

شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیهسازی عددی دوبعدی دادههای ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعهی موردی: تونل شماره ۳ آزادراه تهران- پردیس

اکبرحیدری^{ا*}، حامد عابر^۲ و علی جهان آرا^۳

۱ – دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران ۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران ۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۱

* نویسنده مسئول مکاتبات: akbar.heidari@ut.ac.ir

چکیدہ	واژگان کلیدی
 امروزه روشهای ژئوفیزیکی از توانمندترین روشها برای اکتشاف و تعیین مکان تودهها و سازههای مدفون زیرزمینی	
میباشند. یکی از کارآمدترین روشها در تعیین مکان و اکتشاف سازههای مدفون زیرزمینی روش رادار نفوذی به	
زمین (GPR) است. در این روش با توجه به عمق تودهی مورد نظر، از چشمه با فرکانس.های مختلف برای انتشار	
موج الکترومغناطیس استفاده شده و با توجه به بازتاب این امواج محل سازهی مدفون قابل تشخیص است. در این	
مقاله ابتدا به معرفی روش رادار نفوذی به زمین پرداخته شده و سپس چگونگی مدلسازی پیشرو دادههای مذکور با	
استفاده از روش عددی تفاضل محدود در حوزهی زمان (FDTD) با استفاده از کدنویسی در محیط MATLAB و	رادار نفوذی به زمین
با اعمال شرایط مرزی جاذب CPML برای یک تونل مدفون با ابعاد مشخص تشریح شده است. مزیت استفاده از	تونل مدفون زيرزميني
روشهای عددی نظیر روش تفاضل محدود، دقت بالا، سادگی فهم و محاسبات نسبتاً سادهتر نسبت به سایر روشها	مدلسازی پیشرو
است. هدف از این مقاله مدلسازی پیشرو دادمهای رادار نفوذی به زمین برای کشف تونلهایی با ابعاد کوچک در	روش عددى تفاضل محدود
اعماق مختلف و در شرایط محیطی متفاوت است. این امر از اهمیت زیادی در مباحث مهندسی برخوردار است؛ زیرا	تونل پردیس
این تونلها به راحتی قابل شناسایی نبوده و محلی برای استتار افراد و مهمات است. در این مقاله با توجه به عمق و	
ابعاد تونل ۳ آزادراه تهران-پردیس به مدلسازی انتشار موج در یک مدل مصنوعی از این تونل پرداخته شده است.	
با توجه به نتایج به دست آمده از مدلسازی، فرکانس ۵۰ مگاهرتز برای برداشت میدانی از تونل ۳ پردیس از	
دستگاه ژئورادار (MALA) انتخاب شده و نتایج حاصل از برداشت میدانی با نتایج حاصل از مدلسازی مقایسه	
شدهاند. مقایسهی نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد قابلقبول مدلسازی این تونل است.	

شناسایی تودهها، حفرهها و سازههای مدفون زیرزمینی از مباحث مهم و چالشبرانگیز است. امروزه کشورها برای نگهداری مهمات و همچنین عبور نفرات از تونلها و حفرات زیرزمینی استفاده میکنند. گاهأ ابعاد این تونلها و نوع سازه و مصالح بکار برده شده در ساختار آنها به نحوی است که تشخیص آنها با روشهایی نظیر استفاده از امواج مریی و مادونقرمز ممکن نیست. شناسایی تأسیسات زیرزمینی مدفون به عنوان یکی از پیچیدهترین چالشها در برابر عملیات شناسایی توسط هواپیماهای شناسایی، پرندههای بدون سرنشین و سنجههای فضاپایه به شمار میآید. سازههای زیرزمینی خواه از نوع تونلهایی که در دل کوه حفاری می شوند و خواه انبارهای مهمات که چندین متر زیرزمین حفر شدهاند؛ به عنوان اهداف غیر قابل دسترس مطرح می باشند. در بیشتر موارد فقط یک درب ورودی و یا یک هواکش تهویه وجود چنین تأسیسات زیرزمینی را که میتوانند فضاهایی مدفون و عمیق با وسعتی بیش از هزاران مترمربع را در برگیرند؛ نشان میدهد. بدیهی است چنین اثرات سطحی از فضاهای زیرزمینی به راحتی قابل استتار هستند و شناسایی آنها به وسیلهی تجهیزات موجود به یک مبحث چالشبرانگیز تبدیل شده است. از اواسط قرن بیستم تاکنون استفاده از سازههای مدفون زیرزمینی به عنوان یکی از ساختارهای تعیین کننده در مباحث دفاعی مد نظر قرار گرفته است. این سازهها امنیت مورد نیاز برای مخفی نگه داشتن ابزار و تجهیزات مورد نیاز را فراهم می آورند. در حال حاضر سازههای مدفون چالشهای جدی را به دلیل وجود مشکلاتی در تعیین مکان و تشخیص فعالیتهای در حال انجام در آنها به وجود آوردهاند (Sepp, 2000). سازههای زیرزمینی را به دو دسته تقسیم بندی میکنند: دستهی اول سازههای سطحی که شامل حفر زمین به صورت گودال و قرار دادن سازه درون آن است. در نهایت قسمت بالایی با سنگ و خاکریز پوشیده می شود. این نوع سازه ها در نزدیکی سطح زمين قرار دارند و با توجه به عمق كم، به طور معمول بمبهای معمولی قادر به تخریب آنها میباشند. دستهی دوم شامل حفاری به صورت تونل زدن میباشند؛ که در اعماق زیاد و یا در زیر كوهها قرار دارند. تاكنون هیچ راهحل تعیین كننده و اثربخشی برای شناسایی و رصد این گونه تأسیسات مدفون زیرزمینی ارائه نشده است. تنها ابزار مفید در این حوزه به کارگیری ترکیبی از روشهای مختلف است؛ که از جملهی آنها میتوان به شناسایی تصویری، شناسایی نشانههایی نظیر رصد حرارتی، صوتی یا لرزشی، شناسایی سیگنال نظیر سیگنالهای رادیویی یا راداری و در نهایت شناسایی از طريق عوامل انساني نظير جاسوسها اشاره نمود .(Linger et al.). (2002 شناسایی تأسیسات زیرزمینی زمانی آسان تر و سریع تر است؛ که موقعیت تقریبی سازهی مورد نظر معلوم باشد. بدیهی است داشتن موقعیت تقریبی اهداف زیرزمینی مستلزم برخورداری از ابزار شناسایی است؛ که میتواند حوزههای گستردهای را شامل شود. برای

رسیدن به چنین قابلیتهایی لازم است به دنبال روشهایی بود که محققان و کارشناسان برای درک و گسترش اطلاعات خویش در مورد لایههای زیرسطحی از آنها استفاده میکنند. تقاضای مداوم و فزایندهی انواع فلزات و افزایش روز افزون در مصرف نفت و گاز طبیعی سبب توسعهی روشهای ژئوفیزیکی با دقت بالا برای آشکارسازی و نقشهبرداری ساختارهای غیر قابل رؤیت شده است.

امروزه از بسیاری از روشهای ژئوفیزیکی در عملیاتهای تعیین مکان و شناسایی با کاربردهای مختلف استفاده می شود. تغییرات در رسانندگی الکتریکی و جریانهای طبیعی زمین، آهنگ واپاشی اختلاف پتانسیل های مصنوعی وارده به زمین، تغییرات محل گرانی، مغناطیس و رادیواکتیویته همگی اطلاعاتی را در مورد طبیعت ساختارهای زیرزمینی برای ژئوفیزیک دانان فراهم می آورد؛ که آنها را در تعیین محل مناسب برای جستجوی اهداف اکتشافی و تعیین مکان و شناسایی سازهی زیرزمینی یاری میکند. مبنای ژئوفیزیک اکتشافی بر این است که وجود هر ماده معدنی و یا به طور کلی ساختار مدفون در داخل زمین نوعی تفاوت در خاصیت فیزیکی آن نقطه با نقاط اطراف است. انتخاب نوع روشهای ژئوفیزیکی به منظور موقعیتیابی یک ذخیره معدنی و یا توده و حفرهی زیرسطحی، وابسته به خواص فیزیکی آنهاست. در بین روشهای ژئوفیزیکی، روش رادار نفوذی به زمین (GPR) یک روش مرسوم و شناخته شده و البته با مقبولیت بالا برای تصویرسازی با تفکیک پذیری بالا از اعماق کم زیرسطحی است. در یکی از معمولترین روشهای برداشت GPR، برداشت دادهها از روی سطح زمین انجام می شود. یک گام اساسی در به کارگیری رادار نفوذی به زمین برای به دست آوردن تصویری با تفکیک پذیری بالا از ساختارهای کم عمق زیرسطحی، ایجاد ارتباط بین خواص زمینشناسی و الکتریکی حاکم بر ساختارهای زیرسطحی و اطلاعات موجود در دادههای رادار نفوذی به زمین است. مدل های عددی ابزاری برای یافتن ارتباط بین خواص و ویژگیهای زیرسطحی و دادههای رادار نفوذی به زمین میباشند. می توان مدلی از ناحیه ی مورد نظر در زیر سطح را با توجه به خواص زمینشناسی آن تعریف نمود؛ سپس این مدل را به مدلی که بر اساس خواص الکتریکی تفسیر میشود؛ تبدیل نمود و در نهایت از مدلسازی دادههای مذکور برای شبیهسازی ساختارهای موجود در منطقهی مورد نظر استفاده نمود. دادههای به دست آمده شامل اطلاعات مفیدی در زمینهی تغییرات جانبی خواص توده و یا هدف مدفون در زیرزمین میباشند. پاسخ سیستم رادار نفوذی به زمین بسته به نوع هدف باید با یکی از روشهای مدلسازی پیشرو شبیهسازی شود؛ تا بتوان به شناختی از رفتار مدلهای گوناگون در پاسخ پی برد و در نهایت در برای وارونسازی دادههای مذکور پیش رفت. برای مدلسازی عددی دادههای رادار نفوذی به زمین روشهای گوناگونی ارائه شده است. روشهایی نظیر ردیابی پرتو Goodman

(1994)، (Cai and Mcmechan (1995)، روشهای مبتنی بر فرکانس (Zeng et al. (1995)، موشهای شبه فرکانسی Casper Casper and Kung ،Lui and Fan (1999)، and Kung (1996) (1996)، روش تبدیل Z و اجزای گسسته Bourgeois and Smith (1996) و (1997) (1997) و Bourgeois and Smith (1996) و روشهای تفاضل محدود پیچیدهتر (2009) و Cassidy (2001)،Chen and Huang (1998) و (2006) از جمله روشهای یرکاربرد می باشند.

اگرچه روششناسی این شیوهها با یکدیگر متفاوتاند، در همه آنها انتشار و بازتاب امواج رادار نفوذی به زمین بر اساس رفتار امواج الكترومغناطيسي و برهم كنش آنها با مواد زيرسطحي شبيهسازي می شود. روش تفاضل محدود به دلیل دارا بودن مزیت هایی نظیر درک به نسبت ساده مفاهیم آن، انعطاف پذیری، قابلیت شبیهسازی و مدلسازی محیطهای پیچیده و قابلقبول بودن پاسخهای آن، در میان روشهای عددی پیش گفته، مقبولیت و کاربرد بیشتری یافته و در این مقاله نیز از روش تفاضل محدود دو بعدی برای مدلسازی پیشرو دادههای رادار نفوذی به زمین استفاده شده است. مدلسازی انتشار امواج رادار نفوذی به زمین با اهداف مختلفی استفاده شده است. احمدپور و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی و مطالعهی موردی لولههای مدفون در محوطهی دانشگاه صنعتی شاهرود، با استفاده از مدلسازی مستقیم و وارونسازی دادههای رادار نفوذی به زمین پرداختهاند. در این مقاله، برای دستیابی به این هدف، نگاشتهای راداری منطبق بر تمامی پروفیلهای برداشت با اعمال مراحل پردازشی مختلف مانند تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک و تابع تقویت بر روی دادههای خام، آمادهسازی شدهاند. سپس پاسخ رادار نفوذی به زمین مدل مصنوعی متناظر با نگاشتهای راداری منطبق بر این پروفیلها، به روش تفاضل محدود دوبعدی در حوزهی زمان شبیهسازی شد. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) به آشکارسازی دقیق تأسیسات زیرسطحی شهری با برداشت و مدلسازی دوبعدی و سهبعدی دادههای رادار نفوذی به زمین پرداختهاند. این شبکه زیرسطحی متشکل از لولههای فلزی و غیرفلزی، کابلها و کانالهای زیرسطحی انتقال آب است. بعد از انجام پردازشهای مناسب بر روی دادههای شبکهای، نقشهها و مقاطع مختلف دو و سه بعدی رادار نفوذی به زمین دارای مختصات افقی و عمقی با دقت بالا تهیه شده که در این مقاطع ساختارهای زیرسطحی آشکارسازی شده است.

۲– تئوری روش رادار نفوذی به زمین

سیستم رادار نفوذی به زمین، سیگنالهای الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز را توسط فرستنده ارسال میکند و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنیهای زیرسطحی را به کمک گیرنده، آشکار میسازد. سیگنال ثبت شده به تغییرات ویژگیهای فیزیکی ثبت شده درون

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره 4، شماره ۱، ۱۳۹۷.

محیط پیرامون و ویژگیهای موج رادار نفوذی به زمین، مانند میزان z تضعيف ميدان در محيط سير موج lpha و امپدانس مغناطيسى بستگی دارد. ویژگیهای فیزیکی مواد که رفتار انرژی الكترومغناطيسي را در يك محيط كنترل ميكنند شامل گذردهي σ دىالكتريك ${\mathcal E}$ ، نفوذپذيرى مغناطيسى μ و رسانايى الكتريكى هستند. در همهی شیوههای برداشت رادار نفوذی به زمین، یک اندازهگیری از یک مؤلفهی میدان الکترومغناطیسی (معمولاً مؤلفهی میدان الکتریکی)، به عمل میآید و شدت مؤلفهی میدان الکتریکی اندازه گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و نسبت به زمان ثبت می شود (Annan 2003). متداول ترین شیوه ی نمایش دادههای رادار نفوذی به زمین، نمایش دامنه سیگنال امواج بازتابی الکترومغناطیسی است. در حالت کلی نگاشت راداری یا تصویر رادار نفوذی به زمین، برداشت نیمرخی از دادههای مذکور به صورت مجموعهای از ردهای مجاور است و رخداد حاصل برای اغلب هدفهای مدفون به صورت هذلولی است. روش GPR بر تئوری امواج الکترومغناطیس استوار است و نقطهی شروع هر بحثی در مورد طبيعت مواد، تحت تأثير امواج الكترومغناطيس، معادلات ماكسول و معادلات ساختاری میباشند. معادلات ماکسول فیزیک میدانهای الكترومغناطيسي را به صورت رياضي تشريح ميكنند؛ در حالي كه روابط ساختاری خواص مواد را کمّی میکنند و تلفیق این دو، اساس نمایش عددی سیگنالهای GPR است.

۳- معادلات ماکسول

میدانهای الکتریکی و مغناطیسی و روابط بین آنها به صورت زیر است (Casper and Kung, 1996):

$$\overline{\nabla} \times \overline{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1}$$

$$\overline{\nabla} \times \overline{H} = \overline{J} + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{7}$$

$$\overline{\nabla} \times \overline{D} = q \tag{(7)}$$

$$\nabla \times B = 0 \tag{(f)}$$

 $q\left(rac{c}{m^3}
ight)$ به طوری که $\overline{E}\left(rac{v}{m}
ight)$ بردار شدت میدان الکتریکی، $\overline{E}\left(rac{v}{m}
ight)$ جگالی بار الکتریکی، $\overline{B}(t)$ بردار معناطیسی، چگالی بار الکتریکی، $D\left(rac{c}{m^2}
ight)$ بردار جابجایی $j\left(rac{A}{m^2}
ight)$ بردار جابجایی الکتریکی، t(s) زمان و الکتریکی، $H\left(rac{A}{m}
ight)$ شدت میدان مغناطیسی است.

۴- معادلات ساختاری

معادلات ساختاری وسیلهای برای توضیح پاسخ مواد به میدانهای الکترومغناطیسی میباشند. در رادار نفوذی به زمین خواص الکتریکی و مغناطیسی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. معادلات ساختاری حیدری و همکاران، شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیهسازی عددی دوبعدی دادههای ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعهی موردی: ...، صفحات ۹۳-۸۱.

(معادلات ۵، ۶ و ۷) چگونگی پاسخ الکترون ها، اتم ها و مولکول ها را به میدان مغناطیسی در مقیاس ماکروسکوپی تشریح میکنند (Casper and Kung, 1996):

$$\overline{J} = \widetilde{\sigma}\overline{E}$$
 (a)

$$\overline{D} = \varepsilon \overline{E} \tag{6}$$

$$\overline{B} = \tilde{\mu}\overline{H} \tag{V}$$

هدایت الکتریکی (σ) نشاندهنده حرکت آزاد بارهای الکتریکی در حضور میدان الکتریکی است (که نتیجه آن ایجاد جریان الکتریکی است). مقاومت در برابر جریان منجر به اتلاف انرژی میشود. گذردهی الکتریکی (z) نشاندهنده میزان جابجایی بارهای محدود در ساختار ماده در حضور میدان الکتریکی است؛ یعنی توانایی یک ماده در ذخیره کردن بار الکتریکی را نشان میدهد. نفوذپذیری مغناطیسی نشاندهنده میزان پاسخ ممان مغناطیسی اتمی یا مولکولی به میدان مغناطیسی است.

 σ ، σ و μ مقادیر تانسوری بوده و همچنین میتوانند غیرخطی باشند (به عنوان مثال ($\sigma = \sigma(E)$). مقادیر فوق در تمام مسائل GPR به عنوان مقادیر اسکالری که مستقل از مقادیر میدان هستند در نظر گرفته میشوند؛ به عبارت دیگر، بردار پاسخ در جهت میدان وارده و مستقل از شدت میدان است. هرچند این فرضیات کاملاً معتبر نمی باشند، اما محققانی که بر روی روشهای عملی کار میکنند، به ندرت توانسته اند تا این پیچیدگی را مشخص کرده و (Irving and Knight, 2006).

در روش GPR گذردهی الکتریکی ویژگی مهمی محسوب میشود و در اغلب موارد از ثابت دیالکتریک یا گذردهی الکتریکی نسبی استفاده میشود؛ که به صورت زیر تعریف میشود (Carcione, 1996):

$$K = \mathcal{E}_r = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} \tag{A}$$

که در آن ${\cal E}_0$ گذردهی الکتریکی خلأ بوده و مقدار آن برابر با ${\cal B}_{0}$ 8.89 $imes 10^{-12} iggl(rac{F}{m}iggr)$

روش عددی تفاضل محدود نیز مبتنی بر برآورد معادلات دیفرانسیل با معادلههای تفاضل محدود است. این معادلهها به شکل جبری هستند که مقدار متغیر وابسته در یک نقطه از پراکندگی عددی، فاصله گسسته سازی مکانی ابعاد شبکه بهینه ($\Delta x, \Delta y$) در برآورد تفاضل محدود در GPR باید حداقل ده برابر کوچکتر از طول موج امواج بسامد اسمی آنتن یا به عبارتی دیگر مطابق رابطهی (۹) یک پنجم کوچکترین طول موج در تپ ارسالی باشد Bourgeois) and smith, 1998)

$$\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda_{\min}}{5} \tag{9}$$

رابطهی (۱۰) برای محاسبهی گام زمانی گسسته ارائه شده

است (Sadiku and Mathew, 2001).

$$\Delta t \le \frac{1}{U_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \tag{(1.1)}$$

در این رابطه U_{\max} بیشترین سرعت فازی موج درون مدل است. برای محاسبه بیشینه فاصله زمانی بهینه Δt_{\max} ، رابطه دیگری نیز به صورت زیر ارائه شده است Georgakopoulos, et (Georgakopoulos, et 2001): al., 2001)

$$\Delta t_{\max} = \frac{6}{7} \sqrt{\frac{\mu_{\min} \varepsilon_{\min}}{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}}$$
(11)

در این رابطه μ_{\min} و μ_{\min} به ترتیب کمینهی مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریک موجود در شبکه Δx ، مدلسازی هستند. مقادیر فاصلههای مکانی شبکه گرهها، Δx ، مدل سازی هستند. مقادیر فاصلههای مکانی شبکه گرهها، Δx ، از جمله پارامترهای مهم در کنترل عملکرد روش به حساب می آیند چراکه هرچه مقادیر آنها کوچکتر باشد پاسخ مدل به واقعیت نزدیکتر است و میزان خطای گسسته سازی را کاهش می دهد. با این حال از سوی دیگر می تواند منجر به افزایش خطای گرد کردن، افزایش میزان حافظه لازم برای ذخیره سازی متغیرها و افزایش قابل ملاحظه زمان محاسبات شود (Irving and Knight, 2006).

۵- مدلسازی دوبعدی دادههای GPR به روش تفاضل محدود در حوزهی زمان (FDTD)

هدف از مدلسازی عددی دادههای GPR فهم دقیق تر چگونگی انتشار امواج مذکور در زیر سطح زمین است. در این مقاله از کدنویسی در نرمافزار MATLAB به منظور مدلسازی پیشرو دادههای GPR در حالت پیمایش بر مبنای سطح برای اکتشاف تونل مدفون با بُعد مشخص یک در دو متر استفاده شده است. در ادامه، مفاهیم به کار گرفته شده در مدلسازی شرح داده میشود.

مبنای روش مدل سازی انتشار امواج الکترومغناطیس، معادلات ماکسول در حوزه فرکانس است؛ که عبارتاند از (Carcione, 1996):

$$\nabla \times H = \sigma E + i\,\omega \varepsilon E \tag{11}$$

$$\nabla \times E = -i\,\omega\mu H \tag{17}$$

 σ به طوری که $i = \sqrt{-1}$ ، ω فرکانس زاویهای، \mathcal{F} ، و σ به ترتیب گذردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریکی میباشند. در رابطه فوق E و H نیز بردارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی هستند. به منظور تسهیل در به کارگیری Stretched مرزی جاذب از مختصات کشیده شده (Stretched به شرایط مرزی جاذب از مختصات کشیده شده (coordinate صورت زیر تعریف می شود (2966, 2016):

$$\nabla = \hat{x} \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{1}{s_z} \frac{\partial}{\partial z}$$
(15)

پارامتر S در رابطه فوق به صورت زیر تعریف میشود؛ که نشاندهنده متغیرهای موجود در مختصات کشیده شده هستند و تغییرات آن فقط در جهت k است (Carcione, 1996):

$$S_{k} = K_{k} + \frac{\sigma_{k}}{\alpha_{k} + i\,\omega\varepsilon_{k}} \tag{10}$$

در رابطه (۱۵) σ_k گذردهی الکتریکی خلأ و α_k α_k و σ_k κ_k و κ_k κ_k و مستند که با تعیین آنها، انتشار موج در داخل M_k Perfectly) PML (مجد موج در ناحیه σ_k α_k مدلسازی و جذب موج در ناحیه σ_k α_k α_k مدلسازی و میسر میشود. شایان ذکر است که σ_k α_k و معداد اعلام الکتریکی واقعی نبوده و فقط با افزایش درجه آزادی معادلات ماکسول امکان اجرای شرایط مرزی PML را در مدل سازی میسر می سازند.

با به کارگیری عملگر رابطه (۱۴) در روابط (۱۲) و (۱۳) و با فرض اینکه در مدلسازی دو بعدی تغییرات میدان در جهت y (جهت عمود بر پروفیل) ثابت است؛ به دو دسته معادله دیفرانسیل که شامل مؤلفههای میدان به صورت (E_x, H_z, H_x) و (Irving and Knight, 2006): هستند؛ میرسیم

$$i\,\omega\mu H_x = -\frac{1}{S_z}\frac{\partial E_y}{\partial z} \tag{19}$$

$$E\omega\mu H_z = \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_y}{\partial x}$$
(19)

$$\sigma E_{y} + i \,\omega \varepsilon E_{y} = \frac{1}{S_{x}} \frac{\partial H_{z}}{\partial x} - \frac{1}{S_{z}} \frac{\partial H_{x}}{\partial z} \tag{1A}$$

$$\sigma E_x + i\,\omega\varepsilon E_x = \frac{1}{S_z}\frac{\partial H_y}{\partial z} \tag{19}$$

$$\sigma E_z + i\,\omega\varepsilon E_z = \frac{1}{S_x}\frac{\partial H_y}{\partial x} \tag{(7.)}$$

$$i \,\omega \mu H_y = \frac{1}{S_z} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_z}{\partial x} \tag{(1)}$$

در داخل ناحیه مدلسازی $1 = s_x = S_z$ است. در حالی که در شرایط مرزی PML دارای مقادیر مختلطی خواهند بود که منجر به

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره 4، شماره ۱، ۱۳۹۷.

جذب سریع میدان در این ناحیه میشود. برخلاف روشهای ساده تر مانند تغییر هدایت الکتریکی در ناحیه PML که منجر به جذب امواج میشوند؛ میزان بازگشت موج در مرز بین ناحیه مدلسازی و ناحیه PML در روش فوق صفر است. در اینجا شرایط مرزی جاذب از دیدگاه PML در برنامه نویسی وارد شده است. این روش از معادلههای حوزه زمان $_x S$ و $_z S$ در تخمین تفاضل محدود استفاده می کند؛ که مزیت آن عدم جداسازی مؤلفههای الکتریکی و مغناطیسی در حوزه زمان است و این مزیت در سایر دیدگاههای مغناطیسی در حوزه زمان است و این مزیت در سایر دیدگاههای PML وجود ندارد. از معادله (۱۵) تبدیل معکوس فوریه گرفته می شود (Irving and Knight, 2006):

$$S_{k}^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{K_{k}} - \frac{\sigma_{k}}{\varepsilon_{0}K_{k}^{2}} \exp\left[-\frac{1}{\varepsilon_{0}}\left(\frac{\sigma_{k}}{\alpha_{k}} + \alpha_{k}\right)\right]u(t) = \frac{\delta(t)}{K_{k}} + \zeta_{k}(t)$$
(YY)

به طوری که $\delta(t)$ تابع دلتای دیراک و u(t) تابع پلهای میباشند. استفاده از رابطه فوق و با فرض مستقل از فرکانس بودن خواص فیزیکی مواد، معادلات حوزه زمان برای روابط مد TM به ترتیب به صورت زیر نوشته می شود (Irving and Knight, 2006):

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{K_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z}$$
(17)

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{K_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} - \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x}$$
(14)

$$\sigma E_{y} + \varepsilon \frac{\partial E_{y}}{\partial t} = \frac{1}{k_{x}} \frac{\partial H_{z}}{\partial x} - \frac{1}{K_{z}} \frac{\partial H_{x}}{\partial z} + \zeta_{x}(t)^{*} \frac{\partial H_{z}}{\partial x} - \zeta_{z}(t)^{*} \frac{\partial H_{x}}{\partial z}$$
(Y Δ)

۶- شرایط مرزی جاذب

یکی از مشکلات روش تفاضل محدود در حوزهی زمان (FDTD)، احتياج اين روش به قطع شبكه به صورت مصنوعي است. به اين قطع كنندههای مصنوعی شرایط مرزی جاذب (Absorbing Boundary Condition) گفته می شود؛ چرا که این شرایط موجهای تابشی و پراکنده شده را جذب میکنند. میزان صحت ABC ها مقدار صحت روش FDTD را مشخص مىكند (Gedney, 1998). نياز به شرايط مرزی جاذب دقیق منجر به طراحی انواع آنها شده و در این مقاله از PML ها استفاده شده است. در روش انقطاع به وسیله PML، یک لایه مصنوعی از مواد جاذب محیط فضای محاسباتی را در برمی گیرد. هدف از این کار جذب موج صفحهای است که با هر زاویه دلخواه از فضای FDTD به لایه PML تابیده می شود؛ به طوری که هیچ بازتابشی رخ ندهد. مهم ترین مزیت روش قطع PML، کاهش شدید بازتاب امواج از مرز محيط با كمترين ضخامت لايه جذبي است. مزیت دیگر آن این است که برای اجرای قطع PML نیازی به تغییر معادله FDTD نبوده و کافی است که متغیرهای مختصات کشیده شده در منطقه مرزی تغییر کند. البته در این مقاله از روش CPML استفاده شد؛ زیرا علاوه بر دارا بودن مزیتهای PML نسبت به تغییرات خواص محیط میزبان متغیر است, (Roden and Gedney)

حیدری و همکاران، شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیهسازی عددی دوبعدی دادههای ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعهی موردی: ...، صفحات ۹۳-۸۱.

(2000؛ بنابراین زمانی که محیط ناهمگن، ناهمسانگرد و پر اتلاف است نیازی به تغییر ساختار برنامهنویسی نیست. در ضمن حافظه کامپیوتری مورد نیاز به ویژه زمانی که فرکانس بسیار پایین است و یا اجسام کشیده و طویل میباشند به شدت کاهش مییابد.

اشاره شد که در داخل شبکه مدلسازی S_x و S_x برابر واحد میباشند؛ در نتیجه در ناحیه محاسباتی $\sigma_x = \sigma_z = 0$ و واحد میباشند؛ در نتیجه در ناحیه محاسباتی FDTD در این ناحیه به $K_x = K_z = 1$ قرار داده میشوند و معادلات FDTD در این ناحیه به شکل استاندارد درمیآیند؛ اما در ناحیه قطع PML به این پارامترها مقادیر مختلفی تخصیص داده میشود. با انتخاب مقادیر بزرگتر از صفر برای σ_x و σ_x که باعث مختلط شدن متغیرهای مختصات مفادیر میرای σ_x و σ_x که باعث مختلط شدن متغیرهای مختصات مقادیر بزرگتر از یک برای K_x و r_x نیز میتوان امواج میرا را در مقادیر بزرگتر از یک برای K_x و r_x نیز میتوان امواج میرا را در ناحیه PML جذب نمود. همچنین انتخاب مقادیر بزرگتر از صفر ناحیه σ_x و σ_x توانایی جذب امواج میرا را افزایش میدهد (Kuzuoglu and mittra, 1996; Roden and Gedney, 2000)

از نظر تئوری امپدانس الکترومغناطیسی، با تغییر مقادیر $_{s}^{s}$ ، σ_{x} , σ_{z} , K_{x} , K_{z} مقادیر $_{s}^{s}$, σ_{z} , K_{x} , K_{z} مقادیر $_{s}^{s}$, σ_{z} , σ_{z} , K_{x} , K_{z} مقادیر مقادیر $_{s}^{s}$, σ_{z} , σ_{z} , σ_{z} , K_{x} , K_{z} مقادیر $_{s}^{s}$ البت می ماند؛ بنابراین مقادیر $_{s}^{s}$ البت به بهترین ناحیه قطع بتواند امواج انتشاری و میرا را جذب کند. البته اگر در عمل تغییرات خواص الکتریکی بین گردها شدید باشد، بازتابهای عددی در معادلات حراص الکتریکی بین گردها شدید باشد، بازتابهای عددی ادر معاد در معادلات حواص الکتریکی بین گردها شدید باشد، بازتابهای عددی ادر معاد در معادلات PML رخ می دهد. در نتیجه پارامترهای ناحیه قطع PML باید به صورت تدریجی از یک مقدار معین در داخل شبکه تا یک مقدار بیشینه در مرز افزایش یابد. $_{x}$ K_{x} و $_{z}$ K_{z} از رابطه زیر محاسبه می شوند (Irving and Knight, 2006):

$$K_{k} = \begin{cases} 1 \text{ in grid interior} \\ 1 + \left(\frac{d}{\sigma}\right)^{m} \left(\kappa_{k_{\max}} - 1\right) \text{ inside PML region} \end{cases}$$
(79)

که در معادله فوق d فاصله از مرز ناحیه قطع PML و فضای محاسباتی، δ ضخامت ناحیه قطع PML و m ضریب توانی ناحیه قطع PML و $K_{k_{max}}$ مقدار بیشینه است. به صورت کاملاً مشابه برای σ_{r} و σ_{r} داریم (Irving and Knight, 2006):

$$\boldsymbol{\sigma}_{k} = \begin{cases} 0 \text{ in grid interior} \\ \left(\frac{d}{\sigma}\right)^{m} \sigma_{k_{\max}} \text{ in PML region} \end{cases}$$
(YY)

که در آن K_k مقدار بیشینه σ است. در اینجا K_k و K_k فقط در بُعد K تغییر می کنند؛ زیرا متغیرهای مختصات کشیده σ_k فقط در بُعد K تغییر می کنند؛ زیرا متغیرهای مختصات کشیده شده یک بعدی هستند. به عنوان مثال σ_x در داخل شبکه غیر صفر می باشند و از طرف دیگر پارامتر K_z در داخل شبکه برابر با واحد و فقط در لایههای ML فوقانی و تحتانی شبکه، بزرگتر از یک است. در اینجا m مساوی F و آر داده شدهاند. اینجا m مساوی K_x و آر مت که این اعداد کارایی لازم برای

جذب امواج میرا را دارند. مقدار بیشینه σ_k از رابطه (۲۷) محاسبه می شوند (۲۷) (۲۷) دمی شوند (۲۹ chen and Chew, 1997):

$$\sigma_{k_{max}} = \frac{m+1}{150\pi\sqrt{\varepsilon_r}\,\Delta k} \tag{YA}$$

در این رابطه، \mathcal{F}_r نزدیکترین گذردهی الکتریکی نسبی داخل شبکه به ناحیه قطع PML است؛ به عبارت دیگر در یک محیط ناهمگن مقدار $\sigma_{k_{\max}}$ ممکن است نسبت به مقادیر گذردهی الکتریکی مرزی در داخل مدلسازی متغیر باشد. قبل از اجرای شبیهسازی، مرزهای شبکه به وسیله سلولهای PML لایه گذاری میشود.

۷- مثالهای عددی برای شبیهسازی یک تونل

هدف از مدلسازی، رسیدن به الگو و اطلاعاتی از دادههای در دسترس است؛ به گونهای که با در نظر گرفتن شرایط محیطی، عمق، جنس، هندسه و خواص الكترومغناطيسي متفاوت ميتوان به پاسخهای متفاوتی رسید و با استفاده از این اطلاعات، به انتخاب صحیحتری از پارامترهای برداشت میدانی دست پیدا کرد. در این قسمت به مدل سازی یک تونل مدفون به ابعاد ۱ در ۲ متر، در اعماق مختلف، شرایط متفاوت از لحاظ حاشیهی تونل و محیط زمینه پرداخته شده است. کوچک بودن ابعاد تونل تعیین مکان آن را دشوار می کند. لذا از این خاصیت برای استتار نفر و تجهیزات و ادوات استفاده می شود. روش GPR می تواند پاسخ مناسبی از توده ی مدفون در اعماق مختلف در اختیار قرار دهد. باید به این نکته توجه کرد که فرکانس چشمه نیز بر عمق نفوذ و تفکیک پذیری نتایج تأثیر گذار است. برای مدلسازی دادههای GPR، اولین قدم تعیین خواص الكترومغناطيسي محيط و تودهي مدفون مانند تونل، مين، خطوط لوله های انتقال سیال و غیره است. این خواص عبارتاند از: گذردهی دىالكتريك (ε) ، رسانندگى الكتريكى (σ) و تراوايى مغناطيسى رادار باکتورهای زیادی در پاسخ دریافتی از برداشتهای روش رادار (μ) نفوذي به زمين تأثير گذار مي باشند. مهم ترين اين فاكتورها عبارت اند از: فركانس آنتن GPR، جنس، ابعاد، شكل هندسي، عمق هدف و جنس محیط زمینه. آنتنهای فرکانس بالا در مقایسه با آنتنهای فرکانس پایین، اندازهای کوچکتر، قدرت تفکیک بیشتر و عمق نفوذ کمتری دارند.

در اولین مثال فرض بر این است که تونل در عمق ۱۰ متری و حاشیهی آن از جنس محیط زمینه (خاک رُسی) است. به دلیل این که مقدار تراوایی مغناطیسی نسبی در اکثر مواد طبیعی مقدار ثابتی است؛ بنابراین در تمام مثالها مقدار آن برابر با ۱ در نظر گرفته شده است (Neal, 2004). رسانندگی الکتریکی برای هوا (داخل تونل) بسیار کوچک و نزدیک به صفر و ضریب گذردهی دیالکتریک آن برابر با ۱ است. همچنین یک لایه به ضخامت ۲۰ سانتیمتر در بالای مدل در نظر گرفته شده است؛ که دارای رسانندگی الکتریکی

۰,۰۰۱ S/m و ضریب گذردهی دیالکتریک ۵ است و رسانندگی الکتریکی محیط زمینه S/m ^{۲-}۱۰×۵ و گذردهی دیالکتریک آن ۱۶ است. شکل ۱ مقطع رادار به دست آمده از این تونل را نشان میدهد.



شکل ۱: مقطع رادار حاصل از مدلسازی برای تونل حفر شده در عمق ۱۰ متری و بدون حاشیهی بیرونی، با به کارگیری چشمه با فرکانس ۱۰۰ MHz.

در مقطع به دست آمده امواج مستقیم (باند آبی رنگ در بالای مدل) را به خوبی میتوان مشاهده کرد. مرز مشترک بین دو لایه هم به خوبی در شکل مشخص است (باند آبی رنگ دوم). در این شکل دامنهی بازتاب از تونل به خوبی قابل رؤیت است. امواج بازتابی را که در کرانههای مدل مشاهده میشود میتوان به شرایط مرزی مدلسازی نسبت داد. در این مثال فرکانس چشمه ۱۰۰ مگاهرتز در نظر گرفته شده است.

در مثال بعدی فرض بر این است که تونل در عمق ۱۰ متری مدفون است و مانند مثال اول، حاشیهی تونل از جنس خاک زمینه باشد. این بار از آنتن با فرکانس چشمهی ۵۰ مگاهرتز استفاده شده و نتیجه در شکل ۲ نشان داده شده است. با مقایسهی شکل ۱ و ۲ مشاهده میشود که قدرت تفکیک آنتن با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز به نسبت آنتن با فرکانس ۵۰ مگاهرتز بیشتر است؛ ولی دامنهی بازتابها با استفاده از آنتن با فرکانس ۵۰ مگاهرتز بیشتر است.



شکل ۲: مقطع رادار حاصل از مدلسازی برای تونل حفر شده در عمق ۱۰ متری و بدون حاشیهی بیرونی، با به کارگیری چشمه با فرکانس ۵۰ MHz.

در مثالهای بعدی تونل مدفون در عمق ۱۰ متری قرار داشته و حاشیهی آن از جنس بتن است؛ که در یک حالت لایـهای از خـاک مرطوب و در حالتی دیگر لایـهای خشـک در سـطح آن وجـود دارد.

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۳۹۷.

علت انتخاب این مثالها به این دلیل است که اغلب تونلهای مدفون با چنین ویژگیهایی ساخته میشوند و تونل آزادراهها نیز با حاشیهای بتنی ساخته می شوند. رسانندگی الکتریکی و ضریب گذردهی دیالکتریک برای بتن به ترتیب ۰٫۰۰۰۵S/m و ۶ در نظر گرفته شده است (Neal, 2004). رسانندگی الکتریکی و گذردهی دیالکتریک برای لایه خشک به ترتیب ۰٫۰۰۱S/m و ۲۲ و برای لایه مرط وب برای لایه خشک به ترتیب ۱۰ در نظر گرفته شده است. شکل ۳ و مقطع رادار حاصل از مدل سازی برای این تونل و در شرایطی که شده را نشان می دهد. با توجه به این دو شکل می توان گفت که بازتابها پایین است. در شکل ۵ و ۶ مدل سازی همین تونل ولی این بار در شرایطی که لایهی سطحی خشک است، با به کارگیری چشمه با فرکانس ۵۰ و ۱۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است.

در این دو شکل شدت بازتابها نسبت به شکل ۳ و ۴ به مراتب بالاتر بوده و دامنهی بازتابها در شکل ۵ که از آنتن با فرکانس ۵۰ مگاهرتز استفاده شده است بیشتر است.

با توجه به نتایج مدلسازی برای تونل فرضی و در نظر گرفتن شرایطی نظیر رسانا بودن محیط، تضعیف امواج الکترومغناطیس برای فرکانسهای بالا و ابعاد تونل آزادراه تهران-پردیس، استفاده از آنـتن با فرکانس ۵۰ مگاهرتز برای برداشت از این تونل پردیس گزینهی مطلوبتری به نظر میرسید.



شکل ۳: مقطع رادار حاصل از مدلسازی برای تونل مدفون در عمق ۱۰ متری همراه با لایهی سطحی مرطوب و حاشیهی بتنی با به کارگیری چشمه با فرکانس ۵۰ MHz.



شکل ۴: مقطع رادار حاصل از مدلسازی برای تونل مدفون در عمق ۱۰ متری همراه با لایهی سطحی مرطوب و حاشیه بتنی با به کارگیری چشمه با فرکانس ۱۰۰ MHz.

میدری و همکاران، شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیهسازی عددی دوبعدی دادههای ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعهی موردی: ...، صفحات ۹۳-۸۱.



شکل ۵: مقطع رادار حاصل از مدلسازی برای تونل مدفون در عمق ۱۰ متری همراه با لایهی سطحی خشک و حاشیه بتنی با به کارگیری چشمه با فرکانس ۵۰ MHz.



شکل ۶: مقطع رادار حاصل از مدلسازی برای تونل مدفون در عمق ۱۰ متری همراه با لایهی سطحی خشک و حاشیه بتنی با به کارگیری چشمه با فرکانس ۱۰۰ MHz.

۸- بررسی مدلسازی تونل پردیس با استفاده از روش پیشنهادی و مقایسه با برداشت میدانی

بر اساس مشاهدات زمینشناسی، رسوبات بر روی تونل ۳ آزادراه تهران-پردیس بیشتر از رسوبات دانه درشت تشکیل شده است. بر دامنه تپه در ورودی جنوبی تونل شماره ۳ آزادراه تهران- پردیس دو پروفیل (Profile1-Tunnel3 و Profile2-Tunnel3) عمود بر راستای تونل و در خلاف جهت یکدیگر برداشت شده است. شکل ۷ محدوده برداشت دادههای ژئورادار بر روی تونل شماره ۳ را نشان میدهد.

Reflex بدادهای برداشت شده با استفاده از نرمافزار Subtract-DC-shift و پیادهسازی فیلترهایی نظیر gain function ،subtract mean .Static-correction و bandpass butter worth برداشت از دستگاه ژئورادار مالا (MALA) ساخت کشور سوئد استفاده شده است. در شکل ۸ دستگاه ژئورادار مورد استفاده نشان داده شده است. این دستگاه حدود ۷ کیلوگرم وزن دارد. فرکانس مرکزی برای برداشت دادهها ۵۰ مگاهرتز در نظر گرفته شده است.

تصویر محل برداشت پروفیلها از تونل ۳ در شکل ۹ آمده است. طول پروفیل ۴۰ متر، فاصلهی فرستنده و گیرنده ۵ متر، کل زمان ثبت امواج حدود ۴۸۰ نانوثانیه، فاصلهی نمونهبرداری زمانی ۳ نانوثانیه و فاصلهی ردها ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.





شکل ۷: محدوده برداشت دادههای GPR بر روی تونل شماره ۳ آزادراه تهران– پردیس.



شکل ۸: دستگاه GPR مالا (MALA) مورد استفاده برای برداشت تونل شماره ۳ آزادراه تهران- پردیس.



م شکل ۹: مسیر پروفیل Profile1-Tunnel3 با خطچین قرمز و پروفیل Profile2-Tunnel3 با خطچین سیاه.

۹- مقایسهی مدل پیشرو و دادههای برداشت شده

در این قسمت با توجه به ابعاد تونل پردیس مدلسازی انجام شده است. ارتفاع تونل ۱۸ متر از محل برداشت و قطر تونل ۱۳ متر در نظر گرفته شده است. مدل شماتیک همراه با خواص مغناطیسی در نظر گرفته شده برای تونل ۳ آزادراه تهران- پردیس در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

پس از پیادهسازی روش و اجرای برنامه، مقطع رادار به صورتی که در شکل ۱۱ نشان داده شده است به دست میآید. در این شکل اثر بازتاب از تونل به خوبی مشهود است. در این مدلسازی از چشمه با فرکانس ۵۰ مگاهرتز استفاده شده است. برای اهداف نقطهای انتظار میرود که در مقطع رادار هذلولی تشکیل شود که در شکل ۱۱ به خوبی قابل مشاهده است. همچنین خروج از مرکز و خصوصیات هندسی این هذلولی به سرعت موج در محیط و شعاع جسم مدفون بستگی دارد؛ که در این مورد، به دلیل زیاد بودن قطر تونل، هذلولی کشیده شده است.

در شکل بالا بازتابها از قسمت فوقانی تونل، سقف تونل و آسفالت کف تونل به ترتیب با پیکانهای زردرنگ شمارهی ۱ تا ۳ نشان داده شده است. در این شکل شدت بازتابها بالا بوده و نشان میدهد فرکانس ۵۰ مگاهرتز برای برداشت از این تونل مناسب است. شکل ۱۲ نتیجهی برداشت میدانی از تونل پردیس را نشان میدهد. با توجه به این که شرایط برداشت میدانی کمی متفاوت از مدل سازی مصنوعی است.

اثرات محیطی و ناهمگنیهای زمین نیز (نظیر نوفهی تصادفی) در مقطع رادار مشهود است؛ اما با مقایسه شکل ۱۱ با شکل ۱۲ میتوان به عملکرد خوب مدلسازی پیبرد. همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده میشود، در مقطع رادار برداشت شده، هذلولی از ابتدا تا نتهای مقطع رادار کشیده شده که در مقطع رادار شبیهسازی شده در شکل ۱۱ نیز مشهود است. در شکل ۱۲ بازتابهای سقف تونل به صورت هذلولی و با پیکان زردرنگ نشان داده شده است. با توجه به این که سرعت ۱۹٫۴ نانوثانیه بر متر و فرکانس چشمه ۵۰ مگاهرتز این که سرعت ۱۹٫۴ نانوثانیه بر متر و فرکانس چشمه ۱۸ مگاهرتز مول موج غالب حدود ۲ متر است. قدرت تفکیک قائم 1⁄4 تا 2⁄1 است، طول موج غالب است؛ بنابراین بازتابها در جایی که از این فاصله بیشتر است، بهتر نشان داده شدهاند. همچنین دامنه بازتاب از سقف مول نیز هم در مقطع رادار برداشت شده و هم در مقطع رادار برده شده در شبیهسازی دادههای GPR دارد.



گرفته شده برای تونل شماره ۳ آزادراه تهران – پردیس.

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۳۹۷.



شکل ۱۱: مقطع رادار حاصل از مدلسازی پیشرو رادار نفوذی به زمین برای تونل پردیس شماره ۳. پیکانهای زردرنگ به ترتیب شماره، ۱: بازتاب از قسمت سیمانی بالای انحنای دهانهی تونل، ۲: بازتاب از سقف تونل، ۳: بازتاب از لایهی آسفالت کف تونل.



شکل ۱۲: پروفیل Profile1-Tunnel3. اثر بازتاب از سقف تونل در پروفیلهای فوق با پیکان زرد نشان داده شده. برای مشاهده بهتر اثر بازتاب از سقف تونل این پروفیل در راستای افق فشرده شده است.

۱۰- نتیجهگیری

امروزه اهمیت اکتشاف اهداف مدفون زیرزمینی در صنایع مهندسی، اکتشاف مواد معدنی و محیطزیست کاملاً مشهود است. در این مقاله به مدلسازی پیشرو رادار نفوذی به زمین برای تونل مدفون در اعماق مختلف و شرایط زمین شناسی و محیطی متفاوت پرداخته شده و در نهایت به شبیهسازی برداشت از تونل آزادراه تهران-پردیس پرداخته شده و نتایج این شبیهسازی با برداشت میدانی مقایسه شده است. روش GPR روشی کارآمد برای اکتشاف و تعیین محل و جنس سازههای مدفون به شمار میآید. در این مقاله از روش عددی تفاضل محدود و با استفاده از کدنویسی در MATLAB و در نظر گرفتن مرزهای جاذب CPML برای مدل سازی استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مدلسازی میتوان گفت که حضور لایه مرطوب، فرکانس چشمه، ابعاد و شکل هندسی سازه، بر انتشار رادار به داخل زمین و در نتیجه دامنهی بازتابها تأثیرگذار است. همچنین با افزایش عمق از شدت دامنهی بازتابها کاسته شده و بنابراین استفاده از چشمه با فرکانس مناسب متناسب با عمق سازهی مدفون بسیار با اهمیت است. می توان گفت با توجه به ابعاد کم تونل مورد بررسی نسبت به عمق و طول برداشت، روش رادار نفوذی به زمین روشی کارآمد و مناسب برای اکتشاف تونل و سازههای مدفون است و حیدری و همکاران، شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیهسازی عددی دوبعدی دادههای ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعهی موردی: ...، صفحات ۹۳-۸۱.

of subsurface EM problems, Geophysics, 62, 1730-1736.

- Gedney, S., 1998, The perfectly matched layer absorbing medium, Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House, Norwood, MA, pp. 263-343.
- Georgakopoulos, S.V., Birtcher, C.R., Balanis, C.A. and Renaut, R.A., 2001, Higher-order finite-difference schemes for electromagnetic radiation, scattering and penetration, Part 1, Theory: IEEE Antennas and Propagation Magazine, 44, 134-142.
- Giannopoulos, A., 2005, Modeling ground penetrating radar by GPR Max, construction and building materials, 19, 775-762.
- Goodman, D., 1994, Ground-penetrating radar simulation in engineering and archeology, Geophysics, 59, 224-232.
- Irving, J. and Knight, R., 2006, Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB, Computers & Geosciences, 32, 1247-1258.
- Karpat, E., Akır, M.C. and Sevgi, L., 2009, subsurface imaging, FDTD-Based simulations and alternative scan/processing approaches.
- Kuzuoglu, M. and Mittra, R., 1996, Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 6, 447-449.
- Linger, D.A., Baker, G.H. and Little, R.G., 2002, Application of underground structures for the physical protection of critical infrastructure, north american tunneling, Ozdemir (ed). Swets & Zetlinger, Lisse. ISBN 905809376X.
- Luebbers, R.J. and Hunsberger, F., 1992, FDTD for Nth-order dispersive media, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 40, 1297-1301.
- Lui, Q.H. and Fan, G., 1999, Simulations of GPR in dispersive media using a frequency dependent PSTD algorithm, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37, 2317-2324.
- Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology principles, problems progress: Earth- science reviews, 66, 261-330.
- Reynolds, J.M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics: Wiley.
- Roberts, R.L. and Daniels, J.J., 1997, Modeling nearfield GPR in three dimensions using the FDTD method, Geophysics, 62 (4), 1114-1126.
- Roden, J. and Gedney, S., 2000, Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media, IEEE Microwave and Optical Technology Letters, 27, 334-339.

میتواند در کشف سازههای مدفون از نظر اقتصادی، زمانی و نیروی انسانی کارآمد باشد. بررسی و مقایسهی نتیجهی مدلسازی با استفاده از روش پیشنهادی و برداشت میدانی برای تونل شماره ۳ آزادراه تهران-پردیس، دقت و عملکرد قابلقبول مدلسازی را به خوبی نشان میدهد.

۱۱- مراجع

- احمدپور، ۱.، کامکار روحانی، ۱. و احمدی، ر.، ۱۳۹۵، مدلسازی پیشرو و وارون دادههای رادار نفوذی به زمین با هدف کاربرد در شناسایی لولههای مدفون، مطالعه موردی: لوله انتقال فراوردههای نفتی در دانشگاه صنعتی شاهرود، پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، DOI:10.22044/JRAG.2016.817.
- احمدی، ر.، فتحیانپور، ن. و نوروزی، غ. ح.، ۱۳۹۳، بهبود مدل سازی مستقیم داده های رادار نفوذی به زمین به روش عددی تفاضل محدود، مجله ژئوفیزیک ایران، ۸ (۳)، ۱۱۳–۱۲۹.
- حسینی، م.، کامکار روحانی، ا.، محمدی ویژه، م. و پرنـو، س.، ۱۳۹۴، آشکارسازی دقیق تأسیسات زیرسطحی شـهری بـا برداشـت و مدلسازی دوبعدی و سهبعدی دادههای رادار نفوذی به زمین، مطالعـه مـوردی: دانشـگاه صـنعتی شـاهرود، پـژوهشهـای ژئوفیزیک کاربردی، ۲ (۲)، ۶۷-۷۶.
- Annan, A.P., 2003, GPR for infrastructure imaging: International Symposium (NDT-CE2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering.
- Bourgeois, J.M. and Smith, G.S., 1996, A fully three dimensional simulation of a ground penetrating radar: FDTD theory compared with experiment, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34, 36-44.
- Cai, J. and Mc Mechan, G.A., 1995, Ray-based synthesis of bi-static ground-penetrating radar profiles, Geophysics, 60, 87-96.
- Carcione, J.M., 1996, Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media, Geophysics, 61, 1664-1677.
- Casper, D.A. and Kung, K.S., 1996, Simulation of ground-penetrating radar waves in a 2-D soil model, Geophysics, 61, 1034-1049.
- Cassidy, N.J., 2001, The application of mathematical modeling in the interpretation of ground penetrating radar data, Ph.D. Thesis, Keele University.
- Chen, H.W. and Huang, T.M., 1998, Finite difference time-domain simulation of GPR, Microwave and Optical Technology Letters, 51 (4), 1070-1075.
- Chen, Y.H. and Chew, W.C., 1997, Application of perfectly matched layers to the transient modeling

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۳۹۷.

and Wang, T., 1998, Finite difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous and conductive soils, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36 (6), 1928-1937.

- Zeng, X., McMechan, G.A., Cai, J. and Chen, H.W., 1995, Comparison of ray and Fourier methods for modeling monostatic ground penetrating radar profiles, Geophysics, 60, 1727-1734.
- Sadiku, O. and Matthew, N., 2001, Numerical techniques in electromagnetics. Boca Raton London New York Washington, D.C., CRC Press.
- Sepp, E.M., 2000, Deeply buried facilities: Implications for Military Operations, Occasional Paper No. 14 and Centre for strategy & Technology Air War College.

Teixeria, F.L., Chew, W.C., Straka, M., Oristaglio, M.L.



JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG) 2018, Vol 4, No 1

(DOI): 10.22044/JRAG.2017.5650.1111



Detection of buried tunnel using 2D numerical simulation of GPR data; a case study: Tunnel No. 3 of Tehran-Pardis Highway

Akbar Heidari^{1*}, Hamed Aber² and Ali Jahan Araa³

Ph.D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
 Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 M.Sc., Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 24 April 2017; Accepted: 13 October 2017

Corresponding author: akbar.heidari@ut.ac.ir

Keywords	Extended Abstract
Ground penetration radar (GPR)	Summary
Buried Tunnel	Today, geophysical methods are one of the most feasible means for
Forward Modeling	exploration, detection and localization of underground targets. One of the
Finite-Difference Numerical	most used geophysical methods is ground penetration radar (GPR). In this
Method	method, based on the depth, shape and electromagnetic properties of the target
Pardis Tunnel	and surrounding environment, electromagnetic waves with different central
	frequencies are propagated through the medium. In this paper, first, the theory
	of GPR, and then, forward modeling of GPR data using finite difference time

domain (FDTD) method with consideration of convolutional perfectly matched layer (CPML) absorbing condition are presented. Finally, forward modeling of a buried tunnel in different geological environments is presented and the results are assessed. A schematic model of a tunnel in Tehran-Pardis highway is also constructed and the results of the simulation of the tunnel are compared with the field data.

Introduction

Detection of buried targets and structures are among challenging subjects in engineering, military and environmental assessments. Today, high accuracy geophysical methods have been developed to map and detect underground targets. Using geophysical methods for identifying the physical properties of the earth such as electrical, magnetic and elastic properties is important. GPR is a practical method for imaging high resolution shallow depth targets. GPR numerical models are tools for connecting the subsurface properties and GPR data. First, we define a model for the considered target according to geological and hydrological properties, and then, we change the model to the one that is interpreted based on electromagnetic properties, and finally, using GPR numerical modeling, the simulation of acquisition data for the study area is made. GPR response should be simulated using an appropriate forward modeling method to recognize the response of different models, and also, using the obtained model for inversion of GPR data. What has become by far the most common approach for GPR modeling over the past decade, however, is the FDTD technique, which is relatively conceptually simple and accurate for arbitrarily complex models, and capable of accommodating realistic antenna designing and features such as dispersion in electrical properties. In this paper, the FDTD technique was used with consideration of absorbing boundaries for simulation of a buried tunnel having a dimension 1*2 m in different circumstances.

Methodology and Approaches

In GPR systems, electromagnetic waves are sent by a transmitter with frequency extensions of 1 MHz to 1000 MHz, and the reflected EM field from underground inhomogeneities is recorded in receivers. Recorded signal is dependent on the changes of recorded physical properties of the surrounding environment such as dielectric permittivity, magnetic permeability, and electrical conductivity, and GPR wave characteristics such as phase velocity of the electromagnetic fields mathematically and structural equations describe the properties of the substance. Combination of these equations is the basis of numerical view of GPR signals. The purpose of numerical modeling of GPR data is to obtain a better understanding of electromagnetic waves propagation in the subsurface. In this paper, the FDTD numerical method has been used for forwarding modeling of the propagated EM signals. In the forward modeling process, the CPML has been

JRAG, 2018, VOL 4, NO 1.

considered as an absorbing condition in the borders of the propagation plane. **Results and Conclusions**

In this paper, as a synthetic example, a buried tunnel having a dimension of 1×2 m was considered in the depth of 10 m with different borders and dry and moisture surface layer. The source with central frequency of 50 and 100 MHz was used to evaluate the responses. The obtained results showed the effect of depth, source frequency, geological and electrical properties of the tunnel, surrounding environment and its border on the amplitude of the reflected hyperbolas, which were useful in the detection of the tunnel, and obtaining information about the tunnel depth and its properties. According to the synthetic responses, the antenna with the central frequency of 50 MHz was used for data acquisition from Pardis tunnel. The schematic model for this tunnel was constructed. The results of the numerical modeling of GPR data for this model were compared with the real field GPR data. The results confirmed the appropriate performance of the simulation and the validity of the acquisition parameters.