



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

اکبر حیدری<sup>۱\*</sup>، حامد عابر<sup>۲</sup> و علی جهان آرا<sup>۳</sup>

- 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

### چکیده

### 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 فرکانس‌های 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 با اعمال شرایط مرزی جاذب CPML برای یک تونل مدفون با ابعاد مشخص تشریح شده است. مزیت استفاده از روش‌های عددی نظیر روش تفاضل محدود، دقت بالا، سادگی فهم و محاسبات نسبتاً ساده‌تر نسبت به سایر روش‌ها است. هدف از این مقاله مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین برای کشف تونل‌هایی با ابعاد کوچک در اعماق مختلف و در شرایط محیطی متفاوت است. این امر از اهمیت زیادی در مباحث مهندسی برخوردار است؛ زیرا 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.

رادار نفوذی به زمین  
تونل مدفون زیرزمینی  
مدل‌سازی پیشرو  
روش عددی تفاضل محدود  
تونل پردیس

## ۱- مقدمه

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 می‌شود. تغییرات در رسانندگی الکتریکی و جریان‌های طبیعی زمین، آهنگ واپاشی اختلاف پتانسیل‌های مصنوعی وارده به زمین، تغییرات محل گرانی، مغناطیس و رادیواکتیویته همگی اطلاعاتی را در مورد طبیعت ساختارهای زیرزمینی برای ژئوفیزیک دانان فراهم می‌آورد؛ 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 تفکیک‌پذیری بالا از اعماق کم زیرسطحی است. در یکی از معمول‌ترین روش‌های برداشت GPR، برداشت داده‌ها از روی سطح زمین انجام می‌شود. یک گام اساسی در به کارگیری رادار نفوذی به زمین برای به دست آوردن تصویری با تفکیک‌پذیری 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. مدل‌های عددی ابزاری برای یافتن ارتباط بین خواص ویژگی‌های زیرسطحی و داده‌های رادار نفوذی به زمین می‌باشند. می‌توان مدلی از ناحیه‌ی 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

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. گاه 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 مرئی و مادون قرمز 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 می‌شوند و خواه انبارهای مهمات که چندین متر زیرزمین حفر شده‌اند؛ به عنوان اهداف غیر قابل دسترس مطرح می‌باشند. در بیشتر موارد فقط یک درب ورودی و یا یک هواکش تهویه وجود چنین تأسیسات زیرزمینی را که می‌توانند فضاهای 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 می‌آورند. 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 تقسیم‌بندی 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 می‌شود. این نوع سازه‌ها در نزدیکی سطح زمین قرار دارند و با توجه به عمق کم، 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 کوه‌ها قرار دارند. تاکنون هیچ راه‌حل تعیین کننده و اثربخشی برای شناسایی و رصد این‌گونه 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 طریق عوامل انسانی نظیر جاسوس‌ها اشاره نمود (Linger et al., 2002). شناسایی تأسیسات زیرزمینی زمانی آسان‌تر و سریع‌تر 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

محیط پیرامون و ویژگی‌های موج رادار نفوذی به زمین، مانند میزان تضعیف میدان در محیط سیر موج  $\alpha$  و امپدانس مغناطیسی  $Z$  بستگی دارد. ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک  $\epsilon$ ، نفوذپذیری مغناطیسی  $\mu$  و رسانایی الکتریکی  $\sigma$  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 اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و نسبت به زمان ثبت می‌شود (Annan 2003). متداول‌ترین شیوه‌ی نمایش داده‌های رادار نفوذی به زمین، نمایش دامنه سیگنال امواج بازتابی الکترومغناطیسی است. در حالت کلی نگاهت 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 طبیعت مواد، تحت تأثیر امواج الکترومغناطیس، معادلات ماکسول و معادلات ساختاری می‌باشند. معادلات ماکسول فیزیک میدان‌های الکترومغناطیسی را به صورت ریاضی تشریح می‌کنند؛ در حالی که روابط ساختاری خواص مواد را کمتی 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):

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4)$$

به طوری که  $\bar{E}$  ( $\frac{V}{m}$ ) بردار شدت میدان الکتریکی،  $q$  چگالی بار الکتریکی،  $\bar{B}(t)$  بردار چگالی شار میدان مغناطیسی،  $\bar{J}$  ( $\frac{A}{m^2}$ ) بردار چگالی جریان الکتریکی،  $D$  ( $\frac{C}{m^2}$ ) بردار جابجایی الکتریکی،  $t$  (s) زمان و  $H$  ( $\frac{A}{m}$ ) 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

(1994)، Cai and Mcmechan (1995)، روش‌های مبتنی بر فرکانس Zeng et al. (1995)، روش‌های شبه فرکانسی Casper (1996) and Kung، Lui and Fan (1999)، روش تبدیل  $Z$  و اجزای گسسته Roberts and Daniels (1996)، روش‌های تفاضل محدود پیچیده‌تر Karpat et al (2009)، Irving and Knight (1997) و Bourgeois and Smith (1996) و محدود پیچیده‌تر (2006)، Chen and Huang (1998)، Cassidy (2001) و Giannopoulos (2005) از جمله روش‌های پرکاربرد می‌باشند.

اگرچه روش‌شناسی این شیوه‌ها با یکدیگر متفاوت‌اند، در همه آن‌ها انتشار و بازتاب امواج رادار نفوذی به زمین بر اساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و برهم‌کنش آن‌ها با مواد زیرسطحی شبیه‌سازی می‌شود. روش تفاضل محدود به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی نظیر درک به نسبت ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن، در میان روش‌های عددی پیش‌گفته، 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، نگاهت‌های 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 نگاهت‌های 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

است (Sadiku and Mathew, 2001).

$$\Delta t \leq \frac{1}{U_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \quad (10)$$

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

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

در این رابطه  $\mu_{\min}$  و  $\varepsilon_{\min}$  به ترتیب کمینه‌ی مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریک موجود در شبکه مدل‌سازی هستند. مقادیر فاصله‌های مکانی شبکه گره‌ها،  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta t$  لحظه‌ای در مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود، از جمله پارامترهای مهم در کنترل عملکرد روش به حساب می‌آیند چراکه هرچه مقادیر آن‌ها کوچک‌تر باشد پاسخ مدل به واقعیت نزدیک‌تر است و میزان خطای گسسته‌سازی را کاهش می‌دهد. با این حال از سوی دیگر می‌تواند منجر به افزایش خطای گرد کردن، افزایش میزان حافظه لازم برای ذخیره‌سازی 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 دقیق‌تر 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 مدل‌سازی انتشار امواج الکترومغناطیس، معادلات ماکسول در حوزه فرکانس است؛ که عبارت‌اند از (Carcione, 1996):

$$\nabla \times H = \sigma E + i \omega \varepsilon E \quad (12)$$

$$\nabla \times E = -i \omega \mu H \quad (13)$$

به طوری که  $i = \sqrt{-1}$ ،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $\varepsilon$ ،  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب گذردهی الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریک می‌باشند. در رابطه فوق  $E$  و  $H$  نیز بردارهای میدان الکتریک و مغناطیسی هستند. به منظور تسهیل در به کارگیری شرایط مرزی جاذب از مختصات کشیده شده (Stretched coordinate) استفاده شده است. در این مختصات عملگر  $\nabla$  به صورت زیر تعریف می‌شود (Carcione, 1996):

(معادلات ۵، ۶ و ۷) چگونگی پاسخ الکترون‌ها، اتم‌ها و مولکول‌ها را به میدان مغناطیسی در مقیاس ماکروسکوپی تشریح می‌کنند (Casper and Kung, 1996):

$$\bar{J} = \bar{\sigma} \bar{E} \quad (5)$$

$$\bar{D} = \bar{\varepsilon} \bar{E} \quad (6)$$

$$\bar{B} = \bar{\mu} \bar{H} \quad (7)$$

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

$\sigma$ ،  $\varepsilon$  و  $\mu$  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 نمی‌باشند، اما محققانی که بر روی روش‌های عملی کار می‌کنند، به ندرت توانسته‌اند تا این پیچیدگی را مشخص کرده و تمیز دهند (Irving and Knight, 2006).

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

$$K = \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

که در آن  $\varepsilon_0$  گذردهی الکتریک خلاً بوده و مقدار آن برابر با  $8.89 \times 10^{-12} \left( \frac{F}{m} \right)$  است.

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 گسسته‌سازی 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):

$$\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda_{\min}}{5} \quad (9)$$

رابطه‌ی (۱۰) برای محاسبه‌ی گام زمانی گسسته ارائه شده

جذب سریع میدان در این ناحیه می‌شود. برخلاف روش‌های ساده‌تر 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 CPML در برنامه‌نویسی وارد شده است. این روش از معادله‌های حوزه زمان  $S_x$  و  $S_z$  در تخمین تفاضل محدود استفاده می‌کند؛ که مزیت آن عدم جداسازی مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی در حوزه زمان است و این مزیت در سایر دیدگاه‌های PML وجود ندارد. از معادله (۱۵) تبدیل معکوس فوریه گرفته می‌شود (Irving and Knight, 2006):

$$S_k^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{K_k} - \frac{\sigma_k}{\varepsilon_0 K_k^2} \exp\left[-\frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{\sigma_k}{\alpha_k} + \alpha_k\right)\right] u(t) = \frac{\delta(t)}{K_k} + \zeta_k(t) \quad (22)$$

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 می‌شود (Irving and Knight, 2006):

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{K_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (23)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{K_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} - \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (24)$$

$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{k_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{K_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (25)$$

## ۶- شرایط مرزی جاذب

یکی از مشکلات روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان (FDTD)، احتیاج این روش به قطع شبکه به صورت مصنوعی است. به این قطع کننده‌های مصنوعی شرایط مرزی جاذب (Absorbing Boundary Condition) گفته می‌شود؛ چرا که این شرایط موج‌های تابشی و پراکنده شده را جذب می‌کنند. میزان صحت ABC ها مقدار صحت روش FDTD را مشخص می‌کند (Gedney, 1998). نیاز به شرایط 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 برمی‌گیرد. هدف از این کار جذب موج صفحه‌ای است که با هر زاویه دلخواه از فضای FDTD به لایه PML تابیده می‌شود؛ به طوری که هیچ بازتابی رخ ندهد. مهم‌ترین مزیت روش قطع PML، کاهش شدید بازتاب امواج از مرز محیط با کمترین ضخامت لایه جذبی 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,

$$\nabla = \hat{x} \frac{1}{S_x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{1}{S_y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{1}{S_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (14)$$

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):

$$S_k = K_k + \frac{\sigma_k}{\alpha_k + i\omega\varepsilon_k} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)  $\varepsilon_0$  گذردهی الکتریکی خلأ و  $\sigma_k$ ،  $\alpha_k$  و  $K_k$  پارامترهایی هستند که با تعیین آن‌ها، انتشار موج در داخل شبکه مدل‌سازی و جذب موج در ناحیه PML (Perfectly Matched Layer) میسر می‌شود. شایان ذکر است که  $\sigma_k$ ،  $\alpha_k$  و  $K_k$  خواص الکتریکی واقعی نبوده و فقط با افزایش درجه آزادی معادلات ماکسول امکان اجرای شرایط مرزی PML را در مدل‌سازی میسر می‌سازند.

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  $(E_y, H_z, H_x)$  و  $(E_x, E_z, H_y)$  هستند؛ می‌رسیم (Irving and Knight, 2006):

$$i\omega\mu H_x = -\frac{1}{S_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (16)$$

$$i\omega\mu H_z = \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (17)$$

$$\sigma E_y + i\omega\varepsilon E_y = \frac{1}{S_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{S_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (18)$$

$$\sigma E_x + i\omega\varepsilon E_x = \frac{1}{S_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (19)$$

$$\sigma E_z + i\omega\varepsilon E_z = \frac{1}{S_x} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (20)$$

$$i\omega\mu H_y = \frac{1}{S_z} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (21)$$

به روابط (۱۶ تا ۱۸) مد TE (Transverse electric mode) و به روابط (۱۹ تا ۲۱) مد TM (Transverse magnetic mode) گفته می‌شود. در حالت دو بعدی، معادلات امواج الکترومغناطیس به دو حالت قطبش مستقل از یکدیگر تفکیک می‌شوند: الف) مد TE که در آن میدان الکتریکی در راستای امتداد لایه‌های زمین قرار دارد؛ یا به عبارت دیگر مماس بر سطح است و مؤلفه‌های میدان آن به صورت  $(E_x, E_z, H_y)$  است. مد TE ساختارها را باردار نمی‌کند. در نتیجه آنومالی‌های آن دارای طبیعت القایی می‌باشند و برای تشخیص ساختارهای عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

جذب امواج میرا را دارند. مقدار بیشینه  $\sigma_k$  از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شوند (Chen and Chew, 1997):

$$\sigma_{k_{max}} = \frac{m+1}{150\pi\sqrt{\epsilon_r}\Delta k} \quad (28)$$

در این رابطه،  $\epsilon_r$  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 الکترومغناطیسی متفاوت می‌توان به پاسخ‌های متفاوتی رسید و با استفاده از این اطلاعات، به انتخاب صحیح‌تری از پارامترهای برداشت میدانی دست پیدا کرد. در این قسمت به مدل‌سازی 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 می‌کند. لذا از این خاصیت برای استتار نفر و تجهیزات و ادوات استفاده می‌شود. روش GPR می‌تواند پاسخ مناسبی از توده‌ی مدفون در اعماق مختلف در اختیار قرار دهد. باید به این نکته توجه کرد که فرکانس چشمه نیز بر عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری نتایج تأثیرگذار است. برای مدل‌سازی داده‌های GPR، اولین قدم تعیین خواص الکترومغناطیسی محیط و توده‌ی مدفون مانند تونل، مین، خطوط لوله‌های انتقال سیال و غیره است. این خواص عبارت‌اند از: گذردهی دی‌الکتریک ( $\epsilon$ )، رسانندگی الکتریکی ( $\sigma$ ) و تراوایی مغناطیسی ( $\mu$ ). فاکتورهای زیادی در پاسخ دریافتی از برداشت‌های روش رادار نفوذی به زمین تأثیرگذار می‌باشند. مهم‌ترین این فاکتورها عبارت‌اند از: فرکانس آنتن GPR، جنس، ابعاد، شکل هندسی، عمق هدف و جنس محیط زمینه. آنتن‌های فرکانس بالا در مقایسه با آنتن‌های فرکانس پایین، اندازه‌ی 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 این‌که 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

(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 طولیل می‌باشند به شدت کاهش می‌یابد.

اشاره شد که در داخل شبکه مدل‌سازی  $S_x$  و  $S_z$  برابر واحد می‌باشند؛ در نتیجه در ناحیه محاسباتی  $\sigma_x = \sigma_z = 0$ ،  $K_x = K_z = 1$  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  $\sigma_x$  و  $\sigma_z$  که باعث مختلط شدن متغیرهای مختصات کشیده شده می‌شوند، می‌توان موج انتشاری را جذب کرد و با انتخاب مقادیر بزرگ‌تر از یک برای  $K_x$  و  $K_z$  نیز می‌توان امواج میرا را در ناحیه PML جذب نمود. همچنین انتخاب مقادیر بزرگ‌تر از صفر برای  $\alpha_x$  و  $\alpha_z$  توانایی جذب امواج میرا را افزایش می‌دهد (Kuzuoglu and mittra, 1996; Roden and Gedney, 2000).

از نظر تئوری امیدانس الکترومغناطیسی، با تغییر مقادیر  $S_x$ ، مقادیر  $S_x$  ثابت می‌ماند؛ بنابراین مقادیر  $K_x$ ،  $K_z$ ،  $\sigma_x$ ،  $\sigma_z$  در ناحیه قطع PML باید تا حد امکان بزرگ انتخاب شوند؛ تا به بهترین وجه بتواند امواج انتشاری و میرا را جذب کند. البته اگر در عمل تغییرات خواص الکتریکی بین گره‌ها شدید باشد، بازتاب‌های عددی در معادلات FDTD رخ می‌دهد. 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.  $K_x$  و  $K_z$  از رابطه زیر محاسبه می‌شوند (Irving and Knight, 2006):

$$K_k = \begin{cases} 1 & \text{in grid interior} \\ 1 + \left(\frac{d}{\sigma}\right)^m (\kappa_{k_{max}} - 1) & \text{inside PML region} \end{cases} \quad (26)$$

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

$$\sigma_k = \begin{cases} 0 & \text{in grid interior} \\ \left(\frac{d}{\sigma}\right)^m \sigma_{k_{max}} & \text{in PML region} \end{cases} \quad (27)$$

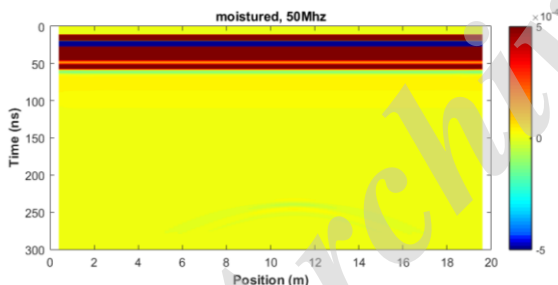
که در آن  $\sigma_{k_{max}}$  مقدار بیشینه  $\sigma$  است. در اینجا  $K_k$  و  $\sigma_k$  فقط در بُعد  $k$  تغییر می‌کنند؛ زیرا متغیرهای مختصات کشیده شده یک بعدی هستند. به عنوان مثال  $\sigma_x$  در داخل شبکه دارای صفر و تنها در لایه‌های PML چپ و راست شبکه غیر صفر می‌باشند و از طرف دیگر پارامتر  $K_z$  در داخل شبکه برابر با واحد و فقط در لایه‌های PML فوقانی و تحتانی شبکه، بزرگ‌تر از یک است. در اینجا  $m$  مساوی ۴ و  $K_{x_{max}}$  و  $K_{z_{max}}$  مساوی ۵ قرار داده شده‌اند. چرا که تجربه نشان داده شده است که این اعداد کارایی لازم برای

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

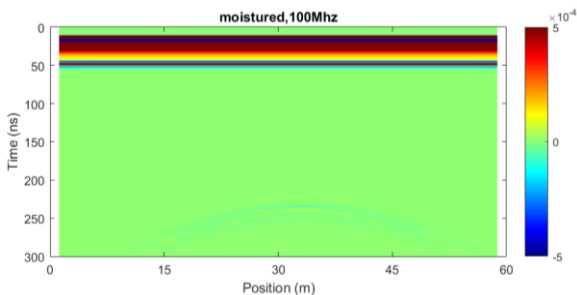
علت انتخاب این مثال‌ها به این دلیل است که اغلب تونل‌های مدفون با چنین ویژگی‌هایی ساخته می‌شوند و تونل آزادراه‌ها نیز با حاشیه‌ای بتنی ساخته می‌شوند. رسانندگی الکتریکی و ضریب گذردهی دی‌الکتریک برای بتن به ترتیب  $0.0005 \text{ S/m}$  و  $6$  در نظر گرفته شده است (Neal, 2004). رسانندگی الکتریکی و گذردهی دی‌الکتریک برای لایه خشک به ترتیب  $0.0001 \text{ S/m}$  و  $12$  و برای لایه مرطوب به ترتیب  $0.001 \text{ S/m}$  و  $10$  در نظر گرفته شده است. شکل ۳ و ۴ مقطع رادار حاصل از مدل‌سازی برای این تونل و در شرایطی که لایه‌ی سطحی مرطوب بوده و از فرکانس  $50$  و  $100$  مگاهرتز استفاده شده را نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل می‌توان گفت که حضور لایه‌ی مرطوب باعث میرایی امواج رادار شده و دامنه‌ی بازتاب‌ها پایین است. در شکل ۵ و ۶ مدل‌سازی همین تونل ولی این بار در شرایطی که لایه‌ی سطحی خشک است، با به کارگیری چشمه با فرکانس  $50$  و  $100$  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  $50$  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 آنتن با فرکانس  $50$  مگاهرتز برای برداشت از این تونل پردیس گزینه‌ی مطلوب‌تری به نظر می‌رسید.

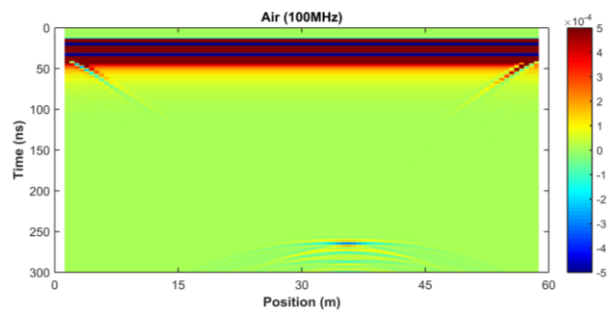


شکل ۳: مقطع رادار حاصل از مدل‌سازی برای تونل مدفون در عمق ۱۰ متری همراه با لایه‌ی سطحی مرطوب و حاشیه‌ی بتنی با به کارگیری چشمه با فرکانس  $50 \text{ MHz}$ .



شکل ۴: 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  $100 \text{ MHz}$ .

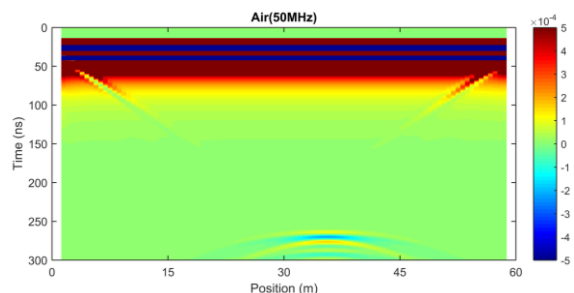
$0.001 \text{ S/m}$  و ضریب گذردهی دی‌الکتریک  $5$  است و رسانندگی الکتریکی محیط زمینه  $5 \times 10^{-3} \text{ S/m}$  و گذردهی دی‌الکتریک آن  $16$  است. شکل ۱ مقطع رادار به دست آمده از این تونل را نشان می‌دهد.



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  $100 \text{ MHz}$ .

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  $100$  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  $50$  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  $100$  مگاهرتز به نسبت آنتن با فرکانس  $50$  مگاهرتز بیشتر است؛ ولی دامنه‌ی بازتاب‌ها با استفاده از آنتن با فرکانس  $50$  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  $50 \text{ MHz}$ .

در مثال‌های بعدی تونل مدفون در عمق ۱۰ متری قرار داشته و حاشیه‌ی آن از جنس بتن است؛ که در یک حالت لایه‌ای از خاک مرطوب و در حالتی دیگر لایه‌ای خشک در سطح آن وجود دارد.

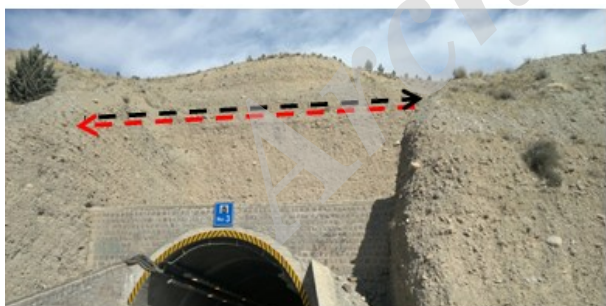
حیدری و همکاران، شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیه‌سازی عددی دوبردی داده‌های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعه‌ی موردی: ...، صفحات ۹۳-۸۱.



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



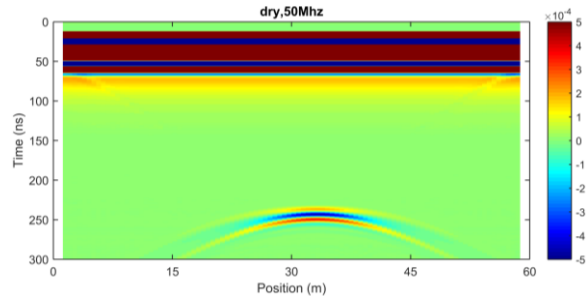
شکل ۸: دستگاه GPR مالا (MALA) مورد استفاده برای برداشت تونل شماره ۳ آزادراه تهران - پردیس.



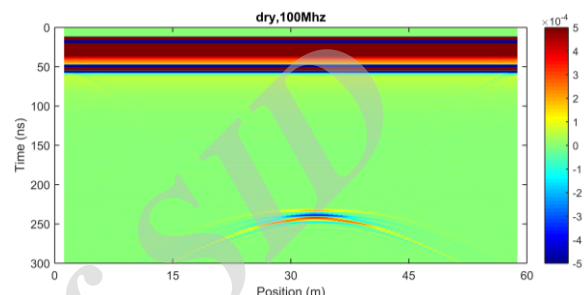
شکل ۹: مسیر پروفیل Profile1-Tunnel3 با خطچین قرمز و پروفیل Profile2-Tunnel3 با خطچین سیاه.

### 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.



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.

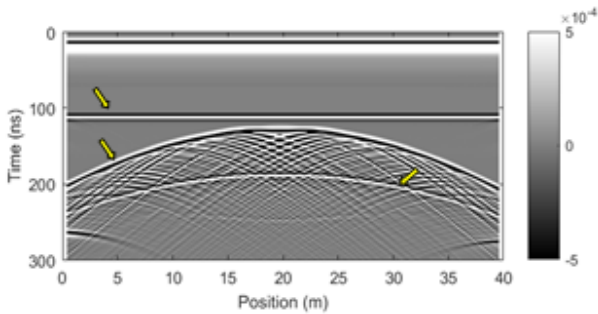
### ۸- بررسی مدل‌سازی تونل پردیس با استفاده از روش پیشنهادی و مقایسه با برداشت میدانی

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 (Profile2-Tunnel3 و Profile1-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.

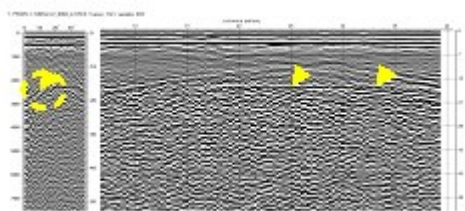
داده‌های برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار Reflex-2DQuick و پیاده‌سازی فیلترهایی نظیر Subtract-DC-shift، Static-correction، subtract mean، gain function و bandpass butter worth پردازش شده‌اند. برای برداشت از این تونل از دستگاه ژئورادار مالا (MALA) ساخت کشور سوئد استفاده شده است. در شکل ۸ دستگاه ژئورادار 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 ۱۱: مقطع رادار حاصل از مدل‌سازی پیشرو رادار نفوذی به زمین برای تونل پردیس شماره ۳. پیکان‌های زرد رنگ 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 Profile 1-Tunnel 3. 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.

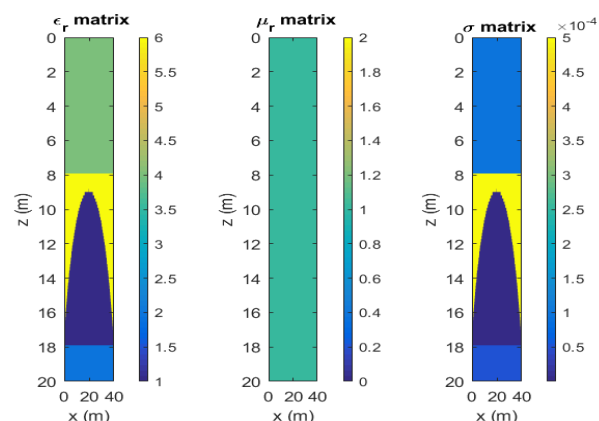
### ۱۰- نتیجه‌گیری

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 زمین‌شناسی 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 مدل‌سازی 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. می‌توان 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

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 زرد رنگ 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 این‌که شرایط برداشت میدانی کمی متفاوت از مدل‌سازی 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. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در مقطع رادار برداشت شده، هذلولی از ابتدا تا انتهای 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 زرد رنگ نشان داده شده است. با توجه به این‌که سرعت ۰٫۱۴ نانوثانیه بر متر و فرکانس چشمه ۵۰ مگاهرتز است، طول موج غالب حدود ۲ متر است. قدرت تفکیک قائم ¼ تا ½ طول موج غالب است؛ بنابراین بازتاب‌ها در جایی که از این فاصله بیشتر است، بهتر نشان داده شده‌اند. همچنین دامنه بازتاب از سقف تونل نیز هم در مقطع رادار برداشت شده و هم در مقطع رادار مدل‌سازی شده مشهود است؛ که نشان از عملکرد خوب روش بکار برده شده در شبیه‌سازی داده‌های GPR دارد.



شکل ۱۰: مدل شماتیک همراه با خواص الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده برای تونل شماره ۳ آزادراه تهران- پردیس.

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 near-field 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، ا.، کامکار روحانی، ا. و احمدی، ر.، ۱۳۹۵، مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های رادار نفوذی به زمین با هدف کاربرد در شناسایی لوله‌های مدفون، مطالعه موردی: لوله انتقال فرآورده‌های نفتی در دانشگاه صنعتی شاهرود، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، DOI:10.22044/JRAG.2016.817.

احمدی، ر.، فتحیانپور، ن. و نوروزی، غ. ح.، ۱۳۹۳، بهبود مدل‌سازی مستقیم داده‌های 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 پرنو، س.، ۱۳۹۴، آشکارسازی دقیق تأسیسات زیرسطحی شهری با برداشت و مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های رادار نفوذی به زمین، مطالعه موردی: دانشگاه صنعتی شاهرود، پژوهش‌های 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.

Archive of SID



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

Akbar Heidari<sup>1\*</sup>, Hamed Aber<sup>2</sup> and Ali Jahan Araa<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- 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

Ground penetration radar (GPR)

Buried Tunnel

Forward Modeling

Finite-Difference

Method

Pardis Tunnel

Numerical

### Extended Abstract

#### Summary

Today, geophysical methods are one of the most feasible means for exploration, detection and localization of underground targets. One of the most used geophysical methods is ground penetration radar (GPR). In this method, based on the depth, shape and electromagnetic properties of the target 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 wave, attenuation of wave field and magnetic Impedance. Maxwell equations describe 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

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  $1 \times 2$  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.

---

Archive of SID