[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



# بررسی تأثیر پارامترهای برداشت بر نتایج روش GPR با استفاده از مدل‌سازی پیش‌رو و پژوهش‌های میدانی

حسین فریدونی؛
دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکدهٔ مهندسی معدن،
رضا احمدی*؛ دانشگاه صنعتی اراک، دانشکدهٔ مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۷/۱۲ پذیرش ۹۶/۱۰/۱۰

## چکیده

رادار نفوذی به زمین (GPR) روشی ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک زیاد است که از امواج الکترومغناطیسی با فرکانس زیاد برای تصویر کردن ساختارها و اشیاء مدفون در زیر زمین بدون تخریب محیط، استفاده می‌کند. در پژوهش حاضر انتخاب پارامترهای بهینه برداشت داده‌های واقعی این روش بررسی شده است. برای این منظور ابتدا مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود دوبعدی حوزهٔ زمان (FDTD) به‌کمک نرم‌افزارهای GPRMAX، ReflexW و Radexplorer برای تعداد زیادی از مدل‌های مصنوعی متناظر با اهداف متداول در تأسیسات زیرسطحی انجام شد. هدف از این شبیه‌سازی‌ها بررسی تأثیر پارامترهای برداشت همانند فاصله نمونه‌برداری مکانی (فواصل بین تریسی) و زمانی بر پاسخ GPR اهداف با پارامترهای هندسی و فیزیکی مختلف است. در راستای انتخاب و طراحی مناسب‌ترین شرایط و پارامترهای برداشت داده‌های واقعی GPR نیز برداشت‌های میدانی متعدد در محوطهٔ دانشگاه صنعتی اصفهان، روی اهداف استوانه‌ای شکل مدفون از پیش شناخته شده با محیط‌های میزبان گوناگون، انجام شد. در این عملیات برخی از پارامترهای برداشت همانند میزان فرکانس مرکزی، بازه آنتنی و وضعیت آنتن به‌دلیل در اختیار داشتن نوعی دستگاه GPR تک ثابت با آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، ثابت (غیرقابل تغییر) باقی ماندند. مهم‌ترین پارامترهای برداشت بررسی شده نیز شامل فرکانس نمونه‌برداری زمانی، فاصله نمونه‌برداری مکانی، پنجرهٔ زمانی و تعداد تریس‌های برانبارش شده است. در نهایت موفقیت یا عدم موفقیت آشکارسازی اهداف

* نویسنده مسئول Rezahmadi@gmail.com

براساس پارامترهای برداشت انتخابی، بررسی شد و مقدار کمّی احتمال موفقیت آشکارسازی اهداف زیرسطحی براساس مقادیر فرکانس نمونه‌برداری زمانی و مکانی تعیین شد که بیش‌ترین احتمال آشکارسازی اهداف، مربوط به فرکانس نمونه‌برداری زمانی ۱۹۵٤ مگاهرتز و فاصله نمونه‌برداری مکانی ۱ سانتی‌متر است.

**واژه‌های کلیدی**: رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی پیش‌رو، پارامترهای برداشت GPR، فرکانس نمونه-برداری زمانی، فاصله نمونه‌برداری مکانی، نرم افزار Radexplorer

## مقدمه

روش‌های ژئوفیزیکی سریع‌ترین، کم‌هزینه‌ترین و پرکاربردترین روش‌های اکتشاف غیرمستقیم به‌حساب می‌آیند. در میان روش‌های ژئوفیزیکی کاربردی متداول، روش رادار نفوذی به زمین[1] (GPR) در آشکارسازی انواع ناهمگنی‌های زیرسطحی و نیز شناسایی انواع اهداف مدفون در اعماق کم، مؤثرترین روش است. GPR روشی ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک زیاد است که از بازتاب امواج رادیویی که عموماً در محدودهٔ فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز به درون زمین انتشار می‌یابند، برای تصویر کردن ساختارهای دست‌ساز بشر و ویژگی‌های اشیاء مدفون در زیر زمین بدون نیاز به مغزه‌گیری و ایجاد شکستگی و تغییر در محیط، استفاده می‌کند. نتایج برداشت این روش به‌آسانی به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند.

روش GPR را اولین بار استرن دانشمند اتریشی برای تخمین ضخامت یک لایهٔ یخی به‌کار گرفت اما در حال حاضر دارای طیف وسیعی از کاربردهاست، به‌گونه‌ای‌که در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله در زمینه‌های معدن‌کاری، ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، تصویر کردن آب‌های زیرزمینی، باستان‌شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، برف و یخ و یخ‌بندان شناسی، تاسیسات و مسائل زیست‌محیطی کاربرد دارد [۱]، [۲]، [۳].

روش GPR نیز همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی در کاربرد، دارای مزایا و معایبی (محدودیت‌هایی) است. از مهم‌ترین قابلیت‌های روش GPR در کاربردهای مختلف، ایجاد تصویر زیرسطحی با تفکیک‌پذیری بالا، غیرمخرب بودن و طیف وسیع کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف است. مهم‌ترین محدودیت این روش نیز عمق تجسس نسبتاً کم‌تر آن، در

1. Ground-Penetrating Radar

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی است و در زمین‌های دارای هدایت الکتریکی زیاد (مانند سازندهای رسی یا سیلتی مرطوب و سازندهای حاوی آب شور) و روباره‌های دارای ترکیبات آهن، عمق نفوذ آن به‌شدت کاهش می‌یابد [٤]. از جمله مشکلات و نارسایی‌های دیگر این روش، وجود پیچیدگی‌هایی در ویژگی‌های الکتریکی محیط‌ها و تغییرات زیاد ویژگی‌های الکتریکی مواد و ضعف دستگاه‌ها در تشخیص چگونگی تأثیر این فاکتورها است [٥].

در این پژوهش انتخاب پارامترهای بهینه برداشت‌های GPR بررسی شده است. برای این منظور ابتدا مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود دوبعدی حوزهٔ زمان (FDTD) به‌کمک نرم‌افزارهای GPRMAX، ReflexW، GPRprofile و Radexplorer برای تعداد زیادی از مدل‌های مصنوعی متناظر با اهداف متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی و تأسیسات زیرسطحی، انجام شد. هدف از انجام این مدل‌سازی‌ها بررسی تأثیر پارامترهای برداشت، همانند فرکانس نمونه‌برداری زمانی و فاصله نمونه‌برداری مکانی (فواصل بین تریسی) بر پاسخ GPR اهداف با پارامترهای هندسی و فیزیکی گوناگون است. سپس برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر برداشت داده‌های واقعی GPR و انتخاب و طراحی مناسب‌ترین شرایط و پارامترهای برداشت، برداشت‌های میدانی متعدد در محوطهٔ دانشگاه صنعتی اصفهان بر اهداف استوانه‌ای شکل مدفون از پیش شناخته شده، انجام شد و پاسخ GPR آن‌ها بعد از اعمال توالی‌های پردازشی مختلف، بررسی شد.

## مرور پیشینهٔ پژوهش

زنگ و مک‌مکان (١٩٩٦) از الگوریتم‌های مدل‌سازی تک ثابت و هر دو ثابت مبتنی بر پرتو برای بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله اثرات جنس مخزن و محتویات آن، اندازه مخازن مختلف، نوع و سطح سیالات محتوی، فرکانس و جدایش آنتن GPR استفاده شده در برداشت داده‌ها، آسیب دیدگی مخزن و نوفه محیط بر پاسخ GPR استفاده کردند و نتیجه گرفتند که روش GPR نه تنها برای تشخیص مخزن، بلکه می‌تواند برای ارزیابی در محل با جزئیات بیش‌تر، وضعیت و محتویات مخزن مفید باشد [٦]. برس و همکاران (١٩٩٩) به بهینه‌سازی پردازش‌ها و تنظیمات دستگاه به‌منظور پردازش صحیح داده‌های سه‌بعدی

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



پرداختند. آن‌ها هم‌چنین به مقایسهٔ نتایج روش‌های برداشت دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته و نتیجه گرفتند که برداشت‌های سه‌بعدی بسیار زمانبر است [۷]. تصاویر GPR به‌شدت تحت تأثیر هندسه بین فرستنده، گیرنده و بازتاب کننده زیرسطحی است. این وابستگی ناشی از ویژگی‌های آنتن‌ها و هم‌چنین حساسیت بازتابنده به پلاریزاسیون امواج الکترومغناطیسی است. در پژوهش‌های لوتز و همکاران (۲۰۰۳) برداشت‌های GPR با آنتن ۱۰۰MHz با دو مد برداشت میدان الکتریکی عرضی[1] (TE) و میدان مغناطیسی عرضی[2] (TM) انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که تصاویر حاصل در این دو حالت، مکمل یک‌دیگر بوده است و جزئیات بیش‌تری را نسبت به حالتی که تنها یک مد برداشت استفاده شود، نشان می‌دهند. تحقیقات آن‌ها به‌صورت واضح بر این نکته تأکید دارد که چگونه استفاده از چندین پیکره‌بندی می‌تواند منجر به بهبود تصاویر و تفسیر در روش GPR شود [۸]. کافمن و همکاران (۲۰۰۶) برای آشکارسازی حفرات در عمق کم، یک آزمایش تجربی در شرایط آزمایشگاهی با دو آنتن با فرکانس‌های مختلف انجام دادند و نتایج این پژوهش نشان داد که آنتن ۳۰۰MHz جفت ثابت[3] بهترین تنظیم برای آشکارسازی یک حفره با اندازهٔ ۰/۶ تا ۲/۴ متر است [۹]. شاری و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر قطبیدگی آنتن و تأثیر محیط برداشت (گذردهی دی‌الکتریک محیط میزبان) روی داده‌های GPR پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در آشکارسازی اهداف استوانه‌ای غیرفلزی، این دو پارامتر نقش بسیار مهمی در کیفیت تصویر ایجاد شده دارند [۱۰]. اسلویک (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر شرایط اندازه‌گیری GPR بر عمق تجسس و تفکیک‌پذیری تصویر در درهٔ آبرفتی پرداخته است. نتایج وی نشان می‌دهد که عمق تجسس و تفکیک‌پذیری تصاویر در برداشت‌های مختلف، تفاوت چشم‌گیری داشته و با توجه به شرایط اندازه‌گیری باید پارامترهای تنظیم کننده دستگاه مانند پنجرهٔ زمانی، تعداد تریس‌های برانبارش شده و فرکانس نمونه‌برداری برای به‌دست آوردن بهترین پاسخ به بهترین نحو تنظیم شوند [۱۱]. متوالی (۲۰۱۵) از آنتن ۴۰۰ مگاهرتزی برای به نقشه درآوردن تأسیسات ممکن زیر زمین در زیر پل السلیمانی در کمربند دوم شهر مکه

1. Transverse Electric
2. Transverse Magnetic
3. Bistatic

استفاده کرده است. نتایج حاصل از پژوهش وی بیانگر اهمیت انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی GPR قبل از فرایند حفاری در سایت‌های شلوغ شهری است [۱۲]. پرگو و همکاران (۲۰۱۷) با به‌کارگیری پارامترهای برداشت مختلف به آشکارسازی لوله‌های مدفون با استفاده از روش GPR پرداخته و بدین نتیجه رسیده‌اند که برای آشکارسازی پاسخ لوله‌های مدفون در اعماق کم به‌کارگیری آنتن GHz ۲/۳ با فاصلهٔ بین تریسی برابر با ۲ سانتی‌متر بهترین نتیجه را به‌دست می‌دهد [۱۳].

## اصول و مبانی روش GPR

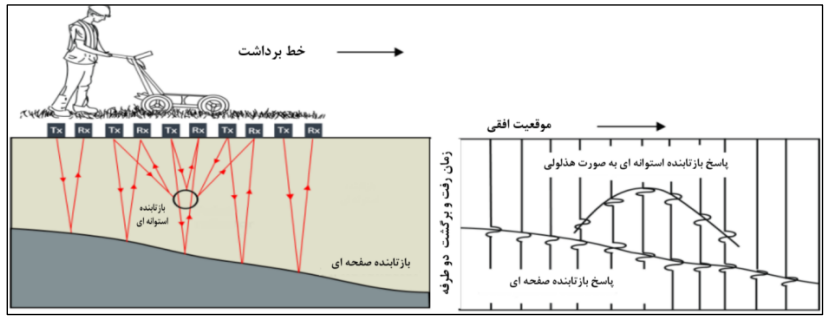
سیستم GPR سیگنال‌های الکترومغناطیسی در محدودهٔ فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز را از طریق فرستنده ارسال کرده و نحوهٔ رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را از طریق گیرنده آشکار می‌کند. از آن‌جاکه سیگنال‌های GPR از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند، بنابراین الکترومغناطیس پایه و اساس GPR است. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، به‌صورتی که تمام پدیده‌های الکترومغناطیس در مقیاس ماکروسکوپی با این معادلات قابل توصیف بوده است و تمامی مسائل مربوط نیز با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب قابل حل هستند. گذردهی دی‌الکتریک $\varepsilon$، نفوذپذیری مغناطیسی[1] $\mu$ و هدایت الکتریکی $\sigma$ مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در GPR هستند. این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند. در بسیاری از کاربردهای زمین شناسی و ژئوتکنیکی GPR، ویژگی‌های الکتریکی، فاکتور غالب کنترل کننده پاسخ‌های GPR هستند. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف است و بنابراین در روش GPR در اکثر مواقع $\varepsilon$ و $\sigma$ مهم‌ترین پارامترها هستند [۱٤].

در یک اندازه‌گیری GPR استاندارد، درحالی‌که آنتن‌ها در راستای مسیر برداشت، کشیده می‌شوند، ردها در بازه‌ای ثابت به‌وسیلهٔ چرخ اندازه‌گیری که به پشت آنتن متصل است، برداشت می‌شوند. این کار موجب به‌دست آمدن مجموعه‌ای از تریس‌ها می‌شود که در نهایت به‌وسیلهٔ نرم‌افزار اندازه‌گیری و بر حسب تابعی از مکان و زمان در قالب نموداری موسوم به

1. Magnetic permeability

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

نگاشت راداری[1] نمایش داده می‌شوند. در حالت کلی نگاشت راداری یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۱ مجموعه‌ای از تریس‌های بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر دوبعدی نیز برای اهداف استوانه‌ای مدفون به‌صورت هذلولی و برای اهداف صفحه‌ای، به‌صورت یک خط مورب است. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، از سیگنال‌های زمینه، بزرگ‌تر هستند.




**شکل ۱. برداشت داده‌های GPR بر اهداف مدفون و رخداد مربوط در نگاشت راداری (ویرایش شده از [۱۵])**

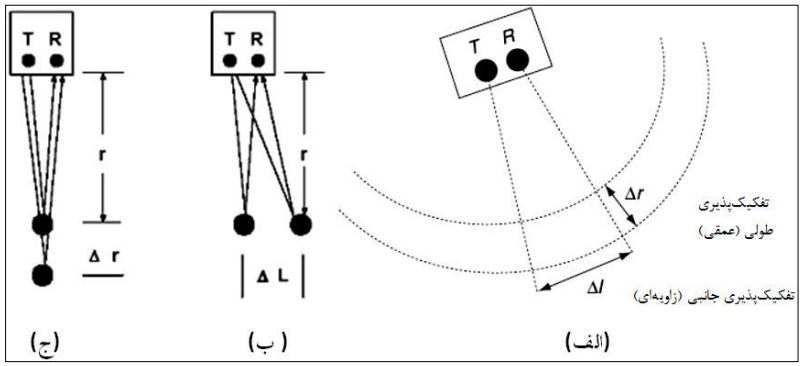
از آن‌جاکه در روش GPR اهداف در فواصل معین، کشف و آشکار می‌شوند، معیار تفکیک‌پذیری است که نشان می‌دهد چگونه موقعیت و ویژگی‌های هندسی اهداف می‌توانند به‌طور دقیق تعیین شوند. اساساً در مسائل مرتبط با GPR، تفکیک‌پذیری با دو مؤلفهٔ تفکیک‌پذیری عمقی (طولی) و تفکیک‌پذیری جانبی (زاویه‌ای) تعریف می‌شود. مفاهیم پایه در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. میان تفکیک‌پذیری، عمق تجسس و فرکانس مرکزی پالس‌های GPR ارتباط وجود دارد، به‌صورتی‌که با افزایش فرکانس مرکزی تفکیک‌پذیری افزایش و عمق تجسس کاهش می‌یابد و برعکس با کاهش فرکانس مرکزی، تفکیک‌پذیری کاهش و عمق تجسس، افزایش می‌یابد.

## مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR

رفتار حاکم بر میادین GPR را می‌توان از طریق حل معادلات ماکسول و شرایط مرزی مناسب که پایه و اساس تئوری الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، شبیه‌سازی کرد. تاکنون

1. Radargram

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]




**شکل ۲. الف و ب) مؤلفه‌های تفکیک‌پذیری جانبی و عمقی، الف و ج) تعریف شده برای سامانه GPR (ویرایش شده از [۱۶]، [۱۷])**

روش‌های عددی مختلفی برای مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR به‌کار گرفته شده است که در این میان روش تفاضل محدود دوبعدی در حوزهٔ زمان[1] به‌دلیل 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 [۱۸].

هدف از انجام این پژوهش آن است که مشخص شود تحت شرایط مختلف محیطی و پارامترهای برداشت گوناگون، چه اطلاعات معقولی از داده‌های میدانی به‌دست می‌آید. بنابراین در ادامه، پاسخ GPR برای اشیای مصنوعی استوانه‌ای فرضی متداول در بررسی‌های ژئوتکنیکی و تأسیسات، با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی GprMax و ReflexW بررسی شده است. هدف اصلی، بررسی تأثیر فاکتورهای مختلف همانند تأثیر فرکانس نمونه‌برداری زمانی و فاصله نمونه‌برداری مکانی بر پاسخ GPR اهداف مختلف است. پارامترهای مهم تنظیم برای تولید پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی، در جدول ۱ خلاصه شده است. با توجه به این‌که دستگاه استفاده شده در برداشت‌های میدانی دارای فرکانس مرکزی ۲۵۰MHz است، به‌همین دلیل در تمام مدل‌سازی‌های انجام گرفته در این پژوهش از فرکانس مرکزی ۲۵۰MHz استفاده شده است.

1. Finite-Difference Time-Domain

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

به‌منظور جامعیت نتایج تحقیق برای ارزیابی تأثیر فاکتورهای مختلف، مقادیر ویژگی‌های الکتریکی محیط‌های میزبان و اهداف، تاحدامکان نزدیک به مقادیر واقعی در عمل، انتخاب شده و در طی فرآیند بررسی تأثیر یک پارامتر، تمام پارامترهای دیگر در مدل، ثابت در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر به‌منظور واقع گرایانه بودن مدل‌سازی‌ها، سعی شد که بررسی تأثیر پارامترهای برداشت GPR بر مدل‌های مصنوعی پیچیده همانند مدل‌های شامل اهداف استوانه‌ای حاوی دو نوع سیال و اهداف استوانه‌ای قائم جفت نیز صورت گیرد که تاکنون بررسی نشده‌اند.

**جدول ۱. پارامترهای تنظیم استفاده شده برای تولید پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی**

| پارامتر | فرکانس مرکزی (مگاهرتز) | موجک اولیه | ابعاد مدل (متر) | شبکه مدلسازی دوبعدی | فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده (متر) | مد برداشت |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **مقدار/ نوع** | ۲۵۰ | ریکر | ٦×٤ | ٦۰۰×٤۱۰ | ۰/۵ | TM |

در جدول ۲ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد بررسی شده در این پژوهش ازجمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج (نوعاً در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) آورده شده است. در زیربخش‌های بعدی مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR برای اشیاء استوانه‌ای با پارامترهای برداشت مختلف بررسی شده است.

### ۱. بررسی تأثیر فاصلهٔ نمونه‌برداری مکانی بر پاسخ GPR

هدف بررسی تأثیر فاصلهٔ نمونه‌برداری مکانی (فاصله بین تریسی) بر پاسخ GPR برای سه مدل با پارامترهای فیزیکی و هندسی یک‌سان است. در مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR به‌روش تفاضل محدود، به‌منظور افزایش صحت نتایج و جلوگیری از دگرنامی (آلیازینگ) مکانی یا پراکندگی عددی، فواصل مکانی چشمه‌ها (فرستنده‌ها) در طول پیمایش پروفیل برای ناهمگنی‌های زیرسطحی، مطابق رابطهٔ (۱) حداکثر یک پنجم بعد هدف در راستای پیمایش پروفیل، انتخاب می‌شود [۱۹]. به‌عبارت دیگر تعداد چشمه‌ها در راستای پیمایش پروفیل به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که حداقل تعداد ۵ عدد تریس، بعد هدف زیرسطحی در راستای پیمایش پروفیل را پوشش دهند.

$$\Delta x = \Delta y = \frac{\lambda_{min}}{5} \qquad (۱)$$

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

در برداشت‌های واقعی GPR انتخاب فاصلهٔ بین اندازه‌گیری‌های راداری گسسته (فواصل بین تریسی)، به اندازه و ابعاد هدف زیرسطحی تحت تجسس و ویژگی‌های دی‌الکتریک مواد و محیط‌های زیرسطحی بستگی دارد. به‌منظور اطمینان از این‌که پاسخ زمین به‌طور مکانی، دگرنام نمی‌شود، فاصله نمونه‌برداری نباید از یک حد مشخص بیش‌تر انتخاب شود. بیش‌ترین فاصلهٔ نمونه‌برداری مجاز مطابق رابطهٔ (۲)، یک‌چهارم طول موج در محیط دربرگیرنده است که بر حسب متر تعیین می‌شود:

$$\Delta x = \frac{c}{4f\sqrt{K}} = \frac{75}{f\sqrt{K}} \qquad (۲)$$

که در این رابطه f فرکانس مرکزی آنتن (برحسب MHz) و K گذردهی دی‌الکتریک نسبی محیط میزبان است. اگر فاصلهٔ ایستگاهی، بزرگ‌تر از فاصله نمونه‌برداری ذکر شده باشد، دگرنامی مکانی رخ می‌دهد.

هم‌چنین مقدار پنجرهٔ زمانی که برای تعیین حد نهایی زمانی (عمقی) پاسخ مدل، تنظیم می‌شود با استفاده از رابطهٔ (۳) قابل محاسبه است:

$$W = 1.3\frac{2\times D}{V} \qquad (۳)$$

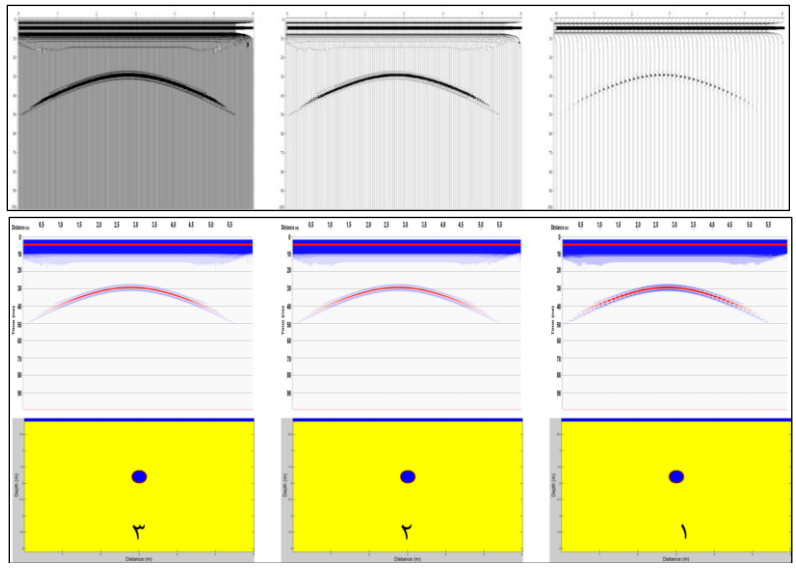
که در این رابطهٔ D عمق بیشینه و V سرعت کمینه است. به‌دلیل عدم قطعیت‌های مربوط به تغییرات سرعت و عمق، در رابطهٔ (۳) پنجرهٔ زمانی ۳۰ درصد بیش‌تر از مقدار محاسباتی نظری، در نظر گرفته می‌شود. از این رابطه می‌توان به‌عنوان معیار اولیه برای تعیین حدودی پنجرهٔزمانی در برداشت‌های واقعی GPR نیز استفاده کرد.

در قسمت پایین شکل ۳ سه مدل هندسی- فیزیکی شامل هدف استوانه‌ای توخالی (صددرصد پر از هوا) با جنس دیواره بتنی با قطر ٤٠ سانتی‌متر و عمق دفن ۱/۵ متر در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی نشان داده شده است (مشخصات هندسی و فیزیکی مدل در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است).

در این شکل هم‌چنین پاسخ GPR هر سه مدل به دو صورت مد تریسی[1] (قسمت بالای شکل) و مد نقطه‌ای[2] (قسمت میانی شکل) نمایش داده شده است. فاصله نمونه‌برداری مکانی

1. Wiggle mode
2. Point mode

در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب برابر با ۱۰، ۵ و ۱ سانتی‌متر است. با توجه به انتخاب این فواصل، تعداد تریس‌ها در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب برابر با ٥٤، ۱۰۸ و ۵۳۰ عدد است. همان‌گونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، فاصله نمونه‌برداری مکانی زیاد (مدل ۱) باعث شده که کیفیت هذلولی پاسخ تا حد زیادی کاهش یافته و به‌صورت پله‌پله و ناهموار باشد. در برداشت‌های واقعی GPR افزایش حالت ناهمواری و پله‌پله بودن در حضور نوفه، ممکن است باعث عدم تشخیص پاسخ اهداف زیرسطحی شود. هرچه فاصله نمونه‌برداری کم‌تر شود، تصاویر خروجی، وضوح بهتر و پیوستگی بیش‌تری را از خود نشان می‌دهند (مدل‌های ۲ و ۳). اگرچه پاسخ مدل‌های ۲ و ۳ به لحاظ مشاهدهٔ کلی، تفاوت چندانی با یک‌دیگر ندارند، ولی با بررسی دقیق‌تر، مدل ۲ شامل اطلاعات و جزئیات بیش‌تر بوده است و درنتیجه دقیق‌تر است.




**شکل۳. بررسی تأثیر فاصله نمونه‌برداری مکانی بر پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای افقی توخالی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی؛ فاصله نمونه‌برداری مکانی در مدل ۱ برابر با ۱۰ سانتی‌متر و در مدل‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب برابر با ۵ و ۱ سانتی‌متر است. به‌ترتیب از بالا به پایین پاسخ مد تریسی، مد نقطه‌ای و مدل هندسی- فیزیکی**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

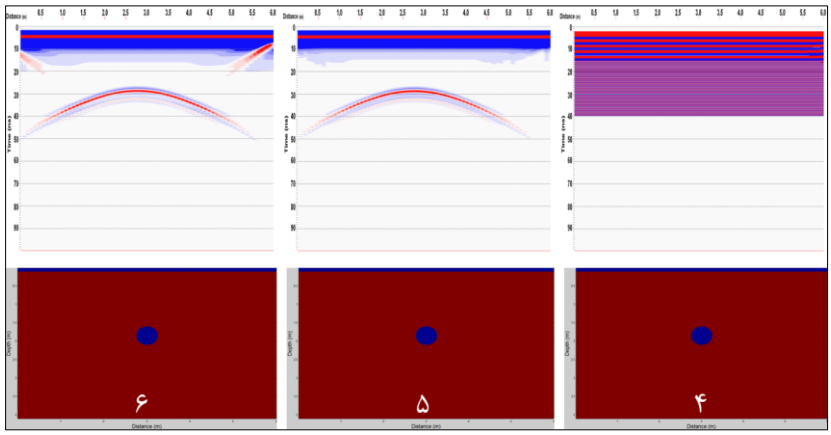
**جدول ۲. برخی از ویژگی‌های مواد بررسی شده (ویرایش شده از [۲۰])**

| ماده (محیط) | گذردهی دی‌الکتریک نسبی | هدایت الکتریکی (ms/m) | سرعت موج (m/ns) |
|---|---|---|---|
| خاک رس سیلتی | ٦ | ٦/٦٧ | ۰/۱۲ |
| هوا | ۱ | ۰ | ۰/۳ |
| آب شیرین | ۸۰ | ۰/۵ | ۰/۰۳۳ |
| فاضلاب | ۵۰ | ۰/۲ | ۰/۰٤ |
| فلز | ۱۰۰–۳۰۰ | $۱۰^{۷}$–$۱۰^{٤}$ | ۰/۰۱۷ |
| بتن | ٦–۱۲ | ۵ | ۰/۰۹ |
| فایبرگلاس | ٤/۸ | ۰/٦٦ | ۰/۱٤ |
| پلاستیک پی‌وی‌سی | ۳/۳ | ۱/۳٤ | ۰/۱٦ |

## ۲. تأثیر فرکانس نمونه‌برداری زمانی بر پاسخ GPR

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر پاسخ GPR برای سه مدل با پارامترهای فیزیکی و هندسی یک‌سان است. در شکل ٤ سه مدل شامل هدف استوانه‌ای توخالی (صددرصد پر از هوا) با قطر نیم‌متر و عمق دفن ۱/۵ متر در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی نشان داده شده است (مشخصات هندسی و فیزیکی مدل در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است). فاصله‌های نمونه‌برداری زمانی در مدل‌های ٤، ۵ و ٦ به‌ترتیب برابر با ۰/۰۹٤، ۰/۰۲۳ و ۰/۰۰۵۹ نانوثانیه است که به‌ترتیب متناظر با فرکانس‌های نمونه‌برداری ۱۰۵۹۹، ٤۲۳۹۷ و ۱٦۹۵۸۸ مگاهرتز در این مدل‌ها است. هر سه مدل با تعداد ٦۸ تریس با فاصلهٔ نمونه برداری مکانی یک‌سان (۸ سانتی‌متر) مدل‌سازی شده‌اند. چنان‌که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، فرکانس نمونه‌برداری پایین (مدل ٤) باعث محو شدن پاسخ هدف زیرسطحی در نگاشت راداری شده است. در این مدل، فرکانس زمانی انتخاب شده قادر به تفکیک پارامترهای فیزیکی مدل (گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) نیست و تنها موج مستقیم ارسالی قابل مشاهده است. چنان‌که از شکل ٤ مشاهده می‌شود، نگاشت راداری مدل ۵ با وضوح بالا قادر به آشکارسازی هدف شده است. در مدل ٦ فرکانس نمونه‌برداری چهار برابر فرکانس نمونه‌برداری مدل ۵ انتخاب شده است؛ چنان‌که دیده می‌شود، پاسخ دریافت شده از استوانه توخالی در این دو مدل هیچ تفاوتی با یک‌دیگر ندارند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]




**شکل ٤. بررسی تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای افقی توخالی در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی. فرکانس نمونه‌برداری مدل ٤ برابر با ۱۰۵۹۹ مگاهرتز و در مدل‌های ۵ و ٦ رتیب برابر با ٤۲۳۹۷ و ۱٦۹۵۸۸ مگاهرتز است.**

### ۳. تأثیر فاصله نمونه‌برداری مکانی بر پاسخ GPR استوانه حاوی دو نوع سیال

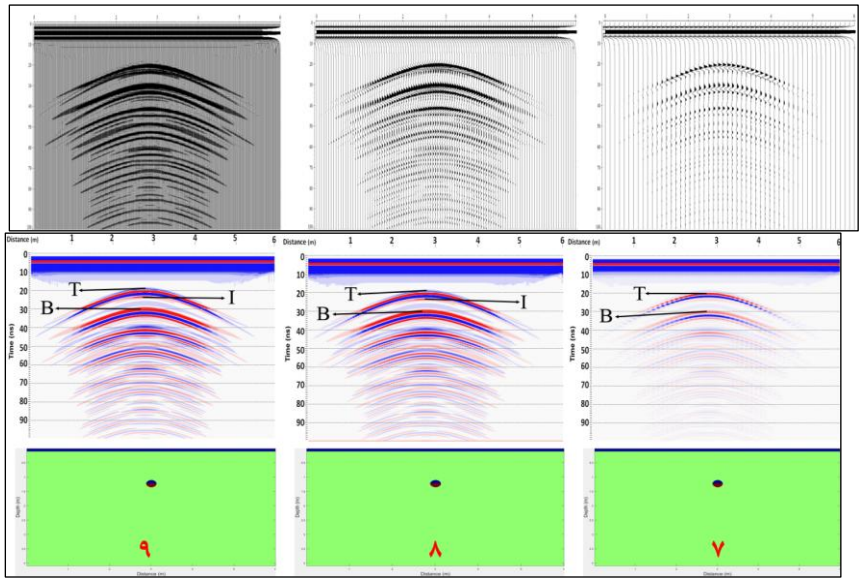
هدف از این پژوهش بررسی تأثیر فاصله نمونه‌برداری مکانی (فاصلهٔ بین تریسی) بر پاسخ GPR سه مدل با پارامترهای فیزیکی و هندسی یک‌سان است. در قسمت پایین شکل ۵ سه مدل هندسی- فیزیکی شامل اهداف استوانه‌ای به قطر ۲۵ سانتی‌متر شامل پنجاه درصد حجمی آب شیرین و عمق دفن یک متر در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی نشان داده شده است (مشخصات هندسی و فیزیکی مدل در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است). پاسخ GPR مدل‌ها نیز به دو صورت مد تریسی (قسمت بالای شکل) و مد نقطه‌ای (قسمت میانی شکل) نمایش داده شده است. فاصله نمونه‌برداری مکانی در مدل‌های ۷، ۸ و ۹ به‌ترتیب برابر با ۱۰، ۵ و ۱ سانتی‌متر است. با توجه به انتخاب این فواصل، تعداد تریس‌ها در مدل‌های ۷، ۸ و ۹ به‌ترتیب برابر با ٥٤، ۱۰۸ و ۵۳۰ عدد است.

در پاسخ GPR این نوع مدل‌ها انتظار می‌رود که علاوه بر پاسخ سقف (T) و کف هدف (B)، پاسخ مرز بین دو سیال (I) هم دیده شود. چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فاصلهٔ نمونه‌برداری مکانی زیاد (پاسخ مدل ۷) باعث شده که کیفیت هذلولی پاسخ تا حد زیادی کاهش یافته و به‌صورت پله‌پله و ناهموار باشد. هم‌چنین مطابق شکل پاسخ سقف و کف

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

هدف تاحدودی قابل تشخیص بوده است اما پاسخ مرز بین دو سیال بسیار ضعیف شده و به سختی قابل تشخیص است. یقیناً در محیط‌های برداشت واقعی و در حضور انواع نوفه‌ها با انتخاب فاصله نمونه‌برداری مکانی زیاد (مدل ۷) پاسخ مرز بین دو سیال به کلی محو شده و قابل تشخیص نیست.

هرچه فاصلهٔ نمونه‌برداری کم‌تر شود، تصاویر خروجی، وضوح بهتر و پیوستگی بیش‌تری از خود نشان می‌دهند (مدل‌های ۸ و ۹). چنان‌که در پاسخ مدل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود، علاوه بر پاسخ سقف (T) و کف (B) هدف، پاسخ مرز بین دو سیال (I) نیز قابل تشخیص است. به‌دلیل این‌که سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در هوا بسیار بیش‌تر از خاک رس سیلتی است، پاسخ مرز بین دو سیال با اختلاف زمانی بسیار کم درست در زیر پاسخ سقف هدف (T) نمایان است. هم‌چنین در این مورد پلاریته سیگنال دریافت شده بین سقف (T) و مرز بین دو سیال (I) (و هم‌چنین کف هدف (B)) نسبت به یک‌دیگر معکوس شده‌اند. این تغییر پلاریته به‌دلیل تغییر محیط از سیال هوا به آب شیرین اتفاق افتاده است.




**شکل ۵. بررسی تأثیر فاصله نمونه‌برداری مکانی بر پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای افقی شامل دو نوع سیال در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی؛ فاصله نمونه‌برداری مکانی در مدل ۷ برابر با ۱۰ سانتی‌متر و در مدل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب برابر با ۵ و ۱ سانتی‌متر است. به‌ترتیب از بالا به پایین پاسخ مد تریسی، مد نقطه‌ای و مدل هندسی- فیزیکی**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

### ٤. تأثیر فرکانس نمونه‌برداری زمانی بر پاسخ GPR استوانه شامل دو نوع سیال

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر پاسخ GPR سه مدل با پارامترهای فیزیکی و هندسی یک‌سان است. در شکل ٦ سه مدل شامل اهداف استوانه‌ای افقی با قطر ۲۵ سانتی‌متر شامل پنجاه درصد حجمی آب شیرین و عمق دفن یک متر در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی، نشان داده شده است (مشخصات هندسی و فیزیکی مدل در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است). فاصله‌های نمونه‌برداری زمانی در مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به‌ترتیب برابر با ۰/۰۸۵، ۰/۰۲۳ و ۰/۰۰۵۹ نانوثانیه انتخاب شده که به‌ترتیب متناظر با فرکانس‌های نمونه‌برداری ۱۲۱۱۳، ٤۲۳۹۷ و ۱٦۹۵۸۸ مگاهرتز هستند. گفتنی است که هر سه مدل با تعداد ٦۸ تریس با فاصله نمونه‌برداری مکانی یک‌سان (۸ سانتی‌متر) مدل‌سازی شده‌اند.

چنان‌که در شکل ٦ مشاهده می‌شود، فرکانس نمونه‌برداری پایین (مدل ۱۰) موجب کاهش کیفیت پاسخ هدف در نگاشت راداری شده است. در این مدل پاسخ سقف (T) و کف هدف (B) مشخص شده ولی هیچ پاسخی از مرز بین دو سیال دریافت نشده است. با توجه به انتخاب فرکانس نمونه‌برداری زمانی کم، مدل قادر به تفکیک پارامترهای فیزیکی (گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی) در مرز دو سیال نشده است. در حالی‌که نگاشت راداری مدل ۱۱ علاوه بر داشتن وضوح بالا، قادر به آشکارسازی پاسخ سقف (T) و کف (B) و نیز پاسخ مرز بین دو سیال (I) است.

در مدل ۱۲ فرکانس نمونه برداری، چهار برابر مدل ۱۱ انتخاب شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، در این مدل پاسخ مرز بین دو سیال با وضوح بیش‌تری به نمایش درآمده است. با توجه به تغییر محیط از سیال هوا به سیال آب شیرین در هر سه مدل، پلاریته پاسخ بین سقف (T) و کف هدف (B) (هم‌چنین مرز بین دو سیال (I)) عکس یک‌دیگر هستند.

### ۵. مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR برای استوانه قائم جفت

به‌منظور بررسی تأثیر حضور بیش از یک شیء روی پاسخ GPR و تعیین میزان حد جدایش قائم دو پاسخ از یک‌دیگر (و در نتیجه شناسایی دو هدف زیرسطحی در راستای قائم)، مدل‌سازی پاسخ GPR برای مدل‌های مصنوعی شامل دو هدف استوانه‌ای توخالی با

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



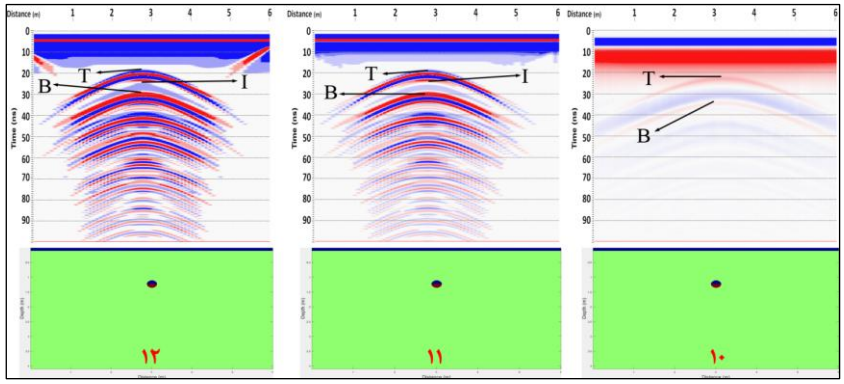
قطر یک متر و در فواصل قائم متفاوت، مدفون در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی انجام شد. ابعاد مدل ۱۲×۲۵ متر، پنجره زمانی ۳۰۰ نانوثانیه، فرکانس نمونه‌برداری ٤۲۳۹۷ مگاهرتز، فاصله نمونه‌برداری ۸ سانتی‌متر و سرعت موج در محیط میزبان برابر با ۰/۱۲m/ns است. این مدل مطابق شکل ۷ با استفاده از نرم‌افزار ReflexW و با موجک اولیه کوپر[1] تهیه شده است. چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود، مدل‌سازی برای حالتی که فاصله قائم بین مراکز دو استوانه برابر با قطر هر یک از استوانه‌ها (مدل ۱۳)، ۲ برابر قطر هر یک از استوانه‌ها (مدل ١٤) و ۳ برابر قطر هر یک از استوانه‌ها (مدل ۱۵) باشد، انجام شد. چنان‌که در مدل ۱۳ دیده می‌شود، پاسخ دو استوانه تا حدود زیادی با یک‌دیگر تداخل پیدا کرده و این اهداف در نگاشت راداری قابلیت تمایز از یک‌دیگر را ندارند. در مدل ١٤ این دو هدف تا حدودی از یک‌دیگر قابل تشخیص هستند اما درجهٔ وضوح اندک است و در تصاویر واقعی GPR به‌دلیل حضور انواع نوفه ها، تشخیص امکان‌پذیر نیست. در مدل ۱۵ دو بازتاب مشخص وجود دارد، اولین هذلولی در عمق ٤/۱۷ متری است که با عمق دفن هدف اول (٤ متر) هم‌خوانی داشته و دومین هذلولی بازتاب شده در عمق ۷/۱۳۹ متری قرار گرفته که با عمق دفن هدف دوم (۷ متر) هم‌خوانی زیادی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل ۲۳ با فاصله‌ای سه برابر قطر هر یک از استوانه‌ها قادر به تفکیک دو استوانه واقع در زیر یک‌دیگر است. در هر صورت به‌منظور ارائه یک قاعده کلی برای تعیین تفکیک‌پذیری قائم دو هدف در مجاورت یک‌دیگر در حالت کلی نیاز به انجام پردازش سیگنال پیشرفته و نیز انجام آزمایش‌های (مدل‌سازی‌های) متعدد است.

در شکل ۸ تصویر سه تریس انتخابی از نگاشت راداری مربوط به مدلی که فاصله قائم بین مراکز استوانه‌ها ٤ برابر قطر هر یک از استوانه‌ها باشد، نمایش داده شده است؛ تریس اول در فاصلهٔ ۹/۸٤ متری (تریس ۱۲۳)، تریس دوم در فاصلهٔ ۱۲/٤۸ متری (تریس ١٥٦) و تریس آخر در فاصلهٔ ۱۵/۱۲ متری (تریس ۱۸۹) قرار گرفته‌اند. تریس ١٥٦ تقریباً در مرکز مدل و دو تریس دیگر در فواصل مساوی در طرفین این تریس قرار گرفته‌اند. چنان‌که در تریس ۱۲۳ دیده می‌شود، دامنهٔ سیگنال پس از برخورد به هدف اول روند نزولی دارد. این

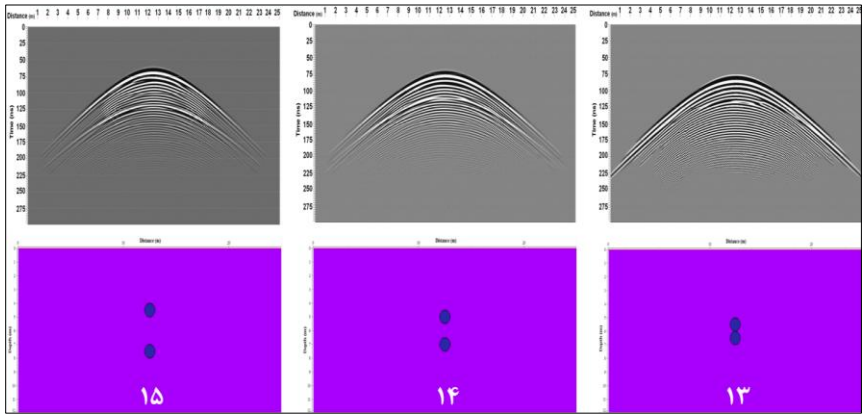
1. kupper

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]






**شکل ٦. بررسی تأثیر فرکانس نمونه‌برداری بر پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای افقی شامل دو نوع سیال در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی. فرکانس نمونه‌برداری مدل ۱۰ برابر با ۱۲۱۱۳ مگاهرتز و در مدل‌های ۱۱ و ۱۲ به‌ترتیب برابر با ٤۲۳۹۷ و ۱٦۹۵۸۸ مگاهرتز است.**



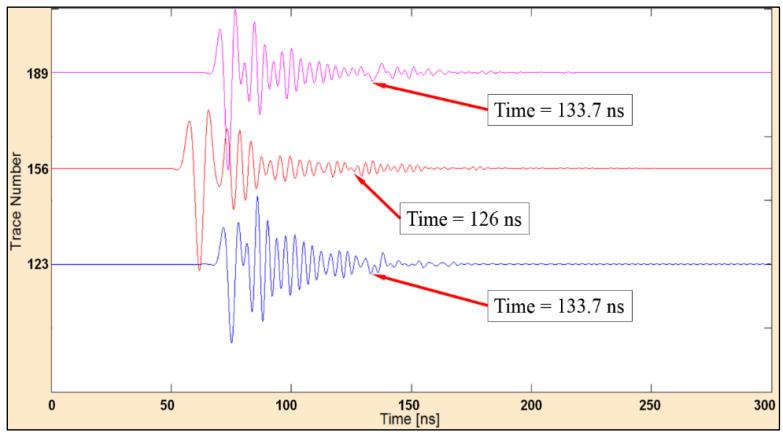

**شکل ۷. بررسی تأثیر فاصله قائم بین مراکز دو استوانه افقی توخالی به قطر یک متر مدفون در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی بر پاسخ GPR. فاصله بین مرکز استوانه‌ها در مدل ۲۱ برابر با ۱ متر و در مدل‌های ۲۲ و ۲۳ به‌ترتیب برابر با ۲ و ۳ متر است.**

روند نزولی در زمان ۱۳۳/۷ نانوثانیه متوقف شده و در این موقعیت زمانی، سیگنال با تغییر دامنهٔ ناگهانی همراه است که این تغییر ناگهانی دامنه (فرکانس) سیگنال در تریس مرکزی و تریس متقارن با این تریس (تریس ۱۸۹) نیز مشاهده می‌شود. این تغییرات در تمام سیگنال‌های نگاشت راداری نیز دیده می‌شود و بیان‌گر بازتاب سیگنال از سقف هدف دوم است. با در

نظر گرفتن سرعت امواج الکترومغناطیس برابر با ۰/۱۲ m/ns عمق دفن هدف دوم برابر با ۷/٦ متر محاسبه می‌شود که با عمق دفن هدف مدل (۷/۵) اختلاف بسیار اندکی دارد.

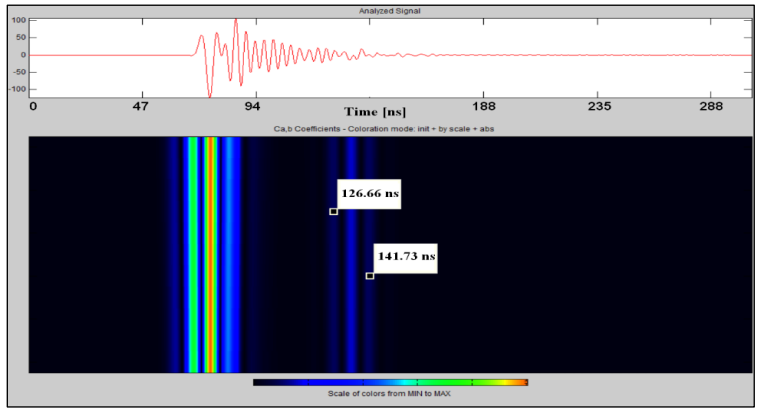
به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات ذکر شده، سیگنال مرکزی (تریس ۱۵٦) از نظر فرکانسی بررسی شد. برای این منظور از تبدیل موجک پیوسته با موجک تعریف شده کلاه مکزیکی در بازه زمانی ۳۰۰ نانوثانیه و مقیاس متناسب با تغییرات فرکانسی متوسط استفاده شده است.

چنان‌که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، پس از تغییرات فرکانسی سیگنال بازتاب شده از هدف اول تغییر فرکانسی در سه مقطع که مربوط به سیگنال بازتاب شده از هدف دوم است، آشکار شده است. به‌نظر می‌رسد که اولین تغییر فرکانسی مربوط به سیگنال بازتاب شده از سقف هدف، دومین تغییر فرکانسی مربوط به بازتاب از داخل استوانه و سومین تغییر فرکانسی مربوط به کف هدف باشد. مطابق این شکل اولین تغییر فرکانسی در عمق دفن ۷/۵۸ متری (۱۲٦/٦٦ ns) آشکار شده است که با عمق دفن سقف هدف (۷/۵ متری) انطباق زیادی دارد. سومین تغییر فرکانسی نیز در عمق دفن ۸/۵۱ متری (۱٤۱/۷۳ ns) آشکار شده است که با عمق دفن کف هدف دوم (۸/۵ متری) انطباق بسیار زیادی دارد. چنان‌که مشاهده می‌شود تحلیل فرکانسی نگاشت راداری قادر به استخراج نتایج دقیق‌تری نسبت به تحلیل دامنهٔ سیگنال است.




**شکل ۸. سه تریس انتخابی از نگاشت راداری در موقعیت ۹/۸٤ (تریس ۱۲۳)، ۱۲/٤۸ (تریس ۱۵٦) و ۱۵/۱۲ متری (تریس ۱۸۹) طول مدل ۲۳**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]




**شکل ۹: تبدیل موجک پیوسته مربوط به تریس میانی (تریس شماره ۱۵۶) مدل ۲۳.**

## برداشت‌های میدانی داده‌های GPR با پارامترهای برداشت مختلف

به‌طورکلی هفت پارامتر میزان فرکانس مرکزی، پنجرهٔ زمانی، فاصلهٔ نمونه‌برداری زمانی، فاصلهٔ (بازه) ایستگاهی، بازهٔ آنتن، موقعیت و فاصله خطی (فاصله‌های بین پروفیلی) و وضعیت آنتن روی یک برداشت بازتابی فاصله ثابت تک‌حالتی تأثیرگذارند. به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر برداشت داده‌های واقعی GPR و انتخاب و طراحی مناسب‌ترین شرایط و پارامترها در برداشت‌های واقعی GPR برداشت‌های میدانی متعدد در محوطهٔ دانشگاه صنعتی اصفهان روی اهداف استوانه‌ای شکل مختلف مدفون از پیش شناخته شده انجام شد و پاسخ GPR آن‌ها بعد از اعمال توالی‌های پردازشی مختلف، بررسی شد.

این برداشت‌ها با استفاده از یک سیستم GPR ساخت شرکت مالا[1] سوئد مجهز به آنتن‌های پوشش دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز [۲۱] انجام شد. برخی از پارامترهای برداشت مذکور همانند میزان فرکانس مرکزی، بازه آنتنی و وضعیت آنتن به‌دلیل در اختیار داشتن یک نوع دستگاه GPR تک ثابت با آنتن‌های پوشش‌دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، غیرقابل تغییر هستند. مهم ترین پارامترهای برداشت بررسی شده در این پژوهش شامل میزان فاصلهٔ نمونه‌برداری زمانی یا فرکانس نمونه‌برداری، فواصل نمونه‌برداری مکانی

1. MALA

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

(فواصل بین تریسی) و پنجرهٔ زمانی[1] و نیز برخی پارامترهای پردازشی همانند تعداد تریس‌های برانبارش شده[2] هستند.

## ۱. اصول پردازش داده‌های GPR

ازآن‌جاکه داده‌های واقعی GPR اغلب مبهم، ناواضح و آلوده به انواع نوفه‌ها هستند، بنابراین اعمال پردازش‌های مختلف روی داده‌ها ضروری است. پردازش‌هایی که روی داده‌های GPR به‌کار می‌رود، با توجه به هدف بررسی شده و دامنهٔ پردازش‌ها می‌تواند متفاوت باشد. نوع و دامنه پردازش‌هایی کـه برای داده‌های GPR به‌کار می‌رود، به مشخصات منطقهٔ بررسی شده، دستگاه GPR، نرم‌افزارهای به‌کار رفته و هم‌چنین اهداف کلی برداشت، وابسته است [۲۲]. ازاین‌رو، نیازی به استفاده از تمام روش‌های پردازش ذکر شده روی داده‌های مختلف نیست. چه‌بسا در شرایطی اعمال برخی از پردازش‌ها منجر به ایجاد مشکلات ناخواسته روی داده‌ها شود. توالی پردازشی اعمال شده به‌ترتیب شامل تصحیح زمان- صفر، اعمال فیلتر دی‌واو در پنجرهٔ زمانی ٤ نانوثانیه بر تمام تریس‌ها، فیلتر میان‌گذر باترورث[3] با حداقل و حداکثر فرکانس قطع به‌ترتیب ۵۰ و ۳۲۵ مگاهرتز، فیلتر حذف زمینه در سرتاسر پنجرهٔ زمانی و تابع تقویت خودکار با بیشینه تقویت ۱۲۰۰۰ است.

## ۲. مشخصات محدوده برداشت

محدودهٔ برداشت در روبروی خوابگاه دانشجویی برادران (خوابگاه الغدیر) دانشگاه صنعتی اصفهان انتخاب شد. درب اصلی خوابگاه درست در کنار یکی از جاده‌های آسفالته اصلی دانشگاه قرار دارد که یکی از خطوط اصلی لوله انتقال فاضلاب دانشگاه با امتداد شمال- جنوبی در زیر این جاده آسفالته قرار دارد و در مجاورت آن (پارکینگ خاکی مجاور جاده آسفالته) نیز چندین خط لوله مدفون است که مشخصات این خطوط لوله در جدول ۳ خلاصه شده است. لوله فاضلاب فلزی به قطر ١٦ سانتی‌متر صددرصد پر از فاضلاب، لوله متروکه انتقال آب سطحی، توخالی و حجم سیال لوله انتقال گاز فلزی، نامشخص است. نقشه کروکی موقعیت این خطوط لوله نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به‌منظور آشکارسازی

1. Time window
2. Stack numbers
3. Butterworth filter

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

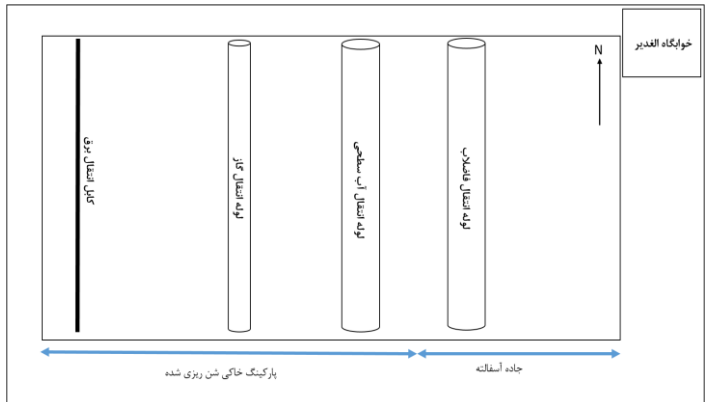
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



اهداف مدفون در این محدوده ۲۱ پروفیل عمود بر امتداد عمومی اهداف و به‌صورت رفت و برگشت به‌طور موازی برداشت شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ٤ خلاصه شده است. محیط دربرگیرنده اهداف مدفون نیز از جنس خاک رس معمولی غیرهمگن است که از نظر پارامترهای فیزیکی دارای گذردهی دی‌الکتریک نسبی بین ٤ تا ٦، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ۱ و هدایت الکتریکی ٤ تا ۷ میلی‌زیمنس بر متر است. میزان سرعت سیر امواج EM در سازندهای آبرفتی دربرگیرندهٔ اهداف استوانه‌ای نیز از طریق مشخصات فیزیکی آن‌ها مانند دانه‌بندی، درصد رطوبت و میزان رس، متغیر بین ۰/۱۵ تا ۰/۱۷ m/ns منظور شد.

**جدول ۳. مشخصات هندسی اهداف مدفون در محدودهٔ برداشت (روبروی خوابگاه الغدیر)**

| مشخصات هندسی / نوع هدف مدفون | جنس | قطر (سانتی‌متر) | عمق دفن (سانتی‌متر) |
|---|---|---|---|
| لوله انتقال فاضلاب | فلزی | ۲۰ | ۲۲۰ |
| لوله انتقال گاز | فلزی | ۱۵ | ۱۲۰ |
| لوله انتقال آب سطحی | فلزی | ۲۰ | ٤ |
| کابل انتقال برق | لاستیکی | ٤ | ۲۰ |




**شکل ۱۰. نقشهٔ کروکی موقعیت خطوط لوله تأسیسات مدفون در محدودهٔ برداشت**

### ۳. بررسی تأثیر پارامترهای برداشت بر داده‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای برداشت در محدودهٔ بررسی شده همهٔ پروفیل‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به‌عنوان نمونه ۲ مورد از آن‌ها بررسی می‌شود:

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

**مشخصات پروفیل اول (Pro1)**

این پروفیل با طولی در حدود ۲۹ متر با امتداد شرقی- غربی از غرب به شرق برداشت شده است که با انتخاب و تنظیم فاصله نمونه‌برداری ۲ سانتی‌متر، تعداد ۱۵٤٤ تریس در طول این پروفیل برداشت شد. هم‌چنین با انتخاب فرکانس نمونه‌برداری ۱۹۵٤ مگاهرتز در طول پنجرهٔ زمانی، تعداد ۱۰٤ نمونه برداشت شده و فاصلهٔ نمونه برداری زمانی ۰/۵۱۲ نانوثانیه است. از آن‌جاکه فرکانس نمونه‌برداری بیش از دو برابر فرکانس نایکوئست انتخاب شده است، بنابراین پدیده دگرنامی فرکانسی رخ نخواهد داد. شکل ۱۱ نگاشت راداری داده‌های خام و پردازش شده پروفیل اول (pro1) بعد از اعمال گام‌های پردازشی لازم به‌وسیلهٔ نرم‌افزار Radexplorer را نشان می‌دهد. در این مقطع به‌خاطر انتخاب مناسب پارامترهای برداشت یعنی فرکانس نمونه‌برداری ۱۹۵۵ MHz و فاصله‌های بین تریسی کم در حدود ۲ سانتی‌متر، پاسخ GPR تمام اهداف مدفون به‌وضوح در نگاشت راداری قابل مشاهده هستند. غربی‌ترین پاسخ هذلولی شکل، مربوط به کابل برق واقع در عمق کم و پاسخ هذلولی شکل واقع در ۱۲ متری طول پروفیل، مربوط به لوله انتقال گاز است. علت مبهم بودن هذلولی پاسخ برای این مورد به جنس محیط میزبان و مواد پوشاننده این لوله از نوع خاک رس معمولی دست‌خورده همراه با ماسه ها و سنگ‌ریزه‌های سطحی مربوط می‌شود. پاسخ هذلولی شکل واقع در ۱۵ متری طول پروفیل مربوط به لوله انتقال آب سطحی است که یک لایه نازک آسفالتی به‌ضخامت ۵ سانتی‌متر روی آن را می‌پوشاند. شرقی‌ترین هذلولی پاسخ نیز مربوط به لوله انتقال فاضلاب است که با وجود عمق دفن نسبتاً زیاد لوله، هذلولی‌های پاسخ درجهٔ وضوح و تفکیک‌پذیری زیادی دارند.

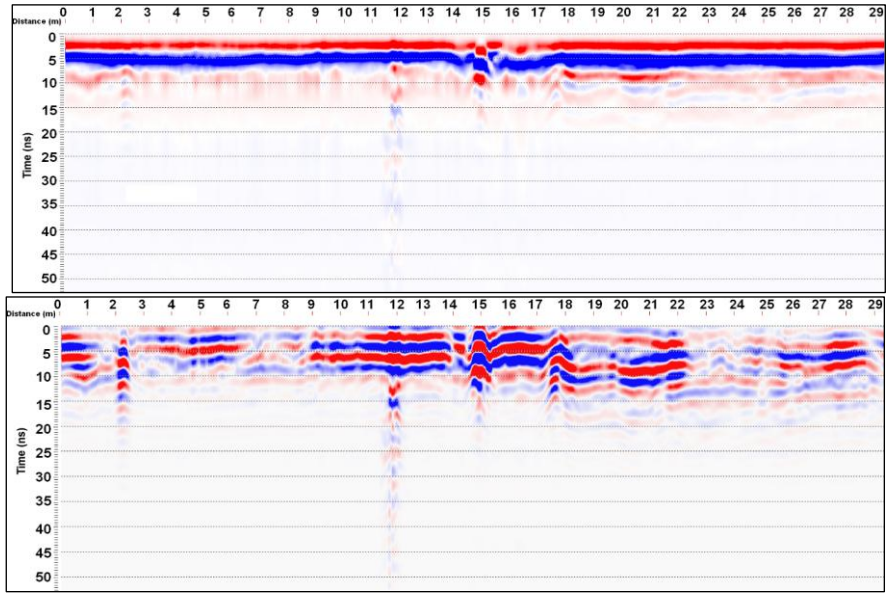
**- مشخصات پروفیل پانزدهم (OMQ1)**

این پروفیل در راستای شرقی- غربی و از غرب به شرق پیمایش شده است. طول پروفیل حدود ۳۰ متر استکه با انتخاب فاصله نمونه‌برداری ۱ سانتی‌متر، تعداد ۳۱٦٤ تریس در طول آن برداشت شده است. هم‌چنین با تنظیم فرکانس نمونه‌برداری ۱۵٦۳ مگاهرتز، تعداد ۷۲ نمونه در طول پنجره زمانی اندازه‌گیری شده که فاصله نمونه‌برداری زمانی ۰/٦۳۹ نانوثانیه است.

**جدول ٤. مشخصات برداشت‌های GPR انجام شده در محدودهٔ برداشت (روبروی خوابگاه الغدیر)**

| پروفیل برداشت | راستای برداشت | فرکانس نمونه برداری (MHz) | فاصله نمونه برداری (m) | پنجره زمانی (ns) (عمق m) | تعداد تریس های برانبارش شده | سرعت موج در محیط (m/ns) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pro1 | غرب به شرق | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۰۲ | ٥۳/۲ | خودکار | ۰/۱٥ |
| Pro2 | شرق به غرب | ۱٥٦۳/۷۸ | ۰/۰۲ | (٥/۲۳) ٦٦/٥ | خودکار | ۰/۱٥ |
| Pro3 | غرب به شرق | ۱۰٤۲ | ۰/۰۲ | (٤/۲۷) ٥۳/۷ | خودکار | ۰/۱٥ |
| Pro4 | شرق به غرب | ٥۰٤ | ۰/۰۲ | ٦۳/٤ (٥) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Pro5 | غرب به شرق | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۰٥ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp1 | شرق به غرب | ۲٦۰٦ | ۰/۱ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp2 | غرب به شرق | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۱ | ٤٥ (۳/٦۲) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp3 | شرق به غرب | ۱٥٦۳/۷۸ | ۰/۱ | ٤٦ (۳/٦۹) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp4 | غرب به شرق | ۱۰٤۲ | ۰/۱ | ٤٦ (۳/٦۹) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp5 | شرق به غرب | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۰۱ | ٤٥ (۳/٦۲) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp6 | شرق به غرب | ۱٥٦۳/۷۸ | ۰/۰٥ | (٤/۰۸) ٥۱/۲ | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp7 | غرب به شرق | ۱۰٤۲ | ۰/۰٥ | ٤٦ (۳/٦۹) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp8 | شرق به غرب | ٥۰٤ | ۰/۰٥ | ٦۳/٤ (٥) | خودکار | ۰/۱٥ |
| Omp9 | غرب به شرق | ۲٦۰٦ | ۰/۰٥ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | خودکار | ۰/۱٥ |
| OMQ1 | غرب به شرق | ۱٥٦۳/۷۸ | ۰/۰۱ | ٤٦ (۳/٦۹) | خودکار | ۰/۱٥ |
| OMQ2 | شرق به غرب | ۱۰٤۲ | ۰/۰۱ | ٤٦ (۳/٦۹) | خودکار | ۰/۱٥ |
| OMQ3 | غرب به شرق | ٥۰٤ | ۰/۰۱ | ٦۳/٤ (٥) | خودکار | ۰/۱٥ |
| OMQ4 | شرق به غرب | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۰۱ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | ۱٦ | ۰/۱٥ |
| OMQ5 | غرب به شرق | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۰۲ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | ۸ | ۰/۱٥ |
| OMQ6 | شرق به غرب | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۰٥ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | ۸ | ۰/۱٥ |
| OMQ7 | غرب به شرق | ۱۹٥٤/۷۳ | ۰/۱ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | ٤ | ۰/۱٥ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]




**شکل ۱۱. الف) نگاشت راداری داده‌های خام، ب) پردازش شده پروفیل اول (Pro1)**

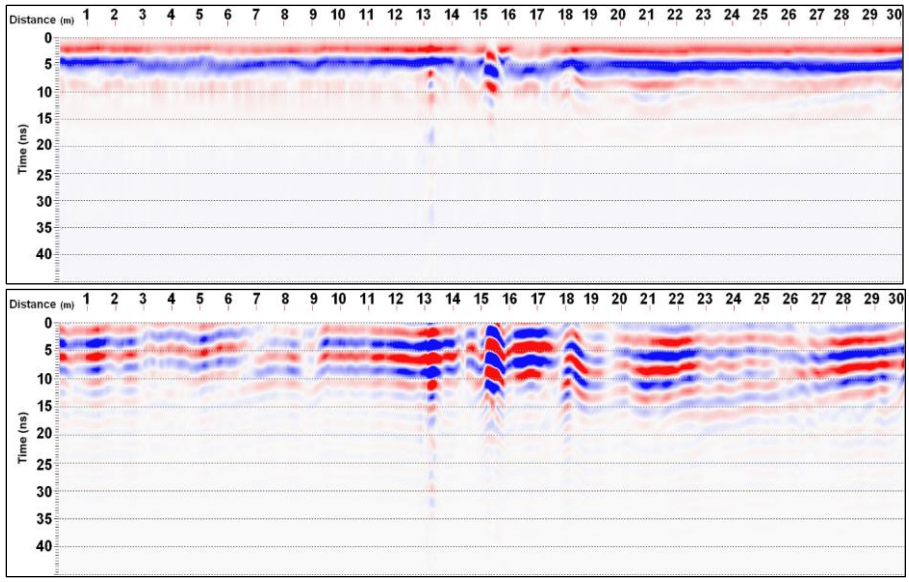
نگاشت راداری داده های خام این پروفیل مطابق شکل ۱۲ الف در فواصل تقریبی ۱۳، ۱۵ و ۱۸ متری بازتاب‌های نسبتاً ضعیفی از خود نشان می‌دهد. چنان‌که در تصویر پردازش شده (شکل ۱۲ ب) مشاهده می‌شود بازتاب اهداف زیرسطحی به‌وضوح و با تفکیک‌پذیری مناسبی قابل شناسایی است. بازتاب‌های دارای شدت بالا در فواصل ۱۳، ۱۵ و ۱۸ متری به‌ترتیب ناشی از لوله انتقال گاز، آب سطحی و لوله انتقال فاضلاب است؛ در فاصله سه متری نیز هذلولی‌هایی با شدت کم‌تر دیده می‌شوند که مربوط به بازتاب کابل برق عبوری در این مکان است.

## بحث و نتیجه‌گیری

موفقیت یا عدم موفقیت آشکارسازی اهداف براساس انتخاب پارامترهای برداشت، در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به داده‌های این جدول ملاحظه می‌شود که تنها در یک حالت، سیستم GPR موفق به آشکارسازی هیچ‌یک از اهداف زیرسطحی نشده و این حالت مربوط به انتخاب فاصله نمونه‌برداری مکانی ۱ سانتی‌متر و فرکانس نمونه‌برداری زمانی ٥٠٤

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

مگاهرتز است. مطابق اطلاعات این جدول مشاهده می‌شود که فرکانس نمونه‌برداری زمانی ۵۰٤ مگاهرتز تنها قادر به آشکارسازی لوله انتقال آب سطحی (به‌خاطر عمق دفن کم آن) است. هم‌چنین فقط در سه حالت، سیستم GPR قادر به آشکارسازی تمام اهداف زیرسطحی شده است که اولین حالت مربوط به فرکانس نمونه‌برداری مکانی ۲ سانتی‌متر و فرکانس نمونه‌برداری زمانی ۱۹۵٤ مگاهرتز بوده است و در دو حالت بعدی، فاصله نمونه‌برداری مکانی، ۱ سانتی‌متر و فرکانس نمونه‌برداری زمانی برابر با ۱۵٦۳ و ۱۹۵٤ مگاهرتز انتخاب شده‌اند. در جداول ٦ و ۷ مقدار کمّی احتمال موفقیت آشکارسازی اهداف زیرسطحی در محدوده برداشت براساس انتخاب به‌ترتیب میزان فرکانس نمونه‌برداری زمانی و مکانی، آورده شده است.




**شکل ۱۲. الف) نگاشت راداری داده‌های خام، ب) پردازش شده پروفیل پانزدهم (OMQ1)**

مقادیر احتمال ارائه شده در این جداول، براساس اطلاعات جدول ۵ محاسبه شده است. برای این منظور نسبت تعداد موارد آشکارسازی اهداف به‌وسیلهٔ یک پارامتر بر کل تعداد موارد برداشت‌های انجام شده با آن پارامتر، تعیین شده و در صد ضرب شده است. مطابق داده‌های این جداول، بیش‌ترین احتمال آشکارسازی اهداف زیرسطحی، مربوط به فرکانس

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

نمونه‌برداری زمانی ۱۹۵٤ مگاهرتز و فاصله نمونه‌برداری مکانی ۱ سانتی‌متر است. میزان احتمال موفقیت آشکارسازی کلی اهداف مختلف در برداشت‌های محدوده، با انتخاب پارامترهای گوناگون، در جدول ۸ خلاصه شده است. مطابق اطلاعات این جدول، کابل انتقال برق از کم‌ترین میزان احتمال آشکارسازی در بین اهداف برخوردار است. آشکار شدن این هدف بیش‌تر تحت تأثیر فاصله نمونه‌برداری مکانی قرار دارد تا فرکانس نمونه‌برداری زمانی؛ و به جز یک مورد (فاصله نمونه‌برداری ۵ سانتی‌متر) تماماً با انتخاب فواصل بین تریسی ۱ و ۲ سانتی‌متری آشکار شده است. این موضوع به قطر کم کابل انتقال برق بازمی‌گردد که مطابق انتظار، این هدف در فواصل بین تریسی زیاد، قابل آشکارسازی نیست. آشکار شدن لوله انتقال گاز بیش‌تر تحت تأثیر محیط دربرگیرنده است زیرا محیط پیرامون، پراتلاف است و بیش‌تر متاثر از فرکانس نمونه‌براری زمانی است تا فرکانس نمونه‌برداری مکانی؛ به‌گونه‌ای‌که این هدف به جز یک مورد (فرکانس نمونه‌برداری زمانی ۱۵٦۳ مگاهرتز) تنها در فرکانس نمونه‌برداری برابر با ۱۹۵٤ مگاهرتز قابل آشکارسازی بوده است. لوله انتقال آب سطحی به جز در یک حالت (فرکانس نمونه‌برداری زمانی ۵۰٤ مگاهرتز) در تمام موارد آشکار شده است.

**جدول ۵. موفقیت یا عدم موفقیت آشکارسازی اهداف زیرسطحی براساس پارامترهای برداشت انتخابی**

| فرکانس نمونه برداری زمانی (MHz) | فاصله نمونه برداری مکانی (cm) | پنجره زمانی (ns) (عمق (m | تعداد تریس های برانبارش شده | آشکارسازی لوله انتقال فاضلاب | آشکارسازی لوله انتقال آب سطحی | آشکارسازی لوله انتقال گاز | آشکارسازی کابل برق |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۹۵٤/۷۳ | ۲ | ۵۳/۲ | خودکار (Auto) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| ۱۵٦۳/۷۸ | ۲ | (۵/۲۳) ٦٦/۵ | خودکار | ✓ | ✓ | × | ✓ |
| ۱۰٤۲ | ۲ | (٤/۲۷) ۵۳/۷ | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |
| ۵۰٤ | ۲ | (۵) ٦۳/٤ | خودکار | × | ✓ | × | × |
| ۱۹۵٤/۷۳ | ۵ | (۳/۹۳) ٤۹/۱ | خودکار | ✓ | ✓ | × | ✓ |
| ۲٦۰٦ | ۱۰ | (۳/۹۳) | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

| فرکانس نمونه برداری زمانی (MHz) | فاصله نمونه برداری مکانی (cm) | پنجره زمانی (ns) (عمق (m | تعداد تریس های برانبارش شده | آشکارسازی لوله انتقال فاضلاب | آشکارسازی لوله انتقال آب سطحی | آشکارسازی لوله انتقال گاز | آشکارسازی کابل برق |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۴۹/۱ | | | | | |
| ۱۹۵۴/۷۳ | ۱۰ | (۳/۶۲) ۴۵ | خودکار | ✓ | ✓ | ✓ | × |
| ۱۵۶۳/۷۸ | ۱۰ | (۳/۶۹) ۴۶ | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |
| ۱۰۴۲ | ۱۰ | (۳/۶۹) ۴۶ | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |
| ۱۹۵۴/۷۳ | ۱ | (۳/۶۲) ۴۵ | خودکار | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| ۱۵۶۳/۷۸ | ۵ | (۴/۰۸) ۵۱/۲ | خودکار | ✓ | ✓ | × | ✓ |
| ۱۰۴۲ | ۵ | (۳/۶۹) ۴۶ | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |
| ۵۰۴ | ۵ | (۵) ۶۳/۴ | خودکار | × | ✓ | × | × |
| ۲۶۰۶ | ۵ | (۳/۹۳) ۴۹/۱ | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |
| ۱۵۶۳/۷۸ | ۱ | (۳/۶۹) ۴۶ | خودکار | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| ۱۰۴۲ | ۱ | (۳/۶۹) ۴۶ | خودکار | ✓ | ✓ | × | × |
| ۵۰۴ | ۱ | (۵) ۶۳/۴ | خودکار | × | × | × | × |
| ۱۹۵۴/۷۳ | ۱ | (۳/۹۳) ۴۹/۱ | ۱۶ | ✓ | ✓ | ✓ | × |
| ۱۹۵۴/۷۳ | ۲ | (۳/۹۳) ۴۹/۱ | ۸ | ✓ | ✓ | × | × |
| ۱۹۵۴/۷۳ | ۵ | (۳/۹۳) ۴۹/۱ | ۸ | ✓ | ✓ | ✓ | × |
| ۱۹۵۴/۷۳ | ۱۰ | (۳/۹۳) ۴۹/۱ | ۴ | ✓ | ✓ | ✓ | × |

ازآن‌جاکه این هدف در محیط کم اتلاف و شناخته شده قرار دارد و عمق دفن آن نسبت به سایر اهداف دیگر، کم‌تر است، بنابراین از بیش‌ترین مقدار احتمال آشکارسازی برخوردار

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

است. لوله انتقال فاضلاب نیز در محیطی کم‌اتلاف قرار داشته و تنها در دو حالت با فرکانس نمونه‌برداری زمانی ۵۰۴ مگاهرتز، آشکار نشده است.

**جدول ٦. مقدار کمّی احتمال موفقیت آشکارسازی اهداف زیرسطحی بر مبنای فرکانس نمونه-برداری زمانی**

| فرکانس نمونه‌برداری زمانی (مگاهرتز) | میزان موفقیت آشکارسازی اهداف |
|---|---|
| ۲۰٦٦ | ٪ ۵۰ |
| ۱۹۵٤ | ٪ ۸۲ |
| ۱۵٦۳ | ٪ ٦۹ |
| ۱۰٤۲ | ٪ ۵۰ |
| ۵۰٤ | ٪ ۱٦ |

**جدول ۷. مقدار کمّی احتمال موفقیت آشکارسازی اهداف زیرسطحی براساس فرکانس نمونه-برداری مکانی**

| فرکانس نمونه‌برداری مکانی (سانتی‌متر) | میزان موفقیت آشکارسازی اهداف |
|---|---|
| ۱۰ | ٪ ٦۰ |
| ۵ | ٪ ۵۸ |
| ۲ | ٪ ٦۰ |
| ۱ | ٪ ٦۵ |

**جدول ۸. احتمال آشکار شدن اهداف مختلف در برداشت‌های انجام شده.**

| نوع هدف زیرسطحی | میزان موفقیت آشکارسازی هدف |
|---|---|
| کابل انتقال برق | ٪ ۲۹ |
| لوله انتقال گاز | ٪ ۳۳ |
| لوله انتقال آب سطحی | ٪ ۹۵ |
| لوله انتقال فاضلاب | ٪ ۸٦ |

در مجموع می‌توان پارامترهای برداشت بهینه برای آشکارسازی هر یک از اهداف مورد نظر با سیستم GPR استفاده شده در پژوهش حاضر را مطابق جدول ۹ خلاصه کرد. بدیهی است که انتخاب پارامترهای برداشت بهینه به اندازه و ابعاد هدف زیرسطحی بستگی دارد.

به‌طورکلی محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های عملی روش GPR درخصوص مسائلی نظیر پژوهش حاضر را می‌توان در دو بخش مدل‌سازی عددی داده‌ها و عملیات برداشت صحرایی خلاصه کـرد. در زمینه مدل‌سازی عددی نیاز بـه تولید پاسخ تعداد زیادی مـدل مصنوعی در

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



**جدول ۹. پارامترهای برداشت بهینه برای اهداف زیرسطحی مدفون**

| نوع هدف زیرسطحی | فاصله نمونه‌برداری مکانی بهینه (سانتی‌متر) | فرکانس نمونه برداری زمانی بهینه (مگاهرتز) |
|---|---|---|
| کابل انتقال برق | ۱ تا ۲ | >۱۰۴۲ |
| لوله انتقال گاز | ۱ تا ۱۰ | ۱۹۵٤ |
| لوله انتقال آب سطحی | ۱ تا ۱۰ | >۵۰٤ |
| لوله انتقال فاضلاب | ۱ تا ۱۰ | >۱۰٤۲ |

فرایند شبیه‌سازی است که این کار بسیار زمان‌بر و خارج از حوصله است. به‌دلیل پیچیدگی‌های ذاتی ویژگی‌های الکتریکی محیط‌های دربرگیرنده اهداف و غیرهمگن بودن آن‌ها، تنوع جنس و ضخامت خاک‌ها و لایه‌های سطحی پوشاننده اهداف و نیز وجود محدودیت‌های گوناگون در تمامی الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای مدل‌سازی، اعمال تمامی شرایط واقعی زمین در مدل، امکان‌پذیر نیست. هم‌چنین انواع نوفه‌ها در مدل واقعی زمین وجود دارد که اعمال تمامی آن‌ها در مدل‌سازی مصنوعی ممکن نیست. در زمینهٔ عملیات برداشت صحرایی داده‌های GPR با توجه به ارتباط بین میزان فرکانس مرکزی سیستم‌های اندازه‌گیری GPR، عمق نفوذ و تفکیک پذیری، و با توجه به تنوع جنس و ترکیبات مختلف محیط‌های دربرگیرندهٔ اهداف و لایه‌های سطحی پوشاننده آن‌ها، نیاز به طیفی از تجهیزات با فرکانس‌های گوناگون است که معمولاً تمامی آن‌ها در اختیار نیستند.

در عمل به‌دلیل پیچیدگی‌های ذاتی ویژگی‌های الکترکی محیط‌های دربرگیرنده اهداف با پارامترهای هندسی مختلف ازجمله اندازه و ابعاد و عمق دفن‌های مختلف، جنس و ضخامت خاک‌ها و لایه‌های سطحی پوشاننده اهداف و نیز حضور انواع نوفه‌ها، ارائه یک مدل ریاضی محاسباتی- تجربی جامع و کامل که برای تمام موارد عملی قابل استفاده باشد، امکان‌پذیر نیست و حتی در صورت وجود چنین روابطی نمی‌توان تنها به آن‌ها اکتفا کرد. چنین روابط ریاضی در صورت وجود به‌عنوان معیارهای اولیه تنظیم پارامترهای برداشت، کمک‌کننده هستند اما برای تمام برداشت‌های عملی جامعیت کاربرد ندارند. ضمناً در مورد برخی از پارامترها همانند تعداد تریس‌های برانبارش شده اصولاً ارائه روابط ریاضی امکان‌پذیر نیست. معمولاً در برداشت‌های GPR برانبارش تریس‌ها به‌منظور حذف نوفه‌های سطحی و در نتیجه

افزایش نسبت سیگنال به نوفه، استفاده می‌شود. تعداد تریس‌های برانبارش شده در یک برداشت GPR به نوع هدف تحت تجسس، پارامترهای برداشت و تنظیمات دستگاه بستگی دارد. در دستگاه‌های برداشت GPR این کار به‌طور دستی به دو صورت خودکار و یا انتخاب عدد مورد نظر کاربر (یک عدد دودویی) تنظیم می‌شود.

درنهایت به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی از پژوهش حاضر، به‌منظور کاهش ریسک در عملیات برداشت داده‌های GPR پارامترهای بهینه برداشت به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود: میزان فرکانس نمونه‌برداری حدود ۷ تا ۸ برابر فرکانس مرکزی سیستم استفاده شده (به‌منظور رعایت احتیاط بیش‌تر و حصول اطمینان از عدم رخداد دگرنامی از یک‌سو نباید کم‌تر از این مقدار باشد و از سوی دیگر به خاطر کاهش حجم داده‌ها و در نتیجه حافظه مورد نیاز برای ذخیره‌سازی و پردازش)، میزان فاصله بین تریسی ۱ سانتی‌متر (به‌منظور آشکارسازی تمام اهداف مدفون از جمله اهداف با اندازه و ابعاد کوچک)، تعداد تریس‌های برانبارش شده برابر با ۱۶ (به‌منظور کاهش حجم حافظه کامپیوتری مورد نیاز برای پردازش و ذخیره‌سازی داده‌ها) و پنجرهٔ زمانی مطابق با رابطهٔ ریاضی محاسباتی-تجربی (۳). نتایج پژوهش حاضر تنها محصور به پژوهش انجام شده نبوده، بلکه در عمل برای موارد با محیط‌های میزبان مشابه به ویژه در نواحی شهری (که استفاده از روش‌های غیرمخرب نظیر GPR ضروری است) قابل استفاده است.

## منابع

1. Huisman J. A., Hubbard S. S., Redman J. D., Annan A. P., "Measuring soil water content with ground- penetrating radar: A review", Vadose Zone Journal Vol. 2 (2003) 476-491.

2. Maijala P., Saarenketo T., Valtanen P., " Correlation of some parameters in GPR measurement data with quality properties of pavements and concrete bridge decks", Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada, Vol. 2 of 3 (1994) 393-406.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



3. Cassidy N. J., "Evaluating LNAPL contamination using GPR and dielectric analysis: Practical implications for signal attenuation and attribute analysis studies", Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 94 No. 1–2 (2007) 49-75.

4. Olhoeft G. R., Capron D. E., "Petrophysical causes of electromagnetic dispersion", in Proc. of the Fifth Int'l. Conf. on Ground Penetrating Radar, Kitchener, Ontario, 12-16 June (1994) 145-152.

5. Annan A. P., Waller W.M., Strangway D. W., Rossiter J. R., Redman, J. D. and Watts R. D., "The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation", Geophysics, Vol. 40, No. 2 (1975) 285-298.

6. Beres M., Huggenberger P., Green A. G., Horstmeyer H., "Using two and three dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. Sedimentary Geology 129 (1999) 1-24.

7. Zeng X., McMechan G. A., "GPR characterization of buried tanks and pipes", GEOPHYSICS, Vol. 62, No. 3, (1997) 797-806.

8. Lutz P., Garambois S., Perroud H., "Influence of antenna configurations for GPR survey: information from polarization and amplitude versus offset measurements", Geological Society, London, Special Publications, 211 (2003) 299-313.

9. Kofman L., Ronen A. and Frydman S., "Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records", Journal of Applied Geophysics 59 (2006) 284-299.

10. Shaari A., Ahmad R. S. and Chew TH., "Effects of antenna-target polarization and target medium dielectric contrast on GPR signal from

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]

non-metal pipes using FDTD simulation", NDT & E International, 43 (2010) 403-8.

11. Słowik M., "Influence of measurement conditions on depth range and resolution of GPR images: The example of lowland valley alluvial fill (the Obra River, Poland) ", Journal of Applied Geophysics, 85 (2012) 1-14.
12. Metwaly M., "Application of GPR technique for subsurface utility mapping: A case study from urban area of Holy Mecca, Saudi Arabia", Measurement 60 (2015) 139-145.
13. Prego F. J., Solla M., Puente I. and Arias P., "Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes", NDT & E International, 91(2017) 22-31.
14. Sadiku M. N. O., "Numerical techniques in electromagnetics. Second edition", Boca Raton London New York Washington (2001) D.C. CRC press.
15. Knödel K., Lange G. and Voigt H. J., "Environmental geology: handbook of field methods and case studies", Google Books Result, 1357 pages, Chapter 4, Geophysics (2007).
16. Annan A. P., "Ground-penetrating radar workshop notes, Sensors and Software Inc", Mississauga, ON, Canada, (2001) 192.
17. Jol H. M., "Ground-Penetrating Radar theory and applications. First edition, Elsevier Science", (2009) 543.
18. Irving J., Knight R., "Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB", J. of Computers & Geosciences, 32 (2006) 1247-1258.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.1.4.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.1.123 ]



19. Bergmann T., Robertsson J. O. A., and Holliger K., "Numerical properties of staggered finite-difference solutions of Maxwell's equations for ground-penetrating radar modeling", Geophysical Research Letters 23, (1996) 45-48.

20. Davis J. L. and Annan A. P., "Ground Penetrating Radar for High-resolution mapping of soil and rock stratigraphy", Geophysical Prospecting, 37 (1989) 531-551.

21. www.malags.com.

22. Reynolds J. M., "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley Press, Chapter 12 (1997) 682-749.