

## شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی دو و سه‌بعدی با هدف کاربردهای ژئوتکنیکی، مطالعه موردی: شناسایی زیرسطحی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی اصفهان

رضا احمدی<sup>۱\*</sup>، نادر فتحیانپور<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی اراک، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: ۹۴/۱۱/۱۴، پذیرش: ۹۵/۰۶/۰۶)

**چکیده:** در پژوهش حاضر از شبیه‌سازی پاسخ رادار نفوذی به زمین (GPR) مدل‌های مصنوعی، برای مقاصد مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است. برای این منظور ابتدا پاسخ GPR دوبعدی مدل‌های مصنوعی به شکل استوانه افقی، منشور دوبعدی مربعی و چندضلعی دلخواه متناظر با اهداف ژئوتکنیکی متداول (ساختارهایی همانند تونل‌ها، قنات‌ها، انواع لوله‌ها و کانال‌ها)، با استفاده از برنامه مدل‌سازی پیشرو به روش اختلاف متناهی دوبعدی بهبودیافته، شبیه‌سازی گردید. سپس پاسخ GPR سه‌بعدی مدل‌های مصنوعی به شکل استوانه قائم و کره (معرف شکل عمومی فضاهای خالی)، با استفاده از نرم‌افزار GPRMAX3D مدل‌سازی شد تا در تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی GPR مورد استفاده قرار گیرند. به‌منظور آشکارسازی ناهمگنی‌های زیرسطحی شامل انواع تاسیسات مدفون، فضاهای خالی، نشست‌ها، گسیختگی‌ها و چاه‌های مدفون در راستای مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی کلان‌شهر اصفهان، به عنوان مطالعه موردی پژوهش حاضر، تعداد ۱۴ پروفیل GPR در امتداد یکدیگر به صورت یک خط برداشت طولانی به طول کلی بیش از ۱۲۰۰ متر برداشت شد. برداشت داده‌ها توسط یک سامانه GPR پوشش‌دار با بسامد مرکزی ۲۵۰MHz انجام گرفت. بررسی نتایج حاصل از تفسیر نگاشت‌های راداری، پس از اعمال فیلترهای مختلف، حاکی از قابلیت بسیار بالای روش GPR در تعیین موقعیت و شناسایی انواع ناهمگنی‌های زیرسطحی است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، بر روی یکی از ناهمگنی‌های تصویر GPR تفسیر شده به‌عنوان یک چاه مدفون، چال قائمی حفر شد و اعتبار نتایج به اثبات رسید.

**کلیدواژه‌ها:** رادار نفوذی به زمین (GPR)؛ هذلولی پاسخ؛ مدل‌سازی عددی؛ اهداف ژئوتکنیکی؛ تونل انتقال تاسیسات برقی اصفهان؛ ناهمگنی زیرسطحی.

### ۱- مقدمه

زیست‌محیطی دارای کاربرد می‌باشد. هدف از کاربرد GPR در زمینه مهندسی ژئوتکنیک، به‌طور ویژه آشکارسازی انواع ساختارهای تونلی (همانند انواع تاسیسات و خطوط انتقال زیرزمینی شامل انواع تونل‌ها، کانال‌ها، قنات‌ها و مجراهای عبور آب و فاضلاب که در اغلب موارد نیز در نواحی شهری قرار دارند)، آشکارسازی فضاهای خالی<sup>۲</sup> و شکستگی‌های درون توده‌های سنگی، شناسایی بتن و آسفالت، بررسی نشست‌های زمین و شناسایی نواحی همگن و غیرهمگن می‌باشد (شکل (۱-الف)). در میان تمام روش‌های ژئوفیزیکی با تفکیک‌پذیری زیاد، GPR اثبات کرده که برای آشکارسازی حفرات، فضاها و مجراهای خالی<sup>۳</sup> در طیف وسیعی از محیط‌های خاک و سنگ، مناسب‌ترین روش است. هدف بیشتر برداشت‌های GPR به‌ویژه حفر تونل، آشکار کردن این

رادار نفوذی به زمین<sup>۱</sup> (GPR) که قابلیت ارائه تصاویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری زیاد از محیط‌های عایق کم‌اتلاف را دارد، یک روش جدید، مفید و بسیار قدرتمند برای شناسایی غیرمخرب تونل‌ها، جاده‌ها و بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن، کف‌پوش‌ها، زیرسازی‌ها، ساختمان‌ها، پل‌ها و ساخته‌های دست بشر همانند بتن، آسفالت و غیره است. روش GPR دارای طیف وسیعی از کاربردهاست به‌گونه‌ای که در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، معدنکاری، تصویرکردن آب‌های زیرزمینی، باستان‌شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، برف و یخ و یخبندان‌شناسی، تاسیسات و مسائل

2. Cavity  
3. Sinkhole

\*نویسنده پاسخگو: R\_ahmadi@arakut.ac.ir  
1. Ground-Penetrating Radar

زده شود. در تمام برداشت‌های GPR، یکی از مولفه‌های میدان الکترومغناطیسی، معمولاً مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود و شدت مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان ثبت می‌شود [۲۳]. متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR نمایش دامنه سیگنال امواج EM بازتابی، در مقابل زمان تاخیر است که رد<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. دستاورد یک برداشت مقطعی داده‌های GPR، مطابق شکل (۲) مجموعه‌ای از ردها در کنار یکدیگر بوده که نگاشت راداری<sup>۴</sup> نام دارد.

در روش GPR نتایج برداشت به‌آسانی به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون، به‌صورت هذلولی است. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی، بزرگ‌تر از سیگنال‌های زمین می‌باشند. قطبش سیگنال GPR نیز که معمولاً براساس علامت ولتاژ نیمه اول دوره تعریف می‌شود، با طبیعت تغییر در ویژگی‌های الکتریکی (به‌ویژه  $\epsilon$ )، کنترل شده و در تفسیر داده‌ها بسیار مفید است [۲۴]. مثلاً در GPR، فلز که یک ماده با مقاومت ظاهری<sup>۵</sup> الکترومغناطیسی خیلی پایین (تقریباً صفر) است، همیشه به یک موجک بازتاب منفی منجر می‌شود؛ حال آنکه یک حفره در خاک یا سنگ، یک ماده با مقاومت بالا را نمایش داده و به یک موجک بازتاب مثبت، منجر خواهد شد.

نبض‌های<sup>۶</sup> GPR مطابق رابطه (۱) با نسبت پهنای باند بر بسامد مرکزی، مشخص می‌شوند:

$$R = \frac{B}{f_c} \quad (1)$$

که B پهنای باند و  $f_c$  بسامد مرکزی آنتن می‌باشد. میان تفکیک‌پذیری، عمق تجسس و بسامد مرکزی نبض‌های GPR ارتباط وجود دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش بسامد مرکزی، تفکیک‌پذیری افزایش و عمق تجسس کاهش می‌یابد. کاهش بسامد مرکزی سامانه رادار، تاثیر مهمی روی افزایش عمق نفوذ آن دارد. دلیل این امر آن است که هرچه بسامد مرکزی کاهش یابد، تضعیف سیگنال در محیط کم می‌شود. از طرف دیگر با افزایش بسامد مرکزی یا پهنای باند وسیع‌تر، تفکیک‌پذیری رادار افزایش می‌یابد. بنابراین هدف سامانه‌های GPR دستیابی به نسبت پهنای باند به بسامد مرکزی (R) در حدود ۱ یا بیشترین میزان تفکیک‌پذیری می‌باشد.

انتخاب بسامد عملکرد بهینه برای یک برداشت راداری، بسیار مهم است. بدیهی است انتخاب بسامد مرکزی سامانه GPR

نواحی خطرناک، قبل از شروع عملیات ساخت‌وساز و یا در حین اجرای آن می‌باشد.

GPR به‌عنوان یک روش غیرمخرب<sup>۱</sup> (NDE) مدت زمانی است که مدنظر قرار گرفته است [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰] و در طی سال‌ها برای مطالعه جاده‌ها و بزرگراه‌ها [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]، راه‌آهن، خطوط لوله و خطوط تونل [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰] و ساختارهای گوناگون دیگر همانند ساختمان‌ها و پل‌ها [۲۱، ۲۲] مورد استفاده قرار گرفته است.

هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی دوبعدی و سه‌بعدی متناظر با اهداف متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی است. همچنین براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها و به‌عنوان یک مطالعه میدانی، وضعیت ناهمگنی‌های زیرسطحی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی در خیابان توحید اصفهان با استفاده از روش GPR مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور برداشت‌های متعدد و هدفمند پروفیل‌های GPR در راستای محور تونل و بعضاً عمود بر راستای آن انجام شد و نگاشت‌های راداری با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی پیشرو دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌های مصنوعی تفسیر گردید.

## ۲- مبانی فیزیکی و نظری روش GPR

انواع سامانه‌های GPR سیگنال‌های الکترومغناطیسی در محدوده بسامدی ۱MHz تا بیش از ۱GHz را از طریق فرستنده، ارسال کرده و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را از طریق گیرنده، آشکار می‌کنند (شکل ۱). از آنجایی که سیگنال‌های GPR از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند، بنابراین الکترومغناطیس پایه و اساس GPR می‌باشد. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، به‌گونه‌ای که تمام پدیده‌های الکترومغناطیس در مقیاس ماکروسکوپی توسط این معادلات قابل توصیف بوده و تمامی مسائل مربوط نیز با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب، قابل حل می‌باشند. خواص فیزیکی ماده که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط، کنترل می‌کنند، شامل گذردهی دی‌الکتریک ( $\epsilon$ )، هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) و نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ ) می‌باشند. در بسیاری از کاربردهای ژئوتکنیکی GPR تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف بوده و بنابراین در بیشتر مواقع  $\epsilon$  و  $\sigma$  مهم‌ترین پارامترها می‌باشند.

انرژی رادار ضمن سیر در درون زمین، به‌صورت یک طرح مخروطی، گسترش می‌یابد (شکل (۱-ب)). اندازه تقریبی ردپای تابش<sup>۲</sup> در عمقی از زمین، می‌تواند از روی بسامد آنتن و گذردهی دی‌الکتریک زمینی که انرژی از درون آن عبور می‌کند، تخمین

3. Trace  
4. Radargram  
5. Impedance  
6. Pulse

1. Non-Destructive Evaluating  
2. Footprint

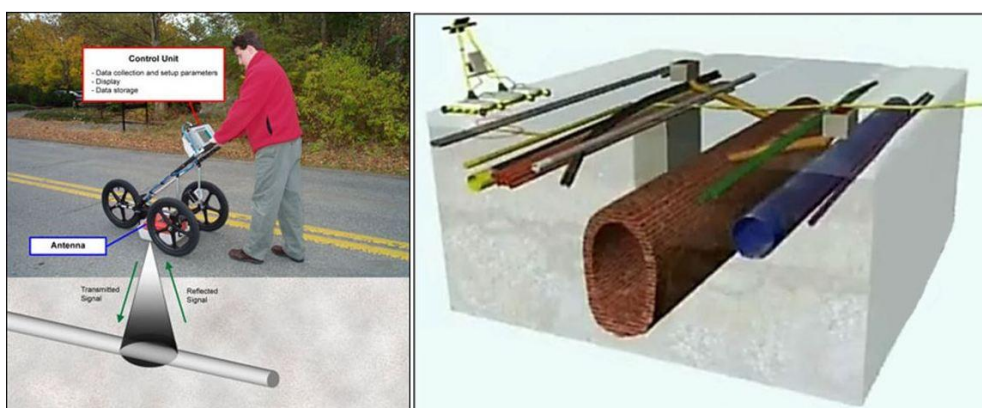
به شناسایی رفتار مدل‌های مختلف در پاسخ‌ها شده و عملیات مدل‌سازی وارون داده‌های GPR در کاربردهای عملی را فراهم نماید. بنابراین هدف از مدل‌سازی داده‌های GPR آن است که معلوم شود تحت شرایط مختلف محیطی، چه اطلاعات معقولی از داده‌های واقعی میدانی به دست می‌آید.

برای دستیابی به این هدف می‌توان از روش‌های عددی مختلفی استفاده نمود که در همه آنها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، براساس رفتار امواج EM و برهمکنش آنها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود. روش اختلاف متناهی به‌خاطر دارا بودن مزیت‌هایی همانند درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد به‌کاررفته، در میان روش‌های عددی مختلف، مورد توجه بیشتری قرار گرفته و کاربرد بیشتری دارد [۲۵].

متناسب با نوع هدف صورت می‌گیرد و همواره بایستی یک توازن بین عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری سامانه، برقرار شود. به‌عنوان مثال اگر هدف، شناسایی یک شیء بزرگ مدفون در زیر زمین باشد، انتخاب بسامد مرکزی در حدود ۲۰۰MHz تا ۵۰۰MHz مناسب است و اگر هدف، شناسایی حفرات کوچک درون یک بلوک بتنی کوچک باشد، آنگاه بسامد مرکزی زیاد در حدود ۹۰۰MHz تا بیش از ۱GHz مورد نیاز است.

### ۳- مدل‌سازی عددی پیشرو داده‌های GPR به روش اختلاف متناهی

رفتار حاکم بر میدان‌های GPR را می‌توان توسط معادلات ماکسول و شرایط مرزی مناسب، شبیه‌سازی نمود. پاسخ سامانه GPR برای مدل‌های مصنوعی فرضی مختلف متناظر با اهداف و ساختارهای ژئوتکنیکی واقعی، باید توسط یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی تولید شود تا این هسته مدل‌سازی پیشرو منجر



(ب)

(الف)

شکل (۱): الف- شکل طرح‌وار برداشت مقطعی GPR برای آشکارسازی اهداف ژئوتکنیکی و انواع تاسیسات مدفون در زیر زمین (ویرایش شده از [۲۶])، ب- نمایش سیگنال ارسالی و بازتابیده و رد پای رادار [۲۷].

توسط ایروینگ<sup>۳</sup> و نایت<sup>۴</sup> [۲۹] مورد استفاده قرار گرفته و برای مدل‌سازی پیشرو اشیاء مصنوعی فرضی متناظر با اهداف متداول در بررسی‌های ژئوتکنیکی، در محیط نرم‌افزار MATLAB بهبود یافته است [۳۰]. تئوری پایه کدهای مدل‌سازی پیشرو GPR، معادلات کرل ماکسول (قانون القای فاراده و تعمیم قانون مدارای آمپر) در حوزه بسامد و مطابق روابط (۲) و (۳) می‌باشند.

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H \quad (2)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + i\omega\epsilon E \quad (3)$$

که در آن،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای،  $E$  و  $H$  نیز به‌ترتیب

برای مدل‌سازی پیشرو دوبعدی داده‌های GPR در پژوهش حاضر، بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو بر روی سطح زمین قرار دارند)، که آنتن‌ها عمود بر صفحه برداشت x-z توجه می‌شوند، به‌روش اختلاف متناهی در حوزه زمان با فرمول‌بندی روش میدان مغناطیسی عرضی<sup>۱</sup> (مد TM) در یک شبکه غیرهم‌مبدأ<sup>۲</sup> شبیه‌سازی شده است. در این روش مولفه‌های میدان در مکان و زمان از یکدیگر فاصله دارند به‌گونه‌ای که تخمین‌های اختلاف محدود مشتقات جزئی در هر معادله، در مرکز مکان- زمان قرار می‌گیرد [۲۸].

برای این منظور روش اختلاف متناهی دوبعدی ارائه شده

3. Irving  
4. Knight

1. Transverse Magnetic Field  
2. tagged grid

بخش عمده‌ای از محاسبات، از درون مرحله مدل‌سازی پیشرو خارج و برای دستیابی به تفکیک‌پذیری زیاد، در حوزه فوریه، عملیات دیگری بر روی آن انجام می‌شود، این محاسبات در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام گرفته و نتیجه آن بهبود کیفی و دیداری پیوستگی ردها در پاسخ نهایی مقطع GPR و تولید پاسخ با تفکیک‌پذیری زیاد می‌باشد. شکل (۳) نمودار جریان الگوریتم مدل‌سازی پیشرو اختلاف متناهی داده‌های GPR با تفکیک‌پذیری زیاد را نشان می‌دهد. افزودنی است که در کدهای تهیه شده برای این منظور، به‌طور پیش‌فرض بین هر دو رد متوالی، تعداد ۱۰ رد مصنوعی ایجاد می‌شود.

### ۳-۱- شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی

در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی دوبعدی پاسخ GPR اشیای مصنوعی فرضی متناظر با اهداف متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی، همانند استوانه افقی منفرد (معرف ساختارهای تونلی، انواع لوله‌ها، قنات‌ها و مجراهای استوانه‌ای شکل)، منشور دوبعدی به شکل مستطیل (معرف کانال‌ها و فضاهای خالی) و چندضلعی دلخواه (معرف فضاهای خالی به‌طور عام) از الگوریتم مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به‌روش اختلاف متناهی دوبعدی بهبودیافته استفاده شد. برای شبیه‌سازی سه‌بعدی پاسخ GPR اهداف مصنوعی فرضی متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی، همانند کره و استوانه قائم (معرف فضاهای خالی) نیز از اختلاف متناهی سه‌بعدی نرم‌افزار GPRMAX3D استفاده شد.

یکی از اهداف اصلی بررسی‌های غیرمخرب ژئوتکنیکی با استفاده از روش GPR، شناسایی فضاهای خالی موجود در محیط‌های مختلف مورد بررسی است. به‌همین جهت بایستی نحوه پاسخ این اشیاء به‌روش شبیه‌سازی مدل‌های مصنوعی، شناسایی شده و نتایج آن در مسائل عملی بکار رود. از آنجایی که فضاهای خالی ممکن است به شکل‌های مختلفی در محیط حضور داشته باشند، بنابراین در مدل‌سازی پیشرو، شبیه‌سازی پاسخ GPR برای مدل‌های شامل فضای خالی با مقطع دوبعدی به‌شکل دایره، منشور در مقطع دوبعدی به‌شکل مربع و چندضلعی دلخواه صورت گرفته است.

در عمق یک متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی منشور) در محیط میزبان از جنس خاک رس مرطوب است، پاسخ سقف مدل (T) به‌صورت یک شبه‌هذلولی با قله مسطح و پاسخ کف مدل (B)، به‌صورت یک نیمه‌هذلولی با قله مسطح است؛ بنابراین در تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی GPR، این نوع پاسخ نشانه حضور یک هدف منشوری شکل مدفون در زیر سطح زمین می‌باشد. در مدل ۳ یک چندضلعی دوبعدی توخالی واقع در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی، نشان داده شده است.

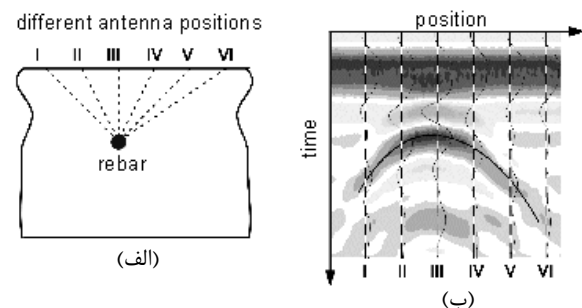
بردارهای شدت میدان الکتریکی و شدت میدان مغناطیسی می‌باشند.

از آنجایی که مطابق شکل (۲)، سیگنال ردهای پاسخ GPR در محدوده ناهمگنی‌های زیرسطحی، یک جابجایی زمانی دارند، این ویژگی اجازه به‌کارگیری تبدیل فوریه ردها و اعمال جابجایی زمانی در حوزه بسامدی را فراهم می‌آورد. با این نگرش از تبدیل فوریه سریع هر دو رد متوالی که دارای جابجایی زمانی معین می‌باشند و اعمال قضیه جابجایی زمانی در حیطه فوریه، مطابق رابطه (۴) استفاده شده است [۳۱].

$$f(t - t_0) \stackrel{\mathcal{F}}{\Leftrightarrow} e^{-i\omega t_0} F(\omega) \quad (4)$$

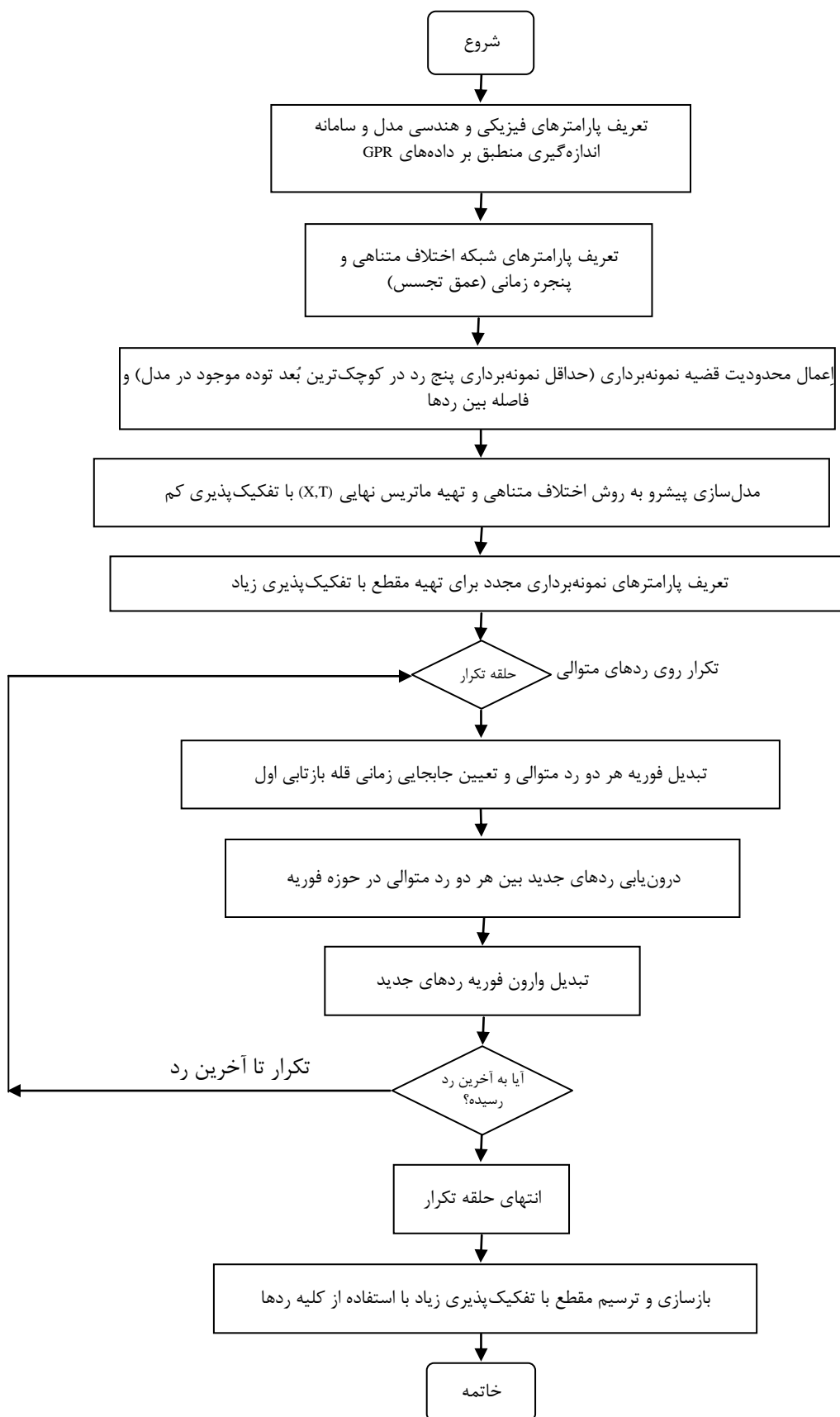
که در این رابطه  $t$  و  $t_0$  زمان،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای و  $\mathcal{F}$  علامت تبدیل فوریه است.

در این روش ابتدا بیش‌ترین مقدار دامنه هر رد به‌عنوان شروع سیگنال بازتابی اول، برای تمام ردها شناسایی شده، سپس اختلاف زمانی بین سیگنال بازتابی اول در هر دو رد متوالی، تعیین گردیده و به‌صورت جابجایی زمانی در فواصل مکانی بین هر دو رد متوالی، ذخیره می‌شود. بعد با استفاده از تبدیل فوریه هر دو رد مجاور و داشتن این میزان جابجایی زمانی، با استفاده از درون‌یابی در فاصله بین هر دو رد متوالی و ایجاد دامنه‌های پاسخ‌های بازتابی مقادیر ردهای تخمینی، به تعداد دلخواه، رد مصنوعی محاسبه می‌شود. از آنجایی که پاسخ GPR اغلب اهداف مدفون مطابق شکل (۲) به‌صورت هذلولی است، بنابراین برای درون‌یابی بین دو رد مجاور، به‌منظور حفظ شکل منحنی‌وار، از درون‌یابی یک‌بعدی مکعبی<sup>۱</sup> استفاده شده است. به‌منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و تمرکز بیشتر بر روی پاسخ هدف، رخداد مربوط به موج مستقیم (هوا و زمین) که همواره به‌صورت رخداد خطی افقی می‌باشد، از پاسخ حذف شده است.



شکل (۲): الف- میلگرد مدفون در زیر زمین، ب- پاسخ GPR هذلولوی آن با نمایش ردها (ویرایش شده از [۳۲]).

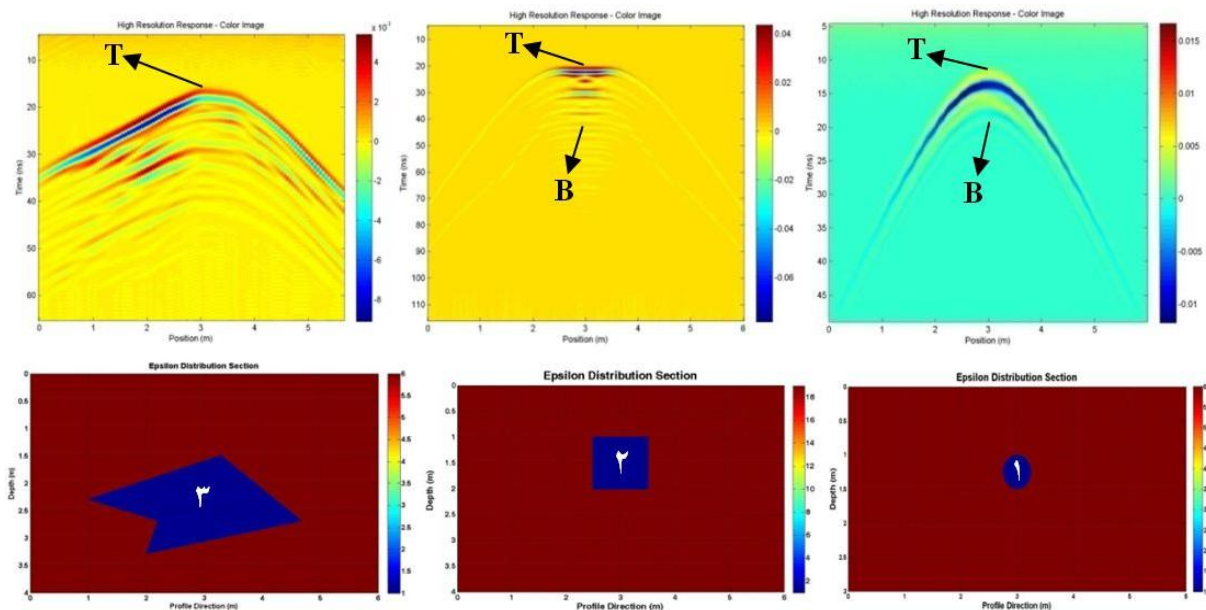
از آنجایی که در فرم بهبود یافته برنامه مدل‌سازی پیشرو،



شکل (۳): نمودار جریان الگوریتم مدل‌سازی پیشرو اختلاف متناهی داده‌های GPR با تفکیک‌پذیری زیاد.

می‌دهند؛ ضمن آن که شدت بازتاب پاسخ قله (بالترین بخش مدل که به صورت یک نقطه است) نسبت به پاسخ اضلاع مدل، قوی‌تر است. در تجزیه و تحلیل و تفسیر تصاویر GPR، وجود علائم مذکور از جمله پاسخ به صورت هذلولی نامتقارن، نشانه‌ای برای شناسایی توده‌های چندضلعی دوبعدی و تعیین موقعیت قله چندضلعی می‌باشند.

عمق دفن این مدل (فاصله سطح زمین تا بالاترین نقطه مدل) برابر با ۱/۵ متر است. بررسی پاسخ GPR مربوط در قسمت بالای شکل (۴) نشان می‌دهد که نقطه قله پاسخ (T)، مربوط به بالاترین نقطه هدف مدفون بوده و مشخص کننده موقعیت آن می‌باشد. همواره اضلاع بالایی مدل چندضلعی دوبعدی خود را در پاسخ GPR به صورت نواحی با دامنه بازتاب‌های بزرگ‌تر نشان

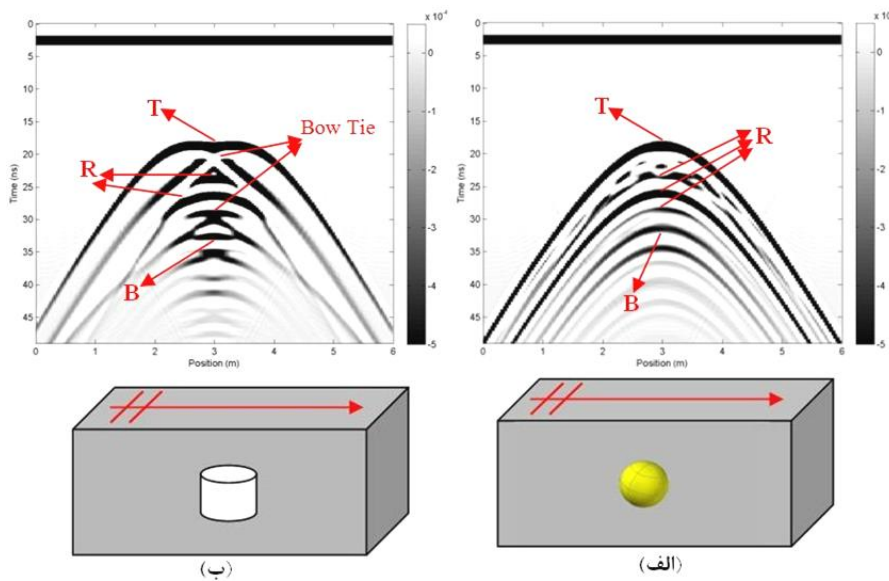


شکل (۴): مدل هندسی - فیزیکی و پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی. مدل‌های ۱ تا ۳ به ترتیب شامل استوانه افقی واقع در خاک رس سیلتی، منشور مربعی واقع در خاک رس مرطوب و چندضلعی دلخواه واقع در خاک رس سیلتی می‌باشند.

بیشتر حفرات در طبیعت، کارستی هستند و محیط میزبان آنها اغلب آهکی می‌باشد، اما در مدل‌سازی‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر، به منظور تناسب بیشتر نتایج شبیه‌سازی با نگاشت‌های راداری مطالعه موردی، محیط میزبان، خاک رس سیلتی در نظر گرفته شده است. اندازه مدل سه‌بعدی  $3 \times 3 \times 6$  متر و مقدار بسامد مرکزی سیگنال ارسالی نیز ۲۵۰ مگاهرتز انتخاب شد. در بررسی فضاهای خالی استفاده از بسامدهای متوسط در حدود ۲۵۰ MHz، مناسب است. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که در پاسخ GPR مدل کروی توخالی، بین پاسخ سقف (T) و کف مدل (B)، یک سری رخدادهایی وجود دارند (R) که ناشی از بازتاب‌های چندگانه بوده و به نام پدیده پژواک ۲ نامیده می‌شوند. در پاسخ GPR مدل استوانه قائم توخالی نیز، علاوه بر حضور پژواک‌های معمول (R)، بین پاسخ سقف (T) و کف مدل (B)، یک سری رخدادهایی وجود دارند که به فرم پایون ۳ بوده و در حقیقت نوعی پژواک می‌باشند. این نوع پاسخ، خاص اهداف استوانه‌ای شکل قائم توخالی می‌باشد.

در عمل اغلب برداشت‌های GPR به‌ویژه برای بررسی‌های ژئوتکنیکی به صورت دوبعدی انجام می‌گیرد و در نتیجه تفسیر نگاشت‌های راداری دوبعدی، رضایت‌بخش و کافی به نظر می‌رسند. به هر جهت به منظور بررسی جزئیات بیشتر، انجام تعبیر و تفسیرهای واقع‌گرایانه‌تر و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج برداشت‌های واقعی، انجام شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی سودمند است.

حفرات استوانه‌ای و کروی فرم‌های استاندارد و متداول بیشتر حفرات، منافذ<sup>۱</sup> و فضاهای خالی هستند، یعنی اغلب ساختارهای حفره‌ای می‌توانند توسط استوانه قائم و کره، مدل‌سازی شوند. به عبارت دیگر این‌ها، مدل‌های هندسی ساده و متقارن برای مدل‌سازی حفره می‌باشند. بنابراین پاسخ GPR اشیاء به شکل کره و استوانه قائم متناظر با ساختارهای حفره‌ای، با استفاده از نرم‌افزار GPRMAX3D شبیه‌سازی شد که در شکل ۵ یک مقطع قائم در راستای پیمایش مقطع GPR از پاسخ سه‌بعدی مشاهده می‌شود.



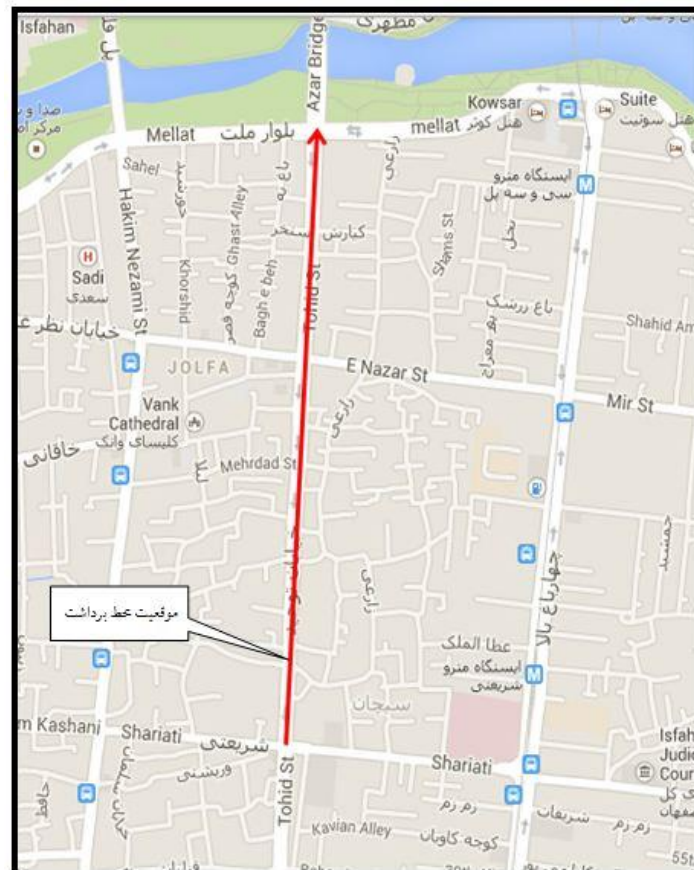
شکل ۵: پاسخ GPR الف- کره توخالی به قطر ۱ متر و ب- استوانه قائم توخالی به قطر ۱ متر و ارتفاع ۱ متر. هر دو شیء در عمق ۱ متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی شیء) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی قرار دارند.

#### ۴- مطالعه میدانی

##### ۴-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و مقاطع برداشت GPR

در شکل (۶) موقعیت جغرافیایی خیابان توحید اصفهان و موقعیت مقاطع برداشت GPR در امتداد یکدیگر به صورت

یک خط برداشت طولانی از جنوب به شمال، در راستای مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی کلان شهر اصفهان (از چهار راه پلیس به سمت زاینده‌رود)، نشان داده شده است.



شکل (۶): موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (خیابان توحید از چهار راه پلیس تا زاینده‌رود) با نمایش موقعیت خط برداشت GPR بر روی آن.



#### ۴-۲- بررسی های ژئوفیزیکی به روش GPR

هدف اصلی از انجام عملیات برداشت ژئوفیزیکی به روش GPR در این محدوده، بررسی کلیه ناهمگنی های زیرسطحی اعم از آشکارسازی انواع تاسیسات مدفون، فضاها، خالی، نشست ها، به هم ریختگی ها، گسیختگی ها و آشکارسازی چاه های مدفون به منظور بازرسی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی در زیر خیابان توحید از چهار راه پلیس به سمت زاینده رود می باشد.

#### ۴-۲-۱- جمع آوری داده ها

برداشت GPR از طریق ۱۴ پروفیل در امتداد یکدیگر به صورت یک خط برداشت طولانی از جنوب به شمال، به طول کلی بیش از ۱۲۰۰ متر در راستای محور تونل و ۳ پروفیل کوچک در راستای عمود بر محور تونل صورت گرفت. در مراحل برداشت میزان سرعت سیر امواج EM در محیط، براساس جنس مواد تشکیل دهنده به طور متوسط  $0.12m/ns$  در نظر گرفته شد. عملیات برداشت GPR توسط یک سامانه GPR پوشش دار<sup>۱</sup> مجهز به آنتن های با بسامد مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز انجام شد. در حالت ایده آل (محیط زمین شناسی معمولی بدون حضور مواد هادی الکتریکی) سامانه GPR مجهز به آنتن با بسامد مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، دارای تفکیک پذیری در حدود ۱۰ سانتی متر و بیشترین میزان عمق نفوذ، در حدود ۱۰ متر می باشد [۳۳] و در مورد محیط های زمین شناسی متداول، دارای میزان تفکیک پذیری در حدود ۳۰ سانتی متر و بیشینه عمق تجسس در حدود ۵ متر است [۲۴].

#### ۴-۲-۲- پردازش داده ها

داده های خام GPR شامل تمام اطلاعات اولیه می باشند و هدف، استخراج اطلاعات مطلوب نهفته در آنهاست. در عمل این کار به معنی افزایش نسبت سیگنال به نوفه پاسخ های دارای پیوستگی<sup>۲</sup> و ارائه داده ها به صورتی است که بتوانند شرایط زیرسطحی را به طور دقیق نمایان کنند [۳۴]. برای بهبود کیفیت داده های خام و در نتیجه ساده تر کردن تفسیر، باید گام های پردازشی مناسب برداشته شوند. به منظور پردازش، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده های GPR منطقه، از نرم افزارهای Ground Vision و ReflexW استفاده شد. نرم افزار اول برای نمایش نگاشت های راداری و نرم افزار دوم برای انجام تصحیحات و اعمال پردازش های مورد نیاز به کار می رود. مهم ترین عملیات پیش پردازش و پردازشی اعمال شده بر روی داده ها جهت ارائه مقاطع نهایی، شامل تصحیح زمان صفر<sup>۳</sup>، فیلترسازی دی واو<sup>۴</sup>

(حذف روند بسامد خیلی پایین از داده ها)، حذف شیفت جریان مستقیم، فیلترهای میان گذر<sup>۵</sup> به ویژه باترورث<sup>۶</sup>، حذف متوسط<sup>۷</sup>، حذف زمینه<sup>۸</sup> و انواع تقویت<sup>۹</sup> دامنه امواج بازگشتی می باشد.

رانه<sup>۱۰</sup> دستگامی، ناپایداری الکترونیکی، کابل ها، عدم جفت شدگی آنتن ها به زمین و تغییرات در شکاف هوایی<sup>۱۱</sup> می توانند موجب پرش هایی در زمان اولین رسید موجک هوا- زمین شوند که معمولاً به عنوان نقطه زمان- صفر شناخته می شود [۳۵، ۳۶، ۳۷]. این فرآیند روی موقعیت مرز زمین در مقطع، توالی زمانی رخ داده های آخر و میزان توازن در عرض ردها و مقاطع مجاور، تاثیر می گذارد. این نتیجه معمولاً با استفاده از بعضی معیارهای مشخص همانند نقطه اولین شکست موج هوا یا اولین پیک منفی رد به دست می آید. بنابراین قبل از اعمال مراحل پردازشی، باید ردها با یک موقعیت زمان- صفر مشترک تعدیل شوند.

واو<sup>۱۲</sup> به وسیله اشباع سیگنال ثبت شده با رسیدهای اولیه (مثلاً موج زمین- هوا، [۳۸]) و یا اثرات جفت شدگی القایی ایجاد می شود و نحوه پردازش، حذف روند سیگنال بسامد خیلی پایین از داده ها است که برای تصحیح مؤثر آن به یک فیلتر بالاگذر بهینه نیاز می باشد [۳۹، ۴۰، ۴۱]. مثلاً برای یک آنتن با بسامد مرکزی ۲۵۰ MHz حدود ۵ MHz یعنی حدود یک پنجاهم بسامد مرکزی است. این گام اغلب دی واو کردن داده ها نامیده می شود.

برای حذف انتقال جریان مستقیم یا مؤلفه DC، میانگین سیگنال باید به میانگین سطح صفر، کاهش پیدا کند. برای حذف لکه های<sup>۱۳</sup> موجود در نگاشت راداری، اعمال یک فیلتر میان گذر همانند باترورث<sup>۱۴</sup> با پهنای باند از ۰/۵ تا ۱/۵ برابر بسامد مرکزی، مناسب است. مثلاً برای پیک بسامد ۲۵۰ MHz محدوده ۴۰۰-۱۰۰ MHz انتخاب می شود.

فیلتر تفریق متوسط، میانگین تعدادی رد را از ردهای مجزا کم می کند. این فیلتر رخدادهای افقی را تضعیف و رخدادهای شیب دار را تقویت می نماید.

حذف زمینه نیز یکی از متداول ترین عملیات های پردازشی کاربردی ویژه داده های GPR است که پس از میانگین گیری تمام ردها یا تعداد مشخصی رد در یک مقطع، آن را از هر رد، کم

5. Band pass  
6. Butterworth  
7. Subtract mean  
8. Background Removal  
9. Gain  
10. Drift  
11. Air-gap  
12. Wow  
13. Speckles  
14. Butterworth

1. Shielded  
2. Coherent  
3. Time zero correction  
4. Dewow



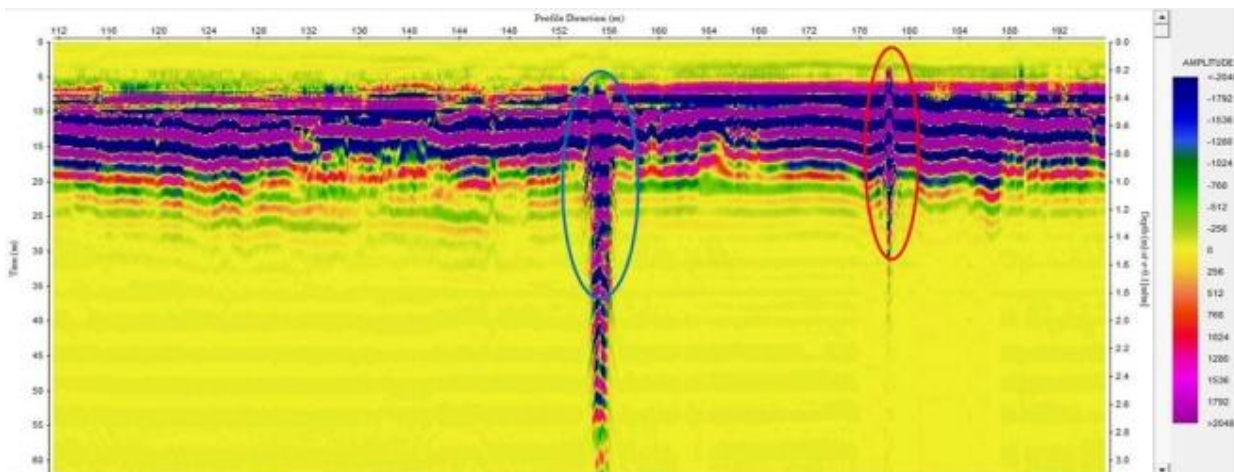
پژوهش حاضر برای نگاشت‌های راداری منطقه، از طریق سعی و خطا و مشاهده خروجی، توابع تقویت مختلف بر روی داده‌ها خطا آزمایش شد و در نهایت توابع تقویت نمایی و خودکار مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه تفسیر نتایج پردازش داده‌های برخی از نگاشت‌های راداری منطبق بر مقاطع برداشت شده، با نمایش محدوده ناهمگنی‌ها در تصاویر آورده شده است.

شکل (۷) بخشی از مقطع نگاشت راداری منطبق بر پروفیل GPR به طول ۲۱۵ متر، برداشت شده در راستای خیابان توحید از جنوب به شمال، به سمت زاینده‌رود را نشان می‌دهد. در این شکل حضور یک چاه قائم یا کانال مدفون پر شده با تخته سنگ‌ها در ۱۵۵ متری شروع پروفیل، واقع در عمق حدود ۰/۴ متری، در مرکز تصویر با بیضی آبی رنگ نمایش داده شده است. مسطح بودن پاسخ سقف هدف، دال بر حضور یک استوانه قائم و یا یک ساختار منشوری است و حضور پژواک‌ها تا اعماق زیاد، بر وجود یک چاه قائم دلالت می‌نماید. موقعیت این نقطه بر روی سطح زمین به وسیله عملیات نقشه‌برداری دقیق، ۱۴۴۰ نشانه‌گذاری شده است. به منظور کنترل نتایج، بر روی این ناهمگنی تصویر GPR تفسیر شده به عنوان یک چاه مدفون، یک چال قائم در موقعیت ۱۴۴۰ حفاری شد و اعتبار نتایج به اثبات رسید. همچنین پاسخ یککابل برق‌واقع در ۱۷۸ متری طول پروفیل در عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر با بیضی‌قرمز رنگ مشخص شده که کم بودن پهنای هذلولی پاسخ و ادامه‌دار بودن بازتاب‌ها تا اعماق زیاد، از علائم چنین اهدافی می‌باشد.

می‌کند. فیلتر بسیار مفیدی برای مواد نسبتاً پراتلاف (خاک‌های مرطوب)، حذف نوفه زمینه و نوفه حلقوی شدن<sup>۱</sup> [۴۲] در داده‌ها بوده، اما می‌تواند بازتابنده‌های افقی مسطح پیوسته را نیز حذف کند. گفتنی است که نوفه حلقوی شدن در GPR به صورت یک‌سری رخدادهای افقی دارای پیوستگی و تناوبی ظاهر می‌شود. در واقع این پدیده مربوط به موج‌های با طول موج بسیار بلند تا بی‌نهایت و در نتیجه عدد موج صفر یا نزدیک به صفر ظاهر می‌شود. بیشتر مواقع حذف زمینه به صورت یک فیلتر بالاگذر یا حذف رد متوسط انجام می‌گیرد.

نبض‌های GPR با انتشار به درون زمین به سرعت تضعیف می‌شوند. سیگنال‌های مربوط به اعماق زیاد خیلی کوچک بوده و نمایش این اطلاعات بر حسب زمان همراه با سیگنال‌های اعماق کمتر، مشکل است. هنگامی که دامنه نمایش برای سیگنال‌های عمق کم، بهینه باشد، رخدادهای اعماق بیشتر ممکن است قابل دیدن یا قابل تشخیص نباشند. به علت تضعیف سیگنال در اثر اتلاف‌های ناشی از گسترش هندسی<sup>۲</sup> (یا واگرایی کروی<sup>۳</sup>) و پدیده جذب و نیاز به افزایش حضور رسیده‌های آخر، تقویت‌های زمانی مورد نیازند. برای تقویت داده‌های راداری، انواع مختلفی از توابع تقویت، همانند تقویت خطی، نمایی و کروی (SEC<sup>۴</sup>) و خودکار (AGC<sup>۵</sup>) وجود دارد که ویژگی‌های هر یک با دیگری متفاوت است. در تقویت، سیگنال و نوفه با هم تقویت می‌شوند. به طور کلی تقویت باعث بهبود فرم مشاهده‌ای داده‌ها شده و اغلب باعث تغییر ساختار داده‌ها (به صورت غیرقابل برگشت) می‌شود. در



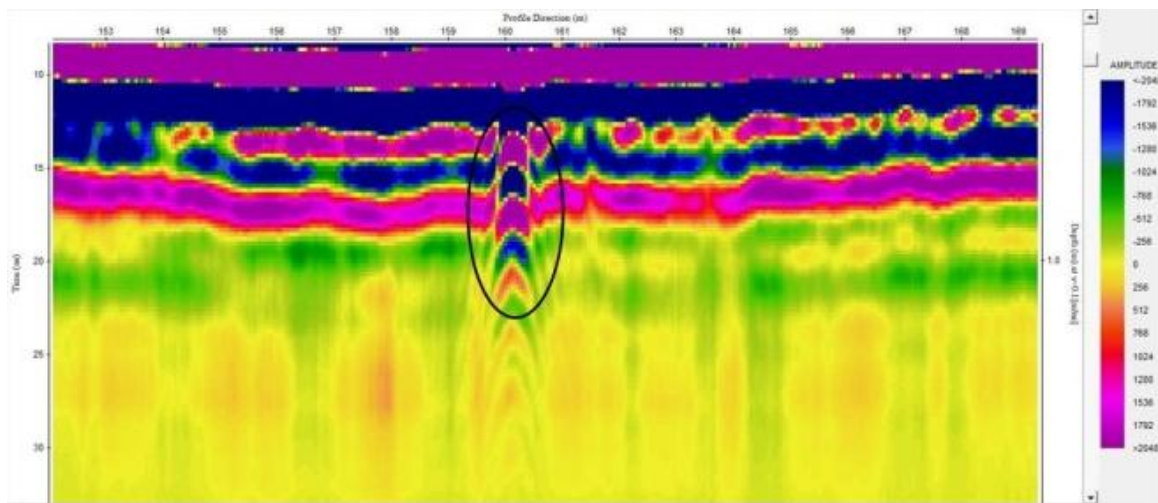
شکل (۷): حضور یک چاه قائم مدفون پر شده با تخته سنگ‌ها در مرکز تصویر (بیضی آبی رنگ) و کابل برق واقع در عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر (بیضی قرمز رنگ).

1. Ringing noise
2. Geometrical spreading
3. Spherical divergence
4. Spherical Exponential Compensation
5. Automatic Gain Control

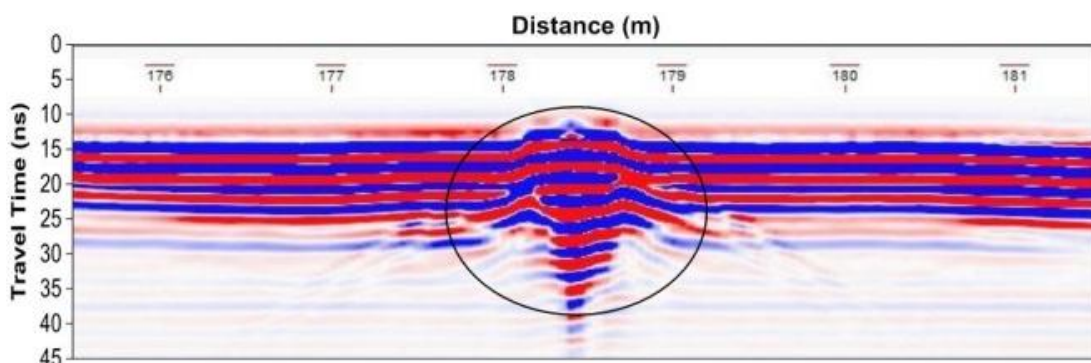
اغلب قطر لوله‌های انتقال آب کمتر از نیم متر و قطر لوله‌های فاضلاب، نسبتاً زیاد است.

بخشی از نگاشت راداری منطبق بر پروفیل GPR به طول ۴۰۴ متر برداشت شده در راستای خیابان توحید از جنوب به شمال، در شکل (۹) نشان داده شده است. حضور دو لوله، یکی غیرفلزی یعنی لوله فاضلاب احتمالاً سیمانی (سمت راست) به قطر تقریبی ۰/۶ متر و دیگری فلزی (سمت چپ) به قطر تقریبی ۲۵ سانتی‌متر، در مجاورت یکدیگر در فاصله ۱۷۷/۵ تا ۱۷۹ متری شروع پروفیل، با بیضی مشکی رنگ در مرکز تصویر نشان داده شده است. تشخیص جنس لوله‌ها براساس نوع پاسخ GPR امکان‌پذیر است. دلیل فلزی بودن جنس لوله سمت چپ، معکوس شدن پلاریته سیگنال بازتابی می‌باشد که از علائم شاخص پاسخ GPR فلزات است [۴۳]. معکوس شدن پلاریته، با معکوس شدن ترتیب رنگی پاسخ سقف لوله سمت چپ نسبت به پاسخ سقف لوله سمت راست، قابل مشاهده است. در این شکل تک هذلولی‌های متقارن متعدد واقع در اعماق کم، مربوط به به هم‌ریختگی‌ها و پرشدگی‌های روی سطح این دو لوله می‌باشند.

در شکل (۸) حضور یک لوله فاضلاب بتنی (احتمالاً ترکیب سیمان و آژبست) به قطر تقریبی یک متر واقع در عمق تقریبی ۱/۵ متر در فاصله ۱۶۰ متری شروع پروفیل برداشت شده به طول کلی ۴۰۰ متر، با بیضی مشکی رنگ در مرکز نگاشت راداری، نشان داده شده است. در این شکل پدیده گسیختگی و نشست زمین در مرکز تصویر، مشهود است. غیرفلزی بودن جنس لوله با توجه به نوع پاسخ GPR (حضور پاسخ سقف و کف لوله و نیز پلاریته آن) قابل تشخیص است زیرا در مورد اهداف فلزی، هیچ بازتابی از کف هدف مشاهده نمی‌شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن می‌باشد [۴۳]. با توجه به پهنای هذلولی پاسخ و عمق سطح بالایی هذلولی در منطقه شهری، هدف مدفون، لوله فاضلاب می‌باشد. جنس لوله‌های فاضلاب متداول، عمدتاً بتنی و یا سیمانی است که برای استحکام بیشتر، معمولاً مقداری رشته‌های آژبست در ترکیب آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌رجهت پاسخ GPR لوله‌های غیرفلزی مختلف همانند فایبرگلاس، پلاستیک PVC (پولیکا) و بتن، تقریباً یکسان است که معمولاً لوله‌های انتقال آب از جنس فلزی، فایبرگلاس و پلاستیک PVC بوده و جنس لوله‌های انتقال فاضلاب، بتن و سیمان می‌باشد.



شکل (۸): حضور لوله فاضلاب احتمالاً بتنی در مرکز تصویر همراه با گسیختگی و نشست زمین (بیضی مشکی رنگ).



شکل (۹): حضور دو لوله در مجاورت یکدیگر نمایش داده شده با بیضی مشکی رنگ در مرکز تصویر.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با استفاده از مدل‌سازی پیشرو به‌روش اختلاف متنای دو بعدی بهبود یافته، پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی فرضی متناظر با ساختارهای ژئوتکنیکی متداول همانند استوانه افقی، منشور دو بعدی مربعی و چندضلعی دلخواه، شبیه‌سازی شد. سپس پاسخ GPR سه بعدی مدل‌های مصنوعی به شکل استوانه قائم و کره (معرف شکل عمومی فضاهاى خالی) با استفاده از نرم‌افزار GPRMAX3D مدل‌سازی گردید. بعد مطالعات ژئوفیزیکی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی خیابان توحید واقع در کلان‌شهر اصفهان با استفاده از روش غیرمخرب GPR و به‌کمک نتایج مدل‌سازی پیشرو انجام شد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی به‌منظور شناسایی ساختار زیرسطحی از جمله انواع تاسیسات مدفون، فضاهاى خالی، نشست‌ها، گسیختگی‌ها و چاه‌های مدفون در راستای مسیر حفر تونل، مورد استفاده قرار گرفت.

براساس مطالعات ژئوتکنیکی و شناسایی ساختار با استفاده از روش GPR، موقعیت انواع تاسیسات مدفون، فضاهاى خالی و چاه‌های مدفون، نشست‌ها، انفصال و گسیختگی‌ها به‌عنوان محل‌های ناامن، شناسایی شدند تا جهت جلوگیری از مخاطرات در حین اجرای عملیات حفاری تونل و استحکام و نگهداری آن در آینده، مورد استفاده قرار گیرند. عملکرد روش GPR و نتایج به‌دست آمده از بکارگیری این روش جهت حل مسائل ژئوتکنیکی پژوهش حاضر نیز اعتبارسنجی شد. برای این منظور در موقعیت ۱۴۴۰ در سطح زمین (نشانه‌گذاری شده توسط عملیات نقشه‌برداری) که در نگاشت راداری منطبق بر پروفیل GPR برداشت شده به‌طول ۲۱۵ متر، محل ناهمگنی موجود در ۱۵۵ متری شروع پروفیل به‌عنوان یک چاه مدفون واقع در عمق حدود ۰/۴ متر تفسیر شده بود، یک چال قائم حفر گردید و درستی تفسیر انجام شده به اثبات رسید.

بررسی منابع موجود در مورد کاربرد روش GPR در بررسی غیرمخرب زیرساخت‌ها و ساختگاه‌ها و نیز نتایج حاصل از بکارگیری این روش در پژوهش حاضر به‌منظور کنترل و بازرسی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی اصفهان قبل از انجام عملیات حفاری، نشان می‌دهد که روش GPR یک روش غیرمخرب باارزش، در بازرسی ساختگاه سازه‌های زیرسطحی همانند تونل‌ها برای آشکار کردن نواحی خطرناک، قبل از شروع عملیات حفاری و یا در حین اجرای آن می‌باشد.

## ۶- مراجع

- [1] Clemena, G.G., "Short pulse radar methods", Chapter 11 in Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete, 1991.
- [2] Bungey, J.H., Millard, S.G. and Shaw, M.R., "The use of sub-surface radar for structural assessment of insitu concrete", A.C.I., SP128/31, 2, 497-514, 1991.
- [3] Grandjean, G., Gourry, J.C. and Bitri, A., "Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site", Journal of Applied Geophysics, 45, 141-156, 2000.
- [4] Singh, K.K.K. and Ghouhan, R.K.S., "Exploration of underground strata conditions for a traffic bypass tunnel using Ground-Penetrating Radar system- a case study", Geotechnical and Geological Engineering, 20, 81-87, 2002.
- [5] Rashed, M., Kawamura, D., Nemoto, H., Miyata, T. and Nakagawa, K., "Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan", Journal of Applied Geophysics, 53 (2-3), 63-75, 2003.
- [6] Lunta, I.A., Hubbard, S.S. and Rubin, Y., "Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data", Journal of Hydrology, 307, 254-269, 2005.
- [7] Giannopoulos, A., "Modelling ground-penetrating radar by GprMax", Construction and Building Materials, 19, 762-775, 2005.
- [8] Lai, W.L. and Tsang, W.F., "Characterization of pore systems of air/water-cured concrete using ground penetrating radar (GPR) through continuous water injection", Construction and Building Materials, 22, 250-256, 2006.
- [9] Xingxin, X., Qiaosong, Z., Dong, L., Jin, W., Xiangnan, W. and Jinyin, S., 2010, GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams, Engineering Geology, 111, 31-42.
- [10] Ahmadi, R., Fathianpour, N. and Norouzi, G.H., "Geotechnical applications of Ground-Penetrating Radar (GPR) to identify physical and geometrical parameters of subsurface inhomogeneities". The first Iranian Conference on Electromagnetic Engineering (ICEME), Iran University of Science and Technology, 26-27 Dec, Tehran, 2012. [in Persian].
- [11] Jack, R. and Jackson, P., "Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar", NDT&E International, 32, 457-462, 1999.
- [12] Saarenketo, T. and Scullion, T., "Road evaluation with ground penetrating radar", Journal of Applied Geophysics, 43, 119-138, 2000.
- [13] Benedetto, A., and Benedetto, F., "GPR experimental evaluation of subgrade soil characteristics for rehabilitation of roads", Ninth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), Proceeding of SPIE, 4758, 708-714, 2002.
- [14] Loken, M., "Current state of the art and practice of using GPR for Minnesota roadway applications", Minnesota local road research board office of research services, 22p, 2005.
- [15] Gobel, C., Hellmann, R., and Petzhold, H., "Georadar model and in-situ investigations for inspection of railways tracks", Proceedings of Ground Penetrating Radar Conference, Kitchener, Canada, June 12-16, 1994.
- [16] Huston, D., Pelczarski, N. and Esser, B., "Damage detection in roadways with Ground Penetrating Radar", Proc. Eighth International Conference on GPR, Gold Coasts, Australia, 2000.
- [17] Manacorda, G., Morandi, D. and Sarri, A., "A customized GPR system for railroad tracks verification", Ninth

- [31] Ahmadi, R., "Developing an intelligent algorithm to detect geometrical and physical parameters of geotechnical targets using GPR responses", Ph.D thesis, Mining engineering department, College of engineering, University of Tehran, 2015. [in Persian].
- [32] Kohl, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch., Wöstmann, J. and Wiggenhauser, H., "3D-visualisation of NDT-data using data fusion technique", Non-Destructive Testing in civil engineering, NDTnet, Vol. 8, No. 10, 2003.
- [33] [www.malags.com](http://www.malags.com)
- [34] Jol, H.M., "Ground-Penetrating Radar theory and applications", First edition, Elsevier Science, 543 Pages, 2009.
- [35] Young, R.A., Deng, Z. and Sun, J., "Interactive processing of GPR data", The Leading Edge, pp. 275-280, 1995.
- [36] Nobes, D.C., "Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oarourupa". Geophysics, Vol. 64, No. 2, 357-367, 1999.
- [37] Olhoeft, G.R., "Maximizing the information return from ground penetrating radar". Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, pp. 175-187, 2000.
- [38] Annan, A.P., "Practical processing of GPR data": Proceedings of the Second Government Workshop on Ground Penetrating Radar, Columbus, Ohio, 1993.
- [39] Gerlitz, K., Knoll, M.D., Cross, G.M., Luzitano, R.D. and Knight, R., "Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets", Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, San Diego, California, 1993.
- [40] Dougherty, M.E., Micheals, P., Pelton, J.R. and Liberty, L.M., "Enhancement of ground penetrating radar data through signal processing". Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP '94), Boston, USA, pp. 1021-1028, 1994.
- [41] Fisher, C.S., Stewart, R.R. and Jol, H.M., "Processing ground penetrating radar data". Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'94), Canada, pp. 661-675, 1994.
- [42] Kim, J.H., Cho, S.J. and Yi, M.J., "Removal of ringing noise in GPR data by signal processing". Geosciences Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 75-81. RADPRO/GPR V.3.0 User's Guide, 2007.
- [43] Ahmadi, R., Fathianpour, N., and Norouzi, G.H., "Detecting physical and geometrical parameters of some common geotechnical targets through their effects on GPR responses", Arabian Journal of Geosciences, DOI 10.1007/s12517-014-1517-5, 2014.
- International Conference on Ground Penetrating Radar, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), Proceedings of SPIE, 4758, 719-722, 2002.
- [18] Geraads, S., Charachon, B., Loeffler, O. and Omnes, G., "Applying a wave number notch filter to remove interferences caused by railway sleepers from a GPR section", Ninth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Koppenjan, S.K., Lee, H. (eds.), Proceedings of SPIE, 4758, 715-718, 2002.
- [19] Karlovsek, J., Scheuermann, A.W. and David, J., "Investigation of voids and cavities in bored tunnels using GPR", 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), proceedings Shanghai, China., 496-501, 2012.
- [20] Ahmadi, R., Fathianpour, N. and Norouzi, G.H., "Estimation of geometrical parameters of buried water and waste-water pipes using mathematical model and simulation of Ground-Penetrating Radar (GPR) data". National Conference on water and waste-water engineering sciences, Post-graduate University of Kerman, 2012. [in Persian].
- [21] Ahmadi, R., Fathianpour, N. and Norouzi, G.H., "Geotechnical investigation of 33 pole bridge structure in Isfahan using Ground- Penetrating Radar method". National Conference on architecture, civil and modern urban development, Tabriz, 2014. [in Persian].
- [22] Ahmadi, R., Fathianpour, N. and Norouzi, G.H., "Identification of basement pitfalls of Isfahan- Imam mosque historical- cultural building using Ground-Penetrating Radar". The first national Conference on Ground-Penetrating Radar, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, 2014. [in Persian].
- [23] Annan, A.P., "GPR for infrastructure imaging": International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2003.
- [24] Annan, A.P., "Ground-penetrating radar workshop notes", Sensors and Software Inc., Mississauga, ON, Canada, 192 pages, 2001.
- [25] Sadiku, M.N.O., "Numerical techniques in electromagnetic", second edition, Boca Raton London New York Washington, D.C. CRC press, 2001.
- [26] [www.tstengineering.com/en/ground-penetrating-radar](http://www.tstengineering.com/en/ground-penetrating-radar)
- [27] [www.geophysical.com/whatisgpr.htm](http://www.geophysical.com/whatisgpr.htm)
- [28] Yee, K.S., "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media": IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-14, 302-307, 1966.
- [29] Irving, J. and Knight, R., "Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB". Computers & Geosciences, 32, 1247-1258, 2006.
- [30] Ahmadi, R., Fathianpour, N. and Norouzi, G.H., "Improving Ground-Penetrating Radar (GPR) forward modeling approach using the numerical finite difference method". Iranian Journal of Geophysics, 8(3), pp 114-130, 2013. [in Persian].

**Simulation of GPR response for 2-D and 3-D synthetic models  
for geotechnical applications, case study: detection of  
subsurface along Isfahan main power line tunnel**

**R. Ahmadi\*, N. Fathianpour**

**Department of Physics, Semnan University**

(Received: 03/02/2016, Accepted: 27/08/2016)

**Abstract**

*In this research, the GPR method has been employed to identify subsurface in-homogeneities along Isfahan main power line tunnel as an application in geotechnical engineering practices. To this goal, the GPR response of common 2D synthetic models including horizontal cylinder, 2D prism and arbitrary polygon corresponding to targets encountered in usual geotechnical practices were simulated first. To achieve this objective, an improved 2D finite difference algorithm developed for forward modeling in frequency domain, was used in MATLAB programming environment. Next, the GPR response of 3D synthetic models containing vertical cylinder and sphere (representing usual form of cavities) was produced by means of GPRMAX3D software for more detailed and realistic interpretations. To detect probable subsurface in-homogeneities including different types of manmade buried installations, subsidence and buried wells along the Isfahan main electric power line tunnel, 14 longitudinal GPR profiles covering more than 1200 meters along the tunnel axis were surveyed. The data were collected using a 250 MHz GPR system equipped with shielded antennas. The interpretation of final radargrams after applying different filters revealed that the GPR method is capable of detecting the location and type of subsurface in-homogeneities. In order to verify the performance and ability of GPR method in solving geotechnical problems encountered in real geological conditions and in particular the results obtained in current case study, a vertical borehole was drilled at one of in-homogeneities found on the radargrams which had been interpreted as a buried abandoned well. The result was in agreement with the respective interpreted radargram.*

**Keywords:** Ground penetrating radar (GPR); Hyperbolic response; Numerical modeling; Geotechnical targets; Isfahan main power line tunnel; Sub-surface in-homogeneities

---

\* Corresponding author E-mail: R\_ahmadi@arakut.ac.ir