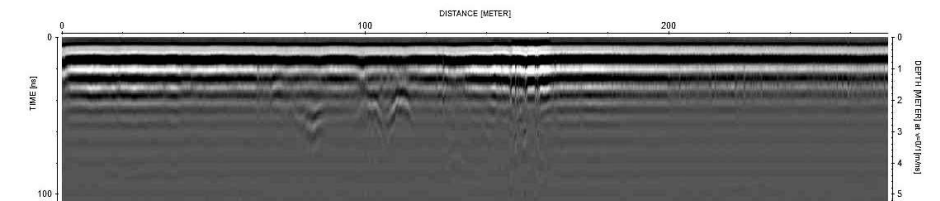


(ب)

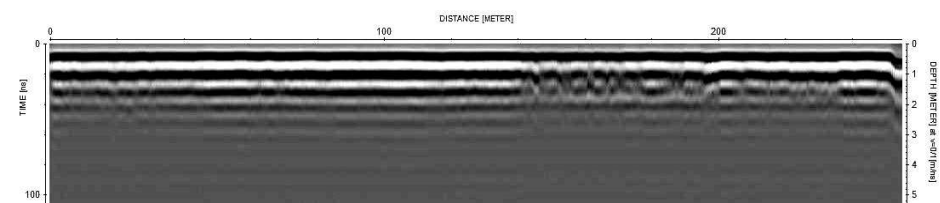


شکل ۷. مقطع اولیه به دست آمده از GPR.

(الف)

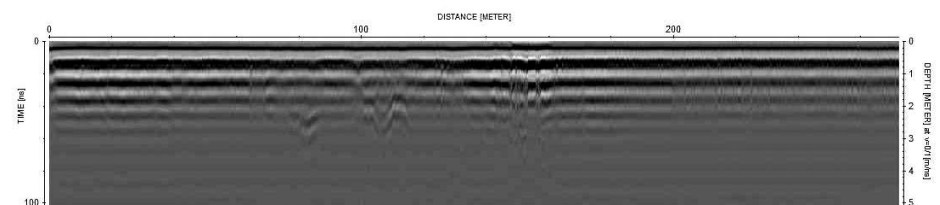


(ب)

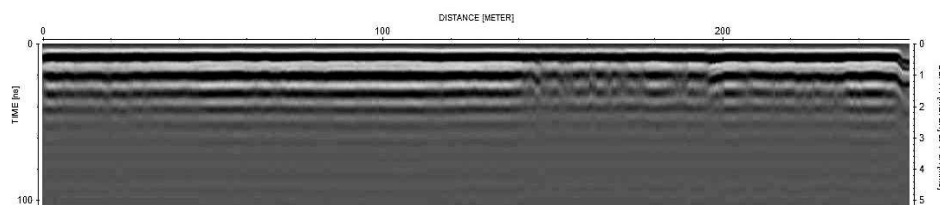


شکل ۸. مقطع عمقی پس از اعمال فیلتر تصحیح ایستا.

(الف)

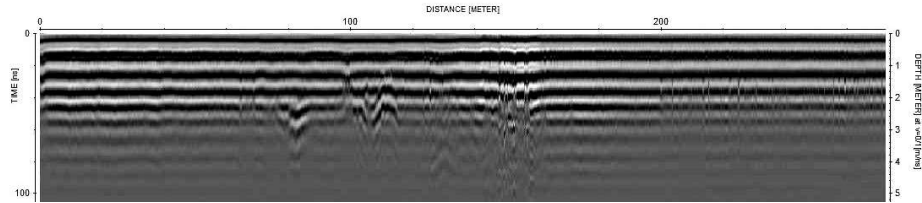


(ب)

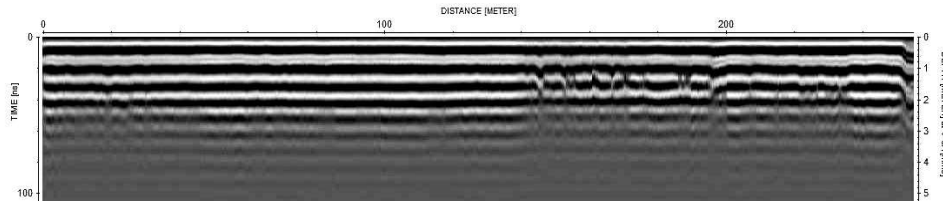


شکل ۹. مقطع عمقی پس از اعمال فیلتر تصحیح اشباع سیگنال.

(الف)

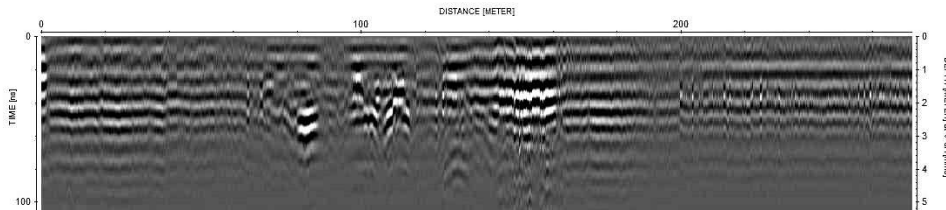


(ب)

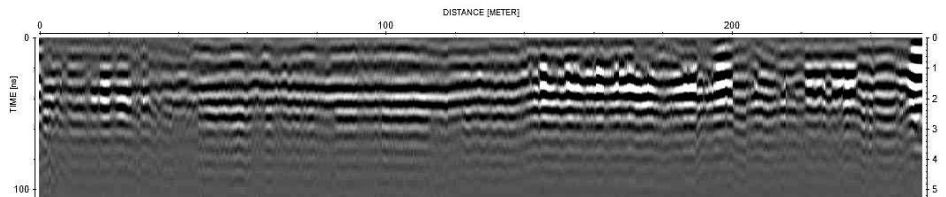


شکل ۱۰. مقطع عمقی پس از اعمال کنترل خودکار بهره.

(الف)



(ب)



شکل ۱۱. مقطع عمقی پس از اعمال فیلترهای باندهگذر و حذف پس‌زمینه.

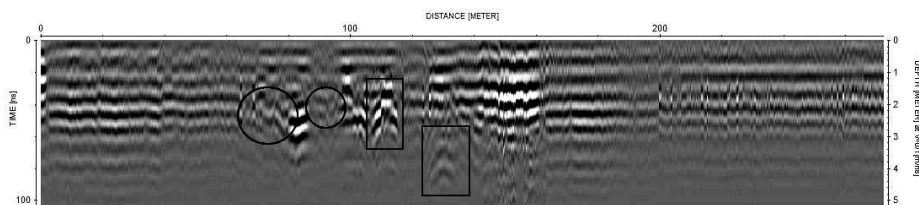
در نهایت در مقطع نهایی می‌توان در خصوص ویژگی‌ها و اثرات و اهداف مورد نظر در تحقیق صحبت کرد (عشقی و کامکار روحانی، ۱۳۹۵) که در تحقیق حاضر با توجه به نوع، بافت و عمق رسوبات (شکل‌های ۲ و ۳) می‌توان در مورد مقاطع عمقی GPR توصیف کرد. آثار شکستگی چینه‌شناسی و حفرات زیرسطحی که در اصطلاح ژئوفیزیک به آن میرایی سیگنال (Signal Damping) می‌گویند در مسیر ۲ اطراف فروچاله منطقه مورد مطالعه مشاهده شد و در شکل ۱۲ ارائه شده است. اشکال دایره‌ای

مقاطع عمقی ارائه شده پس از اعمال هر فیلتر نشان داد که پردازش داده‌های GPR به صورت تام در اختیار کاربر می‌باشد و کاربر می‌تواند درک درستی را از سازوکار عمل هر یک از عملگرها (فیلترها) بر روی داده‌ها و تصاویر داشته باشد؛ بنابراین به منظور دستیابی به بهترین مقطع لازم است در هر گام پردازش؛ مقاطع، ردها و طیف-ها را بررسی کرد و سپس وارد مرحله بعدی پردازش شد. هدف نهایی از پردازش‌ها دستیابی به مقطعی است که بیشترین تطابق را با واقعیت‌های زمین‌شناختی منطقه دارد و

فروچاله‌ها می‌باشد به این نتیجه دست یافتند که رسوبات، ریزدانه‌تر با رس بیشتر و درصد تخلخل بالاتر نسبت به اراضی بالادست که به دامنه‌های کوه ختم می‌شود وجود دارد و رس‌های منطقه حالت روان‌گرایی دارند و هم با تخلخل بیشتر به همراه فرونشست منجر به ایجاد حفره‌های بزرگ‌تر می‌کند و این حالت روان‌گرایی رس‌ها در زیر زمین با توجه به شکل ۱۲ که آثار میرایی سیگنال در زیر زمین مشاهده شد به روش GPR این موقعیت‌ها تشخیص داده شد. اخوان قالیباف و رضوی (۱۳۹۷) با استفاده از روش ژئوالکترونیک در دشت ابرکوه در اطراف فروچاله‌های ایجاد شده توانستند حفره‌های زیر زمین را در عمق‌های ۱۰ تا ۴۰ متری کشف کنند و طبق مطالعه و تحقیق حاضر روش GPR توانست حفره‌های زیر زمین را در منطقه مورد مطالعه واقع در دشت ابرکوه تا عمق ۴/۵ متری آشکار کند. نتایج بررسی شده نشان داد که منطقه مورد مطالعه که دارای فروچاله هست، زمین‌های اطراف آن مستعد گسترش و ایجاد بیشتر این پدیده را دارد که در دشت ابرکوه علاوه بر حضور فروچاله‌ها که در سطح زمین ایجاد می‌شود، حفره‌های زیرسطحی از عمق کم تا زیاد وجود دارند و منطقه مورد مطالعه در قسمت شرقی برای کاربری‌های مختلف (کشاورزی، شهرسازی، کارهای پیمانکاری و...) در حضور و اطراف فروچاله‌ها بسیار خطرناک می‌باشد.

شکل مشخص شده در تصویر اثر شکستگی چینه‌شناسی در زیر زمین را نشان می‌دهد که بیانگر این است که رسوبات ریزدانه مانند رس‌ها در زیرزمین به صورت سیال و فعال در زیرزمین هستند که با توجه به بافت رسوبات (شکل ۳) وجود رس‌ها در زیر زمین را تأیید می‌کند و متفاوت بودن شکستگی چینه‌شناسی در شکل ۱۲ می‌تواند به تغییرات مقدار رس در زیر زمین در عمق‌های متفاوت اشاره کرد. اشکال مستطیلی شکل مشخص شده در تصویر آثار هذلولی شکل را نشان داده است. این نوع اشکال هذلولی با توجه به مطالعه‌ای که پژوهشگر در منطقه انجام می‌دهد متفاوت است به طور مثال می‌تواند لوله آب، چاه، قنات مدفون شده باشد (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۸۹). در منطقه مورد مطالعه در اطراف فروچاله که هیچ آثاری در آنجا وجود نداشت و با توجه به شکل ۶ که نمونه‌ای از فروچاله ایجاد شده ارائه شده است، دهانه فروچاله به صورت هذلولی شکل در سطح زمین آشکار شده است. در شکل ۱۲ این آثار هذلولی در زیر زمین در عمق‌های ۱/۵ تا ۴/۵ متر توسط GPR آشکار و بیانگر حفره‌های زیرسطحی می‌باشد.

پس از پردازش نهایی مقطع عمقی GPR در سمت دامنه‌های کوه (شکل ۱۱-ب) از یکنواختی منطقه در زیر زمین و اثبات برامن بودن منطقه می‌باشد. اخوان قالیباف و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی خصوصیات خاک در پایین دست مخروط افکنه که شامل



شکل ۱۲. مقطع عمقی مسیر ۲ در اطراف فروچاله منطقه مورد مطالعه.

۴ نتیجه‌گیری

روش GPR ضمن سبک بودن دستگاه، آسانی حمل دستی و به دلیل دستیابی به مقاطع عمقی در ناحیه مورد مطالعه جهت تعیین پرخطر و کم خطر بودن منطقه مناسب تشخیص داده شد. در منطقه مورد مطالعه در اطراف فروچاله‌ها، اثرات شکستگی چینه‌شناسی و حفرات زیرسطحی در روش GPR نشان داده شد. داده نگارهای غیر معمول GPR به سمت فروچاله‌ها افزایش یافت. در روش GPR مسیر امن و پیشنهادی در ارتفاعات بالادست منطقه در سمت دامنه‌های کوه جهت ایمنی کار مشخص شد. برداشت از چاه‌های آب متناسب با تغذیه آبخوان‌ها و کنترل چاه‌های آب غیرمجاز می‌تواند در پیش‌گیری و جلوگیری از گسترش فروچاله‌ها مؤثر باشد. پهنه‌های خطر فروچاله که عمدتاً در سمت اراضی کشاورزی و آبرفت‌های جوان و ناحیه کویری است، توسعه عملیات عمرانی خطوط انتقال نیرو و سوخت مانند دکل‌های برق فشار قوی و نفت و گاز و همچنین ریل قطار به دلیل خسارت‌های غیر قابل پیش‌بینی توصیه نگردد.

منابع

اخوان قالیباف، م.، بیدکی، ه.، مهرنهاد، ح.، ۱۳۹۳، نقش ویژگی‌های کانی شناسی رس در شدت فرونشست زمین های دشت ابرکوه یزد: کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی، (۱)۳، ۲۰۷-۲۲۸.

اخوان قالیباف، م.، رضوی، م.، ۱۳۹۷، معیاری ساده برای پهنه بندی حساسیت زمین به رخداد فروچاله در مطالعات پایه شبکه های خطوط ریلی و انتقال نیرو در ابرکوه یزد: کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی، (۲)۶، ۵۰-۷۹.

امینی حسینی، کامبد.، ۱۳۷۳، فرونشست زمین بر اثر وجود قنات‌ها و فضا‌های زیرزمینی: مجله عمران شریف (دانشگاه شریف تهران)، شماره ۱۵.

اویسی موخر، م.، قاسمی، و.، شاه نظری، ح.، ۱۳۸۴: مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین: دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.

ذبیحی افروز، ر.ع.، ۱۳۹۶، بررسی تجارب جهانی و ایران در نحوه طبقه بندی دشت‌ها از منظر آبی و ارائه معیارهای مناسب برای ایران: موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ۱۳۹ ص.

حسینی، م.، ۱۳۸۸، برداشت، پردازش و تفسیر داده های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه مزبور: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

خبازنیا، ا.ر.، ۱۳۸۴، بررسی زمین شناسی ایران: نقشه زمین شناسی ابرکوه (۱:۱۰۰۰۰۰).

مزینانی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی ضخامت آسفالت در دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از روش GPR: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدی ویژه، م.، ۱۳۸۷، برداشت، پردازش و تفسیر داده های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه مزبور: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدی ویژه، م.، کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی ساختارهای مدفون نزدیک سطح زمین با استفاده از روش‌های GPR و مقاومت ویژه، یک مطالعه موردی. مجله علوم زمین، ۸۰، ۱۷۰-۱۶۳.

محمودی سیوند، س.، ۱۳۸۸، مطالعه فروچاله‌های دشت ابرکوه. شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، کمیته تحقیقات. ۳۰۰ ص.

- Bhattacharai, R., Alifu, H., Maitiniyazi, A., Kondoh, A., 2017, Detection of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal, using DInSAR technique: *Land*, **6**, 39. <https://doi.org/10.3390/land6020039>.
- Buttrick, D.B., Trollip, N.Y.G., Watermeyer, R.B., Pieterse, N.D., Gerber, A.G., 2011, A performance based approach to dolomite risk management: *Environment Earth Science*, **1127-1138**.
- Caló, F., Notti, D., Galve, J.P., Abdikan, S., Görüm, T., Pepe, A., Balik Şanlı, F., 2017, Dinsar-based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in konya plain, Turkey: *Remote Sensing*, **9**, 1-83. <https://doi.org/10.3390/rs9010083>
- Chen, Chieh-Hung., Wang, Chung-Ho., Hsu, Ya-Ju., Yu, Shui-Beih., Kuo, Long-Chen., 2010, Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan: *Engineering Geology*, **115**, 122-131.
- Eshghi, H., Kamkar Rouhani, A., 2016, Acquisition, processing and interpretation of ground-penetrating radar (GPR) data for recognition of subsurface sediments in southeast of the Caspian Sea. *Iranian Journal of Geophysics*, **10**(1), 118-135.
- Fabregat, I. et al., 2017, Reconstructing the internal structure and long-term evolution of hazardous sinkholes combining trenching, electrical resistivity imaging (ERI) and ground penetrating radar (GPR): *Geomorphology*, **285**, 287-304.
- Fulton, A., 2014, California Department of Water Resources, Northern District. USA. 4p.
- Gaballah, M., Alharbi, T., 2022, 3-D GPR visualization technique integrated with electric resistivity tomography for characterizing near-surface fractures and cavities in limestone: *Journal of Taibah university for science*, **16**:1, 224-239. <https://doi.org/10.1080/16583655.2022.2040242>
- Galloway, 2011, geological subsidence interest group conference, proceeding of technical meeting: Galveston, Texas, November, 27-29.
- Ghanbari, S., Hafizi, M.K., 2016, Application of forward modeling and appropriate processing algorithm to locate aqueduct by GPR: *Iranian Journal of Geophysics*, **10**(2), 67-82.
- Jia, L., Meng, Y., Li, L., Yin, R., 2021, A multidisciplinary approach in cover-collapse sinkhole analyses in the mantle karst from Guangzhou City (SE China): *Natural Hazards*, **108**, 1389-1410. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04738-1>
- Kadioglu, S., Ulugergerli, E.U., 2014, Imaging karstic cavities in transparent 3D volume of the GPR data set in Akkopru dam, Mugla, Turkey: *Nondestructive Testing and Evaluation*, **27**(3), 263-271. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2012.694885>
- Kofman, R., Ronen, A., Frydman, S., 2006, Detection of model voids by identifying reverberation phenomenon in GPR records: *Journal of Applied Geophysics*, **59**(4), 284-299.
- Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress: *Earth-science Reviews*, **66**, 261-330.
- Oveisi moakher, M., 2007, Investigating the fracture structure of Sarab Qanbar in the south of Kermanshah using radar method: *Iranian Journal of Geophysics*, **1**(1), 81-89.
- Pacheco-Martinez et al., 2013, Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México: *Engineering Geology*, **164**, 172-186.
- Reynolds, J.M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York, 796 pp.
- Ronen, A., Ezersky, M., Beck, A., Gatenio, B., Simhayov, R.B., 2019, Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel: *Geomorphology*, **328**, 28-43.
- Sandmeier, K.J. 2016. REFLEXW. v. 8.1. Manual (info@sandmeier-geo.de) https://www.sandmeier-geo.de/Download/gpr_2d_import_processing.pdf
- Sensors and Software, 1999. pulseEKKO 100 RUN User's Guide, Version 1.2.
- Sevil, J. et al., 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: *Engineering Geology*, **231**, 9-20.
- South African National Standard SANS, 1936-2012. *Development of Dolomite Land*. Edition 1 (ISBN 978-0-626-27840-3).
- Waltham, A.C., Bell, F.G., Culshaw, M.G., 2005. *Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK, 382pp.

Investigating and processing of ground penetrating radar (GPR) sections in order to identify high-risk areas of subsidence and sinkholes in the alluvial sedimentary plain of Abarkooh, Yazd

Peyman Amin ¹, Mohammad Akhavan Ghalibaf^{2*}, Ahmet Ruhi Mermut ³ and Ali Delavarkhalafi ⁴

¹ *Ph.D. student in desert control and management in School of Natural Resources & Desert Studies in Yazd university, Yazd, Iran*

² *Assistant professor in soil science department in School of Natural Resources & Desert Studies in Yazd university, Yazd, Iran*

³ *Professor in Soil science department of Saskatchewan university, Saskatoon, Canada*

⁴ *Associate professor in applied mathematics section in department of mathematical science in Yazd university Yazd, Iran*

(Received: 22 November 2022, Accepted: 08 January 2023)

Summary

Natural hazards are one of the factors that cause financial loss every year, and they occur in most regions of the world, including Iran. One of the hazards that mankind has been dealing with in recent decades, especially in alluvial plains is the phenomenon of land subsidence and sinkhole. Land subsidence and sinkhole due to natural and human causes have been reported in many places. Subsidence or sinkhole will damage human structures that are supported by the earth. Land subsidence is the most important environmental problem in Iran. A major cause of this phenomenon is overexploitation of underground water resources has led to land subsidence, and underground water extraction plays an important role in causing land subsidence. The study area is Abarkooh plain with an area of about 250 square kilometers is a part of the Eqlid-Abarkooh watershed. The lowlands are covered by Quaternary alluvial and some older sediments such as unconsolidated conglomerate, clayey, sandy, and saline areas. Based on geographical location, the study area is located in the geographical range of 53 degrees to 53 degrees and 32 minutes east longitude and 30 degrees and 50 minutes to 31 degrees and 12 minutes north latitude. This area contains medium to fine alluvial fan sediments that end in the salt playa or Abarkooh desert. To determine the high-risk and low-risk areas and routes in the study area, to discover subsurface holes and stratigraphic fractures underground up to a depth of 5 meters and the safe route for contracting works, etc., was used the ground penetrating radar (GPR) method. The results showed that in the areas where there are sinkhole traces in the determined distances around in current research, the attenuation signal of the ground penetrating radar, including the effects of subsurface cavities and stratigraphic fractures was discovered and revealed by GPR. On the side of the mountain slopes and high altitudes in the upstream region, no signal attenuation was observed, and sediments and soil were observed uniformly underground. The ultimate goal of the GPR section is to obtain a cross-section that is most consistent with the geological realities of the region and finally, at the final stage, we can talk about the characteristics, effects, and objectives of the research. The GPR method is an easy and low-cost method that is widely used in the field of natural resources and it is also used in other scientific fields. Regarding the common phenomenon of subsidence and sinkhole, these effects can be found underground, so that humans can prevent the development and expansion of this phenomenon. Also, this method can determine the route and safe area for contracting works, urban development, etc.

Keywords: Fan, sinkhole, land subsidence, ground penetrating radar, civil infrastructure uses, railway

*Corresponding author:

makhavanghalibaf@gmail.com