


Loop propagation modeling of a Static ground penetrating radar and extraction of effective parameters in detecting a buried target

Ehsan Shahroosvand ¹, Morteza Kazerooni ² 

¹ PhD student, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

² Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received:2022 /05/10, Revised: 2022/07/16, Accepted: 2022/08/14, Published: 2022/09/11)

Abstract

The main goal of this article is to investigate the parameters and components influencing the detection of a buried target by a static airborne radar platform by means of loop propagation modeling. In this modeling, the dimensions of the antenna coverage range on the surface and subsurface have been calculated by taking into account all the effective parameters, which allows us to use the radiative transfer theory and determine the amount of input current in each environment, the scattered and absorbed power obtained in the medium. One of the important points in the applications of this type of airborne radars is the proper selection of the central frequency and the frequency bandwidth required for better detection. In this paper, how to choose the parameters of radar design and compromise between having penetration depth and having the resolution are properly presented using delimited diagrams that can be placed as a predefined table in radar memory. Also, with the arrangement of several scenarios, the amount of return signal from the buried target has been measured and verified in CST and GPR_Sim software, and through equations, the depth of its placement has been revealed with an acceptable accuracy of less than 2%.

Keywords: Ground-penetrating radar design , surface and subsurface antenna coverage , loop propagation modeling of ground penetrating radar

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: Kazerooni@mut.ac.ir

علمی - پژوهشی

مدل‌سازی انتشاری حلقه‌وار یک رادار زمین نفوذ هوا پایه ایستای و استخراج پارامترهای مؤثر در آشکارسازی هدف مدفون

احسان شهروسوند^۱، مرتضی کازرونی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، ۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳، انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰)

DOR: Radar.ihu.ac



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

هدف اصلی این مقاله بررسی پارامترها و مؤلفه‌های تأثیرگذار در آشکارسازی یک هدف مدفون توسط یک سکوی راداری هوا پایه ایستا به وسیله مدل‌سازی انتشاری حلقه‌وار می‌باشد. در این مدل‌سازی ابعاد محدوده پوشش آنتن در سطح و زیرسطح، با لحاظ نمودن کلیه پارامترهای مؤثر در آن محاسبه گردیده است که به ما این امکان را می‌دهد تا با استفاده از نظریه انتقال تابشی و مشخص شدن مقدار جریان ورودی در هر محیط، توان پراکنده شده و توان جذب شده در آن محیط را به دست آوریم. یکی از نکات پراهمیت در کاربری این نوع رادارهای زمین نفوذ هوا پایه انتخاب مناسب فرکانس مرکزی و پهنای باند فرکانسی لازم جهت آشکارسازی بهتر می‌باشد. در این مقاله نحوه انتخاب پارامترهای طراحی رادار و مصالحه بین داشتن عمق نفوذ و داشتن قدرت تفکیک به صورت مناسب با استفاده از نمودارهای مرزبندی شده ارائه شده و می‌تواند به عنوان یک جدول از پیش تعیین شده در حافظه رادار قرار گیرد. همچنین با چینش سناریوهای متعدد شبیه‌سازی، میزان سیگنال برگشتی از هدف مدفون در دو نرم‌افزار CST و GPR_Sim اندازه‌گیری و از طریق معادلات، عمق قرارگیری اهداف با دقت قابل قبولی در حدود کمتر از ۲ درصد سنجیده و راستی‌آزمایی شده است.

کلیدواژه‌ها: طراحی رادار زمین نفوذ، محدوده پوشش آنتن در سطح و زیرسطح، مدل‌سازی انتشاری حلقه‌وار رادار زمین نفوذ

۱- مقدمه

دیامنتی و همکاران [۱] در مقاله خود به بررسی کاربرد رادار زمین نفوذ در آشکارسازی تونل‌ها پرداخته‌اند. در این مقاله نویسنده به تشریح ویژگی‌های ساختاری تونل‌ها و حفره‌های زیرسطحی که می‌توانند در فرآیند آشکارسازی آن‌ها مؤثر باشند پرداخته است. استفاده از ساختارهای پشتیبان جهت جلوگیری از ریزش تونل، وجود سیستم ریلی جهت جابجایی تجهیزات، وجود کابل‌ها و خطوط انتقال جریان و همچنین خود فضای داخلی تونل که با هوا پر شده است به عنوان یک دی‌الکتริก قوی عمل می‌کند که با محیط پیرامون خود متفاوت است که باعث آشکارسازی تونل‌ها می‌شود. در این مقاله حجم زیادی از داده‌ها را برای ارزیابی تشخیص و شناسایی تونل با استفاده از رادار زمین نفوذ جمع‌آوری کرده است. پارامترهای کلیدی سیستم رادار زمین نفوذ در تشخیص تونل را عنوان نموده و سپس به معرفی نویز به عنوان یکی از چالش‌های مهم در عرصه شناسایی و آشکارسازی هدف مدفون پرداخته است. در این مقاله انواع نویز مورد بررسی قرار گرفته و میزان تأثیر آن‌ها بر هر یک از پارامترهای کلیدی سیستم رادار زمین نفوذ مورد بررسی قرار داده است.

بررسی مقالات و مقاله‌های متعدد در سالیان اخیر نشان می‌دهد که آشکارسازی هدف مدفون با استفاده از روش‌های راداری که غالباً از نوع رادار زمین نفوذ بوده است، در کانون توجهات متخصصین این حوزه قرار گرفته است. در حالت کلی میزان سیر و نفوذ امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های مختلف به خواص الکترومغناطیسی آن محیط وابسته می‌باشد. تونل‌ها، منابع سوخت زیرزمینی، ساختمان‌های مدفون و تأسیسات زیرزمینی از اهداف بزرگ‌مقیاس مدفون به شمار می‌آیند. یکی از راهکارهای بالابردن امنیت در سازه‌های مدفون قراردادن آن‌ها در اعماق زیاد می‌باشد؛ ولی در حال حاضر مقاله‌های متعدد نشان می‌دهد که این راهکار نیز تقریباً اثر خود را از دست داده است. با سامانه‌های راداری متنوع و همچنین استفاده از روش‌های ترکیبی حوزه‌های انتشاری و راداری و ژئوفیزیکی می‌توان به آشکارسازی این دسته از اهداف پرداخت. در این قسمت به بررسی و معرفی چند مقاله صورت پذیرفته در این زمینه می‌پردازیم.

پاسخ سیستم و میزان تأثیر پارامترهای مختلف در آن و همچنین دستیابی به پارامترها و نکات کلیدی طراحی سامانه اشاره نمود. این مقاله شامل پنج بخش می‌باشد. در بخش اول به معرفی مسأله و چند مقاله ارائه شده در این خصوص پرداخته شد. در بخش دوم، به معرفی اجمالی کارکرد یک رادار زمین نفوذ هوا پایه، محدوده تحت پوشش آنتن یک سامانه در سطح و زیر سطح و محاسبه ابعاد آن و مدل‌سازی سکوی راداری و هدف در حالت ایستا، پرداخته شده است. بخش سوم، شبیه‌سازی سناریوی آشکارسازی هدف مدفون، انتخاب فرکانس و پهنای باند مناسب از طریق نمودارهای طراحی و مدل‌سازی را شامل می‌شود. در بخش چهارم، مقایسه نتایج به دست آمده در مراحل مختلف شبیه‌سازی در دو نرم‌افزار CST و GPR_Sim جهت راستی‌آزمایی، ارائه شده است. بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری این مقاله می‌باشد.

۲- به کارگیری رادار زمین نفوذ هوا پایه جهت آشکارسازی هدف مدفون

روش‌های راداری و به‌ویژه رادارهای زمین نفوذ هوا پایه به علت دقت بالا، سادگی در اجرا و قابلیت به کارگیری از راه دور بسیار مورد استقبال متخصصین حوزه آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون قرار گرفته است. امواج الکترومغناطیسی از یک سکوی انتشاری به سمت زمین ارسال می‌گردد. بخشی از این سیگنال توسط سطح زمین منعکس و قسمتی از آن به داخل زمین نفوذ می‌کند و پس از آن به هدف برخورد نموده و باعث تحریک کل یا قسمتی از آن می‌شود. این تحریک منجر به ارسال موج پراکنده شده به سمت سکوی گیرنده خواهد شد. به‌طور کلی می‌توان از یک سامانه راداری و انتشاری زمین نفوذ جهت کاوش و بررسی یک حجم معین به منظور آشکارسازی و شناسایی اهداف بالقوه، تصویربرداری از یک یا چند هدف مدفون و یا طبقه‌بندی ویژگی‌ها و خصوصیات الکترومغناطیسی اهداف یا لایه‌های مختلف زمین بهره برد [۸].

۲-۱- محدوده پوشش آنتن در رادارهای زمین نفوذ هوا پایه

امواج تابیده شده توسط آنتن فرستنده محدوده معینی از سطح و زیر سطح زمین را روشن می‌کند که به آن محدوده پوشش یا ردپای آنتن^۱ گفته می‌شود. شکل ۱ شمای کلی

در مقاله دیگر، راجر تیلی و همکارانش [۲] به بررسی شناسایی و آشکارسازی هدف مدفون عمیق پرداخته است. در این مقاله، اولاً با استفاده از باندهای فرکانسی پایین به این منظور دست‌یافته و ثانیاً با توجه به این که در فرکانس‌های پایین ممکن است قدرت تفکیک کاهش یابد، با ترکیب جاروب فرکانسی به قدرت تفکیک بهتری رسیده است.

دانیل ریچمن و همکارانش [۳] در مقاله خود سامانه‌ای را معرفی می‌کند که در آن اهداف با توجه به عمق قرارگیری شناسایی و دسته‌بندی می‌شوند. در این مقاله از چندین شبکه فیلتری استفاده شده که برخی از این فیلترها مختص به اهداف نزدیک به سطح و برخی دیگر برای اهدافی که در عمق زیاد قرار دارند، می‌باشند.

محمد رضا سیف و همکارانش [۴] در مقاله‌ای با عنوان مدل‌سازی، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (رادار زمین نفوذ) به منظور شناسایی تونل‌های دفاعی به بررسی چگونگی آشکارسازی این دسته از اهداف با استفاده از رادار زمین نفوذ پرداخته است.

کامکار روحانی و همکاران [۵] داده‌های رادار زمین نفوذ را به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم‌عمق، پردازش و تفسیر کردند.

صفا خزائی و همکاران [۶] مقاله‌ای با عنوان بررسی و تحلیل امکان آشکارسازی عوارض زیرسطحی از طریق رادار زمین نفوذ بر اساس شبیه‌سازی امواج الکترومغناطیسی را ارائه داده‌اند. در این مقاله امکان‌سنجی رادار زمین نفوذ برای آشکارسازی و تعیین موقعیت عوارض زیرسطحی در شرایط مختلف بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، عملکرد امواج رادار در آشکارسازی هدف با جنس‌های متفاوت، در شرایط محیطی با رسانایی الکتریکی مختلف بررسی شده است.

به کارگیری رادارهای زمین نفوذ هوا پایه یکی از کارآمدترین و پرکاربردترین روش‌های آشکارسازی اهداف مدفون زیرزمینی در حوزه‌های نظامی و غیرنظامی است [۷]. از چالش‌های مهم در این فرآیند، ناشناخته و پیچیده بودن وضعیت و موقعیت سکوی راداری و محیط قرارگیری هدف در زیرزمین می‌باشد. برای داشتن درک مناسب از رفتار فیزیکی امواج در محیط‌های سطح و زیرسطح زمین و دریافت پاسخ کمی متنظر با هر یک از محیط‌ها، از مدل‌سازی انتشاری سیستم در آن محیط‌ها استفاده می‌کنیم. از مزایای مدل‌سازی انتشاری می‌توان به پیش‌بینی

^۱ Footprint Antenna

$$\text{Crossrange_diameter}_{(m)} = A + B$$

$$\left(H_A + \frac{2H_T \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_r} \cos \varphi_2} \right) \times \sin(\theta_{3dB(EI)}) \quad (3)$$

$$= \frac{\left(H_A + \frac{2H_T \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_r} \cos \varphi_2} \right) \times \sin(\theta_{3dB(EI)})}{\sin(\beta + (\theta_{3dB(EI)}/2)) \times \sin(\beta - (\theta_{3dB(EI)}/2))}$$

رابطه ۴ قطر سطح مقطع روشن‌شده در جهت سمت را بیان می‌کند.

$$\text{Range_diameter}_{(m)} = C$$

$$\left(H_A + \frac{2H_T \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_r} \cos \varphi_2} \right) \times 2 \tan(\theta_{3dB(Az)}/2) \quad (4)$$

$$= \frac{\left(H_A + \frac{2H_T \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_r} \cos \varphi_2} \right) \times 2 \tan(\theta_{3dB(Az)}/2)}{\sin(\beta)}$$

همان‌گونه که در روابط ۱ تا ۴ مشخص است می‌توان با تغییر زاویه قرارگیری آنتن نسبت به سطح افق میزان محدوده روشن‌شده توسط آنتن را تغییر داد. زمانی که زاویه قرارگیری آنتن نسبت به سطح افق به صورت عمود باشد. در این حالت زاویه تابش و زاویه انتقال با هم برابر خواهند بود ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$) و ابعاد سطح مقطع محدوده روشن‌شده توسط آنتن بر روی سطح و زیر سطح از روابط ۱ تا ۴ و با قراردادن $\beta = 90^\circ$ و به دست خواهد آمد.

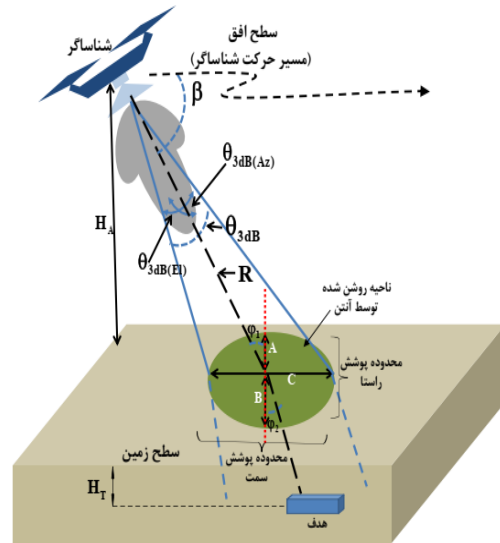
۲-۲- مدل‌سازی انتشاری رادار زمین‌نفوذ هوا پایه ایستا و تعیین پارامترهای مؤثر در آشکارسازی

مدل‌سازی شامل بررسی و تحلیل جزئیات رفتار سامانه از زمان تحریک تا پاسخ اندازه‌گیری شده یا مشاهده‌شده، می‌باشد. مدل‌سازی باعث پیش‌بینی پذیر بودن پاسخ سامانه در شرایط مختلف خواهد بود که این امر منجر به درک پایه‌ای بهتر و توانایی بهتر برای تفسیر پاسخ‌های سامانه می‌شود. در حالت کلی یک سامانه رادار زمین‌نفوذ از دو قسمت فرستنده و گیرنده راداری تشکیل شده است. شکل ۲ شمای کلی مدل‌سازی انتشاری حلقه‌وار یک رادار زمین‌نفوذ هوا پایه ایستا به همراه نمایش پارامترهای اساسی در فرآیند آشکارسازی یک هدف مدفون را نشان می‌دهد.

در سامانه‌های راداری زمین‌نفوذ هوا پایه پالسی، در حالت تک‌پایه^۱ از یک آنتن مشترک جهت ارسال و دریافت امواج استفاده می‌شود.

طبقه داپلکسر در سامانه‌های تک‌پایه، وظیفه در اختیار قراردادن آنتن به فرستنده و گیرنده را بر عهده دارد. زمانی که سیگنال فرستنده آماده ارسال باشد، سیرکولاتور موجود در این طبقه سیگنال را به طبقه آنتن منتقل می‌کند و در زمان دریافت پاسخ

محدوده پوشش آنتن در یک سامانه راداری زمین‌نفوذ هوا پایه را نشان می‌دهد.



شکل (۱). محدوده پوشش آنتن بر روی سطح و در زیر

به‌طور کلی سطح مقطع محدوده روشن‌شده توسط آنتن رادار روی سطح یا زیر سطح می‌تواند به صورت دایره، بیضی متقارن یا بیضی نامتقارن باشد. اندازه ابعاد سطح مقطع ردپای آنتن بر روی سطح به عوامل متعددی از جمله ارتفاع قرارگیری آنتن شناساگر H_A ، زاویه آنتن نسبت به سطح افق β ، پهنای پرتو نیم توان آنتن در جهت سمت $\theta_{3dB(Az)}$ ، پهنای پرتو نیم توان آنتن در جهت ارتفاع $\theta_{3dB(EI)}$ بستگی دارد [۹][۱۰]. سطوح روشن‌شده در زیر سطح توسط آنتن را می‌توان با لحاظ نمودن زاویه انتقال φ_2 ، ضریب گذردهی الکتریکی زیر سطح ϵ_r ، ارتفاع سطح روشن‌شده تا سطح زمین H_T و مؤلفه‌های تأثیرگذار بر روی محدوده پوشش آنتن روی سطح محاسبه نمود. در حالتیکه آنتن شناساگر با سطح افق زاویه داشته باشد، ابعاد سطح مقطع محدوده پوشش آنتن از روابط زیر به دست می‌آید. رابطه ۱ مقدار قطر کوچک محدوده روشن‌شده را در جهت راستا نشان می‌دهد.

$$A_{(m)} = \frac{\left(H_A + \frac{2H_T \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_r} \cos \varphi_2} \right) \times \sin(\theta_{3dB(EI)}/2)}{\sin(\beta) \times \sin(\beta + (\theta_{3dB(EI)}/2))} \quad (1)$$

مقدار قطر بزرگ محدوده روشن‌شده در جهت راستا از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$B_{(m)} = \frac{\left(H_A + \frac{2H_T \sin(\beta)}{\sin(\beta) + \sqrt{\epsilon_r} \cos \varphi_2} \right) \times \sin(\theta_{3dB(EI)}/2)}{\sin(\beta) \times \sin(\beta - (\theta_{3dB(EI)}/2))} \quad (2)$$

قطر محدوده روشن‌شده در جهت راستا از حاصل جمع دو رابطه ۱ و ۲ به دست می‌آید و مقدار آن توسط رابطه ۳ بیان می‌شود.

^۱ Monopulse

پراکنده شده توسط پراکنده گرهای محیطی برابر خواهد بود. یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در فرآیند آشکارسازی اهداف در سامانه‌های راداری، تلفات موجود می‌باشد. در رادارهای زمین نفوذ هوا پایه، تلفات انتشاری به دو قسمت تلفات فضای آزاد (که شناساگر راداری در آن قرار دارد) و تلفات انتشار محیطی (که هدف در آن قرار دارد) تقسیم‌بندی می‌شوند. از تلفات فضای آزاد می‌توان به تضعیف فضای آزاد، تضعیف قطرات باران و مه، محوشوندگی سیگنال، چند مسیری و... نام برد که از این میان مهم‌ترین آن‌ها که در همه سامانه‌های زمین نفوذ هوا پایه وجود دارد تضعیف فضای آزاد می‌باشد [۱۱].

سیگنال‌های راداری بعد از انتشار با سه دسته تلفات روبرو خواهد شد که عبارت‌اند از تلفات انتشاری، تلفات پراکندگی و تلفات مواد در این قسمت به صورت مختصر آن‌ها را بررسی می‌کنیم.

در مباحث انتشار امواج الکترومغناطیسی ضریب تضعیف فضای آزاد یک طرفه از رابطه ۶ محاسبه می‌شود؛ و در مباحث راداری باید در هر دو مسیر رفت و برگشت امواج راداری این تضعیف را مدنظر قرار دهیم [۱۲].

در رابطه بالا H_A فاصله شناساگر تا سطح زمین می‌باشد و λ_0 طول موج در فضای آزاد می‌باشد.

$$FSPL_{(dB)} = 20 \log \left(\frac{4\pi H_A}{\lambda_0} \right) \quad (6)$$

در سامانه‌های راداری زمین نفوذ هوا پایه تلفات انتشار محیطی باتوجه به فاصله قرارگیری هدف تا سطح زمین و باتوجه به نوع هدف تعیین می‌شود مقدار آن برای یک هدف نقطه‌ای از رابطه ۷ به دست می‌آید [۱۳].

$$L_s_{(dB)} = -10 \log_{10} \frac{G_r A_r \sigma}{(4\pi(H_T)^2)^2} \quad (7)$$

در رابطه بالا G_r بهره آنتن فرستنده، A_r دهانه مؤثر آنتن در محل دریافت سیگنال، H_T فاصله تا هدف و σ سطح مقطع راداری هدف می‌باشد.

تلفات پراکندگی شامل اثرات ناهمگنی محیط در مواجهه امواج راداری می‌باشد که از دو قسمت تشکیل شده است، قسمتی از آن مربوط به سیر موج از محیطی به محیط دیگر می‌باشد و قسمتی دیگر آن مربوط به پاسخ پراکندگی هدف می‌باشد. تلفات پراکندگی از رابطه ۸ به دست می‌آید [۱۳].

$$L_{sc(dB)} = 20 \log \left(1 - \left| \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \right| \right) + 20 \log \sigma \quad (8)$$

هدف، سیگنال دریافتی را به سمت گیرنده هدایت خواهد نمود. موج منتشرشده در فضای آزاد باتوجه به مسیر طی شده به دو علت بازشدگی موج و تضعیف فضای آزاد دچار افت توان می‌شود [۱۱]. سرعت موج ارسالی در محیط اول که شناساگر در آن قرار دارد که همان فضای آزاد می‌باشد، با سرعت نور برابر است. پس از عبور موج از این محیط به ناپیوستگی ناشی از تغییر محیط می‌رسد که باتوجه به مشخصات الکترومغناطیسی محیط، علی‌الخصوص ضریب گذردهی الکتریکی نسبی رابطه عکس دارد، یعنی با افزایش آن سرعت موج کم می‌شود. امپدانس محیط نیز به مشخصات الکترومغناطیسی محیط وابسته است. در مسیر رفت موج در فضای آزاد امپدانس در حدود ۳۷۷ اهم و در زمین خشک در حدود ۱۲۵ اهم را در مقابل خود می‌بیند، این ناپیوستگی محیطی را می‌توان با یک مبدل کاهشی امپدانس مدل نمود.

پرتو تشعشعی آنتن محدوده‌ای از سطح زمین را روشن می‌سازد و به طبع آن در لایه‌های زیرسطح نیز انتشار امواج ادامه پیدا می‌کند. محدوده روشن شده توسط آنتن را می‌توان؛ مانند منابع جریان وابسته در نظر گرفت.

طبق رابطه ۵، جریان $I_{Footprint}$ در هر نقطه از زمین را می‌توان از مجموع سه جریان به دست آورد.

$$I_{Footprint} = I_{beam} + I_{position} + I_{environmental} \quad (5)$$

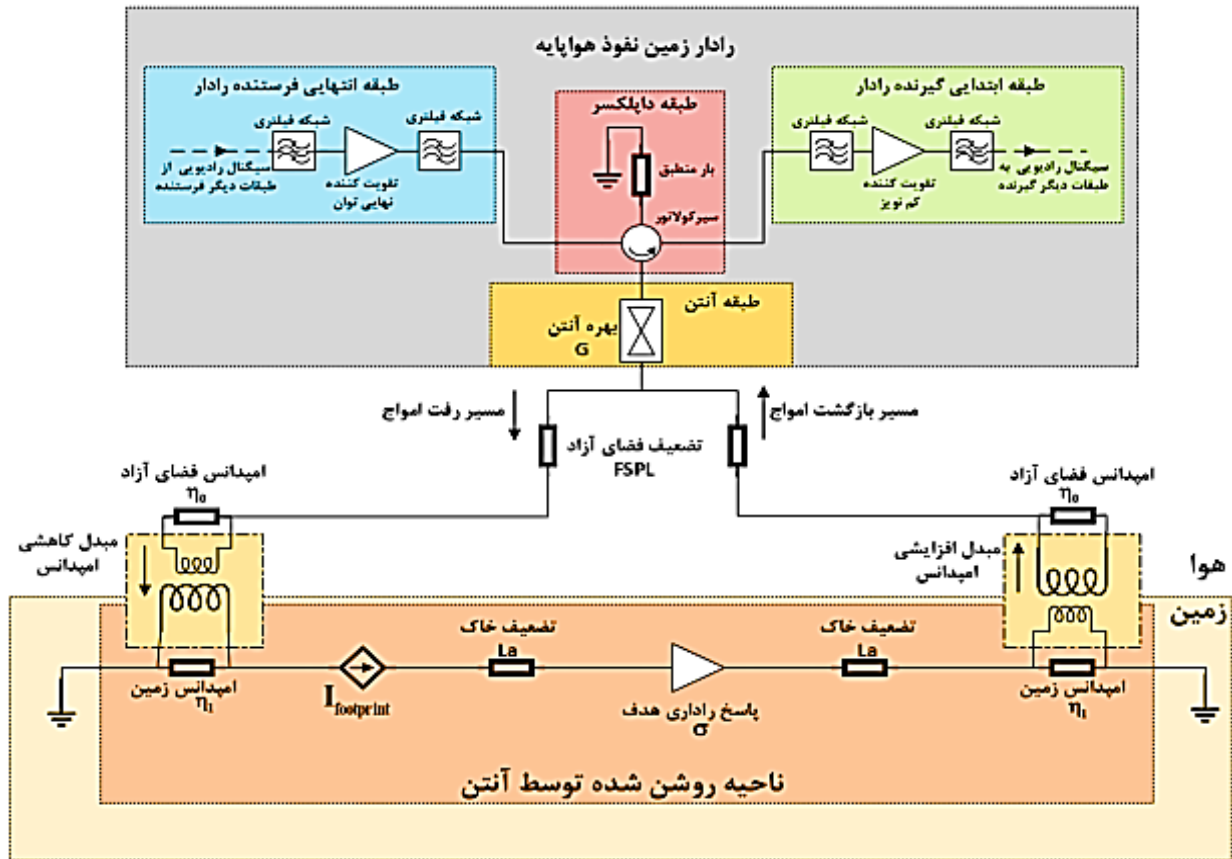
جریان I_{beam} ناشی از پارامترهای انتشاری آنتن از قبیل پهنای پرتو نیم توان آنتن در جهت سمت $\theta_{3dB(Az)}$ و راستا $\theta_{3dB(EI)}$ ، می‌باشد. جریان $I_{position}$ به موقعیت مکانی شناساگر که شامل پارامترهایی نظیر، ارتفاع قرارگیری آنتن H_A و زاویه آنتن نسبت به سطح افق β می‌باشند، بستگی دارد. جریان $I_{environmental}$ از مؤلفه‌های محیطی نظیر، ضریب گذردهی الکتریکی محیط ϵ_r ، زاویه شکست φ_2 ، عمق محدوده روشن شده موردنظر زیرسطح تا سطح H_T تأثیر می‌پذیرد. با تغییر در مقدار هر یک از این جریان‌ها میزان محدوده تحت پوشش آنتن نیز تغییر پیدا خواهد کرد. یکی از الزامات آشکارسازی هدف، قرارگیری هدف در محدوده پوشش آنتن شناساگر می‌باشد.

مطابق نظریه انتقال تابشی^۱، شدت جریان واردشده به یک محیط در واحد سطح، میزان توان ورودی به محیط خواهد بود که با میزان تلفات ناشی از جذب و تضعیف محیطی و توان

^۱ Radiative Transfer

به شکل‌های هندسی ساده تعمیم داد و تأثیرات آن‌ها را در مدل‌سازی لحاظ نمود. سطح مقطع راداری برخی اجسام هندسی در مراجع ذکر شده است [۱۴].

در رابطه بالا L_{sc} تلفات پراکندگی برحسب η_1 dB، امپدانس مشخصه محیط اول، η_2 ، امپدانس مشخصه محیط دوم و σ سطح مقطع راداری هدف می‌باشد. اهداف زیرسطحی را می‌توان



شکل (۲). مدل‌سازی انتشاری یک رادار زمین نفوذ هوا پایه ایستا و نمایش پارامترهای اساسی در فرآیند آشکارسازی هدف مدفون

تقویت‌کنندگی به سطح سیگنال مطلوب جهت آشکارسازی می‌رسد.

به‌عنوان یک قاعده کلی، آستانه نویز سامانه سطح حداقل سیگنال قابل آشکارسازی^۱ را تعیین می‌کند. در صورتی که توان پراکنده شده از هدف به اندازه کافی بالاتر از نویز و کلاتر باشد، تشخیص هدف امکان‌پذیر خواهد بود. حداقل سیگنال آشکارسازی (MDS) را می‌توان از رابطه ۱۰ و با لحاظ نمودن پهنای باند فرکانس سامانه (BW)، عدد نویز گیرنده (NF) و نسبت سیگنال به نویز (SNR) محاسبه کرد [۱۳].

$$MDS = kT_0 \cdot BW \cdot NF \cdot SNR \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، k ثابت بولتزمن و T_0 دمای اتاق برحسب کلوین می‌باشد. مقدار $kT_0 \approx 4 \times 10^{-21} \text{ W/Hz}$ می‌باشد.

در مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله، نوع پالس انتشاری، نوع

تلفات مواد، بخش مهمی از تلفات در یک سامانه راداری را شامل می‌شود که به فرکانس کار رادار، جنس و محل قرارگیری هدف وابسته می‌باشد. میزان تلفات مواد توسط رابطه ۹ بیان می‌شود:

$$L_{a(dB)} = 8.686 \times 4H_1 \pi f \sqrt{\left(\frac{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} \right) - 1 \right)} \quad (9)$$

موج منتشرشده در محیط، تمام یا قسمتی از هدف که همان سطح مقطع راداری هدف می‌باشد را تحریک می‌نماید. این تحریک سبب ایجاد یک جریان سطحی یا حجمی (باتوجه به جنس هدف) که منتج به پراکندگی موج به اطراف می‌گردد. موج پراکنده شده که با عنوان پاسخ راداری شناخته می‌شود، در مسیر بازگشت، با ناپیوستگی محیطی که به صورت یک مبدل افزایشی امپدانس خود را نشان خواهد داد، مواجه می‌شود. سپس موج پاسخ راداری وارد فضای آزادشده و تضعیف فضای آزاد و بهره آنتن گیرنده را در برابر خود خواهد داشت و بعد از عبور از آنتن گیرنده به سیگنال تبدیل شده و طی یک یا چند مرحله

¹ Minimum Detectable Signal (MDS)

۳- شبیه‌سازی سناریوی آشکارسازی و استخراج نمودارهای طراحی

۳-۱- شبیه‌سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در نرم‌افزار CST

در این سناریو یک صفحه تخت رسانا را به‌عنوان هدف در عمق‌های مختلف خاک قرار داده و میزان سیگنال انعکاسی دریافتی که نشانگر آشکارسازی هدف می‌باشد را اندازه‌گیری می‌کنیم. در این شبیه‌سازی از قسمت سیگنال زمانی راداری این نرم‌افزار استفاده شده است. در این مقاله از پورت انتشاری با ابعاد متناظر با سطح مقطع روشن‌شده توسط آنتن در ناحیه میدان دور استفاده شده است که به ما این امکان را می‌دهد تا با ارسال اولین سیگنال راداری هدف کاملاً تحریک‌شده و پاسخ مناسبی به سمت گیرنده ارسال نماید. نکته مهم در این سناریو شبیه‌سازی وابسته نمودن سطح مقطع ردپای آنتن به پارامترهای انتشاری آنتن نظیر پهنای پرتو نیم توان در دو جهت سمت و ارتفاع می‌باشد، این امر دست ما را در انتخاب آنتن باز می‌گذارد و پاسخ شبیه‌سازی را می‌توان به بقیه پارامترهای آنتن نرم‌الیزه نمود. نکته مهم دیگر در این سناریو شبیه‌سازی، توجه به زمان تأخیر متناسب با هریک از پاسخ‌های سیگنال راداری می‌باشد. اولین پاسخ در این سناریو ناشی از انعکاس از سطح جعبه خاک می‌باشد به‌نحوی که با داشتن اولین زمان تأخیر و لحاظ نمودن زمان سیر دوطرفه و سرعت موج در فضای آزاد می‌توانیم میزان فاصله بین پورت انتشاری و سطح جعبه را به دست بیاوریم. پاسخ بعدی در سیگنال دریافتی، ناشی از انعکاس هدف می‌باشد که میزان عمق قرارگیری هدف را با در نظر گرفتن مقدار تأخیر زمانی و لحاظ نمودن زمان سیر دوطرفه و سرعت موج در محیط (باتوجه به میزان ضریب گذردهی الکتریکی) تعیین می‌کند. نکته قابل توجه این است که اگر هدف در عمق زیاد و یا سامانه راداری زمین نفوذ در ارتفاع بالایی نسبت به سطح قرار داشته باشد، در این صورت حتی با ارسال سیگنال پرتو، میزان تأخیر زمانی پاسخ سیگنال دریافتی از سمت هدف، از پنجره زمانی یا همان محدوده دینامیکی سامانه راداری فراتر خواهد بود و سامانه راداری قادر به آشکارسازی هدف نخواهد بود.

فرکانس مرکزی مورد استفاده در این شبیه‌سازی ۱۰۰ مگاهرتز می‌باشد و پهنای باند فرکانسی نیز ۱۰۰ مگاهرتز است. محیطی که هدف در آن قرار دارد یک مکعب مستطیل به ابعاد ۸*۸*۲۲ متر (جعبه خاک) می‌باشد که جنس آن از شن خشک با ضریب گذردهی الکتریکی ۲/۵۳ می‌باشد. هدف شامل یک صفحه تخت رسانای کامل به ابعاد ۱*۱ متر و ضخامت ۵

رادار، روش‌های داده‌برداری و پردازش‌های آن‌ها لحاظ نگردیده و صرفاً پارامترهای اساسی در فرآیند آشکارسازی هدف مدفون توسط یک رادار زمین نفوذ هوا پایه ایستای معرفی و تحلیل گردیده است.

۳-۲- قدرت تفکیک مکانی در رادار زمین نفوذ

قدرت تفکیک مکانی، بیانگر توانایی یک سامانه راداری در تمایز و تشخیص دو شیء یا عارضه نزدیک به هم می‌باشد. در رادارهای زمین نفوذ دو نوع قدرت تفکیک مکانی وجود دارد که شامل قدرت تفکیک مکانی عمودی و افقی می‌باشند. قدرت تفکیک مکانی عمودی، زمانی که دو هدف در دو ارتفاع متفاوت قرار بگیرند، آن‌ها را از یکدیگر متمایز می‌کند. قدرت تفکیک مکانی افقی توانایی تمایز دو هدف در یک ارتفاع مشخص می‌باشد. برای دستیابی به حداقل قدرت تفکیک مکانی عمودی، فاصله بین اهداف حداقل باید نیمی از طول موج فرکانس مرکزی باشد. رابطه ۱۱ میزان قدرت تفکیک عمودی در رادارهای زمین نفوذ را ارائه می‌دهد [۱۴].

$$V_r = \frac{T_{pulse} \cdot c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

رابطه ۱۲ میزان قدرت تفکیک افقی در رادارهای زمین نفوذ را ارائه می‌دهد [۱۴].

$$H_r = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (12)$$

در روابط ۱۱ و ۱۲، T_{pulse} مدت زمان پالس ارسالی رادار، f فرکانس مرکزی آنتن رادار، C سرعت نور در فضای آزاد، ϵ_r ضریب گذردهی الکتریکی محیط و D عمق قرارگیری اهداف می‌باشند.

لازمه داشتن قدرت تفکیک بالا در رادار زمین نفوذ پهنای باند بالا می‌باشد. جهت دسترسی به پهنای باند کافی می‌بایست رادار را در فرکانس‌های بالا به کاربرد. بالا رفتن فرکانس کاری رادار منجر به کاهش عمق نفوذ امواج در زمین خواهد شد. به همین منظور می‌بایست باتوجه به نوع کاربری رادار فرکانس و پهنای باند مناسب لحاظ گردد. بدین منظور می‌بایست جهت انتخاب فرکانس مناسب از شرط رابطه ۱۳ برای انتخاب فرکانس استفاده کنیم.

$$\frac{75}{\Delta z \sqrt{\epsilon_r}} \leq f \text{ (MHz)} \leq \frac{1200\sqrt{\epsilon_r - 1}}{D} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ قدرت تفکیک مکانی مورد نظر Δz بر حسب متر می‌باشد و D نیز میزان عمق تقریبی قرارگیری هدف بر حسب متر می‌باشد که توسط کاربر انتخاب می‌شود [۱۵].

در مرحله اول شبیه‌سازی، هدف روی سطح جعبه خاک قرار گرفته است، شکل ۵ (الف) نمودار خروجی شبیه‌سازی در این حالت را نشان می‌دهد. در این مرحله از شبیه‌سازی دو پالس در خروجی داریم که پالس اول خروجی پورت و پالس دوم انعکاس از سطح جعبه خاک و هدف را نشان می‌دهد. در مرحله دوم هدف را در عمق ۳ متری جعبه خاک قرار می‌دهیم. در این حالت در شکل موج خروجی سه پالس ظاهر می‌شود که به ترتیب پالس پورت خروجی، انعکاس از سطح جعبه خاک و انعکاس از هدف می‌باشند. شکل ۵ (ب) این مرحله از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در مراحل بعدی شبیه‌سازی نیز هدف را در عمق‌های مختلف قرار داده و شکل موج خروجی متناظر با آن را استخراج می‌کنیم. در مراحل ۷ تا ۱۱، هدف را در عمق ثابت قرار داده و ارتفاع شناساگر را تغییر می‌دهیم. در این مراحل نیز در شکل موج خروجی سه پالس ظاهر می‌شود که به ترتیب پالس پورت خروجی، انعکاس از سطح جعبه خاک و انعکاس از هدف می‌باشند.

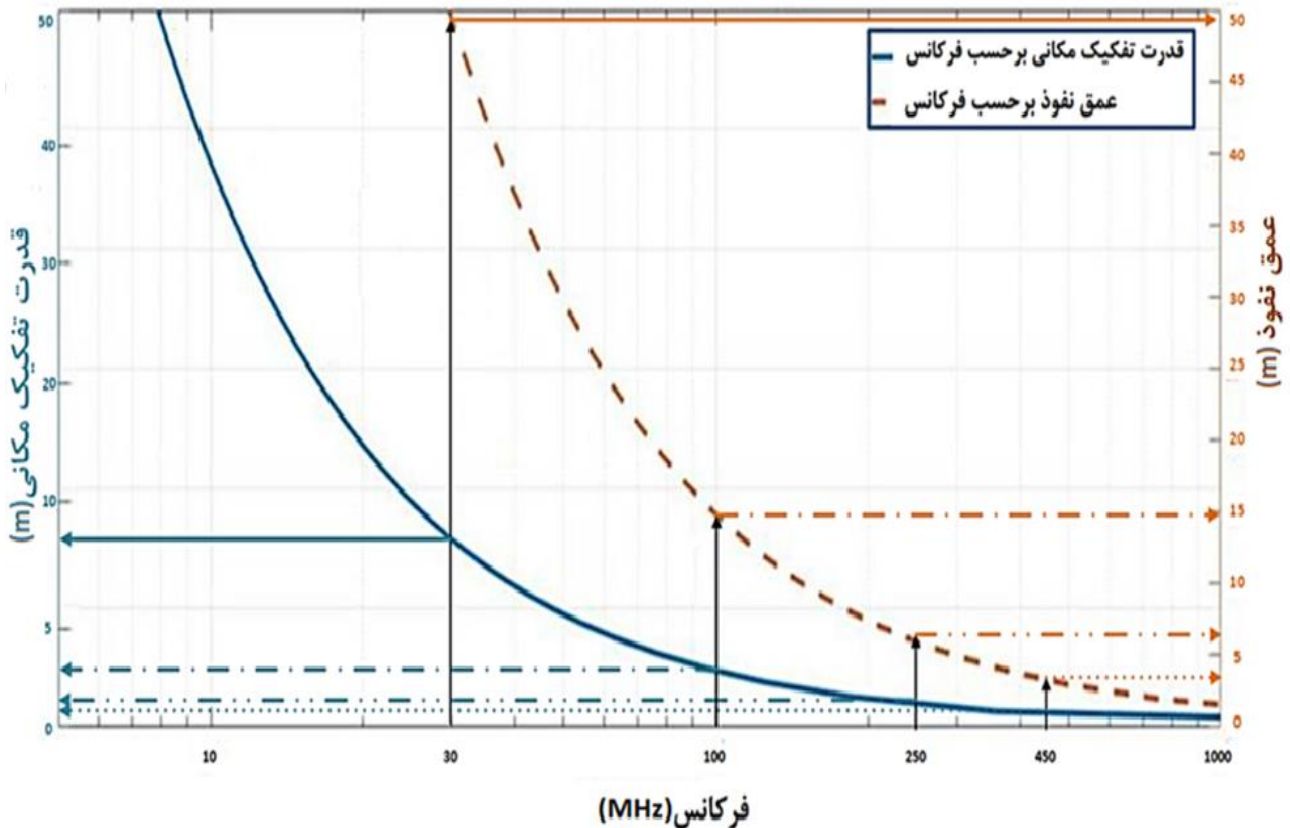
جدول (۱) حاوی مقادیر فرکانسی و مشخصات پالس زمانی برای کاربردهای رادار زمین‌نفوذ که از نمودار شکل ۴ استخراج شده است می‌باشد.

جدول (۱). مقادیر فرکانسی و پالس زمانی رادار زمین‌نفوذ

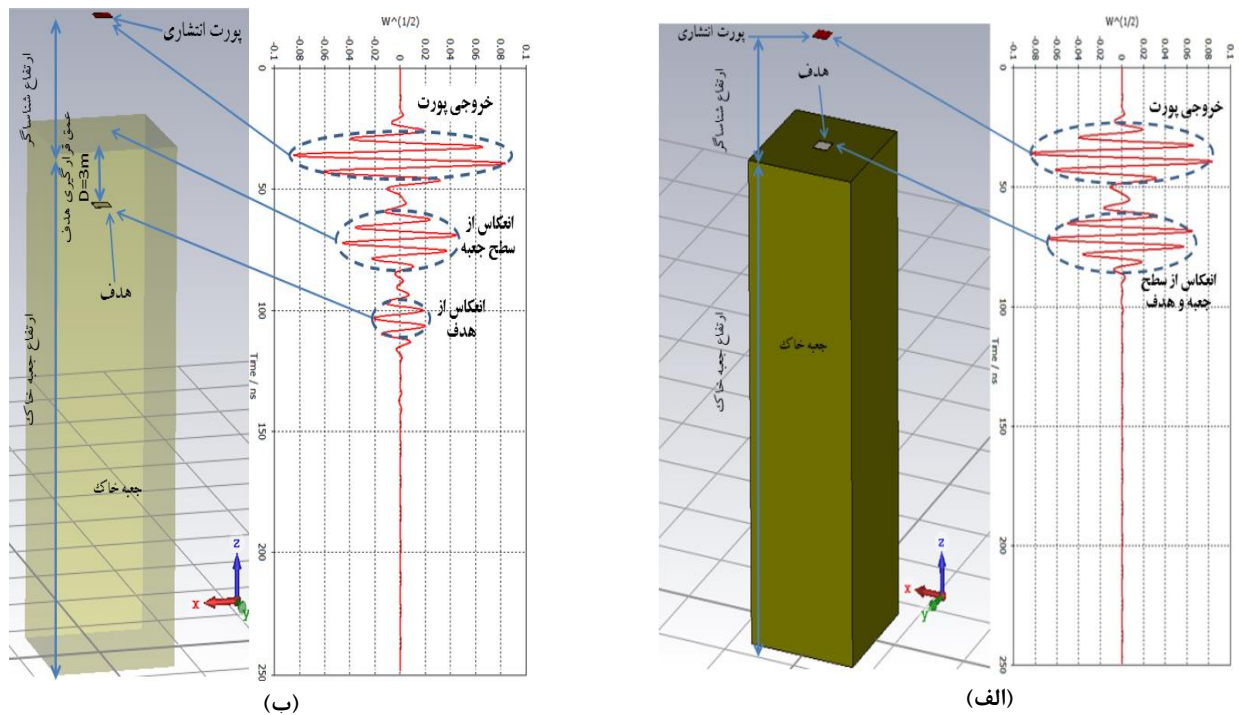
فرکانس مرکزی (MHz)	پهنای باند فرکانسی (MHz)	پهنای پالس زمانی (ns)	عمق نفوذ موج (m)	قدرت تفکیک مکانی (m)
۳۰	۵۰	۸۰	< ۵۰	< ۷/۵
۱۰۰	۱۰۰	۴۰	< ۱۵	< ۳/۰۲
۲۵۰	۲۰۰	۲۰	< ۷	< ۱/۸۸
۴۵۰	۳۰۰	۱۳/۳۳	< ۴	< ۱/۲
۱۰۰۰	۵۰۰	۴	< ۰/۷۵	< ۰/۳۷

۱-۱- نتایج شبیه‌سازی

۱-۱-۱ به‌دست آوردن شکل موج پالس‌های خروجی



شکل (۴). نمودار انتخاب فرکانس مطلوب رادار زمین‌نفوذ در محیط با ضریب گذردهی الکتریکی ۲/۵۳



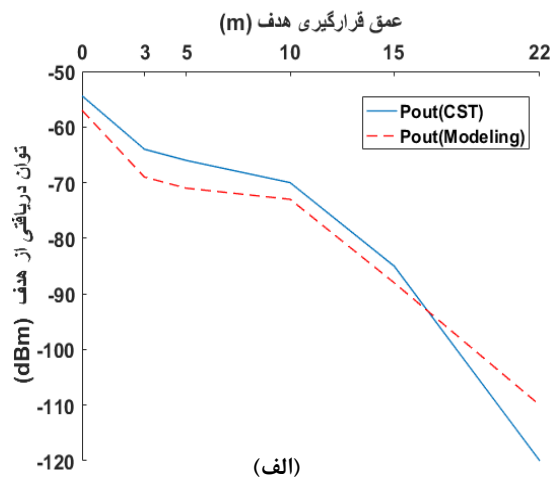
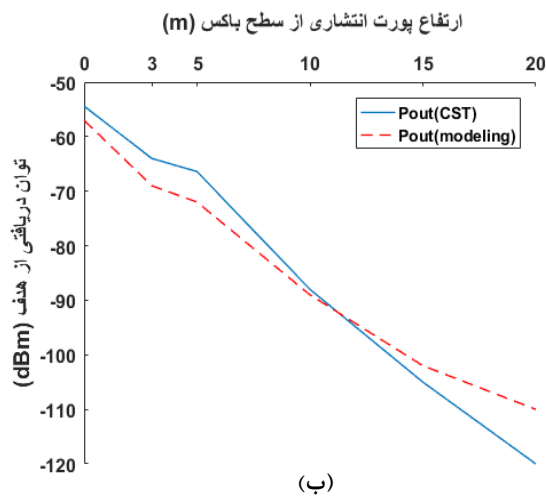
شکل (۵). (الف) مرحله اول شبیه‌سازی هدف روی سطح جعبه قرار دارد. (ب) مرحله دوم شبیه‌سازی هدف در عمق ۳ متری قرار دارد.

موجود در مسیر رفت سیگنال از پورت تشعشعی تا هدف و مسیر بازگشت آن را در نرم‌افزار متلب محاسبه نموده و مقدار نهایی آن را از توان سیگنال ورودی کم نموده و به‌عنوان پاسخ نهایی مدل‌سازی لحاظ کرده‌ایم. نتایج به‌دست‌آمده در حالتی که

ارتفاع شناساگر ثابت و عمق قرارگیری هدف متغیر باشد، در شکل ۶ (الف) نشان‌دهنده شده است. شکل ۶ (ب) نتایج به‌دست‌آمده در حالتی که ارتفاع شناساگر متغیر و عمق قرارگیری هدف ثابت باشد را نشان می‌دهد.

میزان توان خروجی از پورت تشعشعی در تمام مراحل شبیه‌سازی ثابت و یکسان می‌باشد. میزان توان انعکاس یافته (P_{out}) از سطح جعبه و هدف در هر یک از مراحل شبیه‌سازی متفاوت و وابسته به عمق قرارگیری هدف و ارتفاع شناساگر خواهد بود. با افزایش عمق قرارگیری هدف در جعبه خاک یا افزایش ارتفاع شناساگر، میزان دامنه پالس انعکاسی متناظر باهدف کاهش پیدا می‌کند و این کاهش دامنه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر در خروجی پالسی پدیدار نشود.

در مرحله دیگری از سناریو شبیه‌سازی و مدل‌سازی، میزان تلفات



شکل (۶). (الف) نمودارهای توان سیگنال خروجی در حالتی که ارتفاع شناساگر ثابت و عمق قرارگیری هدف متغیر باشد. (ب) نمودارهای توان سیگنال خروجی در حالتی که ارتفاع شناساگر متغیر و عمق قرارگیری هدف ثابت باشد.

انعکاس از

سطح و دومی ناشی از انعکاس هدف می‌باشد. فاصله پورت تا سطح D_2 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \Delta t_1$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{3 * 10^8}{\sqrt{1}} \right) (34 * 10^{-9}) = 5.1 \text{m}$$

فاصله هدف تا سطح D_3 نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \Delta t_1$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{3 * 10^8}{\sqrt{2.53}} \right) (32 * 10^{-9}) = 3.01 \text{m}$$

۳-۳-۳- شبیه‌سازی میزان قدرت تفکیک مکانی عمودی در رادار زمین نفوذ هوا پایه

در رادارهای زمین نفوذ حوزه زمان، یک سیگنال راداری به سمت اهداف فرستاده می‌شود و تأثیر اهداف در سیگنال بازگشتی سنجیده می‌شوند. در این فرآیند نزدیکی دو هدف به هم مانع آشکارسازی تفکیک شده آن‌ها از یکدیگر خواهد شد. در صورتی که یک پالس به سمت هدف ارسال شود تنها قادر به آشکارسازی اهداف در عمق‌های مختلف خواهیم بود، یعنی می‌توانیم فقط میزان قدرت تفکیک مکانی عمودی را بسنجیم.

در سناریوی شبیه‌سازی میزان قدرت تفکیک مکانی عمودی از دو صفحه تخت رسانا به‌عنوان اهداف مورد نظر استفاده می‌کنیم. این شبیه‌سازی در فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز صورت پذیرفته است. کلیه عناصر و شرایط سناریو مطابق با شبیه‌سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی می‌باشد. در مرحله اول این شبیه‌سازی هدف اول را در عمق ۱۰ متری و هدف دوم را در عمق ۱۲ متری از سطح جعبه قرار داده‌ایم. شکل ۷(الف) شمای کلی این مرحله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل موج خروجی نشان داده شده است. به علت نزدیکی دو هدف امکان تفکیک دو هدف از هم میسر نبوده و رادار آن را به صورت یک هدف خواهد دید.

در مرحله دوم این شبیه‌سازی هدف اول را در عمق ۱۰ متری و هدف دوم را در عمق ۱۳ متری از سطح جعبه قرار می‌دهیم. شکل ۷(ب) شمای کلی این مرحله را نشان می‌دهد. با قرار گرفتن فاصله مناسب دو هدف از هم امکان تفکیک دو هدف از میسر بوده و رادار آن‌ها را به صورت دو هدف مجزا از یکدیگر تشخیص خواهد داد.

۱-۲-۳- تعیین عمق هدف با استفاده از شکل موج پالس‌های خروجی

در این شبیه‌سازی به علت داشتن دو محیط متفاوت سرعت انتشار موج در هریک از آن‌ها فرق دارد به صورتی که در فضای آزاد سرعت آن بیشتر و در محیط دوم (جعبه خاک) سرعت آن کمتر می‌باشد. سرعت موج الکترومغناطیسی در هر محیط متناسب با ثابت گذردهی الکتریکی نسبی (ϵ_r) آن محیط و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (μ_r) تغییر پیدا می‌کند [۱۶]. مقدار μ_r برای مواد غیر مغناطیسی برابر ۱ می‌باشد. سرعت موج الکترومغناطیسی (v) در یک محیط از رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$v_{(m/s)} = \frac{c}{\sqrt{\left(\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2} \right) \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right) + 1 \right)}} \quad (14)$$

در رابطه فوق c سرعت نور در فضای آزاد و قسمت $\frac{\sigma}{\omega \epsilon}$ ضریب تلفات می‌باشد. در اکثر محیط‌ها مانند شن، ماسه و خاک رس که دارای تلفات کمی می‌باشند، می‌توان از این قسمت صرف نظر کرد و سرعت موج را از رابطه ۱۵ به دست آورد:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (m/s) = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (m/ns) \quad (15)$$

عمق نفوذ امواج سامانه‌های راداری زمین نفوذ D با دانستن سرعت موج در محیط مورد نظر و محاسبه زمان رفت و برگشت موج Δt امکان‌پذیر بوده و از رابطه ۱۶ به دست می‌آید [۱۷][۱۸].

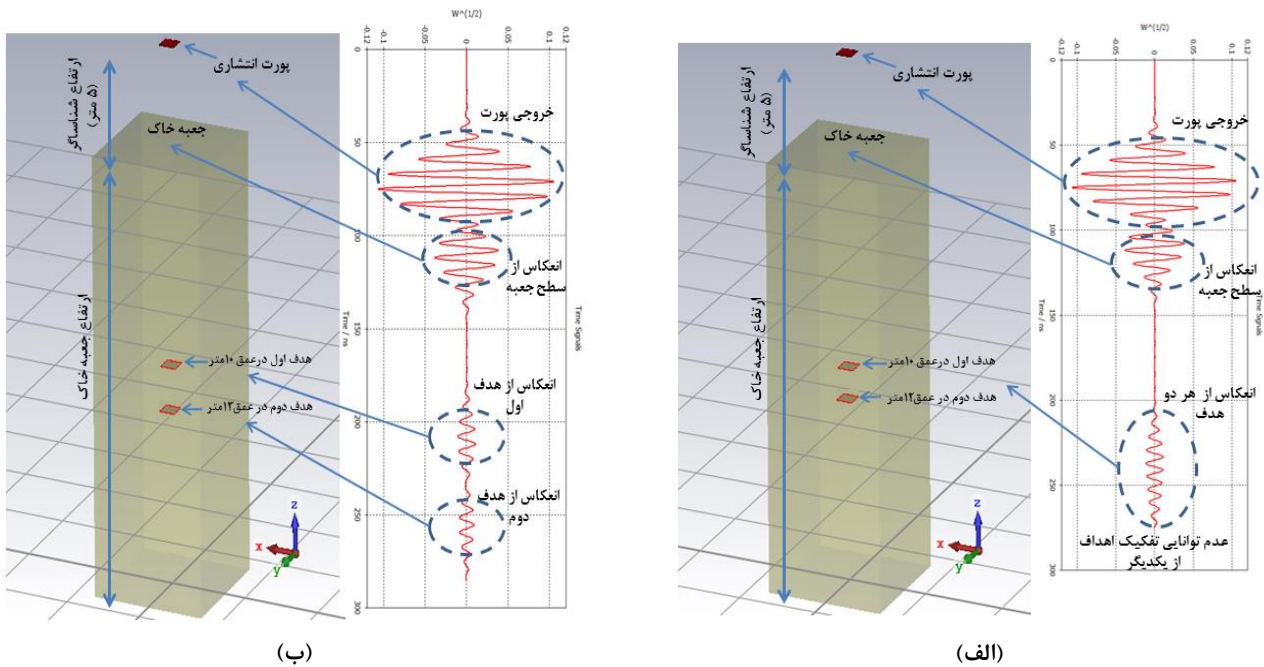
$$D_{(m)} = \frac{1}{2} v \Delta t \quad (16)$$

طبق رابطه ۱۶ برای به دست آوردن فواصل قرارگیری هر یک از عناصر کافی است، میزان تأخیر سیگنال برگشتی (Δt) از آن عنصر را در نصف سرعت موج در آن محیط ضرب کنیم. در مرحله اول که هدف و سکوی انتشاری هر دو در یک محیط قرار دارند فاصله پورت انتشاری تا هدف و سطح جعبه D_1 برابر است:

$$D_1 = \frac{1}{2} v \Delta t_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \Delta t_1$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{3 * 10^8}{\sqrt{1}} \right) (34 * 10^{-9}) = 5.1 \text{m}$$

در مرحله دوم که هدف در جعبه زمین قرار می‌گیرد و سیگنال با تأخیرهای متفاوت دریافت می‌کنیم که اولی ناشی از



شکل (۷). (الف) مرحله اول شبیه‌سازی میزان قدرت تفکیک مکانی عمودی، (ب) مرحله دوم شبیه‌سازی قدرت تفکیک مکانی عمودی

۳-۴- شبیه‌سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در نرم‌افزار GPR_Sim

یکی از نرم‌افزارهای حوزه ژئوفیزیک GPR_SIM است که به بررسی رفتار امواج الکترومغناطیسی در مواجهه با لایه‌های مختلف زمین می‌پردازد. در این نرم‌افزار تعداد لایه‌های محیط را وارد نموده و مشخصات الکترومغناطیسی متناظر با هر کدام از

لایه‌ها که شامل ضریب گذردهی الکتریکی و هدایت الکتریکی است را در آن اعمال می‌کنیم. در نهایت ضخامت لایه و فرکانس کاری را نیز لحاظ می‌کنیم. ابعاد المان‌ها، لایه‌های محیط و مراحل شبیه‌سازی سناریوی آشکارسازی هدف مدفون دقیقاً مطابق با شبیه‌سازی با نرم‌افزار CST است. نتایج عددی حاصل از این شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲). نتایج به‌دست‌آمده در دو شبیه‌سازی

مرحله شبیه‌سازی	تأخیر زمانی محیط اول Δt_1 (ns)		تأخیر زمانی محیط دوم Δt_2 (ns)		فاصله پورت تا سطح (m)		فاصله هدف تا سطح (m)	
	GPR_SIM	CST	GPR_SIM	CST	GPR_SIM	CST	GPR_SIM	CST
۱	۳۳/۴	۳۴	۳۳/۴	۰	۵/۰۱	۵	۰	۰
۲	۳۳/۴	۳۴	۳۱/۷	۳۲	۵/۰۱	۵	۳	۲/۹۸
۳	۳۳/۴	۳۴	۵۳	۵۴	۵/۰۱	۵	۵	۴/۹۹
۴	۳۳/۴	۳۴	۱۰۶	۱۰۸	۵/۰۱	۵	۱۰	۹/۹۹
۵	۳۳/۴	۳۴	۱۵۹	۱۶۱	۵/۰۱	۵	۱۵	۱۴/۹
۶	۳۳/۴	۳۴	**	**	۵/۰۱	۵	**	**
۷	۲۱	۲۰/۷	۵۳	۵۴/۵	۳/۱۵	۳/۱	۵/۱۴	۴/۹۹
۸	۳۳/۴	۳۴	۵۳	۵۴/۵	۵/۰۱	۵/۱	۵/۱۴	۴/۹۹
۹	۶۷/۵	۶۷/۵	۵۳	۵۴/۵	۱۰/۱۲	۱۰/۱۲	۵/۱۴	۴/۹۹
۱۰	۱۰۱	۱۰۱	۵۳	۵۴/۵	۱۵/۱۵	۱۵/۱۵	۵/۱۴	۴/۹۹
۱۱	۱۳۵	۱۳۵	**	**	۲۰/۲۵	۲۰/۲۵	**	**

** : عدم آشکارسازی

- investigation," Society of Exploration Geophysicists, pp. 228–231, 2020.
- [2] R. Tilley, H. R. Sadjadpour, and F. Dowla, "GPR Imaging for Deeply Buried Objects: A Comparative Study Based on Compositing of Scanning Frequencies and a Chirp Excitation Function," 2019.
- [3] D. Reichman, J. M. Malof, and L. M. Collins, "Algorithm Development for Deeply Buried Threat Detection in GPR Data," vol. 9823, pp. 1–8, 2016.
- [4] S. K. I. Khaki, M. R. Seif, "Modeling, Processing And Interpreting Ground Penetrating Radar (GPR) Data for Detecting Tunnels with a Case Study," *Passiv. Def. Q.*, vol. 9, no. 1, pp. 47–56, 2018. (in persian)
- [5] R. Ahmadi, N. Fathianpour, and G. H. Norouzi, "Comparison of the performance of ANN and SVM methods in automatic detection of hidden cylindrical targets in GPR images," *J. Min. Eng.*, vol. 10, no. 26, pp. 69–89, 2015. (in persian)
- [6] V. maleki, S. Khazaei, and K. Alimohammadi, "Analysis of Ground Penetrating Radar Method in Detecting Subsurface Targets Based on Simulating Electromagnetic Waves" *J. Adv. Def. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 159–168, 2019. (in persian)
- [7] H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier Science, 2008.
- [8] F. T. Ulaby, D. G. Long, and A. Fung, *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*.
- [9] S. Pradhan and B. Gupta, "Estimation of Ground Footprint for Airborne Antenna Systems," in *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, pp. 1–3, 2019.
- [10] A. Lahiry, "Hybrid Amplitude Control Antenna Array System for Energy Efficient W-CDMA Network with Adaptive Coverage and Capacity," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 99, Mar. 2018.
- [11] M. I. Skolnik, *Radar Handbook, Third Edition*. McGraw-Hill Education, 2008.
- [12] J. A. Richards, *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [13] D. J. Daniels, "Ground Penetrating Radar," *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. Apr. 15, 2005.
- [14] Y. Guzel and U. of Dayton. School of Engineering, *A Fast Matched Filtered Method for Ground Penetrating Radar Tomographic Imaging*. University of Dayton, 2019.
- [15] A. P. Annan, "Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications," 2003.
- [16] D. Edemsky, A. Popov, I. Prokopovich, and V. Garbatsevich, "Airborne Ground Penetrating Radar, Field Test," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, 2021.
- [17] G. Patent, "GROUND-PENETRATING RADAR: OPERATION," no. 44, 2019.
- [18] L. Dang, H. Yang, and B. Teng, "Detection imaging of impulse borehole well-logging radar," *EURASIP J. Image Video Process*, vol. 2018.

۳-۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی آشکارسازی هدف

مدفون فلزی در دو نرم‌افزار CST و GPR_Sim

نتایج عددی حاصل شده از نمودارهای خروجی شبیه‌سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در دو نرم‌افزار CST و GPR_Sim در جدول ۲ ارائه شده است. در هر مرحله از شبیه‌سازی مقدار تأخیر زمانی بین پورت انتشاری تا پاسخ انعکاس سطح جعبه که از آن می‌توان به ارتفاع قرارگیری شناساگر تا سطح زمین دست‌یافت. از مقدار تأخیر زمانی بین پاسخ انعکاس هدف تا پاسخ انعکاس سطح می‌توانیم عمق قرارگیری هدف تا سطح را به دست بیاوریم. زمانی که پاسخ انعکاس هدف را دریافت نکنیم می‌توان گفت میزان تأخیر زمانی پاسخ انعکاس از پنجره زمانی شناساگر بیشتر می‌باشد که دیگر شناساگر قادر به آشکارسازی آن نخواهد بود. همان گونه که انتظار داشتیم مقادیر به دست آمده تا حد قابل‌قبولی به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

نتیجه این مقاله جهت استفاده در طراحی رادارهای زمین نفوذ هوا پایه بسیار مفید می‌باشد. در این مقاله به مدل‌سازی انتشاری حلقه‌وار یک رادار زمین نفوذ هوا پایه به منظور دستیابی به پارامترهای مؤثر در فرآیند آشکارسازی اهداف مدفون پرداخته شد. با استفاده از این مدل‌سازی می‌توان از قابلیت پیش‌بینی پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند آشکارسازی اهداف مدفون بهره برد و از هدررفت منابع و زمان جستجو تا حد قابل‌قبولی جلوگیری و بازدهی سامانه راداری را بالا برد. استفاده از سطح روشن شده توسط آنتن در ناحیه میدان دور به عنوان منبع تشعشعی می‌تواند در شبیه‌سازی‌های مختلف به ما کمک نموده و از دخیل نمودن سایر پارامترهای آنتن ما را بی‌نیاز کند که باعث ساده‌سازی مناسب در شبیه‌سازی عملکردی رادار می‌شود. باتوجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، میزان سیگنال برگشتی از هدف مدفون اندازه‌گیری و مقادیر آن‌ها در جدول ۲ آورده شده که عمق قرارگیری اهداف با دقت قابل‌قبولی در حدود کمتر از ۲ درصد سنجیده و راستی‌آزمایی شده است. در حالت سکوی غیرایستادن نیز می‌توان از نتایج این مقاله با اضافه نمودن پارامترهای حرکتی همچون سطح منطقه روشن شده توسط رادار، سرعت داده‌برداری، لحاظ نمودن ناهمواری‌های سطحی، تأخیر فاز سیگنال برگشتی ناشی از فاصله سکو تا هدف بهره برد.

۵- مراجع

- [1] D. Nectaria, J. D. Redman, C. M. Hogan, and A. Peter Annan, "Air-launched GPR depth of