



آشکار سازی دقیق تأسیسات زیر سطحی شهری با برداشت و مدل سازی دوبعدی و سه بعدی داده های رادار نفوذی به زمین (GPR)، مطالعه موردی: دانشگاه صنعتی شاهرود

مسعود حسینی^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲، مهدی محمدی ویژه^۳ و سعید پرنو^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشجوی دکتری الکترومغناطیس، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۱

* نویسنده مسئول مکاتبات: saeed.parnow@ut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

شمار کابل ها و لوله های مدفون زیر سطح زمین در مناطق شهری، طی سال های گذشته به شدت افزایش یافته است. فقدان نقشه های دقیق زیر سطحی، باعث آسیب رسیدن به این خطوط در طی عملیات مختلف عمرانی می شود؛ بنابراین استفاده از یک روش غیر مخرب برای آشکار سازی این گونه اهداف زیر سطحی کاملاً ضروری است. روش رادار نفوذی به زمین روشی غیر مخرب، سریع و کم هزینه با قدرت تفکیک بالا برای بررسی های نزدیک به سطح زمین است. در مقاطع GPR اهداف استوانه ای (لوله، کابل و غیره) و نقطه ای به صورت هذلولی نمایش داده می شوند. لذا تمایز بین این اهداف از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این پژوهش با برداشت سه بعدی یا شبکه ای، به وسیله دستگاه Noggin Plus با آنتن پوششی با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، توانایی و عملکرد روش GPR در آشکار سازی تجهیزات زیر سطحی در یک منطقه شهری با شبکه نسبتاً پیچیده ای از تأسیسات زیر سطحی مورد بررسی قرار گرفته است. این شبکه زیر سطحی متشکل از لوله های فلزی و غیر فلزی، کابل ها و کانال های زیر سطحی انتقال آب است. بعد از انجام پردازش های مناسب بر روی داده های شبکه ای، نقشه ها و مقاطع مختلف دوبعدی و سه بعدی GPR دارای مختصات افقی و عمقی با دقت بالا تهیه شده؛ که در این مقاطع ساختارهای زیر سطحی آشکار سازی شده است. علاوه بر این تخمین قطر لوله های غیر فلزی محتوی آب با دقت حدود یک سانتیمتر امکان پذیر شده است. با برداشت شبکه ای، پردازش های مناسب و به دنبال آن نقشه ها و مقاطع تهیه شده، اطلاعات مفید و دقیقی از اهداف زیر سطحی مدفون در منطقه برداشت به دست آمده است.

رادار نفوذی به زمین (GPR)
لوله های فلزی و غیر فلزی
پردازش و تفسیر داده ها
مدل سازی دوبعدی و سه بعدی
دانشگاه صنعتی شاهرود

۱- مقدمه

امروزه توسعه شبکه های تأسیساتی و رفاهی به واسطه گسترش شهرها و جمعیت آن ها، امری اجتناب ناپذیر به نظر می رسد. این امر نیاز روزافزون بشر به بهره وری از محیط های زیرسطحی را سبب شده است. با توجه به قدیمی بودن تأسیسات زیرسطحی در برخی از مناطق و در دسترس نبودن نقشه های کامل این سیستم های زیرسطحی، یکی از چالش های همیشگی پیش روی مهندسین، آگاهی کامل نسبت به مکان ساختارهای زیرسطحی مانند لوله ها، آبراه ها، کابل ها، شبکه های آب و فاضلاب شهری، گودال ها، کانال ها و فضاهای خالی هنگام عملیات خاک برداری، در حین حفر تونل و زیرگذرها است؛ بنابراین آشکار سازی این اهداف، بدون تخریب سطح زمین، می تواند در ساخت سیستم های جدید و همچنین حفظ و جایگزینی شبکه های با طول عمر بالا، بسیار سودمند واقع شود. در این راستا به منظور کاهش تخریب سطح زمین و حفاری های بی مورد در مناطق شهری، روش های غیر مخرب مورد توجه بسیاری از مهندسان تأسیسات قرار گرفته است. در محیط های شهری، اغلب روش های ژئوفیزیک به دلیل وجود محدودیت های مکانی و نوفه های محیطی با مشکل روبه رو هستند و در پاره ای از موارد امکان استفاده از آن ها وجود ندارد. در این گونه محیط ها می توان با استفاده از رادار نفوذی به زمین (Ground Penetrating Radar) یا به اختصار GPR، با آنتن های پوششی، بدون داشتن اثرات نامطلوب در محیط برداشت، داده ها را با سرعت بالا برداشت کرد. روش GPR یکی از روش های نوین، غیر مخرب، سریع و دقیق ژئوفیزیک نزدیک سطح است؛ که موفقیت های قابل توجهی در آشکار سازی اهداف زیرسطحی، داشته است و در سال های اخیر مطالعات بسیاری در این خصوص در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. این روش برای نمایش لوله های فلزی و غیر فلزی، کانال های آب و کابل های زیرسطحی، بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (Birken et al., 2006; Zarkhidze and Iemenager., 2004; Pettinelli., 2009). اصول و مبانی تئوری این روش شباهت های بسیاری با لرزه نگاری بازتابی دارد. با این تفاوت که موج به کار گرفته شده در روش لرزه نگاری، مکانیکی (موج صوتی) اما در GPR از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا استفاده می شود. ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی های زیرسطحی برای اولین بار به مطالب و اختراعات آلمان در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر بازمی گردد (Parasnis, 1997). استفاده از این ابزار از سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه یافت. دستگاه های GPR از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده و به کارگیری این روش از اواسط دهه ۱۹۹۰ به شدت افزایش یافته است (Neal, 2004). گستره وسیع کاربردهای GPR به علاوه قدرت تفکیک بالای آن، سرعت در برداشت داده ها و همچنین غیر مخرب بودن از دلایل توسعه این روش است. البته نباید شباهت آن با لرزه نگاری بازتابی و استفاده از روش های پردازش و

تفسیر داده های لرزه ای را در این میان فراموش کرد. در این پژوهش، پس از انتخاب یک منطقه مناسب که شامل کابل، کانال و لوله های فلزی و غیر فلزی متعدد است؛ با انجام برداشت های سه بعدی یا شبکه ای داده ها و به دنبال آن پردازش و تفسیر داده ها، سعی شده است که توانایی روش GPR در نمایش ساختارهای زیرسطحی به صورت دوبعدی و سه بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- تئوری روش

معمولاً سیستم های GPR از یک آنتن فرستنده و گیرنده تشکیل شده اند. فرستنده یک پالس الکترومغناطیسی (میدان های الکتریکی و مغناطیسی موج الکترومغناطیس بر یکدیگر عمودند و راستای انتشار موج بر صفحه ای که این دو مؤلفه در آن قرار دارند نیز عمود است) با فرکانس بالا (بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) به صورت یک مخروط سه بعدی (شکل ۱ الف) به زیر سطح زمین منتشر می کند. زمانی که این مخروط سه بعدی به یک تباین الکتریکی و مغناطیسی در زیر سطح زمین برخورد کند، بخشی از آن به سطح زمین بازتاب یافته و توسط آنتن گیرنده دریافت می شود. به همین دلیل یک شی حتی قبل از این که دستگاه GPR بر روی آن قرار گیرد، نیز آشکار سازی می شود؛ بنابراین یک جسم نقطه ای در زیر سطح زمین در مقطع GPR به صورت یک هذلولی نمایش داده می شود. هنگامی که دستگاه GPR مستقیماً بر روی شی زیرسطحی قرار گیرد، شی در کمترین فاصله از دستگاه واقع می شود و بنابراین بیشترین انرژی در این زمان در مقطع GPR مشاهده می شود (<http://www.usradar.com/about-gpr/understanding-ground-penetrating-radar-data>).

در شکل ۱ نحوه ی انتشار امواج الکترومغناطیسی در زیر سطح زمین (مخروط سه بعدی)، برداشت داده ها و نمایش دوبعدی مقطع GPR بر روی یک لوله (شی نقطه ای) در زیر سطح زمین نمایش داده شده است.

اگر تابش امواج الکترومغناطیس به صورت عمود در نظر گرفته شود، ضرایب بازتاب و عبور در هنگام برخورد موج به یک ناپیوستگی به ترتیب با رابطه ۱ و ۲ تعریف می شوند:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

در اینجا Z_1 و Z_2 به ترتیب امپدانس موج محیط بالا و پایین ناپیوستگی هستند. امپدانس موج (Z) بیانگر نسبت میدان الکتریکی E به میدان مغناطیسی H است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (3)$$

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۲، شماره ۲، ۱۳۹۵.

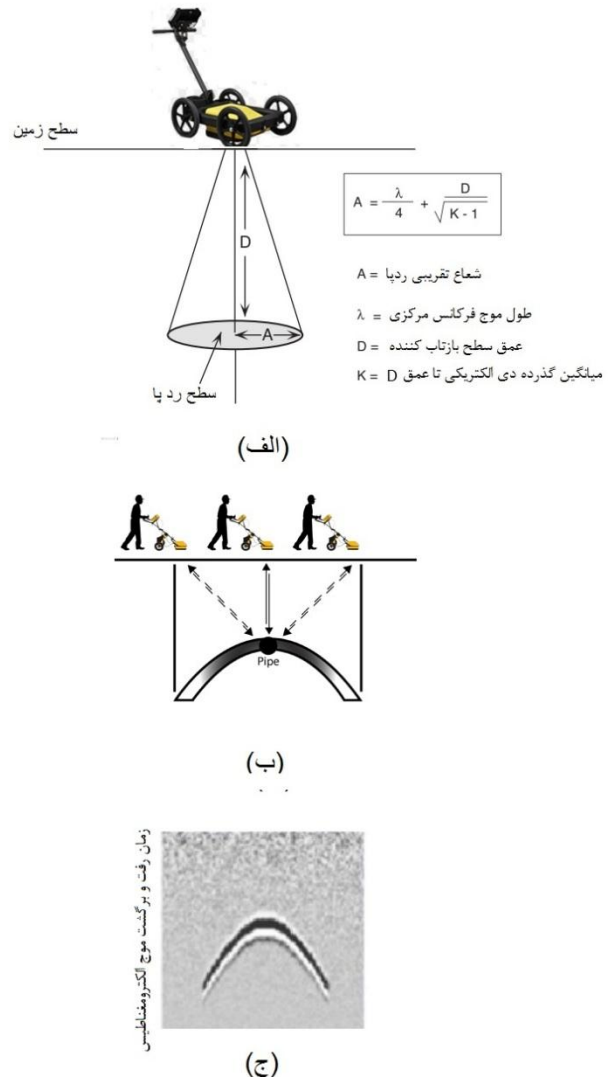
قرار دارند، برابر واحد در نظر گرفته می‌شود و نقش چندانی در بررسی‌های GPR ندارد (Daniels., 2004)". دو عامل مهم در تمامی روش‌های ژئوفیزیکی تفکیک‌پذیری و عمق نفوذ است. روش GPR، عمق نفوذ با فرکانس مرکزی و رسانندگی الکتریکی ساختارهای زیرسطحی، کنترل می‌شود. به طوری که یک رابطه معکوس بین عمق نفوذ و فرکانس مرکزی امواج GPR و رسانندگی برقرار است. در ژئوفیزیک به توانایی تفکیک سیگنال‌ها از اهداف نزدیک به هم قدرت تفکیک می‌گویند. در روش GPR تفکیک‌پذیری (توانایی تفکیک سیگنال‌ها از اهداف نزدیک به هم) به فرکانس مرکزی، پهنای باند و همچنین پارامترهای الکتریکی از قبیل رسانندگی، ضریب دی‌الکتریک و نیز شکل هندسی هدف وابسته است (Daniels., 2004)". تفکیک‌پذیری قائم را از نظر علمی می‌توان، برابر یک چهارم طول موج غالب رادار در نظر گرفت (Parasnis., 1997)" که طول موج طبق رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (4)$$

که در آن V سرعت موج الکترومغناطیس و f فرکانس مرکزی می‌باشند؛ اما تفکیک‌پذیری افقی، بیشتر از آنکه تحت تأثیر طول موج باشد، به گسترش موج الکترومغناطیسی وابسته است. به عبارتی همان‌طور که در شکل (۱-الف) دیده می‌شود، انرژی بازتاب شده که به آنتن گیرنده می‌رسد حاصل برخورد امواج الکترومغناطیسی با یک نقطه خاص نمی‌باشند؛ بلکه این انرژی از سطح محدودی از بازتاب‌کننده به گیرنده می‌رسد. این سطح بازتاب‌کننده به صورت یک بیضی است که قدرت تفکیک‌پذیری افقی به وسیله این بیضی کنترل می‌شود. عرض این بیضی که به عنوان قدرت تفکیک‌پذیری افقی تعریف می‌شود؛ به مشخصات زمین، فرکانس موج مورد استفاده و عمق بازتاب‌کننده بستگی دارد. به طوری که هرچه عمق قرارگیری هدف بیشتر باشد، تمرکز امواج GPR کاهش یافته و در نتیجه تفکیک‌پذیری افقی کاهش می‌یابد (Neal., 2004)".

۳- برداشت داده‌ها

داده‌های GPR غالباً به سه روش دور افت مشترک (Common Offset)، نقطه عمق مشترک (Common mid-point) و درون‌چاهی برداشت می‌شوند. دو روش نقطه عمق مشترک و درون‌چاهی بیشتر برای تعیین سرعت و تضعیف موج الکترومغناطیسی لایه‌های زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع آرایش‌ها به دلیل نیاز به پردازش‌هایی با دامنه گسترده، شرایط خاص عملیات و همچنین زمان بیشتر برداشت داده‌ها نسبت به روش دور افت مشترک، معمول نیست. در روش دور افت مشترک که در این پژوهش از آن استفاده شده است، فرستنده و گیرنده نسبت به هم ثابت بوده و هر دو در جهت خط برداشت حرکت داده می‌شوند. این آرایش به برداشت بازتابی نیز معروف است. بیش از



در رابطه ۳، i (کمیت موهومی)، μ (تراوایی مغناطیسی)، σ (فرکانس زاویه‌ای)، σ (رسانندگی الکتریکی) و ϵ (گذردگی الکتریکی) هستند. پارامترهای اصلی شامل گذردگی دی‌الکتریک (Dielectric permittivity)، رسانندگی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی (Magnetic permeability)، شکل هندسی اهداف، فرکانس موج الکترومغناطیس، لایه‌بندی و عمق اهداف زیرسطحی که امواج الکترومغناطیسی GPR را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این میان گذردگی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی به عنوان پارامترهای محیطی، نقش تعیین‌کننده‌ای در قابلیت بازتاب یا انعکاس‌پذیری و عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی دارند؛ اما تراوایی مغناطیسی نسبی برای بیشتر موادی که در قلمرو کاربردهای GPR

۲۵۰ مگا هرتز بهره می گیرد.

۴- پردازش داده ها

یکی از مراحل مهم در همه ی روش های ژئوفیزیکی، پردازش مناسب داده ها قبل از تفسیر است. هدف از پردازش داده های ژئوفیزیکی غلبه بر محدودیت های ذاتی داده های برداشت شده، به منظور رسیدن به اطلاعات دقیق تر از اهداف زیرسطحی است. در نهایت پردازش های مناسب منجر به تفسیر منطقی و مطمئن تری خواهد شد. گستره پردازش هایی که بر روی داده های GPR بکار می رود توسط هدف مورد مطالعه تعیین می شود. بسته به نوع فعالیت ها و مقدار نوفه، دامنه پردازش ها متفاوت بوده و در پاره ای از موارد حتی ممکن است از اعمال پردازش های ابتدایی بر روی داده ها صرف نظر شود.

دستگاه های GPR زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی را ثبت می کنند؛ بنابراین برای تعیین عمق اهداف زیرسطحی، نیاز به تخمین صحیحی از سرعت امواج الکترومغناطیس است.

سرعت امواج الکترومغناطیس را می توان با اندازه گیری زمان پیمایش موج از اهداف مدفون در عمق معین، برازش هذلولی ها، جداول مربوط به سرعت برای محیط های مختلف، اندازه گیری های مستقیم آزمایشگاهی بر روی نمونه های صحرایی، برداشت های نقطه عمق مشترک و درون چاهی تخمین زد " (Neal., 2004)". در این پژوهش با استفاده از سرعت به دست آمده از طریق برازش هذلولی های پراش بر روی مقاطع زمانی GPR (۱/۰ متر بر نانوثانیه) و رابطه ۵:

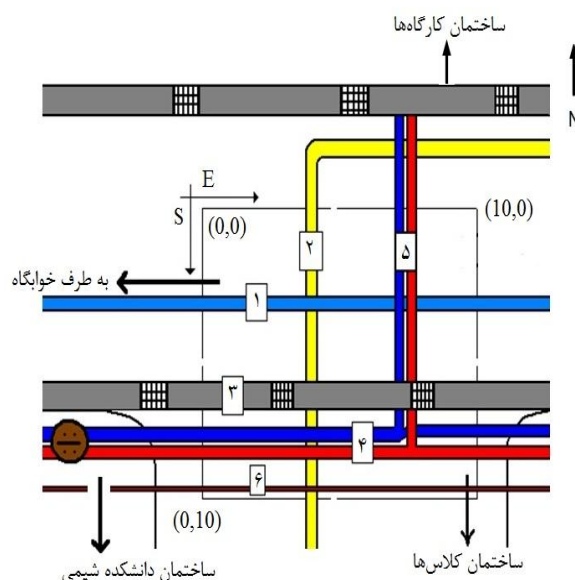
$$V = \frac{D}{t/2} \quad (5)$$

که در این رابطه V ، D و t به ترتیب سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی، عمق بازتاب و زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی هستند، مقاطع به صورت عمقی نمایش داده شده از این سرعت برای پردازش مهاجرت نیز استفاده شده است.

فیلتر اشباع سیگنال یک فیلتر بالاگذر است که برای حذف نوفه های فرکانس پایینی که در اثر نزدیکی آنتن های فرستنده و گیرنده و ایجاد پدیده اشباع سیگنال ایجاد می شوند " (Sensors and software; "pulseEKKO 100 RUN User's Guide, Version 1.2"; 1999). بر روی تمامی مقاطع اعمال شده است.

با گذر زمان و نفوذ امواج الکترومغناطیسی به عمق، بازتاب ها نیز تضعیف شده، به طوری که در اعماق زیاد تقریباً هیچ گونه بازتابی آشکار سازی نمی شود. لذا در این پژوهش با توجه به هدف مورد بررسی (ساختارهای افقی یا قائم) به ترتیب از کنترل بهره اتوماتیک (Automatic Gain Control) و بهره گسترش هندسی و نمایی (Spreading and Exponential Compensation Gain) برای جبران افت انرژی استفاده شده است. کنترل بهره اتوماتیک، به طور معکوس با توان سیگنال متناسب است و سعی در یکسان سازی تمامی بازتاب ها دارد؛ اما کنترل بهره گسترش هندسی و نمایی با

۹۵٪ برداشت های GPR بدین طریق برداشت می شوند " (Reynolds., 1997). همان گونه که اشاره شد، هدف از انجام این پژوهش بررسی عملکرد روش GPR به عنوان یک روش ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک بالا، برای آشکار سازی تأسیسات زیرسطحی در محیط شهری با تأسیسات زیاد است. برای این کار محدوده ای در پردیس مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود که تأسیسات زیرسطحی زیادی از آن عبور کرده و دارای پتانسیل لازم برای بررسی عملکرد روش GPR است، انتخاب و در یک شبکه منظم با ۱۱ پروفیل طولی و ۱۱ پروفیل عرضی به فواصل یک متر از هم داده ها برداشت شده است. این شبکه که دارای ابعاد ۱۰ متر طول و ۱۰ متر عرض است، به همراه موقعیت ساختارهای مورد بررسی در شکل ۲ نمایش داده شده است. پروفیل های شمالی-جنوبی از S0 تا S10 و پروفیل های غربی- شرقی از E0 تا E10 نام گذاری شده اند.



شکل ۲: موقعیت تأسیسات زیرسطحی و شبکه برداشت شده داده در محدوده خیابان شمال شرق دانشکده شیمی در دانشگاه صنعتی شاهرود. تأسیسات زیرسطحی در این شکل با شماره های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ مشخص هستند.

در شکل ۲ ساختارهای زیرسطحی شبکه ی برداشت که با شماره های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ نمایش داده شده اند، به ترتیب لوله ی آب، لوله ی گاز، کانال (آبراهه)، لوله های شوفاژ، لوله های شوفاژ انشعاب یافته و کابل هستند. در این پژوهش با توجه به عمق تقریبی قرارگیری اهداف (کمتر از ۲ متر، تفکیک پذیری افقی مورد نیاز (حدوداً ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر) و شهری بودن محیط برداشت داده ها، از دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software استفاده شده است. این دستگاه برای اکتساب داده های GPR از آنتن پوششی (Shielded Antenna) با فرکانس مرکزی

اتلاف اندک امواج GPR توسط آب شیرین، بازتاب‌های قوی را سبب شده است. هذلولی اول پاسخ ناشی از قسمت فوقانی لوله و هذلولی دوم پاسخ ناشی از قسمت پایینی لوله است. هذلولی سوم که در این مقطع به صورت ضعیفی نمایش داده شده است، اولین بازتاب درونی (چندگانه) لوله است. علت وجود چنین فاصله‌ای در بین این پاسخ‌ها، سرعت بسیار پایین امواج GPR در آب شیرین است. فاصله این هذلولی‌ها در حدود ۹ نانوثانیه است که با توجه به سرعت امواج الکترومغناطیسی در آب (۰/۳۳ متر بر نانوثانیه) و با استفاده از معادله ۲، می‌توان قطر لوله را در حدود ۱۴/۸ سانتیمتر تخمین زد. لوله مورد نظر دارای قطر ۶ اینچی است که نتیجه به دست آمده از مقطع GPR دارای تطابق خوبی با قطر واقعی لوله است. بازتاب‌های مکرری در فاصله ۶/۱ متری ابتدای پروفیل که تقریباً از سطح آغاز شده و تا عمق زیاد در این مقطع مشاهده می‌شود، ناشی از حضور کانال (آبراهه) در این ناحیه است. بازآوایش (Reverberation) امواج در فضای خالی کانال و همچنین فلزات موجود در ساختار بتن مورد استفاده در سقف این کانال می‌توانند این بازتاب‌ها را سبب شده باشند. همچنین هذلولی‌های مشخص شده در فاصله ۸ متری ابتدای پروفیل، بازتاب از سطح دو لوله فولادی مربوط به آب سرد و گرم شوفاژ می‌باشند. هرچند که فاصله این دو لوله از یکدیگر تقریباً ۱۰ سانتیمتر است و پاسخ آن‌ها دارای همپوشانی است، ولی پاسخ آن‌ها در عمق ۰/۷ متری پروفیل، به خوبی تفکیک شده است. در فاصله ۹/۸ متری ابتدای پروفیل نیز در عمق ۰/۵ متری سطح زمین یک بی‌هنجاری مشاهده می‌شود که منطبق با کابل برق عبوری از این ناحیه است. در این فاصله در عمق ۱ متری نیز یک بازتاب ضعیف دیده می‌شود. این بازتاب، دومین بازتاب پس از برخورد با سطح زمین و بازتاب مجدد از کابل است. دلیل این بازتاب‌های مکرر که در فاصله برابر از یکدیگر قرار دارند، نزدیک بودن کابل به سطح زمین است. گذردهی دی‌الکتریکی و رسانندگی الکتریکی فلزات نسبت به مواد تشکیل دهنده پوسته زمین بسیار بیشتر است (Zeng and McMechan., 1997). به همین دلیل در شکل ۳، لوله‌ها و کابل‌های فلزی بازتاب‌های بارزتری را نسبت به لوله آّبستی نشان داده‌اند. همچنین بالا بودن گذردهی دی‌الکتریکی و رسانندگی، باعث عمق پوسته بسیار پایین امواج GPR در فلزات می‌شود. به طوری که این امواج به سرعت در اهداف فلزی مستهلک شده و هیچ بازتابی از قسمت تحتانی لوله‌های فلزی در مقاطع GPR دیده نمی‌شود.

۶- نمایش دوبعدی در امتداد ساختارهای زیرسطحی

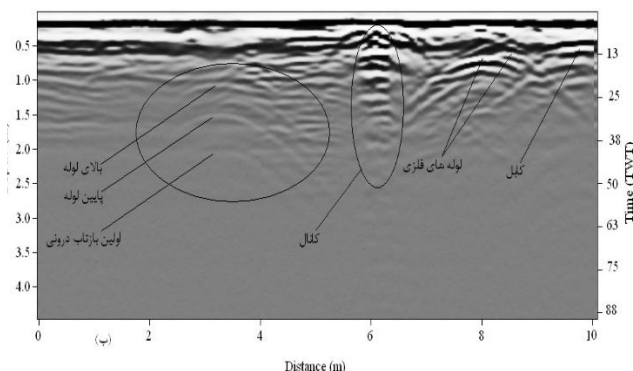
مقطع عمقی پروفیل E3 که در امتداد لوله آّبستی آب آشامیدنی برداشت شده است، بعد از اعمال فیلتر اشباع سیگنال و استفاده از بهره گسترش هندسی و نمایی با ضریب اتلاف ۳ و ماکزیمم بهره ۱۰۰ در شکل ۴ به نمایش درآمده است. در این مقطع سه بازتاب افقی در اعماق ۱، ۱/۵ و ۲ متر و تقریباً در تمام طول پروفیل

جبران اتلاف ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج GPR، به بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی می‌پردازد ("Sensors and software; "pulseEKKO 100 RUN User's Guide, (Version 1.2"; 1999).

فرض این‌که بازتاب‌های مشاهده شده بر روی مقاطع GPR مستقیماً زیر نقطه برداشت واقع شده‌اند، باعث روز خطاهای بارزی می‌شود. همان‌طور که در تئوری این روش نیز ذکر شد، آنتن‌های GPR امواج را به صورت یک مخروط سه‌بعدی به درون زمین ارسال می‌کنند. در نتیجه یک بازتاب بر روی ردهای ثبت شده می‌تواند متعلق به هر جایی از این جبهه موج باشد و اهداف نقطه‌ای در مقاطع GPR به صورت هذلولی‌ها آشکارسازی می‌شوند. در مقاطع دوبعدی از این هذلولی‌ها می‌توان به عنوان نشانگرهایی برای آشکارسازی اهداف نقطه‌ای استفاده نمود؛ اما اگر هدف نمایش دامنه سیگنال در عمق‌های مختلف باشد، باید با اعمال پردازش مهاجرت اهداف نقطه‌ای را به شکل واقعی خود برگرداند. پردازش مهاجرت سعی در حذف پراش‌ها، انحرافات، جابه‌جایی‌های شیب و بازتاب‌های خارج از خط دارد. این پردازش در سال ۱۹۲۱ برای اولین بار بر روی داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی صورت گرفت و تا امروز از پردازش‌های معمول بر داده‌های لرزه‌ای است ("Neal., 2004").

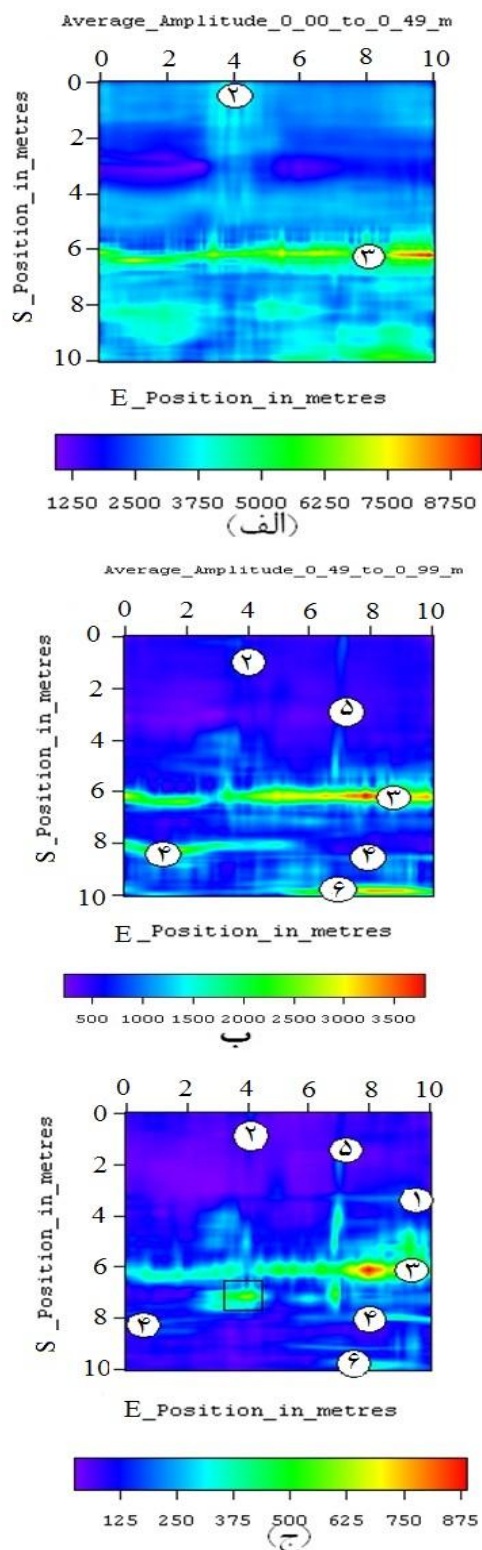
۵- نمایش دوبعدی پروفیل‌های عمود بر ساختارهای زیرسطحی

در شکل ۳ مقطع عمقی و زمانی پروفیل S0 با اعمال فیلتر تصحیح اشباع سیگنال (Dewow) و بهره اتوماتیک نمایش داده شده است.



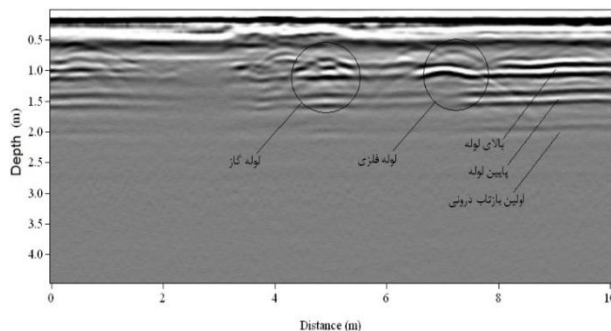
شکل ۳: مقطع عمقی و زمانی پروفیل S0 و نمایش ساختارهای مختلف زیرسطحی.

مطابق شکل ۳، اولین بی‌هنجاری در فاصله ۳/۳ متری ابتدای پروفیل، با بیضی بزرگ آشکارسازی شده است. در این منطقه سه بازتاب متوالی به شکل هذلولی‌های پراش با فواصل زمانی ۹ نانوثانیه دیده می‌شوند. این بی‌هنجاری منطبق بر لوله آب آشامیدنی است؛ که از جنس آّبست بوده و در عمق ۱/۱ متری از سطح زمین مدفون است. اختلاف بالا در گذردهی دی‌الکتریکی خاک و آب شیرین و نیز



شکل ۵: میانگین دامنه سیگنال برحسب عمق برای اعماق ۰ تا ۰/۴۹ متر (الف)، ۰/۴۹ تا ۰/۹۹ متر (ب) و ۰/۹۹ تا ۱/۴۸ متر (ج). اهداف یا بی‌هنجاری‌های زیرسطحی مختلف در این شکل با شماره-های ۱ تا ۸ مشخص شده است. نوع این اهداف یا بی‌هنجاری‌های زیرسطحی شماره‌گذاری شده با ذکر جزئیات آن‌ها در متن توضیح داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود. مطابق شکل، این بازتاب‌ها به ترتیب ناشی از قسمت‌های فوقانی، پایینی و بازتاب درونی لوله آزیستی می‌باشند. همچنین دو بی‌هنجاری مربوط به لوله گاز (در فاصله ۴/۸ متری نسبت به شروع پروفیل) و لوله فلزی (در فاصله ۷/۲ متری نسبت به شروع پروفیل) در این مقطع آشکارسازی شده است. این لوله‌های فلزی که به صورت عمود بر لوله آزیستی و از زیر آن عبور کرده‌اند، به دلیل توان بازتاب بالای خود پاسخ لوله آزیستی را در این نقاط تحت تأثیر قرار داده‌اند.



شکل ۴: مقطع عمقی پروفیل E3، بعد از اعمال فیلتر اشباع سیگنال و استفاده از بهره گسترش هندسی و نمایی. این پروفیل در امتداد لوله آزیستی برداشت شده است.

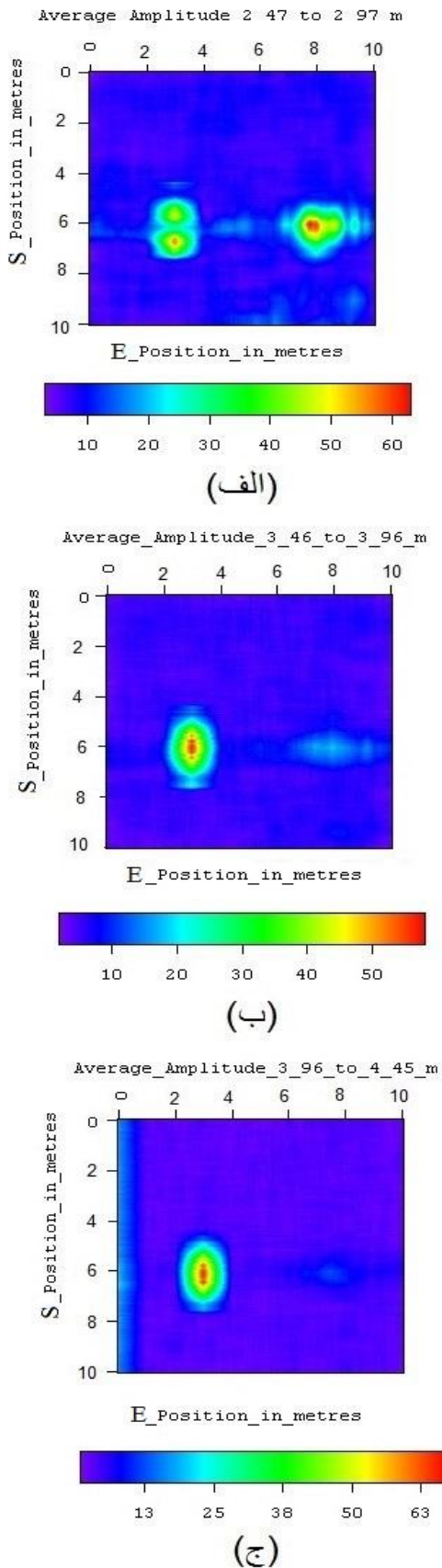
۷- پردازش و تفسیر سه‌بعدی داده‌های برداشت شده

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، یک جسم استوانه‌ای که پروفیل برداشت داده‌ها بر آن عمود باشد، به صورت یک هدف نقطه‌ای عمل کرده و در مقطع دوبعدی GPR به صورت یک هذلولی نمایش داده می‌شود. لذا در این مرحله سعی شده است با استفاده از نرم‌افزارهای داده‌های GPR، به منظور تجزیه و تحلیل مقاطع از زوایای دید مختلف و دقت در تفسیرهای ارائه شده در بخش‌های قبل، پرداخته شود.

۷-۱- نمایش میانگین دامنه سیگنال برحسب عمق

در شکل (۵ الف، ب و ج) به ترتیب میانگین دامنه سیگنال برای عمق‌های صفر تا ۰/۴۹، ۰/۴۹ تا ۰/۹۹ و ۰/۹۹ تا ۱/۴۸ متر بعد از اعمال پردازش‌های اشباع سیگنال و مهاجرت با تخصیص سرعت ۰/۱ متر بر نانوثانیه برای محیط زیر سطح زمین نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اهداف موجود در شبکه با شماره‌گذاری مشخص شده است. بی‌هنجاری شماره ۳ در فاصله ۶ متری محور S و در امتداد پروفیل E6، اثر مربوط به کانال انتقال آب است. با توجه به وجود فلزات درون سقف بتنی این کانال و نزدیکی آن به سطح زمین، این بی‌هنجاری در تمام مقاطع عمقی مشاهده می‌شود.



شکل ۶: الف، ب و ج میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای اعماق ۲/۴۷ تا ۲/۹۷ متر، ۳/۴۶ تا ۳/۹۶ متر و ۳/۹۶ تا ۴/۴۵ متر.

اثر شماره ۲ در مقطع الف شکل ۵، منطبق بر ترانسه حفاری برای عبور لوله گاز است. اثر لوله گاز با وجود فلزی بودن آن در هیچ کدام از مقاطع مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر را می‌توان به عمق دفن آن نسبت داد که امواج الکترومغناطیس به این عمق نفوذ نکرده و بنابراین لوله گاز آشکارسازی نشده است.

در شکل ۵ ب که میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۰/۴۹ تا ۰/۹۹ متر را نشان می‌دهد، بی‌هنجاری‌های بیشتری قابل تشخیص است. شماره ۳ و ۴ که به شکل بارزی در این مقطع دیده می‌شوند، به ترتیب اثر کانال و لوله‌های شوفاژ می‌باشند. اثر لوله‌های شوفاژ در فاصله ۸/۲ متری محور S و تقریباً تا ۶ متری محور E ادامه دارد. دنباله اثر لوله‌های شوفاژ که با شماره ۴ مشخص شده است، از ۶ تا ۱۰ متری محور E در این شکل مشخص شده است. جدایش لوله‌ها از هم (در نقطه‌ای که انشعاب صورت گرفته شده است) و پاسخ از شاخه‌ای از جفت لوله‌ها که در این عمق واقع شده‌اند، دلیل این پاسخ ضعیف است. اثر شاخه دوم از این لوله‌ها، به دلیل افزایش عمق دفن آن‌ها در این مقطع مشاهده نمی‌شوند؛ ولی این اثر در مقطع عمقی ج که میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۰/۹۹ تا ۱/۴۸ متر نمایش می‌دهد، با شماره ۴ از ۶ تا ۱۰ متری محور E مشخص شده است. اثر شماره ۵ که در هر دو مقطع عمقی ب و ج دیده می‌شود، اثر لوله منشعب از لوله‌های شوفاژ در این ناحیه است. این اثر در مقطع ج واضح‌تر از مقطع ب است. این امر به دلیل واقع شدن این لوله در اعماق بیشتر است. اثر شماره ۸ که در مقطع ج مشاهده می‌شود، اثر لوله آزیستی است. این اثر به دلیل میانگین دامنه نسبتاً پایین بازتاب از لوله آزیستی، به صورت اثری ضعیف تنها در قسمت انتهایی لوله آزیستی دیده می‌شود. اثر شماره ۶ که در مقطع ب به صورت بارزی قابل تشخیص است، اثر کابل‌های مدفون، در این ناحیه است. در ادامه مقاطع عمقی منطقه برداشت از عمق ۲/۴۷ تا عمق ۴/۴۵ متر در شکل ۶ به نمایش درآمده است.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، تنها اثری که در اعماق بیش از ۱/۴۸ متری قابل تشخیص است، اثر ناشی از کانال و درچه‌های فلزی مشبک آن است. این اثر به دلیل بازآوایش امواج و به خصوص رینگی شدن آن‌ها در این مقطع، مشاهده می‌شود. همچنین هیچ پاسخی از ساختارهای زیرسطحی در این اعماق دیده نمی‌شود.

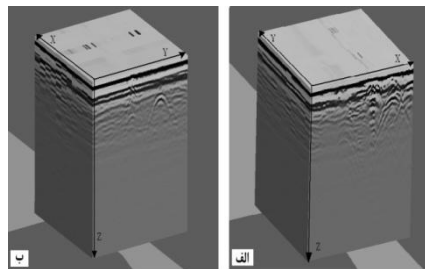
۷-۲- نمایش سه‌بعدی داده‌ها

برای نمایش مقطع سه‌بعدی داده‌ها، پروفیل‌های S و E شبکه برداشت به طور جداگانه با استفاده از نرم‌افزار EKKO_3D به نقشه درآمده است. در شکل ۷ الف و ب به ترتیب مقطع سه‌بعدی پروفیل‌های S و E شبکه و در شکل‌های ۸ و ۹، برش‌های عرضی این مقاطع، به نمایش درآمده است. برای نمایش این مقاطع از فیلتر اشباع سیگنال و کنترل بهره اتوماتیک استفاده شده است.

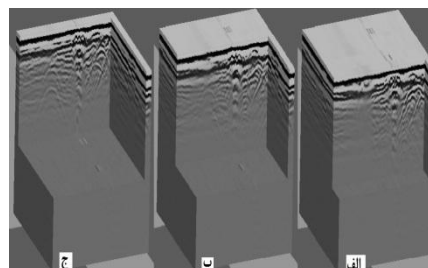
حتی کابل با قطر کم در اعماق دفن شدگی بین ۰/۶ تا ۱/۲ متر، ایجاد کرده است. تمامی پروفیل های این شبکه برداشت کمتر از ۱ ساعت و توسط یک اپراتور برداشت شده است. با فاصله ۱ متری پروفیل ها تمام تأسیسات قابل آشکار سازی بوده اند و حتی محل انشعاب لوله ها نیز مشخص شده است. با این حال با توجه به هزینه و زمان پایین در برداشت داده های GPR به منظور دستیابی به اطلاعات جزئی تر می توان برداشت داده ها را با فواصل کمتر پروفیلی و با دقت بیشتر انجام داد. همان طور که مشاهده شد با روال های پردازشی مختلف پاسخ لوله های فلزی و غیر فلزی از یکدیگر قابل تفکیک بوده اند. به این ترتیب قطر لوله آزیستی محتوی آب که در عمق تقریبی ۱ متری مدفون بوده است، با دقت حدود ۱ سانتیمتر به دست آمده است.

۹- منابع

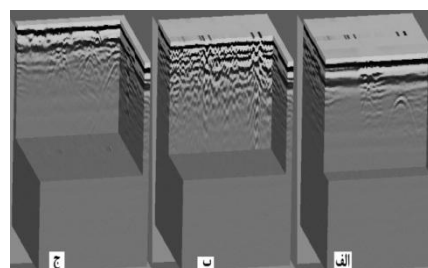
- Birken, R., Deming, R., Hansen, T., MacIntosh, S., Oristaglio, M. and Zhu, Q., 2006, Utility mapping in urban area with dual radar and induction array: 19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Daniels, D.J., 2004, Ground penetrating radar, The Institution of Electrical Engineers, 734 P.
- <http://www.usradar.com/about-gpr/understanding-ground-penetrating-radar-data>.
- Neal, A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, Earth-Science Reviews, 66, 261-330.
- Parasnis, D.S., 1997, Principles of applied geophysics, fifth edition: Chapman and Hall.
- Pettinelli, E., Matteo, A.D., Mattei, E., Crocco, L., Soldovieri, F., Redman, J.D. and Annan, A.P., 2009, GPR Response from Buried Pipes: Measurement on Field Site and Tomographic Reconstructions, Geoscience and Remote Sensing, 47 (8), 2639-2645.
- Reynolds, J.M., 1997, An Introduction to applied and environmental geophysics: John wiley and Sons Ltd.
- Sensors and software, 1999, PulseEKKO 100 run User's Guide, Version 1.2.
- Zarkhidze, A. and Iemenager, E., 2004, Case Study- Use of 3D GPR technologies for utility mapping in Paris: Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 375-378.
- Zeng, X. and McMechan, G.A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes, Geophysics, 62, 798-806.



شکل ۷: الف و ب به ترتیب مقطع عمقی 3D پروفیل های S و E با اعمال فیلتر اشباع سیگنال و استفاده از بهره اتوماتیک.



شکل ۸: الف، ب و ج به ترتیب برش های عرضی از مقطع 3D پروفیل های S شبکه پروفیل های S2، S6 و S10.



شکل ۹: الف، ب و ج به ترتیب برش های عرضی از مقطع 3D پروفیل های E شبکه پروفیل های E2، E6 و E10.

۸- نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی کارایی و عملکرد روش غیر مخرب و سریع GPR در آشکار سازی اهداف زیرسطحی در مناطق شهری بوده است. در این تحقیق نمایش واضح اهداف نزدیک به هم قدرت تفکیک بالای روش GPR در آشکار سازی ساختارهای زیرسطحی را نمایش می دهد. برداشت GPR به صورت شبکه ای، امکان ایجاد نقشه های مقاطع عمقی و سه بعدی با دقت و تفکیک پذیری بسیار بالا را فراهم می کند. این امر پردازش و تفسیر داده ها را دقیق و مطمئن تر می کند. در برداشت های شبکه ای GPR، باید دقت شود که فاصله پروفیل ها نسبت به عمق مورد بررسی طوری انتخاب شوند که با کمترین فاصله بین پروفیل های برداشتی، بهترین هم پوشانی ایجاد شده و امکان آشکار سازی تمامی بی هنجاری های زیرسطحی به وجود آید. در این پژوهش فاصله بین پروفیلی ۱ متر بهترین هم پوشانی را برای آشکار سازی بی هنجاری هایی با ابعاد لوله های ۶ و ۸ اینچی و



Importance of three-dimensional ground penetrating radar surveys in accurate display of the images of subsurface installations, Case study: Shahrood University of Technology

Masoud Hosseini¹, Abolghasem Kamkar Rouhani², Mahdi Mohammadi Vizheh³ and Saeed Parnow^{3*}

1- M.Sc. Graduated, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Ph.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 14 December 2015; Accepted: 1 March 2016

Corresponding author: saeed.parnow@ut.ac.ir

Keywords

Ground-Penetrating Radar (GPR)
Metallic And Non-Metallic Pipes
Data Processing and
Interpretation
Two-Dimensional (2-D) and
Three-Dimensional (3-D)
Modeling
Shahrood University of
Technology

Extended Abstract

Summary

Geophysical methods can effectively be used for delineation and maintenance of man-made subsurface installations. These installations are suitable targets for detection by ground penetrating radar (GPR) method. In this non-invasive method, high frequency electromagnetic (EM) waves in the frequency range 10 to 1000 MHz are used for detection, demonstration and investigation of shallow subsurface structures. The most important advantage of this method over other geophysical methods its high resolution, high speed of survey and non-destructiveness. In urban areas where the ground surface is covered by asphalt and also noise level is high, it not possible to use other geophysical methods

while obtain high resolution data without destruction of the asphalt. However, the GPR method with shielded antenna acts well in urban areas. This method can present a three-dimensional (3-D) picture from the subsurface in which an accurate estimation of the subsurface structures can be made. In this method, EM waves, generated by the GPR transmitter, are sent into the ground and the reflections from the subsurface structures are received by the GPR receiver. The GPR waves are intensively attenuated in high conductive subsurface media and hence, the depth of penetration of GPR waves in this method is limited. In this research work, the depth of penetration of the GPR waves in the study area decreases to less than 2 meters. In this research, an urban survey area where various metallic and non-metallic pipes have been buried is selected, and then, GPR survey is performed on a grid in the area. As a result of processing and interpretation of the acquired GPR data, the subsurface targets at different depths are detected with relatively good accuracy and resolution.

Introduction

Nowadays, transmission of fuels, water and other energy resources by buried pipes, tanks and cables in urban areas is a substantial necessity for human beings. This leads to creation of huge and costly underground networks. Following creation of such networks, a very important matter is the maintenance of these man-made installations to prevent them from possible destructions. These destructions to the installations are not normally observable at the ground surface as the installations are located in the subsurface areas. These destructions that can occur due to different reasons can cause considerable financial losses and also irreparable environmental contaminations. In this regard, geophysical methods can be used for delineation and maintenance of these installations. Often there is a sufficient physical contrast between these installations and their surrounding media. Thus, these installations are suitable targets for detection by GPR method. In this method, high frequency EM waves in the frequency range 10 to 1000 MHz are used for detection, demonstration and investigation of shallow subsurface structures.

Methodology and Approaches

In this research work, GPR method has been used in an urban survey area where various metallic and non-metallic pipes have been buried. The GPR survey has been performed on a grid in the area, and then, the GPR data have been acquired using 250 MHz Noggin Plus GPR system with shielded antenna. Following processing and interpretation of the GPR acquired data, two-dimensional (2-D) and 3-D maps and depth cross-sections are obtained. As a result of this GPR survey, the subsurface targets at different depths in the 3-D maps have been detected with relatively good accuracy

JRAG, 2017, VOL 2, NO 2.

and resolution. These 3-D maps can considerably help the interpreter to interpret the GPR data reliably and accurately. Moreover, significant and relatively comprehensive information from these 3-D maps is obtained. 3-D presentation of the GPR data is very useful in the 3-D visualization of the subsurface, and thus, can indicate the targets more precisely.

Results and Conclusions

In this research work, the depth of penetration of the GPR waves in the study area was less than 2 meters. 2-D and 3-D GPR maps and depth cross-sections were obtained as a result of processing and interpretation of the GPR acquired data. Moreover, the subsurface targets at different depths in the 3-D maps were well detected with relatively good accuracy and resolution. 3-D presentation of the GPR data is very useful in the 3-D visualization of the subsurface, and thus, can indicate the targets more precisely. The results of this research indicate that non-invasive, fast and cheap GPR method has considerable advantages over other geophysical methods in civil engineering applications.
