

## تحلیل حساسیت پاسخ GPR اهداف ژئوتکنیکی مدفون به پارامترهای هندسی و فیزیکی با استفاده از مدلسازی عددی پیشرو

رضا احمدی<sup>۱</sup>، نادر فتحیان پور<sup>۲</sup>، غلامحسین نوروزی<sup>۳</sup>

۱-استادیار، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اراک

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

(دریافت: خرداد ۱۳۹۲ پذیرش: مهر ۱۳۹۴)

### چکیده

در پژوهش حاضر پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی مختلف متناظر با ساختارهای ژئوتکنیکی فرضی نظیر استوانه افقی منفرد، منشور دو بُعدی، استوانه افقی جفت، چندضلعی دو بُعدی دلخواه و زمین لایه‌ای، با استفاده از مدلسازی عددی پیشرو به‌روش تفاضل محدود دو بُعدی حوزه زمان بهبود یافته در حوزه فرکانس، مدلسازی شده است. در این تحقیق براساس پارامترهای ریاضی هذلولی و نتایج مدلسازی پیشرو داده‌های GPR هدف استوانه‌ای، نشان داده شده که بین نسبت ارتفاع به پهناي هذلولی با پارامترهای هندسی هدف استوانه‌ای (قطر و عمق دفن) یک سری روابط خطی وجود دارد. این روابط می‌تواند به‌عنوان معیارهای کمی مناسب برای شناسایی مشخصات فیزیکی و هندسی اشیاء استوانه‌ای مدفون در زیر زمین با تصاویر GPR مورد استفاده قرار گیرد. برای دست‌یابی به هدف و تحلیل حساسیت، تأثیر پارامترهای مختلف هدف نظیر شکل هندسی، جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن، نوع و سطح سیالات محتوی (درصد حجمی سیالات) و ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان بر روی پاسخ‌های GPR، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از پتانسیل بالقوه روش GPR برای آشکارسازی انواع اهداف مدفون، شناسایی جنس مدل و ارزیابی ویژگی‌های محتوای سیال مدل است. با استفاده از این شبیه‌سازی‌ها می‌توان اهداف استوانه‌ای فلزی را از غیرفلزی تشخیص داد و نوع سیال محتوای درون ساختارهای غیرفلزی (نظیر هوا، آب شیرین و آب شور) را تعیین نمود. نتایج تحقیق با مطالعه موردی برای شناسایی قنات واقع در دشت شاهین شهر اصفهان نیز اعتبارسنجی گردیده است، به‌گونه‌ای که عمق دفن و قطر قنات به‌ترتیب با خطای ۳/۴ درصد و ۱۲ درصد تقریب زده شد.

### واژگان کلیدی

رادار نفوذی به زمین (GPR)، هذلولی پاسخ، اهداف ژئوتکنیکی، تحلیل حساسیت، پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای

### ارجاع به این مقاله:

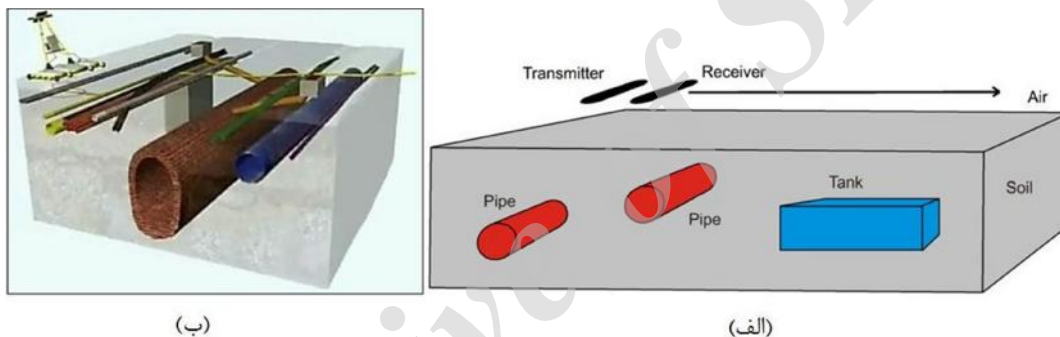
احمدی، ر.، فتحیان پور، ن.، نوروزی، غ.، (۱۳۹۴)، تحلیل حساسیت پاسخ GPR اهداف ژئوتکنیکی مدفون به پارامترهای هندسی و فیزیکی با استفاده از مدلسازی عددی پیشرو، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، (۹)۵، ۱۳-۳۰.

[http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940912-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940912-X)

\* عهده دار مکاتبات: [R\\_ahmadi@arakut.ac.ir](mailto:R_ahmadi@arakut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

روش در حال حاضر دارای طیف وسیعی از کاربردهاست و در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله معدنکاری [۴-۷]، ژئوتکنیک و شناسایی ساختار [۸-۱۲]، تصویر کردن آب‌های زیرزمینی [۱۳-۱۵]، باستان‌شناسی [۱۶، ۱۷]، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی [۱۸، ۱۹]، برف و یخ و یخ‌بندان‌شناسی [۲۰، ۲۱]، تأسیسات و مسائل زیست‌محیطی [۲۲-۲۴] دارای کاربرد است. شکل ۱ به‌طور طرح‌وار شیوه برداشت داده‌های GPR را با متداول‌ترین روش برداشت آن یعنی پروفیل‌زنی بازتابی با فاصله ثابت تک‌حالتی و بعضی از کاربردهای متداول آن برای آشکارسازی و شناسایی تأسیسات، خطوط لوله و اهداف ژئوتکنیکی مدفون، نشان می‌دهد.



شکل ۱: برداشت داده‌های GPR با روش پروفیل‌زنی بازتابی با فاصله ثابت تک‌حالتی، به‌منظور آشکارسازی الف) تأسیسات [۲۵] و ب) ساختارهای ژئوتکنیکی مدفون در زیر زمین (ویرایش شده از [۲۶]).

## ۲- مبانی فیزیکی و نظری روش GPR

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 هستند. این معادلات در یک محیط همسانگرد به‌صورت روابط (۱) تا (۴) بیان می‌شوند.

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

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

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = q_v \quad (4)$$

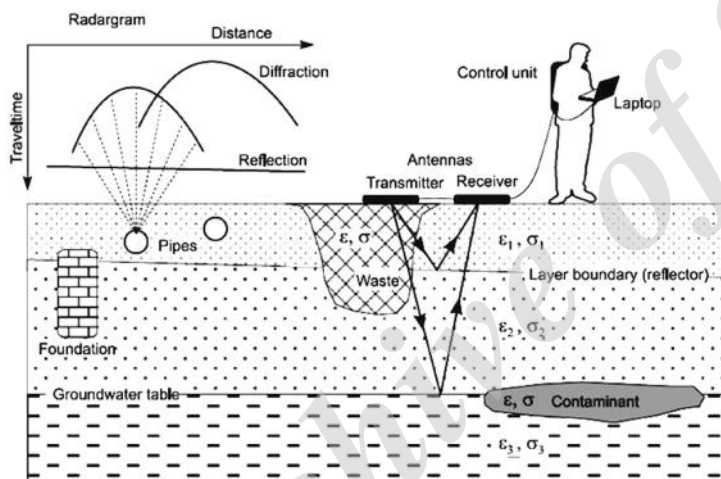
که  $E$  بردار شدت میدان الکتریکی،  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $t$  زمان،  $H$  بردار شدت میدان مغناطیسی،  $D$  چگالی بار الکتریکی (جابجایی الکتریکی)،  $J$  چگالی جریان

رادار نفوذی به زمین<sup>۱</sup> (GPR) یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب<sup>۲</sup> (NDE) و با قدرت تفکیک بالا است که با ارسال امواج الکترومغناطیسی<sup>۳</sup> (EM) با فرکانس زیاد به درون زمین و دریافت امواج بازتابی حاصل، به آشکارسازی و شناسایی ویژگی‌های ساختارهای مدفون در درون زمین می‌پردازد. این روش قادر به تصویربرداری جزئیات زیرسطحی محیط، بدون نیاز به هیچ‌گونه تخریب و یا دست‌کاری بوده و نتایج برداشت، به‌آسانی به‌صورت تصاویر دو بُعدی و سه بُعدی، ارائه می‌شوند.

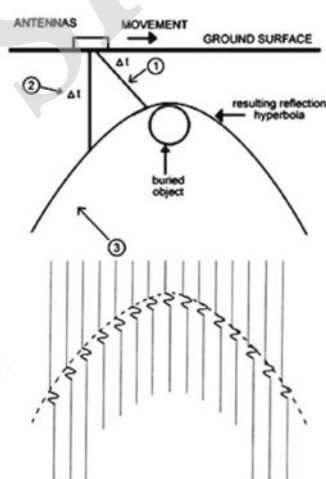
روش GPR اولین بار توسط استرن [۲۱] در اتریش برای تخمین ضخامت یک لایه یخی به‌کار رفت [۳]. این

یک سیستم GPR، سیگنال‌های الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز را توسط فرستنده به درون محیط، ارسال کرده و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را توسط گیرنده، آشکار می‌کند. سیگنال GPR ثبت شده، به تغییرات خصوصیات فیزیکی محیط و ویژگی‌های موج GPR یعنی سرعت فازی موج الکترومغناطیس ( )، میزان تضعیف میدان در محیط سیر موج (۲) و امپدانس الکترومغناطیسی (z) بستگی دارد. از آنجایی که سیگنال‌های GPR از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند، بنابراین پایه و اساس GPR در الکترومغناطیس است. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند،

سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان ثبت می‌شود [۲۸]. متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR نمایش دامنه سیگنال امواج الکترومغناطیسی بازتابی در مقابل زمان تاخیر است که ردی (تریس) نامیده می‌شود. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی، از سیگنال‌های زمینه بزرگتر هستند. پلاریته سیگنال GPR نیز که براساس علامت ولتاژ نیمه اول سیکل تعریف می‌شود با تغییر ویژگی‌های الکتریکی (به‌ویژه  $\nu$ )، تغییر نموده و در تفسیر داده‌ها بسیار مفید است. در حالت کلی نگاشت راداری<sup>۱</sup> برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۲ مجموعه‌ای از تریس‌های بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون، به‌صورت هذلولی است [۳].



(ب)



(الف)

شکل ۲: الف) قالب مقطع بازتابی GPR با رخداد راداری به‌صورت هذلولی (خط چین) برای شیء مدفون [۲۹]، ب) نمایش بعضی از کاربردهای GPR [۳۰،۳]

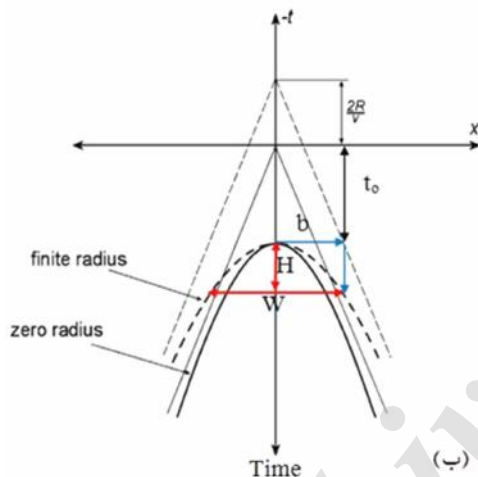
در پژوهش حاضر، پاسخ‌های GPR برای اشیاء مصنوعی فرضی متناظر با اهداف ژئوتکنیکی متداول همانند استوانه افقی منفرد (شاخص انواع لوله‌ها و قنات‌های استوانه‌ای شکل)، منشور دو بُعدی (معرف انواع کانال‌ها و فضاهای خالی)، استوانه افقی جفت (حالت ترکیبی از دو شیء استوانه‌ای مدفون در مجاورت یکدیگر)، زمین لایه‌ای (معرف اسلب) و مدل دو بُعدی شامل چندضلعی دلخواه (معرف انواع فضاهای خالی) با استفاده از مدلسازی پیشرو و الگوریتم مناسب بهبودیافته به روش تفاضل محدود دو بُعدی، مدلسازی شد. بعد از دریافت اطمینان از درستی

پاسخ‌های تولید شده، تأثیر پارامترهای هندسی و فیزیکی مختلف مدل‌های استفاده شده بر روی پاسخ‌ها، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### ۳- روابط بین پارامترهای هندسی و فیزیکی هدف استوانه‌ای و پارامترهای پاسخ GPR مربوطه

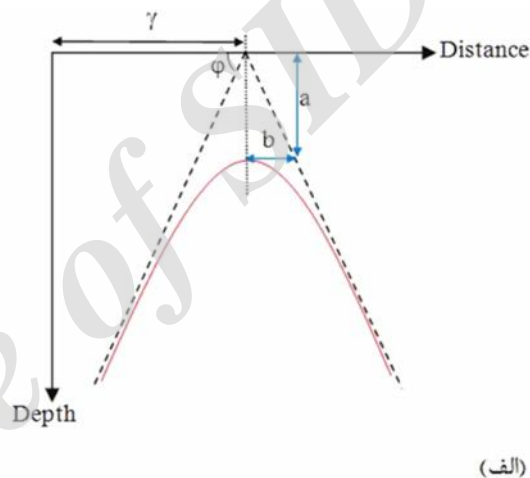
یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مهندسی، شناسایی و استخراج پارامترهای هندسی و فیزیکی ناهمگنی‌های زیرسطحی مدفون است که تا حدودی با استفاده از روش‌های

مدل ریاضی هذلولی می‌توان روابط بین پارامترهای هندسی هذلولی و پارامترهای فیزیکی و هندسی اشیاء مدفون را استخراج نمود. در مقیاس زمانی مقدار  $a$  که مطابق شکل ۳(ب) فاصله از راس هذلولی تا محل برخورد مجانب‌های هذلولی تعریف می‌شود برای یک هدف نقطه‌ای مدفون برابر با  $t_0$  و برای یک هدف غیرنقطه‌ای (مثلاً یک استوانه با شعاع  $R$ ) برابر با  $t_0 + 2R/v$  است [۳۱] که  $t_0$  زمان سیر دو طرفه موج در راستای قائم، مربوط به چشمه واقع بر روی سطح زمین درست بالای مرکز شیء مدفون است.  $v$  هم سرعت سیر امواج  $EM$  است.



ژئوفیزیکی نظیر  $GPR$  قابل حل هستند. همان‌طور که قبلاً نیز آورده شد، پاسخ  $GPR$  برای اغلب اشیاء مدفون (به‌ویژه ساختارهای استوانه‌ای) مطابق شکل ۳(الف) (به‌صورت هذلولی است. در این شکل  $X$  و  $a$  به ترتیب موقعیت مکانی افقی و قائم راس هذلولی، زاویه شیب مجانب‌های هذلولی و  $b$  فاصله افقی از راس تا مجانب‌های هذلولی است.

از آنجایی که اشیاء استوانه‌ای در پاسخ  $GPR$ ، توسط پارامترهایی نظیر شعاع، عمق دفن، موقعیت افقی شیء و نیز ویژگی‌های محیط میزبان نظیر سرعت سیر امواج الکترومغناطیس مشخص می‌شوند، بنابراین با استفاده از



شکل ۳: پارامترهای هذلولی پاسخ نوعی  $GPR$  برای هدف مدفون (الف) در مقیاس مکانی و (ب) تعریف پارامترهای مشخصه جدید  $H$  و  $W$  در مقیاس مکانی - زمانی.

#### ۴- مدلسازی پیشرو داده‌های $GPR$ به روش تفاضل محدود

رفتار حاکم بر میدان‌های الکترومغناطیس  $GPR$  را می‌توان توسط معادلات ماکسول و شرایط مرزی مناسب شبیه‌سازی نمود. پاسخ سیستم  $GPR$  برای مدل‌های مصنوعی فرضی مختلف متناظر با اهداف و ساختارهای ژئوتکنیکی واقعی باید توسط یکی از روش‌های مدلسازی عددی تولید گردد تا این هسته مدلسازی پیشرو منجر به شناسایی رفتار مدل‌های مختلف در پاسخ‌ها شده و عملیات مدلسازی معکوس داده‌های  $GPR$  در کاربردهای عملی را فراهم نماید. بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر آن است که بدانیم تحت شرایط مختلف محیطی، چه اطلاعات

علاوه بر روابط به‌دست آمده توسط شیهاب<sup>۹</sup> و آل‌نوامی<sup>۱۰</sup> [۳۱]، برای به‌دست آوردن موقعیت مکانی و شعاع یک هدف استوانه‌ای، شیب مجانب‌های هذلولی ( $\phi$ ) و نسبت ارتفاع به پهناى هذلولی ( $H/W$ ) نیز می‌تواند به‌عنوان معیارهای کمی مناسبی برای شناسایی پارامترهای شیء استوانه‌ای مدفون مورد استفاده قرار گیرد. همچنین شدت دامنه سیگنال‌های بازتابی و معکوس شدن پلاریته آنها می‌تواند به‌عنوان معیارهای مناسبی برای شناسایی نوع سیال محتوی ساختارهای ژئوتکنیکی مدفون در زیر زمین استفاده شود. به‌منظور استخراج روابط بین این کمیت‌ها و پارامترهای هندسی هدف استوانه‌ای مدفون، بایستی ابتدا پاسخ  $GPR$  برای مدل‌های مصنوعی مختلف، مدلسازی شود.

مجاور و داشتن این میزان جابجایی زمانی، با استفاده از درون‌یابی در فاصله بین هر دو تریس متوالی و ایجاد دامنه‌های پاسخ‌های بازتابی مقادیر تریس‌های تخمینی، به تعداد دلخواه تریس مصنوعی محاسبه می‌شود. از آنجایی که پاسخ *GPR* اغلب اهداف مدفون به صورت یک رخداد هذلولی شکل است بنابراین برای درون‌یابی بین دو تریس مجاور، به منظور حفظ شکل منحنی‌وار، از درون‌یابی یک‌بُعدی مکعبی<sup>۱۵</sup> استفاده شده است. این محاسبات در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام گرفته و نتیجه آن بهبود کیفی و بصری پیوستگی تریس‌ها در پاسخ نهایی مقطع *GPR* و تولید پاسخ با تفکیک‌پذیری زیاد است.

هدف اصلی، مطالعه تاثیر فاکتورهای مختلف نظیر شکل هندسی، جنس، اندازه و ابعاد، عمق دفن، نوع و سطح سیالات محتوی (درصد حجمی سیالات) هدف و مشخصات فیزیکی محیط میزبان بر پاسخ *GPR* مدل‌های مصنوعی مختلف با استفاده از مدلسازی عددی پیشرو است.

به منظور واقع‌گرایانه بودن نتایج تحقیق، برای ارزیابی تاثیر فاکتورهای مختلف، ویژگی‌های الکتریکی محیط‌های میزبان و اهداف، متناسب با واقعیت (عمل) انتخاب شده است. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه در تحقیق حاضر از جمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج (در محدوده فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) آورده شده است.

از آنجایی که در اکثر موارد پاسخ *GPR* مرتبط با شکل هندسی مدل‌های مورد مطالعه، رفتار نسبتاً مشابه و نتایج یکسانی را نشان می‌دهند (به عنوان مثال تفسیر نتایج پاسخ *GPR* یک مدل منشور دو بُعدی با پاسخ *GPR* یک مدل استوانه افقی تقریباً یکسان است) بنابراین از ذکر موارد مشابه خودداری می‌شود. در تمام موارد فرکانس در نظر گرفته شده برای امواج الکترومغناطیس، ۲۵۰ مگاهرتز است. در ادامه تاثیر هر یک از فاکتورهای فوق، به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱-۱-۴- مدلسازی پاسخ *GPR* هدف استوانه‌ای

#### ۴-۱-۱-۴- تأثیر جنس دیواره هدف استوانه‌ای بر پاسخ *GPR*

شکل ۴ پاسخ *GPR* سه هدف استوانه‌ای با جنس‌های مختلف را نشان می‌دهد. هدف مدل ۱ از جنس بتن، مدل

معقولی از داده‌های واقعی 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، بر اساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و اثر مواد زیرسطحی بر آن‌ها، شبیه‌سازی می‌شود.

از میان روش‌های عددی مختلف، روش تفاضل محدود به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی نظیر درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدلسازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن، کاربرد بیشتری دارد [۳۲]. برای مدلسازی پیشرو دو بُعدی داده‌های *GPR* در پژوهش حاضر، بازتاب امواج *GPR* ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو روی سطح زمین)، به روش تفاضل محدود حوزه زمان<sup>۱۱</sup> (*FDTD*) با فرمول بندی روش میدان مغناطیسی عرضی<sup>۱۲</sup> (مد *TM*) شبیه‌سازی شده است. برای این منظور روش تفاضل محدود دو بُعدی ارائه شده توسط ایروینگ<sup>۱۳</sup> و نایت<sup>۱۴</sup> [۳۳] مورد استفاده قرار گرفته و برای مدلسازی پیشرو اشیاء مصنوعی فرضی متداول در بررسی‌های ژئوتکنیکی، بهبود داده شده است [۳۵، ۳۴]. تئوری پایه کدهای مدلسازی پیشرو *GPR*، معادلات کرل ماکسول (قانون القای فاراده و تعمیم قانون مداری آمپر) یعنی معادلات (۱) و (۲) هستند. از آنجایی که مطابق شکل ۲(الف) سیگنال تریس‌های پاسخ *GPR* در محدوده ناهمگنی‌های زیرسطحی جابجایی زمانی دارند، این ویژگی اجازه به کارگیری تبدیل فوریه تریس‌ها و اعمال جابجایی زمانی در حوزه فرکانسی را فراهم می‌آورد. با این نگرش از تبدیل فوریه سریع هر دو تریس متوالی که دارای جابجایی زمانی معینی هستند و اعمال قضیه جابجایی زمانی در حیطه فوریه مطابق رابطه (۵) استفاده شده است.

$$f(t-t_0) \overset{F}{\leftrightarrow} e^{-i\tilde{S}t_0} F(\tilde{S}) \quad (5)$$

که در این رابطه  $t$  و  $t_0$  زمان،  $i = \sqrt{-1}$ ،  $\tilde{S}$  فرکانس زاویه‌ای و  $F$  علامت تبدیل فوریه است.

در این روش ابتدا بیشترین مقدار دامنه هر تریس به عنوان شروع سیگنال بازتابی اول، برای تمام تریس‌ها شناسایی شده سپس اختلاف زمانی بین سیگنال بازتابی اول در هر دو تریس متوالی، تعیین گردیده و به صورت جابجایی زمانی در فواصل مکانی بین هر دو تریس متوالی ذخیره می‌شود. بعد با استفاده از تبدیل فوریه هر دو تریس

جنس خاک رس سیلتی مدفون هستند. در این مورد و سایر موارد بررسی شده در این پژوهش، پیمایش در راستای عمود بر امتداد هدف، انجام شده است.

۲ از جنس فایبرگلاس و مدل ۳ فلزی است. مشخصات هندسی هر سه مدل یکسان بوده، قطر داخلی هر سه هدف برابر با یک متر و ضخامت دیواره آنها ۴ سانتی‌متر است. همگی صددرصد پر از هوا بوده و در عمق یک متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت بالایی هدف) در محیط میزبان از

جدول ۱: برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مطالعه شده [۳۶-۳۸]

ماده	گذردهی دی الکتریک نسبی	هدایت الکتریکی ( $mS/m$ )	سرعت موج ( $m/ns$ )
خاک رس سیلتی	۶	۶/۶	۰/۱۲
خاک رس مرطوب	۱۹	۱۰۰	۰/۰۷
هوا	۱	۰	۰/۳
آب شیرین	۸۰	۰/۵	۰/۰۳۳
آب شور	۸۰	۳۰۰۰	۰/۰۳۳
فاضلاب هیدروکربنی	۲/۵	۱۰ <sup>-۳</sup>	۰/۲
فلز	۱۰۰	۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۰۱۷
بتن	۶	۵	۰/۰۹
فایبرگلاس	۴/۸	۰/۶۶	۰/۱۴

دیواره هدف غیرفلزی، بر روی پاسخ  $GPR$  آن قابل چشم‌پوشی بوده و در این مورد فاکتور غالب بر روی پاسخ  $GPR$ ، تباین<sup>۱۶</sup> بین ویژگی‌های الکتریکی محیط میزبان و محتوای هدف است. بنابراین در مدلسازی‌های بعدی برای اهداف، هیچ‌گونه دیواره‌ای در نظر گرفته نمی‌شود، به عبارت دیگر در هر مدل تنها هدف و محیط میزبان وجود خواهد داشت.

#### ۴-۱-۲- تأثیر قطر هدف استوانه‌ای بر پاسخ $GPR$

مدلسازی برای سه هدف استوانه‌ای توخالی با قطرهای مختلف نیم (مدل ۴)، یک (مدل ۵) و یک‌ونیم متر (مدل ۶)، مدفون در عمق یک متری در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی، صورت گرفته است (شکل ۵). شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش قطر هدف استوانه‌ای، فاصله قائم بین پاسخ سقف ( $T$ ) و کف هدف ( $B$ )، مطابق انتظار افزایش می‌یابد. درحالی‌که شدت بازتاب و زاویه شیب مجانب‌های هذلولی، ثابت بوده و نسبت ( $H/W$ ) با افزایش قطر بطور ملایم افزایش می‌یابد. بین تغییرات نسبت ( $H/W$ ) با قطر هدف استوانه‌ای ( $D$ ) مطابق رابطه (۶) یک رابطه خطی با ضریب همبستگی بسیار خوب ( $r=0.998$ )، ضریب زاویه ۱/۱ و عرض از مبدا ۴/۳۸ وجود دارد.

مقایسه پاسخ  $GPR$  حاصل از مدل‌ها نشان می‌دهد که در مورد مدل‌های ۱ و ۲ اختلاف فاحشی در دامنه پاسخ‌های سقف دو مدل ( $A$  و  $B$ ) و نیز کف دو مدل ( $D$ ) و  $E$ ) مشاهده نمی‌شود زیرا از یک سو ضخامت دیواره اهداف در مقایسه با قطر آنها نسبتاً کوچک است و از سوی دیگر بتن و فایبرگلاس از نظر هدایت الکتریکی و گذردهی دی الکتریک، اختلاف چندانی ندارند. ممکن است در داده‌های واقعی در اثر نوفه، اختلاف ناچیزی در دامنه بازتاب‌های سقف دو مدل ( $A$  و  $B$ ) دیده شود [۳۶].

جنس دیواره اغلب لوله‌ها و ساختارهای استوانه‌ای معمولاً فلزی است (همانند مدل ۳). پاسخ سقف مدل ۳ نسبت به دو مورد قبلی قوی‌تر بوده و پلاریته سیگنال‌های بازتابی نیز معکوس شده است (معکوس شدن پلاریته، با معکوس شدن ترتیب رنگی پاسخ سقف این مدل ( $C$ ) نسبت به دو مدل قبل یعنی  $A$  و  $B$ ، قابل مشاهده است). همچنین هیچ بازتابی از کف هدف فلزی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن است.

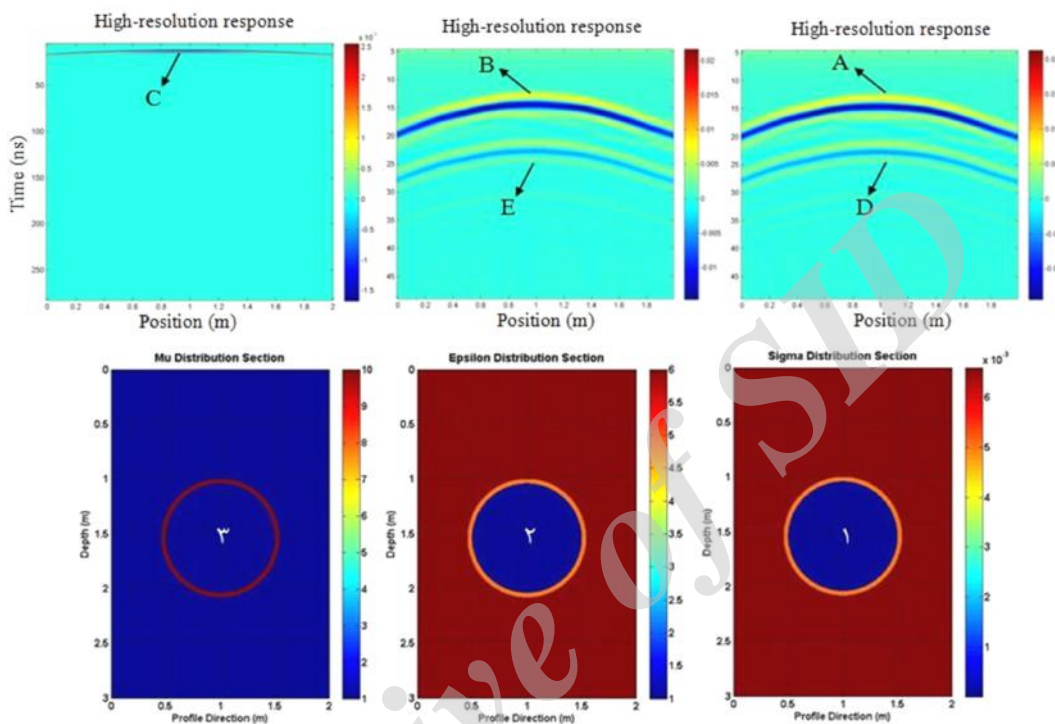
نتایج تعداد زیادی آزمایش عددی دیگر در ارتباط با بررسی تاثیر جنس دیواره هدف بر روی پاسخ  $GPR$  نشان می‌دهد که بطور کلی تاثیر جنس دیواره و نیز ضخامت

$$\frac{H}{W} = 4.38 + 1.1 D \quad (6)$$

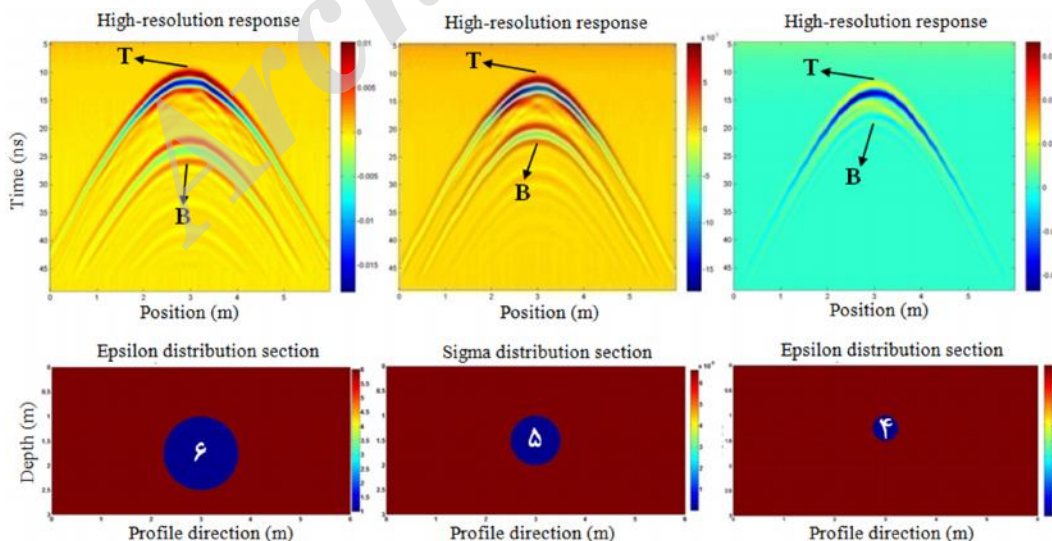
(مدل ۸) و دو متری (مدل ۹) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی صورت گرفته است که نتایج آن در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

#### ۳-۱-۴- تأثیر عمق هدف استوانه‌ای بر پاسخ GPR

شبه‌سازی برای سه هدف استوانه‌ای توخالی به قطر یک متر، واقع در سه عمق مختلف یک (مدل ۷)، یک‌ونیم



شکل ۴: پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای توخالی با جنس‌های مختلف؛ مدل ۱: بتنی، مدل ۲: از جنس فایبرگلاس و مدل ۳: فلزی. محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی است.

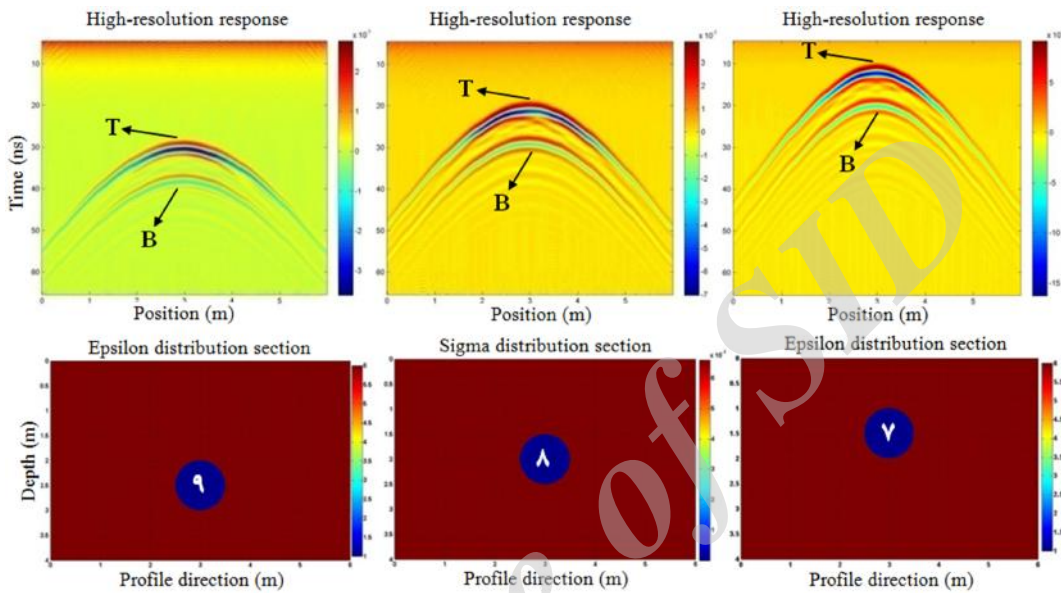


شکل ۵: تأثیر قطر هدف استوانه‌ای توخالی بر پاسخ GPR با ثابت ماندن عمق دفن. قطر مدل‌های ۴ تا ۶ به ترتیب ۱/۵، ۱/۱۰ و ۱/۲۰ متر و محیط میزبان خاک رس سیلتی است.

استوانه‌ای (Z) مطابق رابطه (۷) یک رابطه خطی با ضریب همبستگی منفی زیاد ( $r = 0.976$ )، ضریب زاویه  $-0.59$  و عرض از مبدا  $6.072$  وجود دارد.

$$\frac{H}{W} = 6.072 - 0.59 Z \quad (۷)$$

شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش عمق دفن هدف، موقعیت نقطه پیک هذلولی پاسخ (که معرف موقعیت افقی و عمق دفن هدف استوانه‌ای نیز است) مطابق انتظار افزایش می‌یابد در حالی که زاویه شیب مجانب‌های هذلولی و نیز نسبت ( $H/W$ ) بطور ملایم کاهش پیدا می‌کنند. در این مورد بین تغییرات نسبت ( $H/W$ ) با عمق دفن هدف

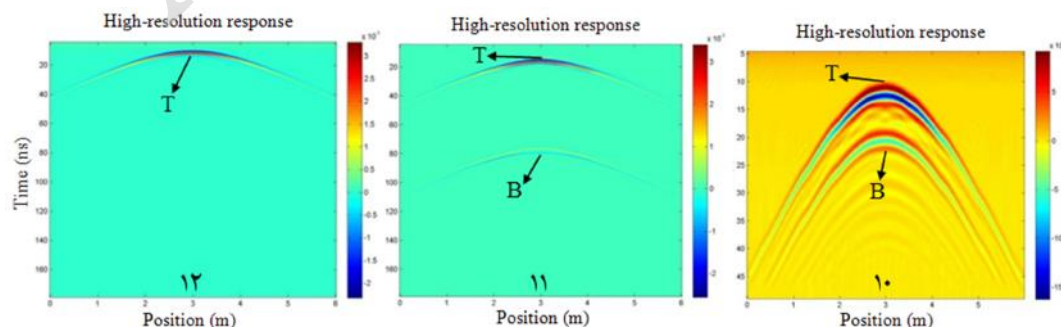


شکل ۶: تأثیر عمق دفن هدف استوانه‌ای توخالی بر پاسخ GPR با ثابت ماندن قطر آن. عمق دفن مدل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب ۱، ۵/۱ و ۲ متر و محیط میزبان، خاک رس سیلتی است.

۱۱ پر از آب شیرین و مدل ۱۲ پر از آب شور است. پاسخ GPR مدل‌ها در شکل ۷ نشان می‌دهد که در صورت خالی بودن هدف مدفون (مدل ۱۰)، پاسخ سقف (T) و کف آن (B) به‌وضوح مشخص بوده و شدت بازتاب هر دو پاسخ، نسبتاً قوی است.

#### ۴-۱-۴- تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر پاسخ GPR

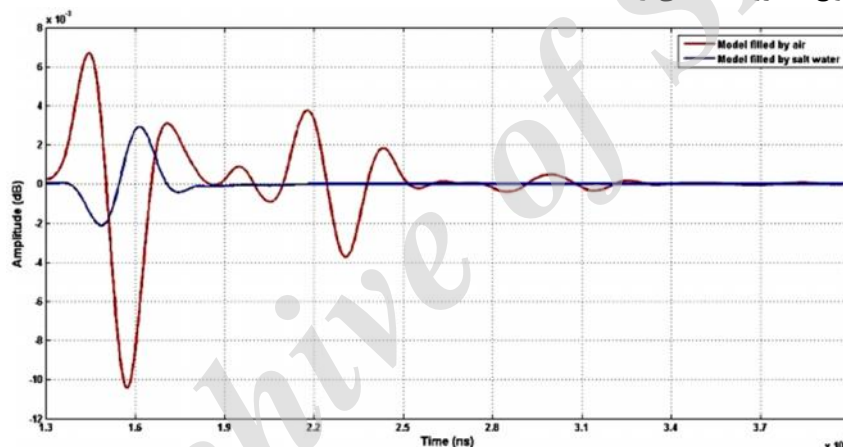
شکل ۷ پاسخ‌های GPR تولید شده برای سه هدف استوانه‌ای با مشخصات یکسان، به قطر یک متر، مدفون در عمق یک متری در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی را نشان می‌دهد که در آن، مدل ۱۰ پر از هوا، مدل



شکل ۷: تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر پاسخ GPR. مدل ۱۰: استوانه توخالی، مدل ۱۱: استوانه پر از آب شیرین و مدل ۱۲: استوانه پر از آب شور. محیط میزبان خاک رس سیلتی است.



می‌نماید. به عبارت دیگر آب شور مانند فلز رفتار می‌کند با این تفاوت که شدت بازتاب آن اندکی از فلز کمتر است. ضمناً پلاریته سیگنال بازتابی در این مورد نیز (نسبت به مدل ۱۰) معکوس شده و شدت بازتاب پاسخ، نسبتاً بالاست. معکوس شدن پلاریته سیگنال در این مورد بطور واضح با ترسیم تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف مدفون (تریس میانی پاسخ)، یکی پر از هوا و دیگری پر از آب شور در شکل ۸ نشان داده شده است. بطور کلی در مورد ساختارهای حاوی آب شور هیچ‌گونه بازتاب و در نتیجه هیچ‌گونه رخدادی در قسمت زیر پاسخ مرز دو سیال وجود نخواهد داشت و این نشانه شناسایی حضور آب شور و نحوه تشخیص آن از آب شیرین است.



شکل ۸: نمایش پلاریته معکوس برای تریس‌های میانی پاسخ هدف دو مدل ۱۰ (رنگ قرمز) و ۱۲ (رنگ آبی)

مشاهده نمی‌شود جز اینکه شدت بازتاب پاسخ‌ها اندکی کاهش می‌یابد.

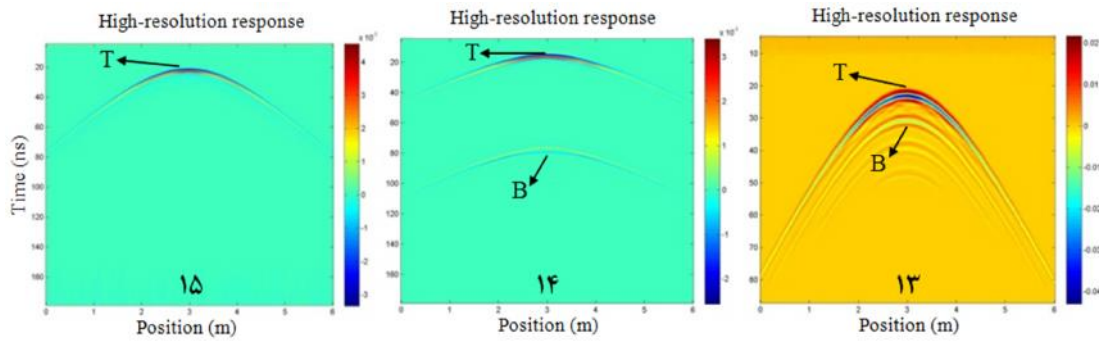
۴-۱-۵- تأثیر حضور دو سیال مختلف (سهم نسبی هر سیال ۵۰ درصد حجمی)

شکل ۱۰ پاسخ‌های GPR سه هدف استوانه‌ای حاوی دو نوع سیال هوا- فاضلاب هیدروکربنی (مدل ۱۶)، هوا- آب شیرین (مدل ۱۷) و هوا- آب شور (مدل ۱۸) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود مرز دو سیال، در قسمت میانی هدف قرار دارد، به عبارت دیگر هر سیال ۵۰ درصد حجمی هدف را تشکیل می‌دهد. تمام اهداف در عمق یک متری درون خاک رس سیلتی، مدفون هستند.

در شرایطی که هدف مدفون پر از آب شیرین باشد (مدل ۱۱) اگرچه در این مورد نیز هر دو پاسخ سقف و کف هدف، مشخص است شدت بازتاب پاسخ کف هدف، ضعیف است که علت آن تضعیف امواج در طی عبور از آب شیرین درون هدف است.

همچنین از آنجایی که سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در آب، کمتر از هواست بنابراین فاصله قائم پاسخ سقف و کف هدف در مدل ۱۱ از مدل ۱۰ به مراتب بیشتر است و نکته دیگر آن که در این مورد، پلاریته سیگنال نیز (نسبت به مدل ۱۰) معکوس شده است. در حالتی که هدف سرشار از آب شور باشد (مدل ۱۲) فقط پاسخ سقف هدف، قابل مشاهده است و هیچ پاسخی از کف هدف وجود ندارد که علت آن هدایت الکتریکی بسیار زیاد آب شور بوده و امواج الکترومغناطیسی را به شدت تضعیف

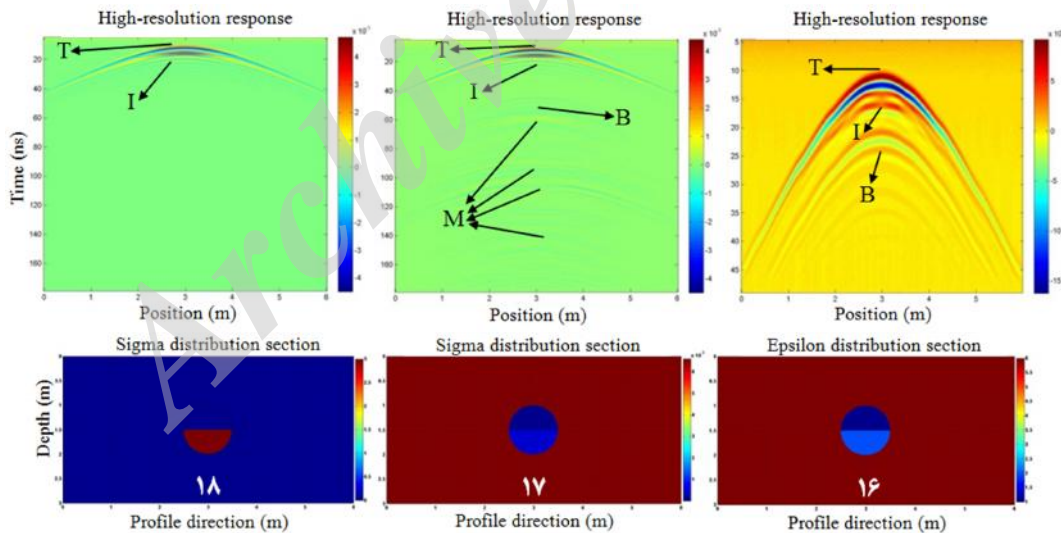
تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای مدفون در محیط میزبان از جنس خاک رس مرطوب نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ نتایج آشکارسازی را برای سه هدف استوانه‌ای، به قطر یک متر، مدفون در عمق یک متری نشان می‌دهد که در آن اهداف مدل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب پر از هوا، آب شیرین و آب شور هستند. نتایج شکل ۹ و مقایسه آنها با نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که اگر هدایت الکتریکی محیط میزبان، نسبتاً زیاد باشد پاسخ کف استوانه توخالی (مدل ۱۳)، به وضوح قابل رویت نیست که دلیل آن تضعیف بیشتر امواج الکترومغناطیسی، در محیط میزبان با هدایت الکتریکی بیشتر است. در پاسخ مدل‌های ۱۴ و ۱۵ تغییر محسوس با نتایج مورد قبلی (شکل ۷)



شکل ۹: تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر پاسخ *GPR*. مدل ۱۳: استوانه توخالی، مدل ۱۴: استوانه پر از آب شیرین و مدل ۱۵: استوانه پر از آب شور. محیط میزبان خاک رس مرطوب است.

کف هدف (*B*) قابل مشاهده است اما زمان بازتاب کف مدل ۱۷ نسبتاً بیشتر است. از آنجایی که آب شیرین تاحدودی هادی جریان الکتریسیته است پاسخ کف مدل ۱۷ (*B*) نسبتاً ضعیف است. در پاسخ *GPR* این مدل، بازتاب‌های چندگانه (*M*) مشاهده می‌شود که اولین رخداد زیر پاسخ مرز دو سیال، پاسخ کف هدف است. در مدل ۱۸ که حاوی دو سیال هوا و آب شور است هیچ پاسخی از کف هدف وجود ندارد زیرا آب شور یک هادی الکتریکی خوب بوده و امواج الکترومغناطیسی را به شدت تضعیف می‌کند.

گاهی انواع هیدروکربن فاضلاب‌های صنعتی را تشکیل می‌دهند و به همین دلیل نیمه پایینی مدل ۱۶ فاضلاب هیدروکربنی با مقاومت الکتریکی زیاد در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن شکل ۱۰ پاسخ سقف (*T*) و مرز دو سیال (*I*) برای هر سه هدف، قابل مشاهده است اما پاسخ مرز سیالات برای مدل ۱۶ نسبتاً ضعیف بوده و احتمالاً در داده‌های واقعی (در حضور نوفه) قابل تشخیص نخواهد بود. در حالتی که فاضلاب هیدروکربنی و آب شیرین نیمه پایینی هدف را تشکیل می‌دهند (مدل‌های ۱۶ و ۱۷) پاسخ



شکل ۱۰: مقایسه پاسخ *GPR* سه هدف استوانه‌ای حاوی دو سیال. مدل ۱۶: هوا- فاضلاب هیدروکربنی، مدل ۱۷: هوا- آب شیرین و مدل ۱۸: هوا- آب شور. مرز دو سیال در قسمت میانی هدف قرار دارد.

دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی نیز روی پاسخ *GPR* تاثیر می‌گذارند. بنابراین بایستی تاثیر آنها با آزمایش‌های مدل‌سازی مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۴-۱-۶- تأثیر ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان بر پاسخ *GPR*

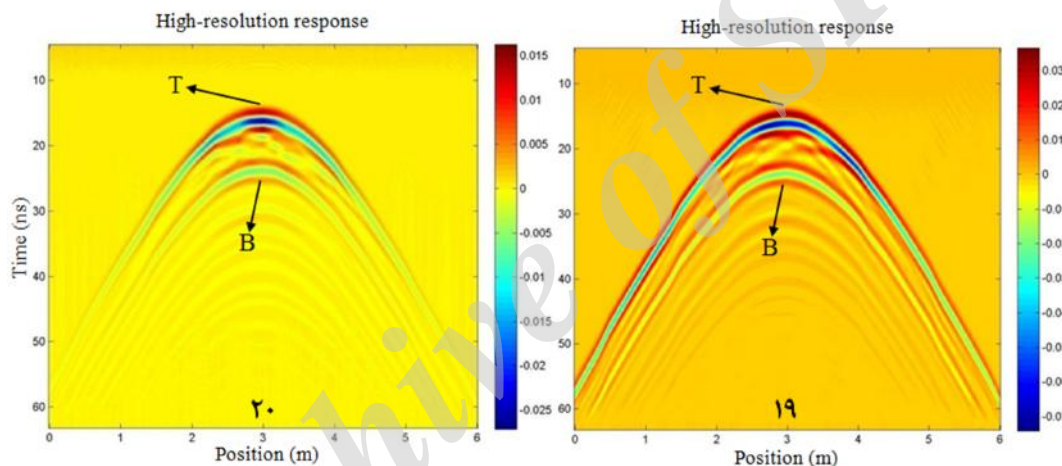
علاوه بر ویژگی‌های هندسی و فیزیکی هدف مدفون، ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان از جمله گذردهی

## تأثیر هدایت الکتریکی محیط میزبان

۱۰ و ۵ است. نفوذپذیری مغناطیسی هر دو مدل نیز یکسان و برابر با مقدار فضای آزاد است.

پاسخ GPR در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که اگر محیط میزبان بسیار مقاوم باشد (مدل ۱۹) دامنه سیگنال‌های بازتابی سقف و کف هدف هر دو قوی‌تر از پاسخ نظیر هدف مدل با محیط میزبان بسیار هادی (مدل ۲۰) هستند. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود بازتاب‌های سقف و به‌ویژه کف مدل ۲۰ به‌گونه‌ای تضعیف شده‌اند که ممکن است پاسخ کف در داده‌های واقعی در حضور نوفه پنهان شده و دیده نشود.

بدیهی است که با تغییر هدایت الکتریکی محیط میزبان (و ثابت ماندن دیگر شرایط)، پلاریته، شیب مجانب‌های هذلولی و نسبت ( $H/W$ ) به‌هیچ‌وجه تغییر نخواهند کرد.



شکل ۱۱: تأثیر هدایت الکتریکی محیط میزبان بر پاسخ GPR برای دو هدف استوانه‌ای. برای مدل ۱۹:  $\uparrow_n=0.1 \text{ mS/m}$  و  $\uparrow_o=1 \text{ mS/m}$  و برای مدل ۲۰:  $\uparrow_n=10 \text{ mS/m}$  و  $\uparrow_o=1 \text{ mS/m}$ .  $h$ : محیط میزبان و  $o$ : شیء.

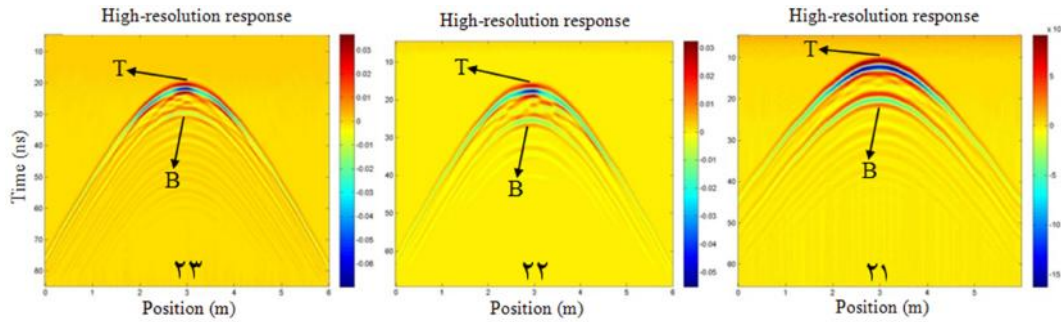
۲۳ به ترتیب برابر با ۶، ۱۲ و ۱۸ هستند. مقدار هدایت الکتریکی محیط میزبان در هر سه مدل برابر با  $6/67 \text{ mS/m}$  است.

هذلولی‌های شکل ۱۲ نشان می‌دهند که با افزایش میزان گذردهی دی‌الکتریک محیط میزبان و در نتیجه کاهش سرعت سیر امواج EM در محیط، موقعیت پیک هذلولی پاسخ به سمت پایین جابه‌جا شده، زاویه شیب مجانب‌های هذلولی افزایش یافته و نسبت ( $H/W$ ) به‌طور ملایم کاهش می‌یابد. در این مورد بین تغییرات نسبت ( $H/W$ ) با گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان (۷)، مطابق رابطه (۸) رابطه‌ای خطی با ضریب همبستگی

## تأثیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان

از آنجایی که گذردهی دی‌الکتریک هر محیط با سرعت سیر امواج EM در آن محیط مرتبط است بنابراین تغییر میزان گذردهی دی‌الکتریک یک محیط باعث تغییر سرعت سیر امواج در آن محیط شده و در نتیجه منجر به تغییر مشخصات هذلولی پاسخ می‌گردد. برای بررسی تأثیر این فاکتور، پاسخ‌های GPR برای سه هدف استوانه‌ای توخالی به قطر یک متر و مدفون در عمق یک متری در سه محیط میزبان با مقادیر ثابت‌های دی‌الکتریک مختلف (و دیگر شرایط یکسان) به‌صورت شکل ۱۲ مدل‌سازی شد که میزان گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان مدل‌های ۲۱ تا

منفی بسیار خوب ( $r=0.9897$ )، ضریب زاویه  $-0.04$  و (۸)  $\frac{H}{W} = 5.74 - 0.04v$   
 عرض از مبدا  $5/74$  وجود دارد.



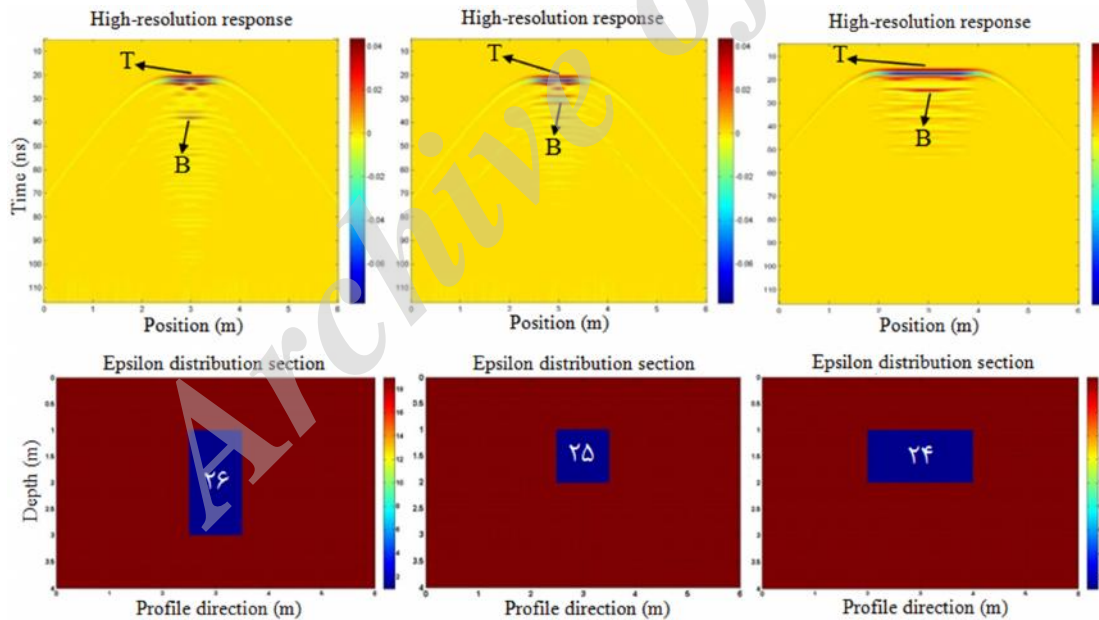
شکل ۱۲: تاثیر گذردهی دی الکتریک نسبی محیط میزبان بر پاسخ GPR برای سه هدف استوانه‌ای با  $V_{rh}=6 V_{ro}$  (مدل ۲۱)،  $V_{rh}=12 V_{ro}$  (مدل ۲۲) و  $V_{rh}=18 V_{ro}$  (مدل ۲۳):  $r$  نسبی،  $h$ : محیط میزبان و  $o$ : شیء.

۲-۴- مدلسازی پاسخ GPR منشور دو بُعدی

۲-۴-۱- تأثیر ابعاد منشور دو بُعدی روی پاسخ GPR

برای این منظور مطابق شکل ۱۳ پاسخ GPR برای مدل‌های حاوی منشور دو بُعدی توخالی در سه شکل مختلف مستطیل افقی که عرض آن دو برابر ارتفاع آن است

(مدل ۲۴)، مربعی (مدل ۲۵) و مستطیل قائم که ارتفاع آن دو برابر عرض آن است (مدل ۲۶) بررسی شده است. هر سه هدف در عمق یک متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت بالایی منشور) در محیطی از جنس خاک رس مرطوب مدفون هستند.



شکل ۱۳: تاثیر ابعاد هدف منشور دو بُعدی توخالی بر پاسخ GPR. مدل ۲۴: منشور مستطیلی افقی، مدل ۲۵: منشور مربعی و مدل ۲۶: منشور مستطیلی قائم. محیط میزبان خاک رس مرطوب است.

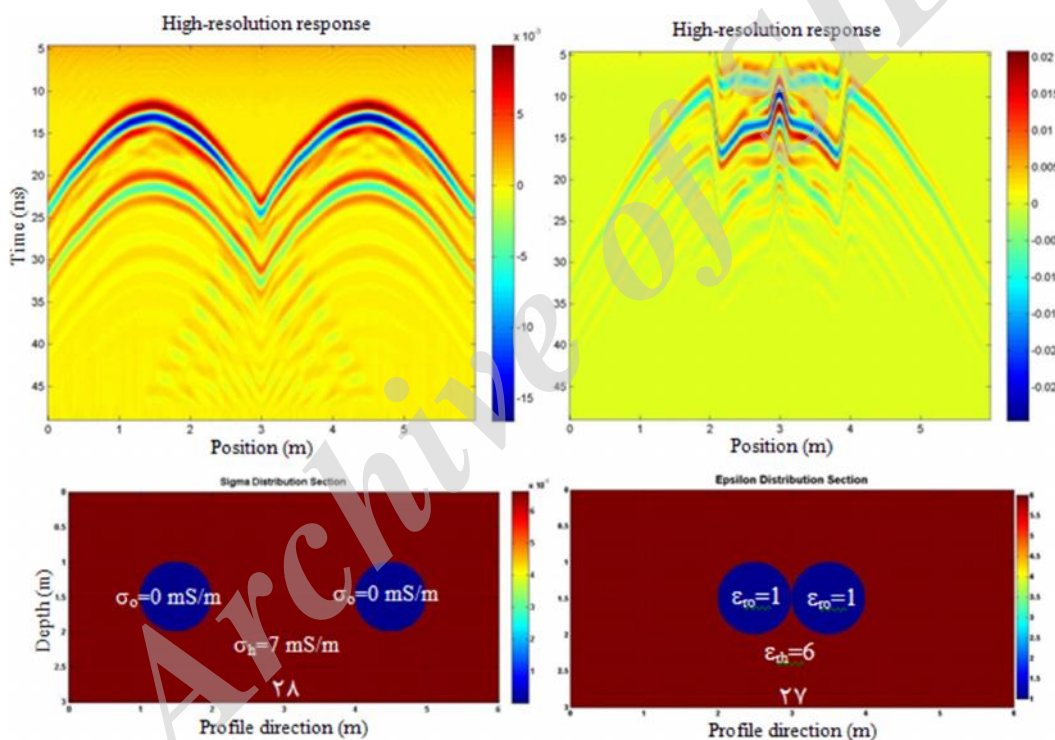
۳-۴- مدلسازی پاسخ GPR استوانه‌های افقی جفت

۳-۴-۱- تأثیر فاصله بین مراکز دو استوانه افقی روی پاسخ GPR

به منظور بررسی تاثیر حضور بیش از یک شیء روی پاسخ GPR و تعیین میزان حد جدایش دو پاسخ از یکدیگر (و در نتیجه شناسایی دو هدف زیرسطحی)، مدلسازی پاسخ GPR برای ترکیبی از دو شیء استوانه‌ای افقی

شناسایی هستند (با توجه به فاصله بین دو هدف). براساس آزمایش‌های عددی تعداد زیادی مدل حاوی دو استوانه افقی در مجاورت یکدیگر با فواصل مختلف، مشخص گردید تامادامی که فاصله بین مراکز دو استوانه (یا فاصله بین نقاط پیک دو هذلولی پاسخ) از یک‌ونیم برابر قطر هر یک از استوانه‌ها کمتر نباشد دو هدف از روی پاسخ‌های تصویر *GPR* قابل تفکیک و شناسایی هستند. به‌هرجهت در عمل به‌دلیل وجود انواع نوفه، شناسایی دو هدف در مجاورت یکدیگر از روی پاسخ *GPR* در صورتی امکان‌پذیر است که نقاط پیک پاسخ‌های آنها (هذلولی‌ها) خیلی بیشتر از این مقدار از یکدیگر فاصله داشته باشند.

توخالی اجراء شده است. قطر استوانه‌ها یک متر و در عمق یک متری در مجاورت یکدیگر درون محیطی از جنس خاک رس سیلتی مدفون شده‌اند. نتایج مدلسازی برای حالتی که فاصله بین مراکز دو استوانه برابر با قطر هر یک از استوانه‌ها باشد (مدل ۲۷) و حالتی که این فاصله سه برابر قطر هر یک از استوانه‌ها باشد (مدل ۲۸) در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود پاسخ *GPR* مدل ۲۷ که شامل ترکیب پاسخ دو هدف استوانه‌ای است از یکدیگر قابل تفکیک نیستند. اما در مورد پاسخ مدل ۲۸ اگرچه در این مورد نیز پاسخ‌های مربوط به دو هدف استوانه‌ای کاملاً از یکدیگر مجزا نبوده و اندکی هم‌پوشانی دارند اما دو هدف به‌وضوح قابل تفکیک و



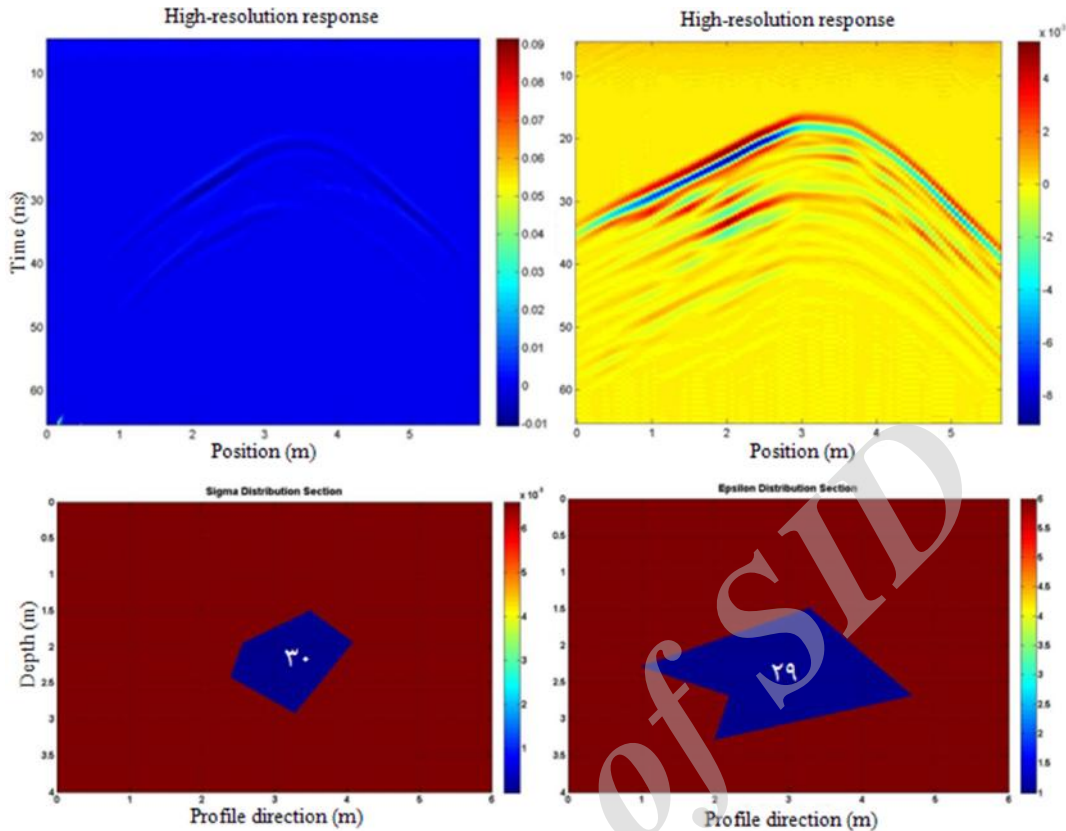
شکل ۱۴: تاثیر فاصله بین مراکز دو استوانه افقی به قطر یک متر مدفون در عمق یک متری در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی. در مدل ۲۷ فاصله بین مراکز دو استوانه، برابر با قطر هر یک از استوانه‌ها و در مدل ۲۸ سه برابر قطر هر یک از استوانه‌ها است.

همراه با پاسخ‌های *GPR* آنها نشان می‌دهد. عمق دفن این دو هدف (فاصله سطح زمین تا بالاترین نقطه هدف) برابر با ۱/۵ متر و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی هدف مدفون و زمینه، در هر دو مدل برابر با فضای آزاد است. بررسی پاسخ *GPR* مدل‌های مربوطه در قسمت بالای شکل ۱۵ نشان می‌دهد که همواره نقطه پیک پاسخ، در ارتباط با بالاترین نقطه هدف مدفون بوده و مشخص کننده موقعیت آن است.

#### ۴-۴- مدلسازی پاسخ *GPR* توده‌های چندضلعی دو بُعدی

#### ۴-۴-۱- تأثیر موقعیت گوشه‌های چندضلعی روی پاسخ *GPR*

شکل ۱۵ دو مدل به‌صورت توده‌های چندضلعی دو بُعدی توخالی، یکی محدب (کوژ) و دیگری مقعر (کاو)، مدفون در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی را



شکل ۱۵: پاسخ GPR توده‌های چندضلعی دو بُعدی توخالی مدفون در خاک رس سیلنتی (مدل ۲۹: چندضلعی محدب و مدل ۳۰: چندضلعی مقعر).

برای این منظور پاسخ GPR برای دو مدل زمین سه‌لایه‌ای مدلسازی شد که ویژگی‌های فیزیکی و هندسی مدل‌ها و پاسخ GPR به‌دست آمده از آنها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در مدل ۳۱ میزان گذردهی دی‌الکتریک لایه دوم دو برابر مقدار لایه اول و میزان هدایت الکتریکی لایه دوم نصف مقدار لایه اول است و در مدل ۳۲ این نسبت‌ها عکس شده است. بیان ریاضی مدل ۳۱ به صورت  $\epsilon_2 = 2\epsilon_1$ ,  $\sigma_2 = 0.5\sigma_1$  و برای مدل ۳۲ به صورت:  $\epsilon_2 = 0.5\epsilon_1$ ,  $\sigma_2 = 2\sigma_1$  است. تمامی شرایط دیگر برای هر دو مدل یکسان بوده و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی تمام لایه‌ها در هر دو مدل برابر با مقدار فضای آزاد است.

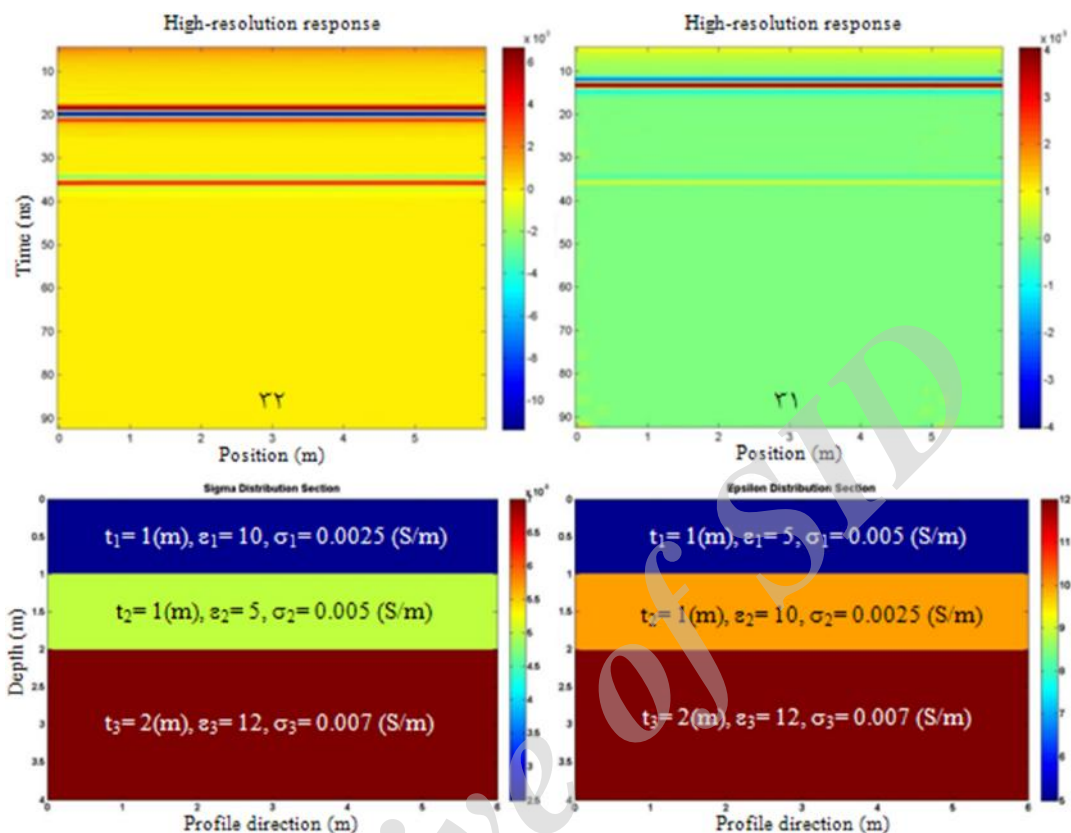
مطابق شکل ۱۶ پاسخ GPR مرز لایه‌های افقی به‌صورت رخدادهای خطی افقی است. موقعیت رخداد خطی افقی اول (مربوط به مرز مشترک لایه‌های اول و دوم) در پاسخ مدل ۳۲ نسبت به مدل ۳۱ جابه‌جا شده است که دلیل آن کمتر بودن مقدار نسبت گذردهی دی‌الکتریک

همواره اضلاع بالایی توده چندضلعی دو بُعدی خود را در پاسخ GPR به‌صورت نواحی با دامنه بازتاب‌های بزرگ‌تر نشان می‌دهند ضمن آن‌که اگر بالاترین بخش هدف به‌صورت یک نقطه باشد پاسخ قله نسبت به پاسخ اضلاع هدف به‌صورت یک نقطه تیز نخواهد بود. هر چند پاسخ GPR یک چندضلعی دو بُعدی به‌تنهایی نمی‌تواند محدب یا مقعر بودن توده چندضلعی دو بُعدی مدفون را تعیین نماید، در تجزیه و تحلیل و تفسیر تصاویر GPR، وجود علائم مذکور از جمله پاسخ به‌شکل هذلولی نامتقارن، نشانه‌ای برای شناسایی توده‌های چندضلعی دو بُعدی و تعیین موقعیت پیک چندضلعی است. در عمل فضاهای خالی موجود در ساختارها را می‌توان به‌صورت توده‌های چندضلعی دو بُعدی شبیه‌سازی نمود.

۴-۵- مدل‌سازی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای (اسلب)

۴-۵-۱- تأثیر تغییرات توأم گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی

لایه دوم به لایه اول، در مدل ۳۲ نسبت به مدل ۳۱ است. به همین دلیل پلاریته سیگنال بازتابی در مورد رخداد خطی افقی اول در مدل ۳۲ نسبت به مدل ۳۱، معکوس شده است.



شکل ۱۶: تأثیر تغییرات توام گذردهی دی الکتریک و هدایت الکتریکی روی پاسخ GPR دو مدل زمین سه لایه‌ای. مدل ۲۹:  $V_2=2V_1$ ؛ مدل ۳۰:  $\epsilon_2=2\epsilon_1$ ؛  $V_2=0.5V_1$  و  $\epsilon_2=0.5\epsilon_1$  ضخامت لایه است.

این منطقه را خاک‌های زراعی تشکیل داده و در زیر آنها تا عمق حدود ۱ تا ۱/۲ متر خاک ماسه‌ای قهوه‌ای رنگ نرم متخلخل است.

برداشت داده‌ها با استفاده از یک سیستم GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز [۳۹] به روش پروفیل‌زنی بازتابی انجام گرفت. برای پردازش و تفسیر داده‌های (تصاویر) GPR، از نرم افزار Radexplorer استفاده شد و سرعت سیر امواج EM در محیط نیز ۰/۱۲ متر بر نانوثانیه منظور شد.

نگاشت راداری بخشی از مقطع منطبق بر یکی از پروفیل‌های برداشت شده در راستای عمود بر امتداد تخمینی قنات در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. مهم‌ترین عملیات‌های پیش‌پردازشی اعمال شده روی داده‌ها جهت ارائه مقطع نهایی، شامل تصحیح زمان صفر<sup>۱۷</sup>،

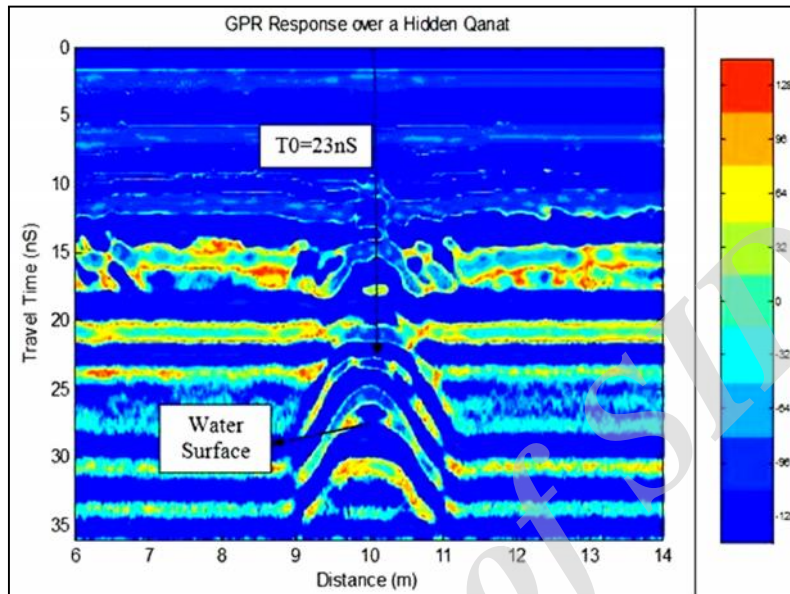
در عمل شبیه‌سازی پاسخ مدل زمین لایه‌ای کاربردهای زیادی دارد؛ از جمله این کاربردها تعیین ضخامت اسلب‌های بتنی، آشکارسازی عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی و تعیین ضخامت لایه‌های آبدار (حاوی آب شیرین)، آشکارسازی چینه‌های زمین‌شناسی و تعیین ضخامت لایه‌های سطحی برای کاربردهای زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی است.

#### ۵- اعتبارسنجی نتایج با بررسی پاسخ مطالعه موردی شناخته شده

هدف اصلی از انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش GPR در این بررسی میدانی، شناسایی و تعیین محل قنات‌های مدفون در محدوده دشت شاهین‌شهر واقع در استان اصفهان است. ضخامت ۳۰ تا ۴۰ سانتیمتر سطحی

قنات مدفون نیمه پر از آب شیرین (به دلیل معکوس شدن پلاریته سیگنال بازتابی در سطح آب و وجود بازتاب از کف قنات)، در قسمت میانی تصویر، به صورت هذلولی‌های متقارن به خوبی قابل شناسایی است.

اعمال فیلتر دی‌وای<sup>۱۸</sup> (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها)، حذف شیفت جریان مستقیم<sup>۱۹</sup>، فیلتر میان گذر باترورث<sup>۲۰</sup>، حذف متوسط<sup>۲۱</sup>، حذف زمینه<sup>۲۲</sup> و انواع تقویت<sup>۲۳</sup> است. همان گونه که از این شکل مشاهده می‌شود موقعیت



شکل ۱۷: آشکارسازی و شناسایی قنات نیمه پر از آب شیرین در دشت شاهین شهر واقع در استان اصفهان (بیضی زرد رنگ).

ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در این تحقیق براساس نتایج مدلسازی پاسخ مدل‌های مختلف و از جمله هدف استوانه‌ای، نشان داده شد که بین نسبت ارتفاع به پهنای هذلولی  $(H/W)$  با مشخصات هندسی مدل، روابط خطی وجود دارد به گونه‌ای که می‌توان با کمی‌سازی ارتباط میان نسبت  $(H/W)$  با پارامترهای هندسی هدف استوانه‌ای (قطر و عمق دفن)، پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون در تصاویر *GPR* را تقریب زد. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان از بزرگی دامنه تریس‌ها یا شدت سیگنال‌های بازتابی و معکوس شدن پلاریته آنها، به عنوان معیارهایی مناسب، جهت شناسایی جنس اهداف ژئوتکنیکی مدفون در زیر زمین، مثلاً فلزی یا غیرفلزی بودن هدف و یا نوع سیال محتوی هدف غیرفلزی (به عنوان مثال خالی یا پر از آب بودن ساختار، شور یا شیرین بودن آب محتوی ساختار و غیره) استفاده نمود.

بعد از آشکارسازی قنات، عمق دفن و قطر آن اندازه‌گیری شد. براساس روابط به دست آمده بین نسبت  $(H/W)$  با پارامترهای هندسی مدل استوانه‌ای یعنی عمق دفن و قطر، این پارامترها برای قنات مذکور به ترتیب،  $۱/۷۹$  متر و  $۰/۵۶$  متر به دست آمد که در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی عمق دفن و قطر قنات به وسیله ترانسه حفر شده روی آن (به ترتیب  $۱/۶$  متر و  $۰/۶$  متر)، مقادیر خطا برای عمق دفن و قطر قنات به ترتیب  $۳/۴$  درصد و  $۱۲$  درصد است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پاسخ *GPR* مدل‌های مصنوعی مختلف متناظر با ساختارهای متداول در مطالعات ژئوتکنیکی، با استفاده از مدلسازی پیشرو براساس یک رویکرد بهبودیافته *FDTD*، تولید گردیده و سپس حساسیت پاسخ سیستم *GPR* به پارامترهای مختلف مدل‌های گوناگون از جمله تاثیر شکل هندسی، جنس مواد تشکیل دهنده، اندازه و ابعاد، عمق دفن، نوع و سطح سیالات محتوی هدف و



using Ground- Penetrating Radar. The first national Conference on Ground Penetrating Radar, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman (In Persian).

- [12]. Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2014), Geotechnical investigation of 33 pole bridge structure in Isfahan using Ground- Penetrating Radar method. National Conference on architecture, civil and modern urban development, Tabriz. (In Persian).
- [13]. Al-fares, W., Bakalowicz, M., Guerin, R., & Dukhan, M. (2002). Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Herauld, France) with ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 51, 97-106
- [14]. Johnson, R.H., & Poeter, E. (2005). Iterative use of the Bruggeman-Hanai-Sen mixing model to determine water saturations in sand. *Geophysics*, 70(5), K33-K38.
- [15]. Leucci, G., Cataldo, R., & De Nunzio, G. (2006). Subsurface water-content identification in a crypt using GPR and comparison with microclimatic conditions. *Near Surface Geophysics*, 4(4), 207-213.
- [16]. Grasmueck, M., Weger, R., & Horstmeyer, H., (2004). Three- dimensional ground- penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archeological features at submeter resolution. *Geology*, 32(11), 933- 936.
- [17]. Conyers, L.B. (2010). Ground-penetrating radar for anthro-pological research. *Antiquity* 84, 323, 175-184.
- [18]. Rappaport, C., El-Shenawee, M., & Zhan, H. (2003). Suppressing GPR Clutter from Randomly Rough Ground Surfaces to Enhance Nonmetallic Mine Detection. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 4(4).
- [19]. Santos, R.N. dos, V., Porsani, L.J. & Hirata, S.T.N. (2009). Automatic classification of metallic targets using pattern recognition of GPR reflection: a study in the IAG-USP Test Site, Sao Paulo (Brazil), *IEEE Conference Publications*, 1-4.
- [20]. Moorman, B.J., Robinson, S.D., & Burgess, M.M. (2003). Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar.
- [21]. Christopher, W., Stevens, B.J., & Moorman, S.M. (2008). Detection of Frozen and Unfrozen Interfaces with Ground Penetrating Radar in the Nearshore Zone of the Mackenzie Delta, Canada. *Ninth International Conference on Permafrost*, 1711-1716.
- [22]. Jordan, T.E., & Baker, S.B. (2004). Reprocessing GPR data from the CFB Borden experiment using APVO/GPR techniques. *Proceedings, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Colorado Springs, Colorado, Paper DNA07.
- [23]. Johnson, T.C., Routh, P.S., Barrash, W., & Knoll, M.D. (2007). A field comparison of Fresnel zone and ray-based GPR attenuation-difference

در نهایت کارایی روابط استخراج شده با استفاده از مدلسازی پیشرو پاسخ *GPR* مدل‌های مصنوعی، با کاربرد آنها برای تحلیل داده‌های واقعی برداشت‌های *GPR*، برای یک سایت ژئوتکنیکی حاوی یک قنات نیمه پر از آب شیرین، به عنوان یک مورد مطالعه عملی نشان داده شد.

## ۷- مراجع

- [1]. Stern, W. (1929). Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis, *Gerl. Beitr. zur Geophysik*, 23, 292-333.
- [2]. Stern, W. (1930). Über Grundlagen, Methodik und bisherige Ergebnisse elektrodynamischer Dickenmessung von Gletschereis. *Z. Gletscherkunde*, 15, 24-42.
- [3]. Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H.J. (2007). *Environmental geology: handbook of field methods and case studies*-Google Books Result, 1357 pages, Chapter 4, *Geophysics*.
- [4]. Kovin, O.N. (2000). Application of georadar for engineering investigations. *Proceeding of scientific session Mining Institute UB RAS*, April 9- 13, Perm, 198- 202 (in Russian).
- [5]. Gregoire, C., Halleux, L. (2002). Characterization of fractures by GPR in a mining environment. *First Break* 20 (7), 467- 471.
- [6]. Strange, A.D., Ralston, J.C., & Chandran, V. (2005). Near-surface Interface Detection for Coal Mining Applications using Bispectral Features and GPR. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 6(2), 125-149.
- [7]. Kovin, O.N. (2010). Ground penetrating radar investigations in Upper Kama potash mine, Mining problems and solutions. ISBN: 978-3-8433-5958-0, LAP Lambert Academic Publishing (2010-11-14), 124 pages.
- [8]. Grandjean, G., Gourry, J.C., & Bitri, A. (2000). Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 141-156.
- [9]. Singh, K.K.K., & Ghouhan, R.K.S. (2002). 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.
- [10]. Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2014), Geotechnical applications of Ground-Penetrating Radar to identify subsurface inhomogeneities of Isfahan electric installation transfer tunnel. The first national Conference on Ground Penetrating Radar, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman (In Persian).
- [11]. Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2014), Identification of basement pitfalls of Isfahan- Imam mosque historical- cultural building

tomography for time-lapse imaging of electrically anomalous tracer or contaminant plumes. *Geophysics*, 72(3), J7-J16.

[24]. Lian, F.Y. & Li, Q. (2011). Recognition method based on SVM for underground pipe diameter size in GPR map. *Information and Electronic Engineering*. 9(4), 403-408.

[25]. Diamanti, N., Giannopoulos, A., & Forde, M.C. (2008). Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges. *NDT&E International*, 41, 354-363.

[26]. [www.tstengineering.com/en/ground-penetrating-radar](http://www.tstengineering.com/en/ground-penetrating-radar).

[27]. Annan, A.P. (2001), Ground-penetrating radar workshop notes, Sensors and Software Inc. Mississauga, ON, Canada.

[28]. Annan, A.P. (2003). Ground penetrating radar: Principles, procedures, & applications. Sensors & Software Inc. Technical Paper.

[29]. <http://mysite.du.edu/~lconyers/SERDP/GPR2.htm>

[30]. Daniels, D.J. (2004). Ground Penetrating Radar, 2nd edition, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 15, Institute of Electrical Engineers, London, UK.

[31]. Shihab, S., & AL-Nuaimy, W. (2005). Radius estimation for Cylindrical objects detected by Ground Penetrating Radar. *subsurface sensing technologies and applications*, 6, 151-166.

[32]. Sadiku, M.N.O. (2001). Numerical techniques in electromagnetics, second edition, Boca Raton London New York Washington, D.C. CRC press.

[33]. Irving, J., & Knight, R. (2006). Numerical modelling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB, *Computers & Geosciences*, 32, 1247-1258.

[34]. Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2012), Simulation of response of GPR pulses using forward modelling by finite difference. The first Iranian Conference on Electromagnetic Engineering (ICEME), Iran University of Science and Technology, 26-27 Dec, Tehran. (in Farsi).

[35]. Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2014), Improving Ground Penetrating Radar (GPR) forward modeling approach using the numerical finite difference method. *Iranian Journal of Geophysics*, 8(3), 114-130. (In Persian)

[36]. Zeng, X. & McMechan, G.A. (1997). GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics*, 62(3), 797-806.

[37]. Davis, J.L., & Annan, A.P. (1989). Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy, *Geophysical Prospecting*. 37, 531-551.

[38]. Jol, H.M. (2009). Ground-Penetrating Radar theory and applications. First edition, Elsevier Science, 543 Pages.

[39]. WWW.malags.com

- 
- 1- Ground-Penetrating Radar
  - 2- Non-Destructive Evaluation
  - 3- Electromagnetic
  - 4- Dielectric permittivity
  - 5- Magnetic permeability
  - 6- Conductivity
  - 7- Trace
  - 8- Radargram
  - 9- Shihab
  - 10- Al-Nuaimy
  - 11- Finite-Difference Time-Domain
  - 12- Transverse Magnetic Field
  - 13- Irving
  - 14- Knight
  - 15- Cubic
  - 16- Contrast
  - 17- Time zero correction
  - 18- Dewowing
  - 19- Dc shift removal
  - 20- Butterworth
  - 21- Subtract mean
  - 22- Background removal
  - 23- Gain

## Sensitivity Analysis of Physical and Geometrical Parameters of Geotechnical Targets on GPR Responses Using Forward Modeling

R. Ahmadi<sup>1\*</sup>, N. Fathianpour<sup>2</sup>, Gh. Norouzi<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Mining, Arak University of Technology, Iran

2- Associate Professor, Dept. of Mining, Isfahan University of Technology, Iran

3- Professor, Dept. of Mining, University of Tehran, Iran

\* Corresponding Author: [R\\_ahmadi@arakut.ac.ir](mailto:R_ahmadi@arakut.ac.ir)

(Received: May 2013, Accepted: October 2015)

### Abstract

In the current research, GPR response of variety of synthetic models encountered with geotechnical applications containing single horizontal cylinder, 2D prism, double horizontal cylinders, 2D arbitrary polygon and layered earth have been produced using forward modeling through the finite-difference time-domain algorithm improved in the frequency domain. In this research by using the parameters of a hyperbola and GPR responses produced for cylindrical objects by means of the forward modeling, it was revealed that there exist some linear relationships between the hyperbola height to width ratio (H/W) with physical and geometrical parameters of the cylindrical objects. These relations can be used as proper quantitative criteria to identify physical and geometrical parameters of buried cylindrical objects on GPR images. To achieve this purpose, the effect of several parameters such as geometrical shape, material type, size and burial depth of the objects as well as type and interface of fluids content and host medium physical properties on GPR responses, have also been studied. The results lead us to the potential of GPR method to detect the kinds of targets; identifying the parameters of cylindrical objects and evaluating characteristics of fluid content, so that one can distinguish metallic from nonmetallic targets as well as type of fluid content of nonmetallic targets (i.e. air, fresh water and salt water). The results of the research were validated by applying for identification of buried qanat in Shahin-Shahr plain, Isfahan province. The burial depth and diameter of the qanat were estimated by 3.4% and 12% error respectively.

### Keywords

Ground-Penetrating Radar (GPR); Hyperbolic Response; Numerical Forward Modeling; Geotechnical Targets; Sensitivity Analysis, Geometrical Parameters of Cylindrical Targets

### Cite This Paper:

Ahmadi, R., Fathianpour, N., Norouzi, Gh. (2015). "Sensitivity Analysis of Physical and Geometrical Parameters of Geotechnical Targets on GPR Responses Using Forward Modeling." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 5(9): 13-30. [http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940912-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940912-X)