

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

مدل سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR و بررسی نتایج در چند مورد مطالعاتی

دانشجو: افسانه احمدپور

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکارروحانی

دکتر ایرج پیروز

اساتید مشاور:

مهندس سعید پرنو

دکتر رضا احمدی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم افسانه احمدپور

تحت عنوان: مدل سازی پیشرو و وارون داده های GPR و بررسی نتایج در چند مورد مطالعاتی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : مهندس سعید پرنو		نام و نام خانوادگی : دکتر ابوالقاسم کامکارروحانی
	نام و نام خانوادگی : دکتر رضا احمدی		نام و نام خانوادگی : دکتر ایرج پیروز

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر سوسن ابراهیمی		نام و نام خانوادگی : دکتر امین روشندل کاهو
			نام و نام خانوادگی : دکتر مهرداد سلیمانی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تفہیم بہ

حسدی کہ آفرید

جہن ان ان را عقل را علم را معرفت را عشق را

کہ بی که عشق را در وجود آمد

فخرا چہ چہ اید و دایم

تقدیر و تشکر

شکر و سپاس خدا را که بزرگ‌ترین امید و یاور در لحظه لحظه زندگیست.

نگارنده بر خود لازم می‌داند که از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه پیوسته راهنمای من بودند، تشکر و قدردانی نماید. از استاد ارجمند جناب آقای دکتر ایرج پیروز که در تعلیم روش‌های تحقیق اینجانب را تعلیم دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از جناب آقای مهندس سعید پرنو که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را متحمل شدند، صمیمانه تشکر می‌کنم. از جناب آقای دکتر رضا احمدی که با سعه صدر مشاوره این تحقیق را پذیرفتند و در طول نگارش این مجموعه همواره از نظرات کارشناسانه ایشان، بهره جستیم، صمیمانه سپاس گزارم. از جناب آقای علی شهنما که در کدنویسی این مجموعه من را یاری فرمودند نهایت تشکر را دارم. سپاس آخر را به مهربانترین همراهان زندگی‌م، تقدیم می‌کنم که حضورشان در فضای زندگی‌م مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب افسانه احمدپور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی پیشرو و وارون داده های GPR و بررسی نتایج در چند مورد مطالعاتی تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر ایرج پیروز و مشاوره مهندس سعید پرنو و دکتر رضا احمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در میان روش‌های ژئوفیزیکی متداول، روش رادار نفوذی به زمین (GPR) قادر به آشکارسازی انواع ناهمگنی‌های زیرسطحی و نیز شناسایی انواع اهداف مدفون در اعماق کم می‌باشد. در این رابطه مدل-سازی داده‌های GPR برای تفسیر و شناسایی این اهداف اهمیت به‌سزایی دارد. هدف از این پایان‌نامه، مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR و بررسی نتایج در چند مورد مطالعاتی است. با توجه به این‌که هر روش مدل‌سازی وارون به برنامه مدل‌سازی پیشرو مناسب جهت محاسبه پاسخ مدل در نقاط و فرکانس‌های مورد نظر، به عنوان هسته اصلی نیاز دارد، قبل از انجام مدل‌سازی وارون، ابتدا تلاش شد تا نقاط ضعف و قوت هر یک از نرم‌افزارهای موجود برای مدل‌سازی پیشرو داده‌های الکترومغناطیسی فرکانس بالا شناسایی شود. بنابراین در این پژوهش، قابلیت، کارایی و سرعت محاسبه نرم‌افزارها با لحاظ مدل‌های مختلف زمینی، مورد بررسی و آزمون قرار گرفته است. سپس بر اساس ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی اهداف زیرزمینی مورد نظر در برداشتهای صحرائی، مدل‌های مصنوعی آن‌ها متشکل از محیط زمین لایه‌ای و اهداف زیرزمینی مصنوعی متداول تهیه شده و پاسخ GPR دوبعدی آن‌ها به روش مدل‌سازی پیشرو با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف، به دست آمده و در نهایت این پاسخ‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. هدف از وارون‌سازی، مشخص کردن مدلی از زمین است که مشاهدات ما را به بهترین وجه تشریح نماید. در این پژوهش سعی بر آن است تا از روش مدل‌سازی وارون برای تعبیر و تفسیر برداشتهای صحرائی GPR به منظور آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون استفاده شود. بدین منظور ابتدا با استفاده از الگوریتمی مؤثر و با انجام کدنویسی در محیط GUI نرم‌افزار MATLAB، برنامه‌ای قابل اعتماد و دقیق برای انجام مدل‌سازی وارون تهیه شده است. در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی رفتار حاکم بر انتشار امواج الکترومغناطیسی (EM) در روش GPR از میان روش‌های عددی مختلف، روش تفاضل محدود دو بعدی، مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت‌های اصلی این روش، درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، دقت بالا و اجرای ساده آن برای مدل‌های پیچیده دلخواه است و به راحتی می‌توان تنظیمات آنتن را در آن اعمال نمود.

در این پژوهش برداشت داده‌های صحرایی بر روی سطح زمین و مدل‌سازی‌های مصنوعی، با استفاده از روش مد TM انجام شده است. نگاشت‌های راداری داده‌های GPR نیز بعد از پردازش‌های لازم، توسط نرم‌افزار Reflexw به نمایش درآمده است. نتایج به‌دست آمده نشان دهنده بالا بودن خطاهای به‌دست آمده از مدل‌سازی وارون داده‌های صحرایی GPR است که علل آن را می‌توان وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی پیشرو و عدم امکان انجام مدل‌سازی پیشرو، دقیقاً مطابق با مدل‌های واقعی (به‌دلیل پیچیدگی‌های طبیعت زمین)، در نظر گرفتن شرایط همگن و کاملاً یکنواخت برای مدل‌سازی محیط میزبان و اهداف مدفون در محیط با وجود متنوع بودن زمین، متفاوت بودن مقادیر ویژگی‌های الکتریکی از سطح زمین تا عمق مشخص و هم‌چنین وجود انواع نوفه‌ها در مدل واقعی زمین و دیگر عوامل برشمرد.

واژگان کلیدی: رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی پیشرو، مدل‌سازی وارون، روش تفاضل محدود، پردازش

مقالات مستخرج از پایان نامه

❖ احمدپور ا، کامکار روحانی ا، پیروز ا، پرنو س، (۱۳۹۴)، "بررسی عوامل مؤثر در بازتاب امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا با استفاده از مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به روش تفاضل محدود در حوزه زمان"، هفتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، ۱۸ و ۱۹ شهریورماه ۱۳۹۴، دانشگاه دامغان

❖ احمدپور ا، کامکار روحانی ا، پیروز ا، پرنو س، (۱۳۹۴)، "مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به روش تفاضل محدود"، دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، ۲۲ و ۲۳ مهرماه ۱۳۹۴، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم

❖ احمدپور ا، کامکار روحانی ا، پیروز ا، پرنو س و احمدی ر، (۱۳۹۴)، "مدل‌سازی پیشرو داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) اجسام استوانه‌ای شکل مدفون در زیر سطح زمین"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، ۱۶ و ۱۷ دی ماه، تهران

❖ احمدپور ا، کامکار روحانی ا، پیروز ا، پرنو س و احمدی ر، (۱۳۹۴)، "مدل‌سازی داده‌های GPR با استفاده از روش FDTD و تفسیر نتایج در یک مطالعه موردی"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، ۱۶ و ۱۷ دی ماه، تهران

فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

فصل اول کلیات

۱-۱- تعریف مسئله.....	۲
۲-۱- سابقه انجام تحقیق.....	۳
۳-۱- اهداف تحقیق.....	۷
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۷
۵-۱- ابزار تحقیق.....	۸
۶-۱- ساختار پایان نامه.....	۸

فصل دوم مبانی نظری و فیزیکی روش GPR

۱-۲- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- دستگاه‌های GPR.....	۱۲
۳-۲- مبانی فیزیکی روش GPR.....	۱۴
۴-۲- برداشت داده‌های GPR و انواع روش‌های آن.....	۱۵
۵-۲- انواع امواج منتشره در روش GPR.....	۱۶
۶-۲- نمایش داده‌های GPR.....	۱۷
۷-۲- خواص مواد.....	۱۸
۱-۷-۲- گذردهی الکتریکی.....	۱۸
۲-۷-۲- رسانندگی الکتریکی.....	۱۹
۳-۷-۲- تراوایی مغناطیسی.....	۱۹
۸-۲- انتشار، سرعت و جذب امواج GPR در زمین.....	۲۰
۹-۲- قدرت تفکیک و عمق نفوذ امواج GPR.....	۲۱
۱۰-۲- مرز محیط‌ها و نحوه سیر امواج الکترومغناطیسی.....	۲۲

فصل سوم پردازش و تفسیر داده‌های GPR

۱-۳- مقدمه.....	۲۶
۲-۳- گام‌های پردازش اولیه داده‌های GPR.....	۲۷
۳-۳- فیلتر DEWOW.....	۲۸
۴-۳- تصحیح زمان - صفر.....	۳۰
۵-۳- بهره زمانی.....	۳۰
۱-۵-۳- بهره SEC.....	۳۱

- ۳-۶- فیلترینگ ۳۳
- ۳-۷- سایر روش‌های پردازشی ۴۰

فصل چهارم روش مدل‌سازی عددی تفاضل محدود

- ۴-۱- مقدمه ۴۲
- ۴-۲- پایه و اساس رویکرد مدل‌سازی تفاضل محدود ۴۳
- ۴-۳- ساختار روش تفاضل محدود ۴۳
- ۴-۴- توسعه روش FDTD ۴۵
- ۴-۵- اصول روش FDTD ۴۶
- ۴-۶- معادلات الگوریتم بی‌مبتنی بر روش FDTD ۴۷
- ۴-۶-۱- روش FDTD در حالت دو بعدی ۵۲
- ۴-۶-۱-۱- مد انتشاری TMZ ۵۲
- ۴-۶-۱-۲- مد انتشاری TEZ ۵۳
- ۴-۶-۲- معرفی نماد گذاری به کاررفته ۵۳
- ۴-۶-۳- روابط تفاضل محدود برای معادلات ماکسول در سه بعد ۵۴
- ۴-۷- شرایط مرزی در محیط شبیه‌سازی در روش FDTD ۵۷

فصل پنجم شبیه‌سازی پاسخ مدل‌های مصنوعی

- ۵-۱- مقدمه ۶۰
- ۵-۲- مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR برای مدل زمین لایه‌ای ۶۰
- ۵-۳- بررسی تأثیر تغییرات توأم گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی بر روی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای ۶۱
- ۵-۴- بررسی تأثیر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی مواد بر روی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای ۶۲
- ۵-۴-۱- بررسی پاسخ مصنوعی GPR به تغییرات گذردهی دی‌الکتریک ۶۳
- ۵-۴-۲- بررسی پاسخ مصنوعی GPR به تغییرات تراوایی مغناطیسی ۶۴
- ۵-۴-۳- بررسی پاسخ مصنوعی GPR به تغییرات رسانندگی الکتریکی ۶۵
- ۵-۵- مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR برای مدل مصنوعی ناودیس ۶۷
- ۵-۶- مدل‌سازی پاسخ GPR برای مدل‌های حاوی اجسام استوانه‌ای مدفون ۶۸
- ۵-۷- مدل‌سازی پاسخ GPR فضاهای خالی و میلگردهای فولادی ۶۹
- ۵-۷-۱- مثال اول ۷۰
- ۵-۷-۲- مثال دوم ۷۱
- ۵-۷-۳- مثال سوم ۷۴
- ۵-۷-۴- مثال چهارم ۷۵
- ۵-۸- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف روی پاسخ GPR مربوط به اجسام استوانه‌ای ۷۶
- ۵-۸-۱- بررسی تأثیر جنس دیواره هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR ۷۷

۷۹.....	۵-۸-۲- بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR
۸۳.....	۵-۸-۳- بررسی تأثیر قطر و عمق بر شکل پاسخ.....
۸۵.....	۵-۸-۴- بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان روی پاسخ GPR
۸۶.....	۵-۸-۴-۱- بررسی تأثیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان روی پاسخ GPR
۸۶.....	۵-۸-۴-۲- بررسی تأثیر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان روی پاسخ GPR
۸۹.....	۵-۹- مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR برای استوانه افقی جفت
۹۰.....	۵-۱۰- بررسی عامل شکل هندسی هدف روی پاسخ GPR.....

فصل ششم پردازش و مدل‌سازی داده‌های صحرائی

۹۴.....	۶-۱- مقدمه
۹۵.....	۶-۲- برداشت داده‌های صحرائی
۹۵.....	۶-۲-۱- محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود
۹۵.....	۶-۲-۱-۱- منطقه برداشت داده‌ها
۹۵.....	۶-۲-۱-۲- برداشت داده‌های GPR
۹۶.....	۶-۲-۱-۳- پردازش داده‌های GPR
۹۸.....	۶-۲-۱-۴- تفسیر داده‌های GPR.....
۹۸.....	۶-۲-۲- منطقه تپه حصار دامغان
۹۸.....	۶-۲-۲-۱- معرفی منطقه برداشت
۹۹.....	۶-۲-۲-۲- برداشت داده‌های GPR
۹۹.....	۶-۲-۲-۳- پردازش داده‌های GPR
۱۰۱.....	۶-۲-۲-۴- تفسیر.....
۱۰۲.....	۶-۲-۳- منطقه یخچال علم کوه مازندران
۱۰۲.....	۶-۲-۳-۱- برداشت داده‌های GPR
۱۰۳.....	۶-۲-۳-۲- پردازش داده‌های GPR
۱۰۶.....	۶-۲-۳-۴- تفسیر.....
۱۰۶.....	۶-۳- مدل‌سازی دو بعدی پیشرو به روش تفاضل محدود در حوزه زمان
۱۰۷.....	۶-۳-۱- بررسی نتایج.....
۱۱۹.....	۶-۵- مدل‌سازی وارون
۱۲۵.....	۶-۶- جمع‌بندی

فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۲۸.....	۷-۱- نتیجه‌گیری
۱۳۱.....	۷-۲- پیشنهادات
۱۳۲.....	منابع

فهرست اشکال

عنوان.....	صفحه
شکل ۱-۲: معرفی اجزاء دستگاه GPR و نمایش بعضی از کاربردهای متداول روش GPR.....	۱۳
شکل ۲-۲: نمایش سه شیوه اساسی عملیات برداشت GPR.....	۱۶
شکل ۳-۲: نمایش امواج مختلف منتشره و دریافتی در روش GPR.....	۱۶
شکل ۲-۴-الف: برداشت داده‌های GPR بر روی یک هدف مدفون و ب: مقطع بازتابی GPR با رخداد تولید شده به صورت یک شبه هذلولی حاصل از پاسخ GPR شیء یا هدف مدفون.....	۱۷
شکل ۲-۵: انتشار امواج و دریافت پاسخ آن‌ها.....	۲۰
شکل ۲-۶: میدان برداری امواج الکترومغناطیس به دو جزء مستقل تفکیک می‌شوند. برای هر جهت انتشار دلخواه دو مد میدان مستقل وجود دارد. یکی مد میدان الکتریکی عرضی (TE) و دیگری مد میدان مغناطیسی عرضی (TM).....	۲۴
شکل ۳-۱: توالی پردازش نوعی برای داده‌های GPR روش بازتابی فاصله ثابت دو بعدی.....	۲۸
شکل ۳-۲: اعمال فیلتر DEWOW بر روی تریس‌های خام GPR.....	۲۹
شکل ۳-۳: اثر WOW بر داده‌های GPR (سمت چپ). مشخص بودن بازتاب‌ها بعد از اعمال این فیلتر (سمت راست).....	۲۹
شکل ۳-۴: نمایش اثر تصحیح زمان - صفر.....	۳۰
شکل ۳-۵: مفهوم بهره متغیر با زمان، که میزان تقویت سیگنال با زمان تغییر می‌کند.....	۳۱
شکل ۳-۶: نمایش داده‌های خام، بهره نمایی SEC و داده‌های نهایی بعد از اعمال بهره SEC.....	۳۲
شکل ۳-۷: نمایش نحوه عملکرد بهره AGC که با شدت داده‌های ورودی رابطه عکس دارد.....	۳۳
شکل ۳-۸: نمایش کاربرد بهره زمانی.....	۳۴
شکل ۳-۹: اصول یک فیلتر ساده میان‌گذر در حوزه فرکانس و دو شکل از توابع رایج فیلتر: فیلتر ناچ و فیلتر باترورث.....	۳۶
شکل ۳-۱۰: نمایش کاربرد فیلتر حذف زمینه.....	۳۸
شکل ۳-۱۱: یک رویداد ثبت شده بر روی تریس‌های بازتاب یافته می‌تواند از هر کجای مخروط باشد. در یک مقطع مهاجرت نیافته GPR، رویدادها مستقیماً به زیر فرستنده - گیرنده نسبت داده می‌شود.....	۳۹
شکل ۳-۱۲: نمایش کاربرد پردازش مهاجرت.....	۳۹
شکل ۴-۱: تخمین مشتقات $F(X)$ در نقطه P به وسیله روش تفاضل محدود پیشرو، پسرو (برگشتی) و میانی (مرکزی).....	۴۴
شکل ۴-۲: سلول واحد یی به همراه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی.....	۵۰
شکل ۴-۳: نمایش آرایش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و آرایش زمانی جهش قورباغه‌ای در حالت یک بعدی.....	۵۰

- شکل ۵-۱: بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ها، بر روی پاسخ GPR، برای یک مدل زمین سه لایه‌ای، با ثابت ماندن شرایط دیگر ۶۱
- شکل ۵-۲: بررسی تأثیر تغییرات توأم گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی بر روی پاسخ GPR، برای دو مدل زمین لایه‌ای ۶۳
- شکل ۵-۳: پارامترهای فیزیکی و هندسی یک مدل زمین لایه‌ای (سمت چپ) و پاسخ امواج GPR به صورت یک تریس نمایش داده شده است (سمت راست). در این مقطع گذردهی الکتریکی لایه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است. ۶۴
- شکل ۵-۴: پارامترهای فیزیکی و هندسی یک مدل زمین لایه‌ای (سمت چپ) و پاسخ امواج GPR به صورت یک تریس نمایش داده شده است (سمت راست). در این مقطع تراوایی مغناطیسی لایه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است. ۶۵
- شکل ۵-۵: پارامترهای فیزیکی و هندسی یک مدل زمین لایه‌ای (سمت چپ) و پاسخ امواج GPR به صورت یک تریس نمایش داده شده است (سمت راست). در این مقطع رسانندگی لایه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است ۶۶
- شکل ۵-۶: مدل مصنوعی برای نمایش یک ناودیس ۶۷
- شکل ۵-۷-الف: مقطع شبیه‌سازی شده‌ی GPR شکل ۵-۶ و ب) همان مقطع قسمت الف بعد از اعمال پردازش مهاجرت ۶۸
- شکل ۵-۸-الف: نمایش الگووار نحوه تشکیل هذلولی ناشی از یک لوله مدفون در مقطع GPR ۶۹
- شکل ۵-۹-الف: پاسخ شبیه‌سازی شده GPR و ب: مدل هندسی لوله فلزی مدفون در لایه بتنی ۷۱
- شکل ۵-۱۰-الف: پاسخ شبیه‌سازی شده GPR و ب: مدل هندسی میله‌های فولادی با اندازه‌های مختلف جاسازی شده درون لایه بتنی همراه با استوانه‌های توخالی ۷۲
- شکل ۵-۱۱: نمایش قطبیت معکوس برای تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف استوانه توخالی (رنگ آبی) و میلگرد فلزی مدفون (رنگ قرمز). ۷۳
- شکل ۵-۱۲-الف: پاسخ شبیه‌سازی GPR و ب: مدل هندسی یک سری از میله‌های فولادی جاسازی شده درون بتن و حضور فضای خالی به شکل مربع درون ماسه مرطوب در زیر بتن ۷۵
- شکل ۵-۱۳-الف: پاسخ شبیه‌سازی GPR و ب: مدل هندسی یک سری از میله‌های فولادی جاسازی شده درون بتن و حضور فضای خالی با اشکال مختلف درون ماسه مرطوب در زیر بتن ۷۶
- شکل ۵-۱۴: مقایسه پاسخ‌های GPR سه هدف استوانه‌ای تو خالی (هوا) با جنس‌های مختلف ۷۹
- شکل ۵-۱۵: بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای روی پاسخ GPR ۸۰
- شکل ۵-۱۶: بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای پر شده از آب شور روی پاسخ GPR ۸۱
- شکل ۵-۱۷: نمایش قطبیت معکوس برای تریس‌های میانی پاسخ‌های دو مدل ۱۷ (رنگ قرمز) و ۱۹ (رنگ آبی). ۸۲
- شکل ۵-۱۸: بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای روی پاسخ GPR. مدل ۲۰: استوانه تو خالی، مدل ۲۱: استوانه پر از آب شیرین و مدل ۲۲: استوانه پر از آب شور و محیط میزبان خاک رس مرطوب است. ۸۳
- شکل ۵-۱۹: مقایسه تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ در عمق ثابت ۱ متر ۸۴

- شکل ۵-۲۰: مقایسه تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ در عمق ثابت ۱/۵ متر ۸۴
- شکل ۵-۲۱: مقایسه تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ در عمق ثابت ۲ متر ۸۵
- شکل ۵-۲۲: بررسی تأثیر گذردهی دی الکتریک نسبی محیط میزبان روی پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای ۸۷
- شکل ۵-۲۳: بررسی تأثیر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان روی پاسخ GPR دو هدف استوانه‌ای ۸۸
- شکل ۵-۲۴: بررسی تأثیر فاصله بین مراکز دو استوانه تو خالی به قطر یک متر بر روی پاسخ GPR ۹۰
- شکل ۵-۲۵: بررسی تأثیر ابعاد منشور دو بعدی تو خالی بر روی پاسخ GPR ۹۰
- شکل ۶-۱: مقطع داده‌های خام برداشت شده در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود ۹۶
- شکل ۶-۲: مقطع شکل ۶-۱ بعد از اعمال فیلتر DEWOW ۹۷
- شکل ۶-۳: مقطع پردازش یافته پروفیل مذکور بعد از تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک و تابع تقویت ۹۸
- شکل ۶-۴: مقطع خام داده‌های برداشت شده در منطقه تپه حصار دامغان ۱۰۰
- شکل ۶-۵: مقطع پردازش شده نگاشت راداری بعد از اعمال تصحیح اشباع سیگنال و تصحیح زمان - صفر ۱۰۰
- شکل ۶-۶: مقطع پردازش یافته نهایی بعد از به‌کارگیری فیلترهای میان‌گذر، بردارنده زمینه و بهره AGC ۱۰۱
- شکل ۶-۷: مقطع اولیه داده‌های برداشت شده در منطقه علم‌کوه ۱۰۳
- شکل ۶-۸: مقطع پردازش شده بعد از تصحیح ایستا و اشباع سیگنال ۱۰۴
- شکل ۶-۹: مقطع عمقی و زمانی داده‌های GPR بعد از به‌کارگیری بهره ترکیبی خطی و نمایی ۱۰۴
- شکل ۶-۱۰: مقطع زمانی و عمقی پروفیل برداشت شده بعد از پردازش‌های تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک، تابع تقویت (SEC)، مهاجرت F-K و تصحیح توپوگرافی ۱۰۵
- شکل ۶-۱۱: مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی در قسمت پایین شکل و پاسخ‌های سیستم GPR در قسمت بالای شکل (مقطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار REFLEXW در سمت راست و مقطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار GPRMAX2D در سمت چپ) ۱۰۸
- شکل ۶-۱۲: مدل فیزیکی و هندسی مدل شامل توده چند ضلعی در قسمت پایین و پاسخ سامانه GPR آن در بالای شکل (سمت راست مربوط به نرم‌افزار GPRMAX2D و سمت چپ مربوط به نرم‌افزار REFLEXW) ۱۰۹
- شکل ۶-۱۳ الف: مقطع شبیه‌سازی شده GPR لایه‌های یخچال علم‌کوه در نرم‌افزار REFLEXW و ب: همان مقطع قسمت الف بعد از اعمال پردازش مهاجرت. مدل فیزیکی و هندسی مقطع جدول ۶-۲ در پایین شکل است ۱۱۲
- شکل ۶-۱۴: پاسخ GPR شبیه‌سازی شده مدل نظیر منطقه یخچال علم‌کوه ۱۱۲
- شکل ۶-۱۵: مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای شکل (تفکیک‌پذیری بالا در سمت راست و تفکیک‌پذیری پایین در سمت چپ) ۱۱۵

- شکل ۶-۱۶: مدل فیزیکی و هندسی شامل چندضلعی دوبعدی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای شکل (تفکیک پذیری بالا در سمت راست و تفکیک پذیری پایین در سمت چپ)..... ۱۱۶
- شکل ۶-۱۷: مدل فیزیکی و هندسی شامل چندضلعی دوبعدی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای شکل ۱۱۸
- شکل ۶-۱۸: مدل فیزیکی و هندسی لایه‌های یخچال علم‌کوه وب: پاسخ سامانه GPR شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار GPRMAX2D ۱۱۸
- شکل ۶-۱۹: نمودار جریان الگوریتم مدل‌سازی وارون داده‌های رادار نفوذی به زمین ۱۲۱
- شکل ۶-۲۰: مدل زمین با بیش‌ترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرائی در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود همراه با میزان خطای به‌دست آمده. ۱۲۲
- شکل ۶-۲۱: مدل زمین با بیش‌ترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرائی در منطقه تپه حصار دامغان همراه با میزان خطای به‌دست آمده. ۱۲۳
- شکل ۶-۲۲: مدل زمین با بیش‌ترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرائی در منطقه یخچال علم‌کوه همراه با میزان خطای به‌دست آمده. ۱۲۴

فهرست جداول

عنوان.....	صفحه
جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف	۲۲
جدول ۱-۵: برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه	۷۷
جدول ۱-۶: ویژگی‌های فیزیکی مدل شامل لوله فولادی حاوی فرآورده نفتی.....	۱۰۸
جدول ۲-۶: مشخصات فیزیکی مدل‌های شبیه‌سازی شده شکل‌های ۱۴-۶ و ۱۵-۶.....	۱۱۱

فصل اول

کلیات

۱-۱- تعریف مسئله

روش‌های ژئوفیزیکی جزء سریع‌ترین، کم هزینه‌ترین و پرکاربردترین روش‌های اکتشاف غیر مستقیم به حساب می‌آیند. در میان روش‌های ژئوفیزیکی معمول و متداول، روش رادار نفوذی به زمین (GPR)^۱، بالاترین قدرت تفکیک^۲ را داشته و قادر به آشکارسازی انواع ناهمگنی‌های زیرسطحی و نیز شناسایی انواع اهداف مدفون در اعماق کم است. کلمه رادار (RADAR)^۳ مخفف عبارت آشکارسازی و تعیین محدوده آشکارسازی رادیویی است. GPR یک روش ژئوفیزیکی است که از بازتاب امواج رادیویی که عموماً در محدوده فرکانسی بین ۱۰ مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز درون زمین انتشار می‌یابند، برای به تصویر درآوردن ساختارها و ویژگی‌های اشیاء مدفون در زیر زمین یا ساختارهای ایجاد شده توسط بشر و به نقشه درآوردن جزئیات زیر سطحی بدون نیاز به مغزه‌گیری و ایجاد شکستگی و تغییر در محیط استفاده می‌کند [۱]. نتایج برداشت این روش به آسانی به صورت تصاویر دو بعدی و سه بعدی ارائه می‌شوند. دستیابی به تصویری واضح از اهداف زیر سطحی با حذف یا کاهش قابل ملاحظه نوفه‌های ناخواسته و تقویت سیگنال‌ها (افزایش میزان نسبت سیگنال به نوفه) و حصول اطلاعات واقعی از توده‌های زیرسطحی با انجام پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها انجام می‌گیرد. در صورتی که پردازش به‌طور اصولی، صحیح و مناسب انجام شود، در نهایت منجر به تفسیر منطقی و مطمئن‌تری خواهد شد. هدف از مدل‌سازی و تفسیر کمی داده‌ها، استخراج ویژگی‌های فیزیکی و هندسی اهداف مدفون و محیط‌های دربرگیرنده‌ی این اهداف در زیرسطح زمین از روی داده‌های GPR می‌باشد. بنابراین همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی، معمولاً مدل‌سازی داده‌های GPR برای تفسیر دقیق و کمی داده‌ها لازم است. رفتار حاکم بر امواج GPR را می‌توان از طریق حل معادلات ماکسول و شرایط مرزی مناسب که پایه و اساس تئوری الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، شبیه‌سازی نمود. تاکنون روش‌های عددی مختلفی جهت مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR به کار گرفته شده است که در این میان روش تفاضل محدود (اختلاف متناهی)^۴ دو بعدی به دلیل

¹ Ground Penetrating Radar

² Resolution

³ RAdio Detection And Ranging

⁴ Finite Diftrence

سادگی درک مفاهیم این روش، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد به‌کار رفته، مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است [۲]. لذا در این پژوهش نیز جهت مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR، از روش تفاضل محدود دو بعدی استفاده شده است. در پژوهش حاضر سعی بر آن است از روش مدل‌سازی وارون برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت‌های صحرائی GPR به منظور آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون استفاده شود. در این مدل‌سازی برای محاسبه مقدار خطا از روش کم‌ترین مربعات خطا استفاده شده است.

۱-۲- سابقه انجام تحقیق

ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی را هولسمیر^۱ محقق آلمانی در سال ۱۹۰۴ بیان کرد [۳]. استفاده از این ابزار از سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه یافته است. روش GPR اولین بار توسط استرن^۲ در سال ۱۹۲۹ در اتریش برای تعیین ضخامت یخچال‌ها به کار گرفته شد [۴]. مطالعه کاربردی و تحقیقاتی در زمینه GPR بیش از سه دهه است که در نقاط مختلف دنیا آغاز شده است و تا به امروز به‌طور فزاینده‌ای ادامه داشته است. گستره کاربردهای GPR بسیار وسیع بوده و مقالات و مطالعات گوناگونی در حوزه علوم زمین‌شناسی، زیست محیطی، آب‌شناسی، مطالعه یخچال‌ها، باستان‌شناسی، مهندسی شهری، فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی دیده شده است [۳، ۵، ۶، ۷ و ۸]. از آن‌جا که پردازش داده‌های GPR از اهمیت بالایی برخوردار است، مطالعات بسیاری نیز در این زمینه دیده می‌شود. فیشر^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۲ بررسی‌هایی در زمینه مهاجرت داده‌های GPR با استفاده از الگوریتم مهاجرت لرزه‌ای انجام دادند [۹]. هم‌چنین مطالعات سان و یونگ^۴ در خصوص تشخیص بازتاب‌های ناشی از توده‌های روی سطح زمین در مقاطع GPR در سال ۱۹۹۵ از این دست مطالعات است [۱۰]. در سال ۲۰۰۳ زیا^۵ و همکاران موفق به افزایش قدرت تفکیک داده‌های

¹ Hulsmeier

² Stern

³ Fisher

⁴ Sun & Young

⁵ Xia

GPR در سنگ‌های آهکی با استفاده از واهمامیخت^۱ معین داده‌ها شدند [۱۱]. یکی از عمومی‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی موجود در روش GPR که سهم قابل توجهی از تحقیقات منتشر شده را به خود اختصاص داده است، مقوله مدل‌سازی عددی می‌باشد [۲، ۱۲ و ۱۳]. روش‌های مدل‌سازی عددی مختلفی نظیر ردیابی پرتو مقدماتی^۲ و تکنیک‌های عبور-بازتاب یک بعدی [۱۴، ۱۵] تا گونه‌های مختلف روش تفاضل محدود [۱۶-۲۱] تکنیک‌های حجم محدود، تبدیل Z و اجزاء گسسته [۲۲-۲۵] و بحث‌های مرتبط با آن‌ها [۲۶-۲۸] برای کاربران GPR وجود دارند اگر چه، روش‌شناسی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است و در همه آن‌ها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، بر اساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و بر هم کنش آن‌ها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود [۲۹]. مطالعات مختلفی در زمینه مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR در دنیا صورت گرفته است. محل احداث خطوط ریلی و جاده‌ای با مدل-سازی داده‌های GPR در چندین مطالعه موردی توسط لولیزی^۳ (۲۰۰۱) مورد بررسی و ارزیابی زیرزمینی قرار گرفته است [۳۰].

شناسایی و تفسیر کمی حفره‌های زیرسطحی نیز با انجام مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود توسط برس^۴ و همکاران (۲۰۰۱) صورت گرفته است [۳۱]. لامبوت^۵ و همکاران (۲۰۰۴) نیز مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR در حوزه فرکانس را به منظور شناسایی خواص گذردهی و رسانندگی الکتریکی اهداف زیرسطح زمین انجام دادند [۳۲]. مدل‌سازی عددی داده‌های GPR به منظور بررسی درزه و ترک‌ها در سازه‌های مختلف توسط هامروش^۶ و همکاران (۲۰۰۹) انجام شده است [۳۳].

¹ Deconvolution

² Preliminary ray-tracing

³ Loulizi

⁴ Beres

⁵ Lambot

⁶ Hamrouche

همچنین مدل‌سازی عددی داده‌های GPR به منظور آشکارسازی و شناسایی مین‌های ضد نفر توسط هوئیسی^۱ (۲۰۱۲) انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴]. مدل‌سازی داده‌های GPR به منظور بررسی آلودگی‌های زیرزمینی نیز توسط افراد مختلفی از جمله کارسیون^۲ (۲۰۰۰) [۳۵]، اسندون^۳ و همکاران (۲۰۰۲) [۳۶] و دیگر محققین انجام شده است. به دلیل نیاز به تفسیرهای دقیق، روش تفاضل محدود درحوزه زمان (FDTD)^۴ به عنوان معمول‌ترین ابزار مدل‌سازی پیشرفته، به ویژه در محیط‌های پیچیده، توسعه یافته است [۳۷]. این روش‌ها، قادرند ویژگی‌های زیرسطحی را دقیق‌تر از روش ردیابی پرتو، مدل کنند (به ویژه در محیط‌های پراکنده کننده پراتلاف) و مهم‌تر آن‌که، به طور واقع‌گرایانه‌تری، هندسه سه بعدی واقعی GPR را در میان محیط‌های بسیار پیچیده، شبیه‌سازی کرده و بنابراین اطلاعات تفسیری دقیق را از داده‌های واقعی (نظیر ویژگی‌های پراکندگی محیط زیرسطحی و ویژگی‌های ماده هدف) استخراج کند [۳۷].

انعطاف‌پذیری روش تفاضل محدود، منجر به کاربرد آن در طیف وسیعی از زمینه‌های کاربردی GPR، شده است. در ادامه به برخی از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های عددی مرتبط با GPR اشاره می‌شود. ایروینگ و نایت^۵ (۲۰۰۶) گونه‌ای از کدهای MATLAB را برای مدل‌سازی تفاضل محدود حوزه زمان داده‌های GPR در دو بعد توسعه دادند. آن‌ها در رویکرد خود از بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو بر روی سطح زمین قرار دارند)، از رابطه روش میدان مغناطیسی عرضی یا مد TM، استفاده نمودند [۳۸]. کسیدی^۶ و میلینگتن^۷ (۲۰۰۹) از یک رویکرد FDTD برای توصیف محیط‌هایی با گذردهی مؤثر پیچیده استفاده کردند که مدل شدن ویژگی‌های انتشار و اتلاف واقعی مواد مغناطیسی را صرف‌نظر از مکانیسم‌های تدریجی میدان الکتریکی یا مغناطیسی مجزای آن‌ها، کاملاً امکان‌پذیر می‌کند.

¹ Huici

² Carcione

³ Sneddon

⁴ Finite Difference Time Domain

⁵ Irving & Knight

⁶ Cassidy

⁷ Millington

آن‌ها برای نشان دادن کاربرد روش خود، از یک مدل شبیه‌سازی شده داده‌های GPR با فرکانس ۴۵۰ مگاهرتز به صورت سه بعدی بر روی یک لوله زنگ زده استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که در شرایط مطلوب، تکنیک‌های GPR می‌تواند برای ایجاد اطلاعات عملی مهم، در تشخیص خوردگی خطوط لوله و پیش بینی شرایط قبل از شکست، مورد استفاده قرار گیرد [۳۹]. جیانوپولوس^۱ (۲۰۰۵) گونه‌ای از کدهای MATLAB را در قالب نرم‌افزار GprMax2D/3D جهت مدل‌سازی داده‌های GPR ارائه نمود. در این مطالعه، جهت مدل‌سازی پیشرو دو بعدی و سه بعدی پاسخ سامانه GPR برای مدل‌های مصنوعی متناظر با اهداف دلخواه پیچیده، روش تفاضل محدود در حوزه زمان با اعمال شرایط مرزی جاذب (ABCs)^۲، به کار گرفته شده است. نتایج نشان داده است نرم‌افزار GprMax2D/3D می‌تواند به عنوان یک نرم‌افزار مناسب جهت مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی داده‌های GPR برای شناسایی و آشکارسازی اهداف زیرسطحی عمل کند [۴۰]. طی دو سال گذشته در ایران نیز مدل‌سازی داده‌های GPR به طور محدود انجام شده که مهم‌ترین آن‌ها را می‌توان در مقاله کنفرانسی قاسم‌زاده و جاویدی (۱۹۹۳) یافت که در آن، مدل‌سازی عددی داده‌های GPR به روش FDTD به منظور آشکارسازی یا شناسایی حفره‌های زیرسطح زمین انجام شده است [۴۱]. هم‌چنین احمدی و همکاران (۱۳۹۱) روشی نوین را جهت افزایش سرعت مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR در حوزه فرکانسی ارائه نمودند. در این مطالعه الگوریتم مدل-سازی پیشرو تفاضل محدود دو بعدی، با قابلیت شبیه‌سازی مدل‌های مصنوعی شامل اهداف ژئوتکنیکی بهبود یافته است. در این تحقیق با استفاده از جابه‌جایی زمانی تریس‌ها در الگوهای پاسخ GPR و تبدیل فوریه آن‌ها در حوزه بسامدی، قدرت تفکیک جانبی داده‌ها در امتداد پیمایش نیم‌رخ افزایش پیدا کرده و بنابراین زمان اجرای مدل‌سازی پیشرو، به‌طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است [۴۲].

¹ Giannopoulos

² Absorbing Boundary Condition

۱-۳- اهداف تحقیق

همان‌طور که اشاره شد تعیین پارامترهای هندسی و فیزیکی اشیاء مدفون زیرسطحی در اغلب مطالعات از جمله ژئوتکنیکی، باستان‌شناسی، تأسیساتی و اکتشافی به‌عنوان یک هدف مطرح می‌باشد. بنابراین در این پژوهش سعی شده است با استفاده از یک روش مدل‌سازی پیشرو مناسب و با توجه به ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی اهداف زیرزمینی مورد نظر در برداشت‌های صحرائی، مدل‌های مصنوعی متشکل از محیط زمین لایه‌ای و اهداف زیرزمینی مصنوعی متداول تهیه شده و در نتیجه، مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از نرم‌افزارهای موجود انجام گردد.

نتایج به‌دست آمده از این نرم‌افزارها به منظور کنترل و بررسی محدودیت‌های نرم‌افزارهای به‌کار گرفته شده، تحلیل پاسخ GPR مدل‌های مختلف و تحلیل حساسیت پاسخ این روش به پارامترهای هندسی و فیزیکی مختلف مدل‌ها انجام پذیرد. همچنین مدل‌سازی وارون داده‌های GPR، با استفاده از یک الگوریتم مناسب، از طریق بهبود پارامترهای هندسی و فیزیکی اهداف مدل‌سازی شده جهت رسیدن به بهترین انطباق بین داده‌های مقطع حاصل از مدل‌سازی و مقطع حاصل از پردازش داده‌های صحرائی انجام می‌پذیرد. جهت دستیابی به این هدف لازم است تا ابتدا داده‌های صحرائی خام اولیه، جهت آماده‌سازی ورود به الگوریتم مذکور مورد پردازش‌های لازم قرار گیرد.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

سیستم GPR بدون نیاز به حفاری، یک مقطع پیوسته از زیر زمین را در اختیار قرار می‌دهد. این ویژگی به همراه مزایای قابل ملاحظه روش GPR در شناسایی اهداف مدفون در عمق کم (سریع، نسبتاً ارزان، غیر مخرب، قدرت تفکیک زیاد [۴۳] و نیز دارا بودن طیف وسیعی از کاربردها)، سبب اهمیت فزاینده این روش و نیز توجه ویژه محققان به تکنیک‌های مختلف پردازش و مدل‌سازی داده‌های این روش در دهه اخیر شده است.

در حال حاضر تفسیر داده‌ها و مقاطع نگاشت راداری GPR عمدتاً به صورت کیفی تا نیمه کمی و دستی صورت می‌گیرد؛ لذا ضرورت بررسی و شناخت بیش‌تر از پاسخ و رفتار اهداف مختلف (با استفاده از مدل‌سازی پیشرو) برای استخراج پارامترهای هندسی مرتبط با هدف قابل استخراج از داده‌ها با دقت بالا، به منظور کاهش هزینه‌ها، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر در تفسیر کمی داده‌های GPR محسوب می‌شود. با توجه به جدید بودن این روش و به ویژه جدید بودن موضوع مدل‌سازی داده‌های GPR در ایران، اهمیت و ضرورت این تحقیق بیش‌تر آشکار می‌شود.

۱-۵- ابزار تحقیق

در این پایان‌نامه جهت پردازش اولیه داده‌های خام از نرم‌افزار Reflexw استفاده شد. نرم‌افزار مذکور اکثر ماژول‌های فیلترسازی داده‌های GPR را دارا می‌باشد. به منظور انجام مدل‌سازی پیشرو پاسخ اشیای مختلف و داده‌های واقعی از نرم‌افزارهای GprMax2D و Reflexw بهره گرفته شده است.

هم‌چنین از برنامه مدل‌سازی پیشرو تهیه شده در محیط MATLAB توسط ابروینگ و نایت (۲۰۰۶) که توسط احمدی و همکاران در سال ۱۳۹۱ بهبود یافته، استفاده گردید. خروجی برنامه مدل‌سازی شده پیشرو مذکور شامل دو پاسخ است: یکی پاسخ با تفکیک‌پذیری پایین و دیگری پاسخ با تفکیک‌پذیری بالا.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر هفت فصل می‌باشد. در فصل اول مقدمه‌ای در خصوص پایان‌نامه، اهداف مطالعه، اهمیت و ضرورت انجام تحقیق و ابزار لازم برای انجام تحقیق آورده شده است و سابقه موضوع تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم به مبانی فیزیکی و نظری روش GPR و تئوری انتشار امواج الکترومغناطیسی پرداخته شده است. فصل سوم به روش‌های پردازش داده‌های GPR مورد استفاده در این پایان‌نامه، می‌پردازد. در فصل چهارم به نظریه پایه مسئله‌های الکترومغناطیس و کاربرد روش

تفاضل محدود در حل آن‌ها، روش‌های عددی در الکترومغناطیس، گسترش روش‌های تفاضل محدود حوزه زمان و مقدمه‌ای بر الگوریتم FDTD، پرداخته شده است. در فصل پنجم مدل‌سازی داده‌های GPR برای مدل‌های مصنوعی دو بعدی متناظر با اهداف ژئوتکنیکی متداول به روش FDTD، انجام و تأثیر پارامترهای هندسی و فیزیکی اهداف مذکور بر روی پاسخ‌های مدل‌سازی مربوطه بر اساس نتایج شبیه‌سازی پاسخ GPR اهداف ژئوتکنیکی متداول بررسی می‌شود. در فصل ششم با اخذ داده‌های صحرائی برداشت شده در مناطق مورد نظر به پردازش، مدل‌سازی و تفسیر پروفیل‌های برداشتی GPR پرداخته شده است. در این فصل مدل‌سازی پیشرو پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی متشکل از محیط زمین لایه‌ای و اهداف زیرزمینی مصنوعی متداول در بررسی‌های زیرزمینی، با استفاده از نرم‌افزارهای Reflexw، GprMax2D و برنامه مدل‌سازی پیشرو بهبود یافته توسط احمدی و همکاران انجام شده است. در ادامه، با طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم مناسب، مدل‌سازی وارون داده‌های GPR و اعتبار سنجی مدل‌سازی پیشرو سیستم GPR انجام گرفته و در پایان، جمع‌بندی نتایج و پیشنهادها در فصل هفتم ارائه گردیده است.

فصل دوم

مبانی نظری و فیزیکی روش GPR

۲-۱- مقدمه

استفاده از روش‌های ژئوالکتریکی برای اکتشاف ساختارهای زیرسطحی در سال ۱۹۲۰ میلادی توسط برادران شولمبرژه در فرانسه آغاز و توسعه یافت [۴۴]. روش GPR یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد ژئوفیزیکی است که با امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا (۱۰ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی در اعماق کم را به‌منظور آشکارسازی زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند [۴۵]. این روش مشابه با روش لرزه‌نگاری بازتابی است که بر مبنای انتشار و بازتاب موج عمل می‌کند [۴۶]. در برخی از نوشته‌ها از GPR با نام‌های دیگری هم‌چون رادار جستجوی زمینی^۱، رادار نفوذی به زیرسطح^۲، زمین‌رادار^۳، رادار پالسی^۴، بازتاب الکترومغناطیسی (EMR)^۵ و رادار مرزی زیرسطحی (SIR)^۶ یاد شده است [۴۷]. به منظور آشکار کردن یک شیء بایستی بخشی از انرژی موج رادیویی که به سطح شیء برخورد می‌کند بازتابیده شود. این امر مستلزم آن است که تفاوتی بین ویژگی‌های الکتریکی شیء و محیط در برگیرنده آن وجود داشته باشد. تغییرات در گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی، سبب پراکندگی امواج رادیویی می‌شود. با آشکار کردن این انرژی پراکنده شده، تعیین محل و موقعیت چشمه‌های پراکنده کننده انرژی، امکان‌پذیر می‌شود [۱]. در این فصل به طور مختصر و مفید به مبانی نظری و فیزیکی روش GPR پرداخته می‌شود.

۲-۲- دستگاه‌های GPR

رادار با امواج پالسی شکل (پالس‌رادار) یکی از انواع مختلف رادار می‌باشد. دستگاه‌های مختلف پالس‌رادار که برای بررسی‌های زیرسطحی به کار می‌روند، مجموعاً تحت عنوان "رادار نفوذی به زمین" و یا به صورت مخفف GPR، نام‌گذاری شده‌اند [۳]. دستگاه‌های GPR از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده است و میل به کاربرد آن، از اواسط دهه ۱۹۹۰ به شدت رو به فزونی بوده است [۶].

¹ Ground-probing radar

² subsurface Penetration radar

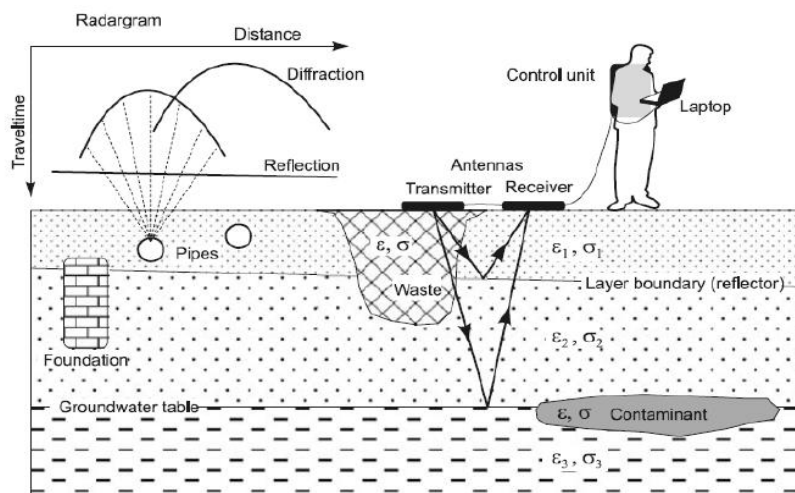
³ Georadar

⁴ Impulse radar

⁵ ElectroMagnetic Reflection

⁶ Subsurface Interface Radar

در حالت ساده یک دستگاه GPR از یک تولیدکننده سیگنال و گیرنده تشکیل شده است. سیگنال ایجاد شده توسط این تولیدکننده، به وسیله آنتن فرستنده به درون زمین فرستاده می‌شود. امواج با سرعت زیادی در زمین منتقل می‌شوند. هنگامی که این امواج به یک شیء و یا سطح بازتاب کننده برخورد می‌کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها، قسمتی از امواج از سطح، بازتاب خواهد شد [۴۶]. آنتن گیرنده مستقر در دستگاه، این بازتاب‌ها را به صورت یک پیک بالا نشان می‌دهد و زمان سیر حرکت و دامنه‌های بازتاب را ضبط می‌کند. زمان رفت و برگشت موج از آنتن فرستنده و بازتاب از اهداف زیرسطحی و دریافت در گیرنده، از چند ده تا چندین هزار نانو ثانیه متغیر است. دستگاه‌های GPR در واقع زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند. در نتیجه مقطع اولیه نمایش داده‌های برداشت شده یک مقطع زمانی است که در آن محور قائم، فاصله زمانی ارسال موج از فرستنده و دریافت با گیرنده را نشان می‌دهد. شکل ۱-۲ مفهوم عمومی چگونگی انجام آشکارسازی اهداف GPR را نشان می‌دهد. در این شکل اهداف و ساختارهای با ویژگی‌های الکتریکی معین در یک محیط با ویژگی الکتریکی متفاوت قرار گرفته‌اند. برای تعیین موقعیت مکانی رویدادها، باید این زمان‌ها به عمق تبدیل شوند یعنی این مقطع به مقطعی که محور قائم آن عمق را نمایش دهد، تبدیل شود. برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد بررسی، تعیین شود.



شکل ۱-۲: معرفی اجزاء دستگاه GPR و نمایش بعضی از کاربردهای متداول روش GPR [۴۶]

۳-۲- مبانی فیزیکی روش GPR

سیگنال‌های GPR از نوع امواج الکترومغناطیس هستند، بنابراین الکترومغناطیس پایه و اساس GPR می‌باشد. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، به‌گونه‌ای که تمام پدیده‌های الکترومغناطیس در مقیاس ماکروسکوپی توسط این معادلات قابل توصیف بوده و تمامی مسائل مربوطه نیز با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب قابل حل می‌باشند [۲]. معادلات (۱-۲) تا (۴-۲) معادلات تفاضل جزئی هستند که رابطه بین مقادیر اصلی میدان الکترومغناطیسی و وابستگی آن‌ها به چشمه‌ها در یک محیط همسانگرد را بیان می‌کنند [۴۸]:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1-2)$$

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

$$\nabla \cdot \bar{D} = q_v \quad (3-2)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4-2)$$

در این معادلات \bar{E} بردار شدت میدان الکتریکی (ولت بر متر)، \bar{B} بردار چگالی شار مغناطیسی (تسلا)، t زمان (ثانیه)، \bar{H} بردار شدت میدان مغناطیسی (آمپر بر متر)، \bar{D} بردار چگالی بار الکتریکی (جابه‌جایی الکتریکی) (کولن بر متر مربع)، \bar{J} بردار چگالی جریان الکتریکی (آمپر بر متر مربع) و q_v چگالی حجمی بار الکتریکی (کولن بر متر مکعب) است. ε ، μ و σ نیز به ترتیب گذردهی دی‌الکتریک، نفوذپذیری یا تراوایی مغناطیسی و رسانندگی الکتریکی می‌باشند. این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط کنترل می‌کنند و معمولاً پارامترهای ساختاری اطلاق می‌شوند. به‌طور کلی این پارامترها می‌توانند، به‌صورت توابعی از مکان، جهت، شدت میدان اعمال شده و زمان باشند [۲]. برای همه‌ی کارهای عملی GPR این مقادیر به صورت کمیت‌های اسکالر مستقل از میدان عمل می‌کنند؛ به بیان دیگر پاسخ به حضور میدان یکسان و مستقل از شدت میدان است. اگر چه این

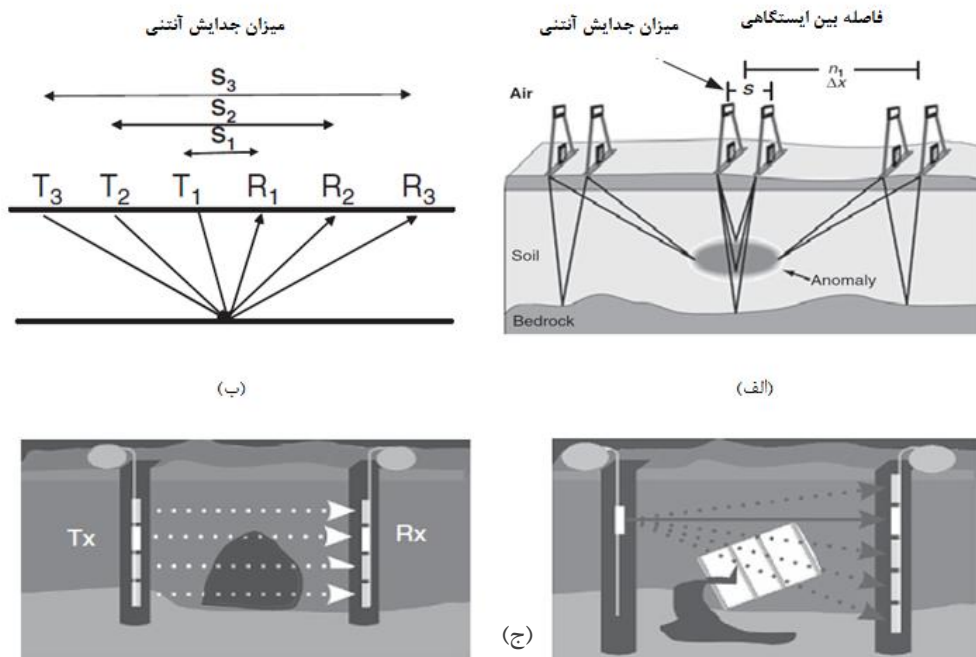
فرضیات به ندرت معتبر هستند ولی در کارهای عملی توصیف چنین پیچیدگی‌هایی بسیار مشکل می‌شود. پاسخ مواد به زمان اعمال میدان نیز بستگی دارد. این مقادیر زمانی در صورتی که نرخ تغییرات میدان کم باشد، ثابت و زمانی که نرخ تغییرات میدان زیاد باشد متغیر در نظر گرفته می‌شوند [۴۹]. در بسیاری از کاربردهای زمین شناسی و ژئوتکنیکی GPR، ویژگی‌های الکتریکی عامل عمده کنترل کننده پاسخ‌های GPR هستند. تغییرات تراوایی مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف بوده و بنابراین در روش GPR در اکثر مواقع ϵ و μ مهم‌ترین پارامترهای مؤثر و کنترل کننده پاسخ‌های GPR می‌باشند [۵۰].

۲-۴- برداشت داده‌های GPR و انواع روش‌های آن

در تمام برداشت‌های GPR، یکی از مؤلفه‌های میدان الکترومغناطیسی (معمولاً مؤلفه میدان الکتریکی) اندازه‌گیری می‌شود و شدت مؤلفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان ثبت می‌شود [۵۱]. بایستی بین مدت زمان انتشار سیگنال چشمه و مدت زمانی که هر بازتاب به آشکارساز می‌رسد، یک تأخیر زمانی وجود داشته باشد. این تأخیر زمانی به وسیله فاصله گیرنده تا هدف، تقسیم بر سرعت انتشار امواج از میان محیط میزبان، تعیین می‌شود. پایه و اساس GPR (و تمام رادارها) اندازه‌گیری این تأخیر زمانی است. اساساً با فرض شرایط سرعتی یکنواخت، تأخیر زمانی طولانی‌تر به معنی بیش‌تر بودن فاصله تا هدف می‌باشد [۵۲].

برداشت‌های GPR به سه شیوه اساسی صورت می‌گیرند. این سه شیوه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌اند عبارت‌اند از: پروفیل زنی بازتابی (شکل ۲-۲-الف)، سونداژزنی با بازتاب از نقطه میانی مشترک یا CMP^۱ (شکل ۲-۲-ب) و عبور از میان یک محیط و دریافت (شکل ۲-۲-ج) [۱]. روش‌های مذکور متداول‌ترین حالت‌های برداشت GPR هستند. برداشت‌های بازتابی چندگانه [۹] که در اصل ترکیبی از گمانه زنی CMP و روش پروفیل زنی بازتابی می‌باشند و روش عبور از میان یک محیط و دریافت که پایه و اساس توموگرافی GPR را تشکیل می‌دهد [۵۳]، بر اساس همان اصول GPR استوار است.

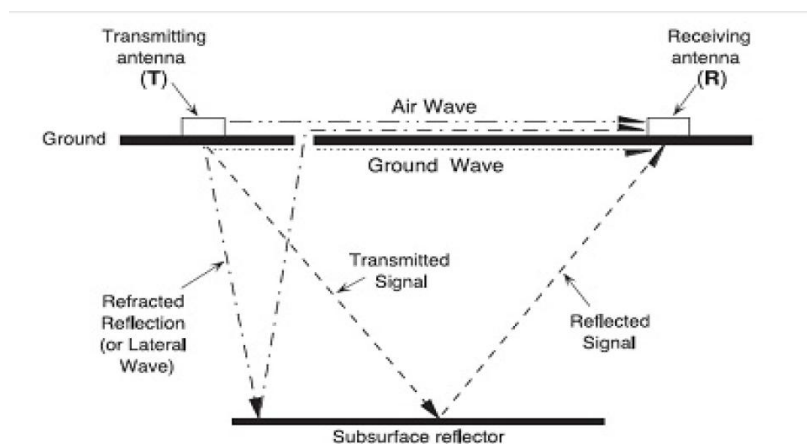
^۱ Common mid-point



شکل ۲-۲: نمایش سه شیوه اساسی عملیات برداشت GPR [۲۹].

۲-۵- انواع امواج منتشره در روش GPR

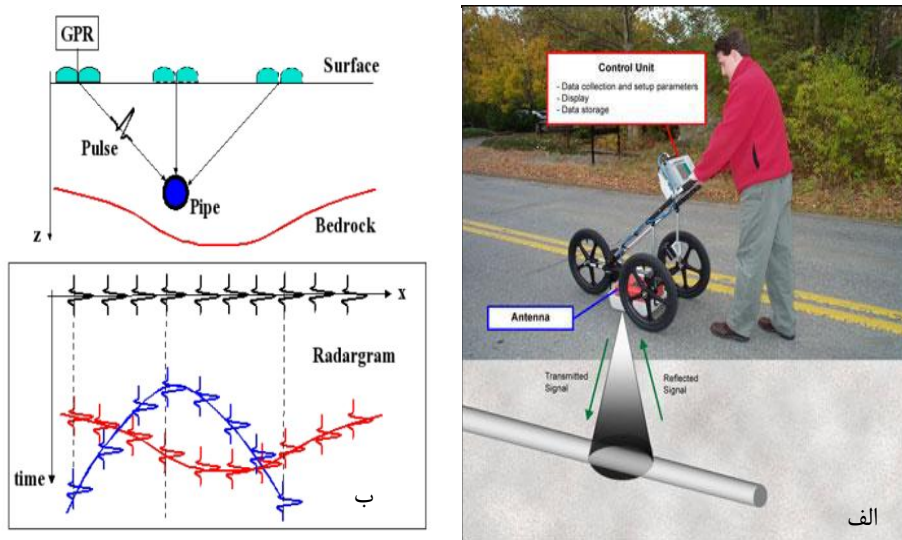
شکل ۲-۳ انواع امواج منتشره و دریافتی در روش GPR را برای یک محیط حاوی یک بازتابنده افقی تخت نشان می‌دهد. برای یک هدف محلی در زمین چندین مسیر ممکن وجود دارد که انرژی از یک چشمه به گیرنده می‌رسد. در بیش‌تر برداشت‌های GPR، فاصله فرستنده و گیرنده کم بوده و مسیرهای غالب مربوط به موج مستقیم هوا، موج مستقیم زمین و سیگنال بازتابی هستند.



شکل ۲-۳: نمایش امواج مختلف منتشره و دریافتی در روش GPR [۱۲]

۶-۲- نمایش داده‌های GPR

متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که رد یا تریس^۱ نامیده می‌شود. در حقیقت رخدادهای فضای سه بعدی درون یک رکورد زمان یک بعدی ترسیم می‌شوند. در حالت کلی، نگاشت راداری^۲ یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۴-۲ مجموعه‌ای از تریس‌های بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر نیز اغلب برای اهداف مدفون به صورت هذلولی است. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیر-سطحی از سیگنال‌های زمینه بزرگ‌تر هستند. بزرگی و ویژگی سیگنال بازتابی با هندسه هدف و تفاوت در ویژگی‌های محیط میزبان و ویژگی‌های شیء یا هدف تولید کننده سیگنال بازتابی، کنترل می‌شوند. متأسفانه این موضوع، لزوماً منحصر به فرد نبوده و گاهی تلاش جهت تعیین هدف منحصرأ بر این اساس غیر ممکن است [۱].



شکل ۴-۲- الف: برداشت داده‌های GPR بر روی یک هدف مدفون [۵۴] و ب: مقطع بازتابی GPR با رخداد تولید شده به صورت یک شبه هذلولی حاصل از پاسخ GPR شیء یا هدف مدفون [۵۵].

¹ Trace

² Radargram

۲-۷- خواص مواد

برای درک انتشار امواج نخست لازم است خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی مواد توضیح داده شود. متغیرهای اصلی در GPR، ثابت‌های گذردهی نسبی (ϵ_r)، تراوایی مغناطیسی (μ) و رسانندگی الکتریکی (σ) می‌باشند.

۲-۷-۱- گذردهی الکتریکی

گذردهی الکتریکی، قابلیت مواد در قطبیده شدن، حفظ قطبیدگی و ذخیره انرژی الکتریکی در پاسخ به اعمال میدان الکتریکی خارجی (متغیر با زمان) است [۵۶]. این ویژگی، مهم‌ترین پارامتر کنترل کننده امواج الکترومغناطیس در ساختارهای مورد بررسی است. گذردهی الکتریکی را می‌توان به صورت یک تابع مختلط نوشت [۱۲]:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (۵-۲)$$

در این صورت گذردهی شامل مؤلفه ذخیره انرژی الکتریکی و میزانی از قطبیدگی الکتریکی (بخش حقیقی گذردهی) و مؤلفه اتلاف انرژی (بخش موهومی گذردهی) می‌باشد. این دو مؤلفه نسبت به یکدیگر ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند. بخش موهومی (ϵ'') با میزان افت انرژی الکتریکی که ناشی از رسانندگی و فرکانس است، مرتبط می‌باشد [۱۲]:

$$\epsilon' = \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad [F/m] \quad (۶-۰)$$

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad [F/m] \quad (۷-۲)$$

بنابراین رابطه گذردهی نسبی با مؤلفه‌های حقیقی و موهومی آن به صورت زیر است [۵۷]:

$$\epsilon_r = \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - i \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \right) \quad (۸-۲)$$

گذردهی نسبی، پارامتر اساسی در تعیین سرعت انتشار سیگنال و در نتیجه طول موج آن است. روابط بین آن‌ها در معادلات (۲-۹) و (۲-۱۰) نشان داده شده است:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (9-2)$$

$$\lambda = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} * \frac{1}{f} [m] \quad (10-2)$$

۲-۷-۲- رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی بیانگر سهولت حرکت الکترون‌ها در یک ماده تحت تأثیر میدان الکتریکی خارجی است [۵۸]. این ویژگی پارامتر مهمی در تضعیف امواج الکترومغناطیسی است و به همین لحاظ در بررسی‌های GPR اهمیت دارد. تأثیر رسانندگی در تضعیف امواج GPR توسط نسبت جریان رسانشی (در نتیجه حرکت الکترون‌ها و یون‌ها در موادی با رسانندگی الکتریکی پایین تحت تأثیر میدان الکتریکی) به جریان جابه‌جایی (در نتیجه ذخیره انرژی الکتریکی در مواد) که به فاکتور افت (δ) معروف است به صورت زیر بیان می‌شود [۱]:

$$\delta = \frac{\sigma}{\epsilon' \omega} \quad (11-2)$$

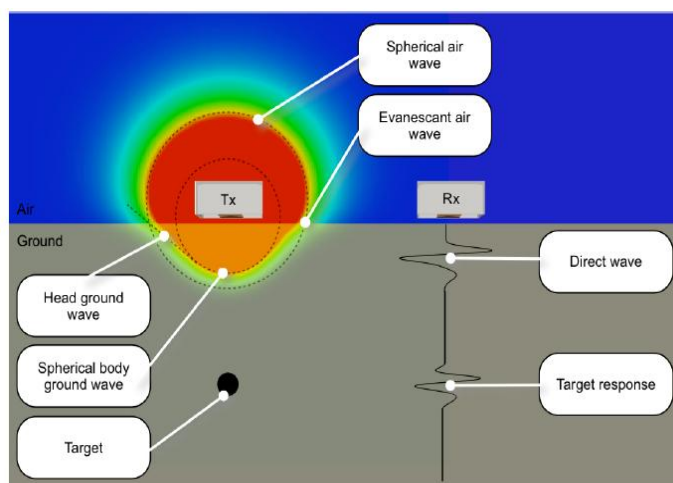
در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای موج الکترومغناطیسی است.

۲-۷-۳- تراوایی مغناطیسی

تراوایی مغناطیسی اندازه‌ای از انرژی الکتریکی یا الکترومغناطیسی ذخیره و پراکنده شده در ماده‌ای است که در معرض میدان خارجی قرار دارد. این پارامتر هم به صورت مختلط است و شامل مؤلفه ذخیره انرژی الکتریکی (بخش حقیقی تراوایی مغناطیسی) و مؤلفه اتلاف انرژی الکتریکی (بخش موهومی تراوایی مغناطیسی) می‌باشد [۵۹]. مقدار تراوایی مغناطیسی برای بیشتر خاک‌ها، سنگ‌ها و رسوبات غیر مغناطیسی، کوچک و تقریباً برابر با تراوایی مغناطیسی خلاً در نظر گرفته می‌شود [۶۰]. تراوایی مغناطیسی نسبی که به صورت نسبت تراوایی مغناطیسی مواد به تراوایی مغناطیسی خلاً تعریف می‌شود، بر انتشار امواج GPR تأثیر گذار است، اما برای بیش‌تر موادی که در قلمرو کاربردهای GPR هستند، این مقدار برابر واحد بوده و در کاربردهای GPR نقش چندانی ندارد [۵۰].

۸-۲- انتشار، سرعت و جذب امواج GPR در زمین

مطابق شکل ۵-۲ یک چشمه انرژی الکترومغناطیسی که سیگنال‌ها را به شکل امواج منتشر می‌کند، انرژی را به طرف هدف می‌فرستد و انرژی ارسال شده و بازتابیده به وسیله گیرنده آشکار می‌شود. موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه‌بُعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر می‌گذارند.



شکل ۵-۲: انتشار امواج و دریافت پاسخ آن‌ها [۶۱]

مؤلفه میدان الکتریکی یک موج تخت، که در جهت عمقی Z منتشر می‌شود، به صورت رابطه (۱۲-۲) تعریف می‌شود [۶۲].

$$E(t, z) = E_0 e^{(i\omega t - \gamma z)} \quad [Vm^{-1}] \quad (12-2)$$

که در رابطه بالا، میدان الکتریکی E ، فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi f [s^{-1}]$ و ثابت انتشار یا تضعیف به صورت زیر می‌باشد:

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad [m^{-1}] \quad (13-2)$$

در این رابطه، α ضریب جذب (میرایی)، β ثابت فاز و $i = \sqrt{-1}$ است. مؤلفه میدان مغناطیسی امواج الکترومغناطیس عمود بر مؤلفه میدان الکتریکی بوده و مانند مؤلفه میدان الکتریکی عمود بر جهت انتشار می‌باشد. سرعت موج الکترومغناطیس انتشار یافته در داخل زمین از رابطه زیر به دست می‌آید [۴۶].

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\epsilon \omega})^2}}{2}}}} \quad (14-2)$$

در رابطه (۱۴-۲)، μ_r بخش حقیقی تراوایی مغناطیسی نسبی، ϵ_r بخش حقیقی ضریب دی‌الکتریک محیط نسبت به هوا و ω فرکانس زاویه‌ای موج GPR می‌باشند. در محیط‌های کم اتلاف عبارت $(\frac{\sigma}{\epsilon \omega})$ نزدیک به صفر است. هم‌چنین μ_r در محیط‌های غیرمغناطیس کوچک بوده و می‌توان آن را برابر با ۱ در نظر گرفت. به این ترتیب داریم [۳، ۷ و ۸]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (15-2)$$

باید در نظر داشت که رابطه اخیر برای مواد با رسانندگی بالا نظیر آب دریا و برخی از انواع رس‌ها و یا مواد مغناطیسی از قبیل مگنتیت و هماتیت درست نمی‌باشد [۱]. مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف شامل مقادیر گذردهی الکتریکی نسبی، رسانندگی، سرعت و اتلاف موج در محیط‌های مختلف در جدول ۱-۲ آورده شده است.

۹-۲- قدرت تفکیک و عمق نفوذ امواج GPR

قدرت تفکیک، توانایی تفکیک دو پدیده نزدیک به هم می‌باشد و در خصوص قدرت تفکیک قائم، این مسئله توسط طول موج کنترل می‌شود [۶۳]. طول موج امواج الکترومغناطیس به وسیله رابطه (۱۶-۲) به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (16-2)$$

در رابطه بالا، v سرعت موج GPR در محیط و f فرکانس آن می‌باشد. بهترین قدرت تفکیک قائم قابل دسترس برابر با $1/4$ طول موج غالب GPR می‌باشد. عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی در این روش نیز با فرکانس مرکزی آنتن فرستنده GPR، رسانندگی الکتریکی و گذردهی الکتریکی مواد زیرسطحی کنترل

می‌شود و به‌طور کلی فرکانس مرکزی زیاد آنتن فرستنده و رسانندگی بالای مواد زیرسطح زمین موجب

کاهش عمق نفوذ امواج GPR می‌شود [۶۳].

جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف [۶۱]

MATERIAL	ϵ_r	v (m/ns)	σ (mS/m)	α (dB/m)
Air	1	0.3	0	0
Clay (dry)	2-20	0.07-0.21	1-100	1-36
Clay (wet)	15-40	0.05-0.08	100-1000	42-252
Concrete (dry)	4-10	0.09-0.15	1-10	<1-5
Concrete (wet)	10-20	0.07-0.09	10-100	5-36
Fresh water	81	0.03	0.1-10	<1
Fresh water ice	3-4	0.15-0.17	1	<1
Granite (dry)	5-8	0.11-0.13	0.001-0.00001	<1-5
Granite (wet)	5-15	0.08-0.13	1-10	<1-4
Limestone (dry)	4-8	0.11-0.15	0.001-0.0000001	<1
Limestone (wet)	6-15	0.08-0.12	10-100	6-42
Sand (dry)	4-6	0.12-0.15	0.001-1	<1
Sand (wet)	10-30	0.05-0.09	0.1-10	<1-3
Sea water	81	0.03	4000	>600
Sea water ice	4-8	0.11-0.15	10-100	8-57
Soil (average)	16	0.08	5	2

۱۰-۲- مرز محیط‌ها و نحوه سیر امواج الکترومغناطیسی

اساس روش GPR بر پایه‌ی پاسخ محیط انتشار امواج به میدان الکترومغناطیسی تولید شده با توجه به خصوصیات الکترومغناطیسی محیط، است [۲۹]. از آن جایی که اساساً سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در هوا همواره از محیط‌های دیگر بیش‌تر است، تمام سیگنال‌ها از مرز هوا-زمین منحرف شده و به سمت پایین و نزدیک به خط قائم حرکت می‌کنند.

روش‌های GPR معمولاً مبتنی بر ردیابی امواج بازتابی (انعکاسی)^۱ یا پراکنده شده^۲ هستند. مرزهای صفحه‌ای ساده‌ترین مدل را برای کیفی‌سازی رفتار امواج ارائه می‌دهند. ضرایب بازتاب فرسnel^۳ چگونگی

^۱ Reflection

^۲ Scatter

^۳ Fresnel

تغییرات دامنه امواج الکترومغناطیسی را در عبور از مرز بین دو ماده، کمی می کنند. جهت سیر امواج نیز طبق قانون اسنل^۱ (به عنوان مثال شکست جبهه موج) تغییر می کند [۲۹].

$$\frac{\sin\theta_1}{v_1} = \frac{\sin\theta_2}{v_2} \quad (17-2)$$

زمانی که $v_1 > v_2$ محیط دوم دارای زاویه بحرانی بالایی است به طوری که انرژی از محیط اول به دوم انتشار نمی یابد. زاویه بحرانی با قرار دادن $\theta_1 = 90^\circ$ به دست می آید. زاویه بحرانی نقش مهمی در بسیاری از پاسخهای GPR ایفا می کند. هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی تخت روی یک مرز می تابد بخشی از آن عبور کرده و بخش دیگری بازتاب می شود. در شکل ۲-۶ سیگنال تابیده با حرف I و سیگنالهای بازتابیده و عبوری با RI و TI نشان داده شده است. R و T نیز ضرایب بازتاب و عبور هستند و توسط روابط (۱۸-۲) و (۱۹-۲) بیان می شوند [۲۹]:

$$R = \frac{\eta_2 \cos \varphi - \eta_1 \cos \alpha}{\eta_2 \cos \varphi + \eta_1 \cos \alpha} \quad (18-2)$$

$$T = \frac{2\eta_2 \cos \varphi}{\eta_2 \cos \varphi + \eta_1 \cos \alpha} \quad (19-2)$$

در این رابطه φ زاویه تابش، α زاویه شکست و η_1 و η_2 امپدانس الکترومغناطیسی محیطهای دو طرف فصل مشترک هستند. اگر تابش امواج الکترومغناطیسی به صورت عمود باشد ($\varphi = \alpha = 90^\circ$)، در این حالت معادلات بالا به صورت روابط (۸-۲) و (۹-۲) خلاصه می شوند:

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (20-2)$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (21-2)$$

امپدانس طبیعی محیط، نسبت بین میدان الکتریکی و مغناطیسی بوده و یک کمیت موهومی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_r}{\sigma + i\omega\varepsilon_r}} \approx \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} [\Omega] \quad (22-2)$$

بنابراین رابطه (۱۸-۲) در محیطهای کم اتلاف ($\tan \delta \ll 1$ و $\mu_r = 1$) به صورت رابطه (۲۳-۲) خلاصه می شود:

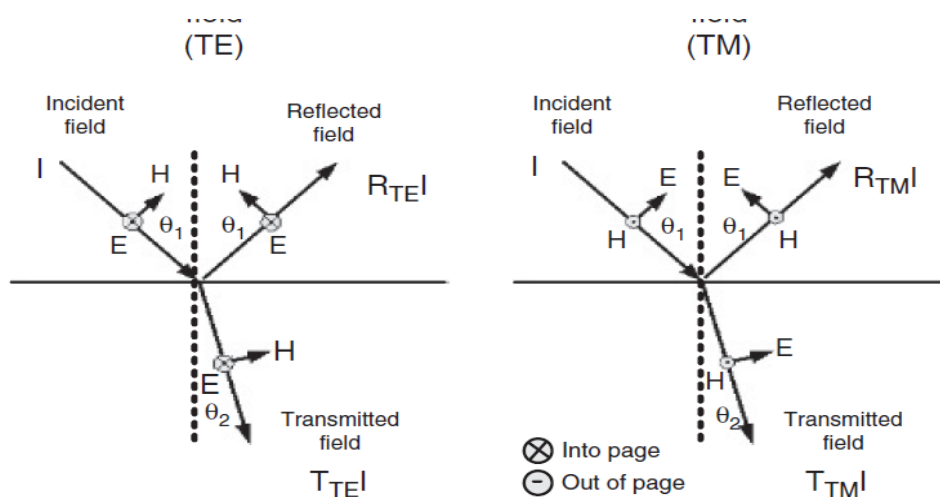
¹ Snell

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{1r}} - \sqrt{\varepsilon_{2r}}}{\sqrt{\varepsilon_{1r}} + \sqrt{\varepsilon_{2r}}} \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (23-2)$$

که در آن V_1 و V_2 سرعت امواج الکترومغناطیس در دو طرف فصل مشترک می‌باشد.

بازتاب و عبور امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک بین دو محیط با مشخصات الکتریکی متفاوت، باعث تغییر شکل آن‌ها می‌شود [۳]. یک موج الکترومغناطیسی در حال انتشار دارای چهار مشخصه اصلی دامنه، فرکانس، فاز و قطبش است. قطبش یک موج الکترومغناطیس مربوط می‌شود به بزرگی و تغییر جهت مؤلفه الکتریکی با زمان. قطبش سیگنال GPR به سه عامل وابسته است: ساختمان آنتن، جهت آنتن و جهت قرارگیری هدف زیرسطحی [۵۷].

برای یک راستای انتشار معین، دو حالت قطبش موج مستقل می‌تواند وجود داشته باشد. این دو حالت موج به نام مد میدان الکتریکی عرضی (TE) و مد میدان مغناطیسی عرضی (TM) نامیده می‌شوند (شکل ۲-۶). همیشه مؤلفه میدان الکتریکی مد TE موازی با صفحه مرز می‌باشد در حالی که مؤلفه میدان مغناطیسی مد TM در صفحه مرز قرار دارد. این تجزیه به‌طور ذاتی تابعی از هندسه مرز است [۲۹].



شکل ۲-۶: میدان برداری امواج الکترومغناطیسی به دو جزء مستقل تفکیک می‌شوند. برای هر جهت انتشاری، دو مد مستقل وجود دارد. یکی مد میدان الکتریکی عرضی (TE) و دیگری مد میدان مغناطیسی عرضی (TM) [۲۹].

فصل سوم

پردازش و تفسیر داده‌های GPR

۳-۱- مقدمه

داده‌های خام GPR حاوی تمام اطلاعات اولیه می‌باشند و هدف استخراج اطلاعات مطلوب نهفته در آن‌ها است. برای بهبود کیفیت داده‌های خام و در نتیجه ساده‌تر کردن تفسیر باید گام‌های پردازشی مناسب برداشته شوند. حجم اطلاعات موجود در داده‌ها را با هیچ روش پردازش سیگنال نمی‌توان بهبود داد اما ارزش یا کیفیت اطلاعات را می‌توان با پردازش مناسب تا حد زیادی بهبود بخشید. در عمل این کار به معنی افزایش نسبت سیگنال به نوفه پاسخ‌های هم‌دوس^۱ و ارائه داده‌ها به‌صورتی است که بتوانند شرایط زیرسطحی را به‌طور دقیق نمایان کنند [۲۹].

به‌طور کلی بهترین شیوه، استفاده از آسان‌ترین روش پردازش و قطع عملیات در زمانی است که هیچ جواب بهتری وجود ندارد تا از پردازش به‌دست آید. روش‌های مختلفی در پردازش و تحلیل داده‌های GPR وجود دارد، اما اگر داده‌های جمع‌آوری شده جهت پردازش از کیفیت پایینی برخوردار باشد، روش‌های گوناگون پردازش به افزایش کیفیت داده‌ها چندان کمکی نمی‌کنند. بسیاری از کاربران مستقیماً از روی صفحه نمایش یا نسخه چاپی داده‌ها و در محل برداشت داده‌ها، تفسیر را انجام می‌دهند. گستره دینامیکی اطلاعاتی که بر روی صفحه نمایش ظاهر می‌شوند در حدود ۲۰-۱۰ دسی‌بل می‌باشد. در حالی که گستره دینامیکی سیستم GPR حداقل ۶۰ دسی‌بل است. به این معنی که تنها بخش محدودی از اطلاعات بر روی صفحه نمایش در دسترس و اطلاعات بالقوه موجود در داده‌ها را می‌توان با پردازش پیشرفته به‌دست آورد [۲۹].

هم‌چنین هدف از روش‌های پیشرفته پردازشی این است که اطلاعات دقیق‌تری از ویژگی‌های طبیعی/ فیزیکی مواد زیرزمینی در اختیار کاربر قرار گیرد. این بدان معنی نیست که کاربر می‌تواند پردازش‌های پیچیده را به‌صورت کورکورانه به‌کار برد تا بتواند "تصویر" یا جواب دلخواه (یا جوابی که دیگران می‌خواهند باور داشته باشند) را بگیرد. زیرا این روش‌ها می‌توانند نظرات شخصی کاربر را اعمال کنند که در

¹ Coherent

بهترین حالت در تفسیر نهایی اختلال ایجاد می‌کند. در این بخش برخی از پردازش‌های اصلی موجود که می‌توانند بر روی داده‌های GPR اعمال شوند، مورد بحث قرار می‌گیرند. نوع و دامنه پردازش‌هایی که بر روی داده‌های GPR به کار برده می‌شوند به مشخصات منطقه مورد مطالعه، دستگاه GPR، نرم‌افزارهای به کار رفته و همچنین اهداف کلی برداشت وابسته است [۶]. از این رو نیازی به استفاده از تمام روش‌های پردازش ذکر شده بر روی تمامی داده‌ها نمی‌باشد. چه بسا در شرایطی اعمال برخی از پردازش‌ها منجر به ایجاد مشکلات ناخواسته بر روی داده‌ها شوند.

۳-۲- گام‌های پردازش اولیه داده‌های GPR

شکل ۳-۱ توالی گام‌های مختلف پردازشی برای داده‌های دو بعدی دو ایستگاهی^۱ و دورافت مشترک^۲، در روش بازتابی GPR را نشان می‌دهد. همه کاربران از این روش استفاده نمی‌کنند، اما به طور کلی، این مسیر مثال مناسبی برای طرز کار GPR می‌باشد. مراحل پر رنگ شده پردازشی برای تفسیرهای قابل قبول، ضروری می‌باشند (مثلاً اعمال فیلترهای مختلف بعد از جمع آوری داده‌ها^۳ یا تبدیل عمقی داده‌ها^۴). توضیح خلاصه‌ای از هر مرحله پردازش در شکل آمده است و جزئیات بیشتر در ادامه خواهد آمد. گام‌های پیشرفته و پیچیده‌تر پردازش (مانند واهمامیخت و مهاجرت) اختیاری بوده و استفاده از آن‌ها می‌بایست مطابق با نیازها و هزینه‌های پروژه تأمین گردد. به ابزارهای تحلیلی مانند تشخیص الگو و تصویر، مدل‌سازی و تحلیل ویژگی، در این توالی اشاره شده است، اما در عمل آن‌ها را می‌توان بیشتر به عنوان ابزار کمکی تفسیر به کار برد تا به منظور پردازش یک ویژگی خاص. همچنین این ابزارها بسیار قدرتمند بوده و می‌توان از آن‌ها برای استخراج اطلاعات سودمندی از داده‌ها (مانند محتویات طیفی^۵ و روابط فازی) استفاده کرد، اما معمولاً اطلاعاتی می‌دهند که ضرورتی ندارند و معمولاً دخیل کردن آن‌ها در استراتژی‌های پردازشی جهت تفسیرهای بهتر غیر ضروری است. با این حال بهتر است که به این نکته

¹ Bistatic

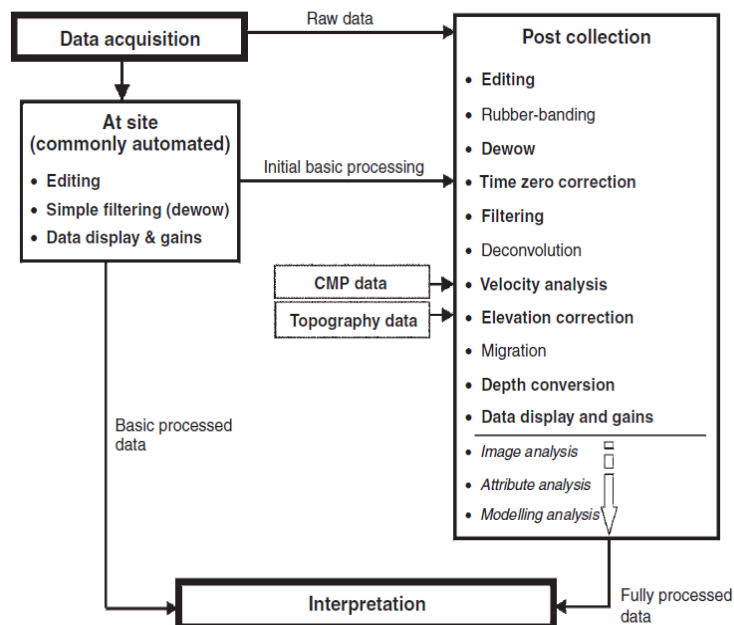
² Common offset

³ Post- collection filtering

⁴ Depth Conversion

⁵ Spectrace content

اشاره شود که بسته‌های نرم‌افزاری دارای ویژگی‌های پردازشی گسترده‌تری مانند توابع حسابی^۱ و تحلیل طیفی، هستند [۲۹].



شکل ۳-۱: توالی انواع پردازش بر روی داده‌های دو بعدی GPR در حالت بازتابی با فاصله ثابت بین فرستنده و گیرنده. گام‌های پردازشی پر رنگ به عنوان اساس تفسیر و بقیه بسته به زمان، کیفیت داده‌ها و ملاحظات هزینه‌ای، مدنظر قرار می‌گیرند [۲۹].

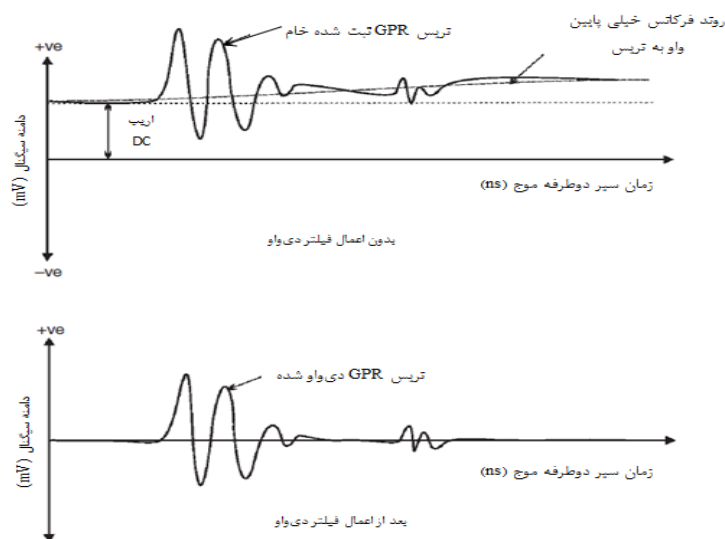
چندین روش مختلف پردازش و تحلیل GPR وجود دارند. به‌طور کلی همیشه بهتر است که ابتدا با ساده‌ترین گزینه‌های پردازشی شروع کرده و هنگامی کار را متوقف نمود که مطلوب‌ترین پاسخ از پردازش به‌دست آید.

۳-۳- فیلتر Dewow

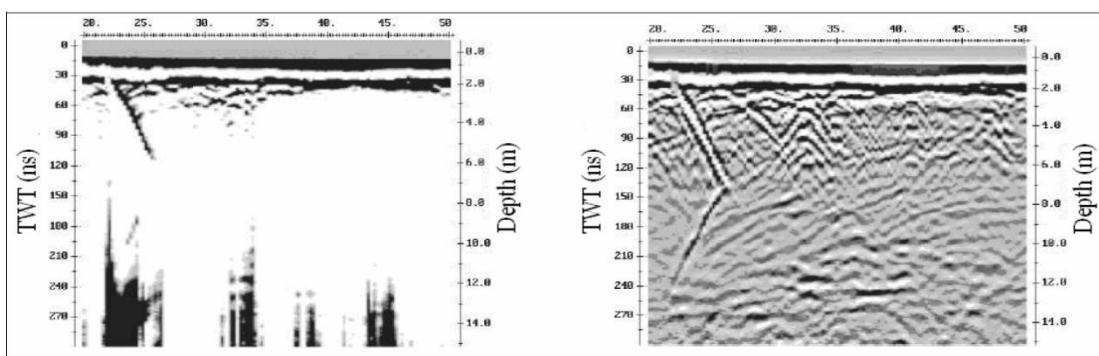
WOW به‌وسیله اشباع سیگنال ثبت شده با رسیدهای اولیه (مثلاً موج زمین- هوا، [۶۴]) و یا اثرات جفت شدگی القایی ایجاد می‌شود. گام نخست پردازش معمولاً از بین بردن WOW یا حضور روند سیگنال فرکانس خیلی پایین از داده‌ها می‌باشد (مثلاً حذف پاسخ‌های حدود ۱۰ مگاهرتز برای یک آنتن ۵۰۰ مگاهرتزی) که برای تصحیح مؤثر آن به یک فیلتر بالاگذر یا میانی بهینه نیاز است [۶۵، ۶۶ و ۶۷]. این

¹ arithmetic

گام اغلب Dewow کردن داده‌ها نامیده می‌شود. فیلتر Dewow یک مرحله اساسی در پردازش داده‌ها به شمار می‌آید، زیرا میانگین داده‌ها را صفر می‌کند. بنابراین این امکان را مهیا می‌کند تا از رنگ‌بندی‌های مثبت و منفی در تریس‌های ثبت شده استفاده شود (شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳). در شکل ۲-۳ فیلتر Dewow همراه با تصحیح شیفت جریان مستقیم صورت گرفته است. در تصحیح شیفت جریان مستقیم^۱، داده‌ها به یک میانگین سطح صفر کاهش پیدا می‌کنند. خوشبختانه تمام سیستم‌های پیشرفته GPR به صورت اتوماتیک فیلتر Dewow را با اعمال پارامترهای شرایط بهینه به هر تریس اعمال می‌کنند.



شکل ۲-۳: اعمال فیلتر Dewow بر روی تریس‌های خام GPR [۲۹].

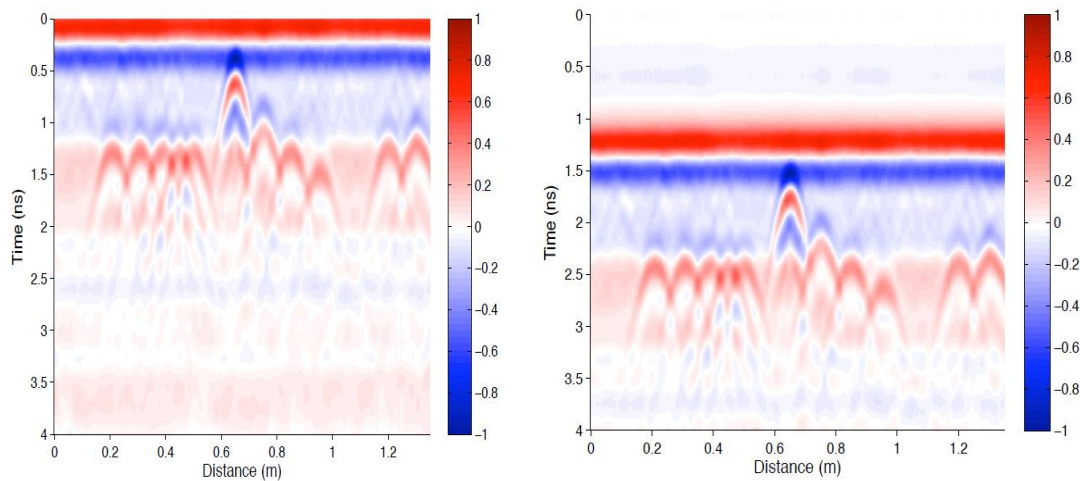


شکل ۳-۳: اثر wow بر روی داده‌های GPR (سمت چپ). بازتاب‌ها بعد از اعمال فیلتر Dewow به خوبی مشخص‌اند (سمت راست) [۶۸].

¹ DC shift

۴-۳- تصحیح زمان - صفر

رانه^۱ حرارتی، ناپایداری الکترونیکی، اختلاف‌های طولی کابل و تغییرات در شکاف هوایی^۲ می‌توانند موجب پرش‌هایی در زمان اولین رسید موجک هوا-زمین شوند که معمولاً به‌عنوان نقطه زمان- صفر شناخته می‌شود [۶۹، ۷۰ و ۷۱]. این فرایند روی موقعیت مرز زمین در مقطع، توالی زمانی رخداد‌های آخر و میزان توازن در عرض تریس‌ها و مقاطع مجاور تأثیر می‌گذارد. بنابراین قبل از اجرای روش‌های پردازشی باید تریس‌ها با یک موقعیت زمان- صفر مشترک تعدیل شوند. این نتیجه معمولاً با استفاده از بعضی معیارهای مشخص (نظیر نقطه اولین شکست موج هوا یا اولین پیک منفی تریس) به‌دست می‌آید. در شکل‌های ۳-۵- الف و ب مقاطع بدون اعمال تصحیح ایستا (شکل ۳-۵- الف) و با اعمال آن (شکل ۳-۵- ب) نشان داده شده است.



بعد از تصحیح زمان - صفر (ب)

قبل از تصحیح زمان - صفر (الف)

شکل ۴-۳- نمایش اثر تصحیح زمان- صفر [۶۱].

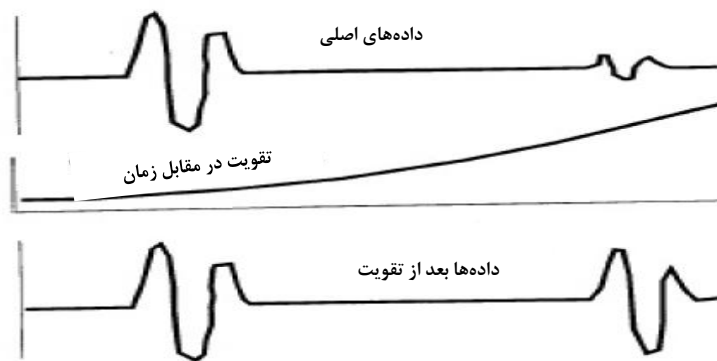
۵-۳- بهره زمانی

پالس‌های GPR با انتشار به درون زمین به سرعت تضعیف می‌شوند. سیگنال‌های مربوط به اعماق زیاد خیلی تضعیف شده و نمایش این اطلاعات بر حسب زمان همراه با سیگنال‌های اعماق کم‌تر، مشکل است

¹ Drift

² Air gap

[۲۹]. هنگامی که دامنه نمایش برای سیگنال‌های عمق کم، بهینه باشد رخدادهای اعماق بیش‌تر ممکن است قابل دیدن یا تشخیص نباشند. به‌علت تضعیف سیگنال در اثر اتلاف‌های ناشی از گسترش هندسی^۱ (یا واگرایی کروی)^۲ و پدیده جذب نیاز به افزایش حضور رسیده‌های آخر با انجام بهره‌های زمانی بر روی این رسیده‌ها وجود دارد. افزایش تابع تقویت برای اصلاح میرایی و دامنه سیگنال در مقابل زمان مناسب است (شکل ۳-۵) [۱]. برای تقویت داده‌های راداری انواع مختلفی از توابع نظیر بهره‌های خطی، جبران گسترش و نمایی (SEC)^۳ و کنترل بهره اتوماتیک (AGC)^۴ وجود دارد که ویژگی‌های هر یک با دیگری متفاوت است. نوع تابع تقویت، طول پنجره توابع تقویت (برحسب نانو ثانیه) و حداکثر تقویت مجاز به آسانی می‌توانند تغییر یابند. متداول‌ترین توابع تقویت یا بهره‌ها به‌صورت زیر می‌باشند:



شکل ۳-۵: مفهوم بهره متغیر با زمان، که میزان تقویت سیگنال با زمان تغییر می‌کند [۱].

۳-۵-۱- بهره SEC

بهره SEC ترکیبی از بهره خطی و نمایی است. این بهره با توجه به محدودیت‌هایی که کاربر تعریف می‌کند و با استفاده از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج GPR در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد [۲۹]. در استفاده از این بهره پارامترهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می‌گیرد، بسیار حائز اهمیت است. این پارامترها از جمله

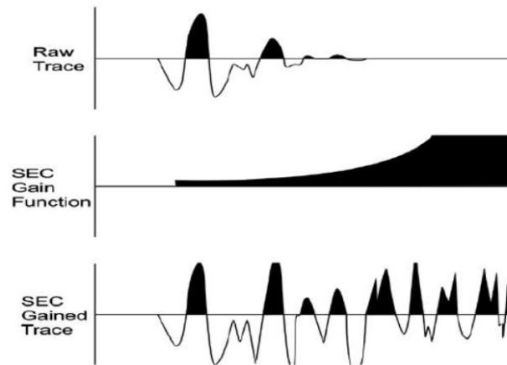
¹ Geometrical spreading

² Spherical divergence

³ Spreading & exponential compensation

⁴ Automatic Gain Control

حداکثر مقدار بهره که بر روی داده‌ها اعمال شود و همچنین اتلاف امواج GPR در محیط، برای بازسازی شکل بازتاب‌ها بسیار با اهمیت می‌باشند (شکل ۳-۶).

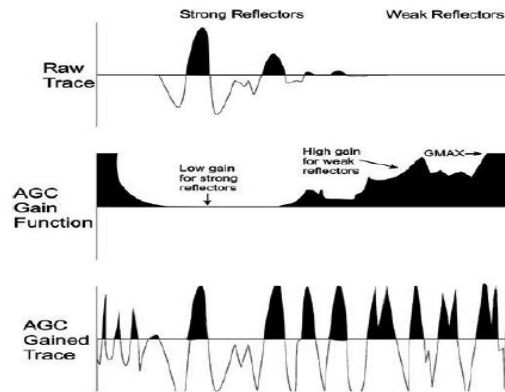


شکل ۳-۶: نمایش داده‌های خام (شکل بالایی)، بهره‌نمایی SEC (شکل وسط) و داده‌های نهایی بعد از اعمال تابع بهره SEC (شکل پایینی) [۶۸].

۳-۵-۲- بهره AGC

بهره AGC از یک تابع تقویت پیوسته خودکار برای هر تریس استفاده می‌کند. این تابع برای نمایش رخداد‌های ضعیف عمیق‌تر، بسیار مناسب است اما نوفه را همانند سیگنال‌های پیوسته به صورت جدایی ناپذیر تقویت می‌کند. به طور کلی در این روش، تابع تقویت در سیگنال ضرب شده و سیگنال و نوفه با هم تقویت می‌شوند [۷۲]. از آنجایی که این بهره با شدت سیگنال رابطه عکس دارد، سیگنال‌های ضعیف بهره‌های بزرگی را ایجاد می‌کنند، بنابراین باید حد بالای بهره توسط کاربر تعریف شود. در بررسی‌های رسوب شناسی به نقشه درآوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است. از این رو در بیش‌تر مطالعات رسوب شناسی از بهره AGC استفاده می‌شود (شکل ۳-۷) [۶۸]. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود به کارگیری بهره AGC بر روی داده‌ها تمامی بازتاب‌ها را یکسان می‌نماید. تقویت تعریف شده توسط کاربر، توابع تقویت کاربردی سیستماتیکی هستند که دارای ریاضیات خاص یا فاکتور ضرب تعریف شده توسط کاربر یا به طور خودکار، توسط سیستم می‌باشند. به طور کلی آن‌ها اطلاعات دامنه نسبی را نگهداری می‌کنند اما مقدار آن به نوع و روش تابع به کار رفته بستگی دارد. تقویت باید بر اساس یک مدل فیزیکی اولیه یا عملی (نظیر طول پالس) و نه بر اساس سلیقه کاربر انتخاب شود. هدف باید اصلاح داده‌ها

با حفظ سودمندی کامل آن، بدون ایجاد محصول‌های مصنوعی باشد. مثلاً بهتر است که برای تفسیر داده‌ها در محل از یک بهره AGC، برای ارزیابی طبیعت سیگنال بعد از جمع‌آوری، بهره SEC و در مرحله نهایی مقاطع پیش پردازش شده از یک بهره متغیر با زمان تعریف شده توسط کاربر استفاده کرد.



شکل ۳-۷: نمایش نحوه عملکرد بهره AGC (شکل وسط) که با شدت داده‌های ورودی (شکل بالایی) رابطه عکس دارد. داده‌هایی که بهره به آن‌ها اعمال شده است (شکل پایینی) [۶۸].

به‌طور کلی تقویت باعث بهبود شکل ظاهری داده‌ها شده و اغلب باعث تغییر ساختار داده‌ها (به‌صورت غیر قابل برگشت) می‌شود. معمولاً نتیجه نهایی تمام روش‌های تقویت تقریباً با روش خودکار یکسان است [۲۹]. در شکل ۳-۸ الف و ب مقاطع با اعمال یک بهره ناکافی (شکل ۳-۸ الف) و اعمال یک بهره اضافی^۱ (شکل ۳-۸ ب) نشان داده شده‌اند.

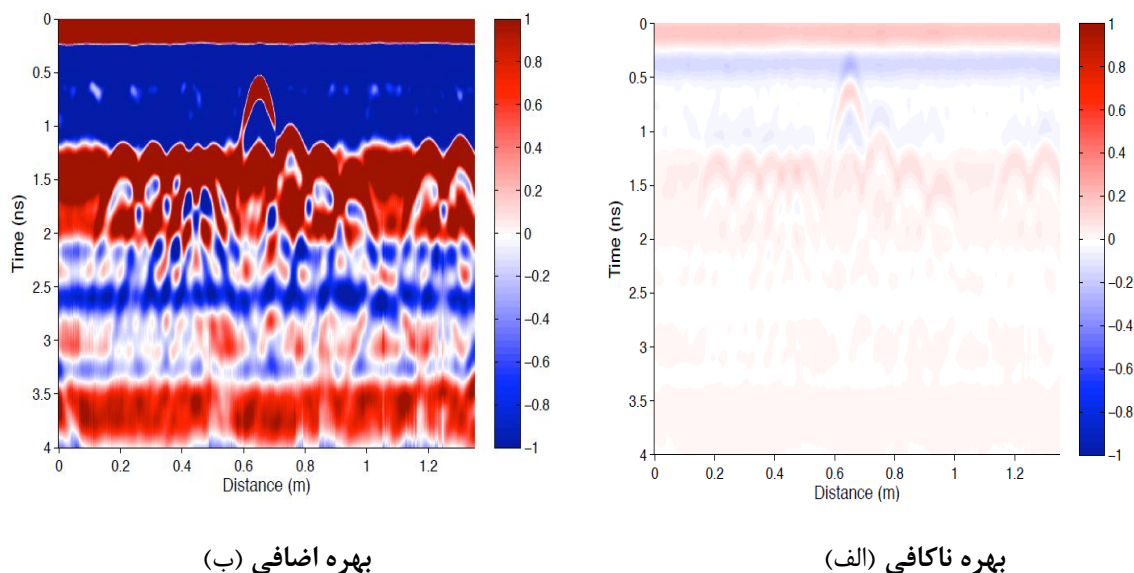
۳-۶- فیلترینگ

فیلترها به‌طور کلی به داده‌ها اعمال می‌شود تا نوفه‌های ایجاد شده توسط انسان یا سیستم اندازه‌گیری را حذف کنند و کیفیت تصویری داده‌ها را بهبود بخشند. فیلترها در استخراج جنبه‌های مشخصی از داده‌ها و در نتیجه در کمک به تفسیر نیز مفیدند. انواع مختلف فیلترها، از فیلترهای میان‌گذر ساده^۲ گرفته تا فیلترهای تبدیل و دامنه پیشرفته، وجود دارند. فیلترهای ساده اغلب شامل روش‌هایی هستند که در

^۱ Excessive

^۲ Band pass

حذف نوفه‌های فرکانس بالا و پایین مؤثر هستند در حالی که روش‌های پیچیده‌تر فیلترها برای اهداف خاصی به کار گرفته می‌شوند.



شکل ۳-۸: نمایش کاربرد بهره زمانی [۶۱]

به‌طور کلی فیلترها را می‌توان به دو دسته تقسیم بندی نمود: زمانی (به یک تریس در زمان‌های مختلف) و مکانی (در چند تریس با فاصله). این دو روش معمولاً با هم ترکیب می‌شوند تا فیلترهای دو بعدی را ایجاد کنند که هم در حوزه زمان و هم در حوزه مکان عمل می‌کنند.

به‌طور کلی فیلترهای اولیه با حذف، افزایش و یا کاهش سیگنال‌هایی با فرکانس معین یا تعداد مشخصی از تریس‌ها در فضا یا نمونه‌ها (زمان)، داده‌ها را تغییر می‌دهند. گستره وسیعی از انواع فیلترهای GPR وجود دارند که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و همه آن‌ها برای هر نوع داده GPR مناسب نمی‌باشند.

از اصلی‌ترین آن‌ها فیلترهای یک بعدی در حوزه زمان هستند که هم برای تریس‌های منفرد و هم برای تمام تریس‌های یک مقطع و یا بر روی محدوده خاصی از آن‌ها عمل می‌کنند. فیلترهای یک بعدی رایج در حوزه زمان شامل موارد زیر است:

- میانگین ساده^۱

میانگین داده‌ها را در یک پنجره زمانی معین حساب می‌کند و در نتیجه داده‌ها را هموار^۲ می‌کند.

- میانه ساده

میانه داده‌ها را بر روی یک پنجره زمانی معین محاسبه می‌کند.

- پایین یا بالاگذر (فیلترهای فرکانس حوزه‌ای)

اجازه عبور مؤلفه‌های فرکانس پایین داده‌ها (پایین‌گذر؛ مناسب برای نوفه‌ها) و یا مؤلفه‌های فرکانس

بالا (بالاگذر؛ مناسب برای حذف رانه و فرکانس‌های پایین) را می‌دهد.

- میان‌گذر^۳ (فیلترهای فرکانس حوزه‌ای)

ترکیبی از فیلترهای پایین و بالاگذر است که اجازه عبور محدوده معینی از فرکانس که به‌وسیله "منطقه

عبور"^۴ تعیین شده است را می‌دهد. فیلترهای میان‌گذر بسیار رایج بوده و انواع مختلفی از آن‌ها وجود

دارد که هر کدام دارای شکل اپراتوری معینی هستند که شکل منطقه عبور را تعیین می‌کند (شکل ۳-۹).

در عمل فیلترهای زمانی تنها برای حذف نوفه‌ها در فرکانس‌هایی بالاتر یا پایین‌تر از پهنای باند اصلی

سیگنال GPR مناسب بوده و نهایتاً فقط سیگنال را "تصفیه"^۵ می‌کنند که باعث می‌شود مقطع GPR از

نظر تصویری بهتر شود. اگر یک بازه بسیار باریک در نظر گرفته شود آن‌گاه فیلتر، مؤلفه‌های سیگنال

واقعی را حذف و مقطع GPR حاصل بدتر به نظر خواهد آمد. یکی از توابع رایج فیلتر ساده میان‌گذر در

حوزه فرکانس فیلتر باترورث^۶ می‌باشد، که عملکرد آن در شکل ۳-۹ نشان داده شده است [۲۹].

¹ Simple mean

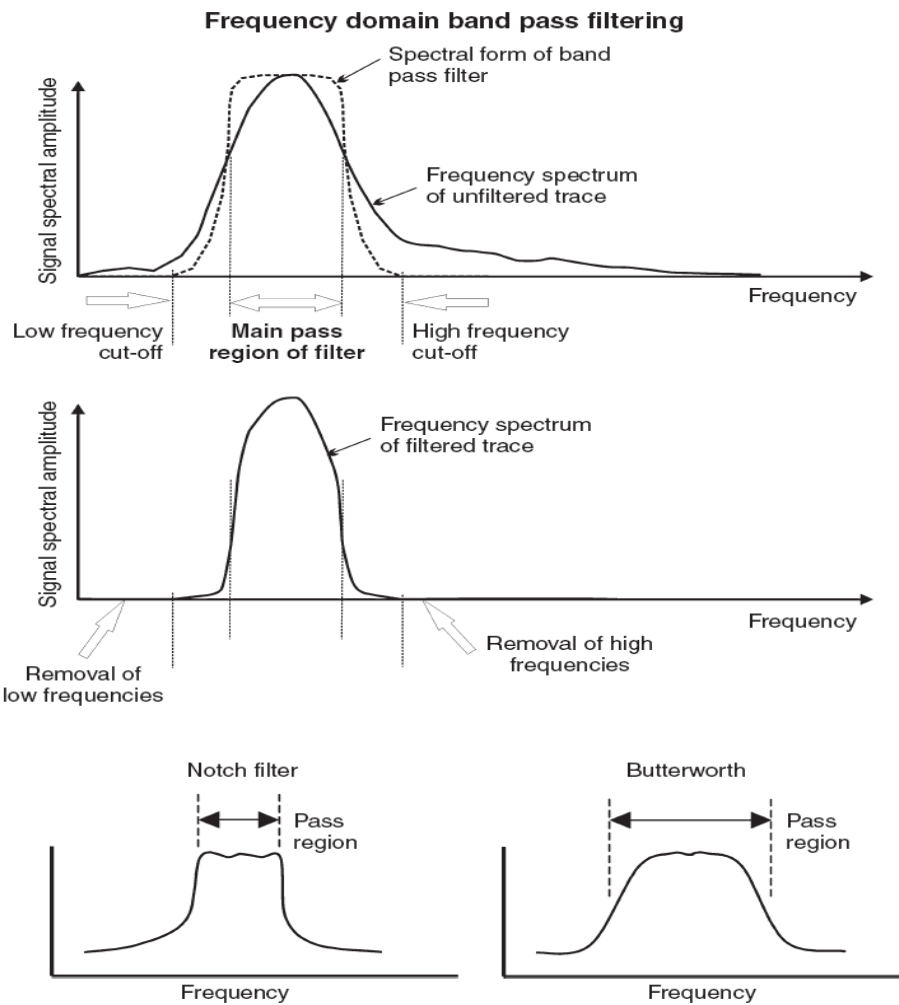
² smooth

³ Band pass

⁴ pass region

⁵ Clean- up

⁶ Butterworth



شکل ۹-۰: اصول یک فیلتر ساده میان‌گذر در حوزه فرکانس و دو شکل از توابع رایج فیلتر: فیلترناچ^۱ و فیلتر باتروث [۲۹]

فیلترهای مکانی همانند فیلترهای زمانی عمل می‌کنند. اما به جای زمان بر روی تریس‌های فاصله‌دار عمل می‌نمایند. این فیلترها معمولاً به شکل فیلترهای میانگین ساده یا فیلترهای میانگین‌گیری هستند که تعداد معینی از تریس‌ها را شامل می‌شوند و معمولاً جهت تقویت یا تضعیف یک ویژگی معین در مقطع استفاده می‌شوند. رایج‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

^۱ notch

- میانگین ساده متحرک^۱

میانگین تعدادی از تریس‌ها را محاسبه می‌کند. داده‌ها را به صورت افقی صاف می‌کند و بازتاب دهنده‌های کم شیب را تقویت کرده درحالی که بازتاب و انکسار دهنده‌های پر شیب را تضعیف می‌کند. بنابراین برای تقویت افق‌های چینه شناسی بسیار مناسب هستند (مثلاً لایه‌بندی زمین شناسی).

- تفاضل میانگین^۲

میانگین تعدادی از تریس‌ها را در یک پنجره محاسبه کرده و از هر کدام از تریس‌ها کم می‌کند که نوفه‌های زمینه را حذف کرده و برای حلقوی شدن^۳ آنتن مناسب می‌باشد. این فیلتر یک ابزار بسیار مناسب جهت حذف پدیده حلقوی شدن می‌باشد. اما در عین حال می‌تواند بازتاب دهنده‌های کم شیب را نیز حذف کند. استفاده از فیلترهای حذف زمینه^۴ یک مرحله کلیدی در پردازش و تفسیر داده‌های GPR در مواد نسبتاً پراکنده (مثلاً خاک‌های مرطوب) می‌باشد. در چنین محیط‌هایی، جفت شدگی^۵ شدید آنتن- زمین و لایه‌های کم عمق نزدیک به سطح ممکن است منجر به ارتعاش (برگشت امواج) قابل توجهی در سیگنال شود که می‌تواند سیگنال‌های بعدی را بپوشاند. در شکل ۳-۱۰ عملکرد این فیلتر به-خوبی نشان داده شده است.

- فیلترهای مکانی پایین- بالا- و میان‌گذر (حوزه عدد موج)

این فیلترها مشابه معادل زمانی‌شان می‌باشند که در آن‌ها داده‌ها از حوزه مکان به حوزه عدد موج تبدیل می‌شوند. فیلترهای مکانی بر روی داده‌هایی با کیفیت و بدون نوفه به‌خوبی عمل کرده و در حذف پاسخ قوی موج هوا / زمین و حلقوی شدن ناشی از داده‌ها بسیار مناسب می‌باشند. فیلترهای ساده میانگین متحرک و پایین‌گذر مکانی برای مقاطع زمین شناسی و رسوب شناسی GPR مناسب بوده زیرا ویژگی‌های مورد علاقه (لایه‌بندی) معمولاً دارای زاویه کم بوده و از نظر فضایی گسترده می‌باشند.

¹ Simple running average

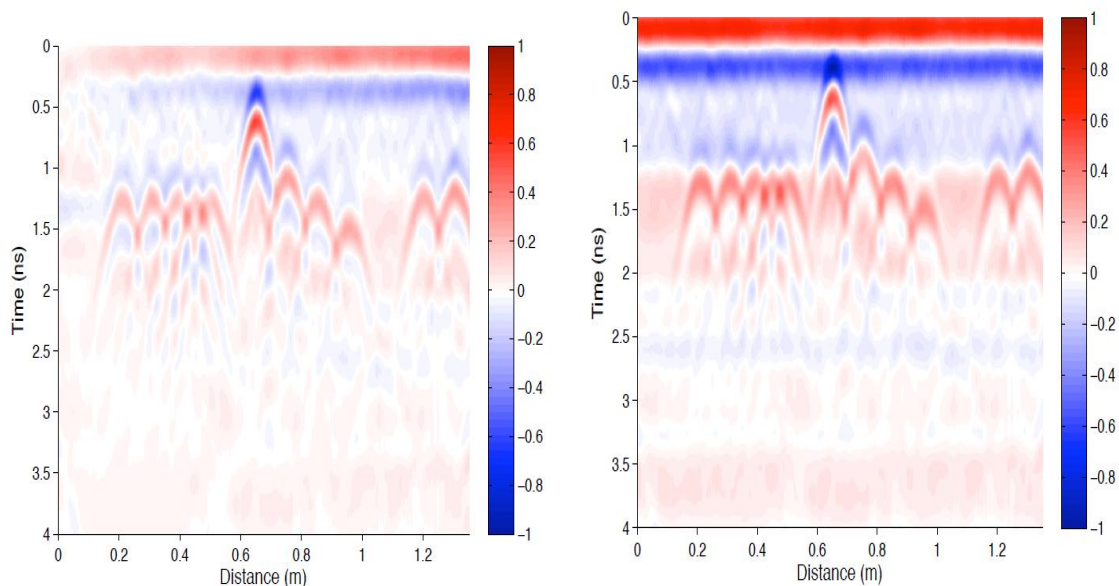
² Average subtraction

³ Ringing

⁴ Background removal

⁵ Coupling

در محیط‌های ناهمگن‌تر مانند کاربردهای مهندسی و باستان‌شناسی GPR، مقاطع می‌توانند شامل انواع مختلفی از عوارض، شامل بازتاب دهنده‌های مسطح و پر شیب، انکسار دهنده و مناطق حاوی نوفه با کاهندگی دامنه زیاد و کم باشد. در چنین مواردی فیلتر مکانی کم‌تر قابل استفاده و مفید خواهد بود زیرا ابعاد عوارض زیرزمینی اغلب مشابه نوفه‌ای است که فیلتر در نظر دارد آن را حذف کند. با این وجود فیلتر مکانی نباید کاملاً نادیده گرفته شود زیرا همیشه نکته تفسیری مهمی را می‌توان از این پردازش‌ها به دست آورد [۲۹]. در شکل ۳-۱۰-الف و ب مقاطع بدون اعمال فیلتر حذف زمینه (شکل ۳-۱۰-الف) و با اعمال آن (شکل ۳-۱۰-ب) نشان داده شده‌اند.



بعد از حذف زمینه (ب)

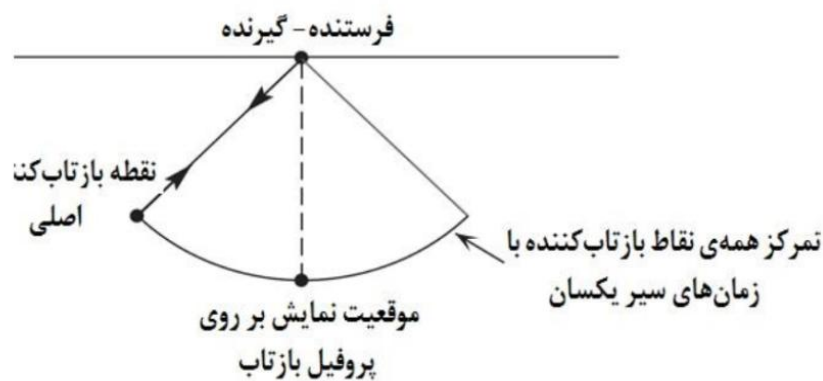
قبل از حذف زمینه (الف)

شکل ۳-۱۰: نمایش کاربرد فیلتر حذف زمینه [۶۱].

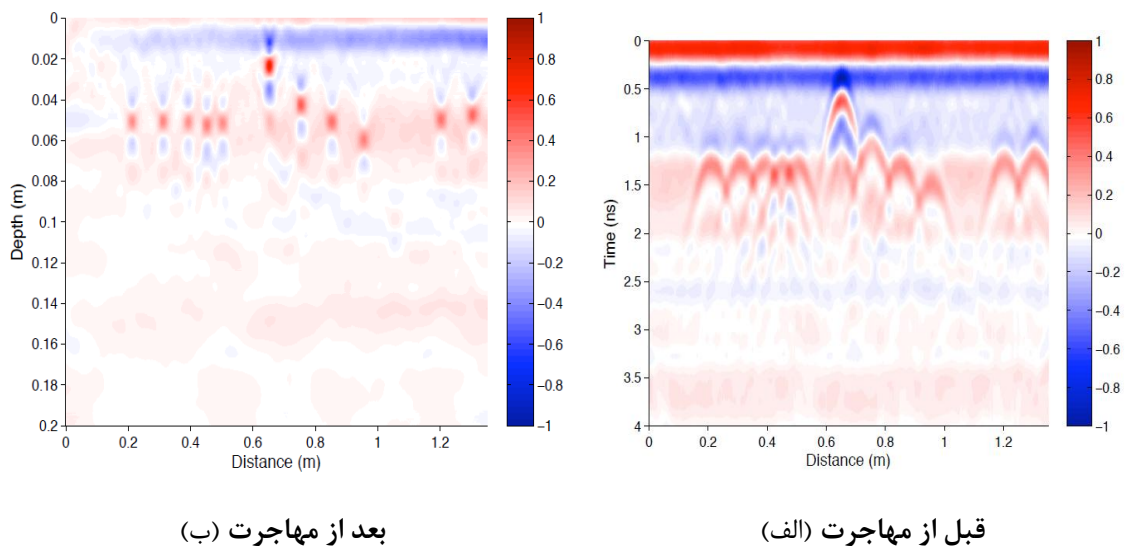
• فیلتر مهاجرت

در مقاطع GPR فرض این‌که رخدادهای ثبت شده بر روی تریس‌های بازگشتی، دقیقاً در زیر نقطه برداشت واقع شده‌اند، به دلیل این‌که آنتن‌های GPR امواج الکترومغناطیسی را به صورت یک مخروط سه بعدی پیچیده ارسال و دریافت می‌کنند، نادرست است (شکل ۳-۱۱). در نتیجه یک رخداد ثبت شده بر روی تریس‌های بازتاب یافته می‌تواند از هر کجای مخروط باشد [۶]. مهاجرت، واهمامیخت فضایی است

که تأثیر جهت‌گیری منبع و گیرنده را بر روی داده‌های بازتاب شده، حذف می‌کند. هدف از به‌کارگیری مهاجرت بازسازی توزیع صحیح بازتاب کننده‌ها زیر سطح به‌صورت هندسی است [۲۹]. در اثر اعمال تصحیح مهاجرت، سیگنال‌های پخش شده متمرکز می‌شوند. همانند تبدیل یک هذلولی به یک هدف نقطه‌ای [۷۳]. در شکل ۱۲-۳ الف و ب مقاطع بدون اعمال فیلتر مهاجرت (شکل ۱۲-۳ الف) و با اعمال آن (شکل ۱۲-۳ ب) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۱-۳: یک رویداد ثبت شده بر روی تریس‌های بازتاب یافته می‌تواند از هرکجای مخروط باشد. در یک مقطع مهاجرت نیافته GPR، رویدادها مستقیماً به زیر فرستنده - گیرنده نسبت داده می‌شود [۶].



شکل ۱۲-۳: نمایش کاربرد پردازش مهاجرت [۶۱].

۳-۷- سایر روش‌های پردازشی

تا به حال روش‌های مهم پردازشی که برای استفاده در مقاطع GPR ضروری می‌باشند، توضیح داده شد. در این قسمت به معرفی فهرست‌وار چند روش پردازشی دیگر و کاربردهای‌شان پرداخته می‌شود که به‌علت غیر ضروری بودن و عدم استفاده در این پایان‌نامه از بسط و تشریح آن‌ها خودداری شده است.

- تصحیح ارتفاع یا توپوگرافی

اگر داده‌ها از سطح هموار برداشت نشده باشند، بعضی از انواع تصحیح توپوگرافی مورد نیاز خواهد بود تا داده‌ها را در موقعیت صحیح فضایی قرار دهد.

- تحلیل سرعت و تبدیل عمق

تاکنون روش‌های پردازشی فقط در حوزه زمان اعمال شدند و داده‌ها مستقیماً به عمق ربط داده نمی‌شدند. به‌منظور تبدیل مقاطع زمانی به مقاطع عمقی، که برای تفسیرهای واقعی و تصحیح ارتفاع نیاز است، تخمین دقیقی از میانگین سرعت زیر زمین را می‌بایست به‌وسیله برداشت‌هایی با نقطه میانی مشترک (CMP) و یا تحلیل هذلولی سرعت به‌دست آورد [۲۹].

- واهمامیخت

این نوع پردازش، یک فیلتر حوزه زمان می‌باشد که دقت مقاطع را با فشرده کردن موجک‌های GPR به شکل باریک و واضح افزایش می‌دهد. به‌عبارت دیگر این فیلتر برای حذف اثرات ناشی از موجک منبع در داده‌های ثبت شده به‌کار می‌رود [۷۳].

فصل چهارم

روش مدل سازی عددی تفاضل محدود

۴-۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در علوم رایانه‌ای و رشد نرم‌افزارهای کاربردی، امروزه برای محاسبه و شبیه‌سازی مسائل پیچیده‌ی علوم گوناگون، روش‌های عددی به‌عنوان جایگزینی برای حل تحلیلی مسائل پیچیده‌تر به کار می‌روند. حل مسائل الکترومغناطیس با کمک تکنیک‌های رایانه‌ای و برنامه نویسی به نام الکترومغناطیس عددی خوانده می‌شود [۷۴].

در سال‌های اخیر، روش‌های عددی برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی از روش‌های تحلیلی پیشی گرفته است. راه‌کارهای تحلیلی تنها در مسائل پایه‌ای با هندسه‌های ساده، یک بعدی و متقارن کاربرد داشته‌اند و در اکثر مسائل کاربردی با شرایط پیچیده محیطی و مرزی که به مسائل واقعی و طبیعی نزدیک‌تر هستند، قابل اجرا نمی‌باشند [۴۸، ۷۵]. در نتیجه امروزه در حوزه‌های مختلف علوم و فن‌آوری میدان‌های الکترومغناطیسی، پرداختن به مقوله روش‌های عددی به‌عنوان راه‌حل جدی برای مسائل الکترومغناطیس و طراحی سامانه‌های الکترونیکی، اجتناب‌ناپذیر است. با نگرش عددی به حل معادلات ماکسول، میدان‌ها را در حوزه زمانی و هم‌چنین در حوزه فرکانسی می‌توان به‌صورت عددی تحلیل کرده و مقادیر کمی آن‌ها را به‌دست آورد. در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰، چندین آژانس دفاعی آمریکا به محدودیت‌های حوزه فرکانس و معادلات انتگرالی در حل معادلات ماکسول پی بردند. این امر به جست‌وجوی بیش‌تر در مورد روش‌های جدید تحلیل حوزه زمان انجامید [۷۶].

روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) که توسط یی^۱ در سال ۱۹۶۶ ارائه شده بود، اولین تکنیک از این دسته محسوب می‌شود [۷۷]. از آن جایی که در این تحقیق برای انجام مدل‌سازی پیشرو از روش تفاضل محدود دو بعدی در حوزه زمان استفاده شده است، بنابراین در این فصل به‌طور مفصل به تئوری این روش پرداخته شده است.

¹ Yee

۴-۲- پایه و اساس رویکرد مدل سازی تفاضل محدود

روش تفاضل محدود اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط تام^۱ تحت عنوان "روش مربع‌ها" برای حل معادلات هیدرودینامیکی غیر خطی ارائه شد. سپس این روش در حل مسائل گوناگونی به کار گرفته شد. روش تفاضل محدود مبتنی بر تخمین توابع دیفرانسیلی به وسیله معادلات تفاضلی است. این معادلات به شکل جبری بوده که مقدار متغیر وابسته در یک نقطه را با استفاده از مقادیر نقاط مجاور، تخمین می‌زند. اولین بار "بی" با معرفی سلول بی توانست روش تفاضل محدود را در حل معادلات ماکسول به کار گیرد.

۴-۳- ساختار روش تفاضل محدود

در این قسمت به نحوه تخمین روش تفاضل محدود برای یک معادله دیفرانسیل معین پرداخته می‌شود. این روش مبتنی بر تخمین عددی مشتقات می‌باشد. می‌توان مشتق تابع $f(x)$ در نقطه P (شکل ۴-۱) را به وسیله شیب کمان PB و با سه حالت مختلف محاسبه نمود.

۱- معادله تفاضل پیشرو^۲

$$\frac{df(x_i)}{dx} = \frac{df_i}{dx} \approx \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} \quad (1-4)$$

۲- معادله تفاضل پسرو یا برگشتی^۳

$$\frac{df(x_i)}{dx} = \frac{df_i}{dx} \approx \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} \quad (2-4)$$

۳- معادله تفاضل میانی یا مرکزی^۴

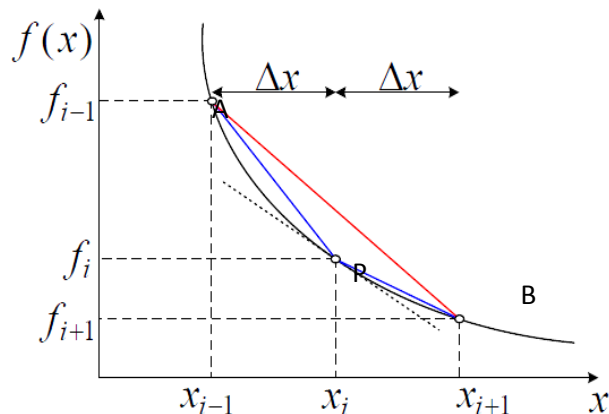
$$\frac{df(x_i)}{dx} = \frac{df_i}{dx} \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3-4)$$

¹ Tom

² Forward difference

³ Backward difference

⁴ Central difference



شکل ۴-۱: تخمین مشتقات تابع به وسیله روش تفاضل محدود پیشرو، پسرو (برگشتی) و میانی (مرکزی) [۷۸].

تخمین مشتقات تابع به وسیله مقدار تابع در دسته‌ای از نقاط گسسته در همسایگی نقطه مورد نظر را تخمین تفاضل محدود می‌نامند. روشی که در بالا آمد نسبتاً ساده می‌باشد. روش جامع‌تر تخمین تفاضل محدود به وسیله بسط تیلور می‌باشد. با برقراری معادلات (۴-۴) و (۵-۴) بسط سری تیلور برای تابع f_{n+1} و f_{n-1} به صورت معادلات (۶-۴) و (۷-۴) می‌باشد [۷۸]:

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \quad (۴-۴)$$

$$x_{n+1} = x_1 + n \Delta x \quad (۵-۴)$$

$$f_{n+1} = f(x_{n+1}) = f(x_1 + n \Delta x) = f_n + (\Delta x)^1 \frac{df_n}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{d^2 f_n}{dx^2} + \frac{(\Delta x)^3}{6} \frac{d^3 f_n}{dx^3} + (O)^4 \quad (۶-۴)$$

$$f_{n-1} = f(x_{n-1}) = f(x_n - \Delta x) = f_n - (\Delta x)^1 \frac{df_n}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{d^2 f_n}{dx^2} - \frac{(\Delta x)^3}{6} \frac{d^3 f_n}{dx^3} + (O)^4 \quad (۷-۴)$$

در روابط فوق $(O)^4$ خطای ناشی از قطع سری است که از درجه ۴ می‌باشد. بنابراین $(O)^4$ نشان دهنده مقادیری است که از $(\Delta x)^4$ کوچک‌تر است. اگر در روابط فوق از عبارتهای بالاتر از درجه $(\Delta x)^1$ صرف-نظر شود داریم:

$$f_{n+1} \approx f_n + \Delta x f'_n \quad (۸-۴)$$

$$f_{n-1} \approx f_n - \Delta x f'_n \quad (۹-۴)$$

در نتیجه:

$$f'_n = \frac{df_n}{dx} \approx \frac{f_{n+1} - f_n}{\Delta x} = \frac{\Delta f_n}{\Delta x} + O(\Delta x)^1 \quad (10-4)$$

$$f'_n = \frac{df_n}{dx} \approx \frac{f_n - f_{n-1}}{\Delta x} = \frac{\nabla f_n}{\Delta x} + O(\Delta x)^1 \quad (11-4)$$

عبارات فوق نشان می‌دهد خطا در معادلات (10-4) و (11-4) از مرتبه 1 می‌باشد. با جمع دو بسط (4-4) و (10) و (11-4) معادله (12-4) به دست می‌آید:

$$f'_n = \frac{df_n}{dx} \approx \frac{f_{n+1} - f_{n-1}}{2\Delta x} = \frac{\delta f_n}{\Delta x} + O^2 \quad (12-4)$$

که در رابطه فوق O^2 خطای ناشی از قطع سری است که از درجه 2 می‌باشد.

• تفاضل مرکزی در گام مکانی $\frac{\Delta x}{2}$

$$\frac{df(x_{n+\Delta x/2})}{dx} = \frac{df_{n+1/2}}{dx} = \frac{f_{n+1} - f_n}{\Delta x} + O^2 \quad (13-4)$$

تخمین‌های تفاضل محدود درجات بالاتر (مشتقات درجه دوم و به بالا) را می‌توان با احتساب جملات بیش‌تری از بسط تیلور محاسبه نمود و اگر تمام جملات بسط تیلور محاسبه شود به جواب دقیق مسأله دست خواهیم یافت. با این وجود به دلایل عملی سری بعد از عبارت درجه 2 قطع می‌شود که یک خطا را به تمام راه‌های تفاضل محدود تحمیل می‌کند [78].

4-4- توسعه روش FDTD

چهار عامل اصلی علت عمده توسعه استفاده از FDTD می‌باشد:

(1) روش FDTD از وارون‌سازی ماتریس‌ها استفاده نمی‌کند. FDTD به علت ماهیت تماماً محاسباتی‌اش، از مشکلاتی که جبر خطی سایر روش‌های تحلیل حوزه فرکانس را به یک میلیون مجهول محدود می‌کند، مبرا است و از این رو مدل‌هایی با یک میلیارد مجهول برای FDTD اجرا شده‌اند. در تئوری هیچ محدودیت برای حد بالایی این عدد وجود ندارد.

۲) FDTD دقیق و پایدار است. منابع خطا در محاسبات FDTD به خوبی شناخته شده‌اند و می‌توان آن‌ها را برای داشتن جواب دقیق‌تر کاهش داد.

۳) FDTD قابل تعمیم برای مسئله غیر خطی است. به علت حوزه زمانی بودن این روش، مسأله غیر خطی بودن به آسانی مدل می‌شود.

۴) روش FDTD سیستماتیک است. تحلیل یک ساختار جدید با این روش به مسأله مش‌بندی تقلیل می‌یابد و دیگر نیازی نیست تا دو مرتبه معادلات پیچیده انتگرالی را بازنویسی کرد. به عنوان مثال FDTD نیازی به محاسبات وابسته به ساختار توابع گرین ندارد.

شاهدی بر مدعای گسترش توجه به FDTD میزان مقالاتی است که پیرامون این موضوع سالانه چاپ می‌گردد. این گسترش با اضافه شدن توجه مهندسان و دانشمندان رشته‌هایی چون سیستم‌های دیجیتال و مدارهای نوری هم‌چنان ادامه خواهد داشت [۷۹].

۴-۵- اصول روش FDTD

- تعیین ابعاد شبکه

اصلی‌ترین قاعده برای تعیین ابعاد شبکه این است که باید به قدر کافی از طول موجی که به ازای آن جواب دقیق می‌خواهیم کوچک‌تر باشد. مسلماً اولین سوالی که پیش می‌آید این است که به چه میزان کوچک‌تر؟ قبل از پاسخ دادن به این سوال باید پرسید که تا چه میزان دقت مورد نیاز است؟ معمولاً ذکر می‌شود که ۱۰ سلول به ازای طول موج بالاترین فرکانس مورد نیاز در نظر گرفته شود. نکته‌ای که به آن باید توجه شود این است که طول موج در مواد مختلف تغییر می‌کند و باید برای تعیین ابعاد شبکه، کاهش طول موج را به ازای افزایش ضریب گذردهی در نظر گرفت. در شرایطی که موادی با ضریب گذردهی بالا وجود دارند استفاده از شبکه‌بندی یکنواخت باعث می‌شود که تعداد شبکه‌های مورد نیاز

بسیار زیاد شوند. در صورتی که نیازی نیست که ابعاد شبکه‌های خارج از این ماده به این میزان کوچک باشند؛ شبکه‌بندی با ابعاد متغیر یکی از روش‌های فایز آمدن بر این مشکل است.

برای درک این که چرا باید ابعاد شبکه‌ها به مراتب از طول موج کم‌تر باشد به این نکته توجه می‌کنیم که قضیه نایکوئیست^۱ بیان می‌دارد که برای آن که بتوان شکل موج را دقیقاً بازسازی کرد نیاز به حداقل دو نمونه در هر طول موج است. اما چون در این جا از تقریب خطی استفاده می‌شود، برای افزایش دقت، نیاز به تعداد بیش‌تری سلول است. دلیل دیگری که برای کوچک در نظر گرفتن ابعاد شبکه‌ها وجود دارد، خطای پاشندگی شبکه‌بندی است که روش FDTD اعمال می‌کند. به‌خاطر تقریب‌های موجود در FDTD امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های متفاوت با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کنند و میزان این پاشندگی به ابعاد شبکه و جهت انتشار نسبت به شبکه‌بندی بستگی دارد. از این رو کاهش ابعاد شبکه این خطا را نیز کاهش می‌دهد. مسأله دیگری که هنگام تعیین ابعاد شبکه‌بندی باید در نظر داشت این است که هندسه مورد نظر با دقت، مدل شود. معمولاً اعمال شرط کوچک‌تر بودن ابعاد شبکه از $1/10$ طول موج خود به خود شرط بالا را برآورده می‌کند مگر آن که برخی اجزای هندسی کوچک‌تر از این میزان در نتیجه‌ی نهایی هدف بررسی باشند.

• تعیین پله زمانی برای پایداری

زمانی که ابعاد شبکه تعیین شد، حداکثر بازه‌ی زمانی از روی شرط پایداری کورانت^۲ تعیین می‌شود. برای فهمیدن شرط کورانت، یک موج تخت را در نظر بگیرید که در یک شبکه FDTD منتشر می‌شود. در یک پله زمانی هر نقطه از این موج نباید از بیش از یک سلول عبور کند، به‌خاطر این که در FDTD در هر پله زمانی امواج می‌توانند فقط از یک سلول به سلول مجاور منتشر شوند. برای آن که پله زمانی به دست آید، جهتی انتخاب می‌شود که موج بیش‌ترین تعداد سلول را در واحد زمان طی کند. این جهت متعامد بر صفحات شبکه FDTD خواهد بود. برای ابعاد شبکه d به شرط آن که تمام شبکه‌ها دارای طول

¹ Nyquist

² Curren

و عرض و ارتفاع یکسان Δu باشند و حداکثر سرعت انتشار برابر v باشد، آن گاه بازه زمانی Δt از رابطه زیر به دست می آید:

$$v\Delta t \leq \frac{\Delta u}{\sqrt{d}} \quad (14-4)$$

برای یک شبکه مستطیلی در حالت کلی تر داریم:

$$V\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (15-4)$$

به طور کلی شرط تساوی نیز نتایجی قابل قبول ارائه می دهد و نیازی به کوچک تر گرفتن بازه زمانی نیست. مثلاً شرط تساوی در مسائل یک بعدی به علت آن که انتشار را بهتر مدل می کند، باعث حداقل شدن خطای ناشی از پاشندگی عددی می گردد. اگر چه در شرایطی که رسانندگی زیادی وجود داشته باشد یا اثرات غیر خطی حضور داشته باشند، باید پله زمانی را بسیار کوچک تر گرفت. معمولاً v را حداکثر سرعت انتشار یعنی c (سرعت موج الکترومغناطیس در هوا) قرار می دهند، تا شرط کورانت در تمام نقاط برقرار باشد [۸۰].

۴-۶- معادلات الگوریتم بی مبتنی بر روش FDTD

در این بخش الگوریتم ارائه شده توسط بی مورد بررسی قرار داده می شود. گرچه روش های متنوعی پس از بی ارائه شد ولی هم چنان روش ارائه شده توسط وی اصلی ترین روش محسوب می گردد. الگوریتم بی دارای استفاده بسیاری می باشد، زیرا پایه ی آن بسیار قوی است. از جمله:

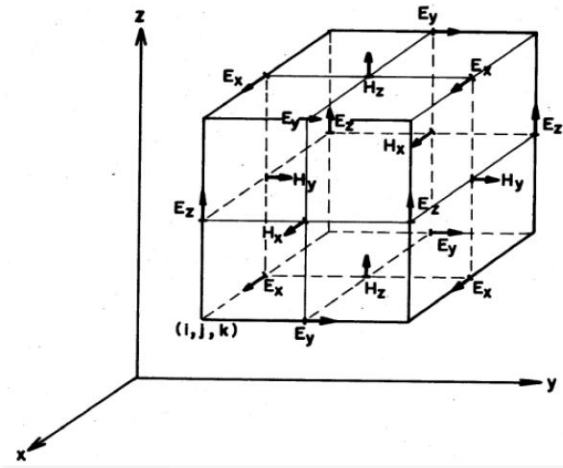
۱- الگوریتم بی هم زمان به حل میدان های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از معادلات کرل ماکسول می پردازد (بر عکس برخی از روش ها که فقط به حل میدان الکتریکی یا مغناطیسی بر اساس حل معادله موج می پردازد). این امر باعث می شود که حل معادله دقیق تر بوده و در عین حال با آن می توان مسائلی که شرایط مرزی هم زمان الکتریکی و مغناطیسی را طلب می کنند به سادگی پیاده سازی نمود.

۲- همان‌طور که در شکل ۴-۱ دیده می‌شود، در شبکه‌بندی بی هر میدان الکتریک توسط ۴ میدان چرخان مغناطیسی و هر میدان مغناطیسی توسط ۴ میدان چرخان الکتریکی احاطه شده است. این شبکه‌بندی دید واضحی نسبت به آنچه که در حقیقت رخ می‌دهد، به نمایش می‌گذارد و به کمک آن می‌توان هم‌زمان شکل انتگرالی و دیفرانسیلی معادلات ماکسول را مشاهده کرد. شکل انتگرالی معادلات ماکسول کاندیدای بسیار خوبی برای بیان شرایط مرزی و برخی تکینگی‌ها است.

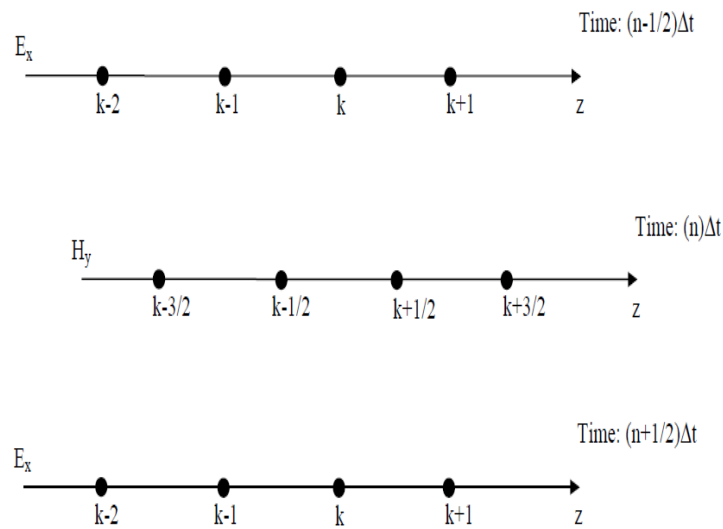
به‌علاوه تفاضل محدود فضایی استفاده شده در سلول بی از نوع تفاضل مرکزی است و دارای دقت مرتبه دو می‌باشد. در ضمن به علت ساختار الگوریتم نیازی به نوشتن شرایط مرزی در محل تماس دو محیط متفاوت نمی‌باشد زیرا شرایط مرزی به شرط آن که سطوح مکعبی شبکه موازی با مرز مورد نظر باشند، خود به خود برآورده می‌شوند. این امر موجب می‌شود که سطوح مرزی به اجبار به‌صورت پله پله با سطح واقعی تقریب زده شوند و دقت این تقریب بستگی به قدرت تفکیک فضایی یا به عبارتی تعداد نقاط شبکه دارد. موقعیت مؤلفه‌های E و H در شبکه فضایی بی (شکل ۴-۱) و همچنین معادلات تفاضل مرکزی حاکم بر آن‌ها به‌طور ضمنی دو معادله دیورژانس ماکسول را برآورده می‌کند.

هم‌چنین الگوریتم زمانی این روش غیر اِتلافی است. یعنی این‌که مدهای موج منتشره در شبکه‌بندی به خاطر یک پدیده غیر فیزیکی میرا نمی‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴-۲ دیده می‌شود، الگوریتم بی میدان‌های E و H را نیز در زمان به‌طور یک در میان قرار می‌دهد که به آن آرایش جهش قورباغه‌ای^۱ گویند. این بدان مفهوم است که ابتدا تمامی مقادیر میدان E در فضا بر اساس مقدار میدان H که در لحظه قبل به‌دست آمده، محاسبه شده و در حافظه قرار داده می‌شود. سپس از طریق میدان E محاسبه شده، میدان H به‌دست می‌آید و به همین شکل به‌دست آوردن میدان‌های E و H در همه مراحل تا زمانی که مراحل زمانی خاتمه یابد، ادامه می‌یابد [۷۹].

¹ Leapfrog



شکل ۴-۲: سلول واحد یی به همراه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی [۷۹].



شکل ۴-۳: آرایش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و آرایش زمانی جهش فورباغه‌ای در حالت یک بعدی [۷۹].

برای حل معادلات ماکسول در محیط بدون بار الکتریکی، ابتدا این معادلات به شکل زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{E} - \frac{1}{\mu} (\bar{M}_{source} + \sigma^* \bar{H}) \quad (16-4)$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \bar{H} - \frac{1}{\varepsilon} (\bar{J}_{source} + \sigma \bar{E}) \quad (17-4)$$

که در آن σ و σ^* به ترتیب رسانندگی الکتریکی و مغناطیسی بوده و M_{source} ^۲ و J_{source} نیز منابع جریان مغناطیسی و الکتریکی می‌باشند. با نوشتن معادلات بالا بر حسب مؤلفه‌های بردارها در دستگاه مختصات کارتزین، معادلات پایه‌ای که بر اساس آن‌ها الگوریتم FDTD کار می‌کند، به دست می‌آید. پس داریم:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - (M_{source_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (18-4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) - (M_{source_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (19-4)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - (M_{source_z} + \sigma^* H_z) \right] \quad (20-4)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) - (J_{source_x} + \sigma E_x) \right] \quad (21-4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) - (J_{source_y} + \sigma E_y) \right] \quad (22-4)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - (J_{source_z} + \sigma E_z) \right] \quad (23-4)$$

در روابط استفاده شده در الگوریتم بی‌نیازی به استفاده از معادلات دیورژانس میدان الکتریکی و مغناطیسی (به شرط عدم حضور بارهای الکتریکی و مغناطیسی) نیست، زیرا معادلات دیورژانس معادلات مستقلی نبوده و از دو رابطه کرل و خواص مربوط به این عملگر قابل حصول هستند. البته باید به این نکته توجه داشت که اگر شبکه‌بندی فضایی به درستی صورت نگیرد و یا به عبارتی تفاضل‌های محدودی که برای شبیه‌سازی عملگر کرل به کار می‌رود مناسب نباشند، آن‌گاه این امکان وجود دارد که دیورژانس میدان الکتریکی یا مغناطیسی صفر نشود و جوابی غیر فیزیکی به دست آید [۸۱].

¹ equivalent magnetic loss

² equivalent magnetic current density

۴-۶-۱- روش FDTD در حالت دو بعدی

اگر ساختار هدف در جهت عمق (z) تا بی‌نهایت ادامه داشته باشد (بدون آن که تغییراتی در خواص محیط وجود داشته باشد) و همچنین انتشار در صفحه افقی xy باشد، آن‌گاه شکل موج در راستای z بدون تغییر خواهد بود به گونه‌ای که مشتقات مؤلفه‌های میدان در راستای z صفر خواهد بود. در این صورت معادلات کرل ماکسول که در بالا آمده است، به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - (M_{source_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (24-4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) - (M_{source_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (25-4)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - (M_{source_z} + \sigma^* H_z) \right] \quad (26-4)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} \right) - (J_{source_x} + \sigma E_x) \right] \quad (27-4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} \right) - (J_{source_y} + \sigma E_y) \right] \quad (28-4)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - (J_{source_z} + \sigma E_z) \right] \quad (29-4)$$

۴-۶-۱-۱- مد انتشاری TMz

می‌توان ۶ معادله (۲۴-۴) تا (۲۹-۴) را به ۲ دسته ۳ تایی تقسیم کرد. اگر سه معادله زیر را به تنهایی در نظر بگیرید، آن‌گاه می‌توان گفت که ساختار در مد انتشاری میدان مغناطیسی عرضی (TM) نسبت به z یعنی TMz قرار دارد [۸۱].

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(-\frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - (M_{source_x} + \sigma^* H_x) \right] \quad (30-4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) - (M_{source_y} + \sigma^* H_y) \right] \quad (31-4)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - (J_{source_z} + \sigma E_z) \right] \quad (32-4)$$

۴-۶-۱-۲- مد انتشاری TEz

سه معادله زیر را در نظر بگیرید به گونه‌ای که فقط H_z ، E_y ، E_x در معادلات حضور داشته باشند، آن-
گاه می‌توان گفت که مد انتشاری میدان الکتریکی عرضی (TE) نسبت به z یعنی TEz وجود دارد [۸۱].

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} \right) - \left(J_{source_x} + \sigma E_x \right) \right] \quad (۳۳-۴)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(-\frac{\partial H_z}{\partial x} \right) - \left(J_{source_y} + \sigma E_y \right) \right] \quad (۳۴-۴)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - \left(M_{source_z} + \sigma^* H_z \right) \right] \quad (۳۵-۴)$$

توجه کنید که معادلات دو مد TMz و TEz هیچ مؤلفه میدان مشترکی ندارند. از این‌رو در محیط‌های همسانگرد یا محیط‌های ناهمسانگردی که تانسور گذردهی یا تراوایی آن‌ها هیچ مؤلفه غیر قطری ندارد، این دو دسته معادله کاملاً از یکدیگر مستقل بوده و جداگانه حل می‌شوند. در واقع می‌توان شرایط اولیه مسأله را به این دو حالت تجزیه کرد و سپس هر کدام از این دو دسته معادله را جداگانه حل نمود و در نهایت برای به‌دست آوردن جواب کلی، از برهم نهی جواب‌های حاصل استفاده کرد [۸۱].

۴-۶-۲- معرفی نماد گذاری به‌کاررفته

برای نمایش یک تابع در نقطه‌ی $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ در لحظه $n\Delta t$ از نماد زیر استفاده می‌شود:

$$u^n(i, j, k) \equiv u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \quad (۳۶-۴)$$

برای گرفتن مشتقات در زیر از تفاضل محدود مرکزی استفاده شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u^n(i+\frac{1}{2}, j, k) - u^n(i-\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} + O[(\Delta x^2)] \quad (۳۷-۴)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u^{n+1/2}(i, j, k) - u^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O[(\Delta t^2)] \quad (۳۸-۴)$$

۴-۶-۳- روابط تفاضل محدود برای معادلات ماکسول در سه بعد

با توجه به نماد گذاری بالا و همچنین معادلات کرل ماکسول که قبلاً به صورت تغییر یافته بیان شده بودند، شکل تفاضلی معادلات ماکسول به دست آورده شده است. به عنوان مثال معادله کرل زیر که برای مؤلفه E_x نوشته شده است، در نظر گرفته شود [۸۱]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) - (J_{source} + \sigma E_x) \right] \quad (۳۹-۴)$$

با جای گذاری مشتقات داریم:

$$\frac{E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} - E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = \quad (۴۰-۴)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{i, j+1/2, k+1/2}} \left(\frac{H_{z \ i, j+1, k+1/2}^n - H_{z \ i, j, k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_{y \ i, j+1/2, k+1}^n - H_{y \ i, j+1/2, k}^n}{\Delta z} - J_{source \ x \ i, j+1/2, k+1/2}^n - \sigma_{i, j+1/2, k+1/2} E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^n \right)$$

حال با توجه به این که می توان $E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^n$ را به صورت میانگین آن در دو لحظه ی اطراف آن نوشت، داریم:

$$E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^n = \frac{E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} + E_{x \ i, j+1/2, k+1/2}^{n-1/2}}{2} \quad (۴۱-۴)$$

پس معادله کرل را می توان به صورت زیر باز نویسی کرد:

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - E_x^{n-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} = \quad (42-4)$$

$$\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \left(-J_{source\ x}^n_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \left(\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} + E_x^{n-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}{2} \right) \right) + \left(\frac{H_z^n_{i,j+1,k+\frac{1}{2}} - H_z^n_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y^n_{i,j+\frac{1}{2},k+1} - H_y^n_{i,j+\frac{1}{2},k}}{\Delta z} \right)$$

که پس از بردن $E_x^{n+1/2}$ به یک طرف معادله و حل بر حسب آن داریم:

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}} \right) E_x^{n-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \quad (43-4)$$

$$+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}} \right) \cdot \left(\frac{H_z^n_{i,j+1,k+\frac{1}{2}} - H_z^n_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y^n_{i,j+\frac{1}{2},k+1} - H_y^n_{i,j+\frac{1}{2},k}}{\Delta z} - J_{source\ x}^n_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \right)$$

به طریق مشابه می توان معادلات مربوط به سایر مؤلفه های E و H را نیز به دست آورد. نتیجه نهایی در زیر

آورده شده است [۸۱].

$$E_y^{n+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}} = \quad (44-4)$$

$$\left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}}}} \right) E_y^{n-\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}}}}{1 + \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}} \Delta t}{2\varepsilon_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}}}} \right) \cdot \left(\frac{H_x^n_{i-\frac{1}{2},j+1,k+1} - H_x^n_{i-\frac{1}{2},j+1,k}}{\Delta z} - \frac{H_z^n_{i,j+1,k+\frac{1}{2}} - H_z^n_{i-1,j+1,k+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - J_{source\ y}^n_{i-\frac{1}{2},j+1,k+\frac{1}{2}} \right)$$

$$E_z^{n+1/2}{}_{i-1/2,j+1/2,k+1} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i-1/2,j+1/2,k+1}\Delta t}{2\varepsilon_{i-1/2,j+1/2,k+1}}}{1 + \frac{\sigma_{i-1/2,j+1/2,k+1}\Delta t}{2\varepsilon_{i-1/2,j+1/2,k+1}}} \right) \quad (45-4)$$

$$+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i-1/2,j+1/2,k+1}}}{1 + \frac{\sigma_{i-1/2,j+1/2,k+1}\Delta t}{2\varepsilon_{i-1/2,j+1/2,k+1}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{H_y{}^n_{i,j+1/2,k+1} - H_y{}^n_{i-1,j+\frac{1}{2},k+1}}{\Delta x} \\ - \frac{H_x{}^n_{i-1/2,j+1,k+1} - H_x{}^n_{i-1/2,j,k+1}}{\Delta y} \\ - J_{source_z}{}^n_{i-1/2,j+1/2,k+1} \end{array} \right)$$

$$H_x^{n+1}{}_{i-1/2,j+1,k+1} \quad (46-4)$$

$$= \left(\frac{1 - \frac{\sigma^*_{i-1/2,j+1,k+1}\Delta t}{2\mu_{i-1/2,j+1,k+1}}}{1 + \frac{\sigma^*_{i-1/2,j+1,k+1}\Delta t}{2\mu_{i-1/2,j+1,k+1}}} \right) H_x{}^n_{i-1/2,j+1,k+1}$$

$$+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i-1/2,j+1,k+1}}}{1 + \frac{\sigma^*_{i-1/2,j+1,k+1}\Delta t}{2\mu_{i-1/2,j+1,k+1}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{E_y{}^{n+1/2}{}_{i-1/2,j+1,k+3/2} - E_y{}^{n+1/2}{}_{i-\frac{1}{2},j+1,k+1/2}}{\Delta z} \\ - \frac{E_z{}^{n+1/2}{}_{i-1/2,j+3/2,k+1} - E_z{}^{n+1/2}{}_{i-1/2,j+1/2,k+1}}{\Delta y} \\ - M_{source_x}{}^{n+1/2}{}_{i-1/2,j+1,k+1} \end{array} \right)$$

$$H_y^{n+1}{}_{i,j+1/2,k+1} \quad (47-4)$$

$$= \left(\frac{1 - \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1}\Delta t}{2\mu_{i,j+1/2,k+1}}}{1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1}\Delta t}{2\mu_{i,j+1/2,k+1}}} \right) H_y{}^n_{i,j+1/2,k+1}$$

$$+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j+1/2,k+1}}}{1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1/2,k+1}\Delta t}{2\mu_{i,j+1/2,k+1}}} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \frac{E_z{}^{n+1/2}{}_{i+1/2,j+1/2,k+1} - E_z{}^{n+1/2}{}_{i-\frac{1}{2},j+1/2,k+1}}{\Delta x} \\ - \frac{E_x{}^{n+1/2}{}_{i,j+1/2,k+3/2} - E_x{}^{n+1/2}{}_{i,j+1/2,k+1/2}}{\Delta z} \\ - M_{source_y}{}^{n+1/2}{}_{i,j+1/2,k+1} \end{array} \right)$$

و در نهایت:

$$H_z^{n+1}{}_{i,j+1,k+1/2} = \left(\frac{1 - \frac{\sigma^*_{i,j+1,k+1/2} \Delta t}{2\mu_{i,j+1,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1,k+1/2} \Delta t}{2\mu_{i,j+1,k+1/2}}} \right) H_z^n{}_{i,j+1,k+1/2} \quad (4-48)$$

$$+ \left(\frac{\frac{\Delta t}{\mu_{i,j+1,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma^*_{i,j+1,k+1/2} \Delta t}{2\mu_{i,j+1,k+1/2}}} \right) \cdot \left(\frac{\frac{E_x^{n+1/2}{}_{i,j+3/2,k+1/2} - E_x^{n+1/2}{}_{i,j+1/2,k+1/2}}{\Delta y}}{-\frac{E_y^{n+1/2}{}_{i+1/2,j+1,k+1/2} - E_y^{n+1/2}{}_{i-1/2,j+1,k+1/2}}{\Delta x}} - M_{source_z}^{n+1/2}{}_{i,j+1,k+1/2} \right)$$

با استفاده از معادلات تفاضلی بالا، هر مقدار میدان در لحظه بعد تنها توسط مقادیر مربوطه در زمان‌های قبلی در نقاط مجاور در شبکه محاسبه می‌شوند. بنابراین برای هر نقطه مقدار جدید در هر تکرار به دست می‌آید و اگر از n پردازنده استفاده شود n نقطه در هر تکرار مقدار جدید خود را می‌گیرد [۸۱].

۴-۷- شرایط مرزی در محیط شبیه‌سازی در روش FDTD

در روش FDTD تنها بخش کوچکی از فضا را می‌توان شبکه‌بندی (مش‌بندی) نموده و امواج الکترومغناطیسی را در آن شبیه‌سازی کرد زیرا حافظه و سرعت پردازش در محدوده، امکان شبیه‌سازی فضای بی‌نهایت را از ما می‌گیرد. حال سوالی که پیش می‌آید این است که اگر مسأله مورد بحث در برگیرنده‌ی محیطی نامحدود بود چه باید کرد؟ در این صورت باید به دنبال شرایطی در مرز محیط شبیه‌سازی خود بود که همانند فضای بی‌نهایت عمل کند یعنی امواجی از جهات گوناگون که به سوی آن تابانده می‌شوند را از خود عبور دهد بدون آن‌که بازتابی رخ دهد. در حالت کلی همیشه باید در نظر داشت که معادلات ماکسول که به صورت تفاضلی نوشته شده‌اند را نمی‌توان در مرز محیط شبیه‌سازی شده به کار برد. زیرا معادلات تفاضلی از نوع مرکزی هستند. بنابراین برای محاسبه مقادیر میدان بر روی مرز به مقادیر میدان در اطراف مرز که شامل میدان‌ها خارج از مرز هم می‌باشد، نیاز است. این امر به ما دیکته می‌کند که نحوه‌ی محاسبه میدان‌ها در مرز به گونه‌ای دیگر انجام شود. در اکثر موارد شرط مرزی مورد

نیاز شرطی است که بتواند فضای بی کران را شبیه‌سازی کند. در واقع چنین مرزی باید یک جذب کننده کامل امواج الکترومغناطیسی باشد. به این جذب کننده‌های مصنوعی شرایط مرزی جذب گفته می‌شود (ABCs)؛ چرا که این شرایط موج‌های تابشی و پراکنده شده را جذب می‌کنند. میزان صحت ABC-ها است که مقدار صحت روش FDTD را مشخص می‌کند. راه‌های فراوانی برای پیاده‌سازی ABCها پیشنهاد شده است. برخی از این راه‌ها به مرزهای جذب تحلیلی معروف‌اند. در این روش‌ها معادلات حاکم بر امواج در مرز محیط به گونه‌ای تغییر می‌یابد که امواج بازتابی وجود نداشته باشند. در واقع با استفاده از جبر عملگرها می‌توان به این گونه مرزها دست یافت [۸۲]. این روش‌ها اگر چه کاربرد فراوانی را داشته‌اند ولی عمدتاً به علت آن که میزان بازتاب از آن‌ها در زوایای تابش زیاد بزرگ و غیر قابل قبول می‌شود، تقریباً منسوخ شده‌اند. دسته دیگر از روش‌های پیاده‌سازی شرایط مرزی جذب استفاده از لایه انطباقی کامل (PML)^۱ می‌باشد. در این دسته از روش‌ها یک لایه با اتلاف بسیار بالا را به گونه‌ای در مرز قرار می‌دهند که امپدانس آن با امپدانس محیط داخل شبکه‌بندی، انطباق کامل داشته باشد. بدیهی است که اگر امپدانس دو محیط یکسان باشد، آن‌گاه از محل جدایی دو محیط هیچ بازتابی رخ نخواهد داد. اگر یکی از این دو محیط دارای اتلاف باشد و ضخامت کافی هم داشته باشد، به طوری که میدان الکترومغناطیسی در آن به طور تقریباً کامل از بین برود، آن‌گاه مستقل از آن که در انتهای مرز محیط دارای اتلاف، چه شرط مرزی قرار داده شده است، هیچ بازتابی وجود نخواهد داشت، زیرا میدانی در آن‌جا وجود ندارد که بخواهد بازتاب کند. معمولاً در این روش‌ها اتلاف به میزانی گرفته می‌شود که بتوان با یک یا حداکثر دو خانه شبکه‌بندی از جنس PML میدان را به صفر رساند [۸۳].

¹ Perfect Matched Layer

فصل پنجم

شبیه‌سازی پاسخ مدل‌های مصنوعی

۵-۱- مقدمه

به منظور راستی آزمایی مدل سازی پیشرو به روش تفاضل محدود، پاسخ سیستم GPR برای مدل های مصنوعی متداول در بررسی ها و تحقیقات ژئوتکنیکی و شناسایی ساختار، نظیر استوانه افقی منفرد (معرف انواع لوله ها و قنات ها)، زمین چند لایه ای (معرف تخته^۱) و یک شیء با سطح مقطع دو بعدی به شکل چند ضلعی دلخواه (معرف فضاهای خالی) شبیه سازی شد. هدف از مدل سازی پیشرو پاسخ GPR یک ساختار زیرسطحی شناخته شده، بررسی تأثیر ویژگی های الکتریکی و در نتیجه سنگ شناختی یا آب شناختی آن ساختار روی پاسخ های GPR برداشت شده از آن است. بنابراین مدل سازی های عددی پاسخ GPR مدل های مصنوعی با هندسه مشخص، می توانند در تعیین ارتباط بین ویژگی های زیرسطحی و داده های GPR، مفید واقع شوند. در این فصل مثال هایی از کاربرد نرم افزارهای GprMax2D و Reflexw برای مدل های مصنوعی در روش GPR ارائه شده است. در این دو نرم افزار از روش FDTD برای مدل سازی مقاطع و تریس های GPR استفاده شده است؛ که مباحث تئوری و روابط ریاضی آن ها به طور کامل در فصل ۴ توضیح داده شد.

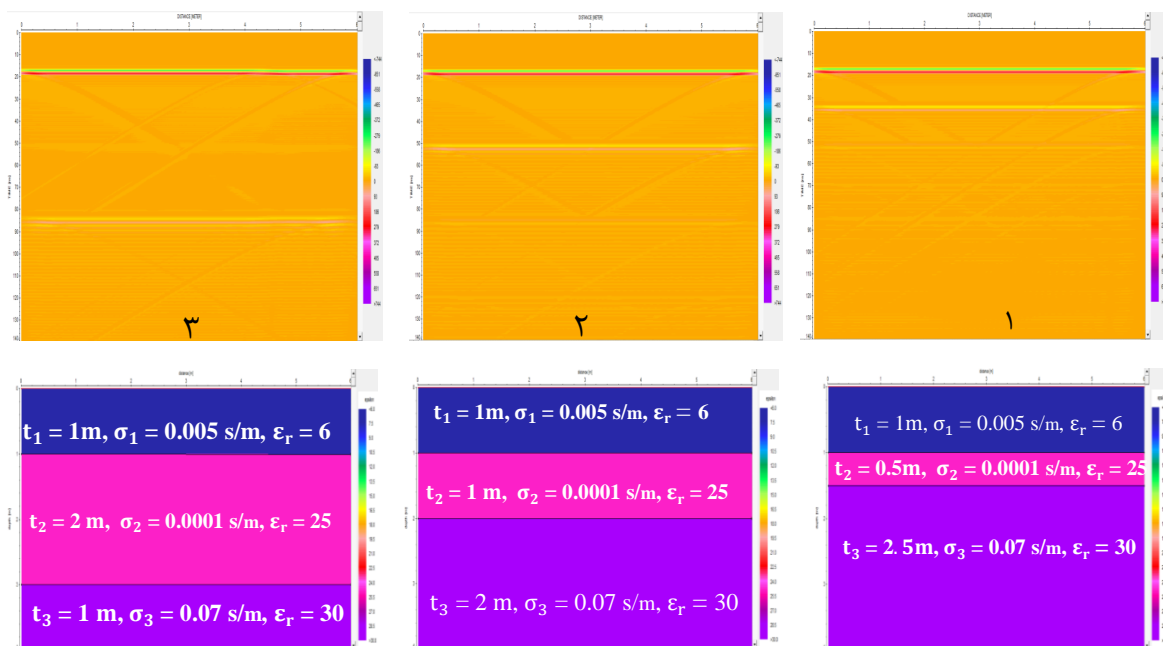
همچنین در این فصل به تهیه ی مقاطعی از اهداف مدفون به ویژه لوله های مدفون با مشخصات مختلف پرداخته شده و به تفسیر تأثیر پارامترهای مختلف نظیر عمق، قطر، جنس لوله، سیال محتوی و سایر عوامل دیگر پرداخته شده است.

۵-۲- مدل سازی پاسخ سیستم GPR برای مدل زمین لایه ای

در شکل ۵-۱ مدل هندسی و فیزیکی (در بخش پایینی شکل) و نتایج مدل سازی سامانه GPR (در ردیف بالای شکل) برای سه مدل زمین لایه ای، آورده شده است. میزان فرکانس مرکزی موج ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز بوده و هدف، کنترل صحت پاسخ GPR برای تعیین کف و ضخامت لایه های یک زمین سه لایه ای است که در آن لایه رویی از جنس بتن، لایه میانی از جنس خاک ماسه ای مرطوب و لایه زیرین از جنس خاک ماسه ای اشباع از آب می باشد. ابعاد مدل ۶×۴ متر بوده و ضخامت لایه بتنی در هر سه مورد

¹ Slab

برابر با یک متر است. نتایج شبیه‌سازی (ردیف بالای شکل) نشان می‌دهد که پاسخ مدل‌سازی GPR مرزهای مشترک افقی لایه‌ها، به صورت رخدادهای افقی است و ضخامت لایه رویی (بتن) در هر سه پاسخ، مطابق انتظار بوده و ضخامت لایه‌های دوم و سوم نیز متناسب با ضخامت آن‌ها در مدل‌های فیزیکی می‌باشند. نتایج این شبیه‌سازی در عمل برای تعیین کف و ضخامت لایه‌های بتنی با استفاده از سیستم‌های GPR مفید خواهد بود.



شکل ۵-۱: بررسی تأثیر ضخامت لایه‌ها، بر روی پاسخ GPR. برای یک مدل زمین سه لایه‌ای، با ثابت ماندن شرایط دیگر

۵-۳- بررسی تأثیر تغییرات توأم گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی بر

روی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای

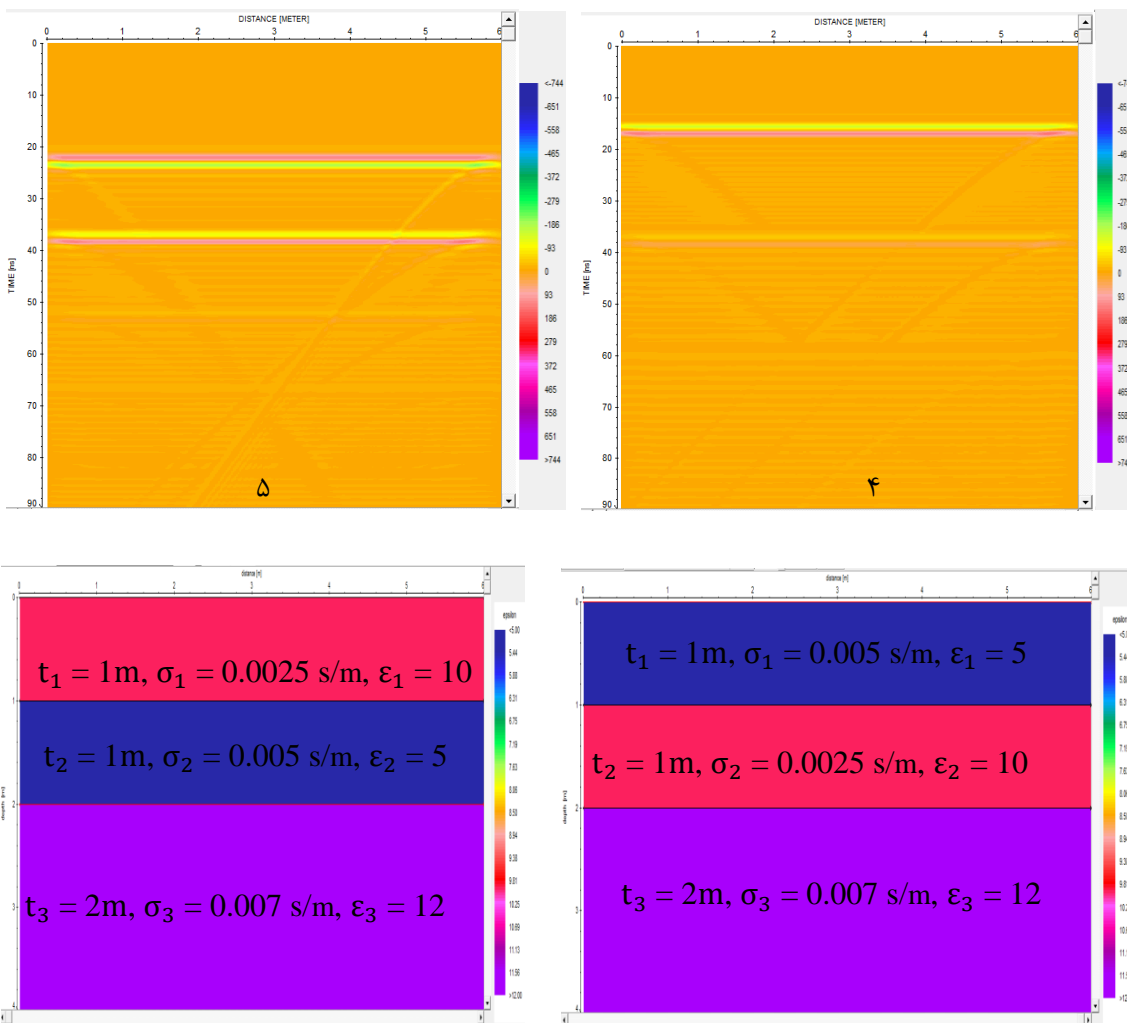
برای این منظور پاسخ‌های GPR برای دو مدل زمین سه لایه‌ای مدل‌سازی گردید. ویژگی‌های فیزیکی و هندسی مدل در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. در مدل ۴ میزان گذردهی دی‌الکتریک لایه دوم دو برابر مقدار لایه اول و میزان رسانندگی الکتریکی لایه دوم نصف مقدار لایه اول می‌باشد و در مدل ۵ نسبت‌ها عکس شده است. به بیان ریاضی برای مدل ۴ داریم: $\epsilon_2 = 2\epsilon_1$ و $\sigma_1 = 0.5\sigma_2$ و برای مدل ۵ داریم: $\epsilon_2 = 0.5\epsilon_1$ و $\sigma_2 = 2\sigma_1$. تمامی شرایط دیگر برای هر دو مدل یکسان بوده و مقدار تراوایی مغناطیسی تمام لایه‌ها در هر دو مدل برابر با تراوایی مغناطیسی در مقدار فضای آزاد است (یعنی $\mu = \mu_0$).

میزان فرکانس مرکزی موج ارسالی، ۲۵۰ مگاهرتز بوده و راستای پیمایش، عمود بر امتداد هدف توجیه شده است. پاسخ‌های GPR حاصل از دو مدل زمین سه لایه‌ای مورد بحث در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. این پاسخ‌ها مرزهای لایه‌های افقی را به صورت رخداد‌های خطی افقی نشان می‌دهند (به‌طور کلی پاسخ GPR برای هر ناهمگنی افقی به صورت یک رخداد افقی است). موقعیت رخداد خطی افقی اول (مربوط به فصل مشترک لایه‌های اول و دوم) در پاسخ مدل ۵ نسبت به مدل ۴ در افق پایین‌تری قرار گرفته است، که دلیل آن کم‌تر بودن مقدار نسبت گذردهی دی‌الکتریک لایه دوم به لایه اول، در مدل ۵ نسبت به مدل ۴ می‌باشد. به همین دلیل قطبیت سیگنال بازتابی در مورد رخداد خطی افقی اول در مدل ۵ نسبت به مدل ۴، معکوس شده است.

شدت بازتاب رخداد خطی افقی دوم (مربوط به فصل مشترک لایه‌های دوم و سوم) در مدل ۴ نسبت به مدل ۵ ضعیف‌تر است که دلیل آن کم‌تر بودن اختلاف گذردهی دی‌الکتریک لایه‌های دوم و سوم مدل ۴ نسبت به مدل ۵ می‌باشد. در عمل شبیه‌سازی پاسخ مدل زمین لایه‌ای کاربردهای زیادی دارد. از جمله این کاربردها تعیین ضخامت لایه‌های بتنی، آشکارسازی عمق یا سطح سفره‌های زیر زمینی و تعیین ضخامت لایه‌های سطحی برای کاربردهای زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی می‌باشد.

۵-۴- بررسی تأثیر تغییرات ویژگی‌های فیزیکی مواد بر روی پاسخ GPR مدل زمین لایه‌ای

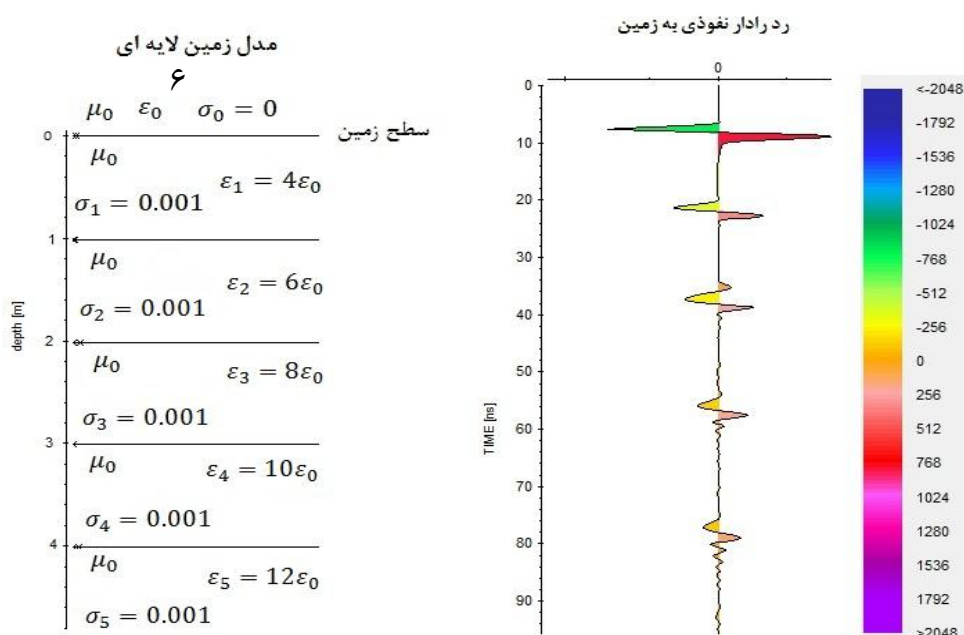
در این بخش با متغیر در نظر گرفتن پارامترهای گذردهی الکتریکی، رسانندگی و تراوایی مغناطیسی در یک زمین لایه‌ای و مدل‌سازی پیشرو دو بعدی داده‌های GPR، تأثیر این پارامترها در بازتاب امواج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته شده است. معمولاً بازتاب‌ها در روش GPR به تباین گذردهی الکتریکی نسبت داده می‌شوند. لذا در این بخش هدف ارزیابی اهمیت تغییرات رسانندگی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی در بازتاب‌های امواج GPR است. به منظور نمایش پاسخ GPR در یک محیط لایه‌ای و بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی مواد زیرسطحی در بازتاب امواج الکترومغناطیسی، مدل‌سازی پاسخ GPR برای حالت‌های مختلف و با فرکانس مرکزی ۱۰۰ مگاهرتز انجام شده است.



شکل ۵-۲: بررسی تأثیر تغییرات توأم گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی بر روی پاسخ GPR، برای دو مدل زمین سه لایه‌ای

۵-۴-۱- بررسی پاسخ مصنوعی GPR به تغییرات گذردهی الکتریکی

با توجه به این که هدف، بررسی تأثیر رسانندگی و تراوایی مغناطیسی در بازتاب امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا و مقایسه آن‌ها با بازتاب‌های ناشی از تباین گذردهی الکتریکی بوده است، لذا ابتدا یک زمین لایه‌ای در نظر گرفته شده است (مدل ۶ نشان داده شده در شکل ۵-۳). تفاوت لایه‌ها در این شکل فقط به دلیل تباین گذردهی دی‌الکتریک می‌باشد. در این شکل تریس به دست آمده از مدل‌سازی یک زمین ۵ لایه‌ای با گذردهی‌های الکتریکی نسبی متفاوت و رسانندگی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی نسبی یکسان نشان داده شده است.



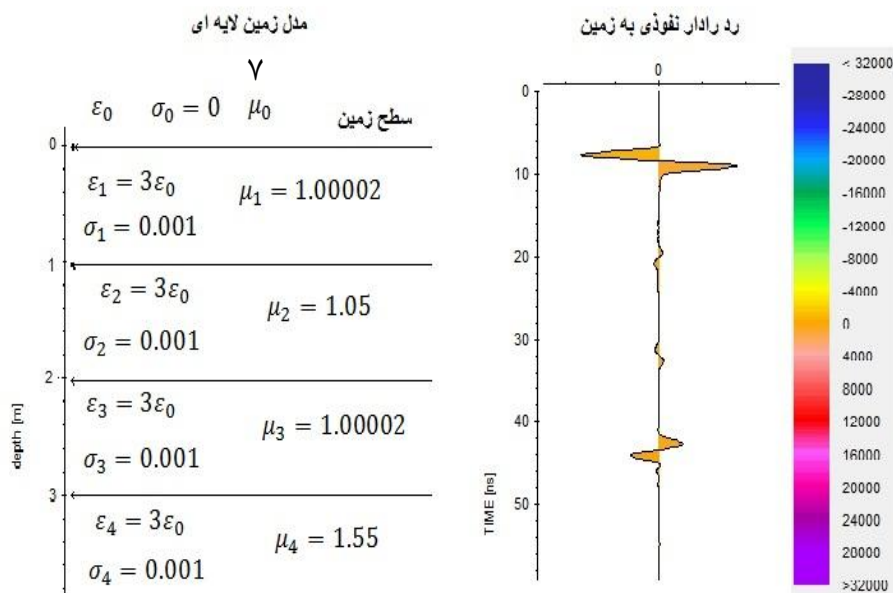
شکل ۳-۵: پارامترهای فیزیکی و هندسی یک مدل زمین لایه‌ای (سمت چپ) و پاسخ امواج GPR به صورت یک تریس نمایش داده شده است (سمت راست). در این شکل گذردهی الکتریکی لایه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، مرز لایه‌ها فقط با در نظر گرفتن تباین گذردهی الکتریکی به خوبی تفکیک شده‌اند و هم‌چنین دیده می‌شود که با نفوذ امواج GPR به عمق هرچند مدل تقریباً رسانندگی پایینی دارد (۰/۰۰۱ زیمنس بر متر)، بازتاب‌های انتهایی نسبت به بازتاب‌های اولیه ضعیف‌تر شده‌اند و این به نقش رسانندگی در تضعیف امواج GPR دلالت دارد.

۵-۴-۲- بررسی پاسخ مصنوعی GPR به تغییرات تراوایی مغناطیسی

مقدار تراوایی مغناطیسی برای بیش‌تر مواد زیر سطح زمین نزدیک به تراوایی مغناطیسی خلأ است و اثر آن بر روی اندازه‌گیری‌های GPR جز در مواردی (مانند مگنتیت، پیروتیت و تیتانومگنتیت که کانی‌های مغناطیسی هستند) خیلی ناچیز است [۸۵]. بنابراین در مدل مورد بررسی شکل ۳-۵، با ثابت در نظر گرفتن رسانندگی ۰/۰۰۱ زیمنس بر متر و گذردهی الکتریکی نسبی ۳، اثر تغییرات تراوایی مغناطیسی نسبی کم (مانند رس‌ها ۱/۰۰۰۰۲)، متوسط (مانند هماتیت ۱/۰۵) و بزرگ (مانند تیتانومگنتیت ۱/۵۵) بر روی بازتاب‌های امواج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور

که در شکل ۴-۵ (سمت راست) مشاهده می‌شود، تباین‌های ناچیز و متوسط تراوایی مغناطیسی بازتاب-های خیلی کوچک در تریس GPR ایجاد کرده‌اند. فقط برای حالتی که تباین تراوایی مغناطیسی قابل توجه بوده بازتابی ایجاد می‌شود، که نسبت به بازتاب ایجاد شده بر اثر تباین گذردهی الکتریکی کوچک است (شکل ۳-۵، سمت راست). در مدل شکل ۴-۵ تباین در تراوایی مغناطیسی نسبی برای مدل‌های مصنوعی بزرگ است. این درحالی است که چنین تباین بزرگی در تراوایی مغناطیسی نسبی عملاً به ندرت در حوزه‌ی کاربردهای GPR، مشاهده می‌شود.

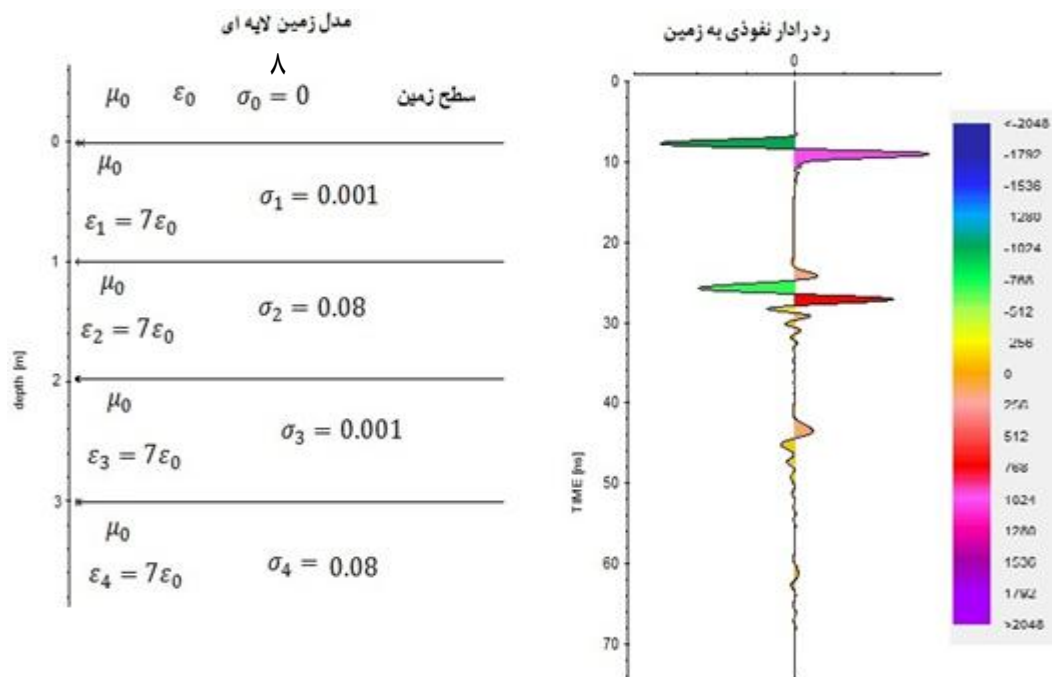


شکل ۴-۵: پارامترهای فیزیکی و هندسی یک مدل زمین لایه‌ای (سمت چپ) و پاسخ امواج GPR به صورت یک تریس نمایش داده شده است (سمت راست). در این مقطع تراوایی مغناطیسی لایه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۵ بررسی پاسخ مصنوعی GPR به تغییرات رسانندگی الکتریکی

در طرف چپ شکل ۴-۵، پارامترهای هندسی و فیزیکی یک مدل لایه‌ای افقی و در طرف راست، تریس مدل‌سازی شده GPR مربوط به این مدل، نشان داده شده است. این مقطع از لایه‌هایی با رسانندگی‌های متفاوت اما تراوایی مغناطیسی و گذردهی دی‌الکتریکی ثابت تشکیل شده است. لایه‌های با رسانندگی بالا

(0.08 / 0.01 / 0.01) زمینس بر متر) و پایین (0.01 / 0.01 / 0.01) زمینس بر متر)، به ترتیب می‌توانند معرف خاک رس مرطوب و ماسه خشک باشند. همان‌طور که در شکل ۵-۵ مشاهده می‌شود بازتاب ایجاد شده در فصل مشترک محیط اول و دوم از نظر دامنه قابل توجه و خیلی مشابه با بازتاب ایجاد شده به دلیل تباین گذردهی الکتریکی است (شکل ۵-۳). اما به دلیل رسانندگی بالای لایه دوم، بازتاب فصل مشترک لایه دوم- سوم و لایه سوم- چهارم به شدت تضعیف شده است.



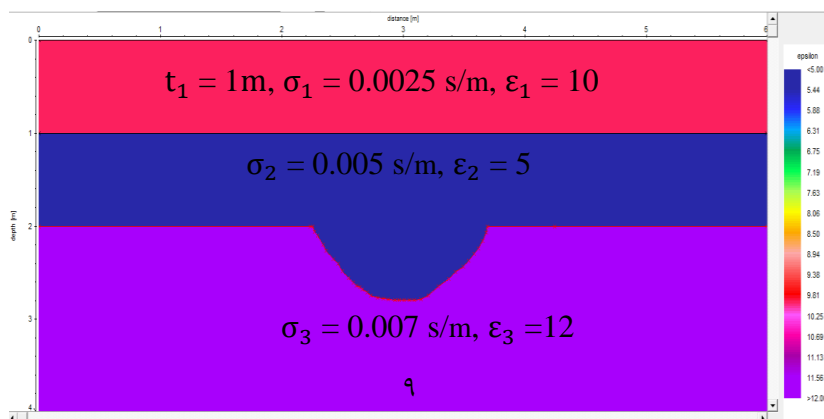
شکل ۵-۵: پارامترهای فیزیکی و هندسی یک مدل زمین لایه‌ای (سمت چپ) و پاسخ امواج GPR به صورت یک تریس نمایش داده شده است (سمت راست). در این مقطع رسانندگی لایه‌ها متغیر در نظر گرفته شده است

نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که تأثیر تراوایی مغناطیسی روی بازتاب‌های GPR کاملاً کوچک است و تأثیر این پارامتر خیلی کم‌تر از رسانندگی الکتریکی است. بنابراین در روش GPR، رسانندگی و گذردهی الکتریکی معمولاً مهم‌ترین پارامترهای بازتاب امواج الکترومغناطیسی هستند (چون اغلب مواد دارای تراوایی مغناطیسی پایینی هستند). از مقایسه بازتاب‌های ایجاد شده بر روی تریس شکل‌های ۵-۳ و ۵-۵ می‌توان دریافت که تباین در رسانندگی نیز ممکن است بازتاب‌هایی مشابه با آن‌هایی که مربوط به تغییرات گذردهی الکتریکی باشند، ایجاد کند. بنابراین در تفسیر مقاطع GPR بایستی

با استفاده از اطلاعات جانبی (زمین‌شناسی یا حفاری‌های انجام شده) عامل بازتاب‌ها را تفسیر نمود و نسبت دادن بازتاب‌ها فقط به تباین گذردهی الکتریکی می‌تواند منجر به تفسیر ناصحیح گردد.

۵-۵- مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR برای مدل مصنوعی ناودیس

ناودیس‌ها در مقاطع GPR و لرزه‌ای، به دلیل بازتاب امواج حداقل از سه نقطه، یک شکل پاپیونی ایجاد می‌کنند. برای این منظور پاسخ GPR برای یک مدل مصنوعی ناودیس مدل‌سازی گردید. ویژگی‌های فیزیکی و هندسی مدل در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. در مدل در نظر گرفته شده، میزان گذردهی دی‌الکتریک لایه دوم دو برابر مقدار لایه اول و میزان رسانندگی الکتریکی لایه دوم نصف مقدار لایه اول می‌باشد. به بیان ریاضی برای این مدل داریم: $\epsilon_2 = 2\epsilon_1$ و $\sigma_2 = 0.5\sigma_1$.

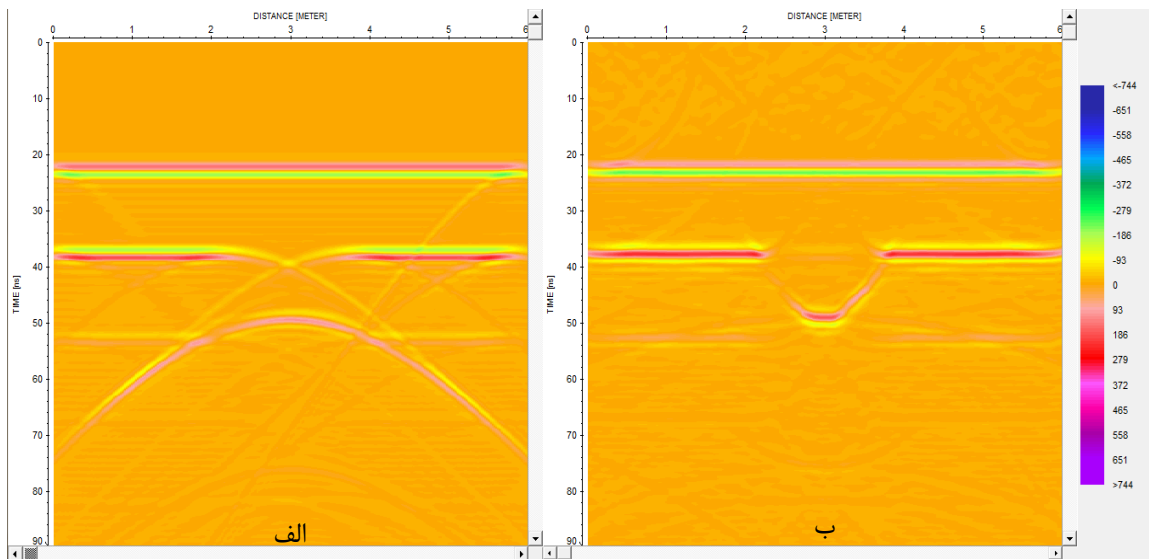


شکل ۵-۶: مدل مصنوعی برای نمایش یک ناودیس

در شکل ۵-۷ الف پاسخ GPR حاصل از مدل ناودیس شکل ۵-۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در بستر یخچال یک پاپیون در اثر ناودیسی که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود، ایجاد شده است. بدین منظور انواع روش‌های مهاجرت برای بازسازی توزیع هندسی سطح هدف (بازتاب کننده) توسعه یافته است. در واقع مهاجرت واهمامیخت فضایی است، که تأثیر جهت‌گیری منبع و گیرنده را بر روی داده‌های بازتاب شده حذف می‌کند [۲۹]. یکی از انواع مهاجرت، مهاجرت f-k است که در این بخش برای حذف این پاپیون از آن استفاده شده است. در این نوع مهاجرت، داده‌ها نخست

توسط تبدیل فوریه دو بعدی، از حوزه مکان-زمان به حوزه فرکانس-طول موج انتقال یافته و پس از انجام محاسبات مربوط به مهاجرت، مجدداً داده‌ها توسط تبدیل فوریه معکوس به حوزه مکان-زمان انتقال داده می‌شوند. این امر باعث کاهش تعداد محاسبات پیچیده در فرایند مهاجرت می‌شود [۸۵].

شکل ۵-۷- ب مقطع این مدل را بعد از اعمال تصحیح مهاجرت نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۷- الف: مقطع شبیه‌سازی شده‌ی GPR مدل ناودیس شکل ۵-۶ و ب: همان مقطع قسمت الف بعد از اعمال پردازش تصحیح مهاجرت

۵-۶- پاسخ GPR برای مدل‌های حاوی اجسام استوانه‌ای مدفون

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری به منظور مدل‌سازی اجسام مدفون استوانه‌ای که معمولاً در نگاشت راداری به شکل هذلولی دیده می‌شود، صورت گرفته است. این هذلولی‌ها می‌تواند ناشی از اهداف با مشخصات مختلفی باشند. در شکل ۵-۸ نحوه تشکیل هذلولی ناشی از یک لوله مدفون در مقطع GPR به صورت الگووار نمایش داده شده است.

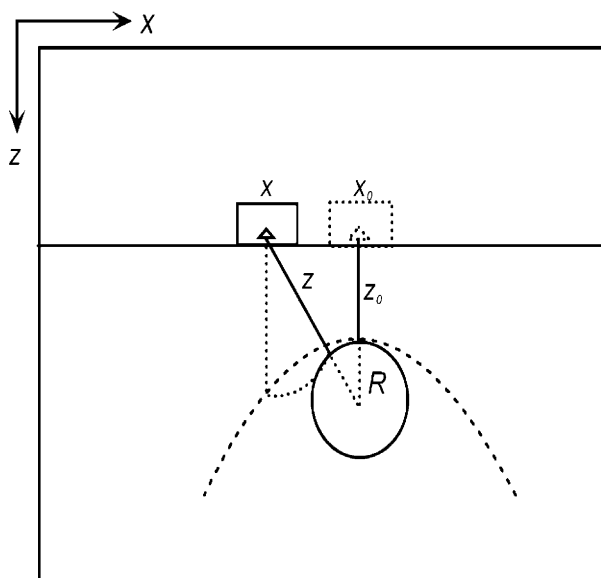
در سال ۲۰۰۰ ال - نوایومی^۱ و همکاران مدلی ارائه دادند که در آن زمان رفت و برگشت موج t به موقعیت مکانی x و سرعت موج v توسط رابطه (۵-۱) مرتبط می‌شود [۸۶].

¹ Al-Nuaimy

$$\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 - \left(\frac{x-x_0}{vt_0}\right)^2 = 1 \quad (1-5)$$

در این مدل هدف نقطه‌ای ($R=0$) فرض شده است که این مشکل را شیهاب¹ و همکاران اولین بار در سال ۲۰۰۵ با در نظر گرفتن یک معادله جامع‌تر حل کردند [۸۷]. رابطه (۲-۵) چگونگی تشکیل هذلولی ناشی از یک لوله مدفون به شعاع R و رابطه زیر مجموعه نقاط روی هذلولی را نشان می‌دهد:

$$(z + R)^2 = (z_0 + R)^2 + (x - x_0)^2 \quad (2-5)$$



شکل ۵-۸: نمایش الگو وار نحوه تشکیل هذلولی ناشی از یک لوله مدفون در مقطع GPR

با جای‌گذاری $vt/2$ به جای Z و vt_0 به جای Z_0 در معادله (۲-۵) خواهیم داشت:

$$\left(\frac{t + \frac{2R}{v}}{t_0 + \frac{2R}{v}}\right)^2 - \left(\frac{x - x_0}{\frac{v}{2}t_0 + R}\right)^2 = 1 \quad (3-5)$$

که در آن t زمان رفت و برگشت موج است. رابطه (۳-۵) معادله یک هذلولی به مرکز $(x_0, -\frac{2R}{v})$ می‌باشد.

۵-۷- مدل‌سازی پاسخ GPR فضاهای خالی و میلگردهای فولادی

یکی از اهداف اصلی بررسی‌های ژئوفیزیکی با استفاده از روش GPR، شناسایی فضاهای خالی موجود در بتن و میله‌های فولادی جاسازی شده در بتن است. به همین جهت باید نحوه پاسخ این اهداف از

¹ Shihab

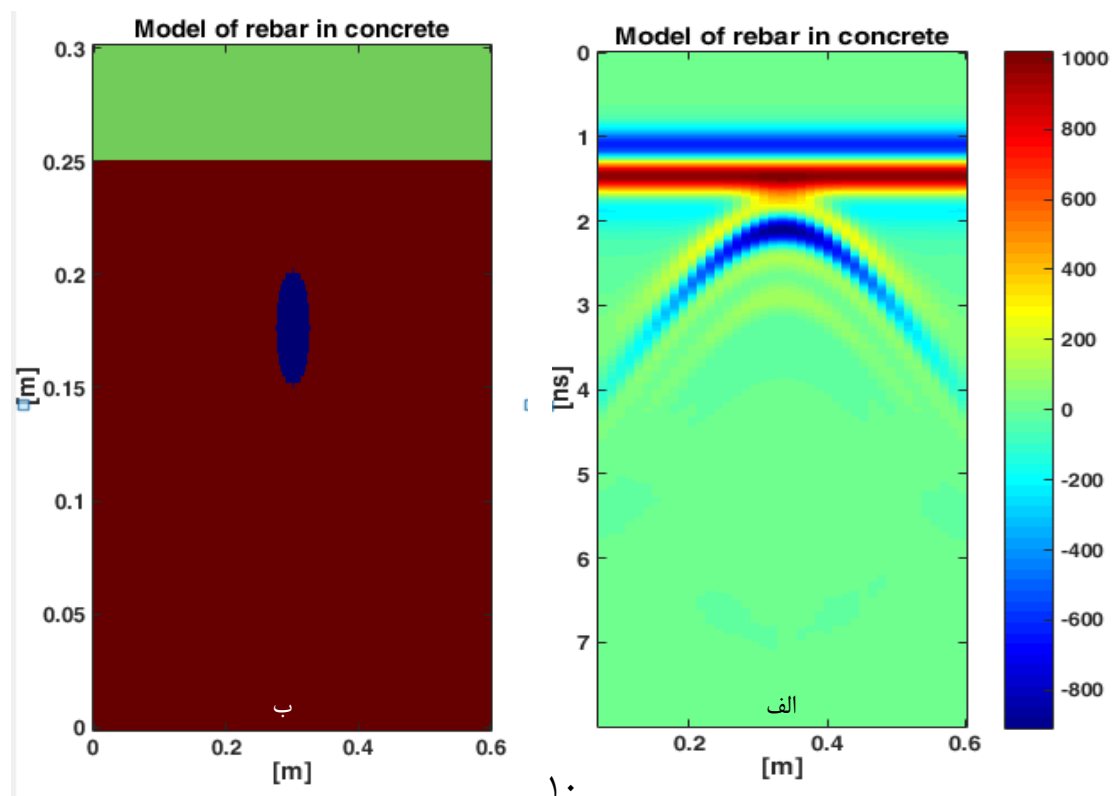
طریق شبیه‌سازی مدل‌های مصنوعی شناسایی و نتایج آن در بحث‌های عملی به‌کار رود. شبیه‌سازی پاسخ GPR برای اهداف مصنوعی فرضی متداول در بررسی‌های ژئوفیزیکی، نظیر منشور دو بعدی (معرف فضاهای خالی با مقطع دو بعدی به شکل منشور)، استوانه افقی منفرد (معرف میله‌ها و میلگردهای فولادی جاسازی شده در بتن یا دو لوله بتنی در مجاورت یکدیگر) از نرم‌افزار GprMax2D؛ با استفاده از معادلات حالت میدان مغناطیسی عرضی یا مد TM، بهره گرفته شده است. برای مدل‌سازی پاسخ GPR مدل گفته شده در این نرم‌افزار لازم است برای هر یک از انواع اهداف مذکور، ابعاد مقطع برداشتی GPR، ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی (σ ، μ و ϵ_r) محیط میزبان و هدف، فاصله‌های گسسته‌سازی مکانی و زمانی، نوع موجک مدل‌سازی و نیز فرکانس مرکزی آنتن، انتخاب گردد.

جهت اجرای مدل‌سازی، در ابتدا باید پارامترهای تشکیل دهنده‌ی محیط تعیین شوند. از آنجایی که رسانای کامل و فضای آزاد (خلاً) در این نرم‌افزار بدون نیاز به تعیین پارامترها مدل‌سازی می‌شوند، تنها تعیین پارامترهای محیط میزبان، مطلوب است. در مقاطع مدل‌سازی شده مقادیر گذردهی الکتریکی (ϵ_0)، تراوایی مغناطیسی (μ_0) و رسانندگی خلاً (σ_0) به ترتیب برابر با $8/89 \times 10^{-12}$ فاراد بر متر، $10^{-7} \times 4\pi$ هانری بر متر و ۰ زیمنس بر متر در نظر گرفته شده است. تمامی مقاطع مدل‌سازی شده در این قسمت با فرکانس مرکزی ۹۰۰ مگاهرتز به‌دست آمده است. هم‌چنین پروفیل برداشت GPR عمود بر امتداد محور (امتداد عمومی) اهداف مدفون، فرض شده است.

۵-۷-۱- مثال اول

پاسخ مدل‌سازی شده GPR برای یک هدف استوانه‌ای افقی کاملاً رسانا به قطر ۰/۰۵ متر، مدفون در عمق ۰/۰۵ متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس بتن، در شکل ۵-۹- الف نشان داده شده است. در شکل ۵-۹- ب نیز پارامترهای هندسی مدل مشاهده می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان برای بتن به صورت $\epsilon_r = 6$ و $\sigma = 0/01 \text{ S/m}$ است. در حالی که مقدار تراوایی مغناطیسی (μ) محیط میزبان و اهداف هم، برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد (خلاً) می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۵-۹-الف مشاهده می‌شود پاسخ GPR حاصل از سقف و کف هدف استوانه‌ای مدفون، به‌صورت هذلولی‌هایی با تفکیک‌پذیری بالایی به وضوح نمایان است. رخداد افقی در قسمت بالای شکل، پاسخ امواج مستقیم هوا و زمین می‌باشد. به‌طور کلی فلزات به دلیل داشتن گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی فوق‌العاده بالا، تقریباً تمام انرژی موج فرودی به سطح خود را بازتاب می‌کنند و لذا بازتاب‌های قوی در مقاطع GPR ایجاد می‌کنند.

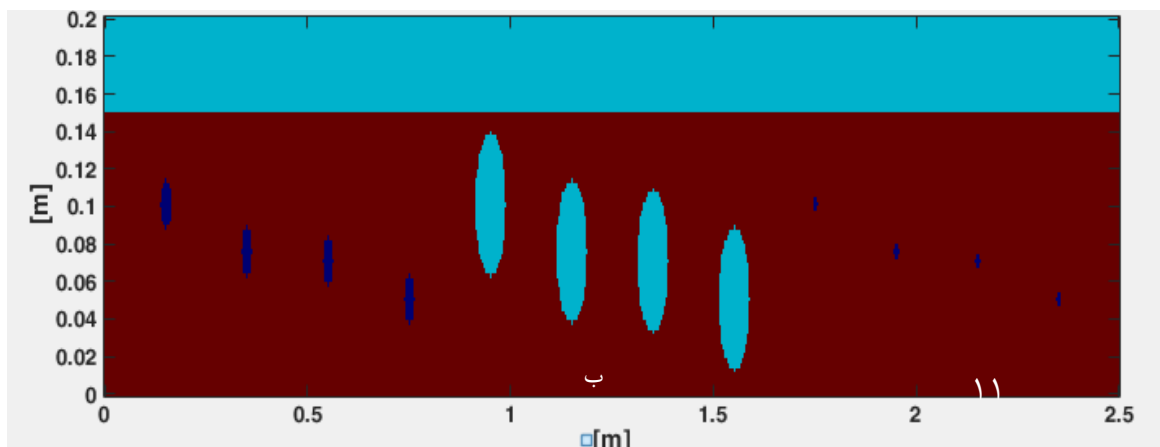
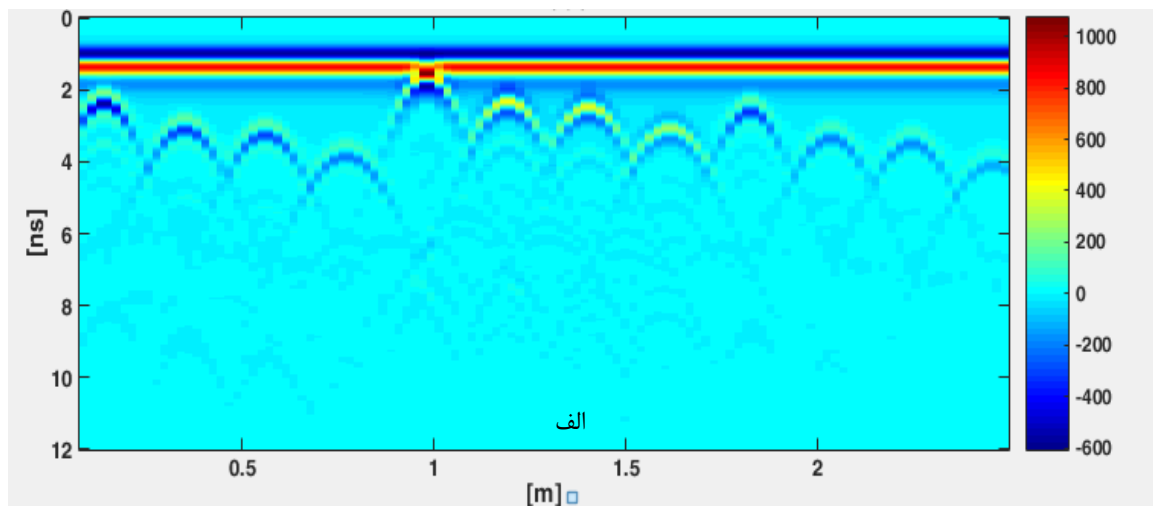


شکل ۵-۹-الف: پاسخ شبیه‌سازی شده GPR و ب: مدل هندسی لوله فلزی مدفون در لایه بتنی

۵-۷-۲- مثال دوم

مدلی به ابعاد 2400×150 میلی‌متر همراه با مدل‌های استوانه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف، به منظور شبیه‌سازی میلگردهای جاسازی شده و منافذ استوانه‌ای شکل توخالی درون محیطی از جنس ماسه مرطوب در شکل ۵-۱۰-ب و تصویر حاصل از مدل‌سازی پیشرو آن نیز در شکل ۵-۱۰-الف نشان داده شده است. ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان برای ماسه مرطوب به‌صورت $\epsilon_r = 20$ و $\sigma = 0.1 \text{ S/m}$

است. در حالی که مقدار تراوایی مغناطیسی (μ) محیط میزبان و هدف هم، برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد (خلأ) می باشد. رخداد افقی در قسمت بالای شکل ۵-۱۰-الف پاسخ امواج مستقیم زمین و هوا می باشد.

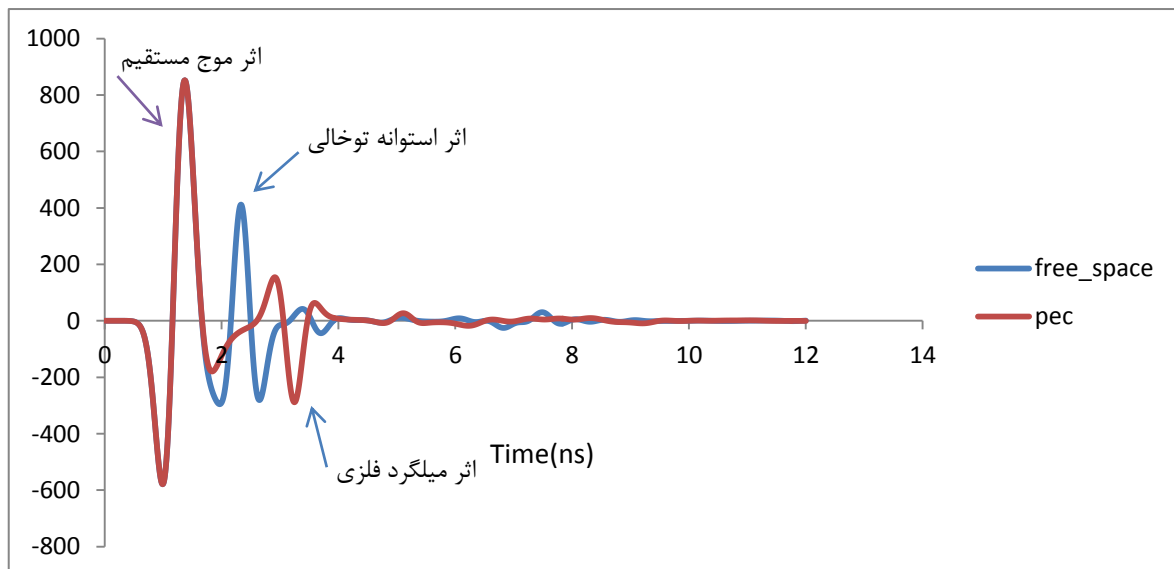


شکل ۵-۱۰-الف: پاسخ شبیه سازی GPR و ب: مدل هندسی میله های فولادی با اندازه های مختلف جاسازی شده درون لایه بتنی همراه با استوانه های توخالی

همان طور که مشاهده می شود پاسخ مدل سازی شده GPR تمامی مدل ها در این مورد نیز به صورت شبه هذلولی است. با مشاهده شکل ۵-۱۰-الف در می یابید پاسخ سقف استوانه های توخالی نسبت به

میلگردهای فلزی قوی تر بوده است و هیچ بازتابی از کف شیء فلزی مشاهده نمی‌شود که دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن می‌باشد.

هم‌چنین ویژگی‌های شبه هذلولی‌های پاسخ استوانه‌های توخالی (به‌ویژه قطبیت) با پاسخ مربوط به میلگردهای فلزی، متفاوت است. به‌عبارت دیگر قطبیت سیگنال بازتابی در مورد استوانه توخالی معکوس شده و شدت بازتاب پاسخ نسبتاً بالا است. معکوس شدن قطبیت سیگنال در این مورد به‌طور واضح با ترسیم تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف مدفون مورد نظر، یکی میلگرد فلزی و دیگری استوانه توخالی در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است.



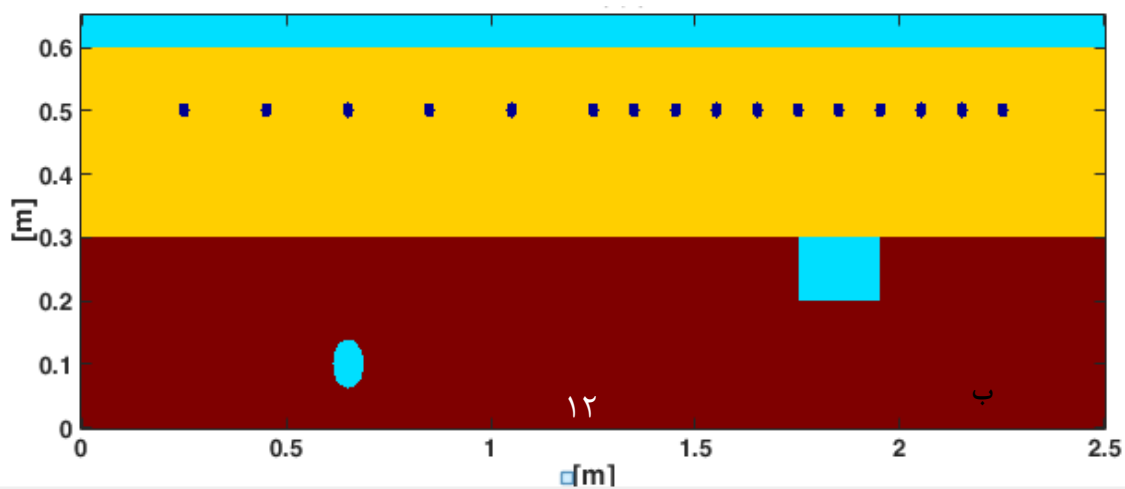
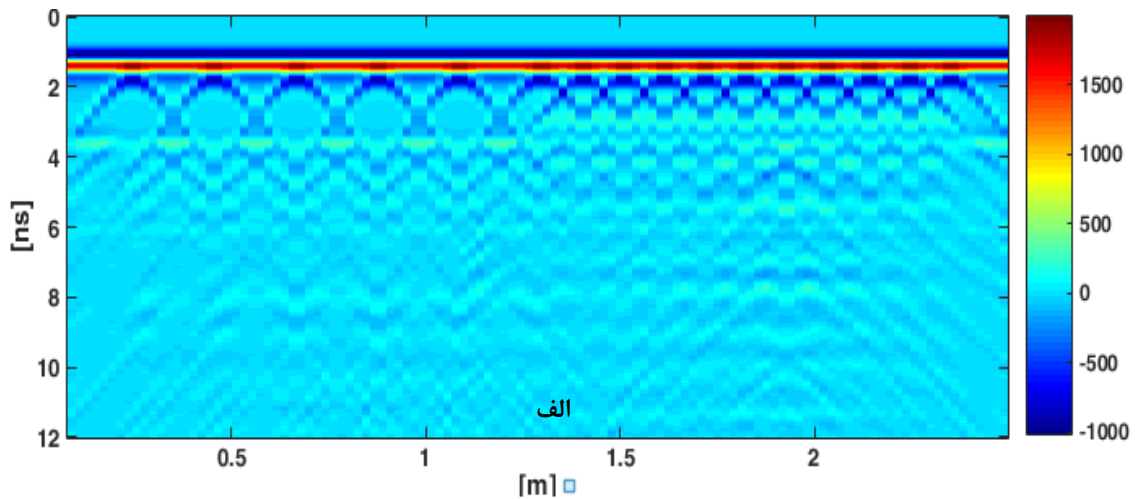
شکل ۵-۱۱: نمایش قطبیت معکوس برای تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف استوانه توخالی (رنگ آبی) و میلگرد فلزی مدفون (رنگ قرمز).

اثر موجی که مستقیماً از طریق هوا به آنتن گیرنده رسیده، در این شکل مشخص شده است. که علت آن فواصل زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده و پالس‌هایی که به‌صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند، می‌باشد.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بازتاب مربوط به لوله فلزی دارای قطبیت معکوس موج مستقیم هوایی است. این پدیده از بازتاب موج از دو فصل مشترک با تغییر امپدانس الکترومغناطیس از مقدار بزرگ‌تر به مقدار کوچک‌تر، ناشی شده است (از مواد با سرعت موج الکترومغناطیس بالا به مواد با سرعت موج الکترومغناطیس پایین). در حالی که قطبیت مربوط به استوانه توخالی، هم علامت موج مستقیم هوایی است. این پدیده از بازتاب موج از دو فصل مشترک با تغییر امپدانس الکترومغناطیس از مقدار کوچک‌تر به مقدار بزرگ‌تر، ناشی شده است.

۵-۷-۳- مثال سوم

شکل ۵-۱۲- الف پاسخ شبیه‌سازی GPR را برای یک مدل متشکل از دو محیط بتن و ماسه خشک نشان می‌دهد که یک‌سری از میله‌های فولادی استوانه‌ای شکل درون بتن رویی، جاسازی شده و فضای خالی به شکل مربع و نیز میله فولادی درون ماسه خشک و در زیر بتن حضور دارند. ابعاد مدل 2400×800 میلی‌متر است. ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان برای ماسه خشک به صورت $\epsilon_r = 3$ و $\sigma = 0.0001 S/m$ و برای بتن به صورت $\epsilon_r = 6$ و $\sigma = 0.005 S/m$ است. در حالی که مقدار تراوایی مغناطیسی (μ) محیط میزبان و اهداف، برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد (خلاً) می‌باشد. رخدادهای افقی در قسمت بالای شکل ۵-۱۲- الف، پاسخ امواج مستقیم هوا و زمین می‌باشد. بازتاب و بعضاً قطبیت پاسخ‌های هدلولی شکل مربوط به مدل‌های با جنس‌ها، اندازه‌ها و اشکال مختلف، با یکدیگر متفاوت می‌باشند.



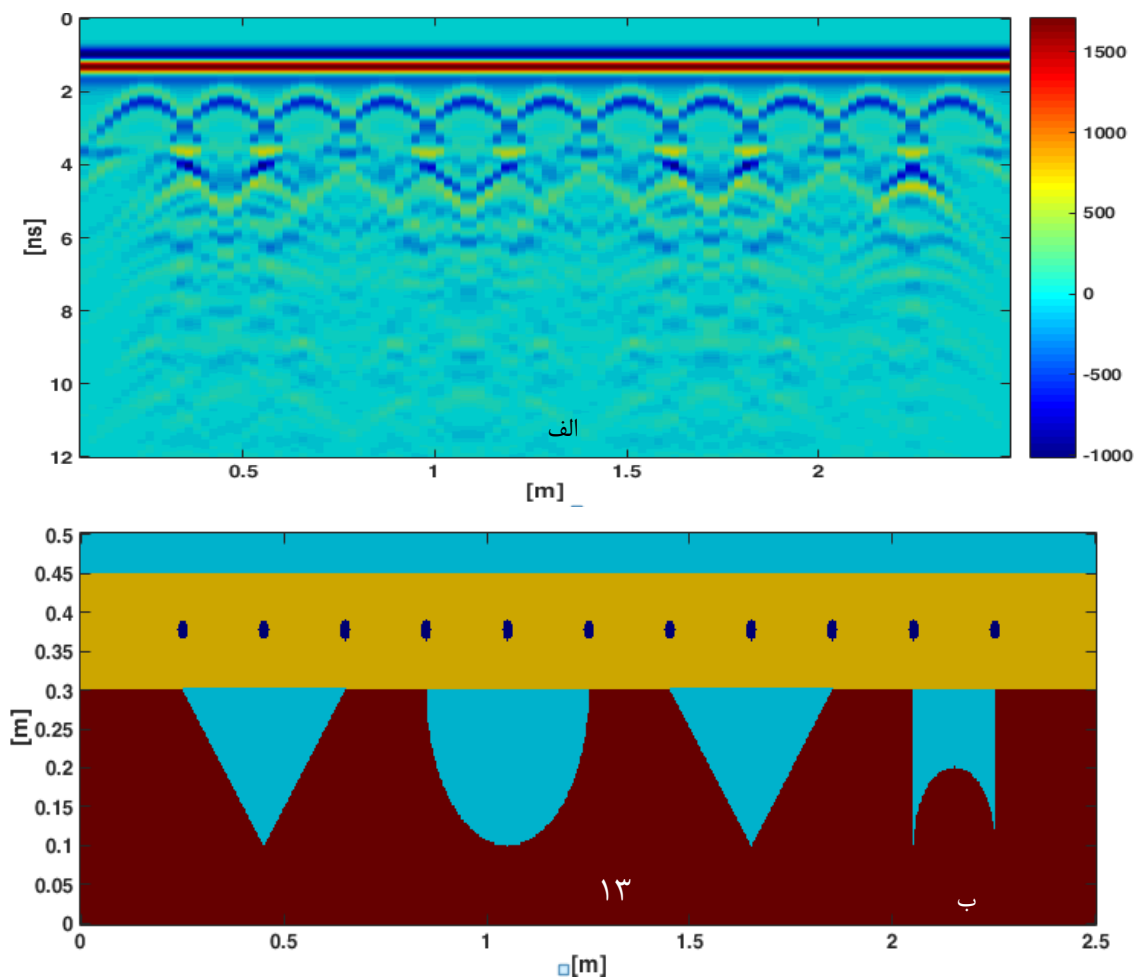
شکل ۵-۱۲-الف: پاسخ شبیه‌سازی GPR و ب: مدل هندسی یک سری از میله‌های فولادی جاسازی شده درون بتن و حضور فضای خالی به شکل مربع درون ماسه مرطوب در زیر بتن.

۵-۷-۴- مثال چهارم

از آن جایی که منافذ (حفرات) ممکن است به شکل‌های مختلفی در بتن حضور داشته باشند لذا در مدل‌سازی پیشرو، شبیه‌سازی پاسخ GPR برای مدل‌های فضای خالی با مقطع دو بعدی به شکل دایره، مربع و مثلث وارونه (که معرف شکل فضای خالی به‌طور عام می‌باشند) صورت گرفته است.

شکل ۵-۱۳-الف: پاسخ شبیه‌سازی GPR را برای یک مدل متشکل از دو محیط بتن و ماسه مرطوب نشان می‌دهد که یک سری میله‌های فولادی استوانه‌ای شکل درون بتن رویی، جاسازی شده و فضاهای خالی با اشکال مختلف درون ماسه مرطوب و در زیر بتن حضور دارند.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود همانند شکل قبل، میله‌های فولادی به دلیل رسانندگی بالای خود، از عبور امواج به پایین جلوگیری کرده و اشکال مختلف درون ماسه مرطوب و در زیر بتن به خوبی آشکارسازی نشده است.



شکل ۵-۱۳-الف: پاسخ شبیه‌سازی GPR و ب: مدل هندسی یک سری از میله‌های فولادی جاسازی شده درون بتن و حضور فضای خالی با اشکال مختلف درون ماسه مرطوب در زیر بتن

۵-۸- بررسی تأثیر پارامترهای مختلف روی پاسخ GPR اجسام استوانه‌ای

زنگ و مک‌مکان (۱۹۹۷) تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ GPR مربوط به اجسام استوانه‌ای را به وسیله مدل‌سازی پیشرو بررسی کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که پارامترهایی نظیر جدایش آنتن، قطر و عمق دفن لوله، جنس و ضخامت لوله، محتویات و سطح مایع در لوله بر روی شکل پاسخ

تأثیرگذار است. از پارامترهای فوق با در نظر گرفتن مشخصات ثابت برای آنتن‌های اندازه‌گیری، تنها قطر و عمق دفن لوله است که به همراه سرعت موج در هدف و زمینه (تباين سرعت موج) بر شکل هذلولی تأثیرگذار است و سایر پارامترها در شدت بازتاب ناشی از تغییر ویژگی الکتریکی محیط تأثیرگذار هستند [۸۸]. در این بخش، هدف اصلی مطالعه تأثیر عوامل مختلف نظیر شکل هندسی هدف، اندازه و ابعاد هدف، عمق دفن، نوع سیال محتوی، جنس دیواره هدف و مشخصات فیزیکی محیط میزبان روی پاسخ-های GPR می‌باشد. در جدول ۵-۱ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مورد مطالعه در تحقیق حاضر از جمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی و رسانندگی الکتریکی، آورده شده است. همچنین تمام مدل‌سازی‌های صورت گرفته در این بخش، در نرم‌افزار Reflexw و با فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز انجام گرفته و راستای پیمایش، عمود بر امتداد هدف توجیه شده است.

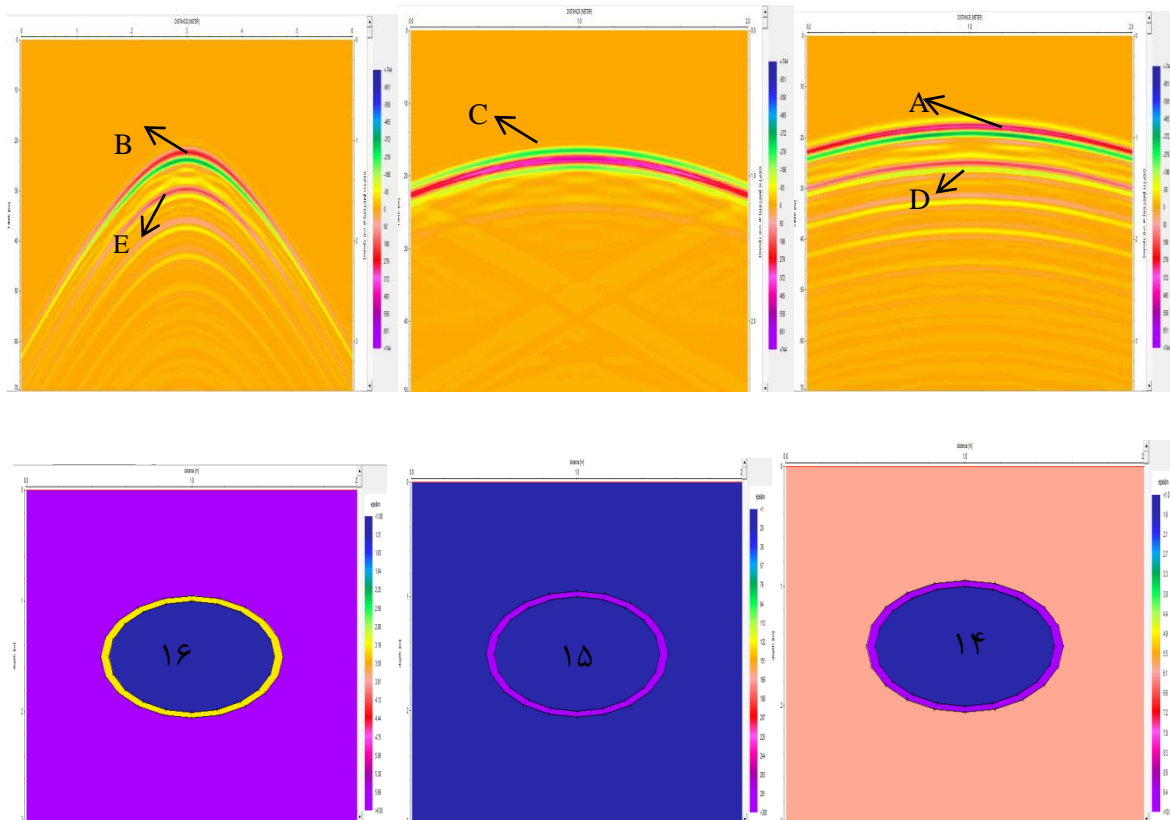
جدول ۵-۱: برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه [۸۸، ۸۹].

ماده (محیط)	گذردهی دی‌الکتریک نسبی	رسانندگی الکتریکی (mS/m)
خاک رس سیلتی	۶	۶/۶
بتن	۱۰	۰/۰۰۵
هوا	۱	۱۰ ^{-۸}
پی وی سی	۳/۳	۱/۳۴
فلز	۳۰۰	۱۰ ^{۱۰}
آب شیرین	۸۰	۰/۰۱
آب شور	۸۰	۵۰۰۰

۵-۸-۱- بررسی تأثیر جنس دیواره هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR

شکل ۵-۱۴ پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای با جنس‌های مختلف را نشان می‌دهد. جنس این اهداف به ترتیب بتن، فلزی و پی وی سی؛ با مشخصات هندسی یکسان هستند به طوری که قطر داخلی هر سه هدف برابر با یک متر و ضخامت دیواره آن‌ها ۵ سانتی متر است؛ همه این اهداف صد درصد 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. مقایسه پاسخ GPR حاصل از استوانه‌ها نشان می‌دهد که در مورد مدل‌های ۱۴ و ۱۶ نشان داده شده در شکل ۵-۱۴ اختلاف فاحشی در دامنه پاسخ‌های سقف دو هدف (A و B) و نیز کف دو هدف (D و E) مشاهده نمی‌شود، زیرا از یک سو ضخامت دیواره اهداف مورد نظر در مقایسه با قطر آن‌ها کوچک است و از سوی دیگر بتن و پلاستیک از نظر رسانندگی الکتریکی و گذردهی دی الکتریک، اختلاف چندانی ندارند. ممکن است در داده‌های واقعی در اثر وجود نوفه، اختلاف ناچیزی در دامنه بازتاب‌های سقف دو هدف (A و B) دیده شود. جنس دیواره اغلب لوله‌ها و ساختارهای استوانه‌ای معمولاً فلزی است (مدل ۱۵). پاسخ سقف هدف مدل ۱۵ (شکل ۵-۱۴) نسبت به دو مورد قبلی بحث شده در بالا قوی‌تر بوده و قطبیت سیگنال‌های بازتابی نیز معکوس شده است (معکوس شدن قطبیت، 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. با بررسی تعداد زیادی آزمایش عددی در ارتباط با این موضوع نشان داده شده که به‌طور کلی تأثیر جنس و نیز ضخامت دیواره یک هدف غیر فلزی بر روی پاسخ GPR آن قابل چشم‌پوشی بوده و در این مورد عامل غالب بر روی پاسخ GPR تباین بین ویژگی‌های الکتریکی محیط میزبان و محتوای مدل می‌باشد. بنابراین در مدل‌سازی‌های بعدی برای اهداف هیچ‌گونه دیواره‌ای در نظر گرفته نشده است. به‌عبارت دیگر در هر مدل تنها هدف و محیط میزبان وجود خواهد داشت.

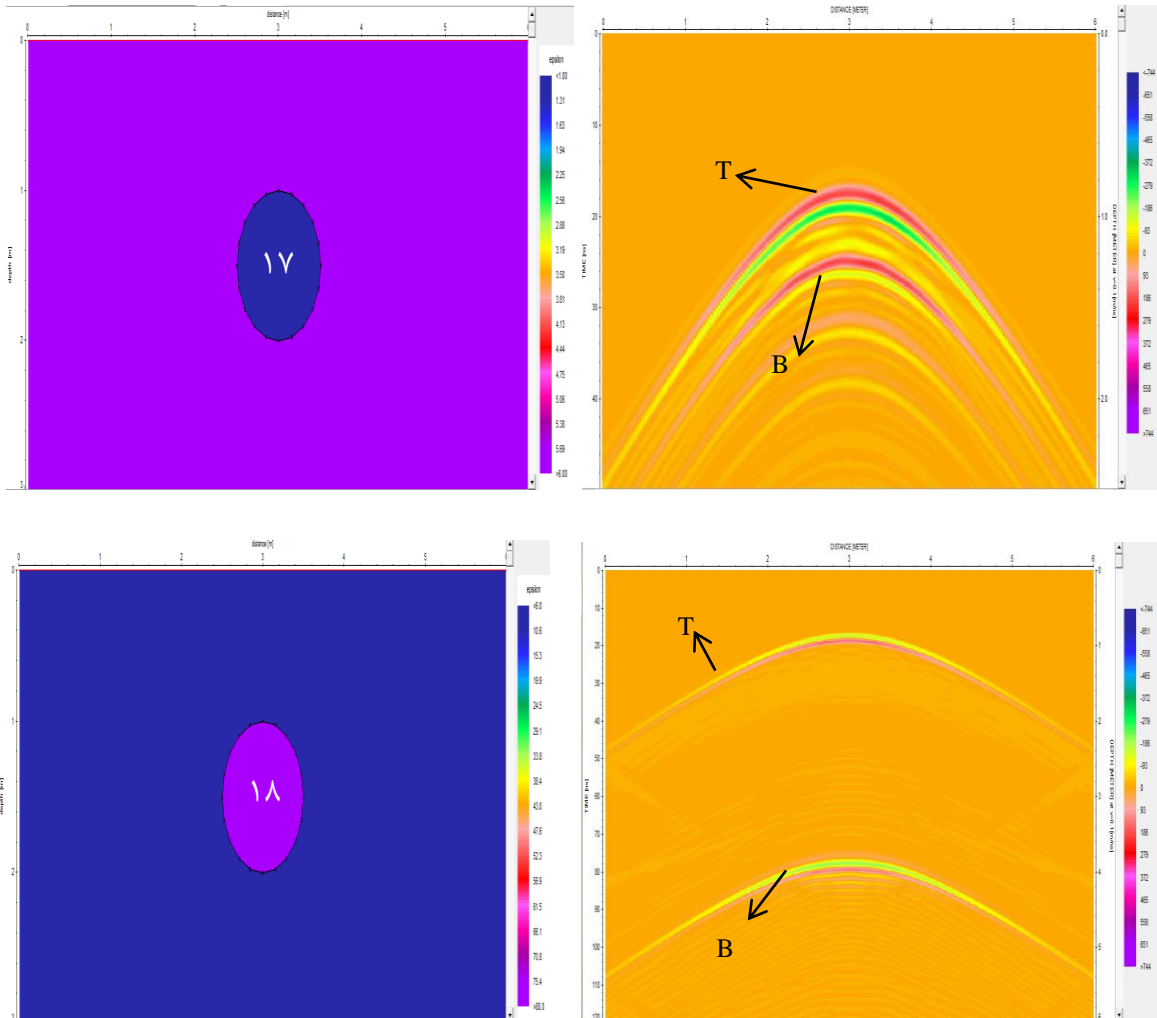


شکل ۵-۱۴: مقایسه پاسخ‌های GPR سه هدف استوانه‌ای توخالی (هوا) با جنس‌های مختلف؛ مدل ۱۴: بتن، مدل ۱۵: فلز و مدل ۱۶: پلاستیک (PVC). محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی است.

۵-۸-۲- بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR

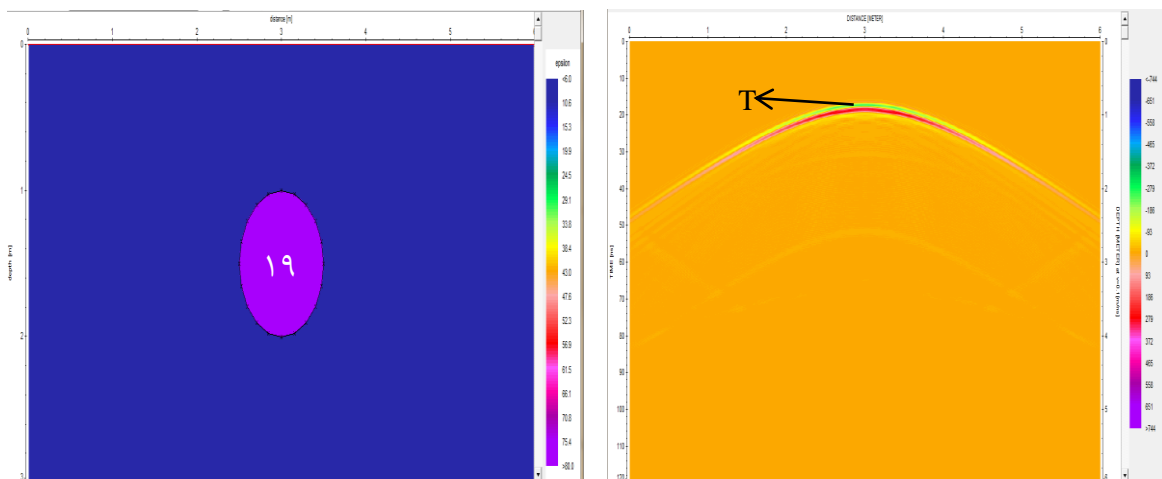
شبهه‌سازی برای سه هدف استوانه‌ای محتوی هوا، آب شیرین و آب شور با مشخصات یکسان به قطر یک متر، مدفون در عمق یک متری و محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی صورت گرفته است. نتایج این شبهه‌سازی در شکل ۵-۱۵ مشاهده می‌شود. پاسخ GPR هدف‌ها (استوانه پر شده از هوا و آب شیرین) در شکل ۵-۱۵ نشان می‌دهد که در صورت خالی بودن هدف مدفون (مدل ۱۷)، پاسخ سقف (T) و کف (B) آن به وضوح مشخص بوده و شدت بازتاب هر دو پاسخ نسبتاً قوی است. در شرایطی که هدف مدفون پر از آب شیرین باشد (مدل ۱۸)، اگر چه در این مورد نیز 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 الکترومغناطیسی در آب کم‌تر از هوا است،

در نتیجه فاصله قائم پاسخ سقف و کف هدف در مدل ۱۸ از مدل ۱۷ به مراتب بیشتر است. نکته مهم تر در این مورد آن است که قطبیت سیگنال نیز نسبت به مدل ۱۷ معکوس شده است.



شکل ۵-۱۵: بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای روی پاسخ GPR. مدل ۱۷: استوانه توخالی، مدل ۱۸: استوانه پر از آب شیرین.

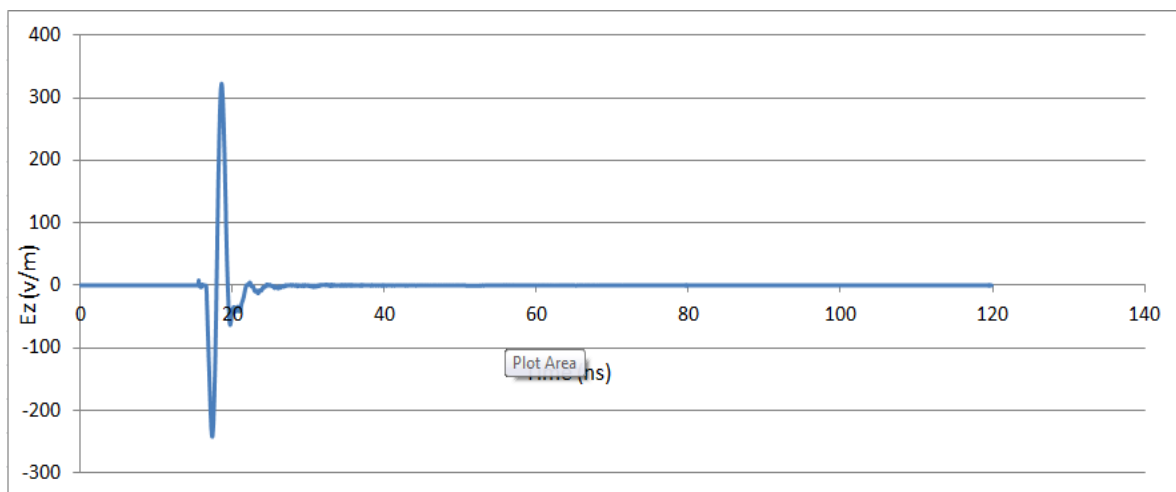
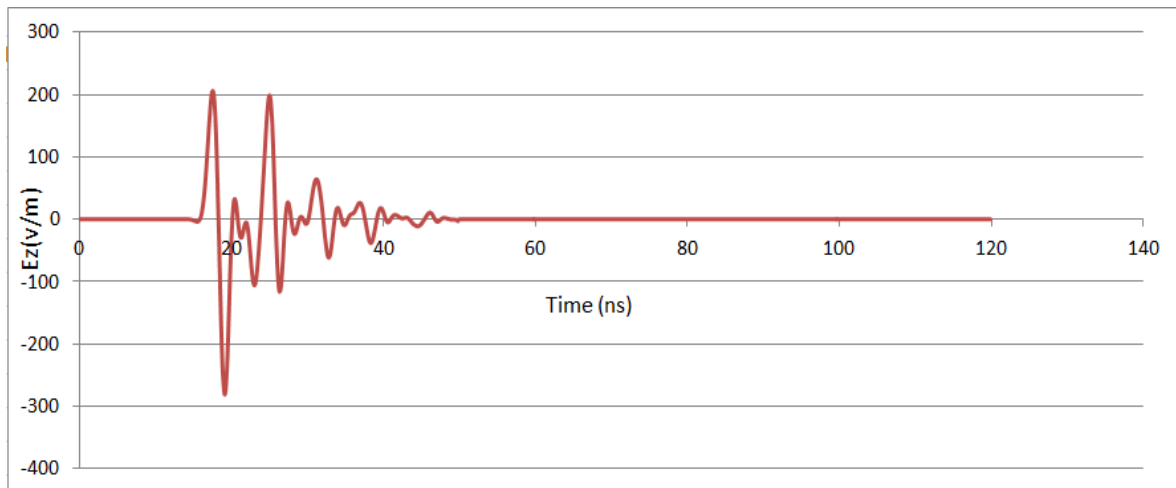
تصویر شکل ۵-۱۶ نشان می‌دهد که در حالتی که هدف از آب شور پر شده باشد (مدل ۱۹) فقط پاسخ هدف قابل مشاهده می‌باشد و هیچ پاسخی از کف وجود ندارد که علت آن رسانندگی الکتریکی بسیار زیاد آب شور و تضعیف شدید امواج الکترومغناطیسی است. به عبارت دیگر آب شور مانند فلز رفتار می‌کند، با این تفاوت که شدت بازتاب، اندکی از فلز کم‌تر است.



شکل ۵-۱۶: بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای پر شده از آب شور روی پاسخ GPR (مدل ۱۹).

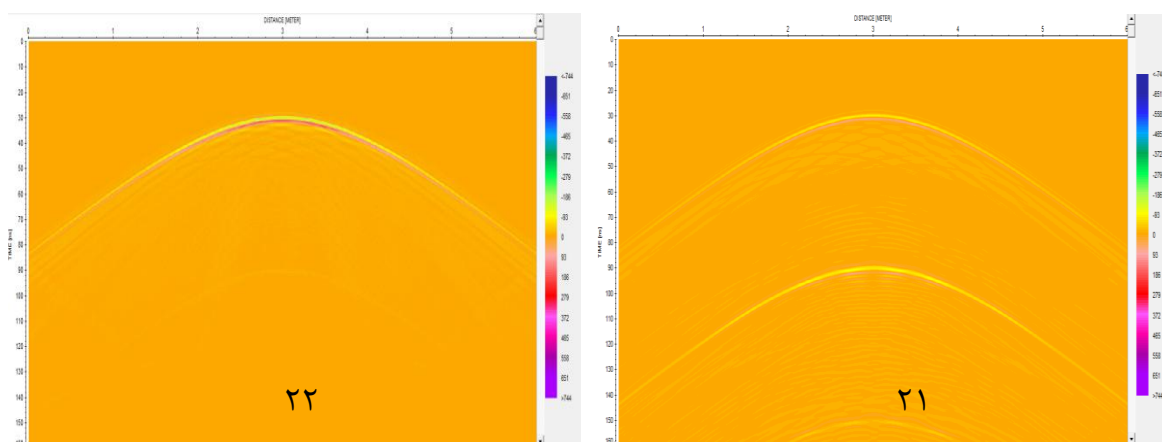
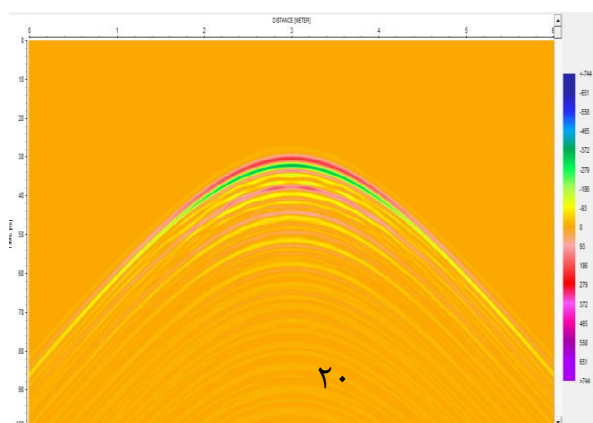
ضمناً قطبیت سیگنال بازتابی در این مورد نیز (نسبت به مدل ۱۷) معکوس شده و شدت بازتاب پاسخ نسبتاً بالا است. معکوس شدن قطبیت سیگنال در این مورد به طور واضح با ترسیم تریس‌های مربوط به موقعیت برداشت، درست بالای مرکز دو هدف مدفون (تریس میانی پاسخ)، یکی از پر از هوا و دیگری پر از آب شور در شکل ۵-۱۷ نشان داده 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 نشانه عدم وجود پاسخ آب شور و نحوه تشخیص آن از آب شیرین می‌باشد.

تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای مدفون در محیط میزبان از جنس خاک رس مرطوب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵-۱۸ نتایج آشکارسازی را برای سه هدف استوانه‌ای به قطر یک متر، مدفون در عمق یک متری نشان می‌دهد که در آن مدل‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ به ترتیب از هوا، آب شیرین و آب شور پر شده‌اند.



شکل ۵-۱۷: نمایش قطبیت معکوس برای تریس‌های میانی پاسخ‌های دو مدل ۱۷ (رنگ قرمز) و ۱۹ (رنگ آبی).

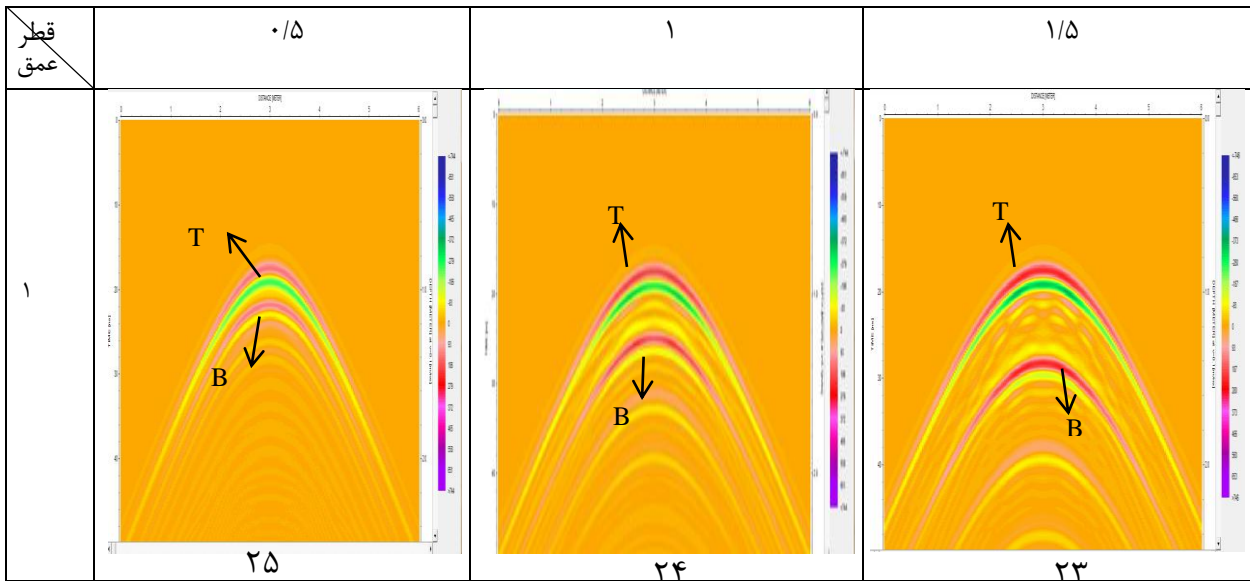
نتایج شکل ۵-۱۸ و مقایسه آن‌ها با نتایج اشکال ۵-۱۵ و ۵-۱۶ نشان می‌دهد که اگر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان نسبتاً زیاد باشد پاسخ کف استوانه توخالی (مدل ۲۰) به وضوح قابل رؤیت نیست که دلیل آن تضعیف بیش‌تر امواج الکترومغناطیسی در محیط میزبان با رسانندگی الکتریکی بیش‌تر است. در پاسخ مدل‌های ۲۱ و ۲۲ تغییر محسوسی با نتایج مورد قبلی (شکل ۵-۱۵) مشاهده نمی‌شود جزء این- که شدت بازتاب‌ها اندکی کاهش پیدا کرده است.



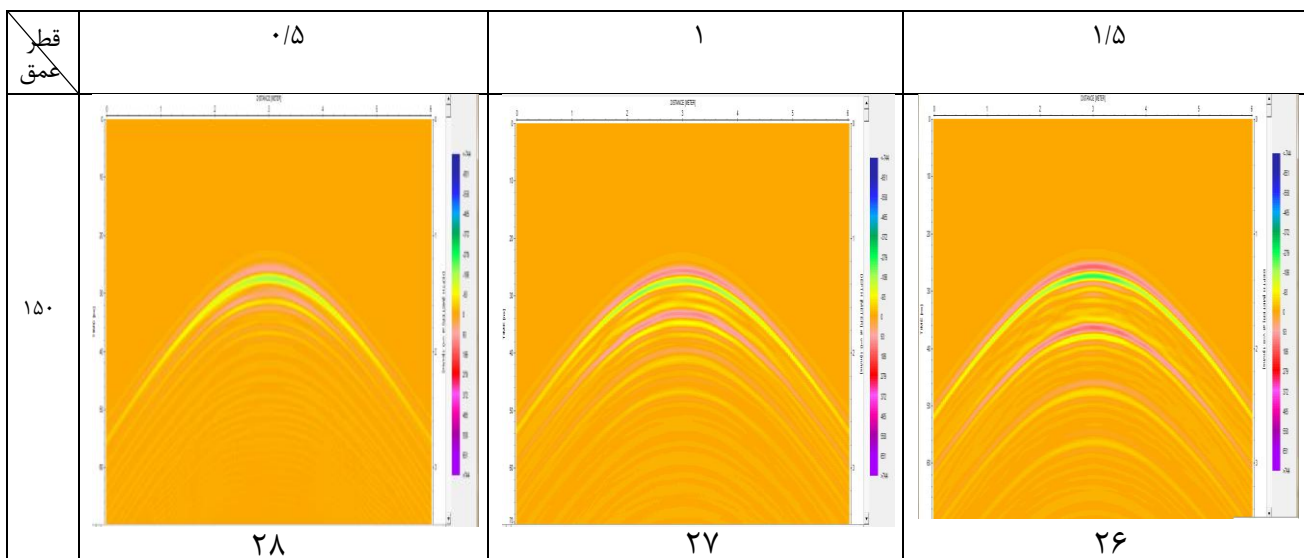
شکل ۵-۱۸: بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای روی پاسخ GPR. مدل ۲۰: استوانه توخالی، مدل ۲۱: استوانه پر از آب شیرین و مدل ۲۲: استوانه پر از آب شور و محیط میزبان خاک رس مرطوب است.

۵-۸-۳- بررسی تأثیر قطر و عمق بر شکل پاسخ

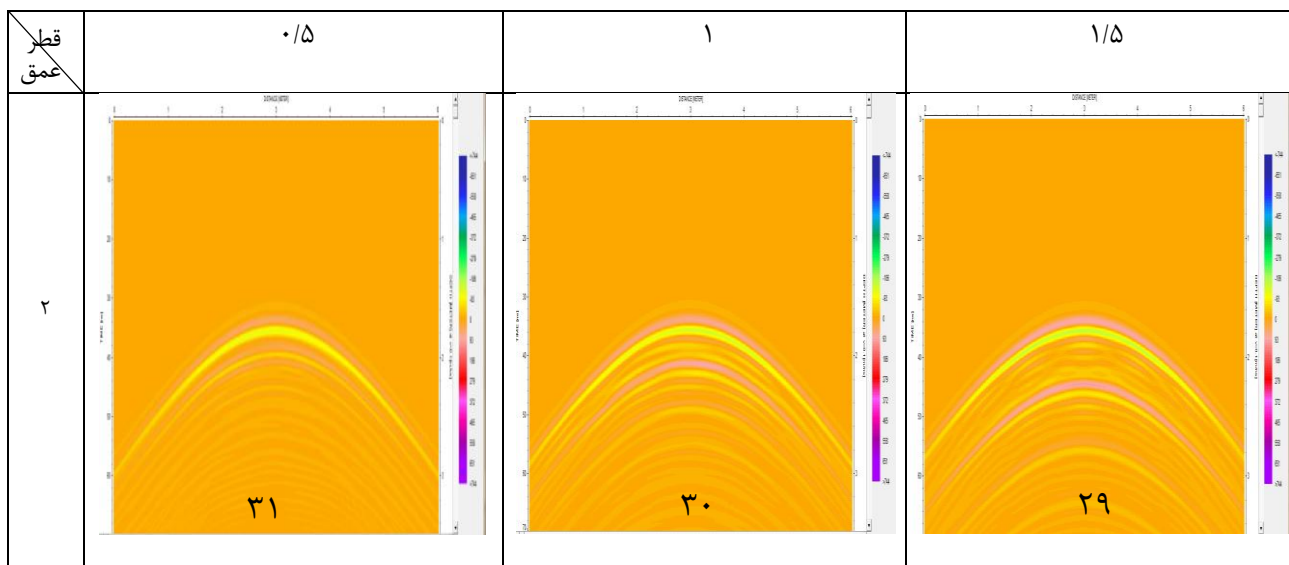
در شکل‌های ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ پاسخ GPR برای لوله‌هایی با قطرهای ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ متر مدفون در عمق‌های ۱، ۱/۵ و ۲ متر (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی آورده شده است. مقاطع GPR تولید شده در شکل‌های ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ مقایسه تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ GPR را در شرایط عمقی متفاوت نشان می‌دهد. در این مقاطع محور افقی طول در امتداد خط برداشت بر حسب متر و محور عمودی زمان رفت و برگشت موج بر حسب نانو ثانیه می‌باشد.



شکل ۵-۱۹: بررسی تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ در عمق ۱ متر



شکل ۵-۲۰: بررسی تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ در عمق ثابت ۱/۵ متر



شکل ۵-۲۱: بررسی تأثیر قطر لوله بر شکل پاسخ در عمق ثابت ۲متر

همان‌طور که در مقاطع شکل‌های ۵-۱۹ تا ۵-۲۱ دیده می‌شود، در عمق ثابت با افزایش قطر انحنای هذلولی ثابت و فقط کانون آن به سمت بالا شیفیت پیدا می‌کند. در واقع با افزایش قطر هدف استوانه‌ای، فاصله قائم بین پاسخ سقف (T) و کف هدف (B)، مطابق انتظار افزایش می‌یابد. هر چند شدت بازتاب زاویه شیب مجانب‌های هذلولی ثابت مانده است. در مورد عمق، مسأله کاملاً متفاوت می‌باشد، طبیعتاً با افزایش عمق رأس هذلولی به سمت پایین انتقال می‌یابد؛ در واقع با افزایش عمق دفن هدف، موقعیت نقطه پیک هذلولی پاسخ (که معرف موقعیت افقی و عمق دفن هدف استوانه‌ای نیز می‌باشد) مطابق انتظار افزایش می‌یابد، در حالی که زاویه شیب مجانب‌های هذلولی به‌طور ملایم کاهش می‌یابد. اما همان‌گونه که در مقاطع مشخص است، با افزایش عمق انحنای منحنی افزایش می‌یابد.

۵-۸-۴ - بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان روی پاسخ GPR

علاوه بر ویژگی‌های هندسی و فیزیکی هدف مدفون، ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان از جمله رسانندگی الکتریکی و گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان هدف نیز روی پاسخ GPR تأثیر می‌گذارد. بنابراین باید تأثیر آن‌ها نیز از طریق آزمایش‌های مدل‌سازی مورد بررسی قرار گیرد.

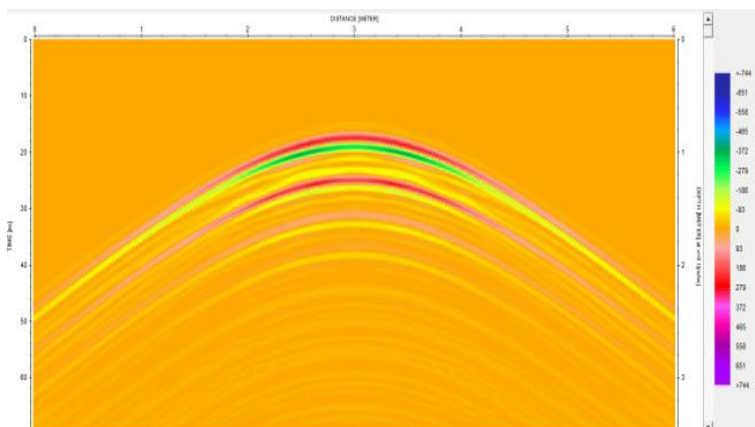
۵-۸-۴-۱- بررسی تأثیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان روی پاسخ GPR

از آن جایی که گذردهی دی‌الکتریک هر محیط با سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی 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 عامل، 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) به صورت شکل ۵-۲۲ مدل‌سازی گردید که میزان گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان مدل‌های ۳۲ تا ۳۴ نشان داده شده در این شکل برابر با ۶، ۱۰ و ۱۸ می‌باشند. مقدار رسانندگی الکتریکی محیط میزبان در هر سه مدل نشان داده شده در شکل مزبور 0.05 S/m است.

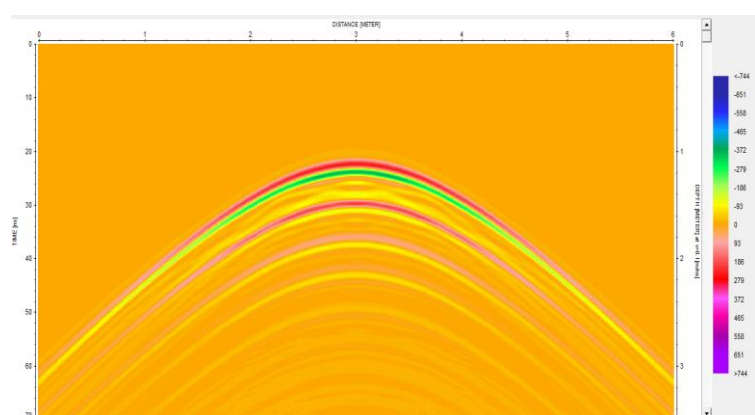
هذلولی‌های شکل ۵-۲۲ نشان می‌دهند که با افزایش میزان گذردهی دی‌الکتریک محیط میزبان و در نتیجه کاهش سرعت سیر امواج در محیط، موقعیت پیک هذلولی پاسخ به سمت پایین جابه‌جا شده و نیز زاویه شیب مجانب‌های هذلولی افزایش یافته است.

۵-۸-۴-۲- بررسی تأثیر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان روی پاسخ GPR

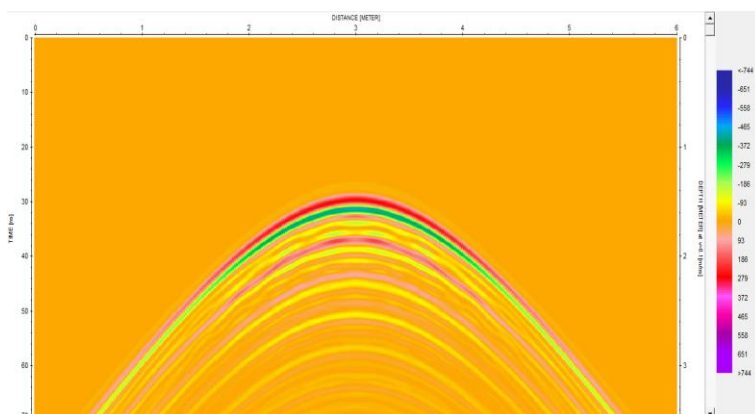
هدف اصلی، مطالعه تأثیر رسانندگی الکتریکی برای حالاتی است که گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان و هدف مدفون در آن ثابت فرض شوند. با این فرض پاسخ‌ها برای دو هدف استوانه‌ای توخالی (هوا)، به قطر یک متر، مدفون در عمق یک متری مدل‌سازی گردید. در شکل ۵-۲۳ مقدار رسانندگی الکتریکی محیط میزبان برای مدل ۳۵ برابر با 0.1 mS/m و برای مدل ۳۶ برابر با 10 mS/m است. به عبارت دیگر محیط میزبان مدل ۳۵، صد برابر مقاوم‌تر از محیط میزبان مدل ۳۶ می‌باشد. مقادیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان برای هر دو مدل برابر با ۶ می‌باشد. تراوایی مغناطیسی هر دو مدل نیز یکسان و برابر با مقدار فضای آزاد است.



مدل ۳۲: $\epsilon_{rh} = 6 \epsilon_{ro}$

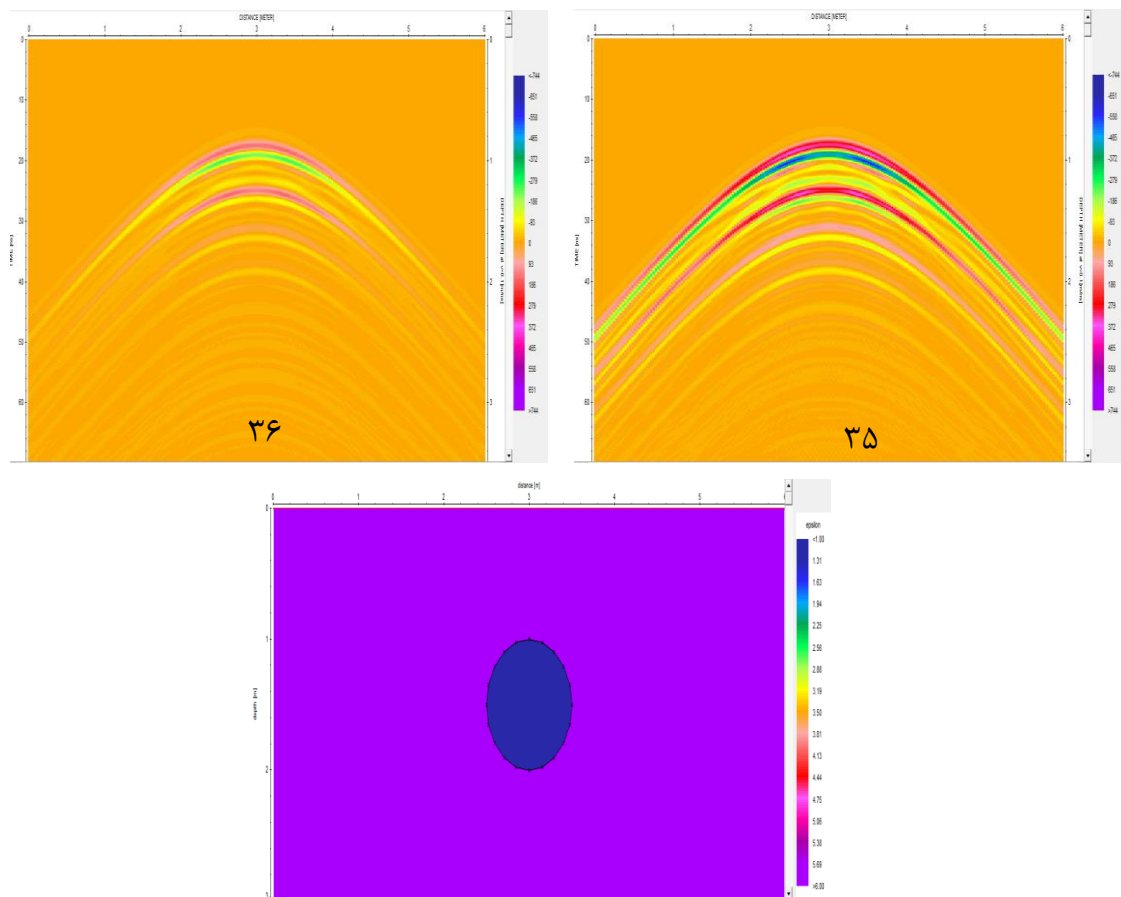


مدل ۳۳: $\epsilon_{rh} = 10 \epsilon_{ro}$



مدل ۳۴: $\epsilon_{rh} = 18 \epsilon_{ro}$

شکل ۵-۲۲: بررسی تأثیر گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان روی پاسخ GPR سه هدف استوانه‌ای با $\epsilon_{rh} = 6 \epsilon_{ro}$ (مدل ۳۲)، $\epsilon_{rh} = 10 \epsilon_{ro}$ (مدل ۳۳) و $\epsilon_{rh} = 18 \epsilon_{ro}$ (مدل ۳۴). h : محیط میزبان و o : هدف.



شکل ۵-۲۳: بررسی تأثیر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان روی پاسخ GPR دو هدف استوانه‌ای. برای مدل ۳۵: $\sigma_h = 0.1 \text{ mS/m}$ و برای مدل ۳۶: $\sigma_h = 10 \text{ mS/m}$. h : محیط میزبان و o : هدف.

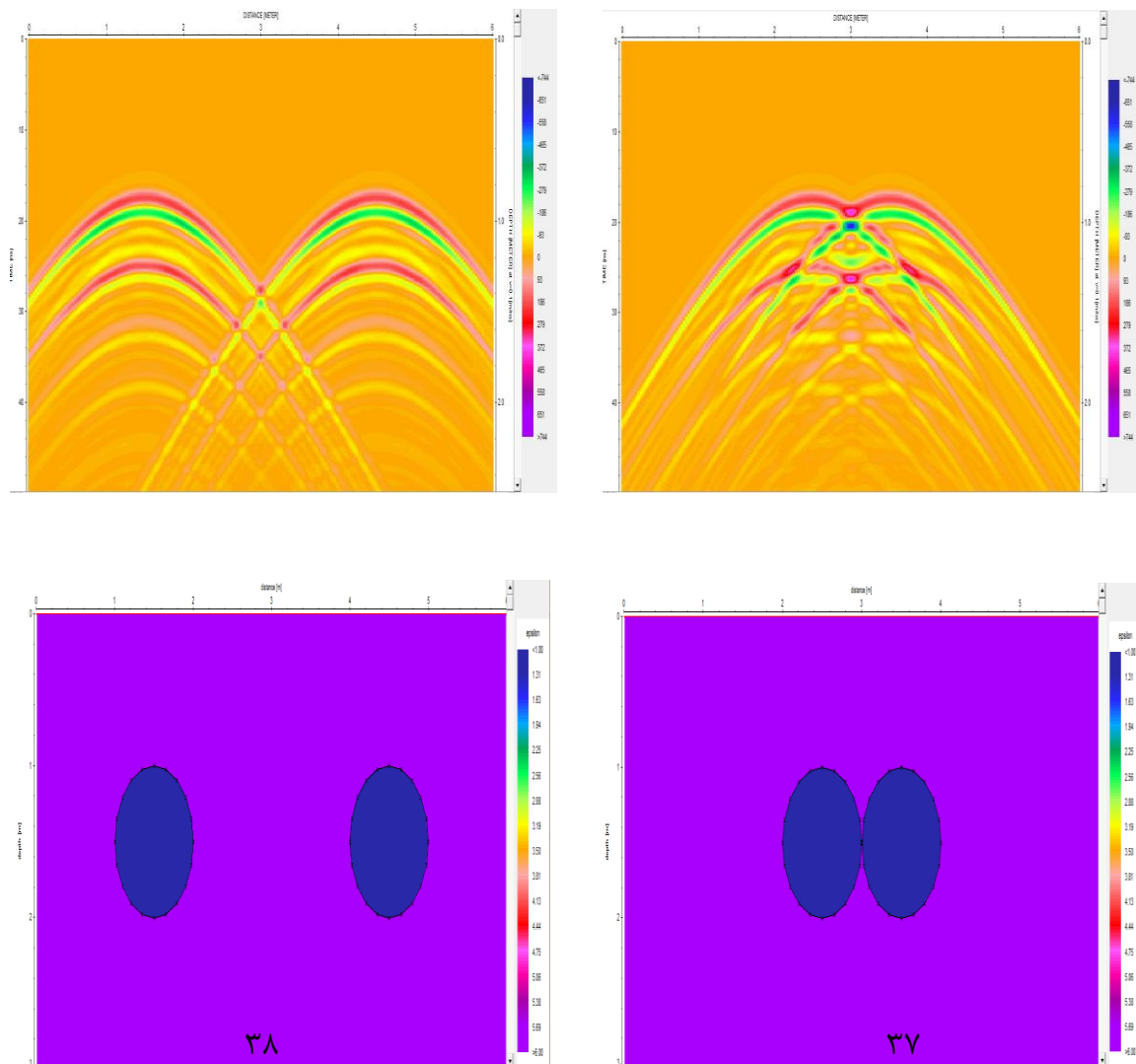
پاسخ‌های GPR در شکل ۵-۲۳ نشان می‌دهند که اگر محیط میزبان بسیار مقاوم باشد (مدل ۳۵) دامنه سیگنال‌های بازتابی سقف و کف هدف هر دو قوی‌تر از پاسخ‌های نظیر هدف مدل با محیط میزبان بسیار رسانا (مدل ۳۶) می‌باشند. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود بازتاب‌های سقف و به ویژه کف مدل ۳۶ به‌گونه‌ای تضعیف شده‌اند که ممکن است پاسخ کف در داده‌های واقعی در حضور نوفه پنهان شده و دیده نشود. بدیهی است که با تغییر رسانندگی الکتریکی محیط میزبان (و ثابت نگه داشتن دیگر شرایط)، قطبیت و شیب مجانب‌های هذلولی تغییر نخواهد کرد.

۵-۹- مدل سازی پاسخ سیستم GPR برای استوانه افقی جفت (بررسی تأثیر فاصله

بین مراکز دو استوانه روی پاسخ GPR)

به منظور بررسی تأثیر حضور بیش از یک هدف روی پاسخ GPR و تعیین میزان حد جدایش دو پاسخ از یکدیگر (و در نتیجه شناسایی دو هدف زیرسطحی)، مدل سازی پاسخ GPR برای ترکیبی از دو هدف استوانه‌ای افقی توخالی اجرا شده است. قطر استوانه‌ها یک متر و در عمق یک متری در مجاورت یکدیگر درون محیطی از جنس خاک رس سیلته مدفون شده‌اند. این مدل سازی (شکل ۵-۲۴) برای حالتی که فاصله بین مراکز دو استوانه برابر با قطر هریک از استوانه‌ها باشد (مدل ۳۷) و حالتی که این فاصله سه برابر قطر هر یک از استوانه‌ها باشد (مدل ۳۸) صورت گرفته است. نتایج مدل سازی نیز در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود پاسخ GPR مدل ۳۷ که شامل ترکیب پاسخ دو هدف استوانه‌ای است، از یکدیگر قابل تفکیک نمی‌باشند. اما در مورد پاسخ مدل ۳۸ اگر چه در این مورد نیز پاسخ‌های مربوط به هدف استوانه‌ای کاملاً از یکدیگر مجزا نبوده و اندکی هم‌پوشانی دارند اما دو هدف به وضوح قابل تفکیک و شناسایی می‌باشند (باتوجه به فاصله بین دو هدف).

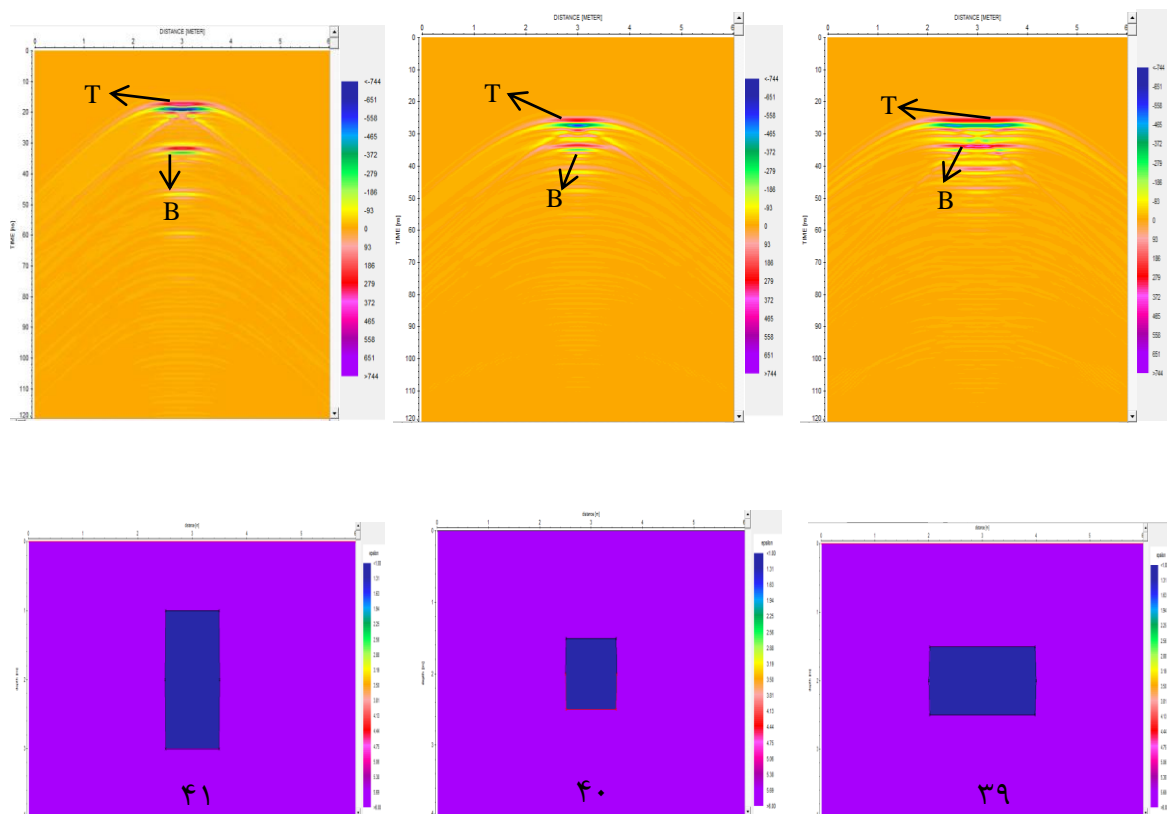
بر اساس آزمایش‌های عددی تعداد زیادی مدل حاوی دو استوانه افقی در مجاورت یکدیگر با فواصل مختلف، مشخص گردید تا مادامی که فاصله بین مراکز دو استوانه (یا فاصله بین نقاط پیک دو هذلولی پاسخ) از یک و نیم برابر قطر هر یک از استوانه‌ها کم‌تر نباشد دو هدف از روی پاسخ‌های تصویر GPR قابل تفکیک و شناسایی می‌باشند. به هر جهت در عمل به دلیل وجود انواع نوفه، شناسایی دو هدف در مجاورت یکدیگر از روی پاسخ GPR در صورتی امکان‌پذیر است که نقاط پیک پاسخ‌های آن‌ها (هذلولی-ها) خیلی بیش‌تر از این مقدار از یکدیگر فاصله داشته باشند.



شکل ۵-۲۴: بررسی تأثیر فاصله بین مراکز دو استوانه توخالی به قطر یک متر مدفون در عمق یک متری در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی بر روی پاسخ GPR: فاصله بین مراکز دو استوانه در مدل ۳۷ برابر با قطر هر یک از استوانه‌ها و در مدل ۳۸ سه برابر قطر هر یک از استوانه‌هاست.

۵-۱۰- بررسی عامل شکل هندسی هدف روی پاسخ GPR

برای این منظور مطابق شکل ۵-۲۵ پاسخ GPR برای مدل‌های حاوی منشور دو بعدی تو خالی در سه شکل مختلف مستطیل افقی که عرض آن دو برابر ارتفاع آن می‌باشد (مدل ۳۹)، مربعی (مدل ۴۰) و مستطیل قائم که ارتفاع آن دو برابر عرض آن می‌باشد (مدل ۴۱) بررسی شده است. هر سه هدف در عمق یک متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی منشور) در محیطی از جنس خاک رس سیلتی مدفون شده‌اند.



شکل ۵-۲۵: بررسی تأثیر ابعاد منشور دو بعدی توخالی بر روی پاسخ GPR. مدل ۳۹: منشور مستطیلی افقی، مدل ۴۰: منشور مربعی و مدل ۴۱: منشور مستطیلی قائم. محیط میزبان خاک رس سیلتی می‌باشد.

شکل ۵-۲۵ نشان می‌دهد که فاصله بین پاسخ سقف (T) و کف هدف (B)، در مدل‌های ۳۹ و ۴۰ برابر و کوچک‌تر از مدل ۴۱ می‌باشد. همچنین در تمام موارد پاسخ سقف مدل به صورت یک شبه هذلولی با پیک مسطح و پاسخ کف مدل به صورت یک شبه هذلولی ناقص با پیک مسطح است.

فصل ششم

پردازش و مدل‌سازی داده‌های صحرایی

۶-۱- مقدمه

همان‌طور که قبلاً نیز آورده شد هدف از این پایان‌نامه، مدل‌سازی پیشرو و وارون داده‌های GPR و بررسی نتایج در چند مورد مطالعاتی است. با توجه به این‌که هر روش مدل‌سازی وارون به برنامه مدل‌سازی پیشرو مناسب جهت محاسبه پاسخ مدل در نقاط و فرکانس‌های مورد نظر، به‌عنوان هسته اصلی نیاز دارد، قبل از انجام مدل‌سازی وارون، ابتدا تلاش شد تا نقاط ضعف و قوت هر یک از نرم‌افزارهای موجود برای مدل‌سازی پیشرو داده‌های الکترومغناطیس فرکانس بالا شناسایی شوند. بنابراین قابلیت، کارایی و سرعت محاسبه نرم‌افزارها با لحاظ مدل‌های مختلف زمینی، مورد بررسی و آزمون قرار گرفت. سپس بر اساس ماهیت و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی اهداف زیرزمینی مورد نظر در برداشت‌های صحرائی، مدل‌های مصنوعی متشکل از محیط زمین لایه‌ای و اهداف زیرزمینی مصنوعی متداول در بررسی‌های زیرزمینی تهیه شده و پاسخ GPR دوبعدی آن‌ها به روش مدل‌سازی پیشرو با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف، تولید گردید. در نهایت این پاسخ‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

در مدل‌سازی وارون برای محاسبه مقدار خطا از روش کم‌ترین مربعات خطا استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف ابتدا با استفاده از الگوریتمی مؤثر و با انجام کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB، برنامه‌ای قابل اعتماد و دقیق برای انجام مدل‌سازی وارون تهیه شد. کد مربوط به این روش در محیط GUI نرم‌افزار MATLAB نوشته شد و در قالب یک نرم‌افزار ساده برای وارون‌سازی تهیه شد و برای مقایسه و تطابق پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی و واقعی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش برداشت واقعی داده‌ها بر روی سطح زمین و مدل‌سازی‌های مصنوعی، با استفاده از روش مد TM انجام شده است. در این روش جهت‌گیری آنتن‌ها عمود بر صفحه برداشت X-Z می‌باشد و به همین دلیل از روابط مد TM به منظور مدل‌سازی استفاده شده است. نگاشت‌های راداری داده‌های صحرائی GPR نیز بعد از پردازش توسط نرم‌افزار Reflexw به نمایش درآمده است. در نگاشت‌های راداری تهیه شده توسط این نرم‌افزار، شاخص عمق در سمت راست مقاطع نمایش داده شده است؛ به‌عبارت دیگر مقاطع زمانی و مقاطع عمقی با هم نمایش داده شده‌اند.

۶-۲- برداشت داده‌های صحرائی

در این پژوهش سه مورد مطالعاتی برای برداشت داده‌های واقعی GPR مورد بررسی قرار گرفته است.

۶-۲-۱- محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود

۶-۲-۱-۱- منطقه برداشت داده‌ها

هدف از این برداشت آشکارسازی لوله‌ی فولادی مدفون در خاک در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از روش GPR می‌باشد. محدوده برداشت داده‌ها بین زمین چمن فوتبال دانشگاه و دانشکده علوم انسانی قرار دارد. همچنین این منطقه به فاصله ۱۰ متر از زمین چمن فوتبال و در سمت غرب آن واقع است. لوله فولادی مدفون دارای قطر ۲۲ اینچ بوده و به منظور انتقال فرآورده‌های نفتی تعبیه شده است. این لوله در قسمتی از مسیر خود، از داخل دانشگاه صنعتی شاهرود عبور می‌کند. در این مطالعه داده‌های GPR در راستای پروفیل‌هایی عمود بر امتداد لوله، برداشت شده‌اند [۹۰].

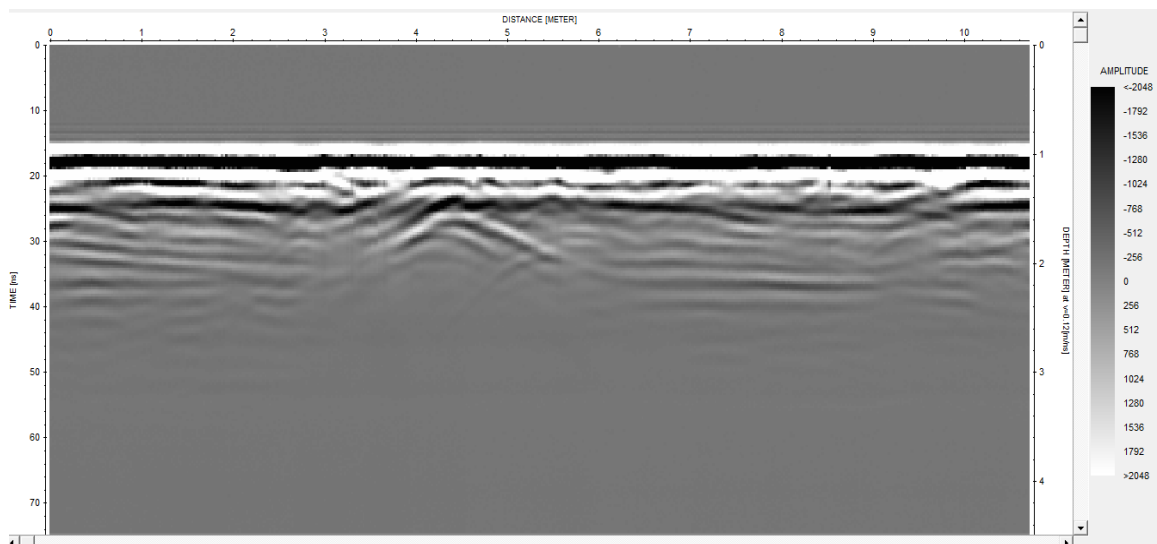
۶-۲-۱-۲- برداشت داده‌های GPR

داده‌های GPR توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شده‌اند. این دستگاه مجهز به آنتن‌های پوششی با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز می‌باشد. این دستگاه از دو آنتن مجزا که درون یک محفظه فایبرگلاس قرار گرفته‌اند، بهره می‌برد. فاصله این آنتن‌ها برابر با ۰/۲۷۹۴ متر، ثابت می‌باشد [۹۰]. داده‌های خام GPR به صورت یک مقطع زمانی GPR است که زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی را نمایش می‌دهد. برای تبدیل مقاطع زمانی به مقاطع عمقی و برخی پردازش‌ها مانند مهاجرت و تصحیح توپوگرافی، لازم است که سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط مورد بررسی، تخمین زده شود. برای تخمین سرعت موج الکترومغناطیسی می‌توان از روش‌های مختلفی هم‌چون برداشت‌های نقطه عمقی مشترک، استفاده از اهداف در عمق مشخص و جداول مربوط به سرعت موج الکترومغناطیسی با معلوم بودن جنس لایه‌ها و محیط مورد بررسی استفاده نمود. در این مورد مقدار میانگین سرعت سیر امواج با استفاده از هذلولی‌های پراش و برای تبدیل زمان رسید به عمق،

۰/۱۲ متر بر نانو ثانیه محاسبه شده است. در ادامه اعمال مرحله به مرحله مسیر پردازشی انتخاب شده روی مقاطع نشان داده می‌شود.

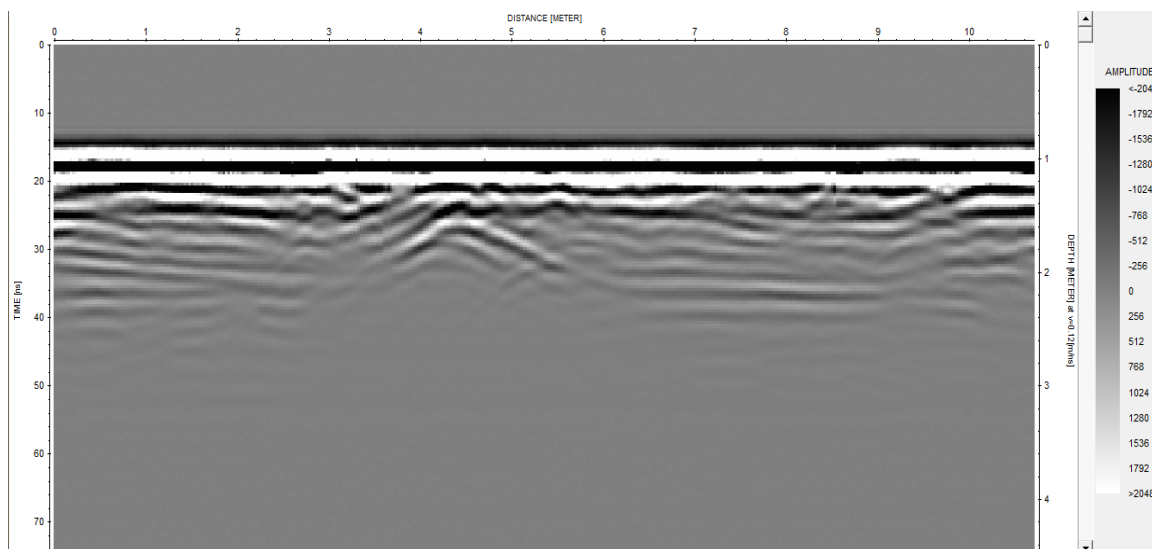
۳-۱-۲-۶- پردازش داده‌های GPR

شکل ۱-۶ مقطع داده‌های خام برداشت شده را بدون اعمال هیچ‌گونه عملیات پردازشی نشان می‌دهد. به دلیل نامشخص بودن محدوده فرکانسی سیگنال و نوفه و عدم آگاهی از نحوه رفتار امواج در محیط، با استفاده از روش آزمون و خطا سعی شد تا با اعمال فیلترهای مختلف و بررسی اثر آن‌ها بر روی مقاطع، مسیر پردازشی مناسبی برای داده‌ها انتخاب شود.



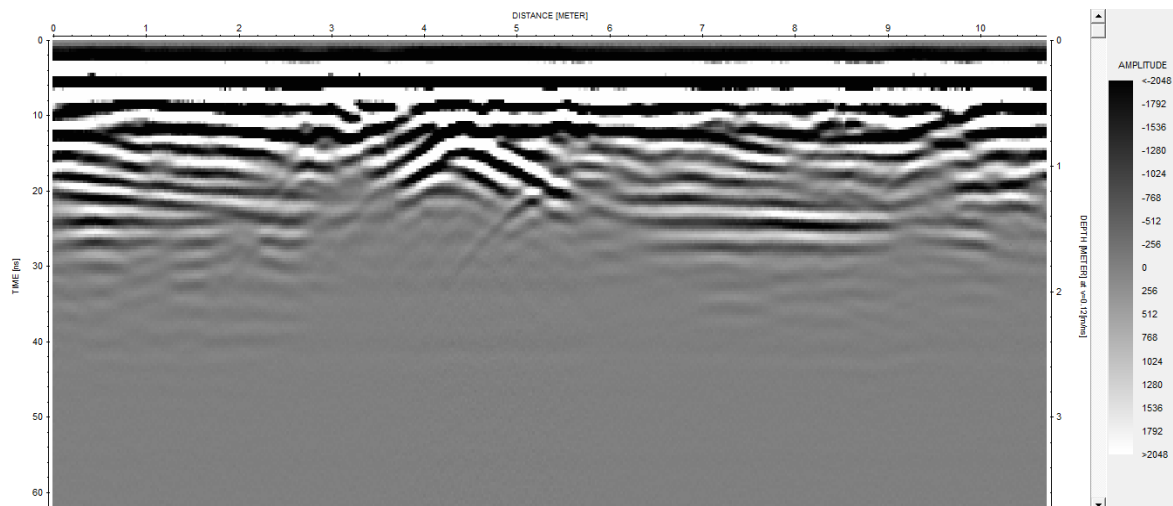
شکل ۱-۶: مقطع داده‌های خام برداشت شده در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود.

در نخستین مرحله از پردازش با به کار گیری فیلتر Dewow، اثر اشباع سیگنال از بین برده می‌شود. این فیلتر یکی از فیلترهای بالاگذر است که با استفاده از روش میانگین‌گیر پی‌درپی، فرکانس‌های بسیار پایین را حذف می‌کند. شکل ۲-۶ مقطع مذکور را بعد از اعمال فیلتر Dewow نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲: مقطع شکل ۶-۱ بعد از اعمال فیلتر Dewow.

به هنگام تفسیر داده‌های GPR، معمولاً سطح زمین به عنوان مبنا (نقطه صفر) در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای همین سطح، عمق یا ضخامت اهداف و لایه‌ها با نسبت دادن سرعت مناسب به لایه‌ها مشخص می‌شوند. بنابراین در این مرحله با استفاده از پارامتر تصحیح ایستا صفر زمانی نگاشت راداری، تصحیح و مشخص می‌شود. پس با توجه به شکل ۶-۲ و فاصله‌ی زمانی ایجاد شده تا پدیدار شدن دامنه‌ی سیگنال-ها که در حدود ۱۴ نانوثانیه می‌باشد، با شیفت زمانی به میزان مذکور در استفاده از پارامتر تصحیح ایستا، صفر زمانی نگاشت راداری، تصحیح می‌شود. پردازش بعدی اعمال بهره روی داده‌ها است. بهره‌ها تابعی متغیر با زمان هستند که روی داده‌ها اعمال می‌شوند که هدف از اعمال آن‌ها، تقویت سیگنال‌های ضعیفی است که از اعماق بیشتر می‌آیند. در این مقطع به‌علت معین بودن محل آنومالی، از تابع بهره دستی manual gain (x) استفاده شده است به‌گونه‌ای که تقویت از ۱۲ نانوثانیه شروع شده و در ۲۶ نانوثانیه به صفر می‌رسد. نتایج تابع فوق در شکل ۶-۳ نشان داده شده است. به‌علت جنس خاک منطقه که درصد بالایی از آن را خاک رس تشکیل داده است، توان سیگنال به‌دلیل میرایی بالای امواج به سختی به عمق بیش‌تر از ۲ متر می‌رسد.



شکل ۳-۶: مقطع پردازش یافته پروفیل مذکور بعد از تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک و تابع تقویت.

۴-۱-۲-۶- تفسیر داده‌های GPR

در مقطع نشان داده شده در شکل ۳-۶، یک هذلولی مشخص در چهار متری از نقطه شروع پروفیل قابل مشاهده است. این هذلولی پاسخ لوله فولادی مدفون می باشد که بر روی سطح فوقانی این لوله نیز زمین دچار مقداری به هم ریختگی شده است. به دلیل عمق پوخته پایین امواج GPR در فلزات، امواج GPR در فواصل بسیار کوتاهی در آنها اتلاف می‌شوند و توانایی عبور از چنین ساختارهایی را نخواهند داشت. از این رو در مقاطع GPR، هیچ‌گونه بازتابی پایین‌تر از سطح فلزات مشاهده نخواهد شد. در نهایت از این مقطع در مدل‌سازی وارون داده‌های GPR برای انجام تطبیق مقاطع استفاده شده است.

۲-۲-۶- منطقه تپه حصار دامغان

۱-۲-۲-۶- معرفی منطقه برداشت

تپه حصار دامغان از تپه‌های پیش از تاریخ در فلات مرکزی ایران است که در ۲ کیلومتری جنوب شرقی شهر دامغان در استان سمنان قرار دارد. اولین کاوش‌های باستان‌شناسی در این منطقه در سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ توسط یک هیئت آمریکایی از دانشگاه پنسیلوانیا، تحت سرپرستی اریک اشمیدت^۱ انجام گرفت و دو تپه در این منطقه حفاری شد. لازم به ذکر است که محوطه باستانی تپه حصار در منطقه‌ای

^۱ Schmidt E.F

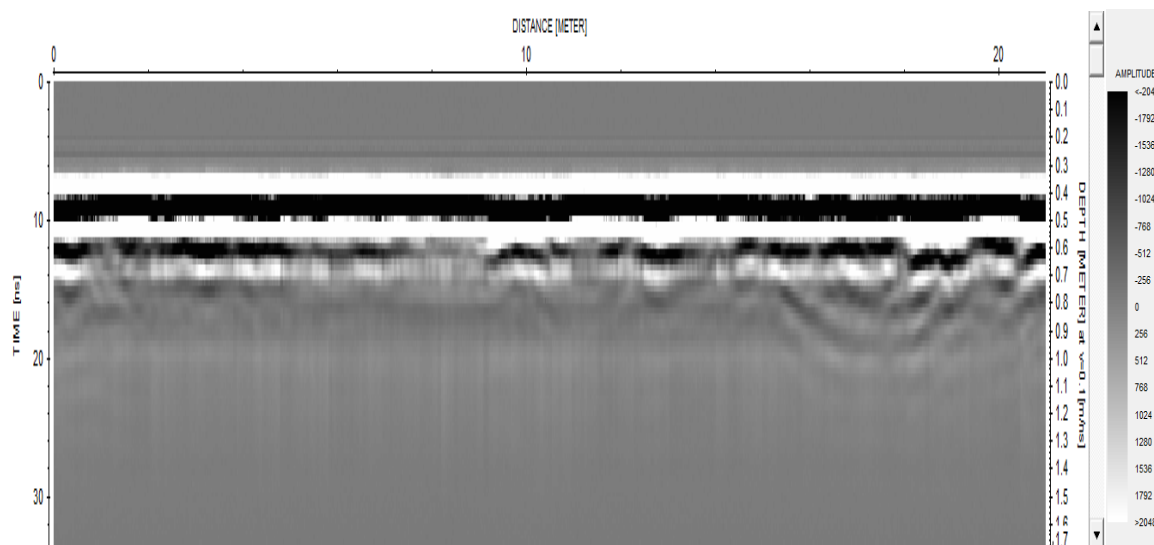
کویری واقع شده و تنها مصالح موجود در محیط برای ساختن بناها، خاک رس بوده است. از طرفی باقی مانده بناها در آوارهای خود که دارای جنس یکسانی هستند، مدفون شده‌اند. با توجه به عوامل فوق از دیدگاه ژئوفیزیکی نمی‌توان انتظار داشت که تباین قابل توجهی بین ساختارهای مدفون احتمالی و محیط در برگیرنده‌شان وجود داشته باشد. عاملی که به نظر می‌رسد می‌تواند باعث به‌وجود آمدن تباین فیزیکی مطلوب بین اهداف زیرسطحی مورد نظر و محیط در برگیرنده شود، متراکم‌تر بودن ساخت‌های مدفون نسبت به محیط اطراف است. از طرف دیگر این عامل نیز با عبور خط راه آهن از میان محوطه باستانی، تحت تأثیر لرزش‌های مداوم ناشی از تردد قطارها قرار گرفته است و با گذشت زمان این بافت سخت‌تر بناهای احتمالی مدفون نیز، سست‌تر شده است. بنابراین تباین اولیه خصوصیات فیزیکی (از جمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی) سازه‌ها با محیط اطراف‌شان بیش از پیش کاهش پیدا کرده است [۹۱].

۶-۲-۲- برداشت داده‌های GPR

برداشت داده‌های GPR با استفاده از دستگاه رادار Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software انجام شده است. داده‌ها به روش پروفیل زنی بازتابی جمع‌آوری شدند. برداشت داده‌ها در راستای یک پروفیل به طول ۲۰ متر و آزیموت ۵۰ درجه انجام شد. سرعت سیر موج در محیط نیز با استفاده از روش برازش هذلولی در حین برداشت، معادل 0.1 m/ns برآورد گردیده است [۹۱].

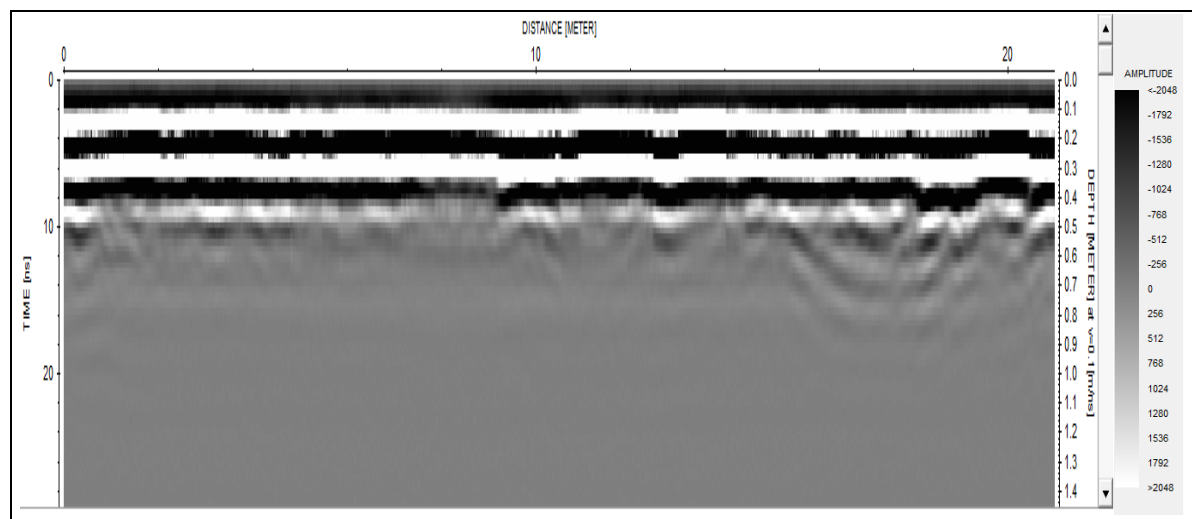
۶-۲-۳- پردازش داده‌های GPR

در شکل ۴-۶ مقطع داده‌های خام GPR برداشت شده، نشان داده شده است. در این پروفیل در فاصله ۱۰ متری و نیز از فاصله ۱۵ تا ۲۰ متری شروع پروفیل، رخدادهایی قابل مشاهده است که در بازه عمقی ۰/۵ تا یک متری قرار دارند. همان‌طور که از این مقطع دیده می‌شود به دلیل رسانایی بالای محیط و میرایی امواج اطلاعاتی از عمق ۱۰۰ سانتی‌متر به بعد به‌دست نیامده است.



شکل ۴-۶: مقطع خام داده‌های برداشت شده در منطقه تپه حصار دامغان.

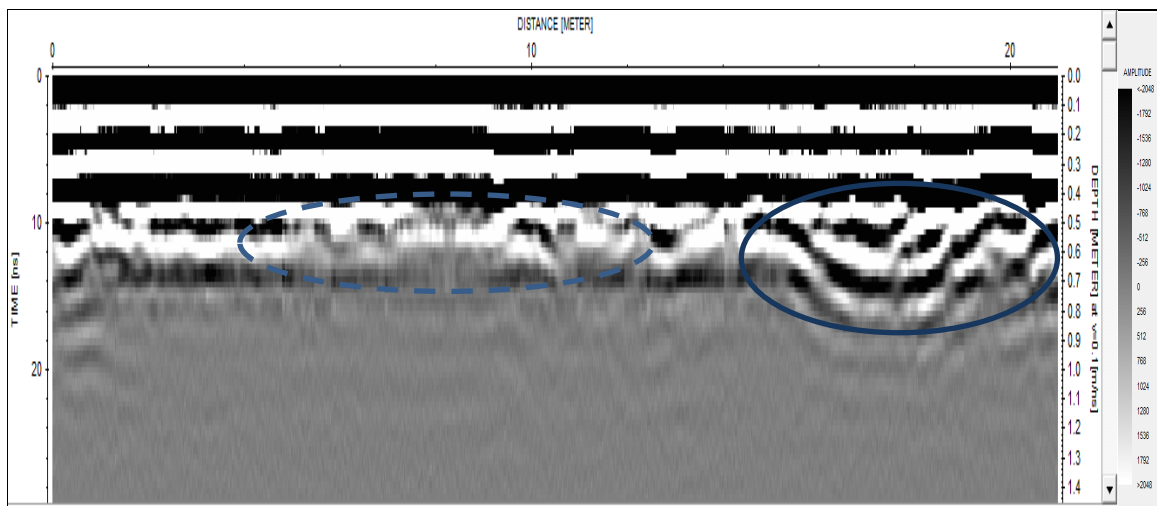
در نخستین مرحله از پردازش برای از بین بردن اثر اشباع سیگنال و حذف فرکانس‌های بسیار پایین، فیلتر Dewow بر روی داده‌ها اعمال شد. در ادامه با به‌کارگیری پارامتر تصحیح ایستا، زمان صفر نگاشت راداری، تصحیح گردید که نتیجه عملیات در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: مقطع پردازش شده نگاشت راداری بعد از اعمال تصحیح اشباع سیگنال و تصحیح زمان - صفر.

مرحله بعدی پردازش محدود نمودن پهنای باند فرکانسی است. در این مرحله با انتخاب فرکانس‌های قطع مناسب می‌توان با نگه داشتن فرکانس‌های مطلوب، نسبت سیگنال به نوفه را افزایش داد. چرا که بیش‌تر نوفه‌ها خارج از این محدوده انتخاب شده قرار دارند. معمولاً فرکانس‌های قطع به‌صورت تقریبی از

یک چهارم تا یک دوم و دوبرابر تا چهار برابر فرکانس مرکزی آنتن اعمال می‌شوند. در این بخش مقادیر ۱۲۵، ۲۵۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ مگاهرتز، انتخاب شده است. برای افزایش کیفیت مقطع به دست آمده، از فیلتر دوعبده حذف زمینه استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد این فیلتر جزء فیلترهای مکانی بوده و عملکرد آن بدین صورت است که با انتخاب و میانگین‌گیری تعداد مشخصی از تریس‌ها و کاستن تریس میانگین از بخش مورد نظر پردازشگر در راستای محورهای زمان و جابه‌جایی سعی در متمایز شدن هدف مورد نظر و افزایش کیفیت نگاشت راداری دارد [۲۹]. همان‌طور که قبلاً هم گفته شد، کنترل بهره اتوماتیک سعی می‌کند که با اعمال یک تابع بهره که با عکس شدت سیگنال متناسب است، تمام سیگنال‌ها را یکسان کند. اما اطلاعات حاوی دامنه نسبی سیگنال را حفظ نمی‌کند [۶۶]. با اعمال بهره AGC با مقدار بیشینه بهره ۵۰۰ بر روی نگاشت راداری، شکل ۶-۶ به دست آمده است. در این شکل افزایش محسوس کیفیت نگاشت راداری در اثر اعمال پارامترهای پردازشی مناسب مذکور، کاملاً مشهود است.



شکل ۶-۶: مقطع پردازش یافته نهایی بعد از به‌کارگیری فیلترهای میان‌گذر، بردارنده زمینه و بهره خودکار.

۶-۲-۲-۴- تفسیر

همان‌طور که در مقطع GPR نشان داده شده در شکل ۶-۶ نمایان است در قسمت میانی پروفیل (مشخص شده با بیضی خط چین) عمق نفوذ نسبت به بخش انتهایی آن (مشخص شده با بیضی خط پر)

به شدت کاهش پیدا کرده است. علت این رخداد در قسمت‌های میانی احتمالاً افزایش رسانندگی در اثر وجود بافت سست‌تر و رسوبات دانه‌ریزی است که در اثر تخریب سازه‌ها و یا روی هم انباشته شدن رسوبات ناشی از جریانات حاصل از ریزش‌های جوی است. در بخش انتهایی پروفیل که عمق نفوذ بیش‌تر است، احتمالاً بافت متراکم‌تر (با مقاومت ویژه بالاتر نسبت به بخش میانی) وجود دارد که در این صورت این بافت متراکم می‌تواند مربوط به سازه‌های مدفون زیر سطح باشد. بیضی خط پر مشخص کننده نواحی با مقاومت ویژه بالا است و با بازتاب‌هایی با دامنه بزرگتر نسبت به دیگر بخش‌ها قابل تشخیص است.

۶-۲-۳- منطقه یخچال علم‌کوه مازندران

قله‌ی علم‌کوه با ارتفاع ۴۸۳۵ متر از سطح دریا در منطقه‌ای به نام تخت سلیمان با طول شرقی (۵۰ درجه و ۹۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و صفر دقیقه) و عرض شمالی (۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه)، دومین قله مرتفع ایران بعد از قله دماوند محسوب می‌شود. علم‌کوه بزرگ‌ترین و مهم‌ترین یخچال موجود ایران است که در شهرستان کلاردشت مازندران واقع بوده و در دوره کواترنری به وجود آمده است. ارتفاع این یخچال حدود ۳۱۹۷ تا ۴۸۳۵ متر بالای سطح دریا می‌باشد. محدوده مورد مطالعه بر روی رسوبات یخچالی کواترنری (مورن) واقع شده است. ضخامت مورن‌های سطحی از ۰/۵ متر تا حدود ۱/۵ متر (در قسمت بالای یخچال) متغیر است. گفتنی است که در فصل برداشت داده‌ها (خرداد ماه ۱۳۹۱)، سطح منطقه توسط برف با ضخامت متغیر (حدود ۰/۵ تا ۱ متر) پوشیده بود. شرایط آب و هوایی بسیار سرد، ارتفاع زیاد یخچال و خطر سقوط بهمن باعث شده است که از روش GPR با توجه به سرعت بالا در برداشت داده‌ها و قدرت تفکیک بالای این روش ژئوفیزیکی، برای مطالعه این یخچال استفاده شود [۴۹].

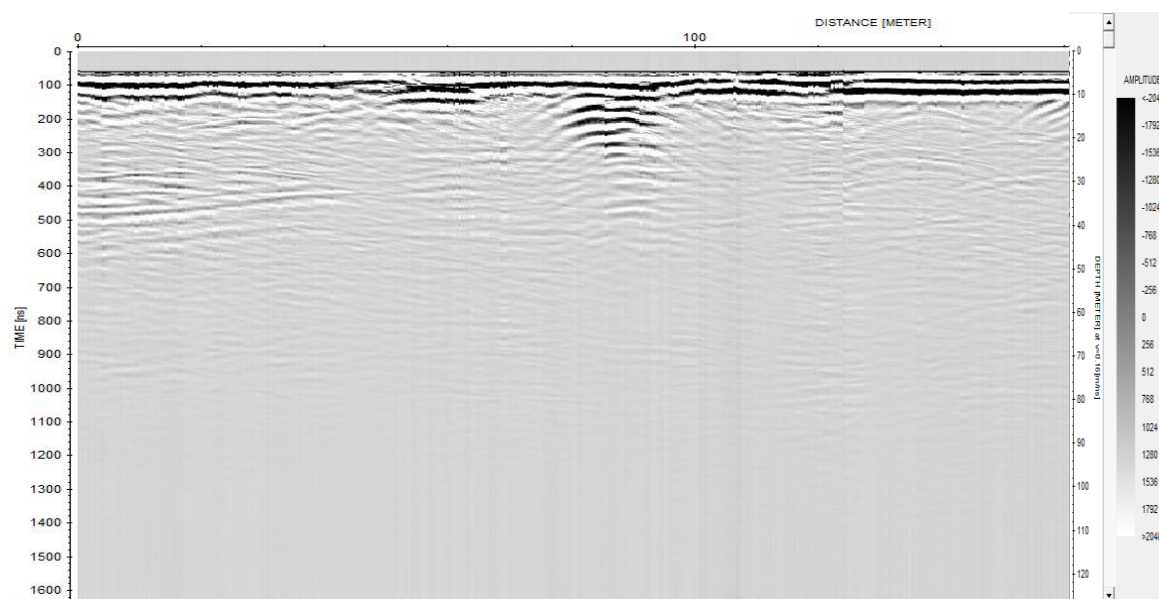
۶-۲-۳- برداشت داده‌های GPR

داده‌ها با استفاده از دستگاه Mala GeoScience با آنتن ۲۵ مگاهرتز توسط مؤسسه تحقیقات آب کشور زیر نظر پژوهشکده منابع آب و در قالب طرح ملی "محافظت از یخچال‌های طبیعی کشور" در خرداد ماه سال ۱۳۹۱ بر روی یخچال علم‌کوه صورت گرفته است. این سیستم یک رادار پالسی بوده که از

آنتن‌های بدون پوشش^۱ بهره گرفته و داده‌ها را به روش دور افت مشترک، برداشت می‌کند. فاصله بین فرستنده و گیرنده در آن ثابت و برابر با ۶ متر و فاصله بین دو رد متوالی ۰/۲۹۹۸۹۲ متر است. در این پژوهش با توجه به جداول موجود و معلوم بودن جنس لایه‌های مورد بررسی، سرعت موج الکترومغناطیسی برای لایه یخ به دلیل وجود واریزه در یخ ۰/۱۶ متر بر نانوثانیه (کم‌تر از سرعت موج الکترومغناطیسی در یخ خالص) انتخاب شده است. در این برداشت جهت‌گیری آنتن‌های فرستنده و گیرنده در طی برداشت داده‌ها ثابت بوده که باعث می‌شود، قطبیت آنتن‌های فرستنده و گیرنده در طی برداشت داده‌ها ثابت باقی بماند [۴۹].

۳-۳-۲-۶- پردازش داده‌های GPR

مقطع زمانی و عمقی داده‌های خام مقطع منطبق بر این پروفیل با طول ۱۶۰ متر، در شکل ۶-۷ نمایش داده شده است.

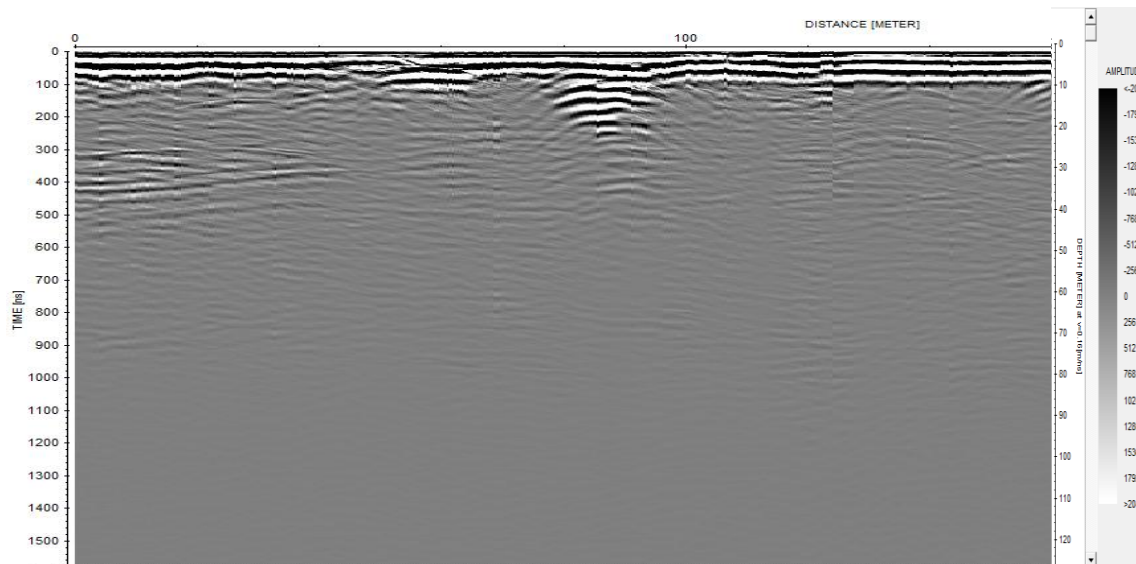


شکل ۶-۷: مقطع اولیه داده‌های برداشت شده در منطقه علم‌کوه

در این مورد نیز ابتدا فیلتر Dewow با مقدار پنجره زمانی ۴۰ نانوثانیه بر روی داده‌ها اعمال شد. به منظور قرارگیری نقطه شروع تریس‌ها در سطح زمین و قرارگیری بازتاب‌ها در مکان واقعی، از فیلتر

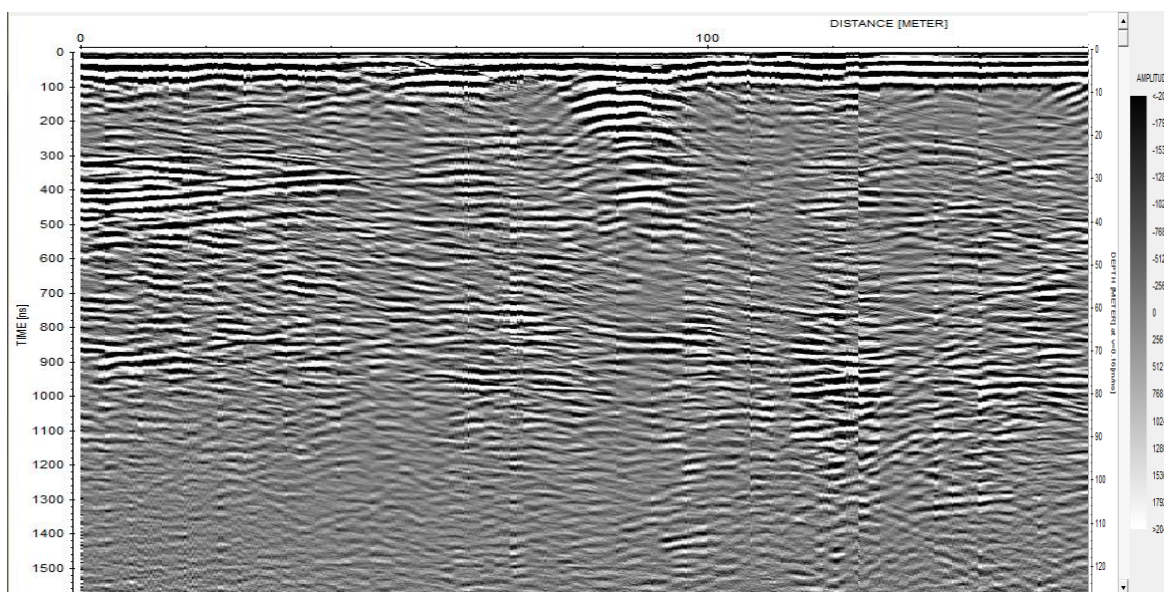
¹ unshielded

تصحیح ایستا (استاتیک) در مرحله بعدی پردازش استفاده شد. نتایج پردازش‌های مذکور در شکل ۸-۶ نمایش داده شده است.



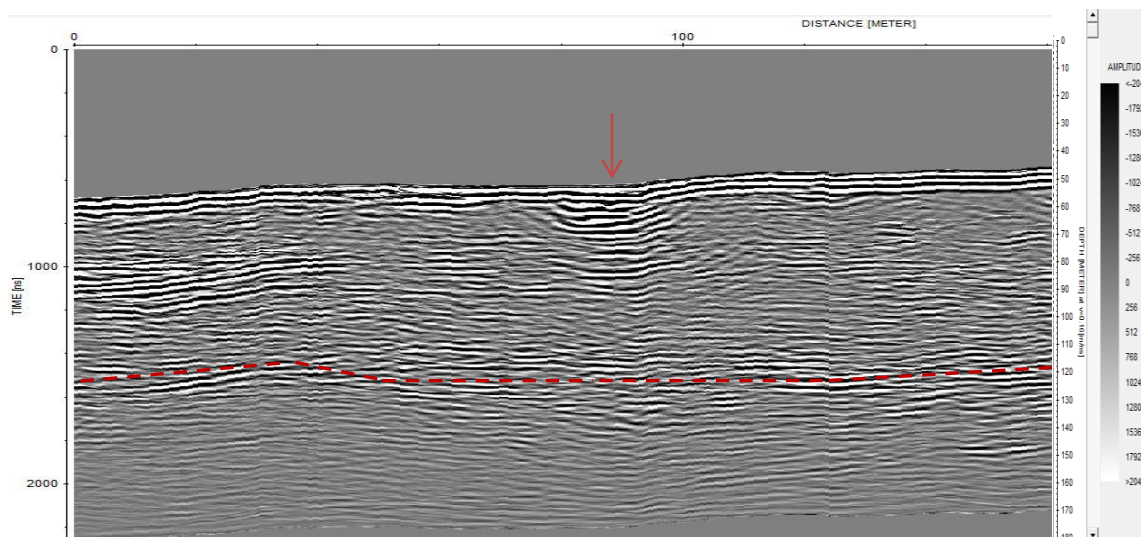
شکل ۸-۶: مقطع پردازش شده بعد از تصحیح ایستا و اشباع سیگنال

به منظور جبران تضعیف امواج الکترومغناطیس، از تابع تقویت ترکیبی از دو بهره خطی و نمایی استفاده شد. شکل ۹-۶ نداشت راداری را بعد از به‌کارگیری بهره ترکیبی خطی و نمایی به ازای مقدار $0/2$ برای بهره خطی و $0/16$ برای قسمت نمایی نشان می‌دهد.



شکل ۹-۶: مقطع عمقی و زمانی داده‌های GPR بعد از به‌کارگیری بهره ترکیبی خطی و نمایی.

وجود توپوگرافی مسیر امواج الکترومغناطیسی GPR را نسبت به راستای قائم، به جلو یا عقب می‌راند و با افزایش شیب سطح زمین انحراف از راستای قائم نیز بیش‌تر می‌شود. آنتن‌های گیرنده نیز به وجود توپوگرافی حساس هستند. بنابراین با توجه به این موضوع و وجود توپوگرافی زیاد در بخشی از این منطقه، تصحیح توپوگرافی بر روی داده‌ها اعمال و رخدادها به مکان صحیح خود نسبت داده شدند. همان‌طور که در شکل ۶-۱۰ مشاهده می‌شود توپوگرافی بر داده‌های GPR تأثیر چندانی نگذاشته است. همچنین برای حذف اثر جهت‌گیری منبع و گیرنده بر روی داده‌های بازتاب شده و توزیع هندسی سطح هدف (بازتاب کننده)، از فیلتر مهاجرت f-k استفاده شده است. فیلتر مهاجرت f-k دارای چهار پارامتر طول پنجره، سرعت امواج الکترومغناطیسی GPR در محیط انتشار و زمان شروع و پایان این فیلتر است. در این پردازش، از طول پنجره ۱۰ نانوثانیه و سرعت ۰/۱۶ متر بر نانوثانیه موج الکترومغناطیسی در یخ برای اعمال فیلتر مهاجرت به منظور تصحیح اثر توپوگرافی استفاده شده است. برای جلوگیری از اعوجاج‌های حاصل از مهاجرت در زمان‌های پایانی این مقطع، این پردازش به بازه زمانی ۰ تا ۱۳۰۰ نانوثانیه محدود شده است. شکل ۶-۱۰ مقطع زمانی و عمقی این پروفیل را بعد از اعمال این دو فیلتر نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۰: مقطع زمانی و عمقی پروفیل برداشت شده بعد از پردازش‌های تصحیح اشباع سیگنال، تصحیح استاتیک، بهره SEC، مهاجرت f-k و تصحیح توپوگرافی

۶-۲-۳-۴- تفسیر

همان‌طور که در مقطع شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است، داده‌های پردازش شده GPR ساختارهای مختلف زیرسطح یخچال را نشان می‌دهد. هرگونه تغییر در ثابت دی‌الکتریکی محیط انتقال دهنده موج، به‌صورت بازتاب در مقطع GPR مشاهده می‌شود. این تغییر پیوسته در بستر یخچال، که به دلیل تباین گذردهی الکتریکی سنگ بستر (گرانیت) و یخ است، با توجه به حضور لایه‌های واریزه‌ای داخل یخ، تضعیف شده است. در این مقطع محدوده‌ای که با پیکان مشخص شده و از زمان ۶۲۵ تا ۹۸۰ نانوثانیه (تقریباً به طول ۲۸ متر) در فاصله ۷۴ تا ۹۷ متری ابتدای پروفیل قرار دارد، به ساختار داخلی یخچال مرتبط نیست و احتمالاً یک گودال پر شده از یخ‌آب و واریزه است. در زمان برداشت داده‌ها (خرداد ماه ۱۳۹۱)، برف کل سطح منطقه را پوشانده و گودال مشخص نبود؛ ولی در فصل ذوب برف دیده شد که سیستم اندازه‌گیری GPR مستقیماً از روی گودال عبور کرده است. همچنین یک لایه واریزه‌ای پیوسته در داخل یخ، به‌طور واضح از ابتدا تا انتهای پروفیل، آشکارسازی شده است. بستر یخچال در زیر پروفیل مورد بررسی نیز قابل شناسایی است.

۶-۳- مدل‌سازی دو بعدی پیشرو به روش FDTD

مدل، بیان ریاضی ایده‌آلی از مقطع زمین است. یک مدل متشکل از یک سری پارامترها است که این پارامترها کمیت‌های فیزیکی هستند که باید با استفاده از داده‌های برداشت شده، تخمین زده شوند. پاسخ مدل، داده‌های ساختگی هستند که از روابط ریاضی تعریف کننده مدل، محاسبه می‌شوند. در همه روش‌های مدل‌سازی سعی بر آن است تا مدلی برای زیر سطح تعیین شود که نزدیک‌ترین و شبیه‌ترین پاسخ را به پاسخ داده‌های برداشت شده داشته باشد. به‌طور کلی مدل‌سازی به دو روش پیشرو و وارون انجام می‌شود [۹۲]. در مدل‌سازی پیشرو ورودی فرایند مدل‌سازی، یک مدل آزمون (فرضی) از زمین می‌باشد و در طی فرایند با توجه به معادلات حاکم بر مسئله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به عنوان خروجی مدل ارائه می‌شود. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) آن‌قدر ادامه پیدا می‌کند تا پاسخ مدل، برازش خوبی با داده‌های صحرائی پیدا کند، یعنی از مدل به داده‌ها می‌رسیم.

مدل‌سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا انجام می‌شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزاء زیرسطحی در نظر گرفته شده و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود. سپس پاسخ این مدل برای هدف مورد نظر تحت شرایط تعیین شده، محاسبه می‌شود. در روش GPR، پارامترهای مدل، مقادیر ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی محیط میزبان و هدف، اندازه و ابعاد و هندسه مدل هستند. خروجی مدل‌سازی، مقادیر میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی برداشت شده به صورت مقاطع دو بعدی مکان بر حسب زمان هستند. رابطه ریاضی بین پارامترهای مدل و پاسخ آن‌ها با استفاده از روش‌های تفاضل محدود، فراهم می‌شود.

۶-۳-۱- بررسی نتایج

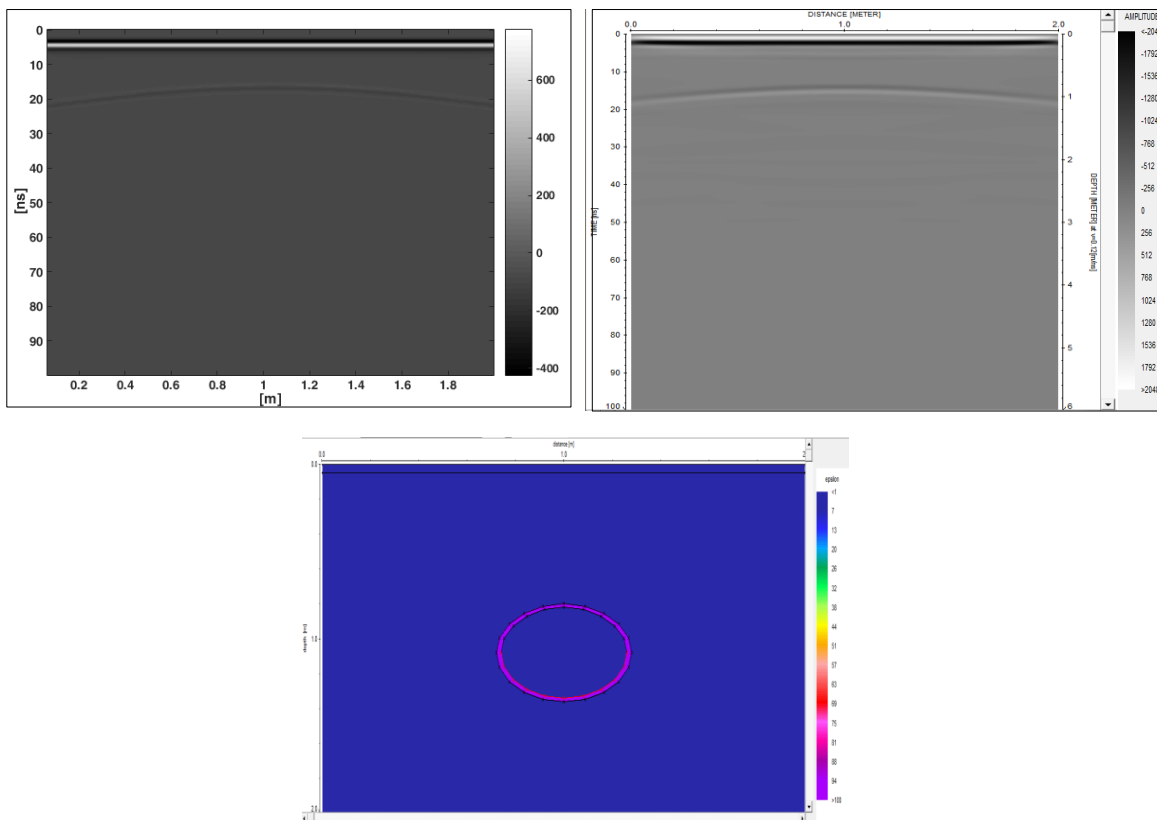
➤ مدل‌سازی داده‌های GPR محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود

پاسخ GPR برای مدل شامل لوله فولادی حاوی فرآورده نفتی در محیط میزبان از جنس خاک رسی سیلتی با استفاده از دو نرم‌افزار GprMax2D و Reflexw مدل‌سازی شد. ویژگی‌های فیزیکی مدل مذکور در جدول ۶-۱ نشان داده شده است. ابعاد مدل ۲×۲ متر بوده و لوله فلزی با قطر داخلی ۵۲ سانتی‌متر و ضخامت دیواره ۲ سانتی‌متر در عمق ۸۰ سانتی‌متر (فاصله از سطح مدل تا سقف هدف) قرار دارد. بنابراین برای مدل‌سازی داده‌های GPR برداشت شده در این منطقه، تنها بخشی از پروفیل که آنومالی در آن قرار گرفته، مدل‌سازی شده است.

جدول ۶-۱: ویژگی‌های فیزیکی مدل شامل لوله فولادی حاوی فرآورده نفتی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی.

جنس	گذردهی دی‌الکتریک	رسانندگی (S/m)	تراوایی مغناطیسی
لوله فلزی از جنس فولاد	۱۰۰	$۱۰^۴$	۶/۰
فرآورده نفتی ^۱	۱/۹۴	$۱۰^{-۷}$	۱/۰
خاک رس سیلتی	۶/۰	۰/۰۰۷	۱/۰

مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی به همراه پاسخ‌های GPR مدل‌سازی شده آن، در شکل ۶-۱۱ نشان داده شده است. مقطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Reflexw و GprMax2D به ترتیب در سمت راست و چپ این شکل مشاهده می‌شود. رخداد افقی در قسمت بالای شکل، پاسخ امواج مستقیم زمین و هوا می‌باشد.

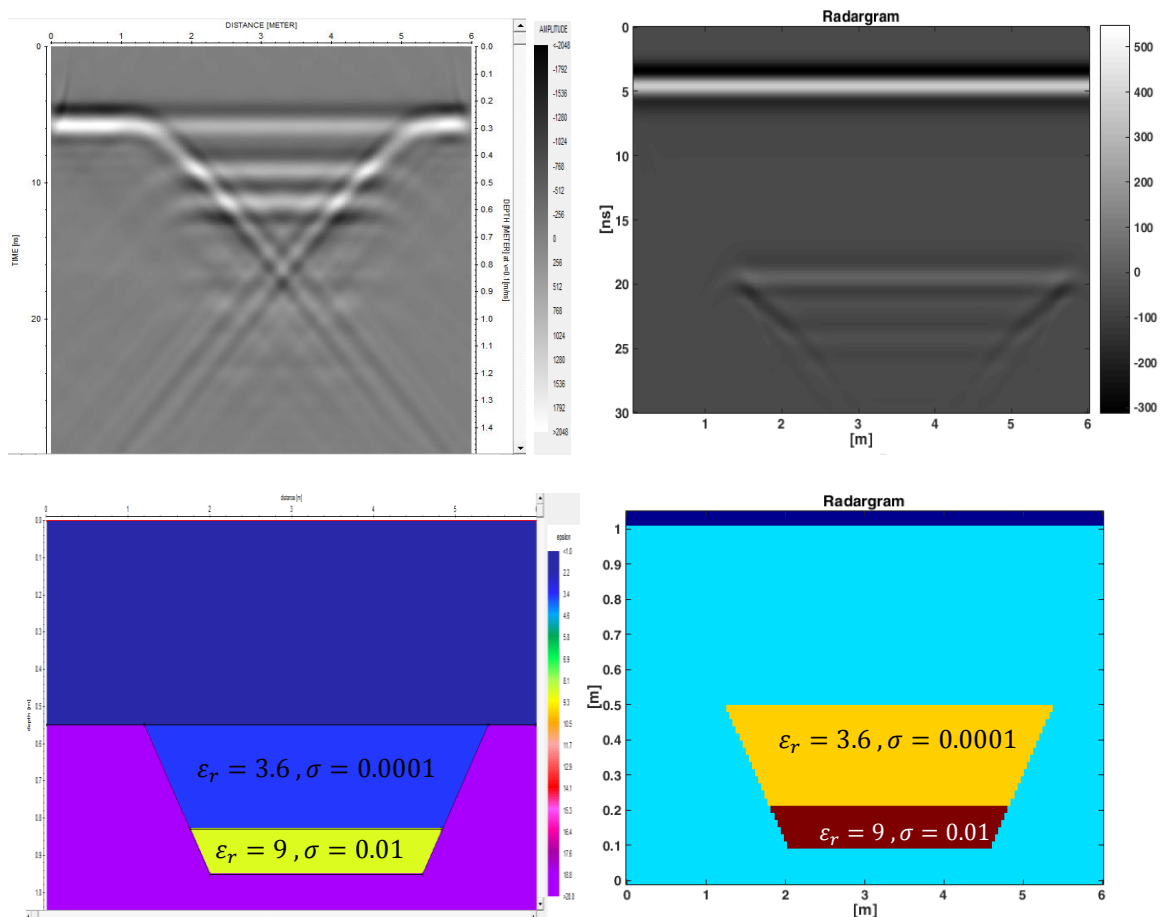


شکل ۶-۱۱: مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی در قسمت پایین شکل و پاسخ‌های سیستم GPR در قسمت بالای شکل (مقطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Reflexw در سمت راست و مقطع مدل‌سازی شده در نرم‌افزار GprMax2D در سمت چپ).

¹ Gasoline

➤ مدل‌سازی داده‌های GPR منطقه تپه حصار دامغان

در قسمت پایین شکل ۶-۱۲ مدل فیزیکی و هندسی شامل چند ضلعی دوبعدی و در قسمت بالا پاسخ سامانه GPR آن نشان داده شده است (سمت راست مربوط به نرم‌افزار GprMax2D و سمت چپ مربوط به نرم‌افزار Reflexw می‌باشد). در این مورد نیز برای مدل‌سازی مقطع مربوط به برداشت داده‌های واقعی منطقه مطالعه شده، تنها بخشی از پروفیل که بی‌هنجاری در آن قرار گرفته، مدل‌سازی شده است. بنابراین ابعاد مدل 6×1 متر در نظر گرفته شد. ویژگی‌های فیزیکی محیط میزبان به صورت $\epsilon_r = 20$ و $\sigma = 0.0025 \text{ mS/m}$ بوده در حالی که مقدار تراوایی مغناطیسی محیط میزبان و هدف چند ضلعی برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد می‌باشد.



شکل ۶-۱۲: مدل فیزیکی و هندسی مدل شامل توده چند ضلعی در قسمت پایین و پاسخ سامانه GPR آن در بالای شکل (سمت راست مربوط به نرم‌افزار GprMax2D و سمت چپ مربوط به نرم‌افزار Reflexw).

برای داشتن پاسخی مطلوب در تصویر GPR سمت چپ شکل ۶-۱۲ از پردازش مهاجرت استفاده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود مدل هندسی ایجاد شده در دو نرم‌افزار اندکی با یکدیگر اختلاف دارند. علت این امر آن است که برای مدل‌سازی اهدافی به شکل چند ضلعی دو بعدی در نرم‌افزار Reflexw بایستی یک مرز تعریف شود. به عبارت دیگر در این نرم‌افزار، مدل‌سازی پاسخ سامانه GPR تنها برای چند ضلعی‌هایی به شکل مربع و مستطیل امکان‌پذیر است. آن هم به این دلیل که این اشکال در منوی این نرم‌افزار موجود است. با این وجود در هر دو مدل، اهداف دارای ابعاد و عمق قرارگیری یکسان هستند. تفاوت آن‌ها تنها در ضخامت لایه هوا است که بررسی تعداد زیادی از مدل‌ها نشان می‌دهد که این عامل در پاسخ سیستم GPR تأثیر چندانی نخواهد داشت. هم‌چنین همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخی که نرم‌افزار GprMax2D برای چنین اهدافی تولید می‌کند از تفکیک‌پذیری پایینی برخوردار است.

➤ مدل‌سازی داده‌های GPR منطقه یخچال علم‌کوه

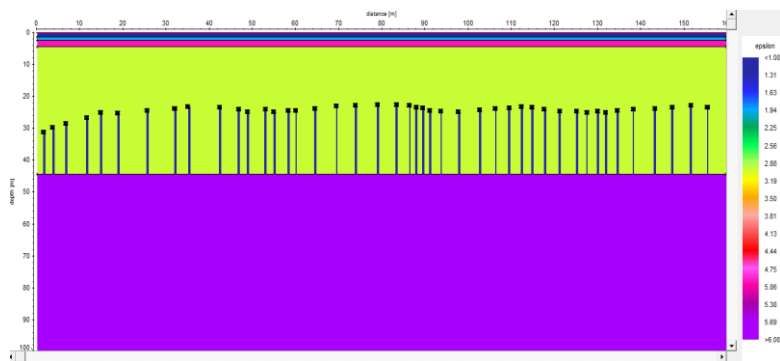
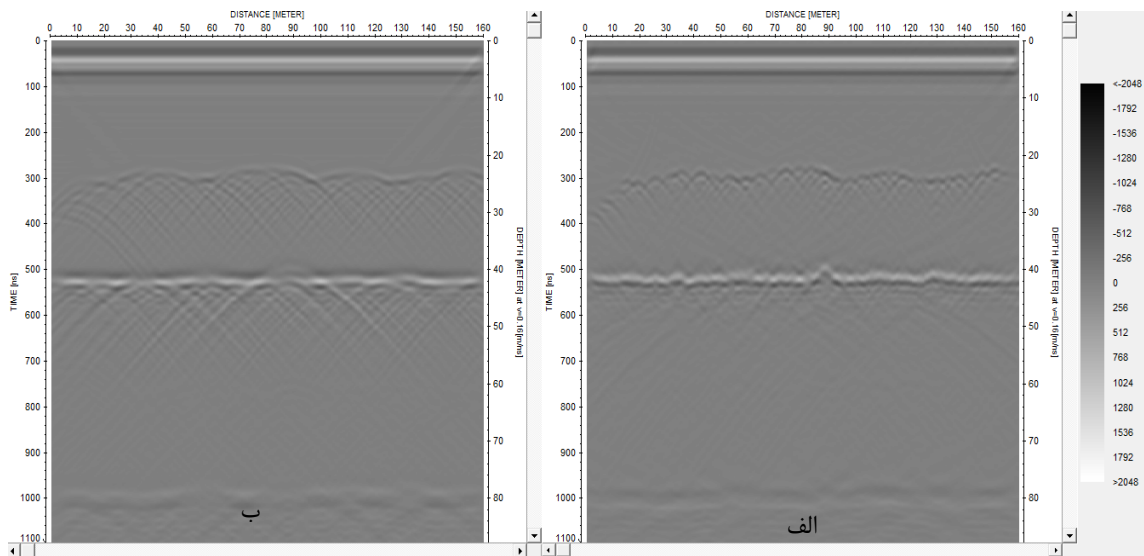
یکی از اهداف اصلی برداشت GPR در منطقه یخچال علم‌کوه، آشکارسازی بستر یخچال و تعیین ضخامت لایه یخ می‌باشد. با توجه به ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه که به ترتیب از سطح به عمق به ترتیب، لایه اول برف (ضخامت متغیر بین ۰/۵ متر تا ۱ متر)، لایه دوم واریزه (ضخامت متغیر بین ۰/۵ متر تا ۱ متر)، لایه سوم یخ و در نهایت بستر یخچال (لایه گرانیتی) قرار دارند و هم‌چنین با توجه به حضور واریزه‌هایی داخل یخ و متأثر از آن، پاسخ GPR یک مدل مصنوعی دارای لایه‌بندی با ناهمگنی‌هایی به شکل دایره با شعاع ۲۵ سانتی‌متر مدل‌سازی شده است. نتایج مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Reflexw همراه با مدل فیزیکی و هندسی آن‌ها در شکل ۶-۱۳ نشان داده شده است. مشخصات فیزیکی لایه‌های شبیه‌سازی شده‌ی این مدل در جدول ۶-۲ خلاصه شده است. مقدار تراوایی مغناطیسی (μ) محیط میزبان و هدف نیز، برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد (خلاً) در نظر گرفته شده است.

جدول ۶-۲: مشخصات فیزیکی مدل‌های شبیه‌سازی شده شکل‌های ۱۳-۶ و ۱۴-۶ [۴۹].

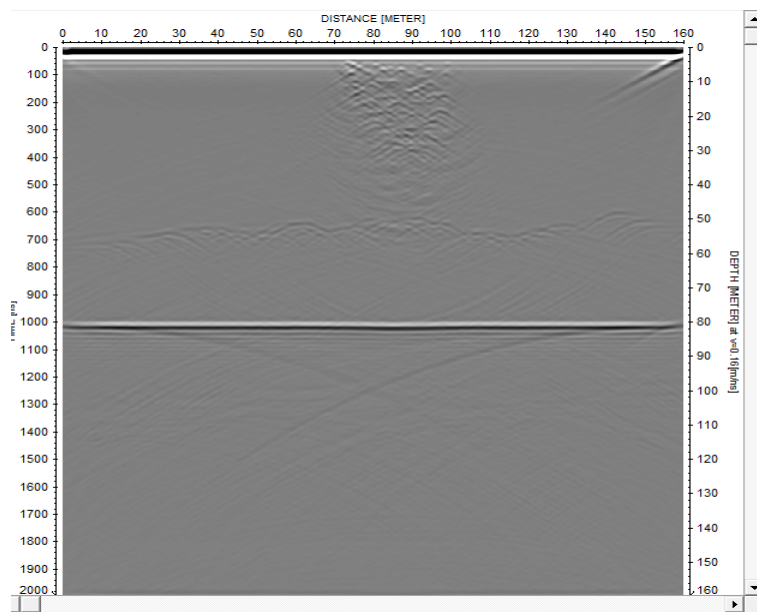
جنس لایه	ضخامت (متر)	گذردهی دی‌الکتریک	رسانندگی (mS/m)
برف	۱	۲	۰/۱
واریزه	۱	۵	۰/۲
یخ	۴۰	۳	۰/۰۱
گرانیت		۶	۰/۱

همان‌طور که از پاسخ GPR شکل ۱۳-۶-الف مشاهده می‌شود لایه‌های نازک اول و دوم (برف و واریزه) با توجه به کم بودن ضخامت این لایه‌ها در مقطع شبیه‌سازی شده قابل تفکیک نیستند. بستر یخچال در زمان ۵۲۰ نانوثانیه مشخص شده است. اهداف نقطه‌ای به دلیل پراش امواج GPR در برخورد با آن‌ها به صورت بازتاب‌های هذلولی شکل در مقاطع GPR، دیده می‌شوند [۶]. بنابراین برای دستیابی به پاسخی بهتر از مهاجرت f-k استفاده شده است. در مهاجرت f-k، داده‌ها نخست توسط تبدیل فوریه دو بعدی، از حوزه مکان-زمان به حوزه فرکانس-طول موج انتقال داده و پس از انجام محاسبات مربوط به مهاجرت، مجدداً داده‌ها توسط تبدیل فوریه معکوس به حوزه مکان-زمان انتقال داده می‌شوند. شکل ۶-۱۳-ب مقطع این مدل را بعد از اعمال این فیلتر نمایش می‌دهد [۸۵].

به‌منظور ایجاد تشابه بیشتر مدل‌های مصنوعی با واقعیت و دستیابی به نتایج واقع‌گرایانه‌تر، مدلی شامل لایه‌های به ترتیب برف، یخ با حضور واریزه‌ها، بستر گرانیتی و گودال پر شده از یخ‌آب و واریزه در نظر گرفته شد که پاسخ مدل‌سازی شده آن در شکل ۱۴-۶ نمایش داده شد.



شکل ۶-۱۳: الف) مقطع شبیه‌سازی شده GPR لایه‌های یخچال علم‌کوه در نرم‌افزار Reflexw و ب) همان مقطع قسمت الف بعد از اعمال پردازش مهاجرت. مدل فیزیکی و هندسی مقطع جدول ۶-۲ در پایین شکل است.



شکل ۶-۱۴: پاسخ GPR شبیه‌سازی شده مدل نظیر منطقه یخچال علم‌کوه.

برای دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر و امکان انجام مقایسه بین پاسخ‌ها، از برنامه مدل‌سازی پیشرو تفاضل محدود دو بعدی ارائه شده توسط ایروینگ و نایت و بهبود یافته توسط احمدی و همکاران در محیط MATLAB نیز استفاده شد. در این الگوریتم بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو روی سطح زمین قرار دارند)، با استفاده از معادلات روش میدان مغناطیسی عرضی یا مد TM شبیه‌سازی می‌شود. مهم‌ترین اشکال کدها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی موجود، دشوار و زمان‌بر بودن ایجاد مدل‌ها و طولانی بودن زمان انجام محاسبات است. به‌طوری که فرآیند محاسباتی مدل‌سازی پیشرو به‌ویژه در محیط‌های با گذردهی دی‌الکتریکی بالا حتی بر روی یک کامپیوتر مدرن نیز ساعت‌ها به طول می‌انجامد. در کدنویسی انجام شده به‌منظور افزایش صحت نتایج و جلوگیری از دگرنامی (آلیاسینگ)¹ مکانی یا پراکندگی عددی، فواصل مکانی چشمه‌ها در طول پروفیل برداشت در مدل‌سازی، برای ناهمگنی‌های زیرسطحی، حداکثر یک پنجم کوچک‌ترین بعد هدف در راستای پروفیل برداشت، انتخاب شده است (قابل ذکر است که فاصله فرستنده و گیرنده در راستای پیمایش پروفیل، عملاً صفر است؛ در حقیقت تعداد چشمه‌ها با تعداد تریس‌های برداشت برابر خواهد بود). به‌عبارت دیگر تعداد چشمه‌ها در راستای پیمایش پروفیل به‌گونه‌ای تنظیم شده است که حداقل تعداد ۵ عدد چشمه، بعد هدف زیرسطحی در راستای پیمایش پروفیل را پوشش دهند. در عین حال جهت کاهش زمان محاسبات باید این پارامتر نیز بهینه انتخاب شود. بدیهی است که با این انتخاب، پاسخ GPR حاصل از مدل‌سازی به‌صورت ناپیوسته و پله پله به‌نظر می‌رسد که چندان مطلوب نیست (پاسخ با تفکیک‌پذیری پایین).

برای رفع این مشکل بایستی فاصله مکانی بین تریس‌های مجاور، با یک روش مناسب، درونیابی گردد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد پاسخ GPR اغلب اهداف مدفون مطابق شکل ۲-۵ به‌صورت هذلولی است. به عبارت دیگر سیگنال تریس‌های پاسخ GPR در محدوده ناهمگنی‌های زیرسطحی یک جابه‌جایی زمانی دارند (مشابه آنچه که در روش‌های لرزه‌ای به‌نام برونراند نرمال، NMO نامیده می‌شود).

¹ Aliasing

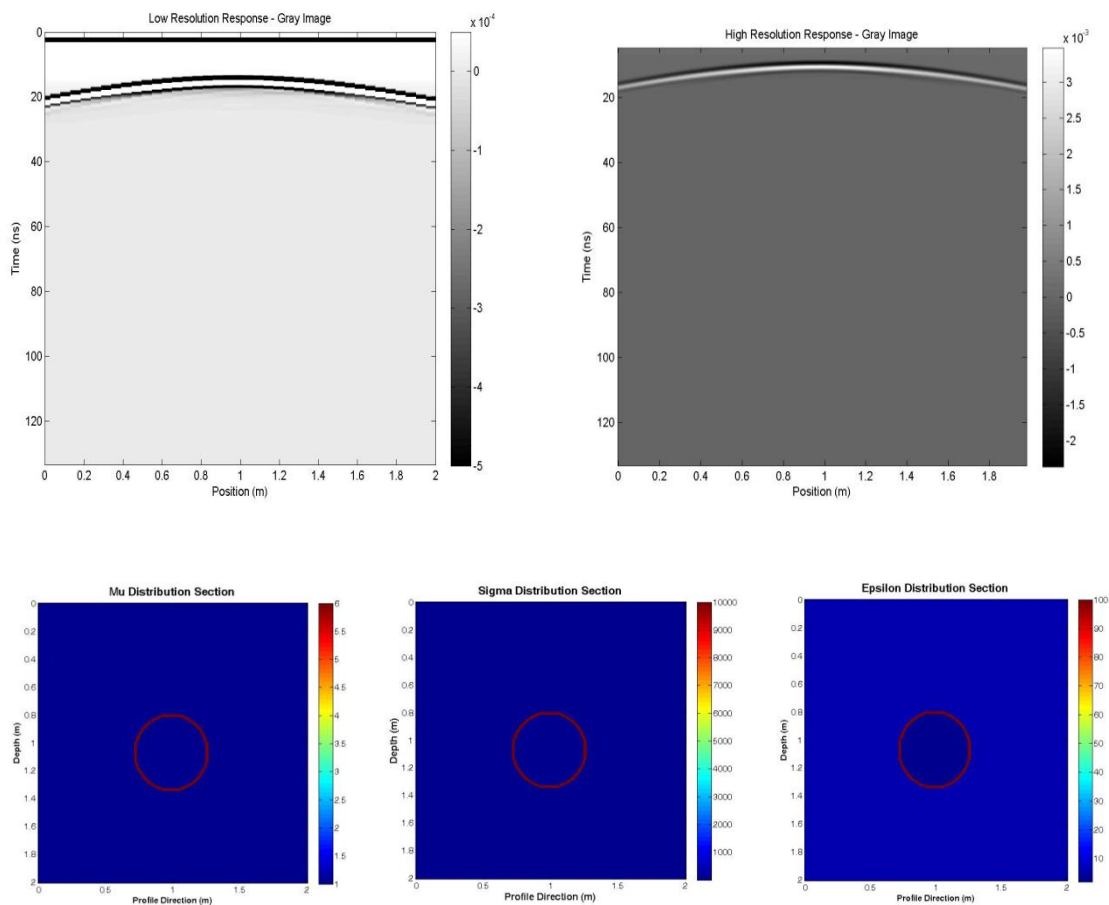
این ویژگی به کارگیری تبدیل فوریه تریس‌ها و اعمال جابه‌جایی زمانی در حوزه فرکانسی را فراهم می‌آورد. با نگرش به این موضوع به منظور بالا بردن سرعت اجرای برنامه در محیط MATLAB و در عین حال افزایش تفکیک‌پذیری مکانی پاسخ (قدرت تفکیک جانبی داده‌ها در امتداد پیمایش پروفیل)، از تبدیل فوریه سریع هر دو تریس متوالی که دارای یک جابه‌جایی زمانی معین می‌باشد استفاده شده است (معادله ۱-۶).

$$f(t - t_0) \xrightarrow{F} e^{-i\omega t_0} F(\omega) \quad (1-6)$$

که در آن t و t_0 زمان، ω ، فرکانس زاویه‌ای و F علامت تبدیل فوریه است.

در روش پیشنهادی از طریق خاصیت جابه‌جایی زمانی در تبدیل فوریه مطابق رابطه بالا استفاده شده است؛ به‌گونه‌ای که در ابتدا شروع سیگنال بازتابی در تریس‌های متوالی، شناسایی و در فواصل مکانی بین دو تریس متوالی، به‌صورت جابه‌جایی زمانی ذخیره می‌گردند (درون‌یابی درجه ۳ در فاصله بین دو تریس) و سپس با تبدیل فوریه هر دو تریس مجاور و داشتن میزان جابه‌جایی زمانی پاسخ‌های بازتابی مقادیر تریس‌های تخمینی در فاصله بین هر دو تریس متوالی، به تعداد دلخواه تریس مصنوعی محاسبه می‌گردد. این محاسبات در مدت کوتاهی انجام گردیده و نتیجه آن حذف حالت پله پله بودن پاسخ در مکان‌های مجزا و بهبود کیفی و بصری پیوستگی تریس‌ها در پاسخ نهایی مقطع GPR می‌باشد (پاسخ با تفکیک-پذیری بالا). بنابراین همواره خروجی برنامه مدل‌سازی پیشرو شامل دو پاسخ است: یکی پاسخ با تفکیک-پذیری پایین و یک پاسخ با تفکیک‌پذیری بالا. قابل ذکر است که در این کد، به منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و تمرکز بیشتر بر روی پاسخ مدل، رخداد مربوط به موج مستقیم (هوا و زمین) از پاسخ، حذف گردیده است [۴۲]. در شکل ۶-۱۵ دو پاسخ با تفکیک‌پذیری بالا و پایین مدل‌سازی شده GPR برای مدل شامل لوله فولادی حاوی فرآورده هیدروکربونی به قطر داخلی ۵۴ سانتی‌متر، مدفون در عمق ۰/۸ متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی هدف) در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی نشان داده شده است. ابعاد مدل ۲×۲ متر می‌باشد. در قسمت پایین این شکل، مقطع توزیع گذرده‌ی

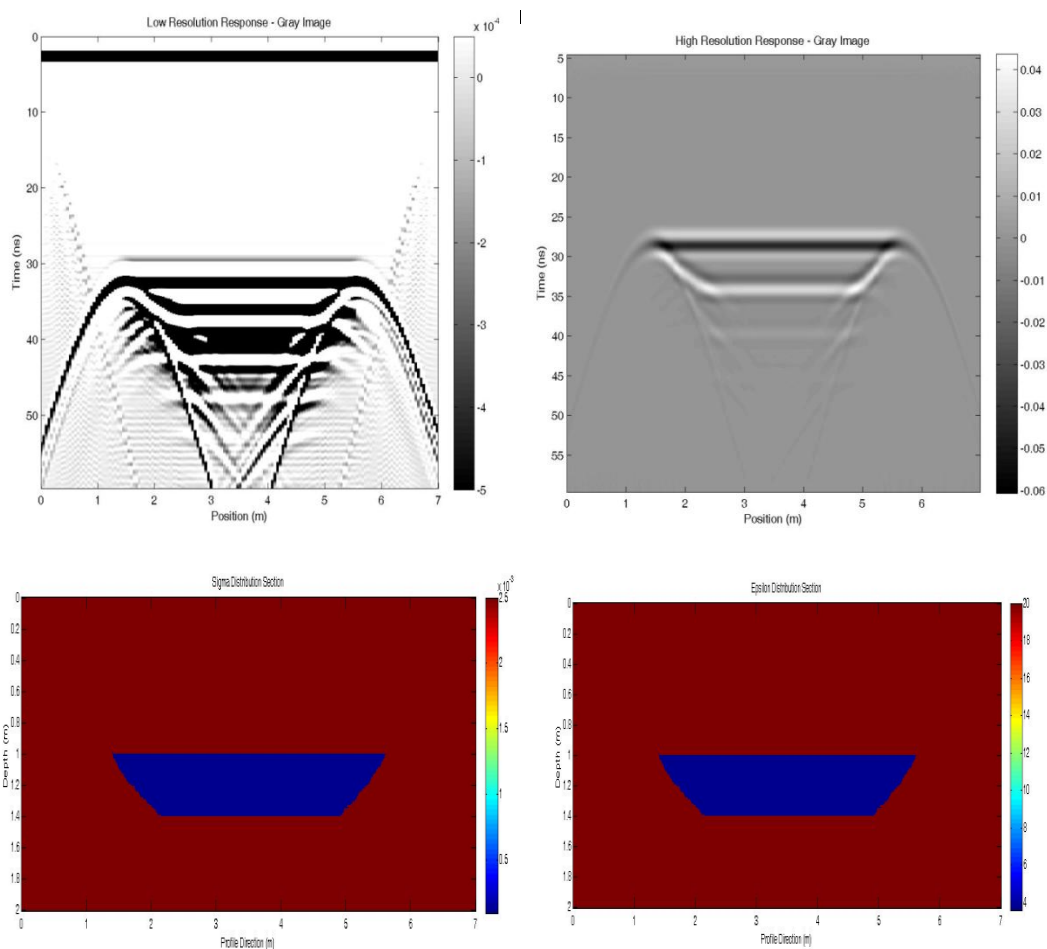
دی‌الکتریک، رسانندگی و تراوایی مغناطیسی مدل مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶-۱۵ مشاهده می‌شود پاسخ GPR سقف هدف، به‌صورت هذلولی‌هایی با دامنه بازتاب بالا به‌وضوح نمایان است. در حالی که هیچ بازتابی از کف لوله فلزی مشاهده نمی‌شود و دلیل آن بازتاب قوی فلز و تضعیف زیاد امواج توسط آن می‌باشد. قابل ذکر است که مدل‌سازی لوله فلزی حاوی هیدروکربون بسیار زمان‌بر است زیرا لوله فلزی دارای مقادیر بالای گذردهی دی‌الکتریک (بیش از ۱۰۰)، تراوایی مغناطیسی (بیش از ۶) و رسانندگی الکتریکی (بیش از 10000 S/m) می‌باشد.



شکل ۶-۱۵: مدل فیزیکی و هندسی شامل لوله فولادی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای شکل (تفکیک‌پذیری بالا در سمت راست و تفکیک‌پذیری پایین در سمت چپ)

در شکل ۶-۱۶ دو پاسخ با تفکیک‌پذیری پایین و با تفکیک‌پذیری بالای مدل‌سازی شده GPR برای مدل به ابعاد 1×7 متر شامل چند ضلعی دو بعدی نشان داده شده است. در قسمت پایین این شکل،

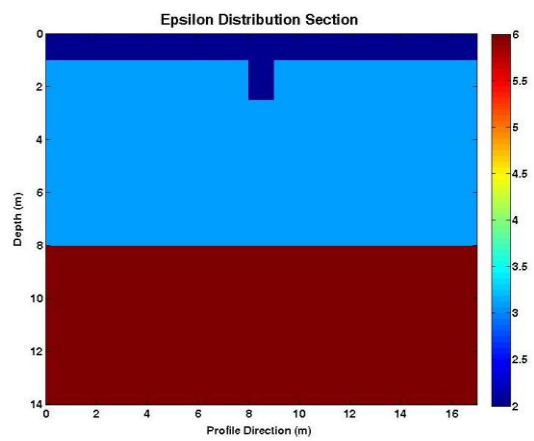
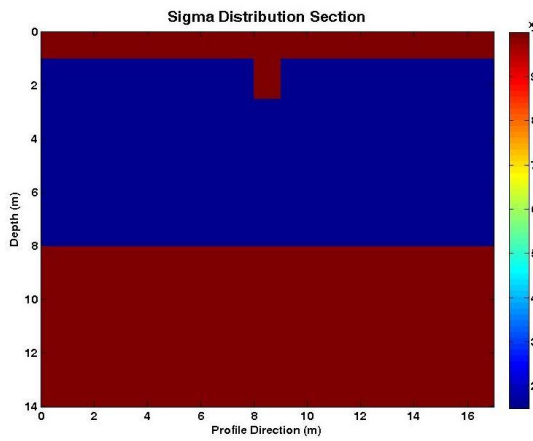
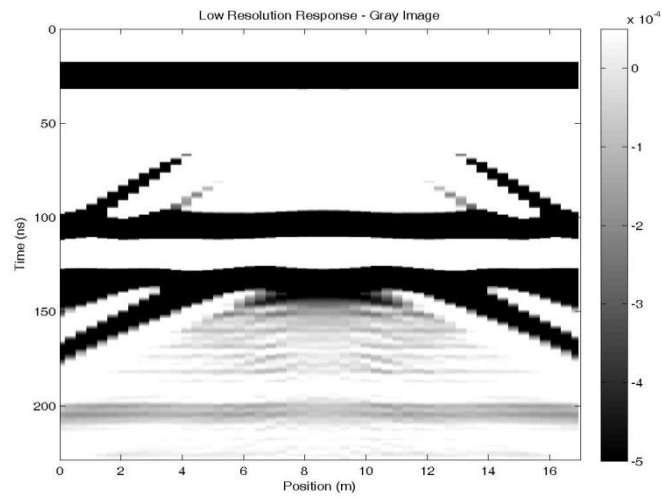
مقطع توزیع گذردهی دی‌الکتریک مدل، در سمت راست و مقطع توزیع رسانندگی الکتریکی، در سمت چپ مشاهده می‌شود. ویژگی‌های محیط میزبان به صورت $\epsilon_r = 20$ و $\sigma = 0.0025 \text{ mS/m}$ و برای هدف چند ضلعی به صورت $\epsilon_r = 3/6$ و $\sigma = 0.0001 \text{ mS/m}$ بوده در حالی که مقدار تراوایی مغناطیسی (μ) محیط میزبان و هدف برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد می‌باشد. ضمناً لایه زیرین با ضخامت ۱۲ سانتی‌متری نادیده گرفته شده است، زیرا وجود یا عدم وجود آن تفاوتی در پاسخ نمی‌کند. همان‌طور که در شکل ۶-۱۶ مشاهده می‌شود، ضلع بالایی توده چندضلعی دو بعدی خود را در پاسخ GPR به صورت نواحی با دامنه بازتاب‌های بزرگ‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۶: مدل فیزیکی و هندسی شامل چند ضلعی دوبعدی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای شکل (تفکیک‌پذیری بالا در سمت راست و تفکیک‌پذیری پایین در سمت چپ)

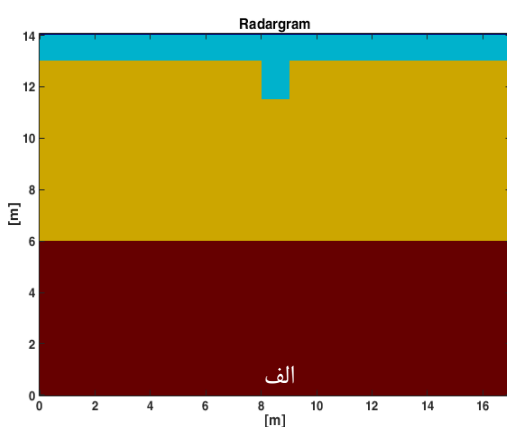
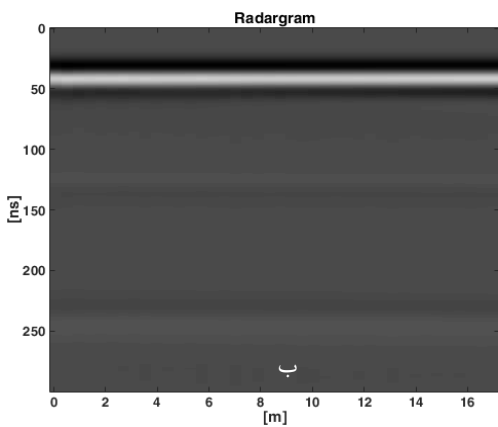
در شکل ۶-۱۷ مدل هندسی و فیزیکی (در ردیف پایین شکل) و نتیجه مدل‌سازی پاسخ GPR (در ردیف بالای شکل) برای مدل زمین لایه‌ای، آورده شده است. میزان فرکانس مرکزی موج ارسالی، ۲۵ مگاهرتز بوده و هدف، کنترل صحت پاسخ GPR برای تعیین بستر یخچال و ضخامت لایه‌های یک زمین سه لایه‌ای است که در آن لایه رویی از جنس برف (که یک گودال به عرض ۱ متر به عمق ۱/۵ متر و فاصله سطح زمین تا دهانه گودال ۱ متر در کف لایه برف وجود دارد)، لایه میانی از جنس یخ دارای واریزه و لایه زیرین از جنس گرانیت می‌باشد. ابعاد مدل ۱۴×۱۷ متر و مقدار تراوایی مغناطیسی (μ) اهداف، برابر با تراوایی مغناطیسی فضای آزاد (خلاً) می‌باشد. مقادیر گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی لایه یخ دارای واریزه از طریق متوسط‌گیری وزن‌دار مقادیر ویژگی‌های فیزیکی یخ و واریزه با نسبت ۴۰ به ۱ محاسبه شده است. مشخصات فیزیکی لایه برف با ضخامت یک متر به صورت (S/m) واریزه و لایه یخ دارای واریزه با ضخامت ۷ متر به صورت (S/m) $\sigma=0/00015$ و $\epsilon=3/1$ و لایه گرانیت با ضخامت شش متر به صورت (S/m) $\sigma=0/0001$ و $\epsilon=6.0$ می‌باشد.

نتیجه شبیه‌سازی (بخش بالای شکل ۶-۱۷) نشان می‌دهد که پاسخ مدل‌سازی GPR فصل‌های مشترک افقی لایه‌ها، به صورت رخداد‌های افقی است. هم‌چنین دلیل تولید چنین پاسخی این است که جنس لایه رویی و جنس مواد داخل گودال یکسان در نظر گرفته شده است (هر دو برف). بنابراین همین موضوع باعث ایجاد هذلولی‌هایی همراه با پاسخ فصل دو لایه اول و دوم می‌شود که قابل انتظار است. در شکل ۶-۱۸-ب پاسخ همین مدل در نرم‌افزار GprMax2D نیز نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۷: مدل فیزیکی و هندسی شامل چندضلعی دوبعدی در قسمت پایین شکل و پاسخ سیستم GPR در قسمت بالای

شکل



شکل ۶-۱۸-الف: مدل فیزیکی و هندسی لایه‌های یخچال علم کوه و ب) پاسخ سامانه GPR شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

GprMax2D

۶-۵- مدل سازی وارون

در مدل سازی وارون سعی می شود تا بر اساس داده های برداشت شده، مدل مربوط ایجاد شود. بقیه مراحل مدل سازی وارون همانند مدل سازی پیشرو می باشد. در واقع تفاوت مدل سازی وارون با مدل سازی پیشرو در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل در روش وارون کمی سخت تر است ولی پاسخ های حاصل به واقعیت نزدیک تر بوده و همچنین تعداد دفعات تکرار برای کاهش خطا نیز کم تر می باشد. به دلیل پیچیده تر بودن مدل در روش وارون، زمان لازم برای محاسبه پاسخ های مدل و حجم حافظه اشغالی، بیش تر است [۹۲]. هدف از وارون سازی، مشخص کردن مدلی از زمین است که مشاهدات ما را به بهترین وجه تشریح نماید و محدودیت های وارد شده از طرف فیزیک مسأله را پاسخ گو باشد. در این پژوهش سعی بر آن است تا از روش مدل سازی وارون برای اعتبارسنجی تعبیر و تفسیر برداشت های GPR واقعی به منظور آشکار سازی و شناسایی اهداف مدفون استفاده شود. برای این منظور باید نتایج مدل سازی وارون با نتایج مدل سازی های انجام شده قبلی مورد مقایسه قرار گیرد تا از مجموع نتایج به دست آمده بتوان برای ارزیابی های دقیق تر داده های برداشت شده استفاده نمود. به طور کلی وارون سازی داده های الکتریکی و الکترومغناطیسی یک مسأله غیر خطی است. از آن جا که در اغلب موارد داده های برداشت شده کم دقت (شامل نوفه)، ناهماهنگ و حتی گاهی متناقض هستند، در نتیجه تعداد بی شماری مدل مساعد برای یک مجموعه داده وجود دارد. در نتیجه پاسخ مسائل وارون سازی، یکتا نمی باشد. هدف از این پژوهش انجام مدل سازی وارون جهت ایجاد مدلی از زمین است که پاسخی مشابه داده های اندازه گیری شده داشته باشد. این مسأله را می توان با حل یک مسأله بهینه سازی، معادله بندی نمود، که در آن محاسبه خطای مدل های مختلف نیز مفید است. در تمامی روش های بهینه سازی، مدل اولیه در فرایندی تکرار شونده طوری بهبود می یابد که اختلاف بین داده های برداشت شده و پاسخ های مدل کاسته شود. می توان داده های برداشت شده را به صورت بردار ستونی y نمایش داد [۹۲]:

$$y = \text{col} (y_1, y_2 \dots y_m) \quad (۲-۶)$$

پاسخ‌های مدل (f) را نیز می‌توان به طریق مشابهی نشان داد:

$$f = \text{col}(f_1, f_2 \dots f_m) \quad (3-6)$$

تفاوت بین داده‌های برداشت شده و پاسخ‌های مدل از بردار تفاضل g که به صورت زیر است محاسبه می‌شود:

$$g = y - f \quad (4-6)$$

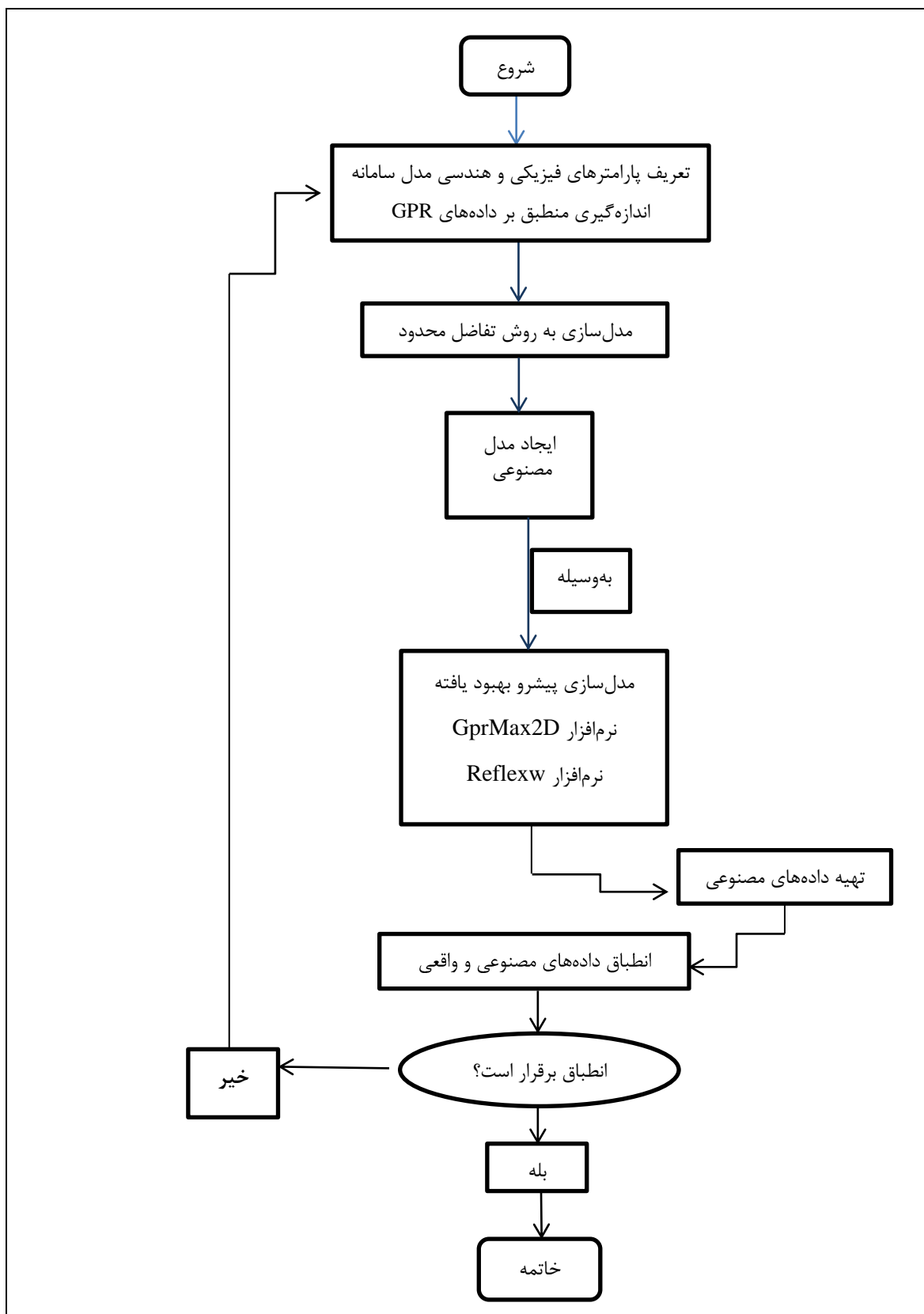
در روش بهینه‌سازی کم‌ترین مربعات خطا، مدل اولیه طوری بهینه می‌شود که مجموع مربعات خطا که تفاضل بین مقادیر پاسخ‌های مدل و داده‌های برداشت شده است، کمینه شود. بدین ترتیب پارامترهایی از مدل باید تغییر کنند تا مجموع مربعات خطا کاهش پیدا کند. فرمول محاسبه‌ی خطا به روش کم‌ترین مربعات خطا بر حسب درصد به صورت زیر است:

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{\sum (Ez_{\text{real}} - Ez_{\text{model}})^2}{n}} * 100 \quad (5-6)$$

در این پژوهش از رابطه نرمالیز شده زیر جهت محاسبه خطا به روش کم‌ترین مربعات خطا، استفاده شده است:

$$\text{RMS error: } \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{Ez_{\text{real}} - Ez_{\text{model}}}{Ez_{\text{real}}} \right)^2}{n}} * 100 \quad (6-6)$$

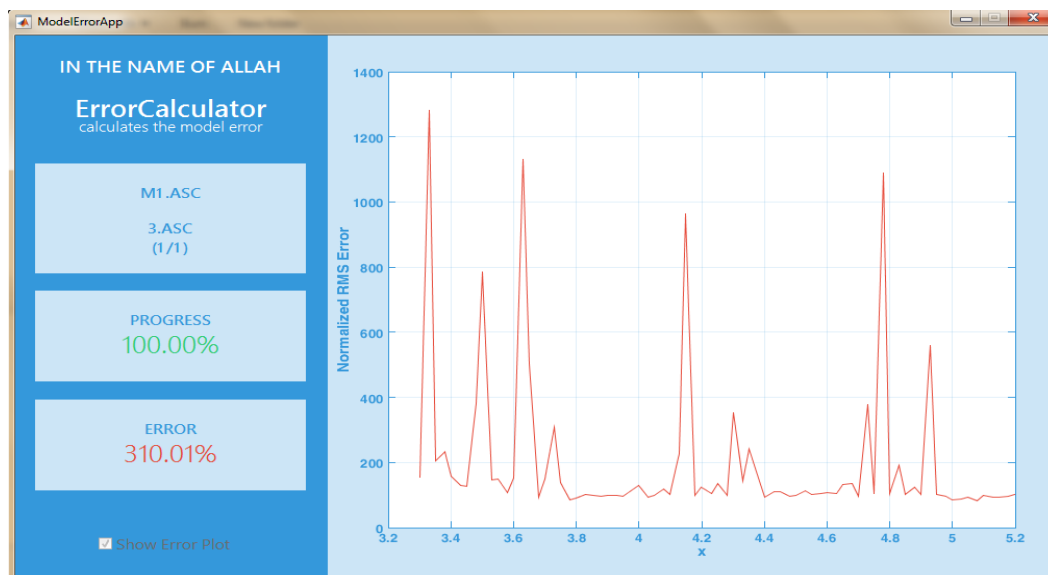
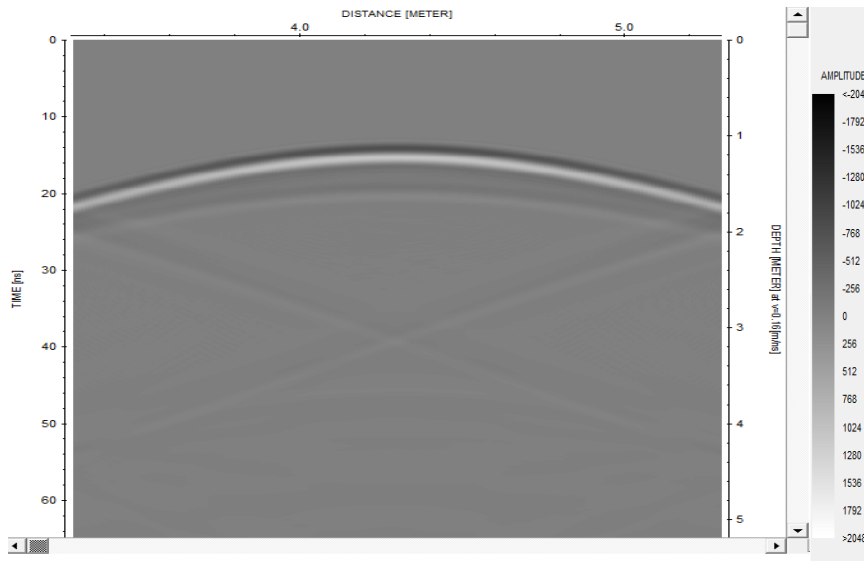
نمودار پیشنهادی برای انجام وارون‌سازی داده‌های GPR در این پژوهش در یک نگاه کلی در شکل ۶-۱۹ نشان داده شده است:



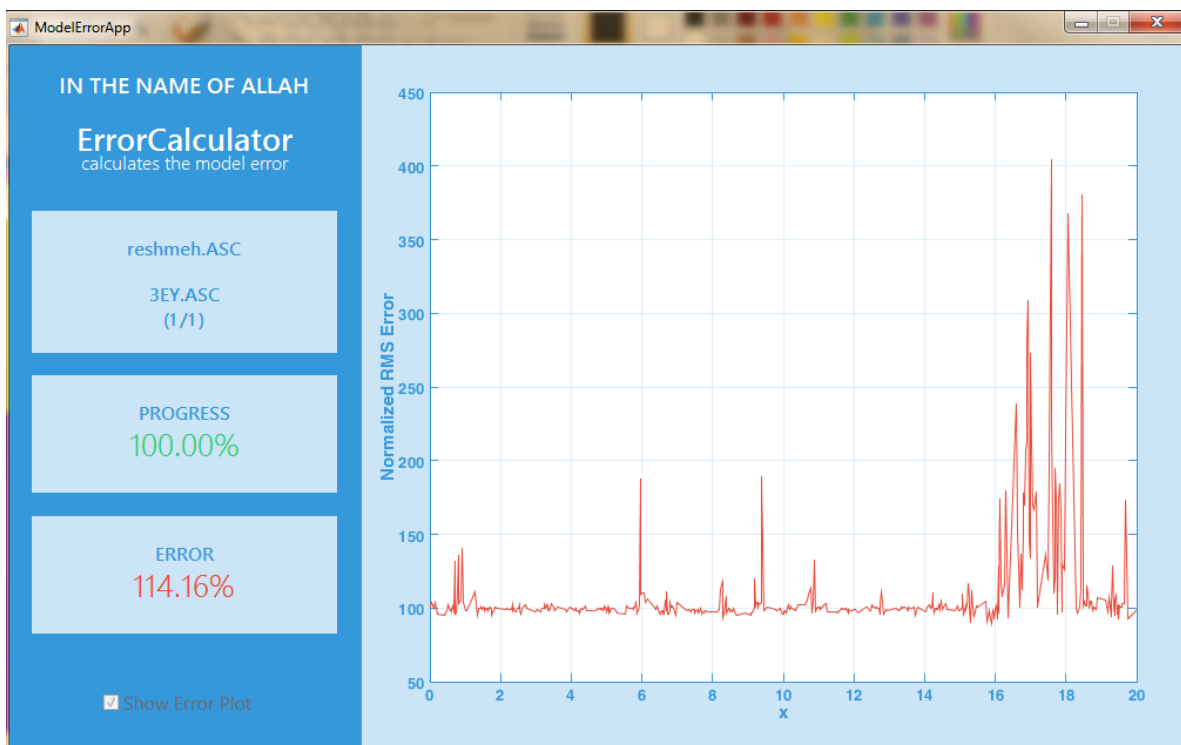
شکل ۶-۱۹: نمودار جریان الگوریتم مدل‌سازی وارون داده‌های رادار نفوذی به زمین

➤ بررسی نتایج

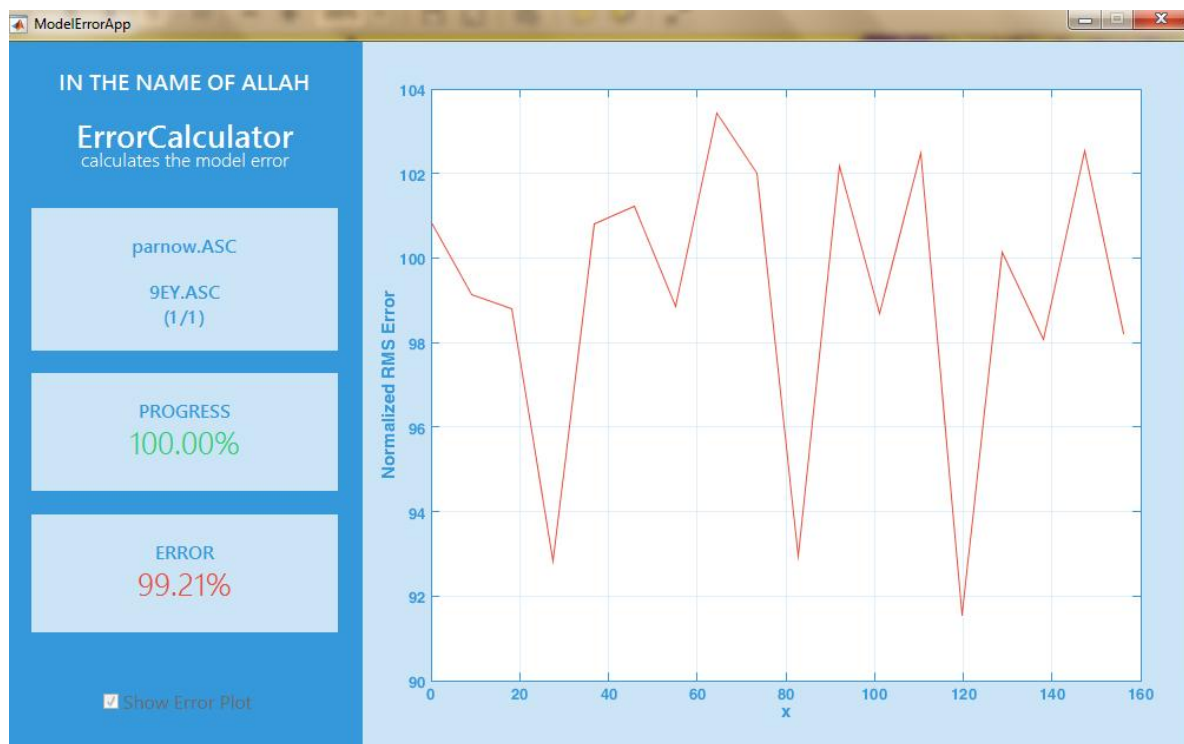
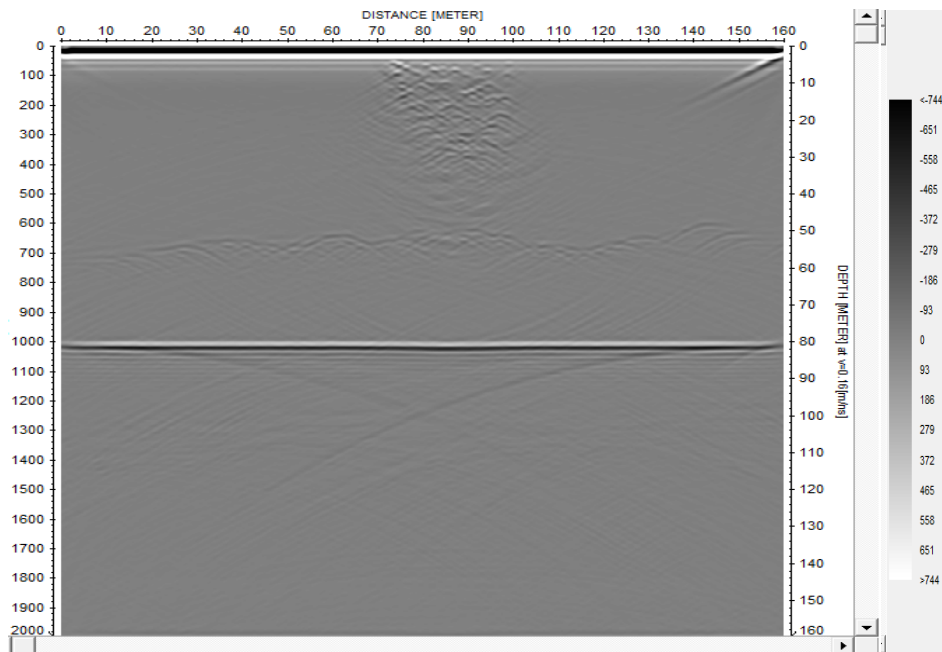
نتایج حاصل از مدل سازی وارون برای داده های صحرائی برداشت شده در سه منطقه مورد نظر همراه با میزان خطای به دست آمده برای هر مدل در شکل های ۶-۲۰ تا ۶-۲۲ نمایش داده شده است. در این پایان نامه آخرین مقطعی که خطای کمتری داشته است، به عنوان نتیجه آورده شده است.



شکل ۶-۲۰: مدل زمین با بیشترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده های صحرائی در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود همراه با میزان خطای به دست آمده.



شکل ۶-۲۱: مدل زمین با بیشترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرایی در منطقه تپه حصار دامغان همراه با میزان خطای به دست آمده.



شکل ۶-۲۲: مدل زمین با بیشترین شباهت به مقطع حاصل از برداشت داده‌های صحرایی در منطقه یخچال علم‌کوه همراه با میزان خطای به‌دست آمده.

۶-۶- جمع بندی

به هر جهت در یک نگاه کلی خطاهای به دست آمده از مدل سازی وارون و داده های واقعی GPR دور از انتظار و غیر قابل قبول به نظر می رسد که البته بالا بودن میزان این خطاها وابسته به عوامل مختلفی است که مهم ترین آنها به صورت زیر می باشند:

در وهله ی اول این نکته باید در نظر گرفته شود که به دلیل وجود محدودیت های گوناگون در تمامی الگوریتم ها و نرم افزارهای مدل سازی پیشرو، امکان انجام مدل سازی دقیقاً مطابق با مدل های واقعی به دلیل پیچیدگی های ذاتی طبیعت زمین، امکان پذیر نمی باشد و تنها تولید پاسخ مدل های ساده امکان پذیر است.

نکته دیگر این است که حتی پاسخ یک مدل واحد با استفاده از نرم افزارهای مختلف، متفاوت می باشد که دلیل آن به نوع ساختار، الگوریتم ها و محدودیت های نرم افزارها نظیر نوع شرایط مرزی، نوع موجک ارسالی به عنوان چشمه و سایر عوامل دیگر بستگی دارد.

نکته سوم این است که زمین بسیار متنوع و مقادیر گذردهی دی الکتریک و ویژگی های الکتریکی، از سطح زمین تا عمق مشخص متفاوت است و زمانی می توان به طور دقیق این مقادیر را تعریف کرد که محیط مورد نظر نقطه به نقطه با آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. این در حالی است که برای شبیه سازی پاسخ مدل ها، محیط میزبان و هدف کاملاً یکنواخت، همگن و همسانگرد در نظر گرفته می شود. هم چنین انواع نوفه ها در مدل واقعی زمین وجود دارد که اعمال آن ها در مدل سازی مصنوعی امکان پذیر نمی باشد.

نکته چهارم این است که اطلاعات ما از عمل کافی نیست و نمی توان به طور قطع به تفاسیر این مقاطع اطمینان نمود. در واقع هدف از انجام مدل سازی وارون این است که داده های مدل سازی معکوس برای تفسیر واقعیت مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که در این پژوهش سعی شده است مدلی اولیه، مطابق واقعیت موجود تعریف شود و با مدل سازی وارون، پاسخ به دست آمده به واقعیت نزدیک شود، که این موضوع خود باعث افزایش خطای مدل سازی است. به عبارت دیگر از ابتدا تفسیر مقاطع واقعی، پایه و

اساس کاملاً شناخته شده و معتبری ندارد، به عبارت دیگر هیچ ملاک و معیاری در دست نمی‌باشد که بر اساس آن صحت و سقم تفسیرها ارزیابی شود. این امر در صورتی محقق خواهد شد که یک مدل واقعی از ابتدا ساخته شود و در آن همه چیز اعم از اطلاعات محیط میزبان و اهداف مدفون به‌طور کنترل شده و آزمایش شده در دست باشد.

فصل هفتم
نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پایان نامه انجام شده به شرح زیر است:

✓ به دلیل وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی پیشرو، امکان انجام مدل‌سازی دقیقاً مطابق با مدل‌های واقعی به دلیل پیچیدگی‌های طبیعت زمین، امکان‌پذیر نبوده و تنها تولید پاسخ مدل‌های ساده امکان‌پذیر است.

✓ در تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدل‌سازی پیشرو اغلب اهداف خاص به شکل دایره (معرف انواع لوله و فضاها خالی)، زمین لایه‌ای و یا اهداف مصنوعی در شرایط ایده‌آل و در مقیاس آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. این در حالی است که به طور مثال اندازه اشیاء و عمق دفن آن‌ها نیز در نتایج به دست آمده و در نهایت آشکارسازی هدف مورد نظر تأثیرگذار خواهد بود به گونه‌ای که اشیاء کوچک مدفون ممکن است قابل آشکارسازی نباشند. نتایج به دست آمده، حاصل ایجاد شرایط مطلوب برای هدف مورد نظر بوده و با تغییر شرایط، پاسخ مورد انتظار مشاهده نمی‌شود. بنابراین آشکارسازی تمام اهداف مدفون در تصاویر واقعی GPR با هر اندازه دلخواه نیازمند استفاده از یکسری الگوریتم‌های کارآمد می‌باشد.

✓ مدل‌سازی پیشرو GPR در ارتباط با اهداف واقعی GPR، تنها برای مواردی خاص و ساده ارزیابی شده است و کاربرد دارد، حال آن‌که الگوریتمی مناسب است که برای موارد مختلف برداشت‌های واقعی GPR که عمدتاً پیچیده هستند، عملکرد قابل قبولی از خود نشان دهد.

✓ نرم‌افزار GprMax2D صرفاً یک نرم‌افزار مدل‌سازی پیشرو است و بهتر است جهت انواع پردازش‌های مختلف و برجسته نمودن الگوهای موجود تصاویر GPR به دست آمده در این نرم‌افزار از روش‌های پردازش تصویر و پردازش سیگنال استفاده شود.

✓ جهت مدل‌سازی پیشرو در نرم‌افزار GprMax2D لازم است یک فایل ASCII برای ورود داده‌ها به این نرم‌افزار آماده و در محیط DOS اجرا گردد. قابل ذکر است که در این نرم‌افزار کوچک‌ترین خطا و یا اطلاعات غیر معقول در فایل ورودی منجر به عدم اجرای آن می‌شود. این در حالی است

که ممکن است این خطاها ملموس و آشکار نباشند. به طور مثال اگر ابعاد مدل خیلی بزرگ باشد، تعداد تکرارها برای رسیدن به پنجره زمانی خیلی زیاد باشد و حتی نام گذاری فایل های خروجی مشکل داشته باشد فایل اجرا نخواهد شد.

✓ یکی از نقاط ضعف برنامه های مدل سازی پیشرو هم چون GprMax2D آن است که برای تولید پاسخ GPR با تفکیک پذیری زیاد، به ویژه در محیط های پر اتلاف و با گذردهی دی الکتریک بالا، از سرعت پردازش پایینی برخوردار است.

✓ نرم افزار Reflexw بیش تر جهت پردازش داده های GPR و هم چنین مدل سازی داده های لرزه ای مرسوم است و این نرم افزار در مدل سازی پیشرو داده های GPR بسیار کم به کار گرفته شده است. هر چند این نرم افزار از سرعت پردازش بالایی برای انجام مدل سازی برخوردار است و می توان در مدت زمانی اندک پاسخ مدل سازی را مشاهده نمود؛ اما از تفکیک پذیری پایینی نسبت به نرم افزار GprMax2D برخوردار است. از طرفی کار کردن با این نرم افزار بسیار راحت تر از نرم افزار GprMax2D است؛ چرا که برای مدل سازی اهداف مورد نظر از محیط گرافیکی می توان بهره برد.

✓ در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف نظیر شکل هندسی هدف، عمق دفن، نوع سیال محتوی، جنس دیواره هدف و مشخصات فیزیکی محیط میزبان بر روی آنومالی های GPR مربوط به اجسام استوانه ای بررسی شد. نتایج حاصل نشان می دهد که در عمق ثابت با افزایش قطر انحنای هذلولی ثابت و فقط کانون آن به بالا شیفت پیدا می کند. با افزایش عمق رأس هذلولی به سمت پایین انتقال می یابد و در نتیجه انحنای منحنی افزایش می یابد.

✓ مقایسه پاسخ GPR حاصل از استوانه هایی پر شده از هوا با دیواره هایی از جنس های مختلف نشان می دهد که پاسخ سقف استوانه های فلزی نسبت به پاسخ استوانه هایی با جنس پلاستیکی قوی تر بوده و نیز قطبیت سیگنال های بازتابی معکوس شده است. هم چنین هیچ بازتابی از کف شیء فلزی مشاهده نمی شود که دلیل آن عمق نفوذ خیلی کم امواج در فلز می باشد.

✓ نتایج به دست آمده در بررسی تأثیر نوع سیال محتوی هدف استوانه‌ای بر روی پاسخ GPR نشان می‌دهد که برای استوانه‌هایی با رسانندگی پایین، پاسخ سقف و کف هدف به وضوح مشخص است و با افزایش رسانندگی، شدت پاسخ سقف و کف ضعیف است به گونه‌ای که در شرایطی که سیال مورد نظر آب شور باشد، پاسخ کف دیده نمی‌شود.

✓ نتایج حاصل از بررسی تأثیر گذردهی الکتریکی و رسانندگی الکتریکی محیط میزبان روی پاسخ GPR نشان داده است که با افزایش میزان گذردهی دی‌الکتریک محیط میزبان و در نتیجه کاهش سرعت سیر امواج در محیط، موقعیت پیک هذلولی پاسخ به سمت پایین جابه‌جا شده و نیز زاویه شیب مجانب‌های هذلولی افزایش یافته است. هم‌چنین اگر محیط میزبان بسیار مقاوم باشد، دامنه سیگنال‌های بازتابی سقف و کف هدف هر دو قوی‌تر از پاسخ‌های نظیر هدف مدل با محیط میزبان بسیار رسانا می‌باشند.

۷-۲- پیشنهادات

- ✓ ارائه برنامه‌های سریع مدل‌سازی (سرعت پردازش بالا) جهت مدل‌سازی محیط‌های پراکنده و با گذردهی دی‌الکتریک بالا و تفکیک‌پذیری زیاد.
- ✓ احداث یک سایت ژئوفیزیکی آزمایشی کنترل شده و آزمایش عملکرد الگوریتم مدل‌سازی وارون بر روی داده‌های GPR برداشت شده بر روی این سایت.
- ✓ اعمال مراحل پیش‌پردازش و پردازشی پیشرفته به‌ویژه فیلترهای دوبعدی متناسب بر روی داده‌های خام واقعی GPR.
- ✓ اعمال یک سری مراحل پردازشی پیشرفته همانند پردازش تصویر بر روی داده‌های مدل‌سازی مدل‌های مصنوعی به‌منظور حذف نوفه‌های تصادفی پیکسلی جهت افزایش قدرت تفکیک (به‌ویژه در مورد خروجی مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار GprMax2D).
- ✓ تعیین مقادیر پارامترهای فیزیکی مهم محیط‌ها همانند گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی به‌روش آزمایشگاهی از طریق نمونه‌برداری از اعماق مختلف، برای محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده.

- [1]. Annan A. P. (2001), “**Ground penetrating radar workshop notes**” Sensors and software Inc, Mississauga, ON, Canada.
- [2]. Giannopoulos A. (2005). “Modeling ground penetrating radar by GPRMax” **Construction and Building Materials**, 19, 775-762.
- [3]. Parasnis D. S. (1997), “**Principles of applied geophysics**”, 5th edition, Chapman and Hall.
- [4]. Stern W. (1929) “Versucheiner elektrodynamischen dickenmessung von gletschereis” **Gerl. Beitr. Zur Geophysik.**, 23, pp 292-333.
- [5]. Knight R. (2001) “Ground penetrating radar for environmental applications” **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, 29, PP 229–255.
- [6]. Neal A. (2004) “Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: principles, problems and progress: **Earth-science reviews.**, 66, PP 261-330.
- [7]. Reynolds J. M. (1997), “**An introduction to applied end environmental geophysics**”, John Wiley & Sons Ltd, pp. 710.
- [8]. Van Overmeeren R. A. (1994) “Georadar for hydrogeology”. **First break.**, 8, PP 401-408.
- [9]. Fisher E., MCMechan G.A., Annan A.P. and Coswey S.W. (1992) “Examples of revers-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles” **J. of Geophysics**, 57, pp 577-586
- [10]. Sun J. and Young R.A. (1995) “recognizing surface scattering in ground-penetrating radar data” **J. of geophysics.**, 60, pp1378-1385.
- [11]. Xia J., Franseen E.K., Miller RD., weis T.V., Byrnes A.P. (2003) “Improving ground-penetrating radar data in sedimentary rocks using deterministic deconvolution” **J. of Appl. Geophysics.**, 54, pp15-33.
- [12]. Daniels D. J. (2004) “**Ground penetrating radar, The Institution of Electrical Engineers**”, The Institution of Electrical Engineers, Londo, United Kingdom, pp. 75-84, and 455-460.
- [13]. Cassidy N.J. (2007) “Evaluating LNAPL contamination using GPR and dielectric analysis: Practical implications for signal attenuation and attribute analysis studies”. **J. of Contaminant Hydrology**, Vol. 94, No. 1–2, pp. 49–75.
- [14]. Olhoeft G.R. (2001), “**Groradartm, Acquisition, Processing, Modeling and Display of Dispersive Ground Penetrating Radar Data**”, version 2001.01.
- [15]. Goodman D. (1994) “Ground Penetrating Radar simulation in engineering and archaeology” **J. of Geophysics**”, 59, pp224-232.

- [16]. Bergmann T., Robertsson J. O. A. and Holliger K. (1998), “Finite difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media” **J. of Geophysics.**, **63**(3), pp **856-867**.
- [17]. Chen H. W. and Huang T. M. (1998) “Finitedifference time-domain simulation of GPRdata” **J.of Applied Geophysics.**, **40**,pp **139–163**.
- [18]. Teixeira F.L., Chew W.C., Straka M., Oristaglio M.L. and Wang T. (1998) “Finite-difference time-domain simulation of ground penetrating radar on dispersive, inhomogeneous and conductive soils”. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. **36**, No. **6**, pp. **1928–1937**.
- [19]. Teixeira F.L. and Chew W.C. (2000) “Finite-difference computation of transient electromagnetic waves for cylindrical geometries in complex media”. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. **38**, No. **4**, pp. **1530–1543**.
- [20]. Cassidy N.J., (2001), PhD. Thesis, “The application of mathematical modeling in the interpretation of Ground Penetrating Radar data”, Keele University.
- [21]. Giannopoulos A. (2008) “An Improved New Implementation of Complex Frequency Shifted PML for the FDTD Method”. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **56**(9):2995–3000.
- [22]. Bourgeois J. M. and Smith G. S. (1996) “A fully three dimensional simulation of a ground penetrating radar: FDTD theory compared with experiment”: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.**, **34**,pp **36-44**.
- [23]. Roberts R.L. and Daniels J.J. (1997) “Modelling near-field GPR in three dimensions using the FDTD method” **J. of Geophysics**, Vol. **62**, No. **4**, pp. **1114–1126**.
- [24]. Yee K.S. and Chen J.S. (1997) “The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving Maxwell’s equations” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.**, Vol. **45**, No. **3**, pp354–363.
- [25]. Nishioka Y., Maeshima O., Uno T. and Adachi S. (1999) “FDTD analysis of resistor-loaded antenna covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar” **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.**, Vol. **47**, No. **6**, pp. **970–977**.
- [26]. Weedon, W.H. and Rappaport, C.M., (1997), A general method for FDTD modeling of wave propagation in arbitrary frequency-dispersive media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation.**, Vol. **45**, No. **3**, pp. **401–409**.
- [27]. Carcione J.M., Lenzi G. and Valle S. (1999) “GPR modelling by the Fourier method: Improvement of the algorithm” **J. of Geophysical Prospecting.**, Vol. **47**, pp. **1015–1029**.
- [28]. Huang Z., Demarest K.R. and Plumb G. (1999) “An FDTD/MOM hybrid technique for modeling complex antennas in the presence of heterogeneous grounds”. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. **37**, No. **6**, pp. **2692–2699**.
- [29]. Jol H. M. (2009), “**Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**”, Oxford: Elsevier Science,pp. 508.

[30]. Loulizi A., (2001), PhD. Thesis, “Development of Ground Penetrating Radar Signal Modeling and Implementation for Transportation Infrastructure Assessment” the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

[31]. Beres M., Luetscher M. and Olivier R. (2001) “Integration of ground penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves” **J. of Applied Geophysics**, **46**, pp 249–262

[32]. Lambot S., van den Bosch I. and Slob E.C. (2004) “Frequency domain gpr signal forward and inverse modelling for identifying the subsurface dielectric properties” **J. of EARSel eProceedings**, **3**,pp398-404

[33]. Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J.P.,Laurens S., Rhazi J., Ballivy G. and Arliguie G., (2009) “Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures” NDTCE’09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd.

[34]. Huici M.A.G., (2012), PhD. Thesis, “Accurate Ground Penetrating Radar Numerical Modeling for Automatic Detection and Recognition of Antipersonnel Landmines” Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

[35]. Carcione J.M. (1998) “Radiation patterns for 2-D GPR forward modeling” **J. of GEOPHYSICS**, **63**, **2**, PP. 424–430.

[36]. Sneddon K. W., Powers M. H., Johnson R. H. and Poeter E. P. (2002), “**Modelling GPR data to interpret porosity and dnapl saturations for calibration of A 3-D multiphase flow simulation**”, USGS Open File Report 02-451.

[37]. Taflove A. and Hagness S.C. (2005), “**Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method**”, Third Edition, Norwood, MA, Artech House.

[38]. Irving J. and Knight R. (2006) “Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB” **J. of Computers & Geosciences.**, **32**,pp 1247–1258.

[39]. Cassidy N. J. and Millington T. M. (2009) “The application of finite-difference time-domain modelling for the assessment of GPR in magnetically lossy materials” **Journal of Applied Geophysics** **67**,pp 296–308

[40]. Giannopoulos A. (2005), “**GprMax, Electromagnetic simulator for ground probing radar**”, <http://www.gprmax.org,2005a>.

[41]. Ghasemzadeh H. and Javidi M., (2014) “Cavity detection with Ground Penetrating Radar using Finite Difference Time Domain simulation” Complex Initial national congress Ground penetrating radar (GPR), the Faculty of the mining engineering, kerman.

[۴۲]. احمدی ر. فتحیان پور ن. و نوروزی غ، (۱۳۹۳) "بهبود مدل سازی پیشرو داده های رادار نفوذی به زمین (GPR) به روش عددی تفاضل متناهی،" *مجله ژئوفیزیک ایران*، جلد ۸، شماره ۳، صفحه ۱۱۳-۱۲۹

[43]. Shafri H. Z. M., Abdollah R. S. A., Roslee, M. and Numiandy, R. (2008), "Optimization for ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pavement density data analysis". IGARSS, USA.

[44]. Awangku L.A.S. and Halim S. (2009) "Ground Penetrating Radar (GPR) for Subsurfacemapping: Preliminary result" *J. of Geoinformation Science.*, 9, pp. 45-62.

[45]. Van Dam R. L. and Schlager W. (2000) "Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses" *J. of Sedimentology.*, 47, pp 435-449.

[46]. Knödel K., Lange G. and Voigt H.J. (2007), "Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies", In. Blindow N., Eisenburger D., Illich B., Petzold - H. and Richter, T. (Aut), Book part 4: Ground Penetrating Radar, pp. 283-284, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[۴۷]. حسینی م، (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد: "برداشت، پردازش و تفسیر داده های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه مزبور"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[48]. Balanis CA. (1989), "Advanced engineering electromagnetics", Wiley:New York.

[۴۹]. پرنو س، (۱۳۹۳)، پایان نامه ارشد: "پردازش، مدل سازی و تفسیر داده های GPR به منظور تعیین عمق، ضخامت و محدوده جانبی یخچال ها در منطقه علم کوه مازندران"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[50]. Mancilla O. L. and Trevifio E. G. (1996) "Synthetic radargrams from electrical conductivity and magnetic permeability variations" *J. of Applied Geophysics.*, 34 pp 283-290

[51]. Annan A. P. (2003) "GPR for infrastructure imaging" *International Symposium (NDT-CE2003), Non-Deestructive Testing in Civil Engineering.*

[52]. Annan A. P. (2011) "Topographic Correction of GPR Data" sensors & software, Canada.

[53]. Olsson R.K., Melillo, A.J., and Schreiber, B.L. (1987) "Miocene sea level events in the Maryland Coastal Plain and the offshore Baltimore Canyon Trough", In Ross C.A. and Haman D. (Eds.), Timing and Depositional History of Eustatic Sequences: Constraints on Seismic Stratigraphy. Spec. Publ. Cushman Found. Foraminiferal Res., 24:pp85-97.

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

- [55]. Müller K., (2005), PhD. Thesis, “Modelling of GPR Wave Propagation and Scattering in Inhomogeneous Media”, Master Thesis in Geosciences Petroleum Geology and Geophysics Department of Geosciences University of Oslo
- [56]. Olhoeft G. (1998) “Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance: proceedings of GPR” **98, seventh international conference on Ground Penetrating Radar**, University of Kansas, p. **177-182**.
- [57]. Packard H. (1992), “**Basic of measuring the dielectric properties of materials**” Application note 1217-1.
- [58]. Saaranketo T. (1998) “electrical properties of water in clay and silty soils” **J. of applied Geophysics**, v. **40**, p. **73-78**.
- [59]. Powers M.H. (1997) “Modeling frequency-dependent GPR”, **The Leading Edge (Tulsa OK)**, November, **16**, no.11, pp.1657-1662
- [60]. Ulaby F.T. (2001), “**Fundamentals of applied electromagnetics**”, Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall.
- [61]. Warren C., (2009), PhD. Thesis, “Numerical Modelling of high-frequency ground penetrating radar antennas”, Doctor of Philosophy The University of Edinburgh
- [62]. V. HIPPEL A. R. (1954) “**Dielectrics and waves**”, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts
- [63]. Kearey P. and Brooks M. (1991), “**An Introduction to Geophysical Exploration**”, Second edition: Blackwell science.
- [64]. Annan A.P. (1993), “**Practical processing of GPR data**”. Proceedings of the Second Government Workshop on Ground-Penetrating Radar, Columbus, Ohio.
- [65]. Dougherty M.E., Micheals P., Pelton J.R. and Liberty L.M. (1994) “Enhancement of ground penetrating radar data through signal processing” **J. of Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP '94)**, Boston, USA, pp. **1021–1028**.
- [66]. Gerlitz K., Knoll M.D., Cross G.M., Luzitano R.D. and Knight, R. (1993) “Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets” **J. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP'93)**, San Diego, USA. pp. **561–575**
- [67]. Fisher C.S., Stewart R.R. and Jol, H.M. (1994) “Processing ground penetrating radar data”. the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'94), Canada, pp. 661–675.
- [68]. Sensors and software. (2001) “**Win_EKKO User's Guide**”, Version 1.0.
- [69]. Olhoeft, G.R. (2000) “Maximizing the information return from ground penetrating radar” **J. of Applied Geophysics.**, Vol. 43, pp. 175–187.
- [70]. Nobes D.C. (1999) “Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oaro urupa” **J. of Geophysics**, Vol. **64**, No. **2**, pp **357–367**.

[71]. Young R.A., Deng Z. and Sun J. (1995) "Interactive processing of GPR data", **The Leading Edge**, April 1995, pp. 275–280.

[72]. Horstmeyer H., Gurtner M., Bucker F. and Green, A., (1996) "Processing 2-D and 3-D georadar data: Some special requirements". the Second Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, European section, Nantes, France.

[73]. Yilmaz, Ö., (2001), "Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, Investigations in Geophysics" No. 10 (vol 1 & 2), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA.

[74]. فرهنگ متین ل. فرخ‌پیام ح. و صفی یاری ا، (۱۳۸۸) "برآورد عددی تغییرات شدت میدان الکترومغناطیسی بر حسب زمان و مکان" فصلنامه فیزیک اتمی-مولکولی، سال اول، شماره ۱، زمستان ۸۸

[75]. Peterson A.F., Ray S.L. and Mittra R. (1998) "Computational Methods for Electromagnetics" **IEEE Press**: New York,.

[76]. چلبی ح. و عبیری ب، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه کارشناسی: "تحلیل موج بر پاشنده‌ی تیغه‌ای بلور فوتونی"، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

[77]. Yee K.S. (1966) "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media". **IEEE T Antenn Propag**;14:pp49–58.

[78]. Nikolova N.K. (2011), "The Finite-Difference Time-Domain(FDTD) methode" part I, Numerical Techniques in Electromagnetics ECE 757.

[79]. Taflove A. (2000), "Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method", Second Edition, Boston, Artech House. pp.51-65

[80]. Knuz K.S. and Luebbers R.J. (1993), "The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics", London, CRC Press.pp.29-32

[81]. Warren C., (2009), PhD. Thesis, "Numerical Modelling of high-frequency ground penetrating radar antennas", Doctor of Philosophy The University of Edinburgh, pp 34-38.

[82]. Taflove A. and Gedney S. (1998), "The perfectly matched layer absorbing medium". Advances in Computational Electrodynamics.

[83]. Berenger J.P. (1994) "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves" **J. of Computational Physics.**, Vol. 114, pp. 185-200

[84]. Telford W. M., Geldart L.P. and Sheriff. R. E.(1990), "Applied Geophysics", Cambridge university press, pp. 284-286.

[85]. kempen L. V. and Sahli H. (1999) "Ground Penetrating Radar Data Processing: A selective survey of the state of the art literature"., Vrije Universiteit Brussel Faculty Of Applied Sciences. Technical Report IRIS-TR-0060.

[86]. Al-Nuaimy W., Huang Y., Nakhkash M., Fang M., Nguyen V. and Eriksen A. (2000), "Automatic detection of buried utilities and solid objects using neural networks and pattern" , **J. of Applied Geophysics**, 43 ,pp. 157–165

[87]. Shihab S. and Al-Nuaimy W. (2005), "Data fusion for accurate detection of pipe geometry using GPR". Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 3rd. p. 99–102.

[88]. Zeng X. and McMechan G. A. (1997) "GPR characterization of buried tanks and pipes". *J. of Geophysics.*, vol. 62, NO. 3 pp. 797–806.

[89]. Davis J.L. and Annan A.P. (1989) "Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy". *Geophysical Prospecting*, 37 p. 531-551.

[۹۰]. محمدی ویژه م، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه ارشد: "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های GPR در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با روش ژئوالکتریک"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۹۱]. رشمه کریم ا، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه ارشد: "کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) در کاوش‌های باستان‌شناسی، مطالعه موردی: تپه حصار دامغان"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[92]. Loke M.H. (2001), "Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys". Available on https://pangea.stanford.edu/research/groups/.../DCResistivity_Notes.pdf

Abstract

Among conventional geophysical methods, ground-penetrating radar method (GPR) is capable of detecting heterogeneity in the subsurface and identifying different types of buried objects at shallow subsurface. In this regard, modeling of GPR data is significant in order to interpret the data and identify these subsurface objects. The aim of this thesis is to make the forward and inverse modeling of GPR data and investigate the results in various case studies. Due to the fact that any method of inverse modeling needs a forward modeling program as its basic core, before performing inverse modeling, an attempt has been made to identify the strengths and weaknesses of each of the software packages available for forward modeling. Thus, in this research, capability, efficiency and speed calculation of each of the software packages for different earth models has been tested. Then, based on the nature and physical and geometric properties of the subsurface targets in the field data, their synthetic models have been built, and their two-dimensional GPR responses forward modeling using different software packages have been obtained and compared together. The purpose of inversion is to specify an earth model that best explain our observations. In this research, it has been tried to carry out inverse modeling on GPR field data to interpret and detect the buried targets. Therefore, to achieve this objective, we have used an effective algorithm, in which coding has been made in GUI environment of MATLAB programming software, and as a result, reliable and accurate inverse modeling has been carried out. In the present study, to simulate the behavior of the propagation of electromagnetic (EM) waves in GPR method, two-dimensional finite difference method has been used. The main advantage of this method is its comparative simplicity of the concept, high accuracy and simple implementation for complex and arbitrary models as well as easily adjusting the antenna when applied. In this study, acquisition of GPR field data and synthetic data modeling have been made in TM mode. The radargrams of the GPR data have been demonstrated using Reflexw software after performing necessary processing on the data. The results indicate high errors in inverse modeling of GPR data. The causes can be attributed to various limitations existing in all forward modeling algorithms and software packages, and also, the impossibility of making forward modeling exactly according to the real models (due to the complexity nature of the ground), taking into account the homogeneity and uniform host environment and targets in the modeling process unlike the diversity and complexity of the real buried targets and different values of the electrical properties of the ground as well as the presence of different types of noises and other factors influencing the real earth models.

Keywords: Ground penetrating radar (GPR), Forward modeling, Inverse modeling, Finite difference method, Processing.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Exploration Geophysics

Forward and inverse modeling of GPR data and investigation of the results in
some case studies

By:

Afsaneh Ahmadpour

Supervisors:

Dr. A. Kamkarr rohani

Dr. I. Piruz

Advisor:

S. parnow

Dr. R. Ahmadi

FEB 2016