

## آشکارسازی خطوط انتقال آب مدفون و تعیین سطح سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین

رضا احمدی\*

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Rezahmadi@gmail.com

### چکیده

رادار نفوذی به زمین (GPR) یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب با قدرت تفکیک بالاست که از بازتاب امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا (عموماً در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز) برای آشکارسازی و شناسایی اشیاء مدفون و ناهمگنی‌های زیرسطحی استفاده می‌کند. در پژوهش حاضر امکان کاربرد این روش برای آشکارسازی خطوط انتقال آب مدفون و تصویر کردن آب‌های زیرزمینی برای مقاصد مهندسی آب، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرو به‌روش تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته در حوزه فرکانس، پاسخ GPR اشیاء مصنوعی متناظر با اهداف متداول در امور آب، همانند استوانه افقی و زمین لایه‌ای مدل‌سازی شده است تا از نتایج آنها، برای تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی GPR استفاده شود. روش GPR برای آشکارسازی خطوط انتقال آب زیرزمینی در محدوده دشت شاهین شهر اصفهان به‌عنوان مطالعه عملی پژوهش حاضر نیز به‌کار گرفته شد و ناهمگنی‌های موجود در نگاشت‌های راداری به‌دست آمده، به‌کمک نتایج مدل‌سازی پیشرو، به‌عنوان موقعیت قنات احتمالی نیمه پر از آب شیرین، تفسیر گردید که اعتبار نتایج از طریق حفر ترانشه بر روی یکی از پروفیل‌های برداشت، به اثبات رسید. براساس نتایج این پژوهش روش GPR برای آشکارسازی کلیه خطوط انتقال آب زیرسطحی، تشخیص فلزی یا غیرفلزی بودن جنس لوله‌های مدفون، شناسایی نوع آب (شور یا شیرین بودن) لوله‌های غیرفلزی، تعیین عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی، ضخامت لایه آبدار (در مورد آب‌های با رسانایی کم) و مرز آب‌های شور و شیرین، قابل استفاده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خطوط انتقال آب مدفون، رادار نفوذی به زمین (GPR)، سطح سفره آب زیرزمینی، سیال محتوی هدف، مدل‌سازی عددی پیشرو

## Detection of Buried Water Lines and Determining the Depth of Water Tables Using Forward Modeling of Ground-Penetrating Radar Data

R Ahmadi\*

Received: 07 June 2015 Accepted: 14 January 2017  
Assit. Prof., Dept. of Mining Engin., Arak Univ. of Tech., Iran  
Corresponding Author, Email: Rezaahmadi@gmail.com

### Abstract

Ground-Penetrating Radar (GPR) is a high-resolution non-destructive geophysical method which detects buried objects and subsurface heterogeneities using transmitting high-frequency (generally in the range of 1 MHz up to 1 GHz) electromagnetic pulses and receiving reflected pulses. In the current study the possibility of employing this method to detect buried water lines and mapping groundwater for water engineering purposes was studied. To achieve this goal, the GPR response of synthetic objects corresponding to targets common in water engineering affairs containing horizontal cylinder and layered earth, was produced using numerical forward modeling by the 2-D finite-difference method modified in the frequency domain to be used for interpreting the real GPR radargrams. The GPR method was also employed to detect underground water lines in Shahin-shahr plain, Isfahan province as the case study of the present research leading to some heterogeneities in the obtained radargrams, interpreted using the results of the forward modeling as probably buried qanat semi filled by fresh water. The validity of the results was also proved through trenching on one of the surveyed profiles. Based on the results of this research, GPR method is capable of detecting all underground water lines, assessing material type (metallic or nonmetallic) of buried pipes, identification of kind of water content (fresh or saline) of nonmetallic pipes, determining depth of water table, estimating thickness of water containing layer (about waters with low conductivity) and distinguishing fresh and saline water interface.

**Keywords:** Buried water lines, Depth of water table, Ground-penetrating radar (GPR), Numerical forward modeling, Target fluid content

### مقدمه

تخمین ضخامت یک لایه یخی بکار رفت (نادل و همکاران ۲۰۰۷) و در حال حاضر دارای طیف وسیعی از کاربردهاست، به گونه‌ای که در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله در زمینه‌های ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، تصویرکردن آب‌های زیرزمینی، معدنکاری، باستان‌شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، برف و یخ و یخبندان‌شناسی، تأسیسات و مسائل زیست‌محیطی به کار می‌رود. در شکل ۱ بعضی از مهم‌ترین کاربردهای GPR به طور طرح‌وار نشان داده شده است.

رادار نفوذی به زمین<sup>۱</sup> (GPR) یک روش ژئوفیزیکی نسبتاً جدید، مفید و بسیار قدرتمند برای شناسایی غیرمخرب ساختارهای زیر سطح زمین است که قابلیت ارائه تصاویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری<sup>۲</sup> بالا از محیط‌های دی‌الکتریک کم اتلاف را دارد. روش GPR اولین بار توسط استرن (۱۹۲۹، ۱۹۳۰) در اتریش برای

<sup>1</sup> Ground-penetrating radar

<sup>2</sup> Resolution

آهن، خطوط تونل، خطوط لوله‌های آب و فاضلاب و انواع لوله‌های تاسیساتی دیگر، مورد استفاده قرار گرفته است (اویسی موخر ۱۳۸۶، کامکار روحانی و همکاران ۱۳۸۷، احمدی و همکاران ۱۳۹۱ الف و ب، ۱۳۹۳ الف و ب، گیل و همکاران ۱۹۹۴، هاستن و همکاران ۲۰۰۰، منکردا و همکاران ۲۰۰۲، گرازد و همکاران ۲۰۰۲، احمدی و همکاران ۲۰۱۴).

هدف از پژوهش حاضر آشکارسازی خطوط انتقال آب مدفون، تعیین عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی، تشخیص نوع آب‌های زیرزمینی (شور یا شیرین بودن) و شناسایی مرز آب‌های شور و شیرین با استفاده از روش ژئوفیزیکی غیرمخرب GPR است که از جمله مسائل متداول مهندسين کشاورزی و مهندسين امور آب می‌باشد. برای این منظور از مدل‌سازی عددی پیشرو داده‌های GPR به روش تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته در حوزه فرکانس، استفاده شده است. علاوه بر این، مطالعات میدانی بر روی خطوط انتقال آب با استفاده از روش GPR نیز صورت گرفته که نگاشت-های راداری مربوطه، براساس نتایج مدل‌سازی پیشرو دوبعدی مدل‌های مصنوعی، تفسیر گردیده است.

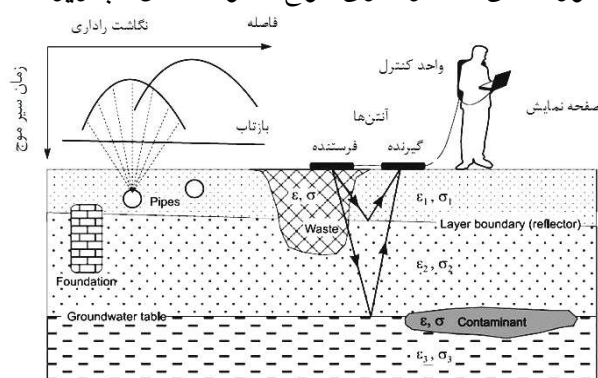
### مواد و روش‌ها

#### مبانی فیزیکی و نظری روش GPR

انواع سیستم‌های GPR سیگنال‌های الکترومغناطیسی<sup>۳</sup> (EM) در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز را از طریق فرستنده، ارسال کرده و نحوه رفتار میدان EM بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را از طریق گیرنده، آشکار می‌کنند (شکل‌های ۱ و ۲). خواص فیزیکی ماده که رفتار انرژی EM را در یک محیط، کنترل می‌کنند شامل

هدف از کاربرد GPR در زمینه مهندسی آب به-

طور خاص آشکارسازی انواع خطوط انتقال آب زیر-



شکل ۱- شکل طرح‌وار بعضی از مهم‌ترین کاربردهای

روش GPR (ویرایش شده از دنیلز ۲۰۰۴، نادل و همکاران ۲۰۰۷).

زمینی (شامل انواع لوله‌ها و انواع ساختارهای تونلی همانند انواع تونل‌ها، کانال‌ها و قنات‌ها)، تعیین عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی، تشخیص نوع آب زیرزمینی (شور یا شیرین بودن آب)، نقشه کردن کف آب‌خوان (در مورد آب‌های با رسانایی کم) و تعیین مرز آب‌های شور و شیرین می‌باشد.

روش GPR نیز همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی در کاربرد، دارای مزایا و معایبی (محدودیت‌هایی) است. یکی از جذاب‌ترین توانایی‌های روش GPR در کاربردهای مختلف، ایجاد تصویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری بالاست. مزیت دیگر این روش، غیرمخرب بودن آن می‌باشد. بزرگ‌ترین محدودیت این روش نیز عمق تجسس نسبتاً کمتر آن، در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی است که عمق نفوذ آن در زمین‌های دارای هدایت الکتریکی بالا و دارای ترکیبات آهن، به شدت کاهش می‌یابد. به هر جهت در میان تمام روش‌های ژئوفیزیکی با تفکیک‌پذیری بالا، GPR اثبات کرده که در طیف وسیعی از محیط‌های خاک و سنگ، مناسب‌ترین روش است.

روش GPR به‌عنوان یک روش غیرمخرب مدت زمانی است که مدنظر قرار گرفته و در طی سال‌ها برای مطالعه ساختمان‌ها و پل‌ها، جاده‌ها، بزرگراه‌ها و راه

<sup>3</sup> Electromagnetic

در تمام برداشت‌های GPR، یکی از مولفه‌های میدان الکترومغناطیسی، معمولاً مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود و شدت مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان ثبت می‌شود (انان ۲۰۰۳). متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR نمایش دامنه سیگنال امواج EM بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که تریس<sup>۹</sup> نامیده می‌شود. دستاورد یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه‌ای از تریس‌ها در کنار یکدیگر بوده که نگاشت راداری<sup>۱۰</sup> نام دارد (شکل‌های ۱ و ۲-ب).

در روش GPR نتایج برداشت به آسانی به صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون، به صورت هذلولی است (شکل ۱). جهت آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتاب شده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، بزرگ‌تر از سیگنال‌های زمینه می‌باشند. پلاریته سیگنال بازتابی GPR نیز که معمولاً براساس علامت ولتاژ نیمه اول سیکل تعریف می‌شود، با ماهیت تغییر ویژگی‌های الکتریکی (به‌ویژه  $\epsilon$ )، کنترل شده و در تفسیر داده‌ها بسیار مفید است (انان ۲۰۰۱). مثلاً در روش GPR فلز که یک ماده با مقاومت<sup>۱۱</sup> الکترومغناطیسی خیلی پایین (تقریباً صفر) است، همیشه به یک موجک بازتاب منفی، منجر می‌شود، حال آن‌که یک حفره در خاک یا سنگ، یک ماده با امپدانس بالا را نمایش داده و به یک موجک بازتاب مثبت، منجر می‌گردد.

از آنجایی که GPR اشیاء را در فاصله معینی کشف و آشکار می‌کند، تفکیک‌پذیری نشان می‌دهد که چگونه موقعیت و ویژگی‌های هندسی هدف می‌تواند به طور دقیق تعیین شود (جل ۲۰۰۹). میان تفکیک‌پذیری، عمق تجسس و فرکانس مرکزی پالس‌های GPR، ارتباط

گذردهی دی‌الکتریک<sup>۴</sup> ( $\epsilon$ )، هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) و نفوذپذیری مغناطیسی<sup>۵</sup> ( $\mu$ ) می‌باشند.

بایستی بین مدت زمان انتشار سیگنال چشمه و مدت زمانی که هر بازتاب به آشکارساز می‌رسد، یک تأخیر انتشار وجود داشته باشد. این تأخیر زمانی به وسیله فاصله گیرنده تا هدف، تقسیم بر سرعت انتشار امواج EM از میان محیط میزبان، تعیین می‌شود. پایه و اساس GPR اندازه‌گیری این تأخیر زمانی است.

اساساً با فرض شرایط سرعتی یکنواخت، تأخیر زمانی طولانی‌تر به معنی بیشتر بودن فاصله تا هدف می‌باشد. بیشتر سیستم‌های GPR از آنتن‌های جداگانه برای ارسال و دریافت استفاده می‌کنند (معروف به عملیات هردو ثابت<sup>۶</sup>)؛ اگرچه ممکن است مطابق شکل ۲ آنتن‌ها در یک سیستم اندازه‌گیری واحد بدون امکان تغییر جدایش آنتنی جای گیرند (تک ثابت<sup>۷</sup>). برداشت داده‌های GPR به روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت (در راستای عمود بر امتداد عمومی ساختارهای زیرسطحی) بسیار متداول است.

انرژی رادار ضمن سیر در درون زمین، به صورت یک طرح مخروطی، گسترش می‌یابد (شکل ۲-الف). اندازه تقریبی ردپای تابش<sup>۸</sup>، در عمقی از زمین می‌تواند از روی فرکانس آنتن و گذردهی دی‌الکتریک زمینی که انرژی از درون آن عبور می‌کند، تخمین زده شود. در شکل ۲-ب انواع امواج منتشره و دریافتی در روش GPR برای یک محیط دارای یک بازتابنده افقی تخت، نشان داده شده است. برای یک هدف محلی در زمین چندین مسیر ممکن وجود دارد که انرژی از یک چشمه به گیرنده می‌رسد. در بیشتر برداشت‌های GPR، فاصله فرستنده و گیرنده، کم بوده و مسیرهای غالب مطابق شکل ۲-ب، مربوط به موج مستقیم هوا، موج مستقیم زمین و سیگنال بازتابی هستند.

<sup>4</sup> Dielectric permittivity

<sup>5</sup> Magnetic permeability

<sup>6</sup> Bistatic

<sup>7</sup> Monostatic

<sup>8</sup> Footprint

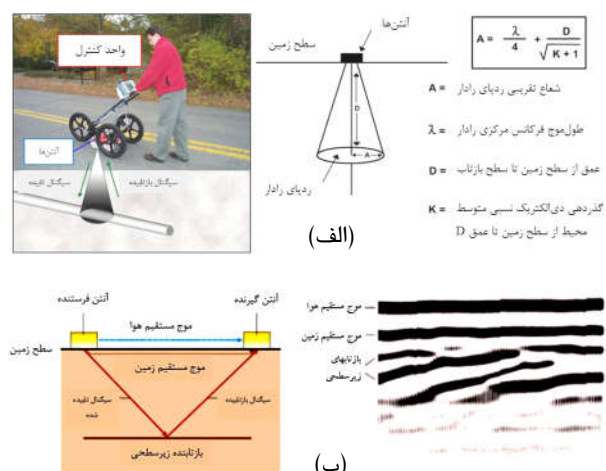
<sup>9</sup> Trace

<sup>10</sup> Radargram

<sup>11</sup> Impedance

انتخاب فرکانس عملکرد بهینه برای یک برداشت راداری بسیار مهم بوده و بدیهی است که همواره داده‌های GPR در کاربردهای عملی را فراهم نماید. بنابراین هدف از مدل‌سازی داده‌های GPR آن است که معلوم شود تحت شرایط مختلف محیطی، چه اطلاعات معقولی از داده‌های واقعی میدانی به دست می‌آید. برای دستیابی به این هدف می‌توان از روش‌های عددی مختلفی استفاده نمود که در همه آنها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، براساس رفتار امواج EM و برهمکنش آنها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود. در میان روش‌های عددی مختلف، روش تفاضل محدود به‌خاطر دارا بودن مزیت‌هایی همانند درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ-های آن در موارد بکار رفته، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (سدیکو و ماتهیو ۲۰۰۱). برای مدل‌سازی پیشرو دوبعدی داده‌های GPR در مطالعه حاضر، بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو بر روی سطح زمین قرار دارند)، به‌روش تفاضل محدود در حوزه زمان با فرمول‌بندی روش میدان مغناطیسی عرضی<sup>۱۲</sup> (مد TM) شبیه‌سازی شده است. برای این منظور روش تفاضل محدود دوبعدی ارائه شده توسط ایروینگ و نایت (۲۰۰۶) مورد استفاده قرار گرفته و برای مدل‌سازی پیشرو اشیاء مصنوعی فرضی متناظر با اهداف متداول در تصویر کردن آب-های زیرسطحی، در محیط نرم‌افزار MATLAB بهبود یافته است (احمدی و همکاران ۱۳۹۳). تئوری پایه کدهای مدل‌سازی پیشرو GPR، معادلات کرل ماکسول (قانون القای فاراده و تعمیم قانون مداری آمپر) می‌باشند. از آنجایی‌که مطابق شکل ۱ سیگنال تریس‌های پاسخ GPR در محدوده ناهمگنی‌های زیرسطحی، یک جابجایی زمانی دارند، این ویژگی اجازه به‌کارگیری

وجود دارد، به‌گونه‌ای‌که با افزایش فرکانس مرکزی، تفکیک‌پذیری افزایش و عمق تجسس، کاهش می‌یابد. بایستی یک توازن بین عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری سیستم، برقرار گردد. در خصوص آشکارسازی خطوط انتقال آب و فاضلاب مدفون و تصویر کردن آب‌های زیرسطحی، انتخاب فرکانس مرکزی آنتن در حدود ۲۵۰ تا ۵۰۰ مگاهرتز مناسب است.



شکل ۲- الف: نمایش سیگنال ارسالی و بازتابیده و ردیای رادار، ب: نمایش امواج مختلف منتشره در روش GPR (ویرایش شده از بیکر و همکاران ۲۰۰۷).

مدل‌سازی عددی پیشرو داده‌های GPR از آنجایی‌که سیگنال‌های GPR از نوع امواج EM هستند، بنابراین الکترومغناطیس پایه و اساس GPR می‌باشد. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، به‌گونه‌ای‌که تمام پدیده‌های EM در مقیاس ماکروسکوپی توسط این معادلات قابل توصیف بوده و رفتار حاکم بر میدان‌های GPR را می‌توان با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب، شبیه‌سازی نمود. پاسخ سیستم GPR برای مدل‌های مصنوعی فرضی مختلف متناظر با اهداف و ساختارهای واقعی، باید توسط یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی تولید شود تا این هسته مدل‌سازی پیشرو منجر به شناسایی رفتار مدل‌های مختلف در پاسخ‌ها شده و عملیات تفسیر

<sup>12</sup> Transverse magnetic field

مرحله مدل‌سازی پیشرو، خارج و برای دستیابی به تفکیک‌پذیری بالا، در حیطه فوریه عملیات دیگری بر روی آن انجام می‌گیرد، این محاسبات در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام شده و نتیجه آن بهبود کیفی و بصری پیوستگی تریس‌ها در پاسخ نهایی مقطع GPR و تولید پاسخ با تفکیک‌پذیری زیاد می‌باشد.

#### مدل‌سازی پاسخ GPR اهداف مصنوعی

هدف از پژوهش حاضر تصویر کردن آب‌های زیرسطحی با استفاده از روش GPR با هدف کاربرد در زمینه‌های مهندسی کشاورزی و مهندسی امور آب می‌باشد. برای این منظور با استفاده از برنامه مدل‌سازی عددی پیشرو بهبود یافته در حوزه فرکانس در محیط نرم‌افزار MATLAB، پاسخ GPR با تفکیک‌پذیری زیاد برای مدل‌های مصنوعی فرضی به شکل استوانه افقی (معرف انواع لوله‌های با جنس‌های مختلف و ساختارهای استوانه‌ای شکل) متناظر با خطوط انتقال آب و فاضلاب، و زمین‌های لایه‌ای جهت تعیین عمق سطح و نوع سفره‌های آب زیرزمینی، شبیه‌سازی شده تا از نتایج آنها برای تفسیر نگاشت‌های راداری واقعی استفاده شود.

به منظور انطباق بیشتر نتایج شبیه‌سازی با عمل، مقادیر ویژگی‌های الکتریکی محیط‌های میزبان و اهداف، واقع‌بینانه انتخاب شده است. در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه در تحقیق حاضر شامل گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج EM (نوعاً در محدوده فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) آورده شده است.

#### مدل‌سازی پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای

##### بررسی تأثیر جنس دیواره هدف استوانه‌ای

شکل ۳ پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای با جنس‌های مختلف را نشان می‌دهد. جنس اهداف ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بتن، فایبرگلاس و فلزی، با مشخصات هندسی یکسان هستند، به طوری که قطر داخلی هر سه هدف برابر با یک متر و ضخامت دیواره آنها ۴ سانتی‌متر است؛ همه

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 یک جابجایی زمانی معین می‌باشند و اعمال قضیه جابجایی زمانی در حیطه فوریه مطابق رابطه ۱ استفاده شده است (احمدی و همکاران ۱۳۹۳ث).

$$f(t-t_0) \stackrel{F}{\Leftrightarrow} e^{-i\omega t_0} F(\omega) \quad [1]$$

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

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 می‌گردد. بعد با استفاده از تبدیل فوریه هر دو تریس 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 مطابق شکل ۱ به صورت هذلولی است، بنابراین برای درون‌یابی بین دو تریس مجاور، به منظور حفظ شکل منحنی‌وار، از درون‌یابی یک‌بعدی مکعبی<sup>۱۳</sup> استفاده شده است. به منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و تمرکز بیشتر بر روی پاسخ هدف، رخداد مربوط به موج مستقیم (هوا و زمین) که همواره به صورت رخداد خطی افقی می‌باشد، از پاسخ حذف گردیده است.

از آنجایی که در فرم بهبود یافته برنامه مدل‌سازی پیشرو، بخش عمده‌ای از محاسبات، از درون

نفوذپذیری مغناطیسی مدل فلزی برابر با ۱۰ و در مورد بقیه اهداف برابر با مقدار نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد (یعنی برابر با یک) است. به منظور اعتباربخشی به عملیات مدل‌سازی دوبعدی، گسترش طولی استوانه‌ها نیز بیش از ده برابر قطر آنها در نظر گرفته شده است که در عمل فرض درستی می‌باشد.

اهداف صددرصد پر از هوا بوده و در عمق یک متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی مدفون می‌باشند. ابعاد مدل‌ها ۲×۳ متر، میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز، پیمایش پروفیل‌های GPR در راستای عمود بر امتداد محور استوانه‌ها، مقدار

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه (دیویس و انان ۱۹۸۹، زنگ و مک‌مکان ۱۹۹۷، احمدی و همکاران ۲۰۱۴).

سرعت موج EM (m (ns) <sup>-1</sup> )	هدایت الکتریکی (mS m <sup>-1</sup> )	گذردهی دی‌الکتریک نسبی	ماده (محیط)
۰/۳	۰	۱	هوا
۰/۰۳۳	۰/۵	۸۰	آب شیرین
۰/۰۳۳	۵۰۰۰	۸۰	آب شور
۰/۰۹	۵	۶	بتن
۰/۱۴	۰/۶۶	۴/۸	فایبرگلاس
۰/۰۱۷	۱۰ <sup>۸</sup>	۳۰۰	فلز
۰/۱۲	۶/۶۷	۶	خاک رس سیلتی
۰/۰۷	۱۰	۱۹	خاک رس مرطوب
۰/۰۹	۰/۰۵	۶	شیل
۰/۱۵	۰/۰۱	۴	ماسه خشک
۰/۰۶	۱۰	۲۵	ماسه اشباع از آب شیرین
۰/۰۶	۵۰۰۰	۲۵	ماسه اشباع از آب شور

شده است (معکوس شدن پلاریته، با معکوس شدن ترتیب رنگی پاسخ سقف این هدف (C) نسبت به دو هدف قبل (A و B)، قابل مشاهده است). همچنین هیچ بازتابی از کف هدف فلزی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن می‌باشد.

نتایج تعداد زیادی آزمایش عددی دیگر در ارتباط با بررسی تأثیر جنس دیواره اهداف بر روی پاسخ GPR نشان داد که به‌طور کلی تأثیر جنس و نیز ضخامت دیواره یک هدف غیرفلزی بر روی پاسخ GPR آن قابل چشم‌پوشی بوده و در این مورد فاکتور غالب بر روی پاسخ GPR، تباین بین ویژگی‌های الکتریکی محیط میزبان و محتوای هدف می‌باشد. بنابراین در

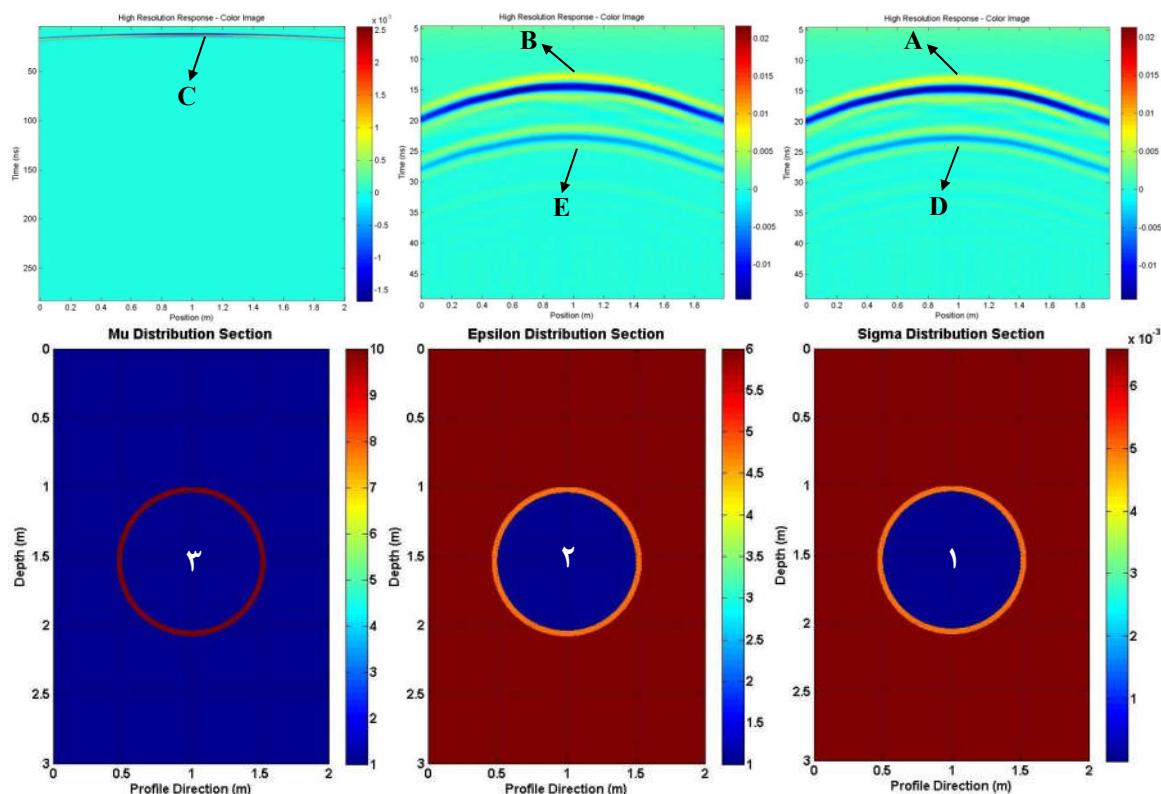
مقایسه پاسخ GPR این استوانه‌ها نشان می‌دهد که در مورد مدل‌های ۱ و ۲ اختلاف فاحشی در دامنه پاسخ‌های سقف دو هدف (A و B) و نیز کف دو هدف (D و E) مشاهده نمی‌شود، زیرا از یک‌سو ضخامت دیواره اهداف در مقایسه با قطر آنها نسبتاً کوچک است و از سوی دیگر بتن و فایبرگلاس از نظر هدایت الکتریکی و گذردهی دی‌الکتریک، اختلاف چندانی ندارند. ممکن است در داده‌های واقعی در اثر وجود پارازیت، اختلاف ناچیزی در دامنه بازتاب‌های سقف دو هدف (A و B) دیده شود.

جنس دیواره اغلب لوله‌ها فلزی است (مدل ۳). پاسخ سقف هدف در مدل ۳ نسبت به دو مورد قبلی قوی‌تر بوده و پلاریته سیگنال‌های بازتابی نیز معکوس

مشخصات یکسان به قطر یک متر، مدفون در عمق یک متری در محیط میزبان از جنس خاک رس مرطوب را نشان می‌دهد. در مدل‌های ۴، ۵ و ۶ اهداف به ترتیب از هوا، آب شیرین و آب شور پر شده‌اند.

مدل‌سازی‌های بعدی برای اهداف، هیچ‌گونه دیواره‌ای در نظر گرفته نمی‌شود. به عبارت دیگر در هر مدل تنها محتوای هدف و محیط میزبان وجود خواهد داشت.

بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای  
شکل ۴ پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای با



شکل ۳- مقایسه پاسخ‌های GPR سه هدف استوانه‌ای توخالی (صردرد پر از هوا) با جنس‌های مختلف: مدل ۱: بتنی، مدل ۲: فایبرگلاس و مدل ۳: فلزی. محیط میزبان از جنس خاک رس سیلنتی است.

پاسخ سقف و کف هدف در مدل ۵ از مدل ۴ به مراتب بیشتر است. نکته مهم‌تر در این مورد آن است که پلاریته سیگنال نیز نسبت به مدل ۴ معکوس شده است. در حالتی که هدف از آب شور پر شده باشد (مدل ۶)، فقط پاسخ سقف هدف، قابل مشاهده است و هیچ پاسخی از کف هدف وجود ندارد که علت آن هدایت الکتریکی بسیار زیاد آب شور و تضعیف شدید امواج EM می‌باشد. 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

پاسخ GPR اهداف در شکل ۴ نشان می‌دهد که در صورت خالی بودن هدف مدفون (مدل ۴)، پاسخ سقف (T) و کف (B) آن به وضوح مشخص بوده و شدت بازتاب هر دو پاسخ، نسبتاً خوب است. در شرایطی که هدف مدفون پر از آب شیرین باشد (مدل ۵)، اگرچه هر دو پاسخ سقف و کف هدف مشخص است ولی شدت بازتاب پاسخ کف هدف، ضعیف است که علت آن تضعیف امواج در طی عبور از آب شیرین درون هدف است. همچنین از آنجایی که سرعت سیر امواج EM در آب کمتر از هواست، بنابراین فاصله قائم



لایه‌ای (شکل ج) نشان داده شده است. در این مدل لایه رویی از جنس ماسه خشک، لایه میانی از جنس ماسه اشباع از آب شیرین و لایه زیرین (سنگ بستر) از جنس شیل نفوذناپذیر می‌باشد. ابعاد مدل  $6 \times 4$  متر، میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی تمام لایه‌ها در مدل برابر با مقدار نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد است.

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که پاسخ GPR مرزهای مشترک افقی لایه‌ها، مطابق انتظار به صورت رخدادهای خطی افقی است (به‌طور کلی پاسخ GPR هر ناهمگنی افقی، به صورت یک رخداد خطی افقی است).

موقعیت رخداد خطی افقی بالایی مربوط به مرز مشترک لایه‌های اول و دوم یعنی سطح سفره آب شیرین و رخداد خطی افقی پایینی، مربوط به مرز مشترک لایه‌های دوم و سوم، یعنی کف سفره آب شیرین می‌باشد. به عبارت دیگر در این مورد، هم پاسخ سطح و هم پاسخ کف لایه آبدار زیرسطحی، قابل شناسایی است. بنابراین در صورتی که هدایت الکتریکی لایه آبدار کم باشد (آب شیرین)، آنگاه ضخامت لایه آبدار را نیز می‌توان از روی پاسخ GPR تعیین نمود.

ضخامت لایه آبدار برابر با حاصل ضرب سرعت سیر موج EM درون لایه آبدار در مدت زمانی است که موج EM، فاصله عمودی بین سقف و کف لایه آبدار را طی می‌نماید.

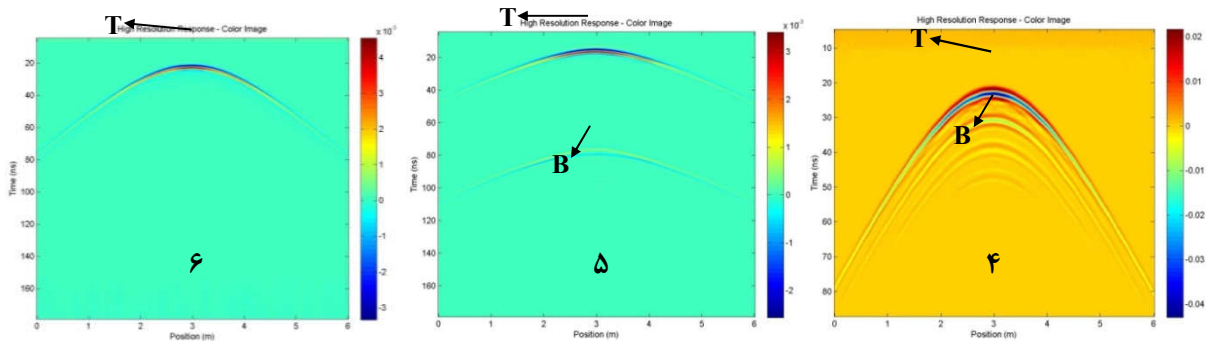
نیز (نسبت به مدل ۴) معکوس شده و شدت بازتاب پاسخ، نسبتاً بالاست. معکوس شدن پلاریته سیگنال در این مورد، به‌طور واضح با ترسیم تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف مدفون (تریس میانی پاسخ)، یکی پر از هوا و دیگری پر از آب شور در شکل ۵ نشان داده شده است.

به‌طور کلی در مورد ساختارهای حاوی آب شور هیچ‌گونه بازتاب و در نتیجه رخدادی در قسمت زیر سطح سیال وجود ندارد که این (عدم وجود پاسخ) نشانه آب شور و نحوه تشخیص آن از آب شیرین می‌باشد.

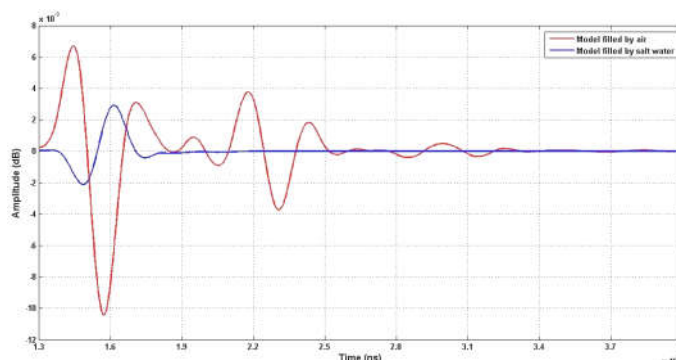
#### مدل‌سازی پاسخ GPR زمین لایه‌ای

در عمل شبیه‌سازی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای دارای کاربردهای زیادی است. از جمله این کاربردها تعیین ضخامت اسلب‌های بتنی، آسفالت جاده‌ها و لایه‌های سطحی برای مقاصد زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، آشکارسازی عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی، تعیین ضخامت لایه‌های آبدار (با هدایت الکتریکی کم) و آشکارسازی چینه‌های زمین‌شناسی می‌باشد.

تعیین عمق سطح سفره آب شیرین و ضخامت آن در شکل ۶ مدل‌های هندسی و فیزیکی (مقاطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی به ترتیب در شکل‌های الف و ب) و پاسخ GPR یک مدل زمین سه



شکل ۴- بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR. مدل ۴: استوانه توخالی، مدل ۵: استوانه پر از آب شیرین، مدل ۶: استوانه پر از آب شور و محیط میزبان خاک رس مرطوب است.



شکل ۵- نمایش پلاریته معکوس برای تریس‌های میانی پاسخ‌های دو مدل ۴ (رنگ قرمز) و ۶ (رنگ آبی).

نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد است.

نتایج مدل‌سازی در این مورد نشان می‌دهد که در پاسخ GPR تنها یک رخداد خطی افقی، قابل مشاهده است که آن هم مربوط به پاسخ مرز مشترک لایه‌های اول و دوم، یعنی سطح سفره آب شور می‌باشد. در واقع هیچ پاسخی از زیر سطح آب شور وجود ندارد که علت آن هدایت الکتریکی بسیار زیاد آب شور و تضعیف شدید امواج EM است. به عبارت دیگر آب شور مانند فلز رفتار می‌کند. بنابراین در صورتی که لایه زیرسطحی، حاوی آب شور باشد (هدایت الکتریکی آن زیاد باشد)، تعیین ضخامت آن امکان‌پذیر نیست.

از این ویژگی می‌توان برای تعیین مرز آب‌های شور و شیرین نیز استفاده نمود. به عنوان مثال در شکل ۹ پاسخ GPR واقعی بر روی یک سفره آب زیرزمینی که در آن آب‌های شور و شیرین در مجاورت یکدیگر قرار دارند، نشان داده شده است. در این نگاشت راداری مرز ناگهانی شیب‌دار، حدفاصل بین آب‌های زیرزمینی شور و شیرین می‌باشد. سمت راست تصویر که در آن هیچ پاسخی از زیر سطح سفره آب زیرزمینی وجود ندارد، مبین آب شور و سمت چپ تصویر که سرشار از بازتاب‌های چندگانه و پژواک‌ها می‌باشد، مشخصه آب شیرین است.

#### مطالعه موردی

مطالعه میدانی برداشت داده‌های صحرائی به-روش ژئوفیزیکی GPR در محدوده دشت شاهین‌شهر واقع در استان اصفهان با هدف تعیین محل و شناسایی

همچنین با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌شود که پلاریته سیگنال بازتابی در مورد رخداد خطی افقی دوم، نسبت به رخداد خطی افقی اول، معکوس شده است. معکوس شدن پلاریته، با معکوس شدن ترتیب رنگی دو پاسخ خطی افقی، قابل مشاهده است.

در عمل معمولاً به دلیل ناهمگنی لایه‌ها و وجود انواع مختلف نوفه‌ها، یک سری پاسخ‌هایی درون لایه‌ها به‌ویژه زیر سطح سفره آب زیرزمینی، وجود دارد که به نام بازتاب‌های چندگانه<sup>۱۴</sup> و پژواک<sup>۱۵</sup> شناخته می‌شوند. به‌عنوان مثال در شکل ۷ پاسخ GPR یک زمین واقعی دارای آب شیرین نشان داده شده است. در این شکل مرز شیب‌دار، مربوط به مرز عادی دو لایه زمین-شناسی سطحی اول و مرز افقی، مربوط به سطح سفره آب زیرزمینی می‌باشد.

#### تعیین عمق سطح سفره آب شور

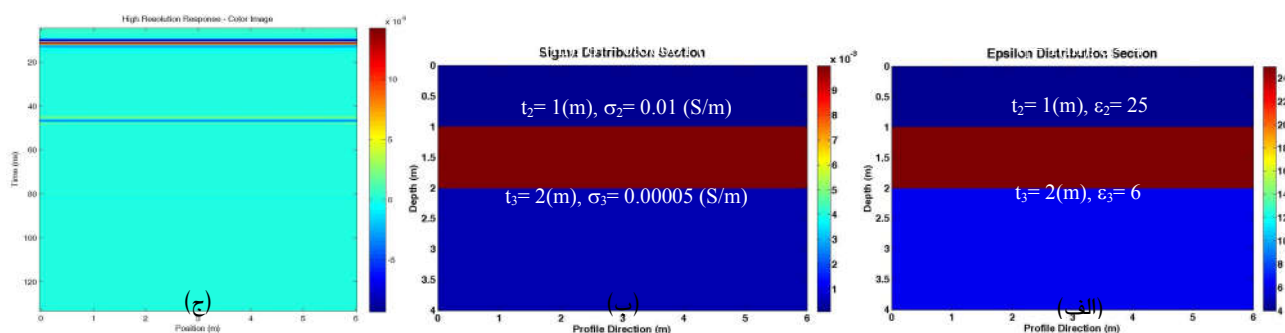
شکل ۸ مدل‌های هندسی و فیزیکی (شکل‌های الف و ب) و پاسخ GPR یک مدل زمین سه لایه<sup>۱۶</sup> (شکل ج) را نشان می‌دهد که در آن لایه رویی از جنس ماسه خشک، لایه میانی از جنس ماسه اشباع از آب شور و لایه زیرین (سنگ بستر) از جنس شیل نفوذناپذیر می‌باشد. ابعاد مدل ۶×۴ متر، میزان فرکانس مرکزی موج EM ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز و مقدار نفوذپذیری مغناطیسی تمام لایه‌ها در مدل برابر با مقدار

<sup>14</sup> Multiple reflection

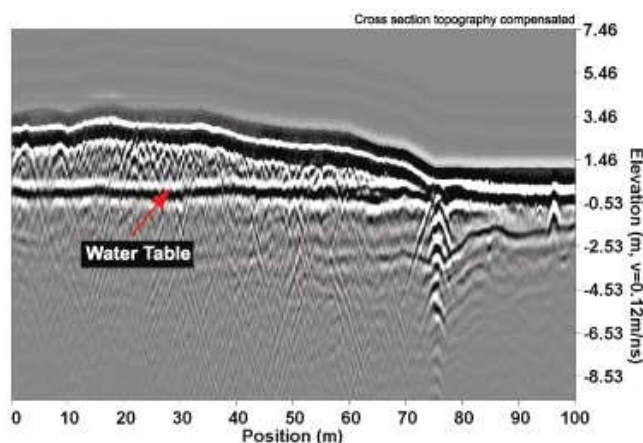
<sup>15</sup> Reverberation

آنتن‌های پوشش‌دار و از روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک‌حالتی استفاده شد. در حالت ایده آل (محیط زمین‌شناسی معمولی بدون حضور مواد هادی الکتریکی) سیستم GPR مجهز به آنتن با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، دارای تفکیک‌پذیری در حدود ۱۰ سانتی‌متر و بیشترین میزان عمق نفوذ، در حدود ۱۰ متر می‌باشد و در مورد محیط‌های زمین‌شناسی متداول، دارای میزان تفکیک‌پذیری در حدود ۳۰ سانتی-متر و بیشترین عمق تجسس در حدود ۸ متر است (انان، ۲۰۰۱).

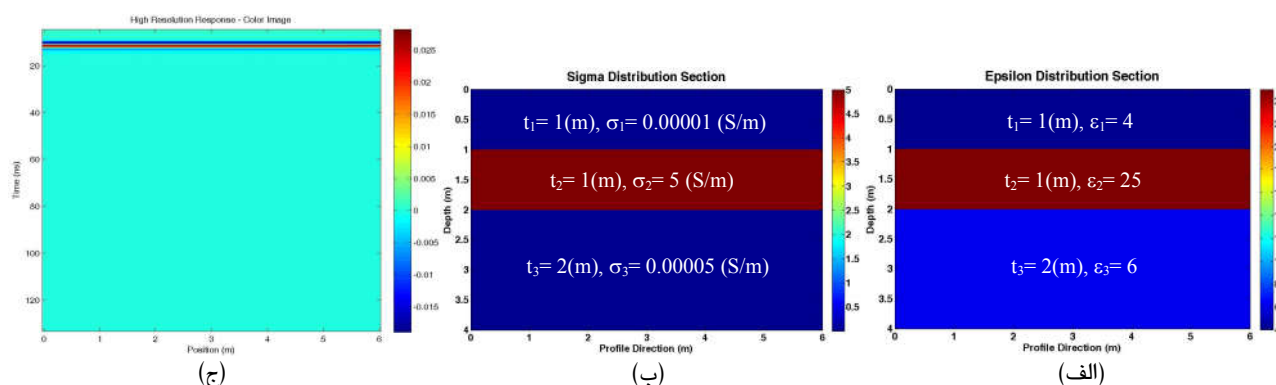
قنات‌های مدفون (به‌عنوان خطوط و مجاری اصلی انتقال آب) صورت گرفت. دشت شاهین شهر دشتی وسیع و هموار، با شیبی بسیار ملایم (به‌طور متوسط ۵٪) است. این دشت با ۱۹۶۵ تا ۲۰۰۳ متر ارتفاع از سطح دریا بلندترین دشت جلگه‌ای در استان اصفهان است که دارای بارندگی بسیار کم و ذخیره آب‌های زیرزمینی بسیار کم و فقیر است. در حال حاضر در این دشت ۲۳ رشته قنات آبدار وجود دارد که مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. امتداد عمومی اغلب قنات‌ها در این محدوده، شمال غربی- جنوب شرقی است. برای انجام عملیات برداشت اهداف مورد مطالعه، از یک سیستم GPR با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز مجهز به



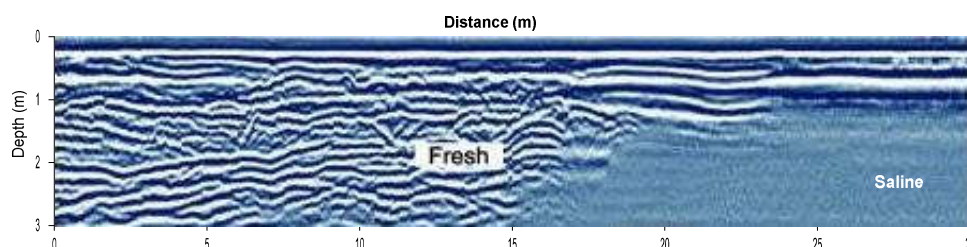
شکل ۶- الف: مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک، ب: مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج: پاسخ GPR یک مدل زمین سه‌لایه‌ای که لایه میانی حاوی آب شیرین می‌باشد ( $\sigma$ ، هدایت الکتریکی برحسب زمینس بر متر و  $t$ ، ضخامت لایه بر حسب متر است).



شکل ۷- مقطع نگاشت راداری داده‌های واقعی GPR با نمایش پاسخ سطح سفره آب زیرزمینی، بازتاب‌های چندگانه و پژواک‌های درون لایه‌ها.



شکل ۸- الف: مقطع توزیع گذردهی دی الکتریک، ب: مقطع توزیع هدایت الکتریکی و ج: پاسخ GPR یک مدل زمین سه لایه‌ای که لایه میانی حاوی آب شور می‌باشد ( $\sigma$ ، هدایت الکتریکی بر حسب زیمنس بر متر و  $t$ ، ضخامت لایه بر حسب متر است).



شکل ۹- مقطع نگاشت راداری داده‌های واقعی GPR مربوط به آب‌های زیرزمینی شور و شیرین در مجاورت یکدیگر با مرز مشخص در تصویر.

جهت پیش‌پردازش و پردازش داده‌های GPR (نگاشت‌های راداری)، از نرم‌افزارهای Ground Vision و Radexplorer استفاده شد. به‌عنوان نمونه نگاشت راداری پیش‌پردازش شده بخشی از مقطع منطبق بر پروفیل میانی برداشت شده در راستای شمال-جنوب عمود بر امتداد تخمینی قنات، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. مهم‌ترین عملیات پیش‌پردازش و پردازشی اعمال شده بر روی داده‌ها شامل تصحیح زمان صفر<sup>۱</sup>، اعمال فیلتر دی‌واو<sup>۲</sup> (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده-ها)، حذف شیفت جریان مستقیم<sup>۳</sup>، فیلتر میان‌گذر باترورث<sup>۴</sup>، حذف متوسط<sup>۵</sup>، حذف زمینه<sup>۶</sup> و انواع تقویت تقویت دامنه امواج بازگشتی با عمق می‌باشد. براساس

در شکل ۱۰- الف نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. برای آشکارسازی قنات مدفون در سطح محدوده مورد مطالعه، برداشت‌های GPR مطابق شکل ۱۰- ب از طریق یک شبکه برداشت متعام مربعی با فواصل پروفیلی ۵ متر در دو راستای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در سطح یک محدوده مربعی به ابعاد ۵۰×۵۰ متر انجام گرفت. در تمام مراحل برداشت GPR، با استفاده از امکانات دستگاه برداشت و براساس وضعیت محدوده مورد مطالعه، تمام پارامترهای برداشت از جمله فواصل بین پروفیلی، فواصل بین تریسی (فاصله ایستگاهی)، پنجره زمانی (عمق تجسس) و فاصله نمونه‌برداری زمانی (فرکانس نمونه‌برداری)، به‌طور بهینه، انتخاب و تنظیم شدند. میزان سرعت سیر امواج EM در سازندهای آبرفتی محیط نیز از طریق مشخصات فیزیکی آنها همچون دانه‌بندی، درصد رطوبت و میزان رس محیط، معادل  $0.12 \text{ m (ns)}^{-1}$  منظور شد.

<sup>1</sup> Time zero correction

<sup>2</sup> Dewowing

<sup>3</sup> DC shift removal

<sup>4</sup> Butterworth

<sup>5</sup> Subtract mean

<sup>6</sup> Background removal

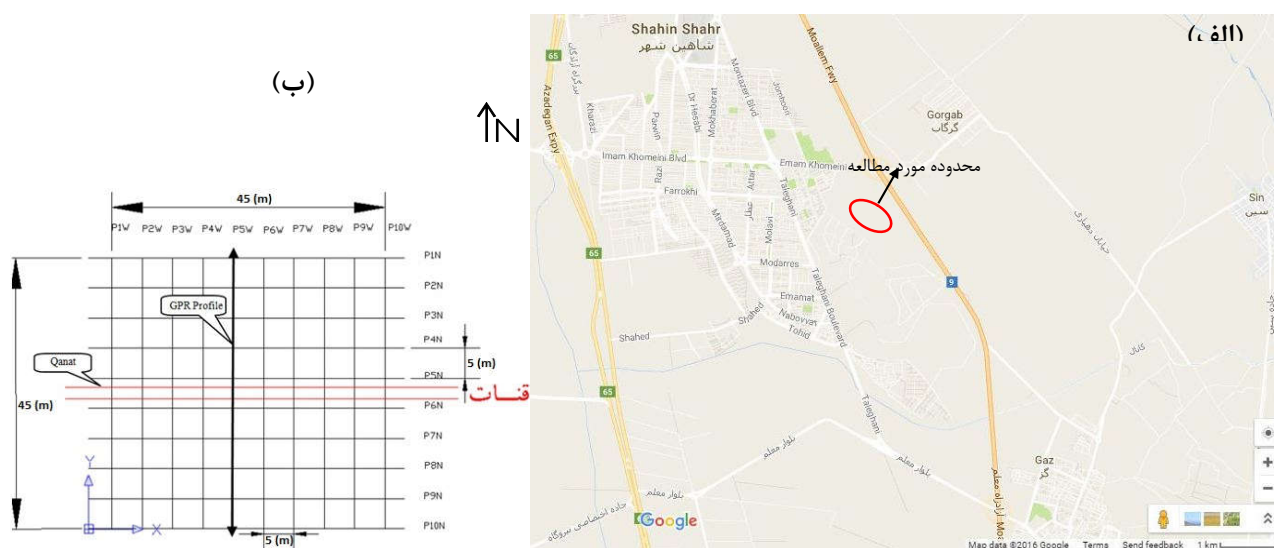
الکتریکی سنگ و خاک دربرگیرنده اهداف مدفون زیاد نباشد، با استفاده از روش غیرمخرب GPR می‌توان کلیه خطوط انتقال آب زیرسطحی را آشکارسازی نمود؛ جنس لوله‌های مدفون را از نظر فلزی یا غیرفلزی بودن تشخیص داد و در مورد لوله‌های غیرفلزی، براساس پلاریته موج EM بازتابی، نوع آب محتوی (شور یا شیرین بودن) را شناسایی نمود. همچنین از این روش می‌توان برای تعیین عمق سطح سفره‌های آب زیرزمینی، نقشه کردن کف آب‌خوان یا تعیین ضخامت لایه آبدار (در مورد آب‌های با رسانایی کم) و تعیین مرز آب‌های شور و شیرین استفاده کرد.

روش GPR برای آشکارسازی خطوط انتقال آب زیرزمینی در محدوده دشت شاهین شهر اصفهان به‌عنوان یک مطالعه موردی نیز به‌کار گرفته شد و ناهمگنی‌های موجود در نگاشت‌های راداری مربوطه براساس نتایج مدل‌سازی پیشرو، به‌عنوان موقعیت قنات نیمه پر از آب شیرین، تفسیر گردید که اعتبار نتایج از طریق حفر ترانشه بر روی یکی از پروفیل‌های برداشت به اثبات رسید.

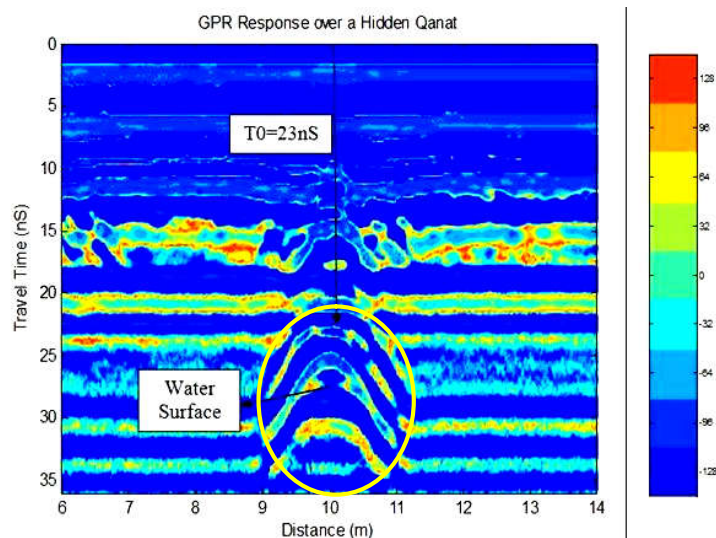
نتایج مدل‌سازی پیشرو در شرایط داده‌های واقعی، هذلولی‌های متقارن در نیمه پایینی نگاشت راداری شکل ۱۱ به‌عنوان موقعیت قنات مدفون نیمه‌پر از آب شیرین (به دلیل معکوس شدن پلاریته سیگنال بازتابی در موقعیت سطح آب و وجود بازتاب‌هایی در زیر سطح آب)، تفسیر شد. بعد از آشکارسازی قنات در تصاویر GPR، از طریق حفر ترانشه در موقعیت مناسب (منطبق بر پروفیل میانی برداشت GPR در راستای شمال-جنوب) در راستای عمود بر امتداد قنات احتمالی، اعتبار نتایج به اثبات رسید و عمق دفن و شعاع واقعی قنات مدفون نیز به ترتیب ۱/۶ متر و ۰/۶ متر اندازه‌گیری شد.

### نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرو به‌روش تفاضل محدود دوبردی بهبود یافته در حوزه فرکانس، پاسخ GPR اشیاء مصنوعی متناظر با اهداف متداول در مقاصد مهندسی آب، همانند استوانه افقی و زمین لایه‌ای، با هدف بکارگیری نتایج جهت آشکارسازی انواع خطوط انتقال آب مدفون و تصویر کردن آب‌های زیرزمینی انجام شد. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در صورتی که هدایت



شکل ۱۰- الف: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (بیضی قرمز رنگ)، ب- نمایش موقعیت پروفیل‌های برداشت GPR.



شکل ۱۱- آشکارسازی و شناسایی قنات نیمه‌پر از آب شیرین در دشت شاهین‌شهر در نیمه پایینی تصویر (بیضی زرد رنگ).

مهندسی امور آب همواره با آنها سروکار داشته و روش غیرمخرب GPR برای این مقاصد، یک روش سریع، دقیق و کم هزینه است. به‌رجهت تجربه کاربر این روش در پردازش داده‌ها و داشتن فهم درستی از محدودیت‌های این روش، نقش مهمی در تفسیر نتایج و اهداف پروژه خواهد داشت.

بررسی منابع موجود درخصوص بکارگیری تکنیک GPR در مطالعات با اهداف مهندسی متعدد و استفاده از آن در مطالعه عملی پژوهش حاضر، حاکی از توانایی و کارایی این روش غیرمخرب در امور مرتبط با آب است. مسائل مورد مطالعه در این پژوهش از جمله امور متداولی است که مهندسی کشاورزی و

#### منابع مورد استفاده

احمدی ر، فتحیان‌پور ن و نوروزی غح، ۱۳۹۱الف. کاربردهای ژئوتکنیکی روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در شناسایی پارامترهای فیزیکی و هندسی ناهمگنی‌های زیرسطحی. اولین کنفرانس مهندسی الکترومغناطیس ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۶ و ۷ دی ماه، تهران.

احمدی ر، فتحیان‌پور ن و نوروزی غح، ۱۳۹۱ب. تخمین مشخصات هندسی لوله‌های انتقال آب و فاضلاب مدفون با استفاده از مدل ریاضی و شبیه‌سازی پاسخ داده‌های رادار نفوذی زمین (GPR). همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، ۸ و ۹ اسفند، دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان.

احمدی ر، فتحیان‌پور ن و نوروزی غح، ۱۳۹۳الف. مطالعه ژئوتکنیکی بنای تاریخی سی‌وسه‌پل اصفهان با استفاده از روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی زمین. همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، ۳۱ اردیبهشت، کانون ملی معماری ایران، تبریز.

احمدی ر، فتحیان‌پور ن و نوروزی غح، ۱۳۹۳ب. کاربردهای ژئوتکنیکی رادار نفوذی به زمین در شناسایی ناهمگنی‌های زیر سطحی مسیر حفر تونل انتقال تاسیسات برقی اصفهان. اولین همایش ملی رادار نفوذی به زمین، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

احمدی ر، فتحیان‌پور ن و نوروزی غح، ۱۳۹۳ث. بهبود مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به روش عددی تفاضل متناهی. مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۸، شماره ۳، صفحه‌های ۱۱۴ تا ۱۲۰.

- اویسی مؤخر م، ۱۳۸۶. روش‌های مغناطیسی و رادار در تشخیص غارهای زیرزمینی در شهر قصرشیرین در ایران. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۴، شماره ۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۱.
- کامکار روحانی ا، محمدی ویژه م و اویسی مؤخر م، ۱۳۸۷. مقایسه روشهای GPR و مقاومت ویژه در آشکارسازی قناتهای آب اطراف شاهرود در خاکهای با رسانندگی الکتریکی بالا. سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۷-۱۹ اردیبهشت، تهران.
- Ahmadi R, Fathianpour N and Norouzi GH, 2014. Detecting physical and geometrical parameters of some common geotechnical targets through their effects on GPR responses. *Arabian Journal of Geosciences* 8(7): 4843-4854.
- Annan AP, 2001. Ground-penetrating radar workshop notes, Sensors and Software Inc., Mississauga, ON, Canada, 192 pages.
- Annan AP, 2003. GPR for infrastructure imaging: International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering.
- Bakker MAJ, Maljers D and Weerts HJT, 2007. Ground-penetrating radar profiling on embanked floodplains. *Netherlands Journal of Geosciences* 86: 55-61.
- Daniels DJ, 2004. Ground Penetrating Radar, 2nd edition, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 15, Institute of Electrical Engineers, London, UK.
- Davis JL and Annan AP, 1989. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37: 531-551.
- Geraads S, Charachon B, Loeffler O and Omnes G, 2002. Applying a wavenumber notch filter to remove interferences caused by railway sleepers from a GPR section. Pp. 715-718, In Proceedings of SPIE: 4758. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Gobel C, Hellmann R and Petzhold H, 1994. Georadar model and in-situe investigations for inspection of railways tracks. Pp. 12-16. Proceedings of Ground Penetrating Radar Conference. June, Kitchener, Canada.
- Huston D, Pelczarski N and Esser B, 2000. Damage detection in roadways with Ground Penetrating Radar. Pp. 91-95. Proceeding of Eighth International Conference on GPR, Gold Coasts, Australia.
- Irving J and Knight R, 2006. Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers & Geosciences* 32: 1247-1258.
- Jol HM, 2009. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. First edition, Elsevier Science. 543 P.
- Knödel K, Lange G and Voigt HJ, 2007. Environmental geology: handbook of field methods and case studies. Google Books Result, 1357 pages, Chapter 4, Geophysics.
- Manacorda G, Morandi D and Sarri A, 2002. A customized GPR system for railroad tracks verification. Pp. 719-722. Proceedings of SPIE: 4758. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Sadiku O and Matthew N, 2001. Numerical Techniques in Electromagnetics. Boca Raton London New York Washington, D.C., CRC Press.
- Stern W, 1929. Experiment of an electrodynamic thickness measurement of glacier ice, *Gerl. Beitr. zur Geophysik* 23: 292-333.
- Stern W, 1930. Basics, methodology and previous results of electrodynamic thickness measurements of glacier ice, *Z. Gletscherkunde* 15: 24-42.
- Zeng X and McMechan GA, 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysics* 62: 797-806.