

## مقایسه روش رادار نفوذی به زمین و مغناطیس‌سنجی در بررسی‌های نزدیک به سطح: یک مطالعه موردی

مسعود حسینی<sup>۱</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۲\*</sup>، مهدی محمدی ویژه<sup>۳</sup>، سعید پرنو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۰۷، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۷)

### چکیده

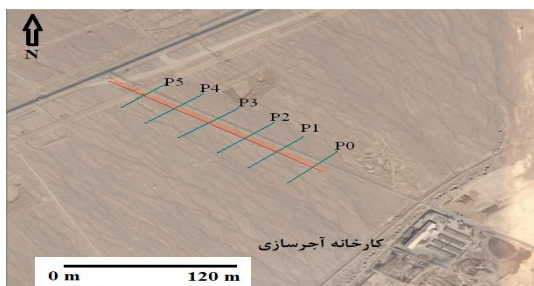
امروزه انتقال مواد سوختی و آب توسط لوله‌های مدفون در زیر سطح زمین در مناطق شهری و بین شهری امری ضروری و مهم است، به طوری که باعث ایجاد شبکه‌های زیرزمینی عظیم با صرف هزینه‌های فراوان شده است. مسئله‌ای که پس از ایجاد چنین شبکه‌هایی دارای اهمیت خاصی است، تعمیر و نگهداری این سازه‌ها برای جلوگیری از تخریب‌های احتمالی است. همچنین فقدان نقشه‌های دقیق زیرسطحی، باعث آسیب‌دیدن این خطوط طی عملیات‌های مختلف عمرانی می‌شود. بنابراین نیاز ضروری به روشی غیرمخرب برای آشکارسازی این‌گونه اهداف زیرسطحی کاملاً مشهود است. از این رو برای تهیه نقشه این سازه‌ها می‌توان از روش‌های ژئوفیزیکی مناسب، بدون هرگونه تخریبی در سطح زمین بهره گرفت. در بین روش‌های ژئوفیزیکی، برداشت داده‌ها در روش‌های رادار نفوذی به زمین و مغناطیس‌سنجی غیرمخرب، سریع و آسان هستند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی مزایا و معایب روش رادار نفوذی به زمین (Ground Penetrating Radar) یا به‌طور مختصر (GPR) در مقایسه با روش مغناطیس‌سنجی، در بررسی ساختارهای نزدیک به سطح زمین است. در این پژوهش روش (GPR) و مغناطیس‌سنجی از لحاظ قدرت تفکیک، عمق نفوذ و مقدار اطلاعات به دست آمده بر روی یک لوله فلزی انتقال گاز با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که رسانندگی زیاد منطقه مورد مطالعه (کانی‌سازی منطقه مورد مطالعه بیشتر رس و سیلت است)، سبب گردیده است امواج (GPR)، به شدت اتلاف شده و عمق نفوذ خیلی محدود گردد. از طرفی فلزی بودن لوله که تباین مغناطیسی قابل توجهی در مقایسه با محیط اطرافش دارد، باعث شده است که علی‌رغم قدرت تفکیک‌پذیری زیاد در روش (GPR) در مقایسه با روش مغناطیس‌سنجی، در چنین محیط‌هایی روش مغناطیس‌سنجی دارای عمق نفوذ زیادی در آشکارسازی این‌گونه اهداف باشد. هرچند در مکان‌های شهری که محیط‌های با نوفه زیاد هستند، امکان برداشت مغناطیس‌سنجی وجود ندارد، روش (GPR) با آنتن پوششی در چنین محیط‌هایی بسیار خوب عمل می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** آشکارسازی لوله‌های فلزی، تباین مغناطیسی، رادار نفوذی به زمین (GPR)، عمق نفوذ، مغناطیس‌سنجی.

## ۱ مقدمه

امروزه روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی برای مطالعات زیرسطحی استفاده می‌شوند. در این میان یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد، روش رادار نفوذی به زمین یا به طور مختصر (GPR) است. به دلیل استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا (۱۲/۵ تا ۲۳۰۰ مگاهرتز) در این روش، کاربرد آن عمدتاً برای آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی در عمق کم است (سنسور و سافتوار، ۱۹۹۹). روش (GPR) در تقسیم‌بندی‌های ژئوفیزیکی، معمولاً در حوزه روش‌های الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می‌شود. استفاده از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیر سطحی برای اولین بار به اختراعات آلمان‌ها در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر (Hulsmeyer) باز می‌گردد (پاراسنیس، ۱۹۹۷). استفاده از این ابزار از سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه یافت. دستگاه‌های (GPR) از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده است. گستره وسیع کاربردهای این روش علاوه بر قدرت تفکیک بالای آن، سرعت قابل ملاحظه در برداشت داده‌ها و همچنین غیرمخرب بودن آن را می‌توان از مزایا و همچنین دلایل توسعه آن نام برد (نیل، ۲۰۰۴). از طرف دیگر مطالعه مغناطیس کره زمین قدیمی‌ترین شاخه ژئوفیزیک است. از سه قرن پیش معلوم بود که زمین به صورت یک مغناطیس بزرگ و تا اندازه‌ای بی‌نظم رفتار می‌کند. برای اولین بار در سال ۱۸۴۳ تغییرات میدان برای تعیین محل کانسارهای مغناطیسی به کار برده شد. در ابتدا اندازه‌گیری‌های میدان مغناطیسی زمین اغلب برای یک مولفه (اکثرأ مؤلفه قائم) انجام می‌پذیرفت تا اینکه طی جنگ جهانی دوم مگنومتر فلاکس گیت برای آشکارسازی زیر دریایی‌ها ابداع شد (تلفورد، ۱۹۹۰). ثبت و پردازش دیجیتال داده‌ها و کاهش اندازه‌گیری لازم برای تهیه نقشه‌های مغناطیسی باعث کاهش مشکلات ناشی از این روش گردیده است.

به طور کلی روش‌های مغناطیسی مکمل دیگر روش‌های کاوش ژئوفیزیکی است، به نحوی که یک برنامه ژئوفیزیکی بدون کاربرد روش مغناطیسی در آن، حداقل در مرحله شناسایی، به‌سختی قابل تصور است. در روش (GPR) بنابر گستره کاربردهای آن در حوزه علوم زمین‌شناسی، زیست‌محیطی، فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی، آب‌شناسی، باستان‌شناسی، مطالعه یخچال‌ها و کاربردهای دیگر، مقالات و مطالعات زیادی دیده می‌شود (نیل، ۲۰۰۴ و نایت، ۲۰۰۱؛ ون اورمن، ۱۹۹۴؛ رینولدز، ۱۹۹۷؛ هوو نیو و همکاران، ۲۰۱۰؛ نیومی و همکاران، ۲۰۰۰). در کشور ما نیز مطالعاتی در زمینه استفاده از روش (GPR) انجام گرفته است. در این مورد می‌توان به مطالعه یخچال علم‌کوه مازندران به منظور بررسی ساختارهای داخلی و تعیین نوع یخچال با استفاده از روش (GPR) و لزوم تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور تفسیر صحیح نتایج (پرنو و همکاران، ۱۳۹۴)، بهبود مدل‌سازی پیشرو داده‌های (GPR) به روش عددی تفاضل محدود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳)، شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم‌عمق (کامکار روحانی و همکاران، ۱۳۹۱)، بررسی ساختارهای مدفون نزدیک سطح زمین با استفاده از روش‌های (GPR) و مقاومت ویژه (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۹۰)، آشکارسازی شکستگی‌ها و تاقدیس‌های نزدیک سطح در منطقه سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه (اویسی مؤخر، ۱۳۸۶) و بررسی آثار باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک سطح با استفاده از روش (GPR) در کنار روش مغناطیس‌سنجی (اویسی مؤخر و دیگران، ۱۳۸۴) اشاره کرد. در این تحقیق سعی شده است دو روش (GPR) و مغناطیس‌سنجی از لحاظ قدرت تفکیک، عمق نفوذ و مقدار اطلاعات به‌دست آمده با یکدیگر مقایسه شوند. لوله‌های فلزی از نظر خواص



شکل ۱. در این شکل موقعیت پروفیل‌ها نسبت به هم، لوله گاز و جاده آسفالتی نمایش داده شده است.

داده‌های (GPR) در این مطالعه، توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software با فاصله‌های ایستگاهی ۵ سانتی‌متر و به صورت پروفیل‌زنی پیوسته برداشت شده‌اند. این دستگاه دارای یک صفحه نمایش دیجیتالی است که توسط کابل‌های فلزی به آنتن‌ها و باتری دستگاه متصل می‌شود. با استفاده از این نمایشگر، تنظیماتی از قبیل انتخاب پارامترهای برداشت و نحوه برداشت داده‌ها توسط کاربر، امکان‌پذیر است. همچنین داده‌های برداشت‌شده را در حین عملیات صحرائی و بعد از عملیات صحرائی می‌توان از طریق این صفحه نمایش مشاهده کرد. آنتن استفاده‌شده برای اکتساب داده‌های (GPR)، آنتن پوششی (Shielded) با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز است. همچنین داده‌های مغناطیسی با دستگاه مغناطیس‌سنج پرتونون منطبق بر پروفیل‌های برداشت‌شده با روش (GPR)، با فاصله ایستگاهی ۱ متر برداشت شده است.

### ۳ پردازش و تفسیر داده‌های (GPR)

به‌طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیکی غلبه بر محدودیت‌های ذاتی و نوفه‌های موجود در داده‌های خام است. روش (GPR) نیز از این قاعده مستثنا نیست و حتی در پاره‌ای از مطالعات بدون اعمال پردازش‌های مناسب، دستیابی به هدف مورد نظر غیرممکن به نظر می‌رسد. دامنه پردازش‌های به‌کاررفته در روش (GPR)، توسط

مغناطیسی و الکتریکی تباین خوبی با محیط در برگیرنده آن‌ها دارند؛ از این رو اهداف مناسبی برای آشکارسازی توسط روش‌های یادشده هستند. در این پژوهش به پردازش و تفسیر داده‌های برداشت‌شده به روش (GPR) و مغناطیس‌سنجی برای یک لوله فلزی انتقال گاز پرداخته شده است. کانی‌سازی منطقه مورد مطالعه بیشتر رس و سیلت است؛ این امر سبب شده است امواج (GPR) با توجه به رسانندگی الکتریکی بالای این کانی‌ها، به شدت اتلاف شده و عمق نفوذ محدود گردد؛ به طوری که در مقاطع عمقی به‌دست‌آمده از این روش مشاهده می‌شود، عمق نفوذ در منطقه به کمتر از ۲ متر می‌رسد.

### ۲ برداشت داده‌ها

همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، هدف این پژوهش مقایسه دو روش (GPR) و مغناطیس‌سنجی برای پی‌جویی لوله‌های فلزی زیر سطحی در عمق‌های کم است؛ به این منظور خط لوله گاز شهری ناحیه قلعه شوکت شهرستان شاهرود انتخاب گردید. این لوله به منظور تأمین سوخت مصرفی کارخانه آجرسازی در این ناحیه تعبیه شده است. این لوله از جنس فولاد است که با لایه‌ای از قیر عایق‌بندی شده است. همچنین قطر لوله، ۸ اینچ و عمق دفن‌شدگی آن در حدود ۱ متری از سطح زمین است. در این بررسی به‌منظور دستیابی به حداکثر پاسخ‌ها، پروفیل‌های برداشت عمود بر امتداد خط لوله گاز انتخاب شده‌اند. به موازات خط لوله، خطوط انتقال نیروی برق ۵۰ هرتز و خط تلفن در نزدیکی لوله در زمین دفن شده‌اند. علاوه بر این جاده آسفالتی‌ای نیز با همین امتداد، جزئی از منطقه برداشت داده‌هاست. از این رو سعی شده است این موارد نیز در این مطالعه بررسی شوند. پروفیل‌های برداشتی به طول ۶۰ متر و به‌طور موازی در فاصله ۱۰۰ متری از همدیگر واقع شده‌اند. جاده آسفالت، لوله گاز و خط تلفن در این منطقه موازی با هم قرار گرفته‌اند (شکل ۱).

(Gain Control) استفاده شده است. این بهره با عکس شدت سیگنال متناسب است و تمام سیگنال‌ها را یکسان می‌کند. پردازش دیگری که در این مقاله از آن استفاده شده است، مهاجرت است. هدف از اعمال مهاجرت، نمایش دقیق بازتاب‌های زیرسطحی است. با اعمال این پردازش بازتاب‌ها به موقعیت صحیح خود برگردانده می‌شوند. به عنوان مثال اهداف نقطه‌ای در مقاطع (GPR) به صورت یک هذلولی نمایش داده می‌شوند. در این مورد مهاجرت، با جمع کردن تمام انرژی هذلولی و نسبت دادن آن به رأس هذلولی، نمایشی صحیح از اهداف نقطه‌ای ارائه می‌دهد. یکی از آخرین مراحل پردازش که در این پژوهش استفاده شده است، تصحیح توپوگرافی است. تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت وجود توپوگرافی شدید یا نسبتاً شدید در منطقه برداشت داده‌های (GPR)، اعمال تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌های مزبور که خود شامل قراردادن ردهای (GPR) در مکان واقعی خود و تصحیح مربوط به کجی آنتن‌هاست، امری ضروری است (پرنو و همکاران، ۱۳۹۳). قبل از به‌کارگیری مهاجرت و تصحیح توپوگرافی، سرعت امواج الکترومغناطیس در ساختارهای زیرسطحی، باید تعیین شود که معمولاً از سرعت ثابت برای تمامی ساختارهای یک منطقه استفاده می‌شود. معمول‌ترین روش برای تعیین سرعت، سونداژزنی به روش نقطه میانی مشترک (Common Midpoint) و برآزش هذلولی‌های ناشی از اهداف نقطه‌ای (نظیر لوله‌ها) است. همچنین می‌توان با معلوم‌بودن جنس مواد زیرسطحی، از جدول‌های مربوطه که در مقالات و کتاب‌ها موجود است، سرعت میانگین را تخمین زد.

### ۳-۱ مقطع زمانی پروفیل صفر

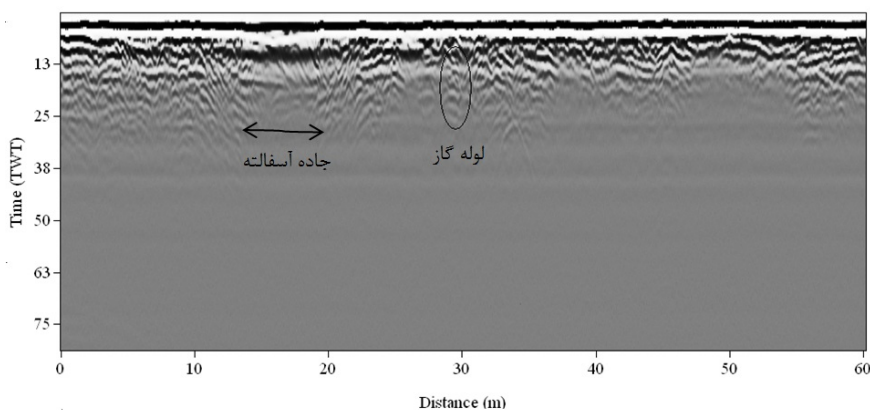
مقطع زمانی پروفیل صفر بعد از اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک AGC در شکل ۲ نمایش داده شده است.

پارامترهای مختلفی کنترل می‌شود. در برخی مطالعات ممکن است حتی از اعمال پردازش‌های ابتدایی بر روی داده‌ها خودداری شود و در پاره‌ای از موارد دامنه وسیعی از پردازش‌ها بر روی داده‌ها صورت می‌پذیرد. همچنین استاندارد خاصی برای روال پردازش داده‌های (GPR) موجود نیست، ولی روند پردازش‌ها باید به گونه‌ای باشد که سبب کیفیت بهتر مقطع گردد؛ به نحوی که مفسر توانایی بهترین تفسیر ممکن را داشته باشد. بعد از ویرایش داده‌ها یعنی تصحیح خطاهای ناشی از برداشت داده‌ها از قبیل معکوس کردن جهت پروفیل‌ها، پیوند فایل‌ها، حذف ردهای تکراری و اضافه کردن آن‌ها در ایستگاه‌هایی که برداشت صورت گرفته، ویرایش پارامترهای برداشت از قبیل فرکانس مرکزی، فاصله آنتن‌ها و ... می‌توان از روند پردازشی‌ای که در این پژوهش به کار رفته است، استفاده کرد.

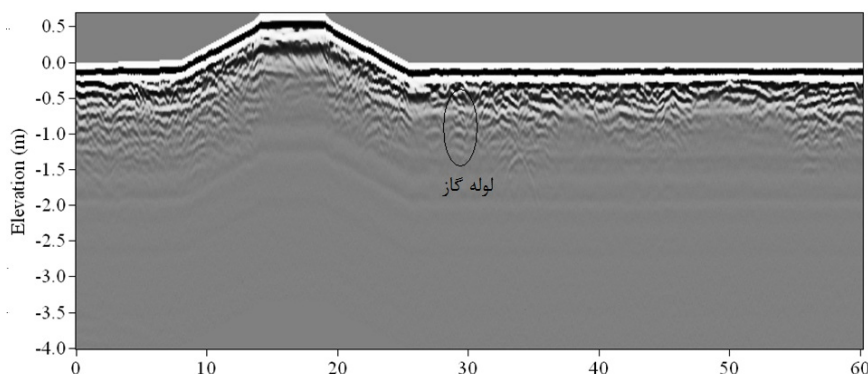
تصحیح اشباع سیگنال یکی از ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین فیلترها در ابتدای پردازش هر داده (GPR) است. با توجه به انرژی زیادی که از طریق امواج مستقیم هوایی، زمینی و بازتاب‌های خیلی نزدیک سطح زمین، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود. این فرایند نوفه‌های فرکانس پایینی را بر روی سیگنال‌های فرکانس بالا القا می‌کند که به کندی کاهش می‌یابند (سنسور و سافتوار، ۱۹۹۹)؛ بنابراین در ادامه از فیلتر تصحیح اشباع سیگنال (Dewow) استفاده شده است. Dewow یک فیلتر بالاگذر است که برای گذراندن پیک طیف سیگنال ارسالی برای فرکانس مرکزی یک آنتن خاص طراحی شده است. به واسطه اتلاف و پخش هندسی امواج الکترومغناطیس، بازتاب‌های در اعماق بیشتر، دامنه‌های بسیار ضعیف‌تری در مقایسه با بازتاب‌های نزدیک به سطح دارند. برای تقویت این بازتاب‌های ضعیف، از بهره‌ها استفاده می‌شود. چندین روش برای اعمال بهره‌ها وجود دارد. در این مقاله برای نمایش بهتر داده‌ها از کنترل بهره خودکار (Automatic

است. جاده مذکور از اطراف آن ارتفاع بیشتری دارد و در کناره‌ها با شیب تندتری به سطح زمین می‌رسد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود بازتاب‌های زیر سطحی در کناره‌های این جاده به صورت غیرطبیعی در فواصل ۱۴ و ۱۹ متری پروفیل دارای شیب تندی به سمت جاده هستند. این امر ناشی از افزایش ارتفاع زمین در محل عبور جاده است. برای نمایش ساختارهای زیرسطحی در مکان و عمق صحیح‌شان، اعمال تصحیحات توپوگرافی در چنین مواردی بسیار بااهمیت است. فایل مربوط به توپوگرافی پروفیل برداشت‌شده به صورت مجزا در نرم‌افزارهای ویرایش متن (مانند Note Pad) ساخته و با استفاده از نرم‌افزار Win\_EKKO Pro بازخوانی شده است (شکل ۳).

خطوط نیروی فشارقوی که به واسطه تیرهای بتنی به موازات این جاده انتقال داده می‌شوند، تقریباً در ۵۰ سانتی‌متری اول این پروفیل قرار دارند. اما در شکل ۲ اثر نامطلوب مربوط به این ساختارها به واسطه استفاده از آنتن‌های پوششی در این پژوهش جهت جمع‌آوری داده‌های (GPR) مشاهده نمی‌شود. یک بی‌هنجاری قابل توجه در ۱۴ تا ۱۹ متری پروفیل قابل تشخیص است. در این بی‌هنجاری به صورت شایان توجهی شکل بازتاب‌ها تغییر کرده است و به صورت یک محیط نسبتاً همگن در مقطع (GPR) دیده می‌شود. جاده آسفالت‌ای که در ابتدای این فصل به آن اشاره شد، باعث این بی‌هنجاری شده است. آشکارسازی این ساختار تأکیدی بر قابلیت روش (GPR) حتی در آشکارسازی ناپوستگی‌های جانبی



شکل ۲. مقطع زمانی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک.



شکل ۳. مقطع عمقی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی.

این مورد (محیط‌های به شدت ناهمگن) بدون اطلاعات قبلی از مکان لوله امکان‌پذیر نبوده است. این مسئله عدم توانایی روش (GPR) را در محیط‌هایی با ناهمگنی زیاد می‌رساند. همچنین دو به هم ریختگی در ۴۴/۵ و ۵۴ متری در انتهای پروفیل مشاهده می‌شود که منشأ ایجاد آن‌ها توپوگرافی و گودال در این دو ناحیه است. علت این بی‌هنجاری‌ها بازتاب ساختارهای زیرسطحی نیست و در واقع توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل برداشتی، این بی‌هنجاری‌ها را سبب شده است. در این نواحی دو گودال با عمق تقریبی ۰/۵ متر و عرض کم وجود دارد. هنگام عبور دستگاه (GPR) از روی این گودال‌ها کف دستگاه از سطح زمین جدا شده و تماس لازم را با زمین نداشته است؛ این امر باعث می‌شود امواج الکترومغناطیس قبل از ارسال به درون زمین از هوا عبور کنند. هوا محیطی کم اتلاف برای امواج محسوب می‌شود و امواج در آن سرعت زیادی دارند (۰/۳ متر بر نانوثانیه) (آنان، ۲۰۰۱). با عبور امواج از این ناحیه موج مستقیم زمینی با تأخیر زمانی درخور توجهی، به آنتن گیرنده می‌رسد. علاوه بر این بازتاب‌های چندگانه بین آنتن و کف گودال، سهمی‌های چندگانه‌ای که در ۴۷ متری پروفیل به طرز بارزی قابل تشخیص می‌باشند، سبب شده‌اند.

### ۳-۲ مقطع عمقی پروفیل ۵

در شکل ۴ مقطع عمقی پروفیل ۵ بعد از اعمال فیلتر Dewow، بهره اتوماتیک و تصحیح توپوگرافی به نمایش درآمده است.

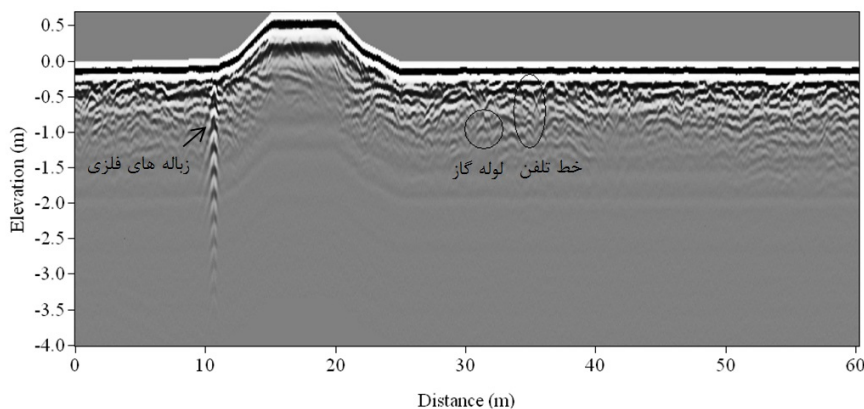
در فاصله ۱۰/۵ متری پروفیل ۵ یک بی‌هنجاری درخور توجه مشاهده می‌شود (شکل ۴). این بی‌هنجاری تقریباً از سطح زمین تا عمق ۳/۵ تا ۴ متری امتداد یافته است. طبق اطلاعات اکتسابی از کارشناسان شرکت گاز و مخابرات در این مکان، ساختار مدفونی موجود نبود. این بازتاب‌های با دامنه زیاد می‌توانند از ساختارهای فلزی

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که پس از اعمال تصحیح توپوگرافی، بازتاب‌ها به مکان واقعی خود انتقال داده شده‌اند. همان‌طور که ذکر شد در ۱۴ تا ۱۹ متری شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات بارزی در مقطع (GPR) دیده می‌شود. تغییرات لایه‌بندی و دانه‌بندی و همچنین اختلاف جنس مواد به کاررفته در ساخت جاده با خاک و رسوبات اطراف آن، علت این تغییرات است. در زیر جاده یک بازتاب نزدیک به سطح دیده می‌شود. این بازتاب از آنجا که از فصل مشترک کم‌عمقی نشأت گرفته است، با امواج مستقیم دارای همپوشانی است. بازتابی که در این ناحیه مشاهده می‌شود، ممکن است ناشی از شن‌ریزی باشد که برای زیرسازی جاده در نظر گرفته شده است. خاکریز ایجادشده به منظور افزایش سطح ارتفاع جاده، همگن و یکنواخت است؛ بنابراین در اعماق بیشتر این ناحیه رویدادهای بازتابی شایان توجهی مشاهده نمی‌شود. در واقع با ایجاد این خاکریز، شکل لایه‌بندی رسوبات در اطراف جاده که در مقطع (GPR) قابل تشخیص است، تغییر کرده و به شکل یکنواخت در آمده است. در فاصله ۲۹ متری پروفیل یک بی‌هنجاری قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری منطبق بر محل عبور لوله گاز است. معمولاً اطراف لوله‌های گاز را با خاک نرم پر می‌کنند که این خاک در سطح شایان توجهی رسی و ریزدانه است. چنین محیط‌هایی رسانا هستند و امواج الکترومغناطیسی در آن به شدت تضعیف می‌شوند. بنابراین بازتاب‌های ضعیف در این ناحیه می‌تواند ناشی از لوله و خاک اطراف آن و حتی تراشه حفاری شده به منظور دفن لوله باشند. وجود درصد بالای رس در خاک منطقه باعث ایجاد محیطی پُر اتلاف شده است، به طوری که در اعماق بیشتر از ۱/۵ متر در مقاطع (GPR) بازتابی مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، هرگونه ناهمگنی الکترومغناطیسی باعث بازتاب امواج الکترومغناطیس می‌شود؛ بنابراین تفکیک بازتاب‌های حاصل از لوله و ناهمگنی‌های زیرسطحی در

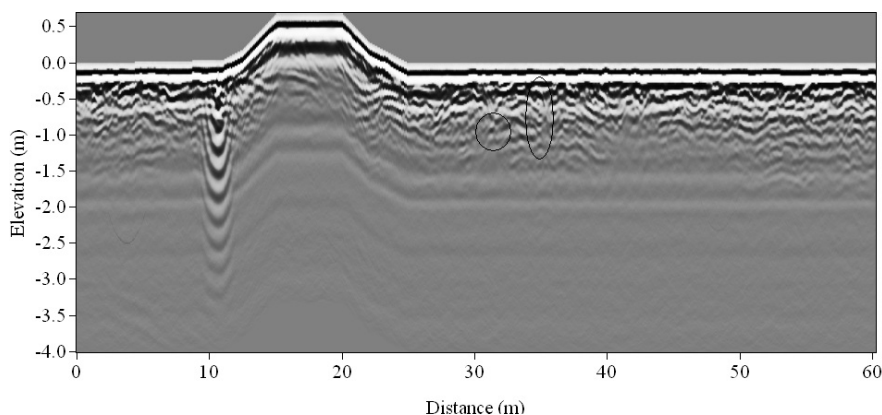
تلفن، تنها با استناد به منطبق بودن محل این بی‌هنجاری‌ها به محل دفن لوله، با ابهاماتی همراه است. بنابراین در مناطقی که ناهمگنی‌های زمین در حد طول موج (GPR) هستند، این روش به‌خوبی عمل نمی‌کند و در تشخیص بی‌هنجاری موردنظر ممکن است با خطا مواجه شود. به منظور ارائه تفسیر صحیح و منطقی از بی‌هنجاری مورد بررسی، دامنه پردازش داده‌ها افزایش داده شد و این پروفیل بعد از اعمال پردازش مهاجرت در شکل ۵ به نمایش درآمده است.

اهدافی از قبیل کابل‌ها و لوله‌های با قطر کم نسبت به طول موج فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده، اهداف نقطه‌ای محسوب می‌شوند. بنابراین با اعمال پردازش مهاجرت به ازاء سرعت متوسط  $0/1$  متر بر ثانیه (باتوجه به جنس محیط مورد مطالعه این سرعت انتخاب شده است)، بازتاب‌های هذلولی‌شکل ناشی از این قبیل اهداف به مکانی که از آن پراشیده شده‌اند، باز می‌گردند و به شکل نقطه در مقطع (GPR) قابل مشاهده هستند. با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ برای لوله گاز و خط تلفن مشاهده می‌شود که پس از اعمال پردازش مهاجرت هذلولی‌های پراش ناشی از حضور لوله گاز و خط تلفن به‌صورت اهداف نقطه‌ای دیده می‌شوند، ولی بازتاب‌های مکرر ناشی از زباله‌های فلزی تغییر جهت یافته‌اند و به‌صورت

نزدیک سطح ناشی شده باشند؛ بنابراین پس از مشاهده این بی‌هنجاری در هنگام برداشت داده‌ها، محل مورد نظر حفاری گردید پس از ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر حفر منطقه، مقداری زباله سوخته در محل یافت شد. بیشتر این زباله‌های سوخته، بازمانده‌های فلزی و فلزات زنگ‌زده (اکسیده شده) بودند. نزدیک سطح بودن این ساختارها با وجود حجم کم آن‌ها آنچه در نگاه اول تصور می‌شد، چنین بازتابی با دامنه بزرگی به وجود آورده‌اند. گستردگی شایان توجه این بازتاب‌ها از سطح به عمق، ممکن است این تصور غلط را سبب شود که این توده رسانا از سطح به عمق گسترش یافته است. وجود چنین بازتاب‌های گسترده‌ای تنها به سبب حلقوی شدن (Ringing) امواج (GPR) به واسطه حضور توده‌های رسانای نزدیک سطح است. در تفسیر مقاطع (GPR) چنین پدیده‌هایی باید به‌خوبی مد نظر قرار گیرند تا به ارائه تفسیر غلط از ساختارهای مورد بررسی منجر نگردد. مشاهده تأثیر پردازش مهاجرت در بررسی چنین بی‌هنجاری‌هایی بسیار مؤثر است. همچنین در فاصله  $31/2$  متری و  $35$  متری پروفیل اثر لوله گاز و خط تلفن قابل تشخیص است. نظیر این چنین بازتاب‌هایی به واسطه ناهمگنی‌هایی با اندازه طول موج (GPR)، در تمام طول پروفیل دیده می‌شود. از این رو نسبت دادن این بی‌هنجاری‌ها به لوله گاز و خط



شکل ۴. مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی.



شکل ۵. مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی.

است. این امر می‌تواند ناشی از نحوه برداشت داده‌ها باشد. برداشت داده‌ها به صورت رفت و برگشت است؛ برای مثال در پروفیل صفر، برداشت از ابتدای پروفیل و در پروفیل ۱ عمل برداشت از انتهای پروفیل شروع شده است. تمام بی‌هنجاری‌های مشاهده‌شده تقریباً در محدوده ۳۳ متری این ۶ پروفیل واقع شده‌اند که منطبق بر عبور خط لوله گاز و خط تلفن است (طبق مشاهده علائم مربوط به عبور خط لوله گاز و کابل تلفن در ۳۰ متری طول پروفیل‌ها که توسط شرکت گاز و اداره مخابرات نصب شده است). به دلیل فاصله کم بین دو بی‌هنجاری ناشی از خط لوله گاز و خط تلفن در پروفیل‌های مزبور، پاسخ‌های ناشی از لوله گاز و کابل تلفن قابل تفکیک نیستند.

به منظور حذف نامتقارنی بی‌هنجاری مغناطیسی، مشخص شدن موقعیت و جهت‌گیری دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها، فیلتر برگردان به قطب بر روی داده مغناطیسی کل اعمال شده است. سپس به منظور حذف آثار نوفه‌ای سطح زمین و مطالعه بهتر ساختارهای زیرسطحی، فیلتر گسترش به طرف بالا یا حذف فرکانس‌های بالا اعمال گردید. روش گسترش به طرف بالا، شدت میدان مغناطیسی را در سطوح بالا محاسبه می‌کند و در واقع یک روش انتگرال‌گیری است. در این روش اثر بی‌هنجاری‌های با

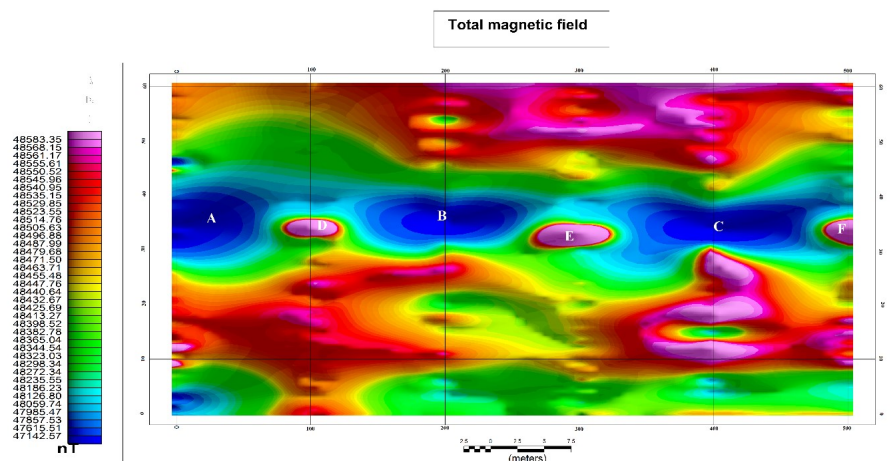
گسترده‌تری دیده می‌شوند. از این رو می‌توان چنین نتیجه گرفت که یکی از راه‌های تشخیص این نوع از بی‌هنجاری‌ها، اعمال پردازش مهاجرت بر روی داده‌هاست.

#### ۴ پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی

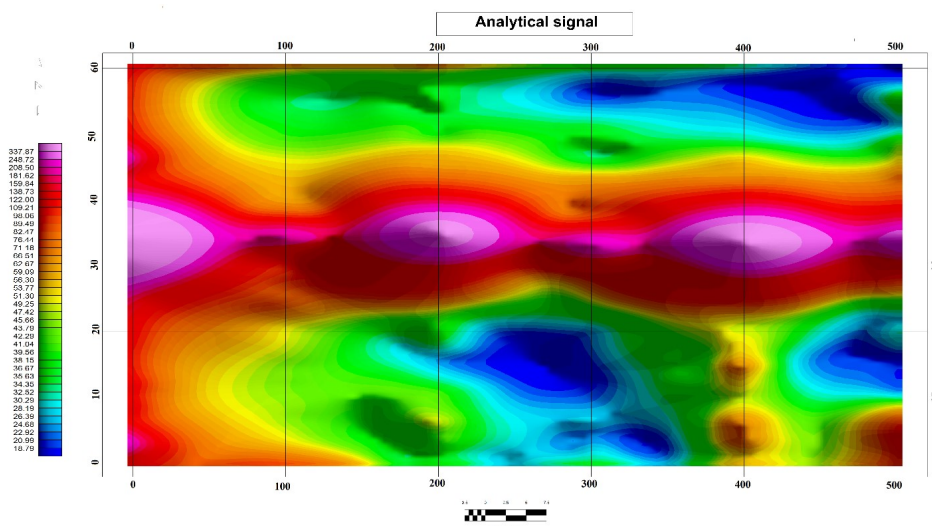
در برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی، به ازاء هر ایستگاه برداشت‌شده، یک مختصات محلی  $X$  و  $Y$  برای شبکه برداشت‌شده تعریف شده است؛ به طوری که امتداد پروفیل‌ها که عرض شبکه را تشکیل می‌دهند، در جهت محور  $Y$  است، یعنی ایستگاه اول در هر پروفیل در نقطه  $Y=0$  و ایستگاه آخر در نقطه  $Y=60$  واقع شده‌اند. همچنین طول شبکه که محل قرارگیری ۶ پروفیل برداشت‌شده است، در جهت محور  $X$  است؛ به صورتی که اولین پروفیل یعنی  $L0$  در نقطه  $X=0$  و آخرین پروفیل یعنی  $L5$  در نقطه  $X=500$  واقع شده است. شدت میدان مغناطیسی کل منطقه برابر  $48500$  نانوتسلا است. در شکل ۶ نقشه میدان مغناطیسی کل نمایش داده شده است.

در شکل ۶، سه زون منفی در پروفیل‌های صفر، ۲ و ۴ به ترتیب با حروف  $A$ ،  $B$  و  $C$  و سه زون مثبت در پروفیل‌های ۱، ۳ و ۵ با حروف  $D$ ،  $E$  و  $F$  مشخص شده





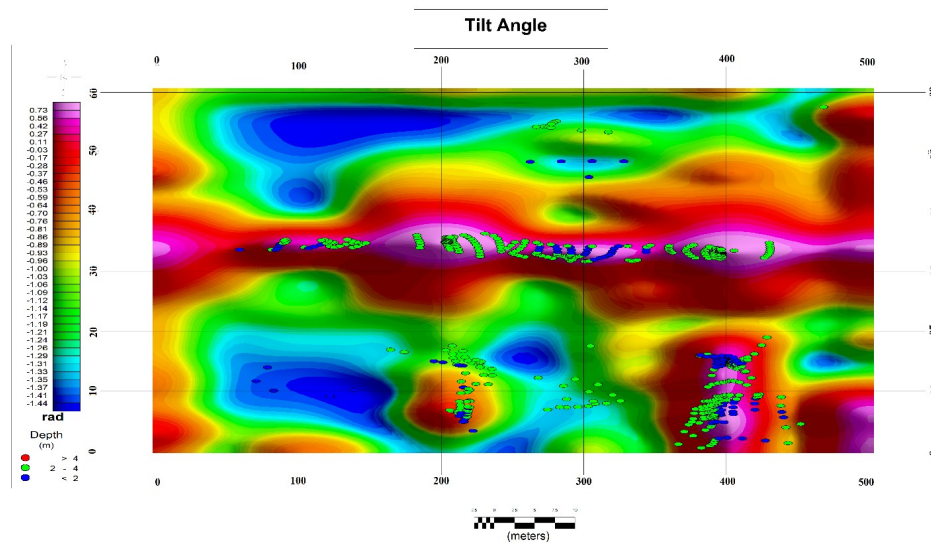
شکل ۶. نقشه مغناطیس کل.



شکل ۷. نقشه سیگنال تحلیلی میدان مغناطیسی کل بعد از اعمال فیلتر گسترش رو به بالا.

پردازش امکان تعیین دقیق تر محدوده‌های سطحی ساختار و نیز ارزیابی عمق آن را فراهم می‌سازد (شکل ۷). فیلترهای فازی نیز برای آشکارسازی لبه بی‌هنجاری‌ها در داده‌های میدان پتانسیل استفاده می‌شوند. در این پژوهش برای تعیین مرز لوله از فیلتر زاویه کجی استفاده شده است. برای تعیین عمق توده روش‌های متعددی به کار می‌رود. یکی از روش‌های پرکاربرد که در اینجا نیز استفاده شده است، روش تخمین عمق اولر است. برای

فرکانس بالا تضعیف می‌شود و بی‌هنجاری‌ها با فرکانس پایین به خوبی مشخص می‌گردند؛ به همین علت باعث محو شدن نوفه‌های سطح زمین که غالباً فرکانس بالا دارند، می‌شود و بررسی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی را آسان تر می‌کند. همچنین سیگنال تحلیلی سه بعدی در نقطه مفروض حاصل گرادیان سه مؤلفه در میدان مغناطیس است. به دلیل تغییرات مؤلفه گرادیان‌ها در لبه‌های ساختار و همچنین تغییر گرادیان‌های مولفه قائم با تغییر عمق، این



شکل ۸. تخمین عمق اوپلر به همراه نقشه زاویه کجی.

محیط برداده‌های برداشت‌شده، روش مغناطیس‌سنجی در محیط‌های شهری که حاوی نوفه‌های محیطی فراوان است، قابل استفاده نیست؛ در صورتی که روش (GPR) با آنتن پوششی در چنین محیط‌هایی به خوبی عمل می‌کند. همچنین نشان داده شد که روش (GPR)، به منظور آشکارسازی بی‌هنجاری در عمق کم، در مقایسه با روش مغناطیس‌سنجی از نظر تعیین عمق و محل دقیق بی‌هنجاری‌ها و تفکیک‌پذیری آنها موفق‌تر است. در روش (GPR) مقاطع زمانی و عمقی با جزئیات کامل از پاسخ‌های ناشی از تغییرات زیرسطحی به راحتی ایجاد می‌شود. برداشت‌های پیوسته با فاصله ایستگاهی ۵ سانتی‌متر و همچنین نحوه ارسال امواج (GPR) که به صورت یک مخروط سه‌بعدی در لایه‌های زیرسطحی نفوذ می‌کند، این امکان را (GPR) ایجاد می‌کند که تصویر دقیق و با جزئیات کامل از تغییرات زیرسطحی به دست آید. در ژئوفیزیک، محیط‌های رسوبی که درصد رس و سیلت در آنها زیاد است، محیط‌های رسانا محسوب می‌شوند. در چنین محیط‌هایی امواج (GPR) به شدت اتلاف شده و عمق نفوذ کاهش می‌یابد؛ در چنین شرایطی روش مغناطیس‌سنجی (GPR) بهتر عمل می‌کند.

افزایش دقت کار، در شکل ۸، نتایج حاصل از تخمین عمق اوپلر بر روی شکل حاصل از فیلتر سیگنال تحلیلی قرار داده شده است. با این کار عمق مربوط به محدوده بی‌هنجاری با دقت بیشتری تعیین می‌شود.

با توجه به شکل ۸ می‌توان عمق توده را در بازه ۲ تا ۴ متر و در برخی نقاط کمتر از ۲ متر تخمین زد. در نهایت می‌توان مشخصات توده را به صورت جدول ۱ بیان کرد.

جدول ۱: مشخصات توده مورد مطالعه در این پروژه.

مشخصات بی‌هنجاری	بازه تقریبی
طول بی‌هنجاری	۵۰۰ متر
عرض بی‌هنجاری	۲ تا ۵ متر
عمق بی‌هنجاری	بین ۲ تا ۴ متر و ۲ تا ۴ متر

## ۵ بحث و نتیجه‌گیری

برداشت سریع و کم‌هزینه روش (GPR) با صرف کمترین نیروی انسانی در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی شایان توجه است. روش مغناطیس‌سنجی تنها روش ژئوفیزیکی است که از نظر سرعت برداشت و کم‌هزینه بودن با روش (GPR) قابل مقایسه است. از نظر تأثیر نوفه

کامکار روحانی، ا.، اسحقی، ا.، و عرب امیری، ع.، ۱۳۹۱، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه بندی، دانه بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم عمق: مجله فیزیک زمین و فضا، ۴(۳۸)، ۱۵۵-۱۷۳.

محمدی‌ویژه، م.، و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۹۰، بررسی ساختارهای مدفون نزدیک سطح زمین با استفاده از روش‌های (GPR) و مقاومت‌ویژه: یک مطالعه موردی: فصلنامه علوم زمین، سال بیستم، ۸۰، ۱۶۳-۱۷۰.

Annan, P., 2001, "Ground penetrating radar, Work shop Notes", Sensors and Software.

Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress: Earth Science Reviews, 66, 261-330.

Nuaimy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, M. T. C., Nguyen, V. T., and Eriksen A., 2000, Automatic detection of buried utilities and solid objects with (GPR) using neural networks and pattern recognition: Journal of Applied Geophysics, 43, 157-165.

Parasnis, D. S., 1997, Principles of Applied Geophysics, fifth edition: Chapman and Hall.

Sensors and software, 1999, "Win\_EKKO User's Guide", Version 1.0.

Huoo Ni, S., Huang, Y. H., Feng Lo, K., and Ci Lin, D., 2010, Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete wavelet transform: Computers and Geotechnics, 37, 440-448.

Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., 1990, Applied Geophysics: Cambridge University Press, 284-286.

Knight, R., 2001, Ground penetrating radar for environmental applications: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 29, 229 - 255.

Van Overmeeren, R. A., 1994, Georadar for hydrogeology: First break, 8, 401-408.

Reynolds, J. M., 1997, An Introduction to applied and environmental geophysics: John Wiley and Sons Ltd.

همچنین عدم توانایی روش (GPR) در محیط‌هایی با ناهمگنی زیاد در تفکیک بی‌هنجاری از ناهمگنی‌های زیرسطحی نشان داده شد. هرگونه ناهمگنی الکترومغناطیسی باعث بازتاب امواج الکترومغناطیسی می‌شود، بنابراین تفکیک بازتاب‌های حاصل از لوله و ناهمگنی‌های زیرسطحی در این مورد (محیط‌های به شدت ناهمگن) بدون اطلاعات قبلی از مکان لوله امکان‌پذیر نبوده است.

## منابع

احمدی، ر.، فتحیانپور، ن.، و نوروزی، غ.، ۱۳۹۳، بهبود

مدل سازی پیشرو داده های رادار نفوذی به زمین

(GPR) به روش عددی تفاضل محدود: مجله

ژئوفیزیک ایران، ۸(۳)، ۱۱۳-۱۲۹.

اویسی مؤخر، م.، قاسمی، و.، و شاه نظری، ح.، ۱۳۸۴،

مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های

عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین:

دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.

اویسی مؤخر، م.، ۱۳۸۶، بررسی ساختار شکستگی سراب

قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش

رادار: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱(۱)، ۸۱-۸۹.

پرنو، س.، کامکار روحانی، ا.، عرب امیری، ع.، و

کریمی، ن.، ۱۳۹۴، بررسی ساختارهای درونی و

تعیین نوع یخچال با استفاده از روش رادار نفوذی

به زمین (GPR): مطالعه موردی یخچال علم کوه

مازندران: فصلنامه علوم زمین، سال بیست و چهارم،

۹۵، ۷۷-۸۴.

پرنو س، کامکار روحانی، ا.، عرب امیری، ع.، و کریمی، ن.

۱۳۹۳، لزوم تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌های

رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور تفسیر صحیح

نتایج، اولین همایش ملی رادار نفوذی به زمین.

## A comparison between the results of ground penetrating radar and magnetic surveys in near surface investigations: A case study

Masoud Hosaini<sup>1</sup>, Abolghasem Kamka Rouhani<sup>2\*</sup>, Mahdi Mohammadi vizheh<sup>3</sup>, and Saeed Parnow<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M. Sc., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup>Ph. D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 29 October 2015, Accepted: 05 February 2017)

### Summary

Today, it is indispensable to transmit and retain fuels, water and other energy resources by buried pipes, tanks and cables in urban and non-urban areas. Thus, the generation of huge and costly underground networks for this purpose is inevitable. Following the creation of such networks, their maintenance, and prevention from possible destructions are needed. Otherwise, considerable financial losses and irreparable environmental contaminations may occur. Often, a sufficient physical contrast between these installations and their surrounding media exists, and as a result, these installations are considered as suitable targets for detection by ground penetrating radar (GPR) method. In this paper, GPR data, acquired from a GPR survey on buried pipes including metallic pipes for gas transmission, have been processed and interpreted to detect the buried metallic pipes and other subsurface anomalies. To investigate the advantages or efficiency and drawbacks of the GPR method in this application, we have compared the results of the GPR method with the results of the magnetic method performed on the same targets. The results of this comparison are given in the following.

The GPR method provides a higher resolution in comparison to the magnetic method. However, GPR waves in subsurface highly conductive media are intensively attenuated. Hence, the depth of penetration in the latter method is limited. As can be seen from the GPR depth sections obtained from the GPR survey in the study area, the depth of penetration is even less than two meters. The magnetic method, despite its weak resolution, can more successfully detect the targets in highly conductive media provided that there is a good magnetic susceptibility contrast between the target and the surrounding medium. In urban areas, where high noise levels exist magnetic surveys unlike GPR methods via shielded antenna cannot be successfully performed. In this research, first, both the GPR and magnetic surveys have been carried out along survey lines passing the buried gas pipelines and other shallow subsurface targets in Qaleh-Showkat area that is approximately located 10 km to the west of Shahrood city to detect the targets. Then, the results of the GPR and magnetic surveys have been compared. As a result, we have found that the GPR method provided higher resolution in the detection of small anomalies located at shallow depths and near each other. However, in the locations having high electrical conductivities, the GPR method, unlike the magnetic method, could detect very shallow subsurface targets or anomalies even high attenuation of the GPR waves happen in these situations.

**Keywords:** detection of metallic pipes, magnetic contrast, ground penetrating radar (GPR), depth of penetration, magnetic survey

\* Corresponding author: