

بررسی و تحلیل امکان آشکارسازی عوارض زیرسطحی از طریق رادار زمین نفوذ بر اساس شبیه سازی امواج الکترومغناطیسی

وحید ملکی^۱، صفا خزائی^{۲*}، کامبیز علی محمدی^۳

۱- دکتری دانشگاه تهران ۲- دانشیار، ۳- مدرس، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۷/۰۲/۰۸، پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۲)

چکیده

در این تحقیق امکان سنجی رادار زمین نفوذ (GPR) برای آشکارسازی و تعیین موقعیت عوارض زیرسطحی در شرایط مختلف بر اساس داده های شبیه سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، عملکرد امواج رادار در آشکارسازی اهداف با جنس های متفاوت، در شرایط محیطی با رسانایی الکتریکی مختلف بررسی شده است. معیار مورد بررسی عملکرد GPR در این مطالعه قدرت تفکیک امواج در استفاده از امواج رادار با فرکانس های مرکزی مختلف است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که انتخاب فرکانس مرکزی در روش GPR تأثیر بسیار زیادی بر اندازه ابعاد هدف در شناسایی با تصویرسازی قابل قبول را دارد و اهداف با اندازه تقریبی قطر کمتر از ۳، ۶، ۱۲، ۲۵ و ۱۲۵ سانتیمتر در آنتن های رادار نفوذی زمین با فرکانس های مرکزی به ترتیب ۲ گیگاهرتز، ۱ گیگاهرتز، ۵۰۰، ۲۵۰ و ۵۰ مگاهرتز قابلیت مشخص شدن را نخواهند داشت. نتایج به دست آمده برای محیطی با سرعت ۰/۱۵ متر بر نانوثانیه (به عنوان مثال آبرفت با دانه بندی متوسط و یا ماسه خشک) صادق است. نتایج حاصل از شبیه سازی شرایط مختلف بر اساس مشخصه های K (گذردهی نسبی)، δ (رسانندگی هر لایه) و D (ضخامت لایه های خاک) نشان می دهد که رسانایی الکتریکی بیشترین تأثیر را نسبت به دیگر پارامترها در نتایج روش GPR را دارد و لایه هایی با رسانایی الکتریکی بیش از کمتر از ۰/۱ اهم- متر به شدت دامنه موج گسیل شده در این روش را تضعیف می کند و امکان نفوذ برای شناسایی هدف را با مشکل مواجه می سازد.

کلیدواژه ها: رادار زمین نفوذ، قدرت تفکیک، گذردهی نسبی، شبیه سازی امواج رادار.

Analysis of Ground Penetrating Radar Method in Detecting Subsurface Targets Based on Simulating Electromagnetic Waves

V. Maleki, S. Khazaei*, K. Alimohammadi

Imam Hussain University

(Received: 28/04/2018; Accepted: 14/10/2018)

Abstract

In this study, the feasibility of using the Ground Penetrating Radar (GPR) method to detect and locate subsurface utilities in various conditions has been investigated. To do this end, the performance of radar waves in detecting different material types in environmental conditions with different electrical conductivity has been studied. The GPR's performance criterion in this study is the resolution of the reflected waves in using radar systems with different central frequencies. The results indicate that the central frequency has a great influence on the size of the target with proper imaging. Moreover, the simulation results show that for central frequencies of 50, 250, 500 MHz, 1 GHz and 2 GHz, targets with sizes 125, 25, 6 and 3 cm cannot be detected, respectively. Estimated results on resolution are related to the radar wave propagation velocity in the media severely. Also, the estimated resolution values are valid for a medium with a wave propagation velocity equal to 0.15 m/ns (For example, alluvium with moderate grains or dry sand). Simulation results on martial type based on relative electromagnetic permittivity (ϵ), sub-layer conductivity (δ) and layers thickness (D), show that the electrical conductivity had a higher effect on the GPR results with respect to the other parameters and layers with an electrical conductivity of less than 0.1 ohm-meter strongly weaken the amplitude of the transmitted wave and made it difficult to identify the target.

Keywords: Ground Penetrating Radar, Resolution, Relative Permittivity, GPR Simulation

۱. مقدمه

امروزه کشف و شناسایی عوارض زیرسطحی به ویژه محل و مسیر تونل های زیرزمینی دفاعی به عنوان یکی از پرکاربردترین و مهم ترین موضوعات مهندسی در عملیات اکتشافی و شناسایی به شمار می آید. شناسایی فضاها، حفره ها و تأسیسات مدفون در زیر زمین از مهم ترین مسائل حوزه مهندسی و دفاعی-نظامی است. امروزه تونل ها و فضاهای زیرزمینی به عنوان سازه های بسیار با اهمیت در همه کشورها برای نگهداری سلاح ها و مهمات جنگی و همچنین مسیرهای پنهانی برای مخفیگاه و عبور نفرات مورد استفاده قرار می گیرد. شناسایی تأسیسات زیرزمینی به عنوان یکی از بااهمیت ترین و پیچیده ترین مسائل نظامی به شمار می آیند.

رادار زمین نفوذ (GPR, Ground Penetrating Radar) از جمله روش های ژئوفیزیک محسوب می شود که سرعت بالا و آسانی انجام برداشت داده ها، پردازش و تفسیر آن موجب به کارگیری گسترده این روش در بسیاری از شاخه های مهندسی از جمله ژئوتکنیک، راه ها، شناسایی، فضاها، زیرزمینی، تأسیسات زیرسطحی و پی جویی های سطحی معدنی شده است. اساس روش GPR بر پایه بازتاب امواج الکترومغناطیسی از مرزهایی است که در آن ها خواص دی الکتریک تغییر می کند. عمق کاوش و میزان تفکیک در این روش نیازمند انتخاب امواج رادار با فرکانس های مرکزی مختلف است که در راستای برآورد نیازهای کاوش سطحی در این روش از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا (در گستره ۱۲/۵ تا ۲/۳ گیگاهرتز) استفاده می گردد.

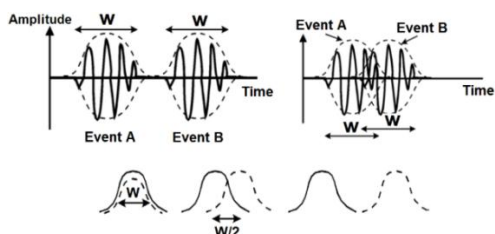
قدرت تفکیک رادار زمین نفوذ از چندین سانتی متر در اعماق سطحی تا چندین متر در اعماق چند ده متری متغیر است [۱] و [۲]. قدرت تفکیک این روش به عوامل مختلفی وابسته است. از جمله این عوامل می توان به اختلاف گذردهی نسبی الکترومغناطیسی بین هدف با محیط میزبان آن، ابعاد هدف، فرکانس مرکزی مورد استفاده اشاره کرد. گستره میزان تفکیک روش GPR بسیار وسیع است به طوری که از ابعاد اهداف چند سانتیمتری تا چند متری در اعماق مختلف می بایست فرکانس مرکزی متناسب را انتخاب نمود. فرکانس مرکزی مورد استفاده معمولاً در قالب یک مجموعه گیرنده و فرستنده که آنتن نام دارد به کار گرفته می شود. وسعت عملکرد روش GPR از لایه بندی های ریز موجود در ساختمان های سطحی مهندسی (آسفالت، بتن و ...) تا فضاهای زیرزمینی در اعماق چند ده متری مورد استفاده قرار می گیرد.

رادار زمین نفوذ از زمانی که در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است همواره با چالش هایی مواجه بوده است. عمده این چالش ها، قدرت تفکیک، عمق نفوذ مفید و میزان

حساسیت به اهداف مختلف بوده است. این پارامترها در میان کاربران و استفاده کنندگان از روش رادار معمولاً ناشناخته است و اطلاعات زیادی پیرامون آن وجود ندارد [۳]. این عدم آگاهی به دلیل وابستگی زیاد سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی به محیط و خاک محل برمی گردد. رسانایی الکتریکی خاک امواج الکترومغناطیسی را تضعیف می کند و در نتیجه عمق نفوذ این امواج در این شرایط به شدت دچار افت می گردد. با وجود اهمیت موضوع باین حال مطالعات اندکی به بررسی کارایی رادار زمین نفوذ در شرایط غیرمعمول رسانایی الکتریکی و میزان میرایی بالای خاک محل پرداخته اند [۱، ۳، ۴، ۵ و ۶]. در این راستا مطالعاتی نظیر سن و همکاران، [۷]، فنگ و سن، [۸] و اولهوفت و کاپرون [۹] بر پایه مدل های آزمایشگاهی به بررسی تأثیر این پارامترها بر امواج رادار پرداخته اند. رادار زمین نفوذ در شاخه های مختلف مهندسی مانند مهندسی عمران راه خود را باز نموده است. در سال های اخیر تعداد زیادی از مطالعات به این شاخه از کاربرد روش رادار پرداخته اند. [۱۰ و ۱۱]. همچنین مطالعات بسیاری در ایران در سال های اخیر انجام گرفته است که با استفاده از رادار زمین نفوذ، ابهامات زمین شناسی و مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است. محمدی ویژه [۱۲] با استفاده از رادار زمین نفوذ به تفسیر و مقایسه این روش با داده های حاصل از روش ژئوالکتریک برای ناحیه ای در شاهرود پرداخته است. حسینی [۱۳] در ادامه مطالعات صورت گرفته در دانشگاه صنعتی شاهرود با مقایسه داده های حاصل از رادار زمین نفوذ با داده های حاصل از مغناطیس سنجی تفسیر زمین شناسی ارائه کرد. با تنوع موجود در کاربرد رادار زمین نفوذ، مزینانی [۱۴] به مطالعه پارامترهای کیفی و کمی روسازی و زیرسازی آسفالت پرداخت. مطالعات رادار نفوذی زمین در حال حاضر در ایران توسط بسیاری از محققین در این حوزه در حال انجام است که از آن جمله می توان به مطالعه اویسی موخر [۱۵] به منظور شناسایی شکستگی ها و کامکار روحانی [۱۶]، به منظور شناسایی حفره ها و برآورد میزان رس در رسوبات اشاره نمود. آشکارسازی زیرسطحی علاوه بر روش های رادار در بررسی های کم عمق با روش های دیگر ژئوفیزیکی نظیر مغناطیس سنجی امکان پذیر بوده و با استفاده از تکنیک های تحلیل عمق نظیر، اویلر می توان به اطلاعاتی در تعیین موقعیت اهداف زیرسطحی دست یافت [۱۷].

علاوه بر شرایط رسانایی محیط، پارامترها و عوامل متعددی می توانند در میزان قدرت تفکیک و عمق مفید نفوذ یک سیستم رادار نفوذی زمین مؤثر باشند که موضوع اصلی این مطالعه است. روش بررسی بر اساس شبیه سازی داده های رادار نفوذی زمین است. در ادامه، در بخش نخست پارامترها و عوامل تأثیرگذار در قدرت تفکیک و نتیجه نهایی رادار زمین نفوذ مورد بحث قرار

آیا می‌توان بیش از یک هدف را در فاصله‌ای نزدیک از هم تشخیص داد و اینکه دو هدف برای اینکه قابل تفکیک باشند باید چه فاصله‌ای از یکدیگر داشته باشند، به قدرت تفکیک دو هدف به وسیله امواج رادار به پهنای باند (W) موجک ارسالی در سیستم GPR مربوط می‌شود [۱۹-۲۱]؛ شکل (۲) این موضوع را نشان می‌دهد. ضریب اتلاف انرژی بر روی سرعت عبور موج الکترومغناطیسی از مواد و مصالح مختلف اثر می‌گذارد. به این ترتیب رابطه (۲) می‌تواند معرف قدرت تفکیک یک موج رادار با فرکانس مرکزی f_c و سرعت V باشد. در شکل (۲)، W (پهنای پالس) معادل نصف طول موج (λ) است. به این ترتیب مقدار قدرت تفکیک امواج رادار را می‌توان معادل یک‌چهارم مقدار طول موج (λ) در نظر گرفت.



شکل ۲. تأثیر پهنای پالس امواج رادار بر قابلیت تفکیک دو هدف زیرسطحی در رادار زمین نفوذ [۱۸].

نتایج تجربی حاصل از آزمایش رادار نفوذی زمین برای آنتن‌های با فرکانس مرکزی مختلف در مطالعات مختلف به دست آمده است. نتایج این تحقیقات به صورت جدول در جدول (۱) آورده شده است [۱۸]. عمق نفوذ در امواج رادار به دو عامل فرکانس مرکزی رادار و ضریب اتلاف انرژی مصالح زیرسطحی وابسته است. ضریب اتلاف انرژی با رسانندگی مواد و مصالح رابطه مستقیم دارد [۱۴]. میزان اتلاف انرژی امواج رادار به شدت وابسته به فرکانس مرکزی سیستم رادار است. [۲۲]، به صورت کیفی نشان داد که چگونه افزایش فرکانس می‌تواند موجب افزایش میرایی امواج رادار گردد.

جدول ۱. مقادیر میزان تفکیک، پهنای پالس و پهنای باند فرکانسی نسبت به عمق هدف. [۱۸]

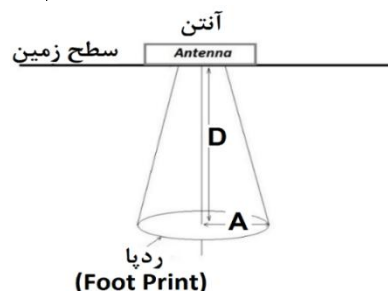
عمق بیشینه (متر)	میزان تفکیک (متر)	پهنای پوش گروه موج رادار (نانوثانیه)	پهنای باند فرکانسی موردنیاز (مگاهرتز)
۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۲	۵۰۰۰۰
۱	۰/۰۱	۰/۲	۵۰۰۰
۱۰	۰/۱	۲	۵۰۰
۱۰۰	۱	۲۰	۵۰

می‌گیرند. سپس پارامترها و عوامل مذکور از طریق بررسی پاسخ رادار در شرایط مختلف با کمک شبیه‌سازی شکل موج به صورت یک بعدی و مقطع عرضی به صورت دوبعدی تحلیل می‌گردند. در بخش پایانی این بررسی، جمع‌بندی نهایی از مطالعات به همراه نتیجه نهایی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲. روش تحقیق

در GPR تعیین قدرت تفکیک امواج رادار از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. قدرت تفکیک در واقع تعیین‌کننده میزان سطح تشخیص هدف زیرسطحی مورد نظر است. انتشار انرژی از آنتن فرستنده به شکل یک مخروط بیضی است. به سطح مقطع این مخروط که به شکل بیضی است (شکل ۱)، ردپا^۱ گفته می‌شود. شعاع بزرگ‌تر بیضی ردپا با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. نکته حائز اهمیت در این رابطه تأثیر عمق هدف بر روی قدرت تفکیک است [۱۸].

$$A = \frac{\lambda_c}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$



شکل ۱. اثر (رد پای) یک موج رادار که قدرت تفکیک امواج رادار را مشخص می‌کند [۱۸]

در رابطه (۱)، A معرف قطر بیضی اثر موج رادار، D عمق هدف، ϵ_r معرف ضریب گذردهی موج الکترومغناطیسی و λ_c طول موج پالس است که از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد [۳].

$$\lambda_c = \frac{V}{f_c} \quad (2)$$

در رابطه بالا، λ_c طول موج موجک گسیل شده رادار، V سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط و f_c فرکانس مرکزی سیستم مورد استفاده است.

قدرت تفکیک در روش GPR دارای اهمیت زیادی است. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌گردد که اهداف مورد نظر در فاصله‌ای نزدیک نسبت به هم قرار داشته باشند. این موضوع که

^۱ Foot Print

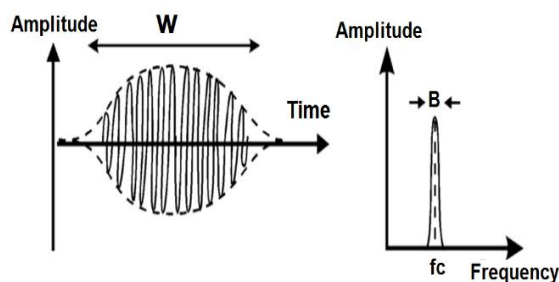
در رابطه (۳)، f_{\min} و f_{\max} به ترتیب فرکانس های بیشینه و کمینه در طیف فرکانس سیگنال رادار هستند. این رابطه بدون نیاز به آگاهی داشتن از فرکانس مرکزی سیستم رادار، محاسبه نسبت پهنای باند فرکانسی به فرکانس مرکزی را ممکن می سازد. یکی از سؤالات مهم در استفاده از رادار زمین نفوذ پیرامون عمق مفید نفوذ امواج رادار در مصالح مختلف و فرکانس های مرکزی در سامانه های مختلف GPR است. پاسخ به این سؤال که آیا هدف موردنظر در گستره عمقی نفوذ امواج رادار قرار دارد یا نه نیازمند آگاهی از ضریب میرایی در خاک محل است که در خود هدف موردنظر را نهفته دارد. از معمول ترین راه های برآورد عمق مفید نفوذ با استفاده از روش های شبیه سازی و یا استفاده از معادله تعیین محدوده نفوذی رادار است. در این مطالعه با استفاده از شبیه سازی شکل موج رادار در محیط های مختلف به بررسی عوامل مؤثر بر عمق نفوذ مفید پرداخته می شود. مطالعات انجام شده در این حوزه پیشنهاد می کنند اگر هدف در عمقی بیش از ۵۰٪ از عمق مفید بهینه قرار داشته باشد آن هدف در امواج رادار قابلیت تشخیص ندارد [۲۲].

۳. نتایج و بحث

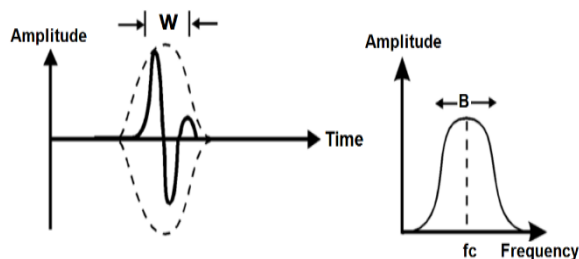
در این مطالعه شرایط مختلف زیرسطحی و پاسخ های دریافت شده از آن ها مورد بررسی قرار می گیرد. به این منظور با استفاده از شبیه سازی شکل موج الکترومغناطیسی در شرایط مختلف عملکرد رادار زمین نفوذ مورد بررسی قرار می گیرد. شبیه سازی صورت گرفته در این مطالعه بر اساس مدل های یک بعدی و دوبعدی است. در بخش نخست شبیه سازی که بر اساس مدل های یک بعدی صورت گرفته است تنها پالس های پاسخ یک موج الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم شبیه سازی داده های دوبعدی GPR به صورت مقطع عرضی شبیه سازی شده است.

شبیه سازی صورت گرفته بر اساس یک تک موجک و سه مشخصه K (گذردهی نسبی)، δ (رسانندگی هر لایه) و D (ضخامت لایه های خاک). جدول (۲) مشخصات برخی از مواد را نشان می دهد [۲۲]. K ثابت دی الکتریک (گذردهی نسبی) است و با رابطه $(K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0})$ مشخص می شود که ϵ_0 ثابت گذردهی خلأ و مقدار آن $10^{-12} \times 8.85$ F/N است. شرایط مختلفی شامل عمق قرارگیری هدف، جنس هدف، لایه بندی خاک و رسانایی هر لایه و همچنین فرکانس مرکزی سیستم GPR بر اساس مقادیر پیشنهادی در جدول (۲) صورت گرفته است.

گسترده بودن پهنای باند فرکانسی در حوزه زمان موجب کوتاه شدن طول موج و در نتیجه افزایش قدرت تفکیک هدف موردنظر را می گردد. شکل (۳) نشان می دهد که موج رادار با محتوای فرکانسی کم در حوزه زمان یک پالس با دوره زمانی بلند که شامل اعوجاجات زیاد است هستند. اعوجاج در سیگنال به شدت قدرت تفکیک را تحت تأثیر قرار می دهد [۲۳].



شکل ۳. پهنای باند فرکانسی و پهنای پالس امواج رادار. یک سیگنال با پهنای باند فرکانسی محدود و پهنای پالس زمانی بزرگ که مقدار قدرت تفکیک را به شدت کاهش می دهد. [۲۲]

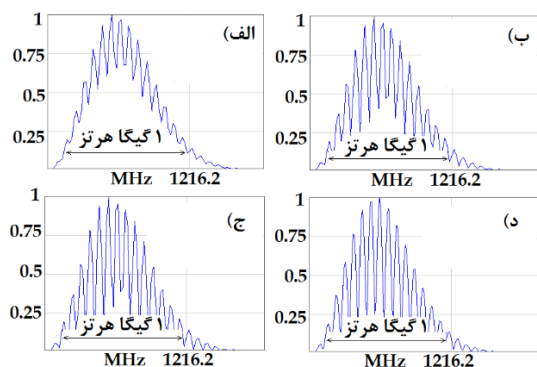


شکل ۴. پهنای باند فرکانسی و پهنای پالس امواج رادار یک سیگنال رادار با پهنای باند فرکانسی گسترده که نتیجه آن پهنای پالس کوتاه در حوزه زمان و افزایش قدرت تفکیک بالاتر است [۲۲].

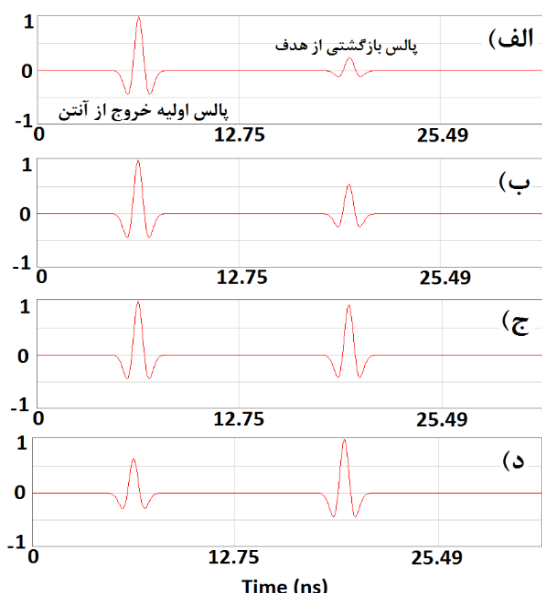
ایده آل ترین شکل سیگنال، یک پالس سینوسی با یک سیکل در حوزه زمان است. این شکل سیگنال دارای محتوای فرکانسی بسیار بالا است. شکل (۴) چگونگی این مطلب را نشان می دهد. در این حالت پهنای باند فرکانس (B) با مقدار فرکانس مرکزی (f_c) مساوی است. نسبت باند فرکانسی به فرکانس مرکزی را با R نشان می دهند. $(R = \frac{B}{f_c})$. در رادار زمین نفوذ در جهت دست یابی به سیگنال و داده مناسب تلاش ها به سمت افزایش مقدار R است. به این منظور همواره سعی می گردد باند فرکانسی تا حد ممکن بیشینه گردد و فرکانس مرکزی به منظور غلبه بر ماهیت ذاتی میرایی برای فرکانس های بالا، حد امکان کمینه شود [۲۴]. مقدار R با توجه به بیشینه و کمینه مقدار فرکانس در سیگنال امواج رادار به صورت کلی با رابطه زیر نشان داده می شود:

$$R = 2 \frac{f_{\max} + f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (3)$$

رادار از آنتن است.



شکل ۵. مقایسه طیف فوریه و پهنای باند امواج رادار در یک محیط تک لایه با قرارگیری هدف با گذردهی نسبی الکترومغناطیسی هدف به ترتیب الف) ۶، ب) ۱۰، ج) ۲۰ و د) ۸۰. برای یک آنتن رادار با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز.



شکل ۶. پاسخ دریافتی امواج رادار در یک محیط تک لایه با قرارگیری هدف با گذردهی نسبی الکترومغناطیسی هدف به ترتیب الف) ۶، ب) ۱۰، ج) ۲۰ و د) ۸۰ برای یک آنتن رادار با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز.

در مدل سازی دوم، تأثیر جنس و شرایط محیط میزبان که هدف در آن قرار دارد مورد بررسی قرار گرفته شده است. جنس خاک محل (میزبان) می تواند دربرگیرنده مشخصه های مختلفی باشد. در آزمایش رادار نفوذی زمین مشخصه مقاومت الکتریکی بیشتر مورد توجه قرار می گیرد و به همین دلیل جنس محیط در این بررسی با پارامتر مقاومت الکتریکی مشخص شده است. در این بخش از مدل سازی، ۴ محیط متفاوت از نظر رسانایی (مقاومت الکتریکی) شبیه سازی شده است. ۴ نوع مصالح مختلف با مقاومت الکتریکی بالا، متوسط، پایین و بسیار کم به ترتیب با مقادیر ۲۰۰، ۲۰، ۱۰ و ۲ اهم متر مشخص شده اند. شکل (۷)، نتایج

جدول ۲. جدول مشخصات مواد مختلف. ثابت گذردهی الکترومغناطیسی، میرایی، رسانندگی الکتریکی، سرعت امواج الکترومغناطیسی و میزان میرایی [۲۲].

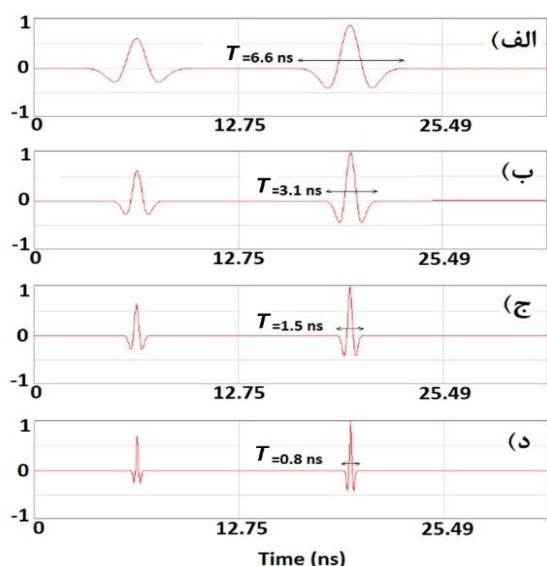
نام ماده	ثابت گذردهی (پسیلون)	رسانندگی الکتریکی (زیمنس بر متر)	سرعت (متر بر ثانیه)	میرایی (دسیبل بر متر)	مقاومت الکتریکی (اهم متر)
هوا	۱	۰	۰/۳	۰	∞
آب شیرین	۸۰	۰/۵	۰/۰۳۳	۰/۱	۲
آب دریا	۸۰	۳۰۰۰	۰/۰۱	۱۰۳	۰/۰۰۳۳
ماسه خشک	۳-۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۱۰۰
ماسه اشباع	۲۰-۳۰	۰/۱-۱	۰/۰۶	-۰/۳	۱۰
لایمستون	۴-۸	۰/۵-۲	۰/۱۲	۰/۴-۱/۰	۰/۵-۲
شیل	۵-۱۵	۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰	۰/۰۱-۱
سیلت	۵-۲۰	۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰	۰/۰۱-۲
رس	۵-۴۰	۲-۱۰۰۰	۰/۰۶	۱-۳۰۰	۰/۰۰۱-۰/۱۵

۳-۱. شبیه سازی بر اساس مدل یک بعدی

اولین بخش شبیه سازی به تأثیر جنس هدف در رادار زمین نفوذ می پردازد. شرایط محیطی و فرکانس مرکزی هر آزمایش در راهنمای شکل های (۵) و (۶) آورده شده است. محیط در نظر گرفته شده، با مقاومت الکتریکی ۱۰۰ اهم متر شبیه به شرایط یک آبرفت با دانه بندی متوسط و گذردهی نسبی محیط برابر ۴ در نظر گرفته شده است که بر اساس جدول (۲) می تواند به ماسه خشک نسبت داده شود. هدف مدل سازی شده در عمق ۱ متری از سطح زمین قرار دارد و فرکانس مرکزی آنتن رادار ۵۰۰ مگاهرتز در نظر گرفته شده است. ۴ مقدار مختلف گذردهی برای هدف در نظر گرفته شده است که می تواند معرف ۴ جنس مختلف باشد. مقادیر گذردهی نسبی هدف، ۶، ۱۰، ۲۰ و ۸۰ در نظر گرفته شده است. به منظور مشاهده جزئیات آزمایش ها، نتایج به دست آمده، در دو حوزه زمان و فرکانس ارائه شده است. شکل (۵)، طیف فوریه حاصل از ۴ مدل با اهداف با گذردهی نسبی متفاوت را نشان می دهد. مقاومت الکتریکی محیط میزبان ۱۰۰ اهم متر در نظر گرفته شده است. هدف در عمق یک متری از سطح زمین قرار دارد. پهنای باند فرکانسی (B) تقریباً معادل یک گیگاهرتز برآورد شده است.

در شکل (۶)، پاسخ موج رادار در شرایط ذکر شده و با اهداف با گذردهی الکترومغناطیسی نسبی متفاوت آورده شده است. مقاومت الکتریکی محیط میزبان ۱۰۰ اهم متر در نظر گرفته شده است. هدف در عمق یک متری از سطح زمین قرار دارد. موج بازتاب شده از سطح هدف با افزایش مقدار گذردهی نسبی دارای دامنه بیشتری است و قابلیت تشخیص آن در روش رادار بالاتر است. رکوردهای حاصل شده در حوزه زمان هستند. در شکل (۶)، دو پالس برای هر رکورد ثبت شده است و این در حالی است که تنها یک هدف شبیه سازی شده است. پالس اول در هر رکورد رادار نفوذی زمین حاصل از نخستین انعکاس اولیه خروج موج

بخش سوم مدل سازی انجام شده به بررسی قدرت تفکیک روش رادار در استفاده از آنتن هایی با فرکانس مرکزی مختلف شامل، ۲۵۰ و ۵۰۰ مگاهرتز و ۱ و ۲ گیگاهرتز می پردازد. با توجه به تغییر پهنای باند فرکانسی و پهنای پالس زمانی در سامانه های رادار با فرکانس مرکزی های مختلف قدرت تفکیک نیز به واسطه همین تغییرات دستخوش تغییر خواهد گردید. در این بخش با در نظر گرفتن شرایط معمول برای یک آپرف با دانه بندی متوسط شامل، مقاومت الکتریکی ۱۰۰ اهم، متر، گذردهی نسبی ۴ برای محیط میزبان، گذردهی نسبی برای هدف معادل ۸۰ و یک هدف در عمق ۱ متری از سطح زمین شبیه سازی صورت گرفته است. قدرت تفکیک محاسبه شده برای یک محیط میزبان با سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است و میزان قدرت تفکیک معادل یک چهارم طول دوره زمانی موج در نظر گرفته شده است (شکل ۹).

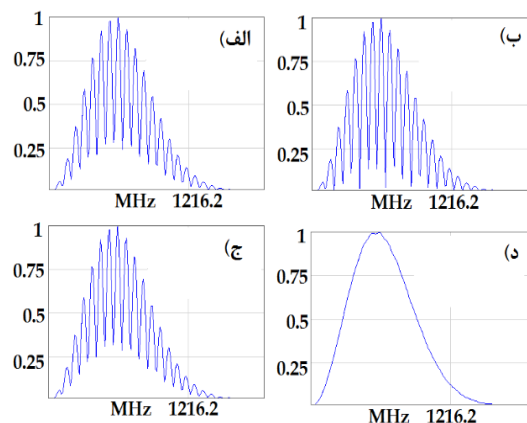


شکل ۹. پاسخ دریافتی امواج رادار در یک محیط تک لایه با قرارگیری هدف با گذردهی نسبی الکترومغناطیسی ثابت، مقاومت الکتریکی ثابت ۱۰۰ اهم، متر برای محیط و آنتن رادار با فرکانس های مرکزی مختلف، (الف) ۲۵۰، (ب) ۵۰۰، (ج) ۱۰۰۰ و (د) ۲۰۰۰ مگاهرتز. گذردهی نسبی هدف و محیط در هر ۴ آزمایش ثابت در نظر گرفته شده است. هدف در عمق یک متری از سطح زمین قرار دارد. پهنای پالس زمانی یک امواج رادار با افزایش فرکانس مرکزی کاهش می یابد.

۳-۲. شبیه سازی بر اساس مدل دوبعدی (مقطع عرضی مصنوعی GPR)

شبیه سازی دوبعدی این امکان را می دهد که پاسخ بازتاب امواج رادار بر روی یک مقطع عرضی از اهداف در عمق مشخص گردد. این نوع شبیه سازی نسبت به روش یک بعدی شباهت بسیار بیشتری به داده های واقعی رادار نفوذی زمین دارد. در این روش می توان مشخصات الکترومغناطیسی محیط دربرگیرنده اهداف و

حاصل در حوزه فرکانس را نشان می دهد. گذردهی نسبی محیط به صورت ثابت، ۴ در نظر گرفته شده است. در این بخش از شبیه سازی نیز مانند بخش اول شبیه سازی فرکانس مرکزی سیستم رادار ۵۰۰، گذردهی نسبی هدف ۸۰ و عمق قرارگیری هدف ۱ متر در نظر گرفته شده است و پهنای باند فرکانسی (B) تقریباً معادل یک گیگاهرتز برآورد شده است. نتایج به دست آمده از امواج بازتاب شده از سطح هدف در شکل (۸) آورده شده است. دامنه موج الکترومغناطیسی بازتاب شده برای هر محیط با مقاومت الکتریکی مختلف در شکل ها نشان داده شده است. هدف در عمق یک متری از سطح زمین قرار دارد. موج بازتاب شده از سطح هدف با کاهش مقدار مقاومت الکتریکی محیط دارای دامنه کمتری شده و قابلیت تشخیص آن در روش رادار کمتر می شود.



شکل ۷. مقایسه طیف فوری و پهنای باند امواج رادار در یک محیط تک لایه با قرارگیری هدف با مقاومت الکتریکی محیط به ترتیب الف) ۲، ب) ۱۰، ج) ۲۰ و د) ۲۰۰ اهم، متر برای یک آنتن رادار با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز.



شکل ۸. پاسخ دریافتی امواج رادار در یک محیط تک لایه با قرارگیری هدف با گذردهی نسبی الکترومغناطیسی ثابت برای یک آنتن رادار با فرکانس مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز و مقاومت الکتریکی محیط میزبان برای ۴ مدل شبیه سازی به ترتیب الف) ۲۰۰، ب) ۲۰، ج) ۱۰ و د) ۲ اهم، متر در نظر گرفته شده است.

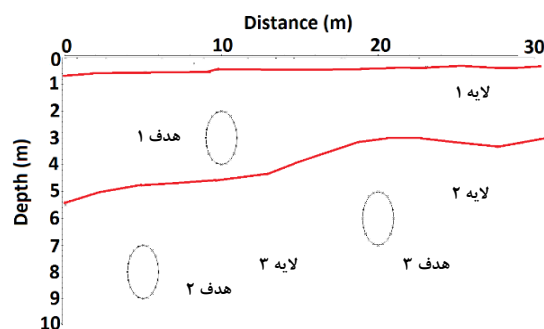
در مورد بررسی شماره یک، توالی لایه‌بندی به صورتی در نظر گرفته شده است که رسانایی خاک (معکوس مقاومت ویژه الکتریکی) پایین و خاک از این نظر شرایط نسبتاً مطلوب برای نفوذ امواج رادار را داشته باشد؛ اما لایه سوم که ضخامت آن بیشتر از لایه‌های بالایی است و دو هدف شماره دو و سه در آن قرار می‌گیرند با مقدار میرایی دو برابر نسبت به لایه‌های بالایی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که هدف شماره یک با قدرت تفکیک بسیار بالا مشخص گردیده است. حال آنکه دو هدف دیگر که در لایه با میرایی زیاد قرار گرفته‌اند ثبت نگردیده‌اند. در شکل (۱۱) نتایج حاصل از این بررسی آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات لایه‌ها و اهداف شبیه‌سازی شده در شبیه‌سازی دوبعدی امواج رادار نفوذی زمین. شامل مقاومت الکتریکی، پارامتر میرایی، ثابت گذردهی الکترومغناطیسی و میزان رسانندگی.

مقاومت الکتریکی (اهم‌متر)	رسانایی الکتریکی (زیمنس بر متر)	میرایی (دسیبل بر متر)	ثابت گذردهی (پسیلون)	مشخصات	شماره لایه
۱۰۰	۰/۰۱	۱	۱۰	آبرفت- سیلت	لایه شماره ۱
۱۰۰۰	۰/۰۰۱	۱	۶	شن-ماسه	لایه شماره ۲
۱۰۰	۰/۰۱	۲	۲۰	ماسه-رس	لایه شماره ۳
۱۰۰	۰/۰۱	۱	۱۰	آبرفت- سیلت	لایه شماره ۱
۱۰۰۰	۰/۰۰۱	۱	۶	شن-ماسه	لایه شماره ۲
۱۰۰	۰/۰۱	۱	۶	ماسه-سیلت	لایه شماره ۳
۱۰۰	۰/۰۱	۱	۱۰	آبرفت- سیلت	لایه شماره ۱
۱۰۰	۰/۰۱	۲	۱۰	سیلت	لایه شماره ۲
۲	۰/۰۵	۴	۲۰	رس	لایه شماره ۳
۱۰۰	۰/۰۱	۱	۱۰	آبرفت- سیلت	لایه شماره ۱
۲۰۰	۰/۰۰۵	۱	۱۰	آبرفت-شن	لایه شماره ۲
۱۰	۰/۱	۲	۲۰	رس	لایه شماره ۳
۰/۰۰۳۳	۳۰۰	۱۰	۸۰	حفره اشباع	حفره شماره ۱
۰/۰۰۳۳	۳۰۰	۱۰	۸۰	حفره اشباع	حفره شماره ۲
بی‌نهایت	۰	۰	۱	حفره خشک	حفره شماره ۳

در مورد بررسی شماره دو، توالی لایه‌بندی مشابه مورد بررسی یک در نظر گرفته شده است با این تفاوت که مقدار میرایی در لایه سوم ۱ در نظر گرفته شده است. در این حالت اهداف شماره ۲ و ۳ به خوبی آشکارسازی شده‌اند. شکل (۱۲) نتایج حاصل شده از بررسی این حالت را نشان می‌دهد.

لایه‌های مختلف زیرسطحی را شبیه‌سازی کرد. جنس اهداف نیز با توجه به اطلاعات کافی از مشخصه الکترومغناطیسی مصالح مختلف قابل شبیه‌سازی است. روش‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی یک موج الکترومغناطیسی وجود دارد. پالس شبیه‌سازی شده معمولاً بر اساس موجک‌های، Ricker، Sine و Kuepper است. در این مطالعه از موجک Kuepper استفاده شده است. موجک Kuepper حاصل خودهمبستگی^۱ یک سیگنال خطی سوپ است. در این روش سوپ شبیه‌سازی شده شامل یک بازه فرکانسی گسترده است که انتخاب کمینه و بیشینه مقادیر فرکانسی در آن به فرکانس مرکزی آنتن رادار نفوذی زمین دارد. بر اساس بازه فرکانسی سوپ مورد نظر جهت شبیه‌سازی داده‌های رادار سایر پارامترهای امواج رادار انتخاب می‌شوند. مهم‌ترین پارامترها پس از فرکانس مرکزی، شامل فاصله نمونه‌برداری مکانی (DeltaX)، فاصله نمونه‌برداری زمانی (DeltaT) و طول زمانی رکورد^۲ هستند که متناسب با فرکانس مرکزی و گستره فرکانسی سوپ Kuepper انتخاب می‌شوند. به منظور شبیه‌سازی دوبعدی، وجود سه حفره در اعماق مختلف شبیه‌سازی شده است. دو عدد از حفره‌ها به صورت اشباع از آب و حفره دیگر به صورت خشک و فضای زیرزمینی شبیه‌سازی شده‌اند. شکل (۱۰) اهداف شبیه‌سازی شده در یک محیط سه لایه‌ای را نشان می‌دهد. مدل فرضی از سه لایه مختلف تشکیل شده است. لایه اول سیلتی با ضخامت نیم متر، لایه دوم ماسه‌ای خشک با ضخامت متغیر تا عمق ۵ متر و لایه سوم لایه سیلتی تا عمق ۱۰ متر شبیه‌سازی شده است. سه حفره به شکل بیضی با ابعاد یکسان مشخص شده است. بیضی‌های شماره ۱ و ۲ به صورت حفره‌های اشباع از آب و حفره شماره ۳ خالی (هوا) شبیه‌سازی شده است. مشخصات لایه‌بندی و اهداف برای حالت‌های مختلف در جدول (۳) آورده شده‌اند. مشخصات لایه‌ها و حفرات شبیه‌سازی شده در جدول (۳) آورده شده است. حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات لایه‌بندی مدل پیش فرض در جدول (۳) ارائه گردیده است. در همه حالات آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰ مگاهرتز در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰. مدل فرضی به منظور شبیه‌سازی داده‌های رادار زمین نفوذ.

^۱ Auto Correlation

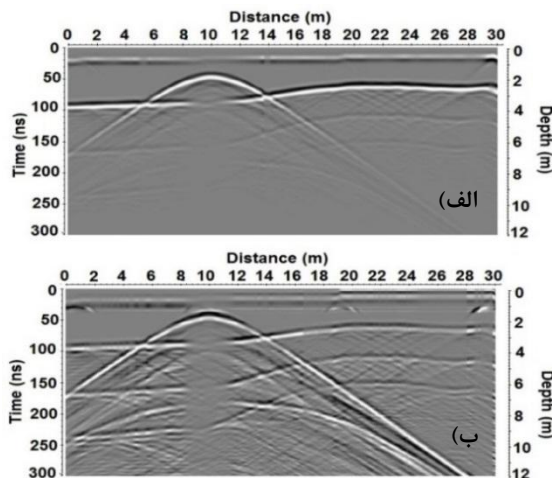
^۲ Time Duration

(بخش های الف و ب)، تفاوت پالس های دریافتی از دو حفره خشک و اشباع به وضوح مشخص است. بازتاب از حفره اشباع با وجود قرارگیری حفره در عمق بیشتر با شدت دامنه بیشتری ثبت شده است.

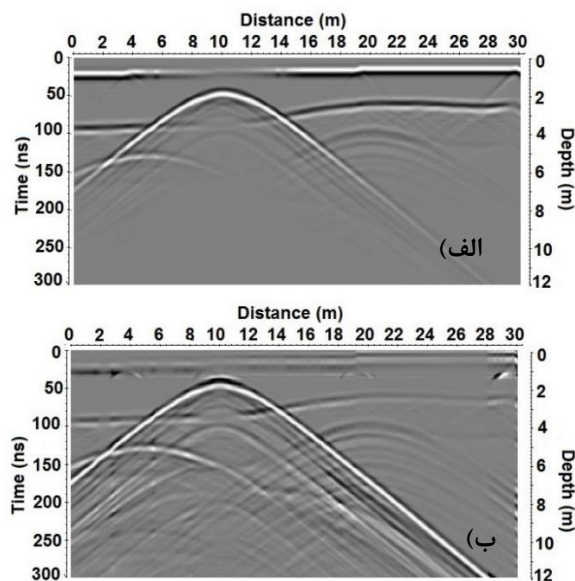
نتایج شبیه سازی نشان داده است که آشکارسازی حفره اشباع (یا اهدافی که دارای مقادیر گذردهی الکترومغناطیسی بالا هستند) محتمل تر و با میزان تفکیک بالاتر است. در مورد بررسی شماره دو، لایه اول به ضخامت نیم متر مشابه موارد بررسی یک و دو در نظر گرفته شده است. در این حالت دو لایه دیگر با میرایی ۲ و ۴ و مقاومت ۱۰۰ و ۲ اهم متر در نظر گرفته شده است. لایه سوم که دو هدف شماره ۲ و ۳ در آن قرار گرفته است لایه ای با میرایی زیاد و مقاومت الکتریکی پایین لحاظ شده است. در این حالت علاوه بر عدم دریافت پالس از اهداف ۲ و ۳، در اثر میرایی زیاد لایه سوم اثرات رینگی حاصل از لایه دوم نیز مشاهده نمی شود (شکل ۱۳). بررسی چهارم حالتی تقریباً مشابه با مورد بررسی شماره سه است. در این بررسی مقاومت ویژه لایه وسط بیشتر شده و میزان میرایی آن کاهش یافته است. پالس پاسخ از هدف شماره یک، یک هذلولی با پال های تنگ تر نسبت به موارد بررسی دیگر ثبت شده است که به دلیل افزایش مقاومت ویژه محیط و تأثیر آن بر افزایش سرعت امواج الکترومغناطیسی رادار است (شکل ۱۴).

در نخستین مدل سازی یک بعدی صورت گرفته که به بررسی تأثیر جنس هدف در رادار زمین نفوذ می پردازد، پهنای باند فرکانسی برای هر چهار هدف مورد آزمایش به صورت یکسان و به مقدار دو برابر فرکانس مرکزی سیستم است حال آنکه محتوای فرکانسی با افزایش مقدار گذردهی نسبی افزایش یافته است. با توجه به نتیجه حاصل شده، دامنه پالس پاسخ بازگشتی از هدف با افزایش مقدار گذردهی نسبی مغناطیسی افزایش می یابد و قابلیت تشخیص آن نیز بالاتر می رود. در مدل سازی دوم یک بعدی، نمودارهای حاصل از هر شبیه سازی نشان می دهند که محتوای فرکانسی با افزایش رسانندگی الکتریکی (کاهش مقاومت الکتریکی) به شدت کاهش می یابد. در محیط با مقاومت ۲ اهم متر پاسخی از هدف مورد نظر دریافت نشده است و محتوای فرکانسی به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است. همچنین نتایج حاصل در حوزه زمان نیز گویای اثر میرا کننده رسانایی خاک بر روی امواج رادار است.

در شکل (۸)، نتایج حاصل از این شبیه سازی نشان داده شده است. با توجه به تاریخچه زمانی امواج رادار، با افزایش رسانندگی خاک محل دامنه موج دریافتی از هدف کمتر شده و با رسیدن مقاومت الکتریکی به مقدار ۲ اهم متر، هیچ پاسخی از هدف واقع در عمق ۱ متری دریافت نمی گردد. در مدل سازی سوم یک بعدی، نتایج به دست آمده در حوزه فرکانس نیز به تصویر



شکل ۱۱. مقطع عرضی شبیه سازی شده رادار نفوذی زمین بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، بررسی شماره ۱ و برای یک آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰ مگاهرتز. الف) مقطع خام داده های شبیه سازی شده رادار نفوذی زمین. ب) مقطع پردازش اولیه، شامل حذف نوفه زمینه بهره دهی.



شکل ۱۲. مقطع عرضی شبیه سازی شده رادار نفوذی زمین بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، بررسی شماره ۲ و برای یک آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰ مگاهرتز. الف) مقطع خام داده های شبیه سازی شده رادار نفوذی زمین. ب) مقطع پردازش اولیه، شامل حذف نوفه زمینه بهره دهی. سه هدف مورد نظر در این مقطع در شرایط شبیه سازی شده در داده ها ثبت شده اند و به صورت هذلولی مشخص هستند.

در این بررسی همچنین می توان اثر اشباع بودن یا خالی بودن حفره بر پالس بازگشتی ثبت شده در مقطع رادار نفوذی زمین را مشاهده نمود. با توجه به مقادیر ارائه شده برای پارامترهای شبیه سازی در جدول (۳)، دو حفره اشباع در عمق های ۲ و ۵ متر شبیه سازی شده اند. در شکل (۱۲)

جدول (۴) نتایج حاصل از پهنای باند فرکانسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش روش تحقیق این مطالعه ذکر گردید امواج با طول موج کم در روش رادار میزان قدرت تفکیک بالاتر دارند اما عمق نفوذ آن‌ها به سبب افزایش میرایی در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد.

جدول ۴. نتایج حاصل شده بر اساس مدل‌سازی سوم انجام شده برای سامانه‌های رادار با فرکانس مرکزی‌های مختلف.

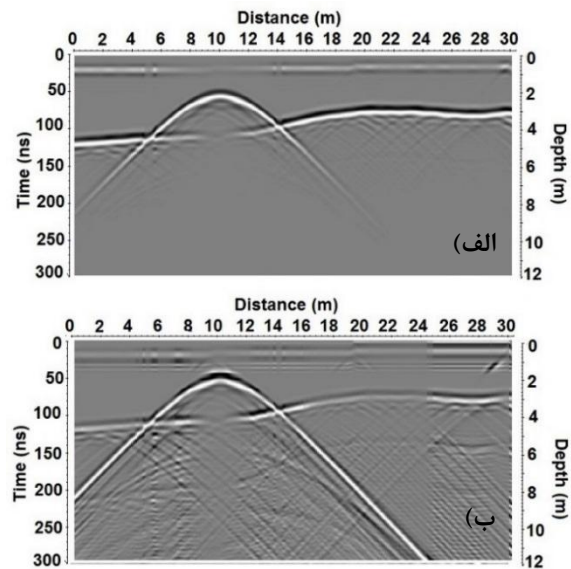
طول موج رادار (متر)	قدرت تفکیک به سانتیمتر	پهنای باند فرکانسی (مگاهرتز)	پهنای پالس زمانی	فرکانس مرکزی
۰/۹۹	۲۵	۵۰۰	۶/۶	۲۵۰ مگاهرتز
۰/۴۷	۱۲	۱۰۰۰	۳/۱	۵۰۰ مگاهرتز
۰/۲۳	۶	۲۰۰۰	۱/۵	۱ گیگاهرتز
۰/۱۲	۳	۴۰۰۰	۰/۸	۲ گیگاهرتز

در مدل‌سازی دوبعدی که مشابه مقاطع عرضی داده‌های رادار است می‌توان به تفسیر جامع‌تری رسید. در ۴ حالت در نظر گرفته شده سه هدف (حفره) و سه لایه‌بندی شبیه‌سازی شد. شرایط مختلف در ۴ حالت مورد بررسی به میزان تأثیر مقاومت ویژه الکتریکی، جنس و میزان میرایی مصالح مختلف شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داد که در حالت افزایش میرایی به میزان ۲ و ۴ پالس رادار به شدت دچار تضعیف شده و نمی‌تواند پاسخی از اهداف زیرسطحی دریافت کند. همچنین تأثیر مقاومت الکتریکی به خوبی نشان می‌دهد که در خاک‌های با مقدار مقاومت ویژه کم (کمتر از ۱۰ اهم‌متر) روش رادار به شدت دچار مشکل شده و میزان تضعیف در آن‌ها بالا می‌رود. در آزمایش شماره سه که به بررسی تأثیر جنس خاک از نظر ویژگی مقاومت الکتریکی می‌پردازد، سه لایه از توالی سیلت و رس انتخاب شده‌اند. نتایج به دست آمده (با تأیید نتایج شبیه‌سازی یک‌بعدی) نشان می‌دهد که کاهش مقاومت الکتریکی به شدت امواج بازگشتی رادار را تضعیف می‌کند به گونه‌ای که حفرات اشباع و خشک در لایه سوم قابل آشکارسازی نیستند (شکل ۱۳). تغییر این لایه به یک لایه با مقاومت الکتریکی بالاتر (لایه‌ای با ویژگی‌های یک آبرفت درشت‌دانه) باعث افزایش دامنه سیگنال و آشکارسازی حفرات زیرسطحی می‌گردد (شکل ۱۲).

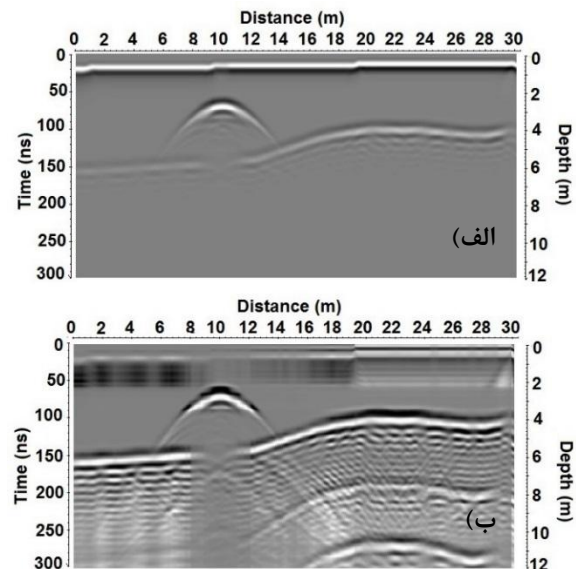
۴. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی یک‌بعدی امواج نشان داده است که در شرایطی که مقاومت الکتریکی خاک محل کمتر از ۲ اهم‌متر باشد، موج بازتاب شده از هدف دارای دامنه بسیار ضعیف خواهد بود و عمق نفوذ موجک ارسالی به شدت کاهش خواهد یافت. در بخش شبیه‌سازی دوبعدی نیز مشخص گردید برای یک خاک سیلتی و

کشیده شده است. پهنای باند فرکانسی معادل دو برابر فرکانس مرکزی محاسبه شده است. محتوای فرکانسی نیز با پهنای پالس زمانی رابطه معکوس دارد. پالس‌های زمانی کوتاه‌تر دارای طیف فرکانسی گسترده‌تر هستند.



شکل ۱۳. مقطع عرضی شبیه‌سازی شده رادار نفوذی زمین بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، بررسی شماره ۳ و برای یک آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰ مگاهرتز. (الف) مقطع خام داده‌های شبیه‌سازی شده رادار نفوذی زمین. (ب) مقطع پردازش اولیه، شامل حذف نوفه زمینه و بهره‌دهی.



شکل ۱۴. مقطع عرضی شبیه‌سازی شده رادار نفوذی زمین بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، بررسی شماره ۴ و برای یک آنتن با فرکانس مرکزی ۵۰ مگاهرتز. (الف) مقطع خام داده‌های شبیه‌سازی شده رادار نفوذی زمین. (ب) مقطع پردازش اولیه، شامل حذف نوفه زمینه و بهره‌دهی. اثر رینگی لایه شماره دو به علت اختلاف زیاد دولایه از نظر مشخصه‌های الکترومغناطیسی است.

- [9] Olhoeft, G. R.; Capron, D. E. "Laboratory Measurements of the Radio-Frequency Electrical and Magnetic Properties of Soils from Near Yuma, Arizona"; USGS Report, 1993, 93-701.
- [10] Zhuravlev, A. V.; Ivashov, S. I.; Razevig, V. V.; Vasiliev, I. A.; Türk, A. S.; Kizilay, A. "Holographic Subsurface Imaging Radar for Applications in Civil Engineering"; IET. Int. Radar Conference, Xi'an, China, 2013, 231-242.
- [11] Ivashov, S.; Razevig, V.; Zhuravlev, A.; Chizh, M.; Bechtel, T.; Capineri L.; Inagaki, M. "MW Holographic Imaging System for Detection of Hidden Dinosaur Tracks"; 38th PIERS in St Petersburg, Russia, 2017, 3241-3246.
- [12] Vizheh, M. M. "Processing and Interpretation of Ground-Penetrating Radar (GPR) and Comparison with Geoelectric Data"; MSc. Thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, 2009.
- [13] Hosseini, M. "Processing and Interpretation of Ground-Penetrating Radar (GPR) and Comparison with Magnetic Data"; MSc. Thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, 2009.
- [14] Mazinani, A. "Study of Asphalt Thickness in Shahrood University, Using GPR Method"; Master Thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, 2010.
- [15] Ovaisi, M. "Study of Fracture Zone in Sarab Ghanbar Lake, in South of Kermanshah, using Ground Penetrating Radar Method"; Iranian Journal of Geophysics 2007, 1, 81-89.
- [16] Rohani, A. K. "Processing and Interpretation of Ground-Penetrating Radar (GPR) Data for Detection of Cavities, Investigation of Bedding and Grain Sizes and Also Estimation of Clay Content in Shallow Subsurface Sediments"; Earth and Space Physics 2013, 38, 155-173.
- [17] Saif, M.; Mohammadzadeh, M. M.; Mirzaei, S. "Detection of Underground Targets Based on the Aeromagnetic Data using the Analytic Signal and Euler Deconvolution and 3D Inversion Methods"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2018, 9, 359-368.
- [18] Annan, A. P.; Cosway, S. W. "Ground Penetrating Radar Survey Design"; Proc. of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1992, 26-29.
- [19] Berkhout, A. J. "Seismic Resolution: Resolving Power of Acoustical Echo Techniques"; Geophysical Press: Amsterdam, 1984.
- [20] Moller, I.; Anthony D. "A GPR Study of Sedimentary Structures within a Transgressive Coastal Barrier along the Danish North Sea Coast in: Bristow, C. S., Jol, H.M. (Eds.), Ground Penetrating Radar in Sediments"; Geol. Soc. London Spec. Publ. 2003, 211, 55-65.
- [21] Knapp, R. W. "Fresnel Zones in the Light of Broadband Data"; Geophys. 1991, 56, 354-359.
- [22] Annan, A. P. "Ground Penetrating Radar Workshop Notes"; Sensors & Software Inc. workshop Denver 1992, 23-31.
- [23] Annan, A. P.; Davis, J. L.; Johnston, G. B. "Maximizing 3D GPR Image Resolution: A Simple Approach: Proceedings of the High Resolution Geophysics Workshop"; Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar 1997, 154-167.
- [24] Annan, A. P.; Redman, J. D.; Pilon, J. A.; Gilson, E. W.; Johnston, G. B. "Crosshole GPR for Engineering and Environmental Applications. Proceedings of the High Resolution"; Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar 1997, 90-98.

رس (ریزدانه با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم.متر) اهداف قابل ثبت نخواهند بود. قدرت تفکیک در روش رادار نفوذی از مهم‌ترین مسائل در این روش است. آگاهی از قدرت تفکیک روش رادار نفوذی می‌تواند در انتخاب فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده متناسب با ابعاد و عمق هدف بسیار مفید باشد. در این مطالعه در بخش شبیه‌سازی یک‌بعدی همچنین تأثیر فرکانس مرکزی در آشکارسازی اهداف مختلف مورد بررسی قرار گرفت. فرکانس‌های مرکزی مورد بررسی در این مطالعه شامل، ۲۵۰ و ۵۰۰ مگاهرتز و ۱ و ۲ گیگاهرتز بوده است. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی قدرت تفکیک برای آنتن‌های با فرکانس مرکزی ۲۰۰ و ۵۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۲۵ و ۱۲/۵ سانتیمتر و برای آنتن‌های با فرکانس مرکزی ۱ و ۲ گیگاهرتز، به ترتیب ۶ و ۳ سانتیمتر برآورد شده است. با توجه به رابطه خطی طول موج با فرکانس مرکزی و سرعت محیط میزبان، می‌توان قدرت تفکیک آنتن ۵۰ مگاهرتز را معادل یک متر برآورد نمود. مشخصه دیگر مورد بررسی در این مطالعه که در بخش شبیه‌سازی دویبعدی و یک‌بعدی مورد توجه قرار گرفته است جنس هدف بوده است. جنس هدف می‌تواند توسط پارامتر گذردهی نسبی مدلسازی شود. میزان گذردهی نسبی بر دامنه موج بازتاب شده از هدف تأثیر بسزایی دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش گذردهی نسبی هدف موجب افزایش دامنه موج بازتابی از هدف شده و کیفیت سیگنال ثبت‌شده از هدف در داده‌های رادار در این حالت بسیار بالاتر است.

۵. مراجع‌ها

- [1] Annan, A. P.; Davis, J. L.; Gendzwill, D. "Radar Sounding in Potash Mines: Saskatchewan, Canada"; Geophys. 1988, 53, 1556-1564.
- [2] Unterberger, R. R. "Radar Propagation in Rock Salt"; Geophys. 1978, 26, 312-328.
- [3] Lucius, J. E.; Olhoeft, G. R. "Geophysical Investigations of Heterogeneity and Scale at Princeton, Minnesota, Management Systems Evaluation Area"; USGS Report, 1996, 581-589.
- [4] Godio, A.; Guo, T. "Characterisation of Sandy Soil with Georadar Measurements"; J. Tech. Environ. Geol. 1998, 4, 17-27.
- [5] Reppert, P. M.; Morgan, F. D.; Toks'oz M. N. "Dielectric Constant Determination using Ground-Penetrating Radar Reflection Coefficients"; J. Appl. Geophys. 2000, 43, 189-197.
- [6] Cook, J. C. "Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks"; Geophys. 1975, 40, 865-885.
- [7] Sen, P. N.; Scala, C.; Cohen, M. H. "A Self-Similar Model for Sedimentary Rocks with Application to the Dielectric Constant of Fused Glass Beads"; Geophys. 1981, 46, 781-795.
- [8] Feng, S.; Sen, P. N. "Geometrical Model of Conductive and Dielectric Properties of Partially Saturated Rocks"; J. Appl. Phys. 1985, 58, 3236-3243.