

آشکار سازی اهداف استوانه‌ای با استفاده از روش GPR بر اساس مدل سازی عددی پیشرو، مطالعه موردی: کشف قنات مدفون

افسانه احمدپور^۱، رضا احمدی^۲، ابوالقاسم کامکار روحانی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی اراک ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود
(دریافت: ۹۶/۰۴/۱۳؛ پذیرش: ۹۶/۰۸/۱۴)

چکیده

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) قابلیت ارائه تصاویر با تفکیک پذیری زیاد از زیر زمین را دارا است اما تفسیر درست پاسخ اهداف مدفون در زیر سطح و ساختارهای زمین، مستلزم شناخت و آگاهی از پاسخ انواع مختلف اهداف زیرسطحی می‌باشد. یکی از متداول ترین نوع اهداف مدفون زیرسطحی، اهداف استوانه‌ای افقی همانند انواع لوله‌ها، کانال‌ها، تونل‌ها و قنات‌ها می‌باشند. در پژوهش حاضر از مدل سازی عددی پیشرو به روش تفاضل محدود دوبعدی، به منظور شبیه سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی استوانه‌ای شکل افقی بر اساس شرایط مختلف متناظر با واقعیت استفاده شده تا در تفسیر نگاشت راداری برداشت‌های واقعی مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، آشکار سازی موقعیت یک قنات مدفون واقع در شمال غرب شهرستان شاهرود به عنوان مطالعه موردی این پژوهش، کارایی روش GPR را برای این منظور به اثبات رسانده است.

واژگان کلیدی

رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل سازی عددی پیشرو، اهداف استوانه‌ای، نگاشت راداری، قنات

۱- مقدمه

زیرسطحی کم عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پژوهش‌ها و مطالعات گوناگونی در حوزه‌های مختلف علوم زمین، آب شناسی، مطالعه یخچال‌ها، باستان شناسی، شناسایی اهداف مدفون شامل لوله، قنات و فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی انجام شده است. شکل (۱-الف) تصویری از برداشت داده‌های GPR را با متداول ترین شیوه برداشت آن، یعنی پروفیل زنی بازتابی فاصله ثابت به منظور آشکار سازی لوله‌های مدفون در زیر زمین، نشان می‌دهد. در حالت کلی نگاشت راداری^۱ یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل (۱-ب) مجموعه‌ای از تریس‌های^۲ بازتابی می‌باشد و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون، به صورت شبه هذلولی است. جهت آشکار سازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، از سیگنال‌های زمینه بزرگ تر هستند.

در حالت ساده، یک دستگاه GPR از یک مولد سیگنال تشکیل شده است. سیگنال ایجاد شده توسط این تولیدکننده به وسیله آنتن فرستنده به درون زمین فرستاده می‌شود. امواج با سرعت زیادی (کسری از سرعت نور) در زمین منتقل می‌شوند.

ایجاد مسیرهای جدید برای کابل کشی و یا لوله گذاری در زیر زمین و نیز نگهداری تأسیسات زیرسطحی و محافظت از آن هنگام خاک برداری و ساخت و ساز، نیازمند داشتن آگاهی کامل از محل دفن دقیق تأسیسات زیرسطحی است. روش رادار نفوذی به زمین^۱ (GPR) روش آشکار سازی، بازرسی و ارزیابی غیرمخرب مطمئن برای استفاده در محیط‌های شهری، به منظور جلوگیری از آسیب رسانی به تأسیسات شهری و مجموعه‌های باستانی به شمار می‌آید [۱]. این روش به سرعت به عنوان یک روش قابل اعتماد در بسیاری از زمینه‌های مهندسی و علوم از جمله مهندسی عمران و ژئوتکنیک، باستان شناسی، برف و یخ و یخبندان شناسی، امور جنایی و قضایی، مسائل زیست محیطی و کاربردهای دیگر شناخته شده است [۲].

ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر محقق آلمانی ارائه شده است [۳]. روش GPR کاربردهای فراوانی در علوم مختلف دارد و به طور گسترده در به تصویر کشیدن اهداف

* نویسنده مسئول: kamkarr@yahoo.com

1-Ground-Penetrating Radar

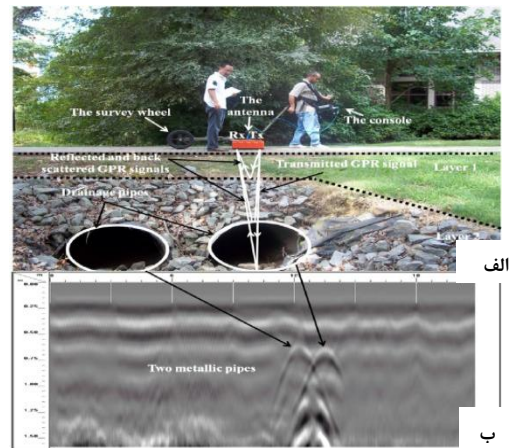
2- Radargram

3- Trace

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 [۶]. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف است. بنابراین، در روش GPR در بیشتر مواقع ϵ و σ مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده پاسخ‌های GPR می‌باشند [۷]. داده‌های خام GPR حاوی تمام اطلاعات اولیه می‌باشند و هدف، استخراج اطلاعات مطلوب نهفته در آن‌ها است. 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 را به‌طور دقیق نمایان کنند [۸]. به‌طور کلی در مطالعات ژئوفیزیکی به‌روش زمین‌رادار، باید با کمک 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.

به‌کارگیری پردازش‌های مناسب هم، روش نرم‌افزاری در راستای افزایش کیفیت نگاشت‌های راداری می‌باشند.

برای آزمون توانایی روش GPR در مطالعات این‌چنینی لازم است علاوه بر برداشت و تفسیر داده‌های واقعی، شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی براساس 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 روزبه‌روز پر رونق‌تر 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 می‌باشد. روش تفاضل محدود اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط تام^۱ تحت عنوان روش مربع‌ها برای حل معادلات هیدرودینامیکی غیرخطی ارائه شد. سپس، این روش در حل مسائلی گوناگونی به‌کار رفت. روش تفاضل محدود مبتنی بر تخمین معادلات دیفرانسیلی به‌وسیله معادلات تفاضلی



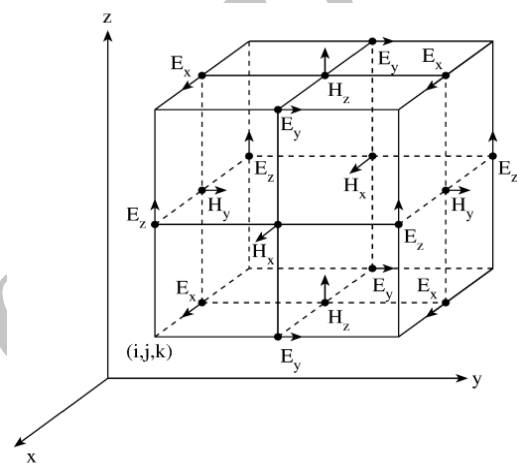
شکل (۱): الف) برداشت داده‌های GPR با روش پروفیلی‌زنی بازتابی فاصله ثابت به‌منظور آشکارسازی لوله‌های مدفون در زیر زمین و ب) قالب مقطع بازتابی GPR با رخداد راداری به‌شکل شبه‌هذلولی (اثر لوله) [۴].

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 [۳]. 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 برداشت‌شده 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 تبدیل شود که محور قائم آن عمق را نمایش دهد. برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد بررسی، محاسبه شود. مهم‌ترین پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را کنترل می‌کنند عبارتند از: گذردهی دی‌الکتریک، رسانندگی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی که به ترتیب با نمادهای ϵ ، σ و μ نشان داده می‌شوند [۵]. این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط کنترل می‌کنند و معمولاً به‌نام پارامترهای ساختاری شناخته می‌شوند. به‌طور کلی این پارامترها می‌توانند به‌صورت تابعی از مکان، جهت، شدت میدان اعمال‌شده 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

1- Tom

انجام شده است که در پژوهش حاضر به طور مختصر به مهم ترین آن‌ها اشاره می‌شود. GPR به عنوان یک روش غیرمخرب^۲ (NDE) مدت زمانی است که در آشکار سازی لوله‌های انتقال آب و فاضلاب و انواع لوله‌های تأسیساتی دیگر، مد نظر قرار گرفته است [۱۶-۱۰]. نی^۳ و همکاران (۲۰۱۰) با معرفی و استفاده از یک روش پردازش سیگنال به نام تبدیل موجک گسسته^۴ (DWT) جهت فیلتر کردن و افزایش داده‌های خام GPR برای به دست آوردن تصاویری با کیفیت بالاتر، موفق به شناسایی و آشکار سازی لوله‌های مدفون در زیر زمین به روش رادار نفوذی شدند. نتایج آن‌ها بیانگر این موضوع است که به کارگیری 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 [۱۷]. 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 [۱۸]. آیالا-کبررا^۵ و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل سه بعدی از ساختمان سیستم خطوط لوله‌های آب تأمین کننده براساس تصاویر GPR ارائه دادند. در این پژوهش یک لوله مدفون در مخزنی جهت شبیه سازی بخش کوچکی از یک زمین در نظر گرفته شد. از تصاویر به دست آمده از این پژوهش، یک مدل سه بعدی برای به دست آوردن نتایج بهتر و تجزیه و تحلیل خط لوله تهیه شد [۱۹]. سگنارد و همکاران (۲۰۱۶) در سایت شهری Sense-City واقع در دانشگاه پاریس، مطالعات و تحقیقاتی را در زمینه به کارگیری روش GPR به عنوان یک روش غیرمخرب 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 دی الکتریک لایه‌های خاک به مقایسه و تفسیر یک تصویر خام پرداختند که از فرکانس‌های مختلف ۳۰۰MHz تا ۱/۵GHz توسط سیستم‌های مختلف GPR به دست آمده بود. سپس اثر هذلولی‌های ایجاد شده در مقاطع راداری را با توجه به پارامترهای مختلف از جمله فرکانس مرکزی، تباین دی الکتریک اشیاء (پر از هوا و یا آب) و

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 یی^۱ با معرفی سلول یی توانست روش تفاضل محدود را در حل معادلات ماکسول به کار گیرد [۹]. در این روش، محیط مورد بررسی به شبکه‌ای با فواصل معین تقسیم بندی می‌شود و مؤلفه‌های میدان براساس سلول یی و روابط ماکسول در مرکز سلول برای یک زمان معین، محاسبه می‌شود. در نهایت، مقادیر برای زمان‌های متوالی، به روزرسانی می‌گردد. شکل (۲)، شبکه FDTD را نشان می‌دهد که از سلول‌های (Nx*Ny*Nz) تشکیل شده است. یک سلول واحد این شبکه، سلول یی نامیده می‌شود.



شکل (۲): سلول واحد یی به همراه مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی [۹].

روش تفاضل محدود دویعدی به دلیل سادگی درک مفاهیم این روش، انعطاف پذیری، قابلیت شبیه سازی و مدل سازی 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 به منظور شناسایی لوله‌های مدفون نشان داده شده است. به عبارت دقیق تر، هدف از پژوهش حاضر، مدل سازی پیشرو داده‌های GPR و بررسی امکان به کارگیری 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 اندازه گیری شده داشته باشد، از روش مدل سازی پیشرو استفاده شود.

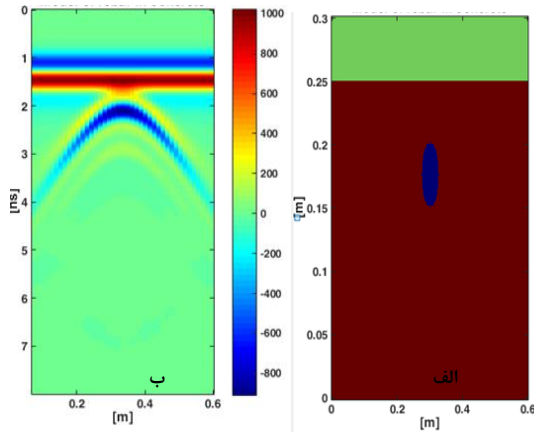
۲- پیشینه تحقیق

در زمینه شناسایی اهداف مدفون همانند لوله‌های تأسیساتی، انتقال آب و فاضلاب و فرآورده‌های نفتی و غیره تحقیقات چندی

2- Non-Destructive Evaluation
3- Ni
4- Discrete Wavelet Transform
5- Ayala-Cabrera

1- Yee

است. درحالی که مقدار نفوذپذیری مغناطیسی (μ) محیط میزبان و اهداف هم، برابر با نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد (خلا) می باشد [۲۱].



شکل (۳): الف) مدل هندسی لوله فلزی مدفون در اسلب بتنی و ب) پاسخ شبیه سازی شده GPR.

همان گونه که در شکل (۳-ب) مشاهده می شود، پاسخ GPR حاصل از سقف هدف استوانه ای مدفون، به صورت هذلولی با تفکیک پذیری بالا به وضوح نمایان است. ضمناً رخداد افقی در قسمت بالای شکل نیز، پاسخ امواج مستقیم هوا و زمین می باشد. به طور کلی، فلزات به دلیل داشتن گذردهی دی الکتریک و رسانندگی الکتریکی فوق العاده بالا، تقریباً تمام انرژی موج فرودی به سطح خود را بازتاب می کنند و بنابراین، بازتاب های قوی در مقاطع GPR ایجاد می کنند.

مدلی همراه با اهداف استوانه ای با اندازه ها و فرم های مختلف، به منظور شبیه سازی میلگردهای جاسازی شده و فضاهای خالی استوانه ای شکل درون محیطی از جنس ماسه مرطوب در شکل (۴-الف) و تصویر حاصل از مدل سازی پیشرو آن نیز در شکل (۴-ب) نشان داده شده است. ویژگی های فیزیکی محیط میزبان برای ماسه مرطوب به صورت $\epsilon_r = 20$ ، $\sigma = 0.1$ S/m است. در حالی که مقدار نفوذپذیری مغناطیسی (μ) محیط میزبان و اهداف هم، برابر با نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد (خلا) می باشد [۲۱].

رخداد افقی در قسمت بالای شکل (۴-ب)، پاسخ امواج مستقیم زمین و هوا می باشد. همان گونه که مشاهده می شود، پاسخ مدل سازی شده GPR تمامی اشیاء در این مورد نیز به صورت شبه هذلولی است. با مشاهده شکل (۴-ب) درمی یابید که پاسخ قسمت فوقانی میلگردهای فلزی نسبت به استوانه های توخالی، قوی تر بوده است؛ همچنین، هیچ بازتابی از کف شیء فلزی مشاهده نمی شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن می باشد.

قطبش مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان می دهد که مطالعات این چینی می تواند کمک بسیاری در توسعه انواع مختلف الگوریتم های پردازش تصویر و سیگنال در نگاشت های راداری نموده و در نهایت به استخراج اطلاعات کمی منجر گردد. هم چنین نتایج تجربی به دست آمده، نشانگر آن است که برای به دست آوردن نگاشت های راداری با وضوح کافی برای توصیف اشیاء مدفون با ابعاد جانبی نسبتاً کوچک، فرکانس ۸۰۰ و ۹۰۰ MHz مناسب ترین فرکانس های برداشت هستند [۲۰].

۳- مدل سازی پیشرو داده های GPR به روش نفاضل محدود

مدل های مصنوعی با هندسه مشخص می توانند در تعیین ارتباط بین ویژگی های زیرسطحی و داده های GPR، مفید واقع شوند. به منظور نمایش پاسخ GPR در یک محیط و بررسی تأثیر ویژگی های فیزیکی و الکتریکی مواد زیرسطحی در بازتاب امواج الکترومغناطیسی، مدل سازی پاسخ سیستم GPR مدل های مصنوعی به شکل استوانه افقی منفرد (معرف میله ها و میلگردهای فولادی جاسازی شده در بتن) یا چند لوله در مجاورت یکدیگر از نرم افزار Reflexw با استفاده از فرمولاسیون روش میدان مغناطیسی عرضی یا مد TM^۱، بهره گرفته شد. در مدل سازی انجام شده در این پژوهش، از موجک کوپر^۲ استفاده شد که راستای پیمایش، عمود بر امتداد هدف توجیه شده است. برای مدل سازی پاسخ سیستم GPR هر یک از اهداف مدنظر، لازم است ابعاد مقطع برداشتی GPR، ویژگی های الکتریکی و مغناطیسی (ϵ ، μ و σ) محیط میزبان و هدف، فاصله های گسسته سازی مکانی و زمانی، نوع موجک مدل سازی و نیز فرکانس مرکزی آنتن، انتخاب گردد. در این پژوهش، تمامی مقاطع مدل سازی شده GPR با فرکانس مرکزی ۲۵۰ MHz تولید شده است.

۴- نتایج شبیه سازی پاسخ مدل های مصنوعی

پارامترهای هندسی مدلی برای یک هدف استوانه ای افقی کاملاً رسانا به قطر ۵ cm، مدفون در عمق ۵ سانتی متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک بتن، در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. در شکل (۳-ب)، نیز پاسخ مدل سازی شده GPR آن مشاهده می شود. ویژگی های فیزیکی محیط میزبان برای بتن به صورت $\epsilon_r = 6$ ، $\sigma = 0.1$ S/m

1- Transverse Magnetic

2- Kuepper

مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند، می‌باشد. همان‌گونه که در شکل فوق دیده می‌شود، بازتاب مربوط به لوله فلزی دارای قطبیت معکوس موج مستقیم هوایی است. این پدیده از بازتاب موج از دو فصل مشترک با تغییر امپدانس الکترومغناطیس از مقدار بزرگ‌تر به مقدار کوچک‌تر ناشی شده است (از مواد با سرعت موج الکترومغناطیس بالا به مواد با سرعت موج الکترومغناطیس پایین). درحالی‌که قطبیت مربوط به استوانه توخالی، هم علامت موج مستقیم هوایی است. این پدیده از بازتاب موج از دو فصل مشترک با تغییر امپدانس الکترومغناطیس از مقدار کوچک‌تر به مقدار بزرگ‌تر، ناشی شده است.

۵- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف روی پاسخ GPR اجسام استوانه‌ای

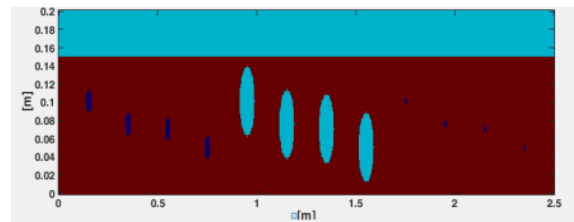
مهم‌ترین اهداف این مطالعه، بررسی تأثیر عوامل مختلف همانند اندازه و ابعاد هدف، عمق دفن، نوع سیال محتوی، جنس دیواره هدف و مشخصات فیزیکی محیط میزبان روی پاسخ‌های GPR می‌باشد. در جدول (۱) برخی از ویژگی‌های الکتریکی مورد مطالعه در تحقیق حاضر از جمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی و رسانندگی الکتریکی آورده شده است.

جدول (۱): برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه [۲۲-۲۳].

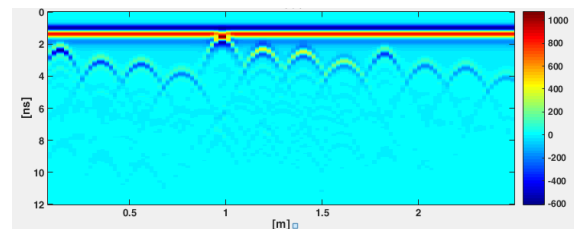
ماده (محیط)	گذردهی دی‌الکتریک نسبی	رسانندگی الکتریکی (ms/m)
خاک رس سیلتی	۶	۶/۶
بتن	۱۰	۰/۰۰۵
هوا	۱	۱۰ ^{-۸}
پی وی سی	۳/۳	۱/۳۴
فلز	۳۰۰	۱۰ ^{۱۰}
آب شیرین	۸۰	۰/۰۱
آب شور	۸۰	۵۰۰۰

۵-۱- بررسی تأثیر جنس دیواره هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR

شکل (۶)، پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای با جنس‌های مختلف را نشان می‌دهد. جنس این اهداف به ترتیب بتن، فلزی و پی وی سی با مشخصات هندسی یکسان هستند. به طوری‌که قطر داخلی هر سه هدف برابر با ۱ m و ضخامت دیواره آن‌ها ۵ cm است. همه این اهداف صددرصد پر از هوا بوده و در عمق یک متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی مدفون می‌باشند.



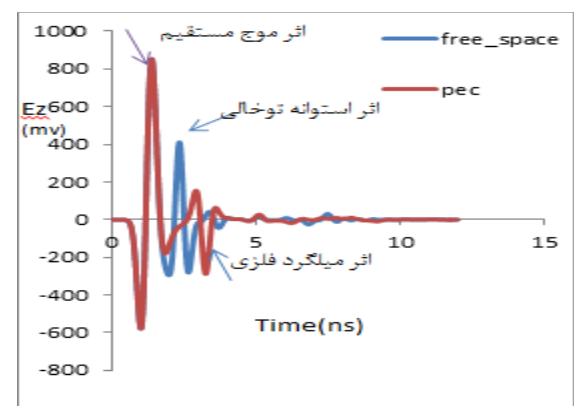
الف



ب

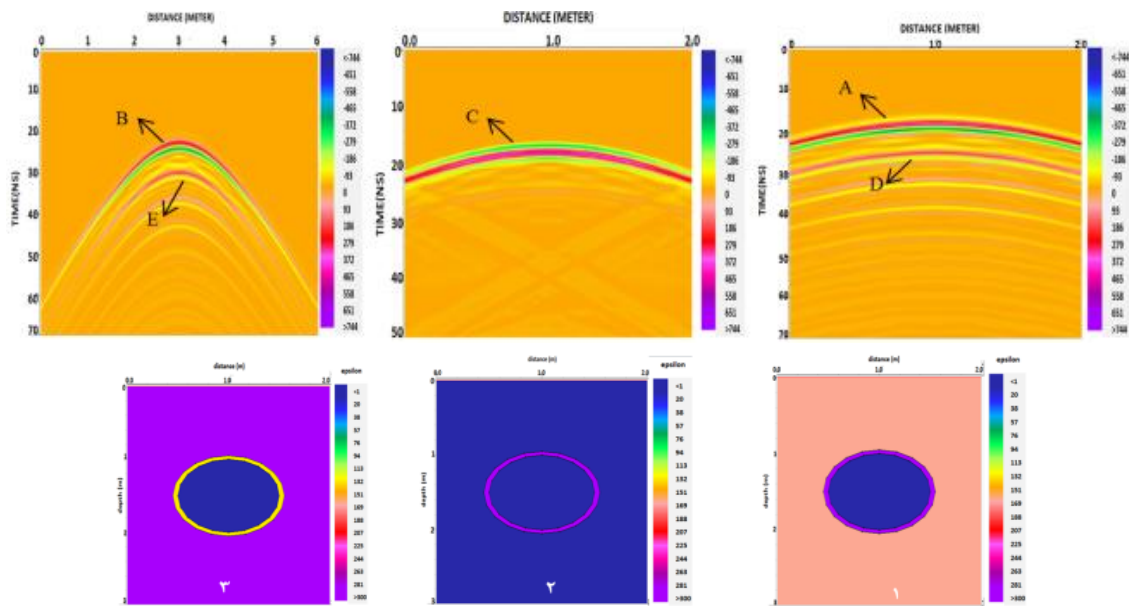
شکل (۴): الف) مدل هندسی میله‌های فولادی با اندازه‌های مختلف جاسازی شده درون ماسه مرطوب همراه با استوانه‌های توخالی و ب) پاسخ شبیه‌سازی GPR.

هم‌چنین ویژگی‌های شبه هذلولی‌های پاسخ استوانه‌های توخالی (به‌ویژه پلاریته) با پاسخ مربوط به میله‌های فلزی، متفاوت است. به عبارت دیگر، پلاریته سیگنال بازتابی در مورد میله‌های فلزی نسبت به استوانه توخالی معکوس شده و شدت بازتاب پاسخ نسبتاً بالا است. معکوس شدن پلاریته سیگنال در این مورد به طور واضح با ترسیم تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف مدفون مورد نظر، یکی میله‌گرد فلزی و دیگری استوانه توخالی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): نمایش پلاریته معکوس برای تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف استوانه توخالی (رنگ آبی) و میله‌گرد فلزی مدفون (رنگ قرمز).

اثر موجی که مستقیماً از طریق هوا به آنتن گیرنده رسیده در این شکل مشخص شده است که علت آن، فواصل زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده و پالس‌هایی که به‌صورت



شکل (۶): مقایسه پاسخ‌های GPR سه هدف استوانه‌ای توخالی (هوا) با جنس‌های مختلف؛ مدل ۱: بتن، مدل ۲: فلز و مدل ۳: پلاستیک (PVC). محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی است.

۵-۲- بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای

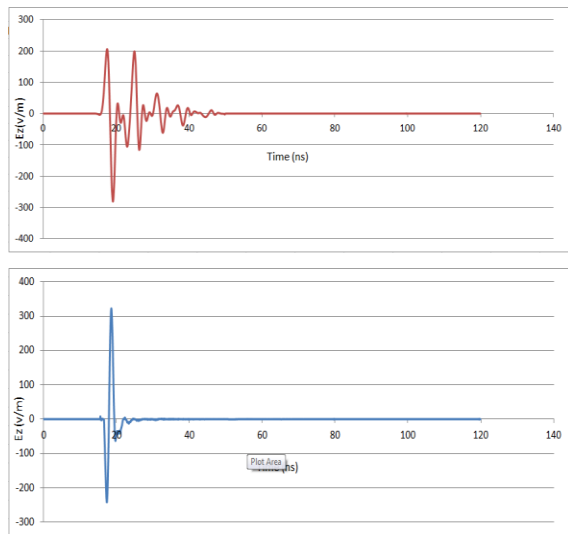
بر روی پاسخ GPR

شبه‌سازی برای سه هدف استوانه‌ای محتوی هوا، آب شیرین و آب شور با مشخصات یکسان به قطر ۱ m، مدفون در عمق یک متری و محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی صورت گرفته است. نتایج این شبه‌سازی در شکل (۷) مشاهده می‌شود. پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای پر از هوا و آب شیرین در این شکل نشان می‌دهد که در صورت خالی بودن هدف مدفون (مدل ۴)، پاسخ سقف (T) و کف (B) آن به وضوح مشخص بوده و شدت بازتاب هر دو پاسخ نسبتاً قوی است.

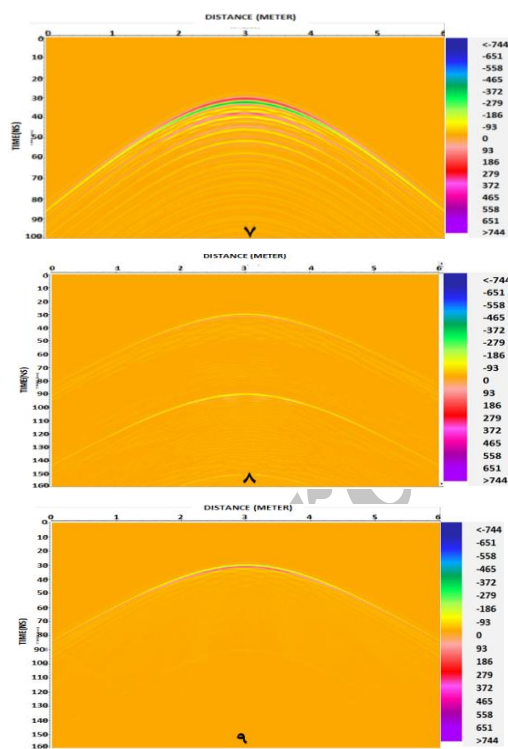
در شرایطی که هدف مدفون پر از آب شیرین باشد (مدل ۵)، اگرچه در این مورد نیز هر دو پاسخ سقف و کف هدف مشخص است، ولی شدت بازتاب پاسخ کف هدف ضعیف است که علت آن تضعیف امواج در طی عبور از آب شیرین درون هدف است. همچنین، از آنجایی که سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در آب کمتر از هواست، در نتیجه فاصله قائم پاسخ سقف و کف هدف در مدل ۵ از مدل ۴ به مراتب بیشتر است. نکته مهم‌تر در این مورد آن است که قطبیت سیگنال نیز نسبت به مدل ۴ معکوس شده است. درحالتی که هدف از آب شور پر شده باشد (مدل ۶) فقط پاسخ سقف هدف قابل مشاهده می‌باشد و هیچ پاسخی از کف وجود ندارد که علت آن رسانندگی الکتریکی بسیار زیاد آب شور و تضعیف شدید امواج الکترومغناطیسی است. به عبارت دیگر، آب شور مانند فلز رفتار می‌کند با این تفاوت که شدت بازتاب، اندکی از فلز کمتر است.

مقایسه پاسخ GPR حاصل از استوانه‌ها نشان می‌دهد که در مورد مدل‌های ۱ و ۳ نشان داده شده است. در شکل (۶)، اختلاف فاحشی در دامنه پاسخ‌های سقف دو هدف (A و B) و نیز کف دو هدف (D و E) مشاهده نمی‌شود، زیرا از یک سو ضخامت دیواره اهداف مورد نظر در مقایسه با قطر آن‌ها کوچک است و از سوی دیگر بتن و پلاستیک از نظر رسانندگی الکتریکی و گذردی‌دی الکتریک، اختلاف چندانی ندارند. ممکن است در داده‌های واقعی در اثر وجود نوفه، اختلاف ناچیزی در دامنه بازتاب‌های سقف دو هدف (A و B) دیده شود.

جنس دیواره اغلب لوله‌ها و ساختارهای استوانه‌ای معمولاً فلزی است (مدل ۲). پاسخ سقف هدف مدل ۲ (شکل ۶) نسبت به دو مورد قبلی بحث‌شده در بالا قوی‌تر بوده و قطبیت سیگنال‌های بازتابی نیز معکوس شده است. معکوس شدن قطبیت، با معکوس شدن ترتیب رنگی پاسخ سقف این هدف (C) نسبت به دو هدف قبل (A و B)، قابل مشاهده است. هم‌چنین، هیچ بازتابی از کف هدف فلزی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن می‌باشد. با بررسی تعداد زیادی آزمایش عددی در ارتباط با این موضوع، نشان داده شده است که به‌طور کلی تأثیر جنس و نیز ضخامت دیواره یک هدف غیرفلزی بر روی پاسخ GPR آن قابل چشم‌پوشی بوده و در این مورد عامل غالب بر روی پاسخ GPR تباین بین ویژگی‌های الکتریکی محیط میزبان و محتوای مدل می‌باشد. بنابراین، در مدل‌سازی‌های بعدی برای اهداف هیچگونه دیواره‌ای در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر در هر مدل تنها هدف و محیط میزبان وجود خواهد داشت.

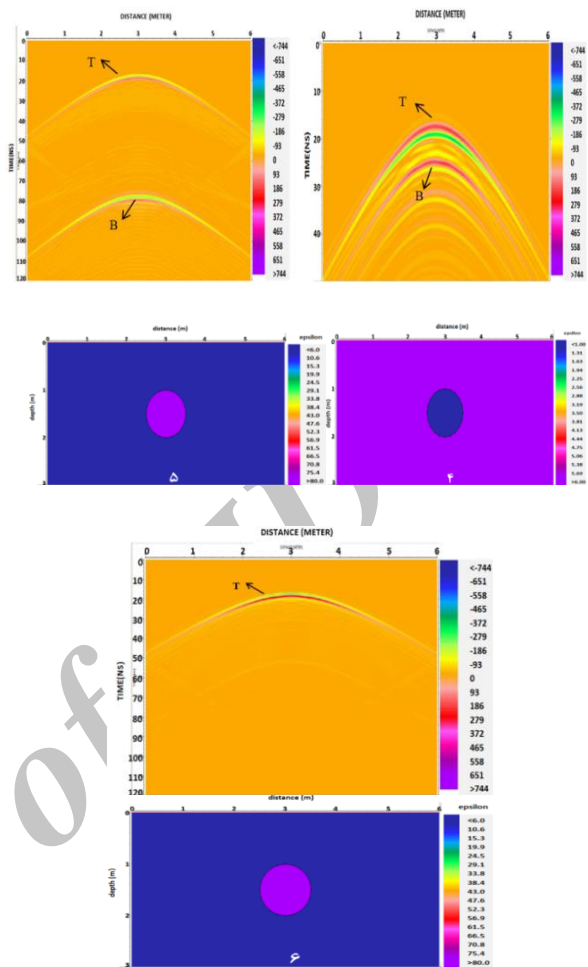


شکل (۸): نمایش قطبیت معکوس برای تریس‌های میانی پاسخ‌های مدل ۴ (رنگ قرمز) و مدل ۶ (رنگ آبی).



شکل (۹): بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای روی پاسخ GPR. مدل ۷: استوانه توخالی، مدل ۸: استوانه پر از آب شیرین و مدل ۹: استوانه پر از آب شور. محیط میزبان خاک رس مرطوب است.

نتایج شکل (۹) و مقایسه آن‌ها با نتایج اشکال (۷) نشان می‌دهد که اگر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان نسبتاً زیاد باشد، پاسخ کف استوانه توخالی (مدل ۷) به وضوح قابل رؤیت نیست که دلیل آن تضعیف بیش‌تر امواج الکترومغناطیسی در محیط میزبان با رسانندگی الکتریکی بیشتر است. در پاسخ مدل‌های ۹-۸ تغییر



شکل (۱۰): بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای روی پاسخ GPR. مدل ۴: استوانه توخالی، مدل ۵: استوانه پر از آب شیرین، مدل ۶: استوانه پر از آب شور

در ضمن، قطبیت سیگنال بازتابی در این مورد نیز (نسبت به مدل ۴) معکوس شده و شدت بازتاب پاسخ نسبتاً بالا است. معکوس شدن قطبیت سیگنال در این مورد به طور واضح با ترسیم تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف مدفون (تریس میانی پاسخ)، یکی پر از هوا و دیگری پر از آب شور در شکل (۸) نشان داده شده است. به‌طور کلی، در مورد ساختارهای حاوی آب شور هیچ‌گونه بازتاب و در نتیجه رخدادی در قسمت زیر سطح سیال وجود ندارد که این نشانه عدم وجود پاسخ آب شور و نحوه تشخیص آن از آب شیرین می‌باشد. تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای مدفون در محیط میزبان از جنس خاک رس مرطوب نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

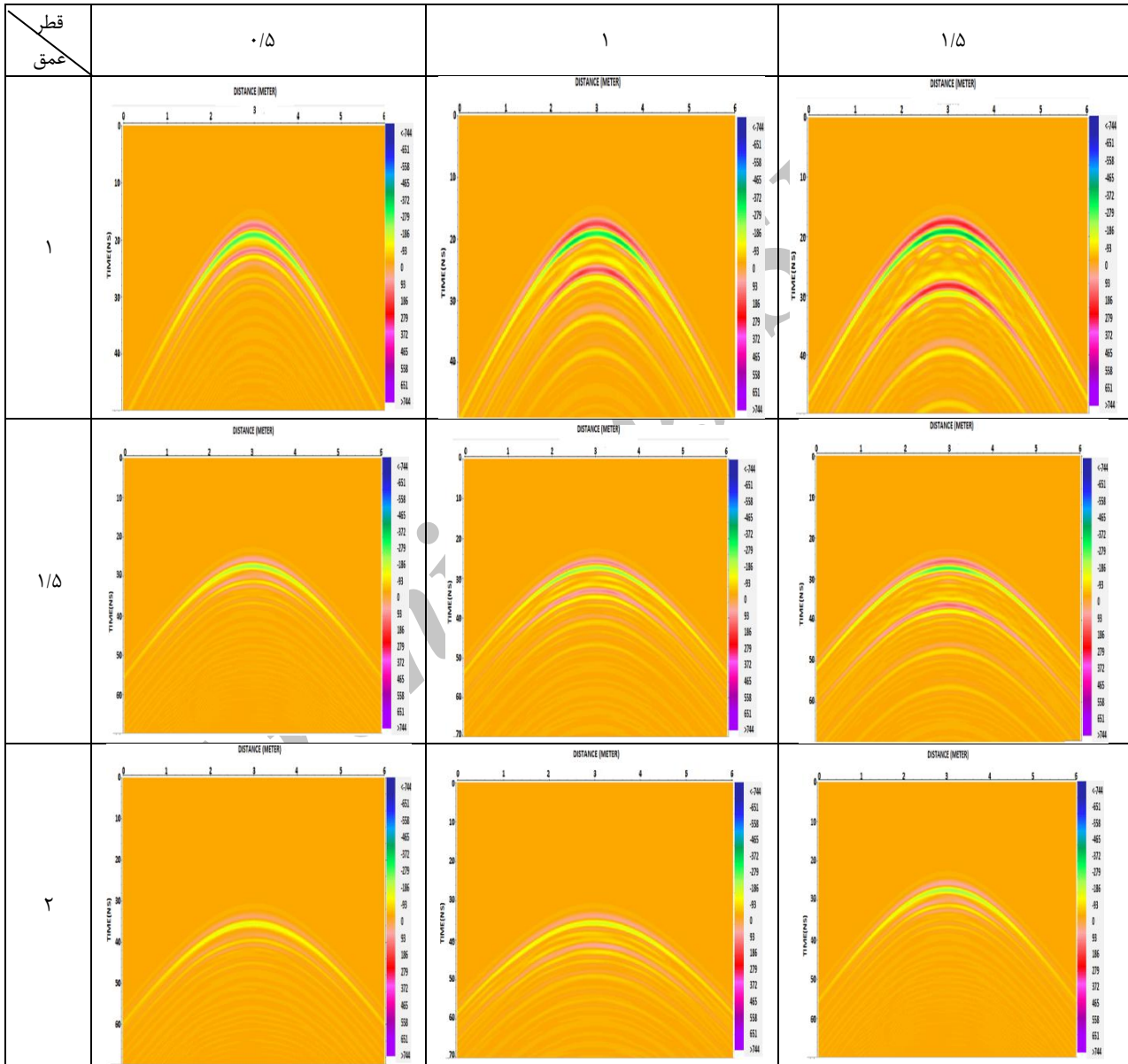
شکل (۹)، نتایج آشکارسازی را برای سه هدف استوانه‌ای به قطر ۱ m، مدفون در عمق یک متری درون محیط میزبان از جنس خاک رس مرطوب نشان می‌دهد که در آن مدل‌های ۹-۷ به ترتیب از هوا، آب شیرین و آب شور پر شده‌اند.

فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی آورده شده است. مقاطع GPR تولیدشده در شکل (۱۰)، مقایسه تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ GPR را در شرایط عمقی متفاوت و بالعکس نشان می‌دهد. در این مقاطع، محور افقی، طول برداشت بر حسب متر و محور عمودی زمان رفت و برگشت موج بر حسب نانوثانیه می‌باشد.

محسوسی با نتایج مورد قبلی (اشکال ۷) مشاهده نمی‌شود جز این‌که شدت بازتاب‌ها اندکی کاهش پیدا کرده است.

۳-۵- بررسی تأثیر قطر و عمق دفن استوانه بر شکل پاسخ

در شکل (۱۰) پاسخ GPR برای اهداف استوانه‌ای با قطرهای ۰/۵ m و ۱ m و ۱/۵ m مدفون در عمق‌های ۱ m و ۱/۵ m و ۲ m

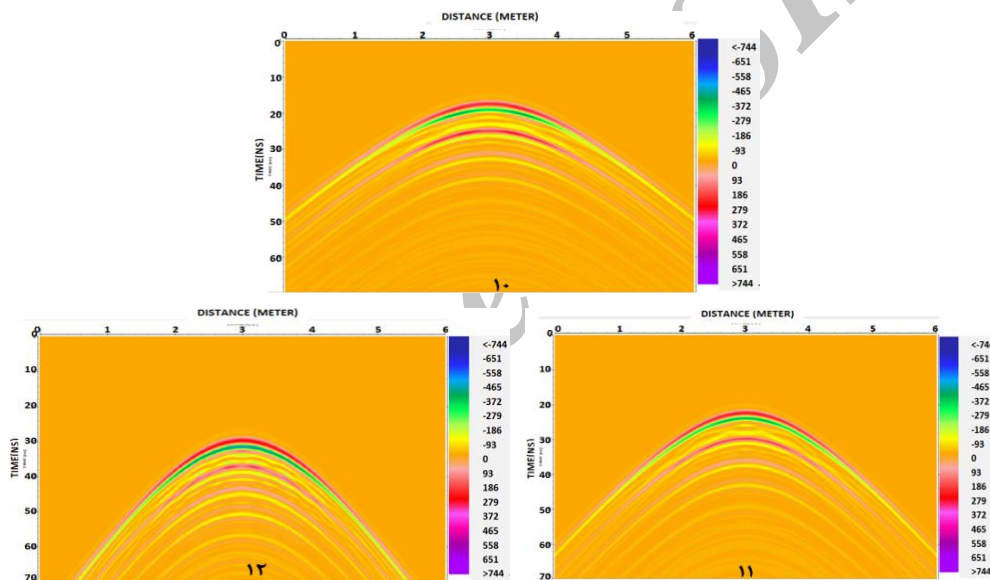


شکل (۱۰): مقایسه تأثیر عمق و قطر لوله بر شکل پاسخ.

مطابق انتظار افزایش می‌یابد. با افزایش عمق دفن هدف، موقعیت نقطه پیک هذلولی پاسخ (که معرف موقعیت افقی و عمق دفن هدف استوانه‌ای نیز می‌باشد) مطابق انتظار افزایش می‌یابد، در حالی‌که زاویه شیب مجانب‌های هذلولی به‌طور ملایم کاهش می‌یابد.

همان‌گونه که در مقاطع شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در عمق ثابت با افزایش قطر، موقعیت راس آن ثابت باقی مانده است و فقط انحنای هذلولی تغییر پیدا می‌کند. با افزایش قطر هدف استوانه‌ای، فاصله قائم بین پاسخ سقف (T) و کف هدف (B) نیز

امواج در آن محیط شده و در نتیجه منجر به تغییر مشخصات هذلولی پاسخ می‌گردد. برای بررسی تأثیر این عامل، پاسخ‌های GPR برای سه هدف استوانه‌ای توخالی به قطر ۱ m و مدفون در عمق یک متری در سه محیط میزبان با مقادیر ثابت‌های دی‌الکتریک مختلف (و دیگر شرایط یکسان) به صورت شکل (۱۱) مدل‌سازی گردید که میزان گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان مدلهای ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده در این شکل برابر با ۶، ۱۰ و ۱۸ می‌باشند. مقدار رسانندگی الکتریکی محیط میزبان در هر سه مدل نشان داده شده در این شکل، 0.05 S/m است. هذلولی‌های شکل (۱۱) نشان می‌دهند که با افزایش میزان گذردهی دی‌الکتریک محیط میزبان و در نتیجه کاهش سرعت سیر امواج در محیط، موقعیت پیک هذلولی پاسخ به سمت پایین جابه‌جا شده و نیز زاویه شیب مجانب‌های هذلولی افزایش یافته است.



شکل (۱۱): بررسی تأثیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان روی پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای با $\epsilon_{rh} = 6\epsilon_{r0}$ (مدل ۱۰)، $\epsilon_{rh} = 10\epsilon_{r0}$ (مدل ۱۱) و $\epsilon_{rh} = 18\epsilon_{r0}$ (مدل ۱۲). h : محیط میزبان و 0 : هدف.

با ۶ می‌باشد. نفوذپذیری مغناطیسی هر دو مدل نیز یکسان و برابر با مقدار فضای آزاد است.

پاسخ‌های GPR در شکل (۱۲) نشان می‌دهند که اگر محیط میزبان بسیار مقاوم باشد (مدل ۱۳) دامنه سیگنال‌های بازتابی سقف و کف هدف هر دو قوی‌تر از پاسخ‌های نظیر هدف مدل با محیط میزبان بسیار رسانا (مدل ۱۴) می‌باشند. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، بازتاب‌های سقف و به ویژه کف مدل ۱۴ به‌گونه‌ای تضعیف شده‌اند که ممکن است پاسخ کف در داده‌های واقعی در حضور نوفه پنهان شده و دیده نشود. بدیهی است که با تغییر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان و ثابت نگه داشتن دیگر شرایط، قطبیت و شیب مجانب‌های هذلولی تغییر نخواهد کرد.

۴-۵- بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان

روی پاسخ GPR

علاوه بر ویژگی‌های هندسی و فیزیکی هدف مدفون، ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان هدف از جمله رسانندگی الکتریکی و گذردهی دی‌الکتریک نسبی نیز روی پاسخ GPR تأثیر می‌گذارند. بنابراین، باید تأثیر آن‌ها نیز از طریق آزمایش‌های مدل‌سازی مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۵-۱- بررسی تأثیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط

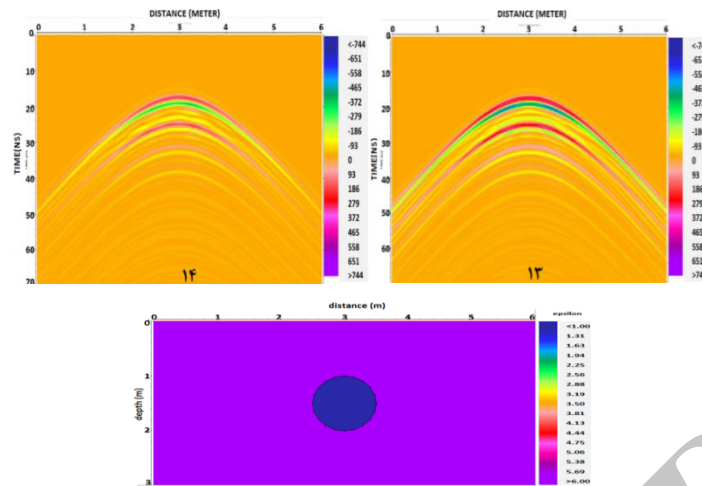
میزبان روی پاسخ GPR

از آنجایی که گذردهی دی‌الکتریک هر محیط با سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در آن محیط مرتبط است، بنابراین، تغییر میزان گذردهی دی‌الکتریک یک محیط باعث تغییر سرعت سیر

۴-۵-۲- بررسی تأثیر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان

روی پاسخ GPR

هدف اصلی، مطالعه تأثیر رسانندگی الکتریکی برای حالاتی است که گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان و هدف مدفون در آن ثابت فرض شوند. با این فرض، پاسخ‌ها برای دو هدف استوانه‌ای توخالی (هوا)، به قطر ۱ m، مدفون در عمق یک متری مدل‌سازی گردید. در شکل (۱۲)، مقدار رسانندگی الکتریکی محیط میزبان برای مدل ۱۳ برابر با 0.1 mS/m و برای مدل ۱۴ برابر با 10 mS/m است. به عبارت دیگر، محیط میزبان مدل ۱۳ صد برابر مقاوم‌تر از محیط میزبان مدل ۱۴ می‌باشد. مقادیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان برای هر دو مدل برابر



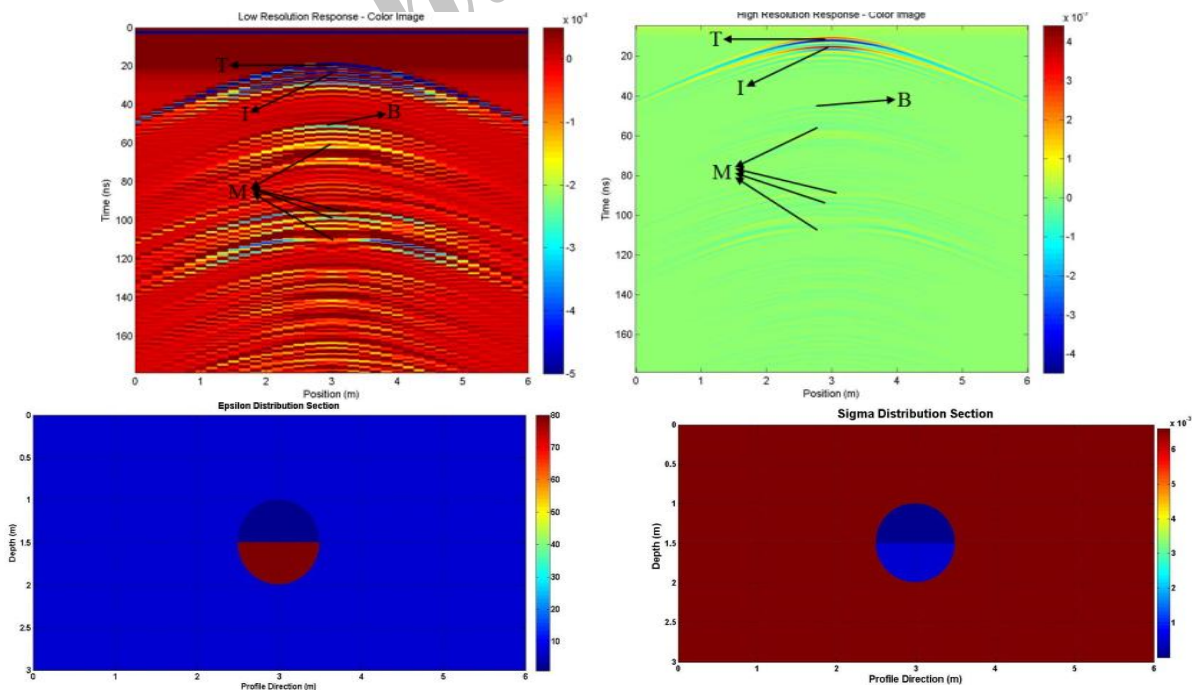
شکل (۱۲): بررسی تأثیر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان روی پاسخ GPR دو هدف استوانه‌ای. برای مدل ۱۳: $\sigma_h = 0.1 \text{ mS/m}$ و برای مدل ۱۴: $\sigma_h = 10 \text{ mS/m}$ محیط میزبان و ۰: هدف.

۵-۵- بررسی تأثیر حضور دو سیال مختلف در داخل

هدف

نگاشت راداری به خوبی مشخص گردد. در قسمت بالای این شکل نیز پاسخ GPR هدف استوانه‌ای حاوی دو نوع سیال هوا-آب شیرین را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مدل هندسی و فیزیکی موجود، پاسخ سقف (T)، مرز دو سیال (I) و کف هدف (B)، قابل مشاهده است. از آنجایی که آب شیرین تا حدودی هادی جریان الکتریسیته است، پاسخ کف هدف (B) نسبتاً ضعیف است. در پاسخ GPR این مدل، بازتاب‌های چندگانه (M) مشاهده می‌شود که اولین رخداد زیر پاسخ مرز دو سیال، پاسخ کف هدف است.

در قسمت پایین شکل (۱۳) مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی مدل شامل هدف استوانه‌ای دارای دو سیال مختلف (هوا و آب شیرین) مشاهده می‌شود. همان‌گونه که از این شکل دیده می‌شود مرز دو سیال، در قسمت میانی هدف قرار دارد؛ به عبارت دیگر، هر سیال ۵۰٪ حجمی هدف را تشکیل می‌دهد. هدف در عمق یک متری درون خاک رس سیلتی مدفون است. با در نظر گرفتن اختلاف بالای مقادیر دی‌الکتریک میان هوا و آب انتظار می‌رود سطح آب به عنوان یک بازتابنده قوی در



شکل (۱۳): مقطع توزیع هدایت الکتریکی و مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک نسبی مربوط به هدف استوانه‌ای شامل دو سیال هوا-آب شیرین در قسمت پایین شکل و پاسخ سامانه GPR آن در قسمت بالای شکل (تفکیک‌پذیری زیاد در سمت راست و تفکیک‌پذیری پایین در سمت چپ).

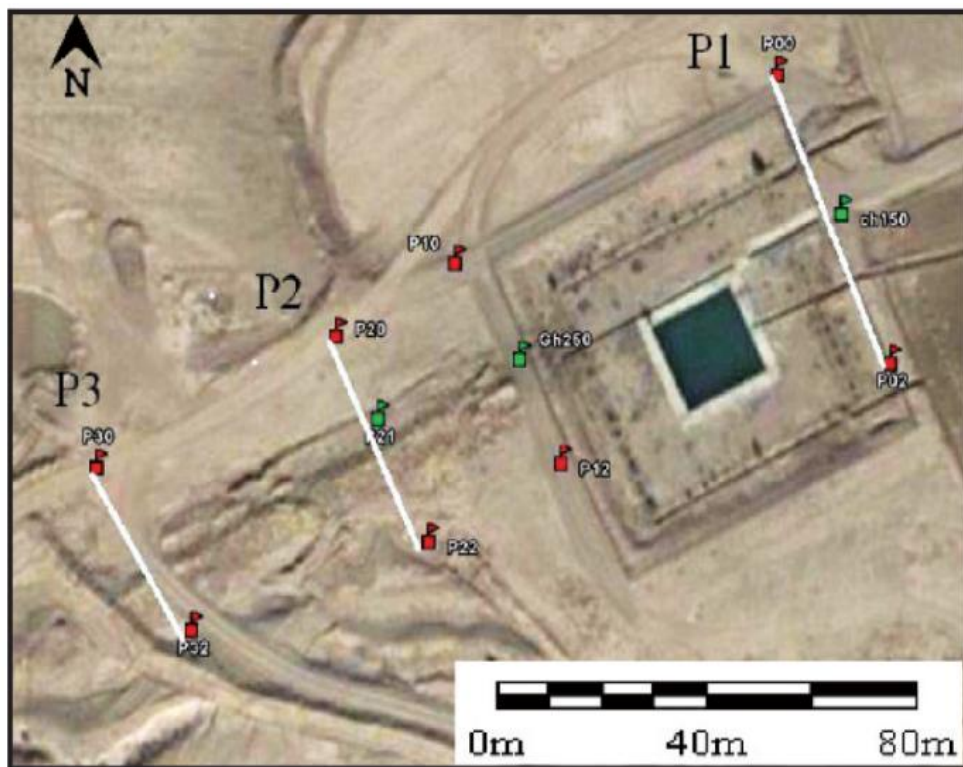
۶- مطالعه موردی: آشکار سازی قنات پنهان

۱-۶- معرفی محدوده برداشت داده‌ها

هدف از این مطالعه موردی آشکار سازی یک قنات پنهان از طریق برداشت داده‌ها به روش GPR می‌باشد. مظهر قنات مورد نظر قابل مشاهده بوده و دسترسی به آن امکان پذیر است. این قنات در ۱۸ کیلومتری شمال و شمال غربی شهرستان شاهرود می‌باشد.

۲-۶- نحوه برداشت و پردازش داده‌های GPR

پروفیل‌های برداشتی عمود بر امتداد احتمالی قنات با آزیموت 150° انتخاب شدند. موقعیت پروفیل‌های مورد بررسی در این پژوهش، بر روی عکس هوایی منطقه برداشت در شکل (۱۴) با استفاده از خطوط سفیدرنگ مشخص شده است. طرح مربع شکل تیره‌رنگ در این شکل، استخری را نشان می‌دهد که برای ذخیره آب برای مقاصد کشاورزی پایین‌تر از مظهر قنات، ساخته شده است و ابعاد آن در حدود ۲۵ m می‌باشد.



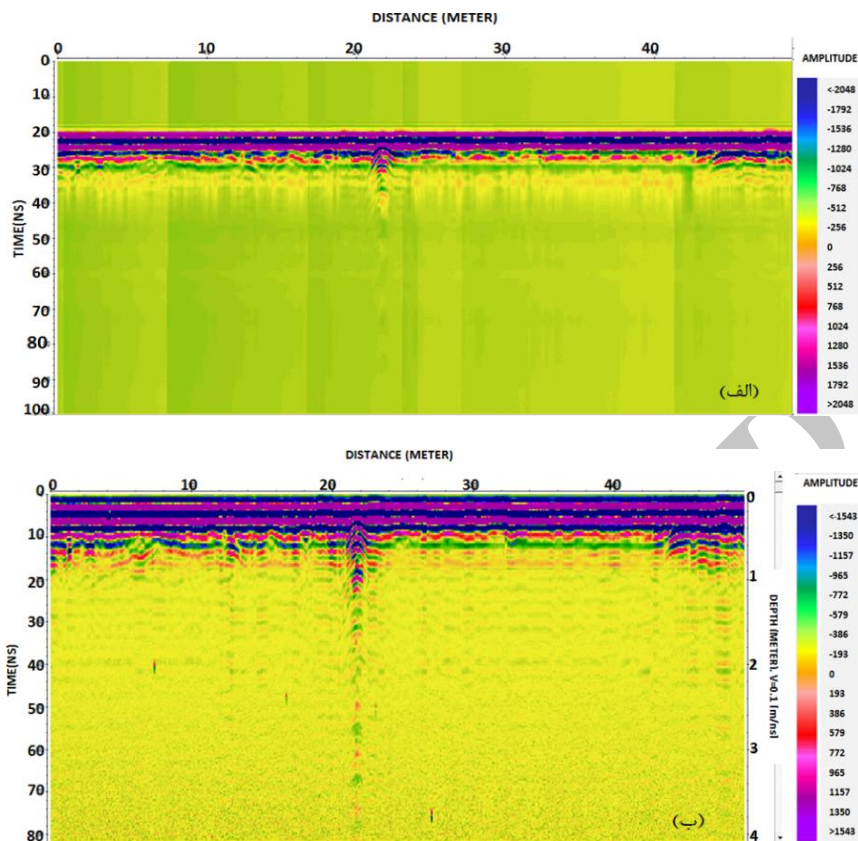
شکل (۱۴): عکس هوایی منطقه برداشت به همراه پروفیل‌های برداشتی و نقاط اندازه‌گیری مختصات مکانی (GPS) برگرفته از سایت Google Earth [۲۴].

۲/۵ متری است. داده‌های GPR برداشت‌شده با استفاده از نرم‌افزار Reflexw پردازش شده و به نمایش درآمده‌اند. داده‌های خام GPR به صورت مقاطع زمانی بوده و برای تبدیل این مقاطع زمانی به مقاطع عمقی و اعمال برخی پردازش‌ها، لازم است که سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط مورد بررسی، تخمین زده شود. در این پژوهش، سرعت میانگین به دست آمده با استفاده از شکل هذلولی‌های پراش در منطقه برداشت حاصل شده است.

مقاطع اولیه و پردازش‌شده داده‌های GPR برای این پروفیل در شکل (۱۵) به نمایش درآمده است. مقطع عمقی (شکل ۱۵-ب) با استفاده از سرعت میانگین 0.1 m/ns به دست آمده است.

برداشت داده‌های GPR در این منطقه توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensor & Software صورت گرفته است. آنتن مورد استفاده برای فراهم آوردن داده‌های GPR، آنتن پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ MHz می‌باشد. داده‌های GPR در این پژوهش، با فاصله ایستگاهی ۵cm و به صورت پروفیل‌زنی پیوسته، برداشت شده‌اند.

در پژوهش حاضر برای اختصار فقط نتایج برداشت یکی از پروفیل‌های برداشت (P2)، آورده شده است. این پروفیل به فاصله ۴۰m از مظهر قنات و به طول ۵۰m بر روی محور تقریبی قنات برداشت شده است. سطح آب در داخل این قنات در عمق تقریبی



شکل (۱۵): (الف) مقطع اولیه داده‌های GPR بر روی پروفیل ۲ (P2) و (ب) مقطع زمانی و عمقی داده‌های GPR برای این پروفیل با به‌کارگیری فیلتر Dewow، تصحیح ایستا و استفاده از بهره خودکار.

شده است. از سوی دیگر، توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد. از جمله مهم‌ترین عوامل تضعیف انرژی سیگنال، تضعیف ناشی از رسانندگی محیط زیرسطحی^۴ و پخش هندسی امواج است [۲۶]. بنابراین، پاسخ دریافتی از توده‌های ژرف ضعیف‌تر است. برای حل این مشکل و یکسان‌سازی پاسخ ساختارهای واقع در ژرفاهای مختلف با استفاده از بهره‌ها^۵، توان سیگنال در ژرفاهای بیشتر افزایش می‌یابد. بهره، یک تابع متغیر با زمان است و از بهره‌های مختلفی برای تصحیح داده‌های GPR استفاده می‌شود. بهره SEC یکی از انواع توابع بهره است که ترکیبی از توابع بهره کروی و نمایی است. این بهره براساس اتلاف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج رادار در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد.

از آنجایی که میرایی امواج الکترومغناطیسی به صورت تابع نمایی رخ می‌دهد، تابع بهره مذکور سعی در جبران میرایی

در تولید این مقطع از فیلتر تصحیح اشباع سیگنال^۱، تصحیح استاتیک^۲ و همچنین بهره گسترش هندسی و نمایی (SEC)^۳ استفاده شده است. با توجه به نزدیکی فرستنده و گیرنده در سامانه‌های برداشت GPR و خصوصیات الکتریکی زمین، سیگنال‌های فرستاده شده به زمین جریانات فرکانس پایینی را در زیر سطح القاء می‌کنند که بازتاب‌های فرکانس بالا را می‌پوشاند [۲۵]. بنابراین، در مقاطع GPR به‌دست آمده، ابتدا از فیلتر تصحیح اشباع سیگنال برای حذف و کاهش این جریانات استفاده شده است. این فیلتر یکی از فیلترهای بالاگذر است که با استفاده از روش میانگین‌گیر پی در پی، 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 استفاده

4- Attenuation
5- Gain

1- Dewow
2- Static Correction
3- Spreading and Exponential Compansation Gain

۱۰- مراجع

- [1] P. Gamba and S. Lossani, "Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar images," IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 38, pp. 790 – 797, 2000.
- [2] N. Linford, "The application of geophysical methods to archaeological prospection," Reports on Progress in Physics vol. 69, pp. 2205–2257, 2006.
- [3] D. S. Parasnis, "Principles of applied geophysics," 5th edition, Chapman and Hall, 1997.
- [4] H. K. Chlaib, H. Mahdi, H. Al-Shukri, M. M. Su, A. Catakli, and N. Abd, "Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows," Applied Geophysics, vol. 103, pp. 121-133, 2014.
- [5] A. Neal, "Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: principles, problems and progress," Earth-science reviews, vol. 66, pp. 261-330, 2004.
- [6] A. Giannopoulos, "Modeling ground penetrating radar by GPRMax," Construction and Building Materials, vol. 19, pp. 775-762, 2005.
- [7] O. L. Mancilla and E. G. Trevifio, "Synthetic radargrams from electrical conductivity and magnetic permeability variations," J. of Applied Geophysics, vol. 34, pp. 283-290, 1996.
- [8] H. M. Jol, "Ground Penetrating Radar: Theory and Applications," Oxford: Elsevier Science, p. 508, 2009.
- [9] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," IEEE T Antenn Propag, vol. 14, pp. 49–58, 1966.
- [10] A. P. Annan, "The history of ground penetrating radar," Subsurface Sensing Technologies and Applications, vol. 3 no. 4, pp. 303–320, 2002.
- [11] B. J. Allred, N. R. Fausey, L. Jr. Peters, C. Chen, J. J. Daniels, and H. Youn, "Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods," Applied Engineering in Agriculture, vol. 20, no. 3, pp. 307–318, 2004.
- [12] J. L. Porsani and W. A. Sauck, "Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks, artifact removal through effective data processing," Geophysics, vol. 72, pp. 77–83, 2007.
- [13] R. N. Santos, V. Dos, L. J. Porsani, and S. T. N. Hirata, "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), 13th International Conference on, IEEE, 2010.
- [14] J. L. Porsani, E. Slob, R. S. Lima, and D. N. Leite, "Comparing detection and location performance of perpendicular and parallel broadside GPR antenna orientations," Journal of Applied Geophysics, vol. 70, pp. 1-8, 2010.
- [15] B. J. Allred and J. D. Redman, "Location of agricultural drainage pipes and assessment of agricultural drainage pipe conditions using Ground Penetrating Radar," Journal of Environmental and Engineering Geophysics, vol. 15, Issue 3, pp. 119–134, 2010.
- [16] C. Ékes, B. Neduczka, and G. R. Henrich, "Completing condition assessments using in-pipe GPR as pipe penetrating radar," Pipelines 2011: A Sound Conduit for Sharing Solutions, Seattle, Washington, United States, 2011.
- [17] S. H. Ni, Y. H. Huang, K. F. Lo, and D. C. Lin, "Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete

رخداده با افزایش دامنه سیگنال‌ها در جهت مقابل میرایی را دارد. به گونه‌ای که با توجه به هدف مورد نظر پردازشگر، در ابتدای تابع بهره کمتر و در ادامه خط سیر موج که میرایی بیشتری رخ می‌دهد، بهره بیشتری اعمال می‌گردد. بهره مورد نظر در این مرحله، با مقادیر ۲dB برای بهره نمایی و زمان رسید ۱۰ns برای شروع بهره و ضریب ۱ برای مقدار بهره‌ی خطی اعمال گردید.

همان‌گونه که از شکل (۱۵-ب) مشاهده می‌شود، اثر این قنات در فاصله ۲۲ متری ابتدای پروفیل به خوبی قابل تشخیص است. پالس‌های با دامنه بالا و متوالی در این محل ناشی از عبور امواج GPR از هوای درون قنات و پژواک امواج درون این منطقه کم اتلاف است. ابعاد ناحیه پر از هوا در بالای سطح آب درون محور قنات، بزرگ‌تر از طول موج فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده است، به همین دلیل، مشاهده چنین پدیده‌ای در این ناحیه دور از انتظار نیست.

۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرو به روش تفاضل محدود، اثر فاکتورهای مختلف تأثیرگذار بر پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی مختلف شامل اهداف استوانه‌ای شکل افقی مدفون در زیر زمین، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روش GPR نه تنها برای آشکارسازی موقعیت چنین اهدافی مفید است بلکه برای به‌دست‌آوردن جزئیات بیشتر درجاء، به منظور ارزیابی شرایط و محتوای ساختار، با استفاده از فعل و انفعال بین امواج الکترومغناطیسی با مواد (سیال‌های) مختلف محتوی ساختار، نیز قابل استفاده می‌باشد به گونه‌ای که از طریق شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته، فلزی یا غیرفلزی بودن اهداف، قابل تشخیص بوده و ویژگی‌های محتوای سیال درون مخازن و لوله‌های غیرفلزی، از جمله هوا، آب شیرین و آب شور را نیز می‌توان شناسایی کرد. نتایج حاصل از این پژوهش برای مطالعه موردی یعنی داده‌های واقعی برداشت‌شده در منطقه‌ای از شهرستان شاهرود به منظور آشکارسازی مسیر محور یک قنات پنهان، توانایی روش GPR را در آشکارسازی موقعیت قنات و اهداف مشابه ثابت نمود.

۹- تقدیر و تشکر

نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از آقای مهدی محمدی ویژه به‌خاطر در اختیار قراردادن داده‌های برداشت‌شده در منطقه تشکر ویژه‌ای نمایند.

- Forward Problem of Ground Probing Radar," D. Phil thesis, Department of Electronics, University of NewYork, UK, 1997.
- [22] X. Zeng and G. A. McMechan, "GPR characterization of buried tanks and pipes," J. of Geophysics, vol. 62, no. 3, pp. 797-806, 1997.
- [23] J. L. Davis and A. P. Annan, "Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy," Geophysical Prospecting, vol. 37, pp. 531-551, 1989.
- [24] M. Mohammadi Vizheh, "GPR data acquisition, processing and interpretation in shahrood area, and comparison of results with geoelectrical results in that area", MSc Thesis, Faculty of Mining and Geophysics, Shahrood University of Technology, 2008, In Persian.
- [25] Sensors and software, "Win_EKKO User's Guide," Version 1.0, 1999.
- [26] J. M. Reynolds, "An introduction to applied and environmental geophysics," John Wiley & Sons Ltd, 1997.
- wavelet transform," Computers and Geotechnics, vol. 37, no. 4, pp. 440-448, 2010.
- [18] W. A. Wahab, J. Jaafar, I. M. Yassin, M. R. Ibrahim, "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, 2013.
- [19] D. Ayala-Cabrera, J. Izquierdo, S. J. Ocana-Levario, and R. Perez-Garcia, "3D Model Construction of Water Supply System Pipes Based on GPR Images," International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 7th Intl. Congress on Env. Modelling and Software, San Diego, CA, USA, 2014.
- [20] F. Sagnard, C. Norgeot, X. Derobert, V. Baltazart, E. Merliot, F. Derkx, and B. Lebental, "Parametric pipe detection on the urban site Sense-City using GPR, EGU General Assembly 2016, vol. 18, p. 8173, 2016.
- [21] A. Giannopoulos, "The investigation of Transmission-Line Matrix and Finite-Difference Time-Domain Methods for the

Archive of SID

Detection of Cylindrical Objects Using the GPR Method Based on Numerical Forward Modeling: A Case Study of the Buried Qanat

A. Ahmadpour, R. Ahmadi, A. Kamkar Rouhani*

Shahrood University of Technology

(Received: 04/07/2017, Accepted: 05/11/2017)

Abstract

Ground penetrating radar (GPR) method has the capability to present high-resolution images of subsurface structures; however, the accurate interpretation for the response of subsurface buried targets and structures need the recognition and awareness of the response of various types of subsurface targets. One of the most common objects used as subsurface installation is the horizontal cylindrical target representing kinds of pipes. In the current study, a two-dimensional finite difference forward modeling method has been employed to simulate the GPR response of horizontal cylindrical synthetic models based on different conditions of the reality, in order to use for interpreting actual survey. Finally, the detection of the location of a buried Qanat located in the north-west of Shahrood city, as a case study, proved the effectiveness of the GPR method for this purpose.

Keywords: Ground-Penetrating Radar (GPR), Numerical Forward Modeling, Cylindrical Targets, Radargram, Qanat

* Corresponding author E-mail: kamkarr@yahoo.com