



## مدل سازی پیشرو و وارون داده های GPR با هدف کاربرد در شناسایی لوله های مدفون، مطالعه موردی: لوله انتقال فرآورده های نفتی در دانشگاه صنعتی شاهرود

افسانه احمدپور<sup>۱\*</sup>، ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۲</sup> و رضا احمدی<sup>۳</sup>

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

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

۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۳

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [afsanehahmadpour69@gmail.com](mailto:afsanehahmadpour69@gmail.com)

### چکیده

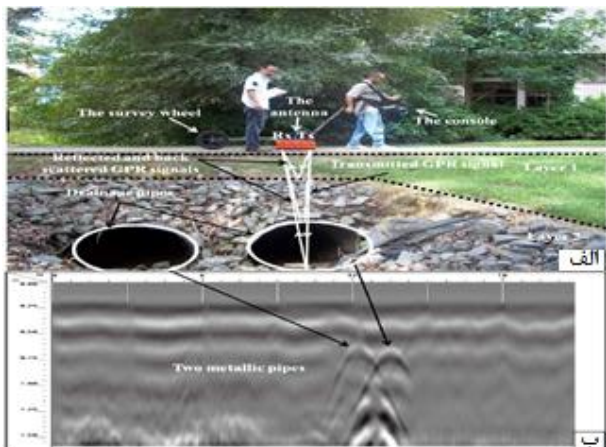
### واژگان کلیدی

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) یک روش ژئوفیزیکی غیر مخرب است که قادر به آشکارسازی انواع ناهمگنی های زیرسطحی و نیز شناسایی انواع اهداف مدفون در اعماق کم است. در پژوهش حاضر مدل سازی پیشرو و وارون داده های GPR با هدف کاربرد در زمینه شناسایی لوله های مدفون در زیرزمین انجام شده است. در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود به منظور شناسایی موقعیت عبور لوله های انتقال سیالات هیدروکربوری، تعدادی پروفیل GPR با استفاده از یک سامانه GPR مجهز به آنتن های پوشش دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، برداشت شد. برای دستیابی به هدف، نگاشت های راداری منطبق بر کلیه پروفیل های برداشت با اعمال مراحل پردازشی مختلف همانند تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک و تابع تقویت بر روی داده های خام، با استفاده از نرم افزار Reflexw آماده سازی شدند. سپس پاسخ GPR مدل مصنوعی متناظر با نگاشت های راداری منطبق بر این پروفیل ها، به روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) دوبعدی، شبیه سازی شد. آنگاه برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت های GPR واقعی به منظور آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون، از روش مدل سازی وارون با حل یک مسئله بهینه سازی، استفاده شد. نتایج این پژوهش بر اساس بررسی میزان تطابق نگاشت راداری داده های واقعی GPR با پاسخ GPR مدل مصنوعی تولید شده متناظر با آن، درستی تفسیر زیرسطحی انجام شده در منطقه مورد نظر جهت شناسایی لوله مدفون را تأیید می نماید.

رادار نفوذی به زمین (GPR)  
مدل سازی پیشرو  
مدل سازی وارون  
محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود  
نرم افزار Reflexw

## ۱- مقدمه

را به‌طور دقیق نمایان کنند (جول، ۲۰۰۹). به‌طور کلی در مطالعات ژئوفیزیکی به روش زمین رادار، باید به شیوه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، نسبت سیگنال به نویز را افزایش داد. مهم‌ترین عامل در شیوه‌های سخت‌افزاری انتخاب صحیح آنتن با توجه به شرایط سایت برداشت و عمق مورد مطالعه است.



شکل ۱: الف) برداشت داده‌های GPR با روش پروفیلی‌زنی بازتابی فاصله ثابت به‌منظور آشکارسازی لوله‌های مدفون در زیرزمین و ب) قالب مقطع بازتابی GPR با رخداد راداری به شکل شبه هذلولی (اثر لوله) (کلیب و همکاران، ۲۰۱۴).

به‌کارگیری پردازش‌های مناسب هم روش نرم‌افزاری در راستای افزایش کیفیت نگاشت‌های راداری می‌باشند. برای آزمودن توانایی روش GPR، در مطالعات این‌چنینی لازم است علاوه بر برداشت و تفسیر داده‌های واقعی، شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی بر اساس شرایط حاکم بر مدل واقعی زمینی که ویژگی‌های آن معلوم است، صورت گیرد. از آنجایی که پردازش داده‌های GPR هنوز به دوران تکاملی خود نرسیده است، رشد و تعالی این روش در گرو پیشرفت روش‌های پردازشی و مدل‌سازی پیشرو برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر است و در این صورت به‌کارگیری GPR روز به روز پررونق‌تر و اقتصادی‌تر خواهد شد. به‌طور کلی در مدل‌سازی داده‌های GPR سه روش متداول شامل دیدگاه مبتنی بر پرتو، محاسبات فرکانس-عدد موج (حیطه فوریه) و تفاضل محدود است. روش تفاضل محدود اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط تام تحت عنوان روش مربع‌ها برای حل معادلات هیدرودینامیکی غیرخطی ارائه شد. سپس این روش در حل مسائلی گوناگونی به کار رفت. روش تفاضل محدود مبتنی بر تخمین معادلات دیفرانسیلی به‌وسیله معادلات تفاضلی است. این معادلات به شکل جبری بوده که مقدار متغیر وابسته در یک نقطه را با استفاده از مقادیر نقاط مجاور، تخمین می‌زند. اولین بار بی با معرفی سلول بی توانست روش تفاضل محدود را در حل معادلات ماکسول به کار گیرد (بی، ۱۹۶۶). در این روش محیط مورد

ایجاد مسیرهای جدید برای کابل‌کشی و یا لوله‌گذاری در زیرزمین و همچنین نگه‌داری تأسیسات زیرسطحی و محافظت از آن هنگام خاک‌برداری و ساخت‌وساز، نیازمند داشتن آگاهی کامل از محل دفن دقیق تأسیسات زیرسطحی است. روش رادار نفوذی به زمین<sup>۱</sup> (GPR) روشی مطمئن برای استفاده در محیط‌های شهری، به دلیل عدم آسیب‌رسانی به تأسیسات شهری و مجموعه‌های باستانی به شمار می‌آید (گامبا و لوسانی، ۲۰۰۰). این روش به‌سرعت به‌عنوان یک روش قابل اعتماد در زمینه‌های مهندسی عمران، باستان‌شناسی و کاربردهای دیگر شناخته شد (لینفورد، ۲۰۰۶). ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر محقق آلمانی ارائه شده است (پاراسنیس، ۱۹۹۷). روش GPR کاربردهای فراوانی در علوم مختلف دارد و به‌طور گسترده در به تصویر کشیدن اهداف زیرسطحی کم‌عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهش‌ها و مطالعات گوناگونی در حوزه علوم زمین (دنیس و همکاران، ۲۰۰۹؛ کریستی و همکاران، ۲۰۰۹؛ پاسولی و همکاران، ۲۰۱۰)، زیست‌محیطی (رینولدز، ۱۹۹۷؛ نایت، ۲۰۰۱)، آب‌شناسی (رابین و هابارد، ۲۰۰۵؛ لین و همکاران، ۲۰۰۹)، مطالعه یخچال‌ها (برانن و همکاران، ۲۰۰۷؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ هاگ و همکاران، ۲۰۱۳)، باستان‌شناسی (نگری و همکاران، ۲۰۰۸؛ گراندجین و همکاران، ۲۰۰۰؛ گریشیا و همکاران، ۲۰۰۰)، شناسایی اهداف مدفون شامل لوله، قنات و فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی انجام شده است. شکل ۱ (الف) تصویری از برداشت داده‌های GPR را با متداول‌ترین شیوه برداشت آن، یعنی پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت به‌منظور آشکارسازی لوله‌های مدفون در زیرزمین، نشان می‌دهد. در حالت کلی نگاشت راداری<sup>۲</sup> یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۱ (ب) مجموعه‌ای از تریس‌های<sup>۳</sup> بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون، به‌صورت شبه هذلولی است. جهت آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، از سیگنال‌های زمینه بزرگ‌تر هستند.

داده‌های خام GPR حاوی تمام اطلاعات اولیه می‌باشند و هدف، استخراج اطلاعات مطلوب نهفته در آن‌هاست. برای بهبود کیفیت داده‌های خام و در نتیجه ساده‌تر کردن تفسیر باید گام‌های پردازشی مناسب برداشته شوند. حجم اطلاعات موجود در داده‌ها را با هیچ روش پردازش سیگنال نمی‌توان بهبود داد؛ اما ارزش یا کیفیت اطلاعات را می‌توان با پردازش مناسب تا حد زیادی بهبود بخشید. در عمل این کار به معنی افزایش نسبت سیگنال به نویز پاسخ‌های همدوس و ارائه داده‌ها به صورتی است که بتوانند شرایط زیرسطحی

<sup>1</sup> - Ground-Penetrating Radar

<sup>2</sup> - Radargram

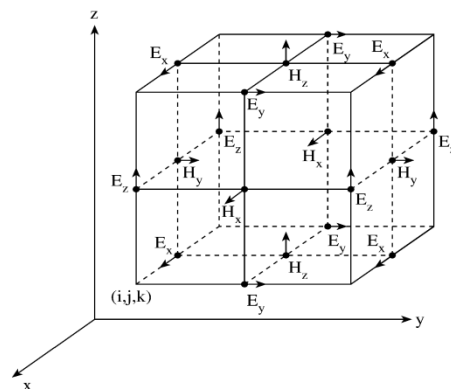
<sup>3</sup> - Trace

### نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، مقاله تحت چاپ.

میدان‌های زمینی، بکار بردند. گامبا و بلوتی (۲۰۰۳) از دو رویکرد شبکه عصبی و تطبیق الگو برای آشکارسازی سریع و تحلیل داده‌های GPR با هدف شناسایی موقعیت لوله‌های مدفون در نواحی شهری استفاده کردند. شیهاب و همکاران اولین بار در سال ۲۰۰۵ با در نظر گرفتن یک معادله جامع‌تر و با ارائه یک رابطه ریاضی، چگونگی تشکیل هذلولی ناشی از یک لوله مدفون به شعاع R در مقطع GPR را نشان دادند.

GPR نیز به‌عنوان یک روش غیر مخرب<sup>۲</sup> (NDE) مدت زمانی است که در آشکارسازی لوله‌های انتقال آب و فاضلاب و انواع لوله‌های تأسیساتی دیگر، مدنظر قرار گرفته است (انان، ۲۰۰۲؛ آرد و همکاران، ۲۰۰۴؛ جیانوپولوس، ۲۰۰۵؛ پورسانی و سوک، ۲۰۰۷؛ سنتوز و همکاران، ۲۰۱۰؛ پورسانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ آرد و ردمن، ۲۰۱۰؛ ایکس و همکاران، ۲۰۱۱). نی و همکاران (۲۰۱۰) با معرفی و استفاده از یک روش پردازش سیگنال به نام تبدیل موج گسسته (DWT) جهت فیلتر کردن و افزایش داده‌های خام GPR برای به دست آوردن تصاویری با کیفیت بالاتر، موفق به شناسایی و آشکارسازی لوله‌های مدفون در زیرزمین به روش رادار نفوذی شدند. نتایج آن‌ها بیانگر این موضوع است که به‌کارگیری این روش پردازشی در مطالعات GPR می‌تواند در تعیین مشخصاتی همچون قطر، موقعیت لوله و تفکیک افقی دو لوله از مواد مختلف با کیفیت بالاتری انجام پذیرد. وهاب و همکاران (۲۰۱۳) برای تشخیص و برآورد کابل‌ها و لوله‌های مدفون در خاک، از تفاسیر مقاطع به دست آمده از برداشت داده‌های GPR بر روی اهداف مذکور بهره جستند. در این مطالعه یک تکنیک تطبیق هذلولی جدید برای تخمین شعاع دفن اهداف (لوله‌ها و کابل‌ها) ارائه شده است. نتایج آن‌ها نشان دهنده آن است که این روش قادر به برآورد شعاع لوله‌های مدفون با نتیجه قابل قبول است. آیالا-کیررا و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل سه‌بعدی از ساختمان سیستم خطوط لوله‌های آب تأمین‌کننده بر اساس تصاویر GPR ارائه دادند. در این پژوهش یک لوله مدفون در مخزنی جهت شبیه‌سازی بخش کوچکی از یک زمین در نظر گرفته شد. از تصاویر به دست آمده از این پژوهش، یک مدل ۳ بعدی برای به دست آوردن نتایج بهتر و تجزیه و تحلیل خط لوله تهیه شد. عبدالواد و همکاران (۲۰۱۵) از روش رادار نفوذی به زمین با هدف تشخیص آلودگی آب در سیستم‌های توزیع آب زیرزمینی استفاده نمودند. آن‌ها از یک مدل آزمایشگاهی از نمونه اولیه‌ای به‌صورت لوله مدفون در خاک شنی به بررسی و مطالعه پرداختند. برای تشخیص آلودگی از یک لوله پلاستیکی که دارای تباين ضریب دی‌الکتریک بالایی بین آب خالص و آلوده شده وجود دارد، برای تشخیص حضور آلاینده در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از موفقیت آن‌ها در رسیدن به هدف مطلوب است. سگنارد و همکاران (۲۰۱۶) در سایت شهری Sense-City واقع در دانشگاه پاریس مطالعات و تحقیقاتی را در زمینه به‌کارگیری

بررسی به شبکه‌ای با فواصل معین تقسیم‌بندی می‌شود و مؤلفه‌های میدان بر اساس سلول‌های و روابط ماکسول در مرکز سلول برای یک زمان معین، محاسبه می‌شود. در نهایت مقادیر برای زمان‌های متوالی، به‌روزرسانی می‌گردد. شکل ۲ شبکه FDTD را نشان می‌دهد که از سلول‌های  $(N_z * N_y * N_x)$  تشکیل شده است. یک سلول واحد این شبکه، سلول‌های نامیده می‌شود.



شکل ۲: سلول واحد یی به همراه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (یی، ۱۹۶۶).

روش تفاضل محدود دوبعدی به دلیل سادگی درک مفاهیم این روش، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد به کار رفته، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در پژوهش حاضر قابلیت کارایی روش GPR به‌منظور شناسایی لوله‌های مدفون نشان داده شده است. به عبارت دقیق‌تر هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی پیش‌رو و وارون داده‌های GPR و بررسی امکان به‌کارگیری آن در زمینه لوله‌های مدفون است. در واقع سعی شده است برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت‌های GPR و ایجاد مدلی از زمین که پاسخی مشابه داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشد، از روش مدل‌سازی پیش‌رو و وارون استفاده شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

تحقیقات زیادی در زمینه شناسایی اهداف مدفون همانند لوله‌های تأسیساتی، انتقال آب و فاضلاب و فرآورده‌های نفتی و غیره انجام شده؛ که در این پژوهش به‌طور مختصر به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. زنگ و مک‌مکان (۱۹۹۷) تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ GPR مربوط به اجسام استوانه‌ای را به وسیله مدل‌سازی پیش‌رو بررسی کرده‌اند. ال-نوایمی و همکاران (۲۰۰۰) یک طبقه‌بندی‌کننده شبکه عصبی را برای شناخت نواحی بالقوه حاوی هدف و تبدیل هاف<sup>۱</sup> را به‌عنوان یک روش شناخت الگو، برای تعیین موقعیت پیک آنومالی‌های هذلولی مربوط به اهداف مدفون همانند لوله و

<sup>2</sup>- Non-Destructive Evaluation

<sup>1</sup>- Hough

احمدپور و همکاران، مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR با هدف کاربرد در شناسایی لوله‌های مدفون، مطالعه موردی: لوله انتقال فرآورده‌های ...، مقاله تحت چاپ.

لرزه‌نگاری بازتابی است که بر مبنای انتشار و بازتاب موج عمل می‌کند (بلیندو و همکاران، ۲۰۰۷). در حالت ساده یک دستگاه GPR از یک تولیدکننده سیگنال تشکیل شده است. سیگنال ایجاد شده توسط این تولیدکننده به‌وسیله آنتن فرستنده به درون زمین فرستاده می‌شود. امواج با سرعت زیادی در زمین منتقل می‌شوند. هنگامی که این امواج به یک شی و یا سطح بازتاب برخورد می‌کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها، قسمتی از امواج از سطح، بازتاب خواهد شد (پاراسنیس، ۱۹۹۷). آنتن گیرنده مستقر در دستگاه، این بازتاب‌ها را به‌صورت یک پیک بالا نشان می‌دهد و زمان سیر حرکت و دامنه‌های بازتاب را ضبط می‌کند. زمان رفت و برگشت موج از آنتن فرستنده و بازتاب از اهداف زیرسطحی و دریافت در گیرنده، از چند ده تا چندین هزار نانوثانیه متغیر است. دستگاه‌های GPR در واقع زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند. در نتیجه مقطع اولیه نمایش داده‌های برداشت شده یک مقطع زمانی است که در آن محور قائم، فاصله زمانی ارسال موج از فرستنده و دریافت با گیرنده را نشان می‌دهد. برای تعیین موقعیت مکانی رویدادها، باید این زمان‌ها به عمق تبدیل شوند، یعنی این مقطع به مقطعی که محور قائم آن عمق را نمایش دهد، تبدیل شود. برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد بررسی، محاسبه شود. مهم‌ترین پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیسی در یک محیط را کنترل می‌کنند عبارت‌اند از گذردهی الکتریکی، رسانندگی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی که به ترتیب به صورت  $\epsilon$ ،  $\sigma$  و  $\mu$  نشان داده می‌شوند (نیل، ۲۰۰۴). این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط کنترل می‌کنند و معمولاً به نام پارامترهای ساختاری شناخته می‌شوند. به‌طور کلی این پارامترها می‌توانند به‌صورت توابعی از مکان، جهت، شدت میدان اعمال شده و زمان باشند. برای تمام کارهای عملی GPR این مقادیر به‌صورت کمیت‌های اسکالر مستقل از میدان عمل می‌کنند. به بیان دیگر پاسخ به حضور میدان، یکسان و مستقل از شدت میدان است. اگرچه این فرضیات به‌ندرت معتبر هستند؛ ولی در کارهای عملی توصیف چنین پیچیدگی‌هایی بسیار مشکل می‌شود. پاسخ مواد به زمان اعمال میدان نیز بستگی دارد. در صورتی که نرخ تغییرات میدان کم باشد، این مقادیر زمانی، ثابت و اگر نرخ تغییرات میدان زیاد باشد، متغیر در نظر گرفته می‌شوند (جیانوپولوس، ۲۰۰۵). تغییرات تراوایی مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف است بنابراین در روش GPR در بیشتر مواقع  $\epsilon$  و  $\mu$  مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده پاسخ‌های GPR می‌باشند (مانسیلا و ترویوزو، ۱۹۹۶). برای موقعیت‌یابی یک لوله یا کابل باید در پروفیلی عمود بر راستای آن برداشت صورت گیرد. هنگامی که جهت قطبش میدان الکتریکی با محور طولی یک جسم موازی باشد، انتظار بازتاب‌ها و شکست‌هایی با دامنه‌های بزرگ وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که جهت مناسب آنتن نسبت

روش GPR به‌عنوان یک روش غیر مخرب جهت شناسایی انواع اهداف متداول در مطالعات ژئوتکنیکی انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از چند سیستم GPR روی لوله‌های مدفون در خاک متمرکز شدند. در این مطالعه ابتدا برای توصیف خواص دی‌الکتریک لایه‌های خاک به مقایسه و تفسیر یک تصویر خام پرداختند که از فرکانس‌های مختلف ۳۰۰ مگاهرتز تا ۱۰۵ گیگاهرتز توسط سیستم‌های مختلف GPR به دست آمده بود. سپس اثر هدولوی‌های ایجاد شده در مقاطع راداری را با توجه به پارامترهای مختلف از جمله فرکانس مرکزی، تباین دی‌الکتریک اشیاء (پر از هوا و یا آب) و قطبش مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مطالعات این چنینی می‌تواند کمک بسیاری در توسعه انواع مختلف الگوریتم‌های پردازش تصویر و سیگنال (موجک، تبدیل هیلبرت، فیلتر همسان، تطبیق الگو، مهاجرت و غیره) در نگاشت‌های راداری نموده و در نهایت به استخراج اطلاعات کمی منجر گردد. همچنین نتایج تجربی به دست آمده نشان‌دهنده آن است که برای به دست آوردن نگاشت‌های راداری با وضوح کافی برای توصیف اشیاء مدفون با ابعاد جانبی نسبتاً کوچک، فرکانس ۸۰۰ و ۹۰۰ مگاهرتز مناسب‌ترین فرکانس‌های برداشت هستند. یکی از عمومی‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی موجود در روش GPR که سهم قابل توجهی از تحقیقات منتشر شده را به خود اختصاص داده است، مقوله مدل‌سازی عددی است (دنیلز، ۲۰۰۴؛ جیانوپولوس، ۲۰۰۵؛ کسیدی، ۲۰۰۷). مطالعات مختلفی در زمینه مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR در دنیا صورت گرفته است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های عددی مرتبط با GPR اشاره می‌شود. مدل‌سازی عددی داده‌های GPR به‌منظور آشکارسازی و شناسایی مین‌های ضد نفر توسط هوئیس (۲۰۱۲) انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. شناسایی و تفسیر کمی حفره‌های زیرسطحی نیز با انجام مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود توسط برس و همکاران (۲۰۰۱) صورت گرفته است. لامبوت و همکاران (۲۰۰۴) مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR در حوزه فرکانس را به‌منظور شناسایی خواص گذردهی و رسانندگی الکتریکی اهداف زیر سطح زمین انجام دادند.

### ۳- مبانی نظری روش GPR

روش GPR یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد ژئوفیزیکی است که با امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی در اعماق کم را به‌منظور آشکارسازی ساختارها و مواد زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند (وندام و اشلاگر، ۲۰۰۰). روش GPR در برداشت‌ها دارای چهار مزیت اساسی است: ساده، سریع، غیر مخرب و دقیق با قدرت تفکیک زیاد (شفری و همکاران، ۲۰۰۸). این خصوصیات باعث شده است تا این روش برای بررسی‌های کم‌عمق، کاربرد روزافزونی پیدا کند. این روش مشابه با

#### نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، مقاله تحت چاپ.

راداری داده‌های GPR نیز بعد از پردازش‌های ضروری و مناسب توسط نرم‌افزار Reflexw، به نمایش درآمده است.

### ۵- منطقه برداشت داده‌ها

هدف از این برداشت آشکارسازی لوله‌ی فولادی مدفون در خاک در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از روش GPR است. محدوده برداشت داده‌ها بین زمین چمن فوتبال دانشگاه و دانشکده صنایع و مدیریت قرار دارد. هم‌چنین این منطقه به فاصله ۱۰ متر از زمین چمن فوتبال و در سمت غرب آن واقع است. لوله فولادی مدفون دارای قطر ۲۲ اینچ بوده و به‌منظور انتقال فرآورده‌های نفتی تعبیه شده است. این لوله در قسمتی از مسیر خود، از داخل دانشگاه صنعتی شاهرود عبور می‌کند. در این عملیات برداشت، داده‌های GPR به شیوه‌ای متفاوت جمع‌آوری شدند؛ به گونه‌ای که داده‌ها با یک شبکه منظم، به‌صورت ۴ پروفیل موازی به طول ۱۰ متر و به فاصله ۲ متر از یکدیگر عمود بر امتداد لوله، برداشت شدند. محل تقریبی این پروفیل‌ها و نیز امتداد تقریبی لوله در شکل ۳ به نمایش درآمده است.

در پژوهش حاضر برای اختصار فقط نتایج برداشت یکی از پروفیل‌های برداشت، آورده شده است.



شکل ۳: تصویر ماهواره‌ای منطقه برداشت به همراه پروفیل‌های برداشتی و امتداد تقریبی لوله (محمدی و یژه و همکاران، ۱۳۸۷).

### ۶- برداشت و پردازش داده‌های واقعی GPR

داده‌های GPR توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شده‌اند. این دستگاه مجهز به آنتن‌های پوششی با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز است که از دو آنتن مجزا واقع در درون یک محفظه فایبرگلاس، بهره می‌برد. فاصله این آنتن‌ها برابر با ۰/۲۷۹۴ متر، ثابت است. داده‌های خام GPR به صورت مقاطع زمانی بوده و برای تبدیل این مقاطع زمانی به مقاطع عمقی و اعمال برخی پردازش‌ها مانند مهاجرت و تصحیح توپوگرافی، لازم است که سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط مورد بررسی، تخمین زده شود. برای تخمین سرعت موج

به آنومالی مورد مطالعه می‌تواند اثرات بازتاب‌ها و شکست‌های بالای سطح زمین را به حداقل برساند (وندراک و اسلوب، ۲۰۰۴). موج الکترومغناطیسی درون زمین به‌صورت یک مخروط سه‌بُعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر می‌گذارد. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی وابسته به سه پارامتر الکترومغناطیسی مذکور در بالا به ویژه گذردگی الکتریکی محیط انتشار امواج است. انرژی بازتاب شده که به آنتن گیرنده می‌رسد، حاصل برخورد امواج الکترومغناطیسی با یک نقطه خاص نیست. این انرژی از سطح مشخصی از بازتاب کننده به گیرنده رسیده است. قدرت تفکیک افقی توسط این پارامتر (شعاع ردپای GPR که به دلیل طبیعت دوقطبی امواج GPR بیضی شکل است) کنترل می‌شود. برای فرکانس‌های بالاتر قدرت تفکیک افقی افزایش می‌یابد. بهترین قدرت تفکیک عمودی ثبت شده در موارد کم اتلاف مانند ماسه‌های خشک با استفاده از آنتن‌های فرکانس بالا بین ۲ تا ۸ سانتی‌متر است و در حالت کلی با ۰/۲۵ طول موج تخمین زده می‌شود (نیل، ۲۰۰۴). عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی نیز به مقاومت ویژه و گذردگی محیط انتشار و هم‌چنین فرکانس موج مورد استفاده وابسته است. هر چه قدر مقاومت ویژه محیط انتشار بیشتر و فرکانس موج، کمتر باشد، عمق نفوذ افزایش می‌یابد؛ اما هنگامی که فرکانس کاهش یابد، قدرت تفکیک عمومی کاهش پیدا می‌کند (رینولدز، ۱۹۹۷).

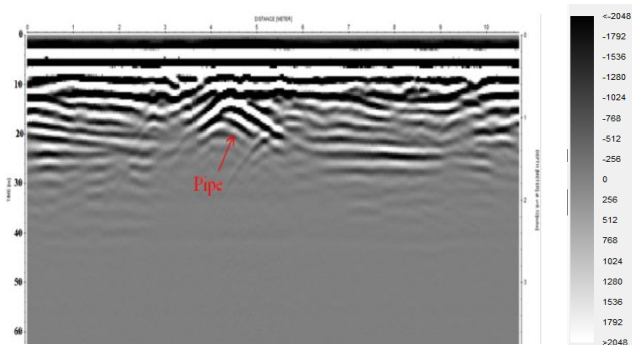
### ۴- روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر از روش‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR به‌منظور تعبیر و تفسیر برداشت‌های صحرائی با هدف تعیین لوله مدفون در خاک در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. در این پژوهش برای دست‌یابی به هدف، با استفاده از یک الگوریتم مناسب و با انجام کد نویسی در محیط GUI نرم‌افزار MATLAB، کدهای لازم برای انجام مدل‌سازی وارون تهیه شد و از آن برای مقایسه و تطابق پاسخ GPR مدل مصنوعی و واقعی استفاده شد. با توجه به این که هر روش مدل‌سازی وارون به برنامه مدل‌سازی پیشرو مناسب برای محاسبه پاسخ مدل در نقاط مورد نظر، به‌عنوان هسته اصلی نیاز دارد، قبل از انجام مدل‌سازی وارون، ابتدا تلاش شد تا بر اساس ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی هدف مورد نظر در برداشت صحرائی، مدل مصنوعی آن تهیه شده و پاسخ GPR دوبعدی آن به روش مدل‌سازی پیشرو، به دست آید. در این مطالعه از الگوریتم مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به روش تفاضل محدود دوبعدی به کمک نرم‌افزار Reflexw و نیز الگوریتم مدل‌سازی پیشرو ارائه شده توسط ایروینگ و نایت (۲۰۰۶)، بهبود یافته در حوزه فرکانس (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳) استفاده شده است. برداشت داده‌های صحرائی بر روی سطح زمین انجام شده و نگاشت‌های



## احمدپور و همکاران، مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR با هدف کاربرد در شناسایی لوله‌های مدفون، مطالعه موردی: لوله انتقال فرآورده‌های ... مقاله تحت چاپ.

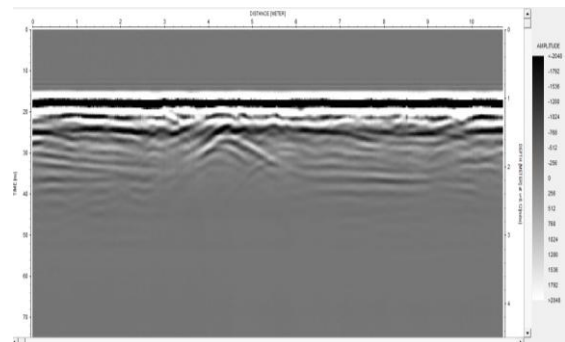
میزان مذکور در استفاده از پارامتر تصحیح ایستا، صفر زمانی نگاشت راداری، تصحیح می‌شود. بعد از این پردازش‌ها، اعمال صحیح الگوریتم بهره از اساسی‌ترین نکات پردازشی است که اعمال نادرست آن می‌تواند مفسر را از هدف دور کند. محدود کردن درست و به‌جای نمایش دامنه‌های دریافتی در مشخص کردن هدف مورد نظر می‌تواند عامل مهم و کلیدی باشد. بهره‌ها توابع متغیر با زمان هستند که روی داده‌ها اعمال می‌شوند و هدف از اعمال آن‌ها، تقویت سیگنال‌های ضعیفی است که از اعماق بیشتر می‌آیند. در این مقطع به علت معین بودن محل آنومالی، از تابع بهره دستی ( $\text{manual gain} (x)$ ) استفاده شده است، به گونه‌ای که تقویت از ۱۲ نانوثانیه شروع شده و در ۲۶ نانوثانیه به صفر می‌رسد. نتایج تابع فوق و تصحیح ایستا در شکل ۵ نشان داده شده است. به علت جنس خاک منطقه که درصد بالایی از آن را خاک رس تشکیل داده است، توان سیگنال به دلیل میرایی بالای امواج، به‌سختی به عمق بیشتر از ۲ متر می‌رسد. در مقطع نشان داده شده در شکل ۵، یک هذلولی مشخص در چهار متری از نقطه شروع پروفیل قابل مشاهده است. این بی‌هنجاری تاکدیدیسی شکل از آنجایی که شباهت زیادی به هذلولی‌های پراش دارد، ممکن است به اشتباه پاسخ ناشی از لوله فلزی در این عمق تفسیر شود. این بی‌هنجاری احتمالاً از وجود رسوبات دانه‌ریز (رس‌ها، لای و غیره) که برای حفاظت از لوله روی آن انباشته شده، ناشی شده است. احتمالاً به خاطر قطر نسبتاً قابل توجه لوله مدفون، این رسوبات شکل تاکدیدیسی به خود گرفته‌اند. یک بی‌هنجاری هذلولی شکل در زیر بی‌هنجاری تاکدیدیسی مشاهده می‌شود. این هذلولی پاسخ لوله فلزی در این عمق است و از واژه Pipe برای نمایش آن استفاده شده است. دنباله‌های این هذلولی به دلیل حضور نهشته‌های پراتلاف رسی در اطراف لوله، به‌خوبی دیده نمی‌شود. به دلیل عمق پوسته پایین امواج GPR در فلزات، امواج GPR در فواصل بسیار کوتاهی در آن‌ها اتلاف می‌شوند و توانایی عبور از چنین ساختارهایی را نخواهند داشت. از این رو در مقاطع GPR، هیچ‌گونه بازتابی پایین‌تر از سطح فلزات مشاهده نخواهد شد. در نهایت از این مقطع در مدل‌سازی وارون داده‌های GPR برای انجام تطبیق مقاطع استفاده شده است.



شکل ۵: مقطع پردازش شده پروفیل مورد نظر بعد از اعمال فیلتر

دی‌واو، تصحیح ایستا و تابع تقویت.

الکترومغناطیسی می‌توان از روش‌های مختلفی همچون برداشت‌های نقطه میانی مشترک، استفاده از اهداف در عمق مشخص و جداول مربوط به سرعت موج الکترومغناطیسی با معلوم بودن جنس لایه‌ها و محیط مورد بررسی استفاده نمود. در این مورد برای تبدیل زمان رسید به عمق، مقدار متوسط سرعت سیر امواج با استفاده از هذلولی‌های پراش،  $0.12$  متر بر نانوثانیه محاسبه شد. شکل ۴ مقطع داده‌های خام برداشت شده را بدون اعمال هیچ‌گونه عملیات پردازشی نشان می‌دهد. به دلیل نامشخص بودن محدوده فرکانسی سیگنال و نوفه و عدم آگاهی از نحوه رفتار امواج در محیط، با استفاده از روش آزمون و خطا سعی شد تا با اعمال فیلترهای مختلف و بررسی اثر آن‌ها بر روی مقاطع، توالی پردازشی مناسبی برای داده‌ها انتخاب شود.



شکل ۴: مقطع داده‌های خام برداشت شده در محوطه دانشگاه

صنعتی شاهرود.

با توجه به نزدیکی فرستنده و گیرنده در سامانه‌های برداشت GPR و خصوصیات الکتریکی زمین، سیگنال‌های فرستاده شده به زمین جریان‌های فرکانس پایینی را در زیر سطح القاء می‌کنند که بازتاب‌های فرکانس بالا را می‌پوشانند (Sensors and software, 1999)؛ بنابراین در مقاطع GPR به دست آمده، ابتدا از فیلتر تصحیح اشباع سیگنال<sup>۱</sup> برای حذف این جریان‌ها استفاده شده است. این فیلتر یکی از فیلترهای بالا گذر است که با استفاده از روش میانگین‌گیر پی‌درپی، فرکانس‌های بسیار پایین را حذف می‌کند. هم‌چنین هنگام تفسیر داده‌های GPR، معمولاً سطح زمین به‌عنوان مبنا (نقطه صفر) در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای همین سطح، عمق یا ضخامت اشیاء و لایه‌ها با نسبت دادن سرعت مناسب به لایه‌ها مشخص می‌شود. به همین دلیل، به‌منظور قرارگیری نقطه شروع تریس‌ها در سطح زمین و قرارگیری بازتاب‌ها در مکان واقعی، از فیلتر تصحیح ایستا<sup>۲</sup> استفاده شده است.

با توجه به شکل ۴ و فاصله‌ی زمانی ایجاد شده تا پدیدار شدن دامنه‌ی سیگنال‌ها که در حدود ۱۴ نانوثانیه است، با شیفت زمانی به

۱- Dewow

۲- Static Correction

## نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، مقاله تحت چاپ.

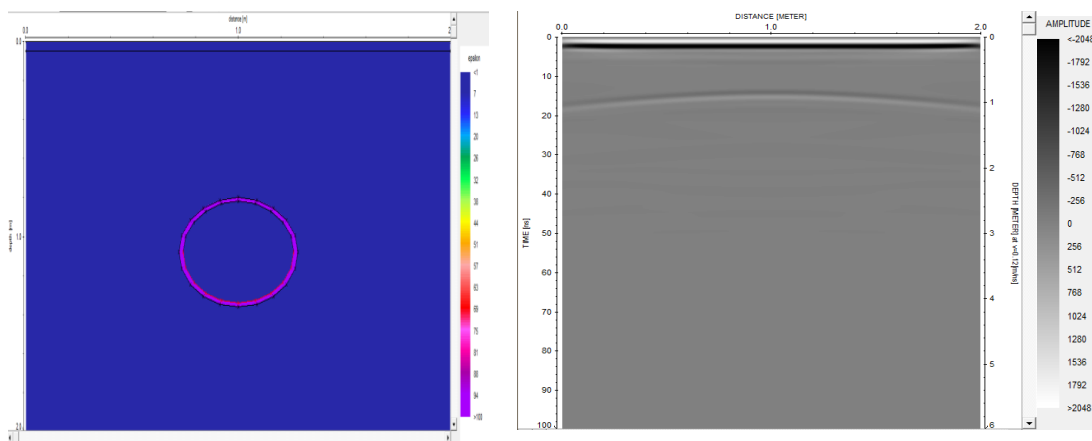
۵۲ سانتی‌متر و ضخامت دیواره ۲ سانتی‌متر در عمق ۸۰ سانتی‌متری (فاصله تا سقف هدف) قرار دارد؛ بنابراین برای مدل‌سازی داده‌های GPR برداشت شده در این منطقه، تنها بخشی از پروفیل که آنومالی در آن قرار گرفته، مدل‌سازی شده است. در این شکل فقط بخشی از پروفیل که پاسخ هدف (پاسخ لوله فلزی) در آن قرار دارد، مد نظر قرار گرفته است. پیمایش پروفیل در راستای عمود بر امتداد ناهمگنی‌های زیرسطحی، صورت گرفته است. رخداد افقی در قسمت بالای شکل ۶ (الف)، پاسخ امواج مستقیم زمین است.

## ۷- مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR

به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های GPR برداشت شده در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود، در شکل ۶ پاسخ GPR مدل مصنوعی متناظر با یکی از پروفیل‌های برداشت شده در این منطقه، نشان داده شده است. این پاسخ برای مدلی شامل لوله فولادی حاوی فرآورده نفتی در محیط میزبان از جنس خاک رسی سیلتی با استفاده از نرم‌افزار Reflexw شبیه‌سازی شده است. مدل فیزیکی و هندسی مدل مذکور در شکل ۶ (ب) و ویژگی‌های فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. ابعاد مدل ۲×۲ متر بوده و لوله فلزی با قطر داخلی

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی مدل شامل لوله فولادی حاوی فرآورده‌های نفتی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی.

جنس	گذردهی دی‌الکتریک	رسانندگی (S/m)	تراوایی مغناطیسی
لوله فلزی از جنس فولاد	۱۰۰	۱۰ <sup>۴</sup>	۶/۰
فرآورده نفتی (Gasoline)	۱/۹۴	۷ <sup>-۱۰</sup>	۱/۰
خاک رس سیلتی	۶/۰	۰/۰۰۷	۱/۰

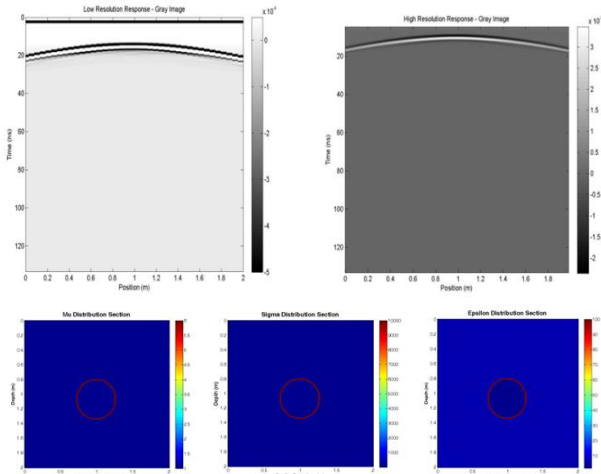


شکل ۶: پاسخ سیستم GPR در قسمت راست شکل و مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی در سمت چپ.

منظور افزایش صحت نتایج و جلوگیری از دگرنامی (آلیازینگ)<sup>۱</sup> مکانی یا پراکندگی عددی، فواصل مکانی چشمه‌ها در طول پروفیل برداشت در مدل‌سازی، برای ناهمگنی‌های زیرسطحی، بیشینه یک پنجم کوچک‌ترین بعد هدف در راستای پروفیل برداشت، انتخاب شده است (قابل ذکر است که فاصله فرستنده و گیرنده در راستای پیمایش پروفیل، عملاً صفر است؛ در حقیقت تعداد چشمه‌ها با تعداد تریس‌های برداشت برابر خواهد بود)؛ به عبارت دیگر تعداد چشمه‌ها در راستای پیمایش پروفیل به‌گونه‌ای تنظیم شده است که دست‌کم تعداد ۵ عدد چشمه، بعد هدف زیرسطحی در راستای پیمایش پروفیل را پوشش دهند. در عین حال جهت کاهش زمان محاسبات باید این پارامتر نیز بهینه انتخاب شود. بدیهی است که با این انتخاب،

برای دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر و امکان انجام مقایسه بین پاسخ‌ها، از برنامه مدل‌سازی پیشرو تفاضل محدود دو بعدی ارائه شده توسط ابروینگ و نایت و بهبود یافته در حوزه فرکانس (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳) در محیط نرم‌افزار MATLAB نیز استفاده شد. در این الگوریتم بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو روی سطح زمین قرار دارند)، با استفاده از معادلات روش میدان مغناطیسی عرضی یا مد TM شبیه‌سازی می‌شود. مهم‌ترین اشکال کدها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی موجود، دشوار و زمان‌بر بودن ایجاد مدل‌ها و طولانی بودن زمان انجام محاسبات است به‌گونه‌ای که فرآیند محاسباتی مدل‌سازی پیشرو به‌ویژه در محیط‌های با گذردهی دی‌الکتریک بالا حتی بر روی یک کامپیوتر مدرن نیز ساعت‌ها به طول می‌انجامد. در کد نویسی انجام شده به

<sup>۱</sup> - Aliasing



شکل ۷: مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای شکل (تفکیک پذیری بالا در سمت راست و تفکیک پذیری پایین در سمت چپ).

## ۸- مدل سازی وارون

مدل سازی وارون داده ها در امور اکتشافی و مسائل ژئوفیزیکی جایگاه ویژه ای دارد. در ارتباط با داده های GPR چون همواره تعداد داده ها از تعداد پارامترهای مدل، بیشتر است، به عبارت دیگر چون در این مورد، همواره حالت بیش تعیین شده وجود داشته و تعداد زیادی مدل، با داده ها منطبق می شوند، بنابراین اصل هم ارزی پیش می آید، یعنی پاسخ های مشابه ایجاد می شود. در نتیجه پاسخ مسائل وارون سازی، یکتا نیست؛ اما در پژوهش حاضر بر اساس نتایج مدل سازی پیشرو در این خصوص نیز تلاشی صورت گرفته است. به طور کلی وارون سازی داده های الکتریکی و الکترومغناطیسی یک مسئله غیرخطی است. از آنجایی که در اغلب موارد داده های برداشت شده آلوده به انواع نوفه ها بوده، ناهماهنگ و حتی گاهی متناقض هستند، هدف از وارون سازی، مشخص کردن مدلی از زمین است که مشاهدات ما را به بهترین وجه ممکن، تشریح نماید و محدودیت های وارد شده از طرف فیزیک مسئله را پاسخ گو باشد. روش قدرتمند کمترین مربعات برای حل مسائل غیرخطی به صورت متداول مورد استفاده قرار می گیرد؛ اما در بیشتر این تکرارها، برای همگرایی قابل قبول مدل، نیاز به یک حدس اولیه مناسب است. البته هیچ تضمینی هم وجود ندارد که همه قسمت های طراحی شده به سمت مدل واقعی همگرا شوند. در این پژوهش، هدف تعیین مدلی از زمین است که پاسخی مشابه داده های اندازه گیری شده داشته باشد. این مسئله را می توان با حل یک مسئله بهینه سازی، فرمول بندی نمود که در آن محاسبه خطای مدل های مختلف نیز مفید است. در تمامی روش های بهینه سازی، مدل اولیه در فرایندی تکرار شونده طوری بهبود می یابد که اختلاف بین داده های برداشت شده و پاسخ های مدل، کاسته شود. در روش بهینه سازی کمترین مربعات خطا، مدل اولیه طوری بهینه می شود که مجموع مربعات خطا که تفاضل بین مقادیر پاسخ های

پاسخ GPR حاصل از مدل سازی به صورت ناپیوسته و پله پله به نظر می رسد که چندان مطلوب نیست (پاسخ با تفکیک پذیری پایین). برای رفع این مشکل باید فاصله مکانی بین تریس های مجاور، با یک روش مناسب، درون یابی گردد. همان طور که قبلاً ذکر شد پاسخ GPR اغلب اهداف مدفون به صورت هذلولی است. به عبارت دیگر سیگنال تریس های پاسخ GPR در محدوده ناهمگنی های زیرسطحی یک جابه جایی زمانی دارند (مشابه آنچه در روش های لرزه ای به نام برونراند نرمال (NMO) نامیده می شود). این ویژگی امکان به کارگیری تبدیل فوریه تریس ها و اعمال جابه جایی زمانی در حوزه فرکانسی را فراهم می آورد. با نگرش به این موضوع به منظور بالا بردن سرعت اجرای برنامه در محیط MATLAB و در عین حال افزایش تفکیک پذیری مکانی پاسخ (قدرت تفکیک جانبی داده ها در امتداد پیمایش پروفیل)، از تبدیل فوریه سریع هر دو تریس متوالی که دارای یک جابه جایی زمانی معین است، استفاده شده است (رابطه ۱).

$$f(t - t_0) \xrightarrow{F} e^{i\omega t} F(\omega) \quad (1)$$

که در آن  $t$  و  $t_0$  زمان،  $\omega$ ، فرکانس زاویه ای و  $F$  علامت تبدیل فوریه است. این محاسبات در مدت کوتاهی انجام شده و نتیجه آن حذف حالت پله پله بودن پاسخ در مکان های مجزا و بهبود کیفی و بصری پیوستگی تریس ها در پاسخ نهایی مقطع GPR است (پاسخ با تفکیک پذیری بالا)؛ بنابراین همواره خروجی برنامه مدل سازی پیشرو شامل دو پاسخ است: یکی پاسخ با تفکیک پذیری پایین و دیگری پاسخ با تفکیک پذیری بالا. قابل ذکر است که در این کد، به منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و تمرکز بیشتر بر روی پاسخ مدل، رخداد مربوط به موج مستقیم (هوا و زمین) از پاسخ، حذف گردیده است. در شکل ۷ دو پاسخ با تفکیک پذیری بالا و پایین مدل سازی شده GPR برای مدل شامل لوله فولادی حاوی فرآورده هیدروکربنی به قطر داخلی ۵۴ سانتی متر، مدفون در عمق ۰/۸ متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی نشان داده شده است. ابعاد مدل نیز ۲×۲ متر است. در قسمت پایین این شکل، مقطع توزیع گذردهی دی الکتریک، رسانندگی و تراوایی مغناطیسی مدل مشاهده می شود. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می شود، پاسخ GPR سقف هدف، به صورت هذلولی هایی با دامنه بازتاب بالا به وضوح نمایان است. در حالی که هیچ بازتابی از کف لوله فلزی مشاهده نمی شود و دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن است. قابل ذکر است که مدل سازی لوله فلزی حاوی هیدروکربن بسیار زمان بر است زیرا لوله فلزی دارای مقادیر بالای گذردهی دی الکتریک (بیش از ۱۰۰)، تراوایی مغناطیسی بالا (بیش از ۶) و رسانندگی الکتریکی زیاد (بیش از ۱۰۰۰۰ S/m) است.



### نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، مقاله تحت چاپ.

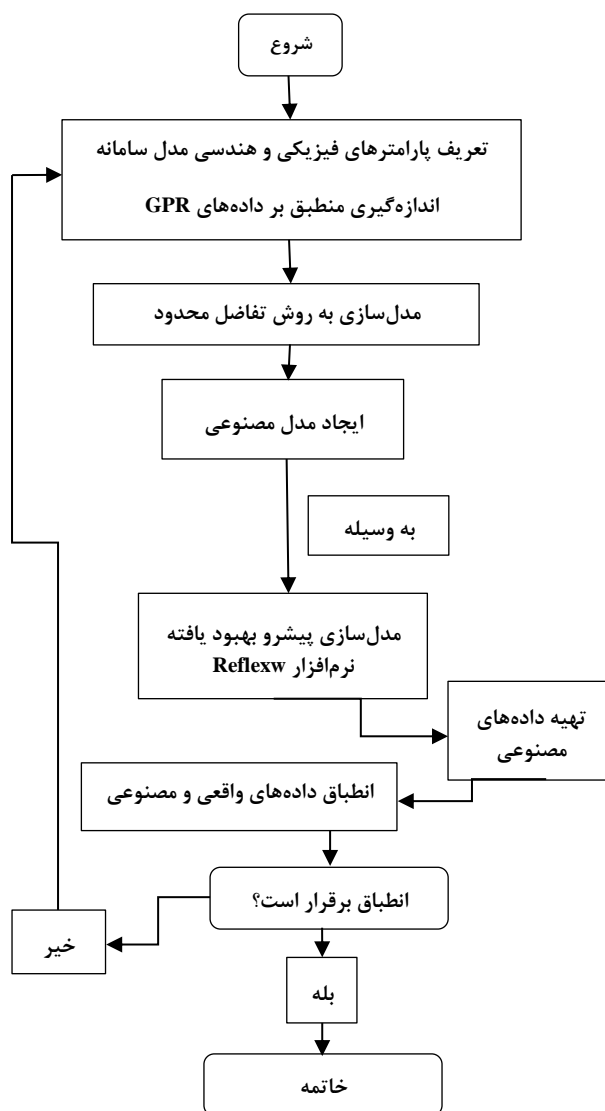
مطابق نمودار جریان شکل ۸ برای انطباق بیشتر پاسخ مدل با مقادیر میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده، پارامترهای مدل با فرایند مدل‌سازی وارون به گونه‌ای تغییر داده شد تا خطای مدل‌سازی در هر مرحله کاهش یابد. با تکرار چنین فرایندی، محاسبات آن‌قدر تکرار شد تا خطای حاصل از مدل‌سازی به مقدار مورد نظر کاهش یافت.

نتیجه حاصل از مدل‌سازی وارون برای داده‌های صحرایی برداشت شده در منطقه مورد نظر همراه با میزان خطای به دست آمده برای مدل مذکور، در شکل ۹ نشان داده شده است. در این پژوهش آخرین مقطعی که خطای کم‌تری داشته، به‌عنوان نتیجه نهایی، آورده شده است.

مدل و داده‌های برداشت شده است، کمینه شود. بدین ترتیب پارامترهایی از مدل باید تغییر کنند تا مجموع مربعات خطا کاهش پیدا کند؛ به عبارت دیگر در این روش در هر بار تکرار، یک مقدار خطا به دست می‌آید که تابعی از پارامترهای مدل است. به دلایل گفته شده در این پژوهش نیز از رابطه به‌هنگار (نرمالیزه) شده مطابق رابطه ۲ برای محاسبه خطا به روش کم‌ترین مربعات خطا، استفاده شد:

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{\sum (Ez_{\text{real}} - Ez_{\text{model}})^2}{Ez_{\text{real}}}} \times 100 \quad (2)$$

نمودار جریان عملیات پیشنهادی استفاده شده در این تحقیق برای انجام وارون‌سازی داده‌های GPR در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: نمودار جریان الگوریتم مدل‌سازی وارون داده‌های GPR.

مختلف، محیط میزبان و هدف کاملاً یکنواخت، همگن و همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. همچنین انواع نوفه‌ها در مدل واقعی زمین وجود دارد که اعمال آن‌ها در مدل‌سازی مصنوعی امکان‌پذیر نیست.

### ۱۰- سپاس‌گزاری

نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از آقای مهدی محمدی ویژه به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های برداشت شده در منطقه و نیز کمک‌های ارزشمند ایشان تشکر ویژه‌ای نمایند. همچنین از زحمات جناب آقای علی شهنا که در کد نویسی برنامه مدل‌سازی وارون داده‌های این مقاله همکاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

### ۱۱- مراجع

احمدی، ر.، فتحیان‌پور، ن. و نوروزی، غ. ح.، ۱۳۹۳، بهبود مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به روش عددی تفاضل متناهی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۸ (۳)، ۱۱۳-۱۲۹.

محمدی ویژه، م.، ۱۳۸۷، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های GPR در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با روش ژئوالکتریک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Abdelgwad, A.H., Said, T.M. and Gody, A.M., 2015, Developing of A Ground Penetrating Radar Antenna for Detecting Water Pollution in Underground Pipelines, International Journal of Microwaves Applications, 4 (1), 1-5.

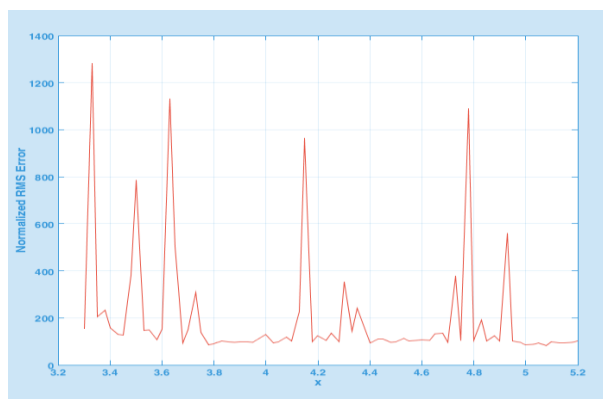
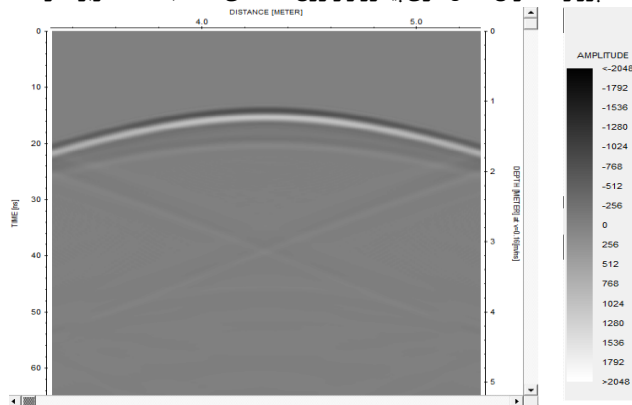
Allred, B.J. and Redman, J.D., 2010, Location of agricultural drainage pipes and assessment of agricultural drainage pipe conditions using Ground Penetrating Radar, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 15 (3), 119-134.

Allred, B.J., Fausey, N.R., Peters, L.J.R., Chen, C., Daniels, J.J. and Youn, H., 2004, Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods, Applied Engineering in Agriculture, 20 (3), 307-318.

Al-Nuaimy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, M., Nguyen, V. and Eriksen, A., 2000, Automatic detection of buried utilities and solid objects using neural networks and pattern, J. of Applied Geophysics, 43, 157-165.

Annan, A.P., 2002. The history of ground penetrating radar, Subsurface Sensing Technologies and Applications, 3 (4), 303-320.

Ayala-Cabrera, D., Izquierdo, J., Ocana-Levario, S.J. and Perez-Garcia, R., 2014, 3D Model Construction of Water Supply System Pipes Based on GPR Images, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 7<sup>th</sup> Intl.



شکل ۹: مدل زمین با بیش‌ترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرائی در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود.

### ۹- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش GPR با هدف کاربرد در زمینه شناسایی لوله‌های مدفون در زیرزمین در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. برای این منظور مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR برای نگاشت‌های راداری منطبق بر پروفیل‌های برداشت شده در این منطقه، صورت گرفت. نتایج پژوهش حاضر در مورد یکی از پروفیل‌های ارائه شده در مقاله، بر اساس خروجی مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR و میزان تطابق پاسخ مدل‌سازی پیشرو با نگاشت راداری داده‌های واقعی منطبق بر پروفیل برداشت شده در منطقه، حاکی از تفسیر درست زیرسطحی آن منطقه است. به هر جهت در یک نگاه کلی خطاهای به دست آمده از مدل‌سازی وارون داده‌های واقعی GPR دور از انتظار و غیر قابل قبول به نظر می‌رسد که البته بالا بودن میزان این خطاها به دلیل تأثیر عوامل مختلف و وجود محدودیت‌های گوناگون در مدل‌سازی به‌ویژه مدل‌سازی وارون داده‌های GPR است و از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی پیشرو اشاره داشت به گونه‌ای که امکان انجام مدل‌سازی دقیقاً مطابق با مدل‌های واقعی به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی طبیعت زمین از سطح زمین تا عمق مشخص، امکان‌پذیر نیست و تنها تولید پاسخ مدل‌های ساده امکان‌پذیر است. در شبیه‌سازی پاسخ اهداف

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، مقاله تحت چاپ.

- Gracia, V.P., Canas, J.A., Pujades, L.G., Clapes, J., Caselles, O., Garcia, F. and Osorio, R., 2000, GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain), *Journal of Applied Geophysics*, 43, 167-174.
- Grandjean, G., Gourry, J.C. and Bitri, A., 2000, Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications study on a test site, *Journal of Applied Geophysics*, 45, 141-156.
- Hagg, W., Mayer, C., Lambrecht, A., Kriegel, D. and Azizov, E., 2013, Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan, *Global and Planetary Change*, 110 (A), 40-50.
- Huici, M.A.G., 2012, Accurate Ground Penetrating Radar Numerical Modeling for Automatic Detection and Recognition of Antipersonnel Landmines, PhD. Thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Irving, J. and Knight, R., 2006, Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB, *J. of Computers & Geosciences.*, 32, 1247-1258.
- Jol, H.M., 2009, *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Oxford: Elsevier Science, 508 P.
- Knight, R., 2001, Ground penetrating radar for environmental applications, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 29, 229-255.
- Lambot, S., Van Den Bosch, I. and Slob, E.C., 2004, Frequency domain GPR signal forward and inverse modelling for identifying the subsurface dielectric properties, *J. of. EARSel eProceedings*, 3, 398-404.
- Lin, M.C., Kang, Y.M., Lee, K.F. and Hsu, H.C., 2009, A Study on the Technologies for Detecting Underground Water Level and Processing Image, *International Journal of Applied Science and Engineering*, 7 (1): 61-68.
- Linford, N., 2006, The application of geophysical methods to archaeological prospection, *Reports on Progress in Physics*, 69, 2205-2257.
- Mancilla, O.L. and Trevifio, E.G., 1996, Synthetic radargrams from electrical conductivity and magnetic permeability variations, *J. of Applied Geophysics*, 34, 283-290
- Neal, A., 2004, Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-science reviews*, 66, 261-330.
- Negri, S., Leucci, G. and Mazzone, F., 2008, High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface, *Journal of Applied Geophysics*, 65, 111-120.
- Ni, S.H., Huang, Y.H., Lo, K.F. and Lin, D.C., 2010, Buried pipe detection by ground penetrating radar Congress on Env. Modelling and Software, San Diego, CA, USA.
- Beres, M., Luetscher, M. and Olivier, R., 2001, Integration of ground penetrating radar and micro gravimetric methods to map shallow caves, *J. of Applied Geophysics*, 46, 249-262.
- Blindow, N., Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H. and Richter, T., 2007, Ground penetrating radar, In *Environmental Geology* (Eds K.Knödel, G.Lange and H.-J.Voigt), Springer, pp. 283-335.
- Brandt, O., Langley, K., Kohler, J. and Hamran, S.E., 2007, Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: A case examination on Svalbard, *Remote Sensing of Environment*, 111: 212-227.
- Cassidy, N.J., 2007, Evaluating LNAPL contamination using GPR and dielectric analysis: Practical implications for signal attenuation and attribute analysis studies, *J. of Contaminant Hydrology*, 94 (1-2), 49-75.
- Chlaib, H.K., Mahdi, H., Al-Shukri, H., Su, M.M., Catakli, A. and Abd, N., 2014, Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows, *Applied Geophysics*, 103, 121-131.
- Christie, M., Tsoflias, G.P., Stockli, D.F. and Black, R., 2009, Assessing fault displacement and off-fault deformation in an extensional tectonic setting using 3-D ground-penetrating radar imaging, *Journal of Applied Geophysics*, 68, 9-16.
- Daniels, D.J., 2004, *Ground penetrating radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 726 P.
- Denis, A., Huneau, F., Hoerlé, S. and Salomon, A., 2009, GPR data processing for fractures and flakes detection in sandstone, *Journal of Applied Geophysics*, 68, 282-288.
- Ékes, C., Neduczka, B. and Henrich, G.R., 2011, Completing condition assessments using in-pipe GPR as pipe penetrating radar. *Pipelines 2011: A Sound Conduit for Sharing Solutions*, Seattle, Washington, United States.
- Gamba, P. and Belotti, V., 2003, Two fast buried pipe detection schemes in ground penetrating radar images, *Int. J. Remote Sens.*, 24 (12), 2467-2484
- Gamba, P. and Lossani, S., 2000, Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar images, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 38, 790-797.
- Giannopoulos, A., 2005, Modeling ground penetrating radar by GPR Max, *Construction and Building Materials*, 19, 775-762.

- احمدپور و همکاران، مدل سازی پیشرو و وارون داده های GPR با هدف کاربرد در شناسایی لوله های مدفون، مطالعه موردی: لوله انتقال فرآورده های ...، مقاله تحت چاپ.
- Shafri, H. Z.M., Abdollah, R.S.A., Roslee, M. and Numiandy, R., 2008, Optimization for ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pavement density data analysis. IGARSS, USA.
- Shihab, S. and Al-Nuaimy, W., 2005, Data fusion for accurate detection of pipe geometry using GPR, Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 3<sup>rd</sup>, pp. 99-102.
- Singh, S.K., Rathore, B.P., Bahuguna, I.M. and Ramnathan, A.L., 2012, Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan Region, Current Science, 103 (1), 68-73.
- Van Dam, R.L. and Schlager, W., 2000, Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses, Sedimentology, 47, 435-449.
- Van der Kruk, J. and Slob, E.C., 2004, Reduction of reflections from above surface objects in GPR data, Journal of Applied Geophysics, 55, 271-278.
- Wahab, W.A., Jaafar, J., Yassin, I.M. and Ibrahim, M.R., 2013, Interpretation of Ground Penetrating Radar (GPR) image for detecting and estimating buried pipes and cables, IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, pp. 361-364
- Yee, K.S., 1966, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE T Antenn Propag, 14, 49-58.
- Zeng, X. and McMechan, G.A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes, J. of Geophysics, 62 (3), 797-806.
- using the discrete wavelet transform, Computers and Geotechnics, 37 (4), 440-448
- Parasnis, D.S., 1997, Principles of applied geophysics, 5<sup>th</sup> edition, Chapman and Hall.
- Pauselli, C., Federico, C., Frigeri, A., Orosei, R., Barchi, M.R. and Basile, G., 2010, Ground penetrating radar investigations to study active faults in the Norcia Basin (Central Italy), Journal of Applied Geophysics, 72, 39-45.
- Porsani, J.L. and Sauck, W.A., 2007, Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks: artifact removal through effective data processing, Geophysics, 72, 77-83.
- Porsani, J.L., Slob, E., Lima, R.S. and Leite, D.N., 2010, Comparing detection and location performance of perpendicular and parallel broadside GPR antenna orientations, Journal of Applied Geophysics, 70, 1-8.
- Reynolds, J.M., 1997, An introduction to applied environmental geophysics, John Wiley & Sons Ltd.
- Rubin, Y. and Hubbard, S.S., 2005, Hydrogeophysics, Springer. pp. 185-213.
- Sagnard, F., Norgeot, C., Derobert, X., Baltazart, V., Merliot, E., Derkx, F. and Lebental, B., 2016, Parametric pipe detection on the urban site Sense-City using GPR, Geophysical Research Abstracts, EGU General Assembly 2016, 18, pp. 8173.
- Santos, R.N. D.V., Porsani, L.J. and Hirata, S.T.N., 2010, Automatic classification of metallic targets using pattern recognition of GPR reflection: a study in the IAG-USP Test Site, Sao Paulo (Brazil), Ground Penetrating Radar (GPR), 13<sup>th</sup> International Conference on, IEEE.
- Sensors and software, 1999, Win\_EKKO User's Guide, Version 1.0.



Shahrood University of Technology



## Forward and inverse modeling of GPR data applied to detect buried pipes, a Case study: Petroleum products pipelines at the Shahrood University

Afsaneh Ahmadpouri<sup>1\*</sup>, Abolghasem Kamkar-Rouhani<sup>2</sup> and Reza Ahmadi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, 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. Assistant Professor, School of Mining, Arak University of Technology, Arak, Iran

Received: 16 October 2016; Accepted: 13 December 2016

Corresponding author: afsanehadpour69@gmail.com

### Keywords

Ground Penetrating Radar (GPR)  
Forward Modeling  
Inverse Modeling  
Shahrood University of Technology  
Campus  
ReflexW Software

### 'Extended Abstract

#### Summary

Ground penetrating radar (GPR) method is a non-destructive geophysical method that is used to detect subsurface heterogeneities, and also, to recognize various shallow targets. In the present research, forward and inverse modeling of GPR data was carried out to detect subsurface buried pipes. In Shahrood University of Technology campus, GPR data along several survey lines were acquired using 250 MHz shielded antenna to detect hydrocarbon transfer pipes. To achieve the goal, the real radargram along the survey lines in the area was obtained after applying different processing operations including signal saturation correction, static correction and amplitude gain on the GPR data using ReflexW software. Then, the synthetic radargram corresponding to the real radargrams was simulated using finite-difference time domain (FDTD) method. In this study, acquisition of field GPR data and synthetic models were carried out in TM mode. Afterward, the inversion method with solution of an optimization problem was employed for validation of the interpretation of GPR radargram in order to detect buried targets. The results of this study on the basis of conformity of real GPR data with GPR response of their respective synthetic models validated the accuracy of GPR investigations in detection of buried pipes in the area.

### Introduction

Significant advantages of GPR method to identify buried targets at shallow subsurface with respect to the other geophysical methods, has been led to acceptability and development of this method for various applications. In this method, simulation for accurate interpretation is usually necessary as in the other geophysical methods. In the present research, forward modeling of GPR data for synthetic models corresponding to subsurface targets has, first, been carried out. To simulate the governed behavior on the propagation of electromagnetic (EM) waves in GPR method, two-dimensional finite difference method among various numerical methods has been used. In this paper, the design and implementation of appropriate algorithm, inverse modeling of GPR data and validation of the forward modeling GPR system have been made.

### Methodology and Approaches

In this research, based on the nature and physical and geometric properties of the subsurface target in the field data, their synthetic model have been built, and their two-dimensional forward modeling of GPR responses using ReflexW software and improved finite difference frequency domain algorithms, have been obtained. Moreover, we have used an effective algorithm, in which coding has been made in GUI environment of MATLAB programming software, and as a result, reliable and accurate inverse modeling has been made. In the present study, to simulate the behavior of the propagation of EM waves in GPR method, two-dimensional finite difference method has been used. The main advantage of this method is its comparative simplicity of the concept, high accuracy and simple implementation for complex and arbitrary models as well as easily adjusting the antenna when applied. In this study, acquisition of GPR field data and synthetic data modeling have been made in TM mode. The radargrams of the GPR data have been demonstrated using ReflexW software after performing necessary processing sequence.

### Results and Conclusions

The results of this research for the presented GPR sections on the basis of forward and inverse modeling outputs of GPR data in comparison with real GPR radargrams validated the accuracy of GPR investigations in the area. Although



### **ARTICLE IN PRESS**

with a quick glance, the error obtained by the inverse modeling of real GPR data seems unexpected and unacceptable. The high rate of error depends on many factors influencing the real earth models containing various limitations existent in all forward modeling algorithms and software packages, impossibility of making forward modeling exactly according to the real models (due to the complexity nature of the ground), taking into account the homogeneity and uniform host environment and targets in the modeling process unlike the diversity and complexity of the real buried targets, the presence of different types of noises and other factors. Therefore, making a controlled geophysical test site and trying performance of inverse modeling algorithm for field GPR data in this site, as well as determining the important physical parameters such as dielectric permittivity and electrical conductivity by experimental method through sampling from different depths for complex geological environments are suggested by the authors.

---