

# کاربرد مدل‌سازی پیشرو و الگوریتم پردازشی مناسب در تعیین محل قنات به روش GPR

سجاد قنبری<sup>۱</sup> و محمدکاظم حفیظی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئوالکترونیک، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۲۱)

## چکیده

روش رادار نفوذی به زمین (GPR)، به دلیل توان بالای تفکیک، سرعت زیاد در برداشت داده‌ها و غیرتخریبی بودن، بهترین روش نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات نزدیک به سطح است. یکی از موارد مناسب برای مطالعه با این روش، تعیین محل گالری قنات‌های آبدار نزدیک به سطح به دلیل تباین قابل توجه ویژگی‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی قنات آبدار نسبت به محیط اطراف آن است. به همین منظور، یک مطالعه دوبعدی با برداشت داده‌ها در منطقه مشکان کاشان و با استفاده از آنتنی با بسامد مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز انجام پذیرفت. در رادارگرام اولیه، نشانه‌های مربوط به هدف مورد نظر به خوبی مشاهده نشد. از این رو، هدف این مقاله با توجه به شرایط قنات مذکور، بر آن بوده است که ابتدا با مدل‌سازی پیشرو و سپس با اعمال پارامترهای پردازشی مناسب، تا حد امکان به اهداف مورد نظر نزدیک شویم. رادارگرام مطلوب نهایی با به‌کارگیری پارامترهای پردازشی مانند تصحیح اشباع سیگنال، صافی‌های میان‌گذر، بهره جبران نمایی و گسترش هندسی و بردارنده زمینه، به دست آمد. خاک منطقه شامل مقادیری از ماسه، گراول و سیلت بوده و میانگین مقاومت ویژه الکتریکی آن تقریباً برابر ۲۰۰ اهم‌متر است. تحلیل سرعت سیر موج برای تعیین عمق قنات، بر اساس محاسبه مقدار میانگین سرعت امواج با توجه به جنس زمین منطقه مورد مطالعه، انجام پذیرفته است. در پایان، همخوانی مناسبی میان برون‌داد مدل طراحی‌شده و نتایج حاصل از تفسیر رادارگرام و شرایط واقعی زمین مشاهده شد. همچنین توانایی GPR با توجه به عمق کم هدف مورد نظر و وضوح بالای مورد نیاز به خوبی به اثبات رسید.

**واژه‌های کلیدی:** پردازش رادارگرام، تحلیل سرعت، رادار نفوذی به زمین، قنات، مدل‌سازی پیشرو

## ۱ مقدمه

رادار نفوذی به زمین (GPR)، یک روش ژئوفیزیکی برپایه انتشار امواج الکترومغناطیسی است که به عنوان یک روش غیرمخرب برای به تصویر درآوردن سطوح زیرزمینی به کار می‌رود (کانیرز، ۲۰۰۴؛ دانیلز، ۲۰۰۴).

امروزه در میان روش‌های ژئوفیزیکی، GPR توانسته است روزبه‌روز کاربردهای تازه‌ای را با موفقیت عرضه کند. از آنجایی که پردازش داده‌های GPR هنوز در دوران ابتدایی خود به سر می‌برد، رشد و توسعه این روش در گرو پیشرفت روش‌های پردازشی و مدل‌سازی پیشرو برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر است. در این صورت، به کارگیری GPR روزبه‌روز پررونق‌تر و اقتصادی‌تر خواهد شد.

در محیط‌هایی که اهداف رسانی غیرعادی و یا مغناطیسی وجود نداشته باشد، کمیتی که منجر به آشکارسازی بی‌هنجاری‌ها در روش GPR می‌شود، گذردهی دی‌الکتریک نام دارد (ون اورمیرن، ۱۹۹۴). این کمیت را به صورت نسبی، نسبت به گذردهی دی‌الکتریک هوا سنجیده و با نماد  $\epsilon_r$  نمایش می‌دهند. اساس روش GPR بر تباین دی‌الکتریکی مواد و همچنین روابط حاکم بر گسیل امواج الکترومغناطیسی استوار است (ون اورمیرن، ۱۹۹۴). عامل تعیین‌کننده در چگونگی عبور و بازتاب امواج الکترومغناطیسی از مواد مختلف، میزان ثابت دی‌الکتریک آنها است. هرچه قدر مقدار انرژی بازتابی بیشتر و تباین بیشتری در مواد روی زمین از لحاظ مقدار ثابت دی‌الکتریک وجود داشته باشد؛ وضوح بیشتری در مقاطع رادار حاصل خواهد شد (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۸۹).

در مطالعاتی که پیش از ساخت و ساز بناها و راه‌ها به ویژه در مورد فرودگاه‌ها و مناطق راهبردی انجام می‌گیرد، داشتن آگاهی کافی نسبت به محل دقیق حفره‌های مدفون ضروری است. اکتشاف حفره‌هایی مانند گالری قنات

به ویژه اگر دارای آب نیز باشند، همواره از اهمیت بالایی در ساخت و سازها و یا مطالعات پایه منابع آب مانند تخمین آبدهی برخوردار بوده است. در کشور ایران، قنات‌های بسیاری در مناطق گوناگون وجود دارند که در بسیاری از موارد محل دقیق آنها مشخص نیست. از طرفی روش‌های ژئوفیزیکی معدودی برای مطالعه حفره‌های نزدیک سطح وجود دارد. در میان همه روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل تباین بارزی که در مشخصات الکتریکی میان حفره‌های مدفون با محیط دربرگیرنده وجود داشته و همچنین با توجه به توانایی و توان تفکیک بالا در عمق‌های کم، آشکارسازی چنین اهدافی با روش GPR امکان‌پذیر است. در زمینه مطالعه قنات با روش ژئورادار، مطالعات متعددی در ایران انجام پذیرفته است. در یکی از این پژوهش‌ها، ساختارهای مدفون نزدیک سطح از جمله یک قنات و لوله‌های آب در حومه شهر شاهرود، با استفاده از روش‌های GPR و مقاومت ویژه، مطالعه و بررسی شده‌اند (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۸۹). در مطالعه دیگر، با انتخاب قنات به عنوان یک هدف مناسب، به بررسی نقاط ضعف و قوت روش‌های بُرش‌نگاری (توموگرافی) الکتریکی (ERT) و GPR پرداخته شده است (اسحاقی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس و رسوبات زیرسطحی کم‌عمق، از روش GPR و روش‌های تفسیر و پردازش آن استفاده شده است (کامکار روحانی و همکاران، ۱۳۹۱). در حالت کلی، با توجه به محدودیت‌های این روش گاهی در مقاطع به دست آمده از داده‌های رادار، هیچ‌گونه نشانه‌ای از اهداف مورد مطالعه دیده نمی‌شود. از این رو اکتشاف اهداف مدفون یا ناپیوستگی‌ها به وسیله روش GPR، همواره به سادگی سایر ناهنجاری‌ها که بازتابنده امواج رادار هستند، نیست (رادزویوس و همکاران، ۲۰۰۰). بنابراین در این موارد به کارگیری الگوریتم پردازشی

مناسب شکست‌ها و گذاشتن پدیده‌ها در جای مناسب‌تر، تصویر بهتری از رخدادهای پنهان‌شده به نمایش گذارد. تمامی فرایندهای پردازش پیشرفته باید به‌جا و در حد لازم صورت پذیرد و گرنه ممکن است پردازش به‌حدی مقطع داده‌های رادار را ساده نماید که مفسر دچار تصویری اشتباه در مورد شرایط واقعی حاکم در زمین شود (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹). تفسیر داده‌های GPR را می‌توان به دو بخش عمده تفسیر کمی و تفسیر کیفی تقسیم‌بندی کرد. هدف از تفسیر کمی داده‌ها استخراج ویژگی‌های فیزیکی موردنظر از روی اطلاعات موجود در مقاطع است. این‌گونه تفسیرها بیشتر در مطالعات آلودگی آب‌های زیرزمینی، مهندسی مخازن آب و هیدروکربور و برش‌نگاری موردتوجه بوده و از این‌رو تفسیر کمی داده‌ها تا حدود زیادی به شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی محدود است. تفسیر کیفی داده‌ها که به تفسیر گرافیکی نیز معروف است بعد از به‌کارگیری پردازش‌های مناسب بر روی داده‌ها انجام می‌پذیرد. به این ترتیب که مقاطع زمانی به‌دست‌آمده ممکن است با استفاده از سرعت امواج در محیط زیرسطحی به مقطع عمقی تبدیل شده و یا این‌که به‌صورت مستقیم در دست مفسر قرار گیرند. در این نوع تفسیر، مفسر در واقع کیفیت و شکل بازتاب‌ها را نسبت به بازتاب‌های مجاور تشخیص داده و با توجه به ویژگی این بازتاب‌ها از جمله پیوستگی، بزرگی و گسترش آنها، این رویدادها را از یکدیگر تفکیک می‌کند (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹).

در این پژوهش، ابتدا با مدل‌سازی پیشرو و طراحی مدل براساس شرایط مورد انتظار مطالعه، رفتار امواج الکترومغناطیسی و پاسخ محیط را بررسی و سپس با تفسیر کیفی مقطع به‌دست‌آمده از برداشت داده‌های GPR، نتایج به‌دست‌آمده را با شرایط واقعی زمین مقایسه خواهیم کرد.

مناسب بسیار مفید خواهد بود. برای آزمودن توانایی روش GPR، در مطالعات این‌چنینی، لازم است علاوه بر برداشت و تفسیر داده‌های واقعی، براساس شرایط حاکم بر قناتی که ویژگی‌های آن معلوم است، یک مدل طراحی و اجرا شود. آنچه در این پژوهش نسبت به سایر مطالعات مشابه انجام‌پذیرفته پیشین در ایران بارزتر است، بهره‌گیری از مزایای مدل‌سازی پیشرو در روش GPR و مقایسه نتایج حاصل از آن با داده‌های واقعی است. در مدل‌سازی سعی بر آن است تا از بازتاب امواج دریافت‌شده از زیر زمین که به دلیل انتشار امواج الکترومغناطیسی حاصل‌شده، بهترین شبیه‌سازی از بی‌هنجاری زیرسطحی انجام شود.

در پردازش مقاطع GPR، مراحل ابتدایی پردازش شامل آماده‌سازی و مرتب کردن داده‌ها بر اساس فواصل مکانی و سایر ملزومات ویرایش ابتدایی مانند تصحیح صفر زمان‌رسیده‌ها و تصحیح طول رادارگرام است. از آنجایی که بسامدهای خیلی کم بیانگر پدیده‌های القایی و یا محدودیت‌های برد پویا در هنگام استفاده از دستگاه‌هاست، پردازش پایه‌ای، بهره‌گیری از یک صافی بالاگذر زمانی برای حذف داده‌های برداشت‌شده در بسامدهای بسیار پایین است. مرحله بعد، شامل به‌کارگیری بهره زمانی صحیح و استفاده ترکیبی از صافی‌های زمانی و مکانی مناسب است (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹).

استفاده از صافی‌ها می‌تواند پیش یا پس از اعمال بهره زمانی، البته با معلوم بودن چگونگی اثر بهره زمانی انجام گیرد؛ چراکه برخی از مراحل یادشده، ماهیتی غیرخطی داشته و نمی‌توان اثر ترتیب اجرای مراحل مختلف را نادیده گرفت. پردازش پیشرفته داده‌ها به آن دسته از عملیات پردازشی اطلاق می‌شود که در آن کاربر به دنبال متمایز نمودن هدف مورد جستجو در مقاطع داده‌ها برای به‌دست آوردن تصویر واضح‌تری از بی‌هنجاری‌های موردنظر است. مثلاً کوچک به‌سادگی می‌تواند با حذف

۲ روش پژوهش

اگر  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی ویژه محیط،  $\varepsilon$  ثابت دی‌الکتریک و  $\mu$  تراوایی مغناطیسی باشد، برای بیشتر کاربردهای GPR، فرض ثابت بودن شکل نرده‌ای کمیت‌های فوق کافی است. این فرض برای  $\sigma$  و  $\varepsilon$  از اهمیت بیشتری برخوردار است (نیل، ۲۰۰۴). همچنین اگر برخورد موج به فصل مشترک دو محیط به صورت عمودی باشد، ضرایب بازتاب ( $R$ ) و عبور ( $T$ ) به ترتیب با روابط زیر بیان می‌شوند (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

۱) 
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2},$$

۲) 
$$T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2},$$

که  $Z_1$  و  $Z_2$ ، رهنبدی (امپدانس) موج الکترومغناطیسی در دو محیط مختلف بوده و با روابط زیر برحسب ویژگی‌های فیزیکی محیط تعریف می‌شوند و  $Z_0$ ، رهنبدی موج برای خلأ و با تقریب خوبی برای هوا است:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} = \frac{\omega\mu}{k}, \quad (3)$$

$$k = (\omega^2 \varepsilon \mu + i\omega\mu\sigma)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

واضح است که در حالت آرمانی، یعنی بدون در نظر گرفتن پدیده جذب و میرایی، خواهیم داشت:

$$R + T = 1. \quad (5)$$

با فرض عمودی بودن برخورد موج به فصل مشترک دو محیط و همچنین نامغناطیسی و نارسانا بودن محیط‌ها، آنگاه ضریب بازتاب با رابطه زیر بیان می‌شود (انان، ۲۰۰۱):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{1r}} - \sqrt{\varepsilon_{2r}}}{\sqrt{\varepsilon_{1r}} + \sqrt{\varepsilon_{2r}}}. \quad (6)$$

جدول ۱. ضریب بازتاب در مرز محیط‌های مختلف با توجه به ضریب دی‌الکتریک هر محیط (زنگ و مک‌مگان، ۱۹۹۷).

| ضریب بازتاب | $\varepsilon_{2r}$ | $\varepsilon_{1r}$ | فصل مشترک دو محیط    |
|-------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| -۰/۵۰       | ۹                  | ۱                  | هوا - خاک خشک        |
| -۰/۳۳       | ۱۶                 | ۴                  | خاک خشک - خاک مرطوب  |
| +۰/۶۰       | ۱                  | ۱۶                 | خاک مرطوب - هوا      |
| -۰/۸۰       | ۸۱                 | ۱                  | هوا - آب شیرین       |
| +۰/۳۰       | ۲۵                 | ۸۱                 | آب شیرین - خاک اشباع |

با توجه به مقادیر جدول فوق که بر اساس شرایط واقعی هریک از محیط‌ها در نظر گرفته شده‌است؛ قدر مطلق ضریب بازتاب برای مرزهای خاک-هوا و هوا-آب از سایر مرزها بیشتر است. هرگاه ضریب بازتاب منفی باشد، بدان معناست که قطبش موج بازتابی تغییر خواهد کرد. به‌هرحال هرچقدر قدر مطلق این ضریب بیشتر باشد موج بازتابی دامنه بیشتری خواهد داشت. اگرچه آب شیرین و هوا محیط‌های کم‌اتلافی برای امواج ژئورادار به حساب می‌آیند (دیویس و انان، ۱۹۸۹) و همچنین بادر نظر گرفتن اختلاف بالای مقادیر دی‌الکتریک میان هوا و آب، انتظار می‌رود سطح آب به‌عنوان یک بازتابنده قوی در

برای تبدیل زمان رسید امواج به عمق باید سرعت سیر موج را به دست آوریم. سرعت امواج در محیط‌های زیرسطحی با رابطه زیر محاسبه می‌شود (نیل، ۲۰۰۴):

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2}}{2}}}, \quad (7)$$

که  $C_0$  سرعت موج در هوا،  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی ویژه محیط،  $\mu_r$  نشان‌دهنده تراوایی مغناطیسی نسبی،  $\varepsilon_r$  گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا، و  $\omega$  بسامد زاویه‌ای موج GPR است. در خاک‌هایی که رسانندگی بالایی ندارند، می‌توان از عامل  $\left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)$  که به عامل تضعیف مشهور است، چشم‌پوشید (رینولدز، ۱۹۹۷). روش‌های گوناگونی برای محاسبه سرعت سیر موج رادار وجود دارد. به‌عنوان مثال، سرعت سیر امواج در سطوح زیر زمین را می‌توان از روی هذلولی‌های پراش به دست آورد (خایدکف و همکاران، ۲۰۰۴). از آنجایی که گالری قنات نزدیک به سطح است، مسیر عبوری موج گسلی از آنتن در لایه‌های سطحی و در عمق‌های کمتر از یک متر خواهد بود. به‌همین سبب روشی که در این پژوهش به کار گرفته شد، بهره‌گیری از مقدار میانگین سرعت سیر موج با توجه به نوع خاک منطقه مورد مطالعه است. خاک منطقه، خاکی مخلوط از ماسه با مقداری گراول و سیلت بوده و مقدار میانگین رسانندگی الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برابر با ۰/۰۰۵ زیمنس بر متر است. با در نظر گرفتن مقدار میانگین گذردهی الکتریکی به دست آمده از روش خازنی در آزمایشگاه، که مقداری نزدیک به ۱۰ است و با در نظر گرفتن غیرمغناطیسی بودن خاک که فرض صحیحی است، طبق رابطه (۷)، سرعت سیر موج به دست آمده برابر با مقدار تقریبی ۰/۰۹ متر بر

رادارگرام به خوبی مشخص گردد؛ اما موج گسلی شده از آنتن، به مرز هوا-خاک سطح زمین برخورد کرده و پس از بازتاب نسبتاً شدید، قسمتی از موج به درون زمین نفوذ می‌کند؛ سپس موج نفوذی پس از عبور از لایه‌های خاک به مرز خاک-هوای بالای گالری قنات برخورد کرده و دوباره به موج عبوری و بازتابی تقسیم می‌شود. در نهایت موج عبوری به سطح آب شیرین برخورد کرده و بازتاب می‌کند و دوباره به سطح هوای بالای قنات-خاک رسیده و تقسیم می‌شود. اما پس از بازتاب‌های متوالی، موجی از سطح آب به گیرنده می‌رسد که دامنه بسیار کمتری نسبت به موج اولیه گسلی شده دارد. از این رو مرز هوا-آب به راحتی قابل مشاهده نخواهد بود. از تحلیل دامنه امواج بازتابی و پیش‌بینی توان سیگنال‌های دریافتی، نتیجه می‌شود که در رادارگرام نهایی، مرز خاک-هوای قنات، نشانه بارز حضور گالری قنات خواهد بود.

انرژی بازتاب شده که به آنتن گیرنده می‌رسد، حاصل برخورد امواج الکترومغناطیسی به یک نقطه خاص نیست. این انرژی از سطح مشخصی از بازتاب‌کننده به گیرنده رسیده است. توان تفکیک افقی با این پارامتر کنترل می‌شود؛ به گونه‌ای که برای بسامدهای بالاتر توان تفکیک افقی افزایش می‌یابد. همچنین بهترین توان تفکیک قائم ثبت شده در موارد کم‌اتلاف مانند ماسه‌های خشک با استفاده از آنتن‌های بسامد بالا بین ۲ تا ۸ سانتیمتر بوده و در حالت کلی با ۰/۲۵ طول موج تخمین زده می‌شود (نیل، ۲۰۰۴). اگر گسترش جانبی بازتاب‌کننده‌ای کوچک‌تر از حد تفکیک باشد، شکل آن به خوبی روی مقطع زمانی دیده نشده و پدیده پراش رخ خواهد داد (پاراسنیس، ۱۹۹۷). اما در این مطالعه، گالری قنات به‌عنوان هدف مورد نظر، دارای قطری بیشتر از ۰/۵ متر است. در نتیجه انتظار می‌رود که نیمه بالای گالری به صورت یک خمیدگی شبیه هذلولی در مقطع نهایی پدیدار گردد.

پدیده انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط و سطوح نزدیک به سطح زمین از معادلات ماکسول تبعیت می کند (نبیقیان، ۱۹۹۱):

$$\begin{aligned} \nabla \times H(r,t) &= J(r,t) + \frac{\partial D(r,t)}{\partial t} \\ &= J_s(r,t) + \varepsilon(r) \frac{\partial E(r,t)}{\partial t} + \sigma(r)E(r,t), \quad (8) \\ \nabla \times E(r,t) &= -\frac{\partial B(r,t)}{\partial t} = -\mu(r) \frac{\partial H(r,t)}{\partial t}, \end{aligned}$$

که  $H$  شدت میدان مغناطیسی  $\left(\frac{A}{m}\right)$ ، چگالی جریان الکتریکی کل  $\left(\frac{A}{m^2}\right)$ ،  $(J = \sigma E)$ ، شدت میدان الکتریکی  $\left(\frac{V}{m}\right)$ ،  $B$  میدان القای مغناطیسی  $\left(\frac{wb}{m^2}\right)$ ،  $(B = \mu H)$ ، جابه جایی الکتریکی  $\left(\frac{C}{m^2}\right)$ ،  $(D = \varepsilon E)$ ، چگالی جریان منبع الکتریکی است. کمیت های برداری در معادلات بالا تابع زمان و فضا هستند. فرض می شود که کمیت های  $\sigma$ ،  $\varepsilon$ ،  $\mu$  در هر زمان، دما و فشاری ثابت باشند، اما ممکن است رفتارها و مقادیر گوناگون در محیط های مختلف داشته باشند. با اندک محاسبات جبری و فرض نبودن بار آزاد و همچنین مواد فرومغناطیس در محیط و معرفی ضریب (فاکتور) کیفیت (Q) براساس  $Q = (\tan \delta)^{-1} = (\sigma / \omega \varepsilon)^{-1}$  (ون هیل، ۱۹۵۴) و رابطه  $c = 1 / \sqrt{\mu \varepsilon}$  برای سرعت نور برحسب  $\varepsilon$  و  $\mu$ ، رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{2\pi f \tan \delta}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon c^2} \frac{\partial J_s}{\partial t}, \quad (9)$$

که  $\delta = \text{Arctg}(\sigma / \omega \varepsilon)$ ،  $f$  بسامد موج الکترومغناطیسی و  $\omega = 2\pi f$  است. طبق روشی که چن و هوآنگ (۱۹۹۸) به کار گرفته اند، رابطه (۹) برای استخراج معادله تفاضل متناهی براساس عملگرهای تعیین کننده مشتقات جزئی استفاده شده و مدل بر پایه یک

نانوآنی خواهد بود که در تبدیل زمان رسید موج به عمق اعمال خواهد شد.

## ۱-۲ مدل سازی

برای اهداف مختلف، پاسخ سامانه GPR باید با یکی از روش های مدل سازی عددی شبیه سازی شود تا موجب شناخت رفتار مدل های مختلف شده و زمینه وارون سازی صحیح داده های GPR را در کاربردهای عملی فراهم آورد. روش های مختلفی برای مدل سازی GPR وجود دارد (رجوع کنید به بانو، ۱۹۹۶؛ چن و هانگ، ۱۹۹۸؛ بیتری و گرنجین، ۱۹۹۸؛ و آرت و کنوسن، ۲۰۰۴). اگرچه در روش شناسی با یکدیگر متفاوتند، اما در همه این روش ها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، بر اساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و برهمکنش آنها با مواد زیرسطحی شبیه سازی می شود. روش تفاضل متناهی به خاطر دارا بودن مزیت هایی نظیر سادگی نسبی مفاهیم، انعطاف پذیری، قابلیت شبیه سازی و مدل سازی محیط های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ های آن در موارد به کاررفته، به نسبت سایر روش های عددی، مقبولیت و کاربرد بیشتری دارد. همچنین روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) می تواند خواص سطح زیرین را با دقت بیشتری مدل سازی کند. این روش اجازه می دهد تا کاربر محیط های کاملاً پیچیده حاصل از انتشار امواج GPR را شبیه سازی کند و با استفاده از این مدل سازی اطلاعات نسبتاً دقیق تری در هنگام تفسیر داده های واقعی استخراج کند (آرت و نوسن، ۲۰۰۴). به طور معمول، برای مدل سازی امواج منتشر شده، پدیده ها و لایه های زیرزمین به قسمت های مکعب شکلی تقسیم می شود که به آن شبکه یاخته ای متعامد گفته می شود. برای هر یاخته، شدت میدان های الکتریکی و مغناطیسی به وسیله مؤلفه های قائم و افقی میدان های یکنواخت الکترومغناطیسی تعیین می شود (ترایس، ۲۰۱۰).

شکل ۱ نحوه انتشار موج الکترومغناطیسی را براساس تغییرات میدان الکتریکی در دو راستای  $x$  و  $z$ ، برای اجرای الگوریتم نمایش می‌دهد. در این روش، گسسته‌سازی سامانه مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند. علاوه بر قرار گرفتن فرضی تغییرات میدان الکتریکی در وسط اضلاع شبکه، در واقع تمامی یاخته‌های تعریف شده در این روش باید در مرکز مکعب خود قرار گیرند، تا از بروز اختلالات جزئی و بعضاً بزرگ جلوگیری شود (بانو، ۱۹۹۶). در واقع با اعمال این شرط، خروجی مطمئن‌تری تولید می‌شود. حال فرمولبندی صریح تفاضل متناهی مرتبه چهارم بر اساس روابط زیر تعریف و اجرا می‌شود:

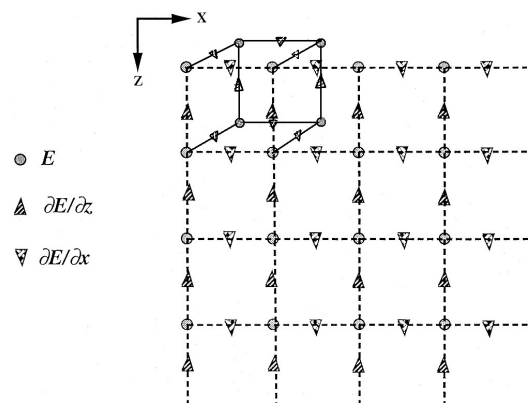
$$E(i,j,t+1) = \frac{1}{1+A} \left\{ \begin{aligned} & C_0 \left[ \frac{-1}{12} (E(i+2,j,t) + E(i-2,j,t)) \right. \\ & \left. + E(i,j+2,t) + E(i,j-2,t) \right] \\ & + \frac{4}{3} \left[ \frac{E(i+1,j,t) + E(i-1,j,t)}{+E(i,j+1,t) + E(i,j-1,t)} \right] \\ & + \left[ \frac{2E(i,j,t) - E(i,j,t-1)}{+ \left( A - \frac{20}{3} \right) E(i,j,t)} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

که  $C_0 = \frac{(c^2 \Delta t^2)}{\Delta h^2}$ ،  $\Delta h$  و  $\Delta t$  به ترتیب مقادیر گام زمانی و فاصله مکانی بین گره‌ها در شبکه هستند و  $A = 2\pi \Delta t f \tan \delta$  است. در ضمن اندیس‌های  $i$ ،  $j$  و  $t$  نشان‌دهنده مختصات در راستاهای  $x$ ،  $z$  و زمان هستند. آلفورد و همکاران (۱۹۷۴) نشان دادند که شرایط پایداری و کارایی مشتقات مکانی مرتبه چهارم و مشتقات زمانی مرتبه دوم تفاضل متناهی به صورت زیر است:

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{3}{8}} \Delta h / V_{\max}, \quad (11)$$

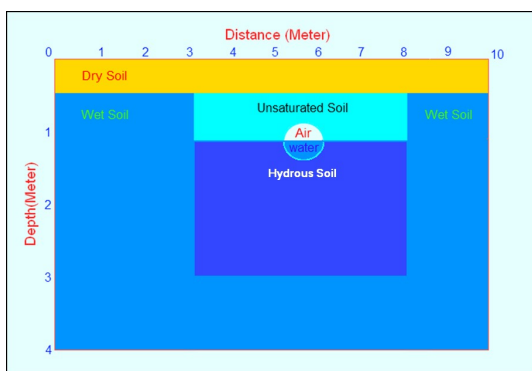
که  $V_{\max}$ ، سرعت بیشینه موج در ماده است. همچنین به منظور اجتناب از پاشش عددی، فاصله شبکه‌ای  $\Delta h$ ، نباید بیشتر از یک‌دهم کوچک‌ترین طول موج سیگنال

توری یا شبکه با فواصل  $\Delta h$  تعریف می‌شود. به هر یک از نقاط شبکه مقادیر پارامترهای فیزیکی مانند نفوذپذیری دی‌الکتریکی یا رسانندگی الکتریکی نسبت داده می‌شود. همچنین مشتقات مکانی به وسیله عبارات تفاضل متناهی با دقت مرتبه چهارم و مشتقات زمانی توسط عبارات تفاضل متناهی با دقت مرتبه دوم تخمین زده می‌شوند. در این مطالعه، مدل‌سازی عددی تفاضل متناهی روابط مُد میدان مغناطیسی عرضی امواج الکترومغناطیسی (TM) برای (Transverse Magnetic) در یک شبکه غیر هم‌مبدأ (Staggered Grid) که در آن مؤلفه‌های میدان در وسط فاصله میان هر دو گره یا نقطه شبکه متوالی قرار می‌گیرند، انجام گرفته است. اکنون اگر از آهنگ تغییرات زمانی منبع الکتریکی برای شبیه‌سازی پراکندگی سیگنال‌های آنتن GPR استفاده شود، برای یک گام زمانی ثابت، میدان سه‌بعدی الکترومغناطیسی با محاسبه مرحله به مرحله توسط هر یک از میدان‌های متناوب  $E$  و  $H$  که برای هر تک یاخته در هر فراخوانی محاسبه می‌شود، به دست می‌آید. این رویه برای آهنگ‌های بعدی نیز تکرار شده که در نهایت انتشار امواج الکترومغناطیسی وابسته به زمان در سراسر حجم مدل مفروض نتیجه می‌شود.



شکل ۱. چگونگی یاخته‌بندی مکعبی محیط دوبعدی بر اساس تغییرات میدان الکتریکی و انتشار موج الکترومغناطیسی در دو راستای  $x$  و  $z$  (چن و هوانگ، ۱۹۹۸).

تعریف شده است. مهم ترین پارامتر فیزیکی تأثیرگذار، کمیت گذردهی دی الکتریک بوده که مقادیر آن در هر لایه در جدول ۱ آورده شده است. مقدار تراوایی مغناطیسی نیز در زمین های معمولی و بدون رسانندگی بالا، برابر با تراوایی در خلأ و  $4\pi \times 10^{-7}$  است. سپس دو سطح مقطع به شکل نیم دایره منطبق بر ویژگی های گالری قنات، که نیم دایره های بالایی و پایینی به ترتیب با توجه به کمیت های فیزیکی هوا و آب تعریف شده است، در عمق تقریبی یک متر واقع گردید. مقدار گذردهی نسبی الکتریکی برای هوا و آب به ترتیب ۱ و ۸۱ است. همچنین مناطق محتوی آب در ناحیه زیر گالری و منطقه ای از خاک مرطوب در بالای قنات در نظر گرفته شده است. با توجه به آنتن به کار گرفته شده در این مطالعه و عمق نفوذ نسبتاً کم آن، انتظار می رود در اعماق بیشتر از ۱/۵ متر، امواج رادار دچار میرایی شدید شوند. در این صورت در اعماق بیشتر هیچ گونه سیگنالی دریافت نخواهیم کرد. اما برای محدود نبودن مدل به عمق مذکور، بیشینه عمق نفوذ موج تا چهار متر اعمال گردیده و همچنین فاصله نمونه برداری زمانی و مکانی به ترتیب مقادیر ۰/۱۵ نانوثانیه و ۰/۳ متر در نظر گرفته شده است



شکل ۲. آرایش لایه ها و نواحی مورد انتظار در مدل طراحی شده برای مدل سازی پیشرو.

شکل ۳ برون داد مدل طراحی شده بر اساس اطلاعات بیان شده فوق را نشان می دهد. از آنجایی که پدیده میرایی

ارسالی و یا یک پنجم نسبت سرعت کمینه به بسامد بیشینه باشد. به عبارتی:

$$\Delta h \leq 0.2(V_{\min} / f_{\max}) \quad (12)$$

که  $f_{\max}$  نشان دهنده بیشینه بسامد موج ارسالی است. تپی (پالسی) که در شبکه سیرمی کند، به عنوان یک موجک ریکر (Ricker) در نظر گرفته شده و با تابع زیر تعریف می شود:

$$J_s(t) = \sqrt{\frac{e}{2\theta}} \quad (13)$$

که  $\theta$  ثابت زمانی قله به قله (peak to peak) برای  $J_s(t)$  و عامل  $\sqrt{\frac{e}{2\theta}}$ ، برای بهنجار کردن بیشینه دامنه  $J_s(t)$  به مقدار واحد و  $e$  عدد نپر است. شرایط مرزی در این مدل به صورت ترکیبی از مرزهای بدون بازتاب و بدون جذب در نظر گرفته شده که اصطلاحاً ABC نامیده می شود. در نهایت، با محاسبه الگوریتم با تعداد تکرار کافی، می توان مدل به دست آمده از این روش را به منابع بی هنجاری نسبت داد. آنچه در این مطالعه اهمیت دارد، پیاده کردن تمامی موارد فوق بر اساس شرایط پیچیده یک قنات دارای آب نزدیک به سطح و نواحی اطراف گالری قنات است. اکنون در طراحی مدل به کمک نرم افزار Reflexw Project، بر اساس شرایط هدف مطالعه، لایه ها و نواحی مختلف تعریف شده و مقادیر میانگین کمیت های فیزیکی به هر لایه یا پدیده مدنظر نسبت داده می شود. شکل ۲ تصویر طرحواره ای از آرایش لایه ها و قنات موردنظر در مدل سازی را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، ابتدا یک لایه کم-ضخامت از خاک سطحی خشک و سپس یک لایه خاک مرطوب با ضخامت نسبی بیشتر تا عمق تقریبی دو متر در نظر گرفته و مقادیر کمیت های فیزیکی مربوط به هر لایه



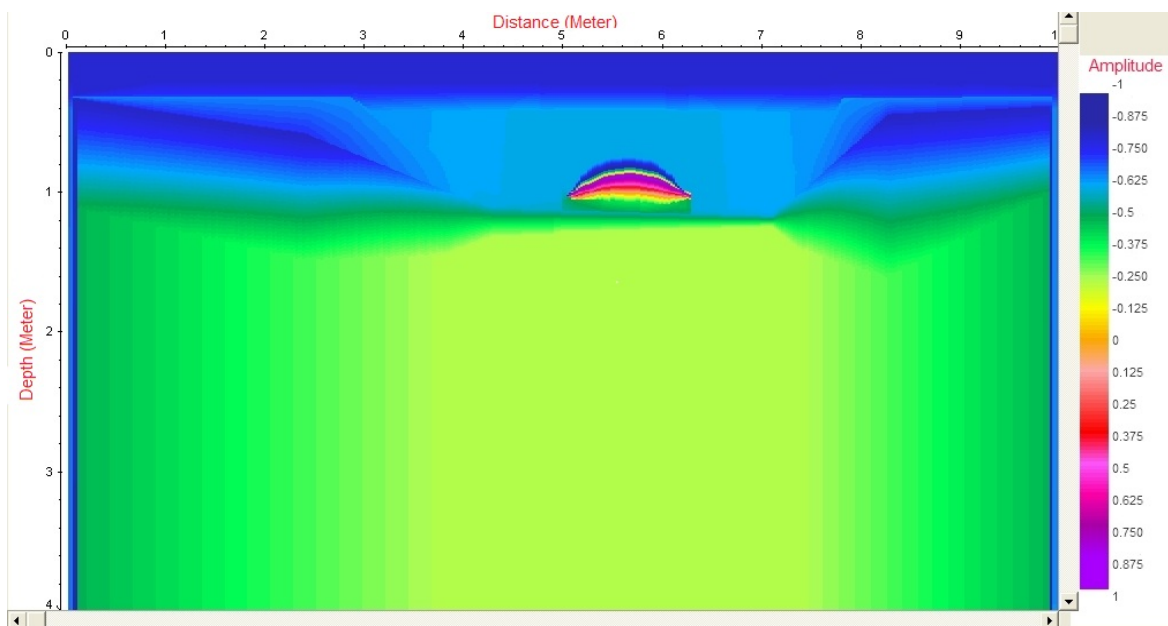
شد، موج بازتابی از این مرز حتی با وجود ضریب بازتاب بالا در مرز آب-هوا، دامنه نسبتاً کوچکی داشته و این مرز به‌خوبی پدیدار نخواهد شد.

اینکه نتایج حاصل از مدل اجرا شده تا چه اندازه با نتایج حاصل از تفسیر مقطع ژئورادار تطابق دارند، نیازمند پردازش و تفسیر کیفی رادارگرام و در نهایت مقایسه نتایج حاصله است.

## ۲-۲ برداشت و پردازش داده‌ها

برداشت داده‌ها توسط گروه ژئوفیزیک شرکت مهندسی مشاور زمین‌آب‌پی، به‌صورت پروفیل‌زنی خطی و در منطقه‌ای به نام مشکان در حوالی شهر کاشان صورت پذیرفته است. برای برداشت داده‌ها، با توجه به عمق کم هدف مورد نظر از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز دستگاه مالا (MALA) استفاده و برای فاصله نمونه‌برداری زمانی و مکانی، همان مقادیر به‌کاررفته در مدل‌سازی منظور شده است. شکل ۴ مقطع ابتدایی به‌دست‌آمده از برداشت داده‌ها را نشان می‌دهد.

در لایه سطحی چندان قابل توجه نبوده و موج بازگشتی بیشترین دامنه را داراست، لایه خاک خشک به‌خوبی در برون‌داد مدل نمایان شده است. در عمق ۰/۳ تا یک متری برون‌داد، بازتاب‌های نسبتاً بارزی که نشان‌دهنده لایه مرطوب خاک است مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه، حضور بازتاب‌های تکرارشونده مشخصی در فاصله ۵-۶ متری برون‌داد در عمق کمتر از یک متر است که به‌خوبی نیمه بالایی قنات و مرز خاک-هوا را نمایان ساخته است. دامنه موج بازتابی از مرز خاک-هوای بالای گالری نسبت به مرزهای دیگر در گالری قنات بیشتر است. از این‌رو می‌توان انتظار داشت نشانه‌های این مرز با به‌کارگیری الگوریتم مناسب پردازشی در رادارگرام نهایی پدیدار گردد. در ناحیه خاک مرطوب بالای قنات، حضور آب موجب تشدید پدیده میرایی گردیده و شدت دامنه موج دریافتی را کاهش داده است. در عمق بیشتر از یک متر، پدیده غالب، میرایی است. به‌ویژه در ناحیه محتوی آب زیر گالری قنات عملاً سیگنالی دریافت نشده است. اگرچه اختلاف دی‌الکتریکی بزرگی میان آب درون قنات و محیط اطراف وجود دارد، اما همان‌گونه که پیش‌تر بیان



شکل ۳. برون‌داد حاصل شده از مدل‌سازی پیش‌رو.

زمین به گیرنده می‌رسند، و همچنین وجود بازتاب‌هایی که از توده‌های کم‌عمق نشئت می‌گیرند، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود. این مسئله سبب به وجود آمدن یک زوال آهسته بسامد پایین (WOW) می‌شود. این زوال بسامد پایین بر روی بسامدهای بالاتر قرار گرفته و آنها را مغشوش می‌کند. اندازه و شدت این بسامدهای پایین به فاصله آنتن‌ها و همچنین مشخصات الکتریکی زمین وابسته است. برای حذف نوفه‌های بسامد پایین معمولاً یک صافی بالاگذر بر داده‌ها اعمال می‌شود. صافی Dewow یک صافی بالاگذر بوده که برای گذراندن قله طیف سیگنال ارسالی برای بسامد مرکزی یک آنتن خاص طراحی شده است. برای این کار یک پنجره زمانی تعریف شده و براساس مقدار در نظر گرفته شده برای آن بسامدهای پایین‌تر حذف می‌شوند (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹). مقدار منظور شده برای پنجره زمانی در این مرحله برابر با ۵ نانوثانیه است. نتیجه به کارگیری پارامترهای پردازشی فوق در رادارگرام شکل ۵ نمایش داده شده است. همان‌گونه که بیان شد در این مطالعه مرز مشترک

به هنگام برداشت داده‌ها، اگر اولین رویداد موج مستقیم که در هوا از فرستنده به گیرنده می‌رسد تغییر موقعیت دهد، جابه‌جایی صفر زمانی رخ می‌دهد. این خطا نه فقط باعث جابه‌جایی اولین رویداد، بلکه باعث رانش تمامی رویدادها، از جمله رویدادهای بازتابی از مکان واقعی‌شان می‌شود (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹). برای این منظور در نرم‌افزارهای GPR، یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد به کار می‌رود که به واسطه آن اولین رویداد، موج مستقیم هوا را تشخیص دهند. به‌خاطر موفقیّت آمیز اولین رویداد باعث می‌شود که بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان به نمایش درآیند. بنابراین در نخستین مرحله پردازش با توجه به شکل ۴ و فاصله زمانی ایجاد شده تا پدیدار شدن دامنه سیگنال‌ها که در حدود ۱۰ نانوثانیه است، با جابه‌جایی زمانی به میزان مذکور در استفاده از پارامتر تصحیح ایستا (Static Correction) صفر زمانی رادارگرام را تصحیح می‌کنیم. به‌علت فواصل زمانی کوتاه بین تپ‌های ارسالی توسط فرستنده و تپ‌هایی که به‌صورت مستقیم از طریق هوا و



شکل ۴. مقطع اولیه به‌دست‌آمده از برداشت داده‌های ژئورادار با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز.

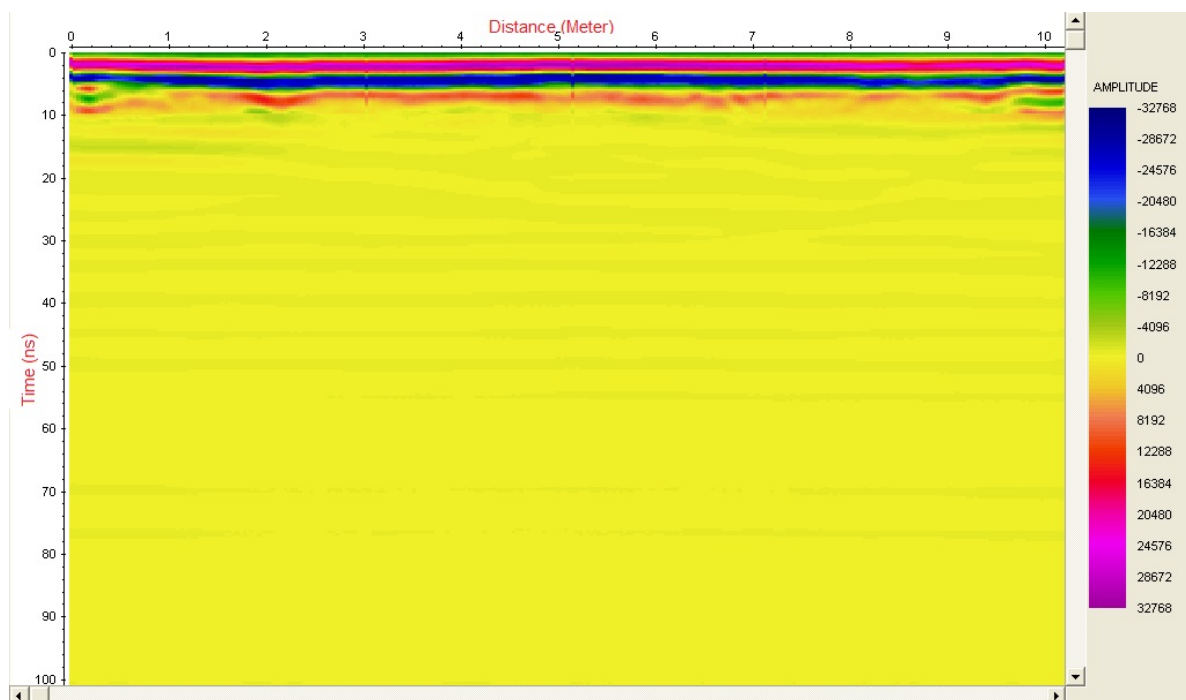
که برای بازسازی شکل بازتاب‌ها اعمال می‌گردد، می‌باشند (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۸۹). تابع عملگر بهره فوق با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$G(t) = (1 + at) e^{bt}, \quad (14)$$

که  $a$  مقدار بهره خطی و  $b$  پارامتر بهره نمایی برحسب دسی‌بل بر متر، و  $t$  بیانگر متغیر مستقل زمان برحسب نانوثانیه است. عملگر بهره خطی، به میزان ثابتی که کاربر تعریف می‌کند، دامنه تمام سیگنال‌های دریافتی را افزایش می‌دهد. از آنجایی که میرایی امواج الکترومغناطیسی به صورت تابع نمایی رخ می‌دهد، تابع بهره مذکور سعی در جبران میرایی، با افزایش دامنه سیگنال‌ها در جهت مقابل میرایی دارد. بهره مورد نظر در این مرحله، با مقدار ۳ دسی‌بل بر متر برای بهره نمایی و زمان رسیدن ۱۰ نانوثانیه برای شروع بهره و ضریب یک برای مقدار بهره خطی اعمال گردید.

میان محیط‌های گوناگون، توان‌های بازتاب متفاوتی دارند و هریک مقداری از سیگنال ورودی را بازتاب می‌کنند. برای حفظ اطلاعات مربوط به مرز مشترک‌ها که در برخی از کاربردها بسیار ارزشمند است، از انواع مختلف بهره که از جمله مهم‌ترین آنها بهره SEC است، استفاده می‌شود (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۸۹).

بنابراین مرحله بعد پردازش، استفاده از پارامتر بهره جبران گسترش خطی و نمایی است. این پارامتر پردازشی از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال در محیط استفاده می‌کند. بهره SEC با توجه به محدودیت‌هایی که کاربر تعریف می‌کند و با استفاده از اطلاعات مربوط به تضعیف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج GPR در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد. در استفاده از این بهره، متغیرهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می‌گیرد، بسیار اهمیت دارد. این متغیرها شامل میزان بهره خطی، بیشینه مقدار بهره و همچنین اتلاف امواج رادار در محیط



شکل ۵. مقطع داده‌های رادار پس از اعمال پارامترهای پردازشی اولیه.

است. این صافی، براساس انتخاب و میانگین گیری تعداد مشخصی از ردها و کاستن رد (تریس) میانگین از بخش مورد نظر پردازشگر در راستای محورهای زمان و جابه-جایی، سعی بر متمایز کردن هدف مورد نظر و افزایش کیفیت رادارگرام دارد. طبق رابطه (۱۵)، اگر  $P$  تعدادی مشخص از سیگنال‌ها و  $A_{B(z)}$  نشان‌دهنده دامنه رد میانگین باشد، آنگاه  $A_{BR}(x, y, z)$  دامنه ردهای زمینه یا به عبارتی میزان نوفه زمینه حذف شده از تمام سیگنال‌های انتخابی خواهد بود.

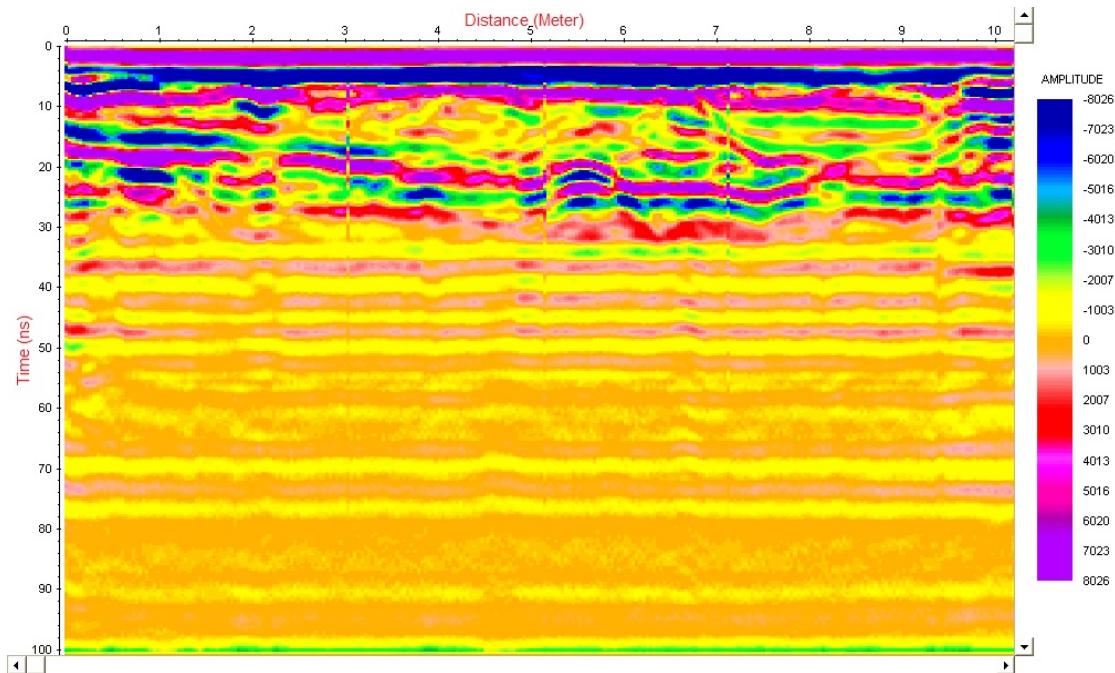
$$A_{B(z)} = \left(\frac{1}{P}\right) \sum_i^P A_i(x, y, z) \quad (15)$$

$$\rightarrow A_{BR}(x, y, z) = A(x, y, z) - A_{B(z)}$$

عملگر حذف زمینه، ابتدا با میانگین گیری از دامنه سیگنال براساس پنجره زمانی تعریف شده توسط کاربر و تفریق دامنه سیگنال‌ها از میانگین محاسبه شده، مقدار زمینه را مشخص می‌کند. سپس این مقدار نوفه از تمام سیگنال‌های موجود در ناحیه موردنظر پردازشگر برداشته

مرحله بعدی پردازش، محدود کردن پهنای نوار بسامدی است. در حذف نوفه‌های محیطی و سامان‌مند که دارای بسامدی متفاوت با بسامد سیگنال می‌باشند، معمولاً از صافی‌های حوزه بسامد استفاده می‌شود. این صافی‌ها سعی دارند یک نوار بسامدی خاص را از داده‌ها حذف کنند (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹). نکته شایان توجه در به‌کارگیری صافی‌های بسامدی، حفظ ویژگی‌های اصلی بازتاب‌های اولیه به‌دلیل حفظ انرژی در اطراف بسامد مرکزی آنتن مورد استفاده است. معمولاً بسامدهای قطع، به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نوارهای بسامدی یکسانی نسبت به بسامد مرکزی ایجاد کنند (دیویس و انان، ۱۹۸۹). در پردازش مقاطع رادار، معمولاً بسامدهای قطع به‌صورت تقریبی از یک‌چهارم تا یک‌دوم و دو برابر تا چهار برابر بسامد مرکزی آنتن اعمال می‌شوند. با انتخاب مقادیر ۷۰، ۱۳۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مگاهرتز، رادارگرام شکل ۶ حاصل خواهد شد.

درنهایت، برای افزایش کیفیت مقطع به‌دست آمده، از صافی دوبعدی حذف زمینه (Background) استفاده شده



شکل ۶. بهبود کیفیت مقطع ژئورادار پس از اعمال تابع بهره AGC و بسامد میان‌گذر.

در  $D = 0.5(30 \text{ ns} \times 0.09 \text{ m}(\text{ns})^{-1}) = 1.35 \text{ m}$  :  
 شکل ۷، علاوه بر محور زمان رسید، محور عمق و همچنین عمق نفوذ محاسبه شده و افزایش محسوس کیفیت رادار گرام در اثر به کارگیری پارامترهای پردازشی مناسب، کاملاً مشهود است.

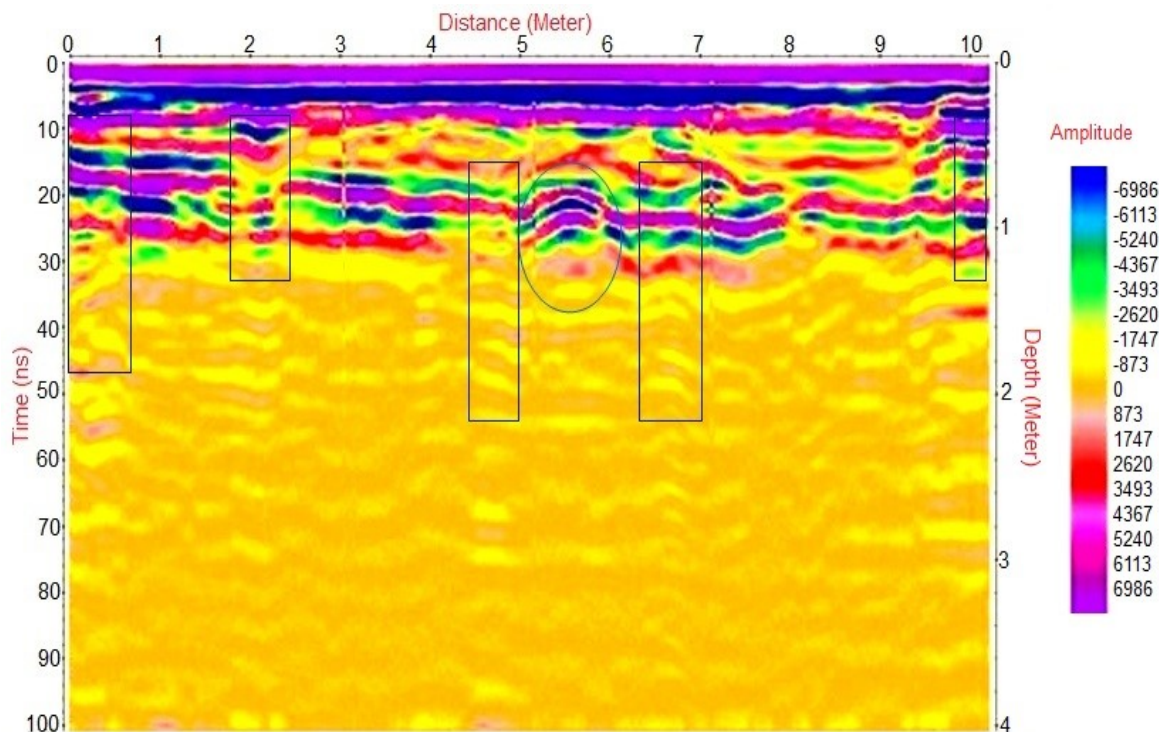
### ۳ تفسیر و نتیجه گیری

با توجه به رادار گرام پردازش شده نهایی، یک لایه با بازتاب شدید و ضخامت تقریبی  $0/3$  متر، در زمان‌رسیدهای صفر تا کمتر از  $10$  نانوثانیه دیده می‌شود. این پدیده را می‌توان به لایه خشک سطحی نسبت داد. در عمق بیشتر از  $0/3$  متر در زمان‌رسیدهای  $10$  تا  $30$  نانوثانیه یک لایه دیگر با شدت بازتاب‌های نسبتاً کمتر دیده می‌شود. حضور این پدیده را می‌توان به لایه مرطوب زیرین نسبت داد. نکته حائز اهمیت آن است که در اعماق بیش از  $1/5$  متر به دلیل میرایی شدید امواج هیچ سیگنالی

می‌شود. با حذف نوفه زمینه، تفکیک افقی بهتری در رادار گرام رخ خواهد داد (نیل، ۲۰۰۴). به عبارتی، انحنا و خمیدگی‌های اهداف مورد نظر در مقطع نمایان‌تر خواهند شد. در ادامه، برای تبدیل محور زمان رسید به عمق و هم چنین محاسبه عمق کاوش آنتن به کار گرفته شده از مقدار سرعت  $0/09$  متر بر نانوثانیه، که پیش‌تر محاسبه شد، استفاده می‌کنیم. عمق کاوش یا نفوذ ( $D$ ) با مشخص بودن دو عامل تعیین می‌شود. عامل اول سرعت موج در ماده ( $V_m$ ) و عامل دوم زمان سیر موج در مسیر رفت و برگشت ( $T$ ) است که از نمایش گرافیکی سیگنال‌های GPR به دست می‌آید و در این مورد با توجه به شکل ۵ تقریباً برابر با  $30$  نانوثانیه است. موارد فوق با رابطه زیر:

$$D = \frac{1}{2} (T V_m), \quad (16)$$

نمایش داده می‌شود که برطبق آن عمق نفوذ برابر است با



شکل ۷. به کارگیری صافی حذف زمینه و چگونگی تأثیر آن بر رادار گرام.

این‌گونه نیستند. پدیدار شدن چنین نوفه‌هایی در آغاز حرکت و یا به دلیل تغییر جهت ناگهانی آنتن از مسیر پروفیل‌زنی اتفاق رایجی است. در بسیاری از مواقع می‌توان با تکرار پروفیل‌زنی و همچنین در جهت‌های معکوس، اثر این نوفه‌ها را کاهش داد.

در این مطالعه ابتدا با توجه به شرایط حاکم، یک مدل‌سازی بر اساس روش تفاضل متناهی طراحی و اجرا گردید. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی پیشرو و رادارگرام نهایی نشان از تطابق نسبتاً بالا و مناسبی دارد. در برون‌داد مدل، لایه سطحی خاک خشک با حضور بازتاب قوی لایه‌ای مشاهده می‌شود. انتظار می‌رود لایه مذکور در رادارگرام داده‌های واقعی نیز به‌خوبی پدیدار شود. با توجه به رادارگرام نهایی شکل ۷، لایه مذکور با همان دامنه بالای بازتابی به‌خوبی مشاهده می‌شود. آنچه در زمان-رسیده‌های بیشتر در برون‌داد مدل دیده می‌شود، شامل بازتاب‌های ضعیف‌تری در لایه زیر خاک خشک سطحی و بالای نیم‌دایره فوقانی گالری قنات، مرز خاک-هوای بالای قنات، و همچنین ناحیه مرطوب بالای قنات است. در رادارگرام نهایی، همان‌گونه که در تفسیر بیان شد، لایه مرطوب بالای گالری قنات با بازتاب‌های نسبتاً ضعیف‌تر و همچنین نواحی اطراف آن با دامنه‌های بازتابی نسبتاً بیشتری قابل مشاهده است. مرز خاک-هوای بالای قنات اگرچه نه به‌وضوح آنچه در مدل پدیدار گشته است، اما با اندکی دقت نمایان و قابل تشخیص است. همان‌گونه که از نتایج حاصله از برون‌داد مدل انتظار می‌رفت، در رادارگرام داده‌های واقعی، امکان مشاهده مرز هوای قنات-آب و یا کف قنات وجود ندارد. با توجه به دامنه بازتاب‌ها در اعماق بیشتر از ۱/۵ متر و عمق نفوذ و محدوده میرایی امواج در رادارگرام نهایی، همخوانی بسیار مناسبی با محاسبات و آنچه در برون‌داد مدل پدیدار گشته است، وجود دارد. نکته جالب توجه، عدم پدیدار شدن نوفه‌ها و پراش‌های نقطه‌ای در برون‌داد مدل است.

دریافت نشده است. با توجه به شکل بازتاب‌ها، پدیده‌ای که در فاصله ۶-۵ متری پروفیل و در عمق تقریبی ۰/۷ متری دیده می‌شود را می‌توان به مرز خاک مرطوب و هوای بالای قنات نسبت داد. در هنگام عبور آنتن از روی گالری قنات، امکان وقوع پدیده پراش امواج در دیواره‌های کناری وجود دارد، چراکه امواج الکترومغناطیسی به‌صورت یک جبهه مخروطی از آنتن فرستنده گسیل می‌شوند. سطح برخورد این مخروط با دیواره‌های کناری گالری قنات، همانند یک بی‌هنجاری نقطه‌ای منجر به رخ دادن پدیده پراش خواهد شد. از این رو پدیده‌های مشاهده‌شده در فواصل ۴/۵ و ۶/۵ متری پروفیل با توجه به موقعیت‌هایشان نسبت به گالری قنات، به پدیده پراش نقطه‌ای نسبت داده می‌شوند. هذلولی‌های پراش که از اهداف نقطه‌ای روی سطح زمین ناشی می‌شوند، برون‌راند کمتری نسبت به هذلولی‌های زیرسطحی دارند. از این رو معمولاً با استفاده از تصحیح برون‌راند نرمال یا اصطلاحاً کوچ (Migration)، می‌توان آنها را از سایر پدیده‌ها تشخیص داد (سان و یونگ، ۱۹۹۵). در بسیاری از مواقع، نمایش پردازش فوق بر روی رادارگرام ممکن است به حذف بخشی از اطلاعات مهم در نمایش گرافیکی منجر شود، در این مواقع استفاده از مهاجرت تنها جنبه تشخیصی برای تفسیر داشته و در رادارگرام نهایی نمایش داده نمی‌شود. با توجه به توضیحات فوق، پدیده مشاهده‌شده در فاصله حدوداً ۲ متری از ابتدای پروفیل که از زمان‌رسید ۱۰ نانوثانیه آغاز گردیده است، نیز می‌تواند به پراش امواج از یک توده سطحی نسبت داده شود. پدیده‌های مشخص‌شده در ابتدا و انتهای پروفیل که از سطح آغاز می‌شوند نشان‌دهنده حضور نوفه‌های تصادفی هستند. یکی از روش‌های تشخیص این نوع از نوفه‌ها توجه به این نکته است که معمولاً در حالت نمایش داده‌ها به‌صورت رد به رد (wiggle mode)، این پدیده‌ها تنها بر روی تک‌رد قرار می‌گیرند، درحالی‌که بازتاب‌های واقعی

روش‌های GPR و مقاومت ویژه: یک مطالعه  
موردی: مجله علوم زمین، ۸۰، ۱۷۰-۱۶۳.

- Alford, R. M., Kelly, K. R., and Boore, D. M., 1974, Accuracy of finite difference modeling of the acoustic wave equation: *Geophysics*, **39**, 834-842.
- Arft, C. M., and Knoesen, A., 2004, An efficient finite-difference frequency-domain method including thin layers: *Microwave and Optical Technology Letters*, **43**(1), 40 - 44 .
- Bano, M., 1996, Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves: *Geophys. J. Int.*, **124**, 279-288.
- Bitri, A. and Grandjean, G., 1998, Frequency-wave number modeling and migration of 2D GPR data in moderately heterogeneous dispersive media: *Geophysical Prospecting*, **46**, 287-301.
- Chen, H. W., and Huang, T. M., 1998, Finite-difference time-domain simulation of GPR data: *J. Applied Geophysics*, **40**, 139-163.
- Conyers, B. L., 2004, *Ground Penetrating Radar for Archaeology*: Altamira Press.
- Daniels, D. J., 2004: *Ground Penetrating Radar*: The Institution of Electrical Engineers Press.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989, Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospecting*, **3**, 531-551.
- Khaidukov, V., Landa, E., and Moser, J., 2004, Diffraction imaging by focusing-defocusing: An outlook on seismic superresolution: *Geophysics*, **69**(6), 1478-1490.
- Nabighian, M. N., 1991, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics — Theory*, Vol. 1: SEG Publication, Tulsa, OK, 513 pp.
- Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress: *Earth Science Reviews*, **66**, 261-330
- Parasnis, D. S., 1997, *Principles of Applied Geophysics*: Chapman & Hall, London, 420 pp.
- Radzevicius, S. J., Guy, D. E., and Daniels, A. J., 2000, Pitfalls in GPR data interpretation: Differentiating stratigraphy and buried objects from periodic antennae and target effects: *Geophysics Research Letters*, **27**, 3393-3396.
- Reynolds JM (1997): *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. - Wiley, pp.796.

در صورتی که، برخی از پدیده‌های رادارگرام داده‌های واقعی به‌عنوان نوفه و پراش شناسایی شدند. همچنین با توجه به در نظر نگرفتن فاصله آنتن‌ها از هم و از سطح زمین در طراحی مدل، جابه‌جایی صفر زمانی رخ داده در رادارگرام خام شکل ۴ در برون‌داد مدل پدیدار نگشت. لازم به ذکر است که گالری قنات مورد نظر در عمق نسبتاً کمی واقع گردیده و مظهر قنات در فاصله کمتر از دو متری محل پروفیل قابل مشاهده است و برای اطمینان بیشتر، عمق گالری قنات به وسیله یک سونداژ یک متری اندازه‌گیری شد. از این رو در صحت محل به دست آمده گالری قنات با توجه به مظهر آن تردیدی نیست. می‌توان گفت نتایج حاصل از این پژوهش، توانایی روش GPR و سودمندی مدل‌سازی پیش‌رو در مکان‌یابی قنات و مطالعات مشابه را ثابت کرد. اما با این حال، پیشنهاد می‌شود در مطالعه و اکتشاف قنات‌ها، در کنار روش GPR از دیگر روش‌های مکمل ژئوفیزیکی هم استفاده شود.

#### منابع

- اسحاقی، ا.، کامکار روحانی، ا.، و عرب‌امیری، ع.، ۱۳۹۲، مقایسه و تلفیق نتایج پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های توموگرافی الکتریکی و GPR برای شناسایی اهداف و ساختارهای زیرسطحی کم‌ژرفا: مجله علوم زمین، ۹۲، ۱۰-۳.
- کامکار روحانی، ا.، اسحاقی، ا.، و عرب‌امیری، ع.، ۱۳۹۱، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم‌عمق: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۴)، ۱۷۳-۱۵۵.
- محمدی ویژه، م.، و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی ساختارهای مدفون نزدیک سطح زمین با استفاده از

- Companion book: Dielectric materials and applications, pp. 276–277.
- Tzanis, A., 2010, MatGPR Release 2: A freeware MATLAB package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data: *Fast Times*, **15**(1), 17–43.
- Zeng, X., McMechan, G. A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes: *Geophysics*, **62**, 798–806.
- Reflexw Project: for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data  
[www.sandmeier-geo.de](http://www.sandmeier-geo.de)
- Sun, J., and Young, R. A., 1995, Recognizing surface scattering in ground-penetrating radar data: *Geophysics*, **60**, 1378–1385.
- Sensors and software, 1999, Ground Penetrating Radar Survey Design.
- Sensors and software, 1999, Pulse EKKO 100 RUN User's Guide, Version 1.2.
- Sensors and software, 1999, Win\_EKKO User's Guide, Version 1.0.
- Van Overmeeren, R. A., 1994, Georadar for hydrogeology: *First Break*, **8**, 401–408
- Von Hippel, A. R., 1954, *Dielectric and Waves*: Chapman & Hall, Wiley, New York, 284 pp.