

مدلسازی عددی و ارزیابی عملکرد سامانه رادار زمین نفوذ در استخوان یابی در صحنه نبرد

مرتضی کازرونی^{۱*}، مجتبی رستمی^۲، کیان کیهباد^۳، حمید حیدر^۴

۱. دانشیار گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۲. دانشجوی دکتری مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳. استادیار گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۴. دانشیار گروه مخابرات، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله، یک سامانه رادار زمین نفوذ (GPR) با هدف تشخیص و مکان یابی استخوان های انسانی مدفون در شرایط صحنه نبرد، به صورت عددی مدلسازی و شبیه سازی شده است. روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) به همراه شرط مرزی لایه کاملاً منطبق پیچیده (CPML) برای شبیه سازی انتشار موج و برهم کنش با خاک و هدف به کار رفته است. پارامترهای الکترومغناطیسی خاک (بر اساس نمونه های واقعی از مناطق شلمچه و طلائییه در استان خوزستان) و استخوان (اندازه گیری آزمایشگاهی روی نمونه های قدیمی و جدید در بازه ۲۰۰ مگاهرتز تا ۲ گیگاهرتز) در مدل اعمال شده اند. نتایج کمی نشان می دهد که در فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز و عمق ۲ متر، نسبت سیگنال به نویز (SNR) برابر ۱۴.۸۶ دسی بل و در عمق ۴ متر (فرکانس ۲۰۰ مگاهرتز) برابر ۲.۳۷ دسی بل است. حضور یک شیء فلزی (کلاه خود) در مجاورت استخوان، SNR را به طور غیرخطی تا ۳۱ دسی بل افزایش می دهد. فرکانس های پایین (۲۵۰-۲۰۰ مگاهرتز) برای نفوذ در اعماق بیشتر و فرکانس های بالاتر (۵۰۰ مگاهرتز) برای وضوح بهتر اهداف کوچک مناسب ترند. مدل نویز سفید گاوسی فرض شده و آستانه آشکارسازی حدود ۱۲ دسی بل تعیین گردید. احتمال آشکارسازی (Pd) در عمق ۲ متر بیش از ۰.۹۵ و احتمال هشدار کاذب (Pfa) کمتر از ۰.۰۱ برآورد شده است. به دلیل محدودیت مدل دوبعدی و فرض خاک همگن، نتایج باید در شرایط میدانی واقعی با احتیاط تفسیر شوند.

واژه های کلیدی: مدلسازی عددی، رادار زمین نفوذ، تشخیص استخوان، FDTD، CPML، نسبت سیگنال به نویز، آشکارسازی غیرخطی.

Propagation Model for Bone Detection Using Ground-Penetrating Radar (GPR)

Morteza Kazerooni^{1*}, Mojtaba Rostami², Kiyan Keighobad³, Hamid Heidar⁴

1. Associate Prof., Faculty of Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

2. PhD student, Faculty of Electrical & Computer Engineering Malek Ashtar University, Tehran, Iran

3. Assistant Prof., Faculty of Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

4. Associate Prof., Faculty of Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, a ground-penetrating radar (GPR) system for the detection and localization of buried human bones in battlefield conditions is numerically modeled and simulated. The finite-difference time-domain (FDTD) method with the complex perfectly matched layer (CPML) absorbing boundary condition is employed to simulate wave propagation and interaction with the soil and target. The electromagnetic parameters of the soil (based on real samples from the Shalamcheh and Tala'eyeh regions in Khuzestan Province) and bone (measured experimentally on fresh and aged specimens in the frequency range of 200 MHz to 2 GHz) are incorporated into the model. Quantitative results show that at 250 MHz and a depth of 2 m, the signal-to-noise ratio (SNR) is 14.86 dB, while at 4 m depth (200 MHz) the SNR is 2.37 dB. The presence of a metallic object (helmet) near the bone nonlinearly increases the SNR by up to 31 dB. Lower frequencies (200–250 MHz) are more suitable for deeper penetration, whereas higher frequencies (500 MHz) provide better resolution for small targets. A white Gaussian noise model is assumed, and a detection threshold of approximately 12 dB is determined. The probability of detection (Pd) at 2 m depth exceeds 0.95, and the probability of false alarm (Pfa) is estimated to be below 0.01. Due to the limitations of the 2D model and the assumption of homogeneous soil, the results should be interpreted with caution when applied to real field conditions

Key words: Numerical Modeling, Ground-Penetrating Radar, Bone Detection, FDTD, CPML, Signal-to-Noise Ratio, Nonlinear Detection.

تشخیص گورهای پنهان زیرزمینی با استفاده از GPR کاربرد رایجی در تحقیقات جنایی و باستان‌شناسی است. فناوری رادار نفوذی زمین در اوایل تا اواسط قرن بیستم توسعه یافت و در ابتدا عمدتاً برای کاربرد های نظامی و زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفت. بعدها، این فناوری در حوزه‌های باستان‌شناسی و پزشکی قانونی نیز به کار گرفته شد. در علم پزشکی قانونی، رادار نفوذی زمین به دلیل قابلیت آن در کشف شواهد دفن‌شده شهرت یافت. متخصصان جرم‌شناسی و پزشکی قانونی از این فناوری به عنوان روشی غیرمخرب برای تجزیه و تحلیل صحنه جرم و شناسایی بقایای انسانی دفن‌شده استفاده کردند. تعداد زیادی آزمایش اعتبارسنجی برای تعیین میزان دقت رادار نفوذی زمین در تشخیص استخوان‌های دفن‌شده انجام شده است. این پژوهش‌ها به بهبود روش‌های استفاده از این فناوری و تعیین بهترین شیوه‌های تشخیص استخوان کمک شایانی کرده‌اند [۱].

این مقاله به بررسی کاربرد GPR در شناسایی بقایای استخوانی می‌پردازد. یکی از مهم‌ترین انگیزه‌های این پژوهش، کمک به بازیابی اجساد و ارائه اطلاعات به خانواده‌ها و بازماندگان قربانیان است. اهمیت این موضوع تا حدی است که در ژوئیه ۲۰۲۱، صلیب سرخ جهانی در طرحی با عنوان "روشن‌سازی سرنوشت افراد مفقود شده در عصر دیجیتال با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین باستان‌شناسی و پزشکی قانونی" بر آن تأکید ویژه‌ای نمود. کشف بقایای انسانی در میدان نبرد، شناسایی اجساد مدفون در مناطق عملیاتی، محیط‌های پس از انفجار، میدان‌های مین یا بقایای تجهیزات کاربرد اصلی این مقاله می‌باشد. رادار نفوذی زمین به عنوان یک فناوری پیشرفته در کاوش‌های زیرسطحی، با تحلیل امواج الکترومغناطیسی بازتابیده از لایه‌های زیرین زمین عمل می‌کند. این روش در تمام محیط‌هایی قابل اجراست که عمق نفوذ فرکانس اصلی سیگنال رادار با عمق هدف مورد نظر قابل مقایسه باشد. از آنجا که این سیستم قادر به تشخیص هرگونه ناهمگنی در خواص الکتریکی مواد نسبت به خاک محیط است، به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های غیرمخرب در بررسی‌های زیرسطحی شناخته می‌شود. برخلاف دستگاه‌های فلزیاب متعارف که تنها قادر به شناسایی اجسام فلزی هستند، رادار نفوذی زمین توانایی تشخیص همزمان هر دو نوع هدف فلزی و غیرفلزی (از جمله بقایای استخوانی انسان) را داراست. این ویژگی منحصر به فرد، GPR را به ابزاری ارزشمند در تحقیقات باستان‌شناسی و پزشکی قانونی تبدیل کرده است. آنتن فرستنده رادار، موج الکترومغناطیسی را به درون خاک منتشر می‌کند که با هدف مدفون برهمکنش می‌نماید. این برهمکنش‌ها منجر به تشکیل موج پراکنده‌ای می‌شود که توسط آنتن گیرنده رادار اندازه‌گیری می‌گردد. داده‌های پراکندگی با حرکت دادن رادار در امتداد سطح مشترک و ثبت خروجی آنتن گیرنده به عنوان تابعی از زمان یا فرکانس و موقعیت رادار جمع‌آوری می‌شوند. این داده‌های پراکندگی را می‌توان

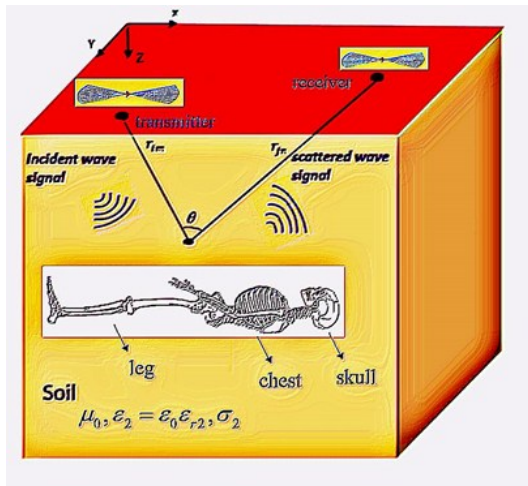
برای تعیین وجود یک شیء مدفون استفاده نمود. علاوه بر این، می‌توان از آنها برای مکان‌یابی و شناسایی اجسام دفن‌شده بهره‌برد [۲]. با توجه به کاربرد مورد نظر، سیستم‌های اسکن مختلفی شامل اسکن A، اسکن B و اسکن C مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سناریوی اندازه‌گیری اسکن B، یک آنتن GPR رو به پایین در امتداد یک مسیر مستقیم روی سطح حرکت می‌کند در حالی که حسگر GPR میدان پراکنده را در نقاط فضایی مختلف جمع‌آوری و ثبت می‌نماید. داده‌های ایستای اندازه‌گیری شده در یک نقطه خاص به عنوان اسکن A شناخته می‌شوند [۳]. خروجی مدل سازی ارائه شده در این مقاله که منجر به کشف بقایای انسانی می‌شود، می‌تواند برای شناسایی اجساد انسان و حیوان نیز مورد استفاده قرار گیرد. کاربردهای آن شامل تشخیص گورهای دسته‌جمعی، پزشکی قانونی، مناطق باستان‌شناسی و موارد مشابه می‌شود. برخی نمونه‌های کارهای انجام شده در زمینه تشخیص استخوان‌ها یا اجساد در اعماق زمین عبارتند از: گذردهی الکتریکی استخوان و تأثیر آن بر استفاده از GPR [۴]، تشخیص اجساد انسانی دفن شده با استفاده از GPR [۵]، تصویربرداری GPR از لایه‌های استخوانی حیوانات ماقبل تاریخ [۶]، مدل سازی FDTD انرژی پالس رادار نفوذی زمین برای مکانیابی محل‌های دفن [۷]، پیاده‌سازی فناوری اسکن سه بعدی در مدل سازی عددی GPR [۸]، تشخیص محل گورهای نشان نشده برای اهداف باستان‌شناسی با استفاده از GPR [۹]، مکانیابی بقایای انسانی با رادار زمین نفوذ [۱۰]، شناسایی گورهای بدون علامت در گورستان راندولف^۱ با استفاده از GPR [۱۱] یافتن گورها در گورستان: بررسی‌های اولیه پزشکی قانونی با GPR در گورستان غیرکاتولیک رم (ایتالیا) [۱۲]، کشف یک گور دسته‌جمعی از جنگ داخلی اسپانیا با استفاده از رادار نفوذی زمین و باستان‌شناسی پزشکی قانونی [۱۳].

نوع کاربرد GPR چالش‌ها و محدودیت‌های آن را آشکار می‌سازد. موارد استفاده‌ای مانند تشخیص گورهای دسته‌جمعی، مقبره‌ها، حفره‌ها و تونل‌ها، چالش‌های ناشی از وسعت زیاد منطقه تحت بررسی در مقابل یک استخوان کوچک منفرد دفن شده در زمین را نشان می‌دهند. تشخیص و شناسایی استخوان‌ها به دلیل چندین عامل پیچیده، چالش قابل توجهی محسوب می‌شود. این عوامل شامل اندازه کوچک استخوان‌ها، عمر و میزان تخریب آنها در طول زمان، امکان تکه‌تکه شدن، و همچنین رطوبت بالا و تراکم خاک اطراف می‌شوند که همگی مانع شناسایی و تشخیص مؤثر می‌گردند.

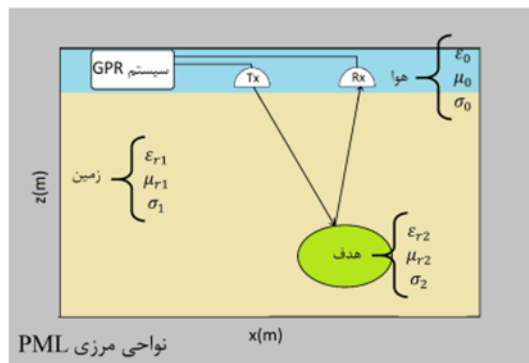
نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

۱. استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده از استخوان انسان (قدیم و جدید) و خاک مناطق مرزی ایران (شلمچه، طلائیه).
۲. ارائه تحلیل کمی مبتنی بر SNR به همراه تعریف آستانه آشکارسازی و مدل نویز AWGN

¹ B.F. Randolph



شکل ۱الف - طرح ایده آل و کامل استخوان یاب



شکل ۱ب - تقلیل حالت ایده آل به سیستم دو بعدی

یک رویکرد ساده تر برای تخمین شبیه سازی های GPR لازم است تا بتوان به کمک آن بدون نیاز به محاسبات سنگین یک مدل سازی سه بعدی، رفتار GPR را پیش بینی کرد. با فرض بر این که در هندسه مسئله و میدان های الکترومغناطیسی در یک جهت تغییری وجود ندارد، مسئله ی GPR به یک مسئله ی دو بعدی کاهش می یابد. با کاهش یک بعد از مسئله امکان استفاده از معادلات ماکسول تقلیل یافته به وجود می آید که به طور قابل توجهی فرمول بندی و اجرای مدل را ساده تر می کند. برای بیان نظریه ی شبیه سازی GPR ابتدا معادلات کرل ماکسول در حوزه فرکانس بیان می شود [14]:

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + i\omega\epsilon E \quad (2)$$

که در آن $i = \sqrt{-1}$ ، ω فرکانس زاویه ای، ϵ گذردهی دی الکتریک، μ نفوذ پذیری مغناطیسی، σ رسانایی الکتریکی، و H به ترتیب بردارهای میدان های الکتریکی و مغناطیسی هستند. در اینجا، برای پیاده سازی مرز های جذب از طریق لایه های کاملاً منطبق از نوشتار کلی فضای مختصاتی با بسط مختلط بهره برداری شده است که در آن عملگر ∇ نشان دهنده ی فرم زیر است [14]:

$$\nabla = \hat{x} \frac{1}{s_x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{1}{s_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3)$$

۳. عمق آشکارسازی استخوان تا ۴ متر با حد تفکیک ۱ سانتیمتر
۴. کشف و تحلیل پدیده افزایش غیرخطی SNR در حضور همزمان هدف فلزی و استخوان.
- محدودیت های مطالعه شامل:
 ۱. همگن فرض شدن خاک
 ۲. دو بعدی بودن شبیه سازی
 ۳. عدم لحاظ کلاتر زمین
 ۴. مدل نویز ساده
 ۵. آستانه ثابت ۱۲ دسی بل
 ۶. محاسبات Pd و Pfa می باشند.

ساختار باقی مانده مقاله به بخش های مختلفی تقسیم شده است تا شفافیت لازم در مورد پژوهش انجام شده فراهم گردد. بخش ۲ به مدل سازی آشکارسازی توسط GPR می پردازد و ویژگی ها و پارامترهای مرتبط را تشریح می نماید. بخش ۳ نتایج شبیه سازی رارائه می دهد که شامل تحلیل و تفسیر داده های به دست آمده از مدل می باشد. در نهایت، بخش نتیجه گیری، یافته های کلیدی پژوهش را خلاصه سازی می کند.

۲- روش ها-مدل سازی هندسی و الکترومغناطیسی

در این قسمت، هدف حل مسئله ی بیان شده در شکل (۱) است. این شکل نشان دهنده ی طرح کامل و ایده آل می باشد و تلاش ها بر آن است که طراحی و شبیه سازی به کمک متلب یا CST به آن نزدیک باشد. همان طور که در شکل مشاهده می گردد تلاش می شود، محیطی این چینی را به کمک نرم افزار متلب ایجاد و آن را به کمک روش FDTD حل نمود، حداقل سه ماده مختلف، (در اینجا هوا، زمین و هدف) با مشخصات الکتریکی متفاوت در نظر گرفته شده اند. هدف از این قسمت از مقاله عبارت است از آشکارسازی هدف مورد نظر که در زمین مدفون شده، به کمک امواج الکترومغناطیسی ساطع شده از طرف فرستنده ی GPR که در شکل Tx نامیده شده است و ضبط امواج بازتاب شده از زیر زمین توسط گیرنده ی رادار که در شکل Rx نامیده شده است. نواحی مرزی لایه های کاملاً منطبق و کاربرد آن در دامنه ی شبیه سازی، شرح داده خواهد شد.

۲-۱- معادلات حاکم

راه حل شبیه سازی GPR در واقع یک راه حل برای معادلات ماکسول با هندسه (مرزها) و شرایط اولیه خاص است. این باعث ایجاد یک مسئله ی سه بعدی می شود که راه حل تقریبی آن یک مدل سازی عددی است که دارای محاسبات فشرده است.

که در آن:

$$S_k = k_k + \frac{\sigma_k}{\alpha_k + i\omega\epsilon_0}, k = x, y, z \quad (4)$$

CPML بهترین روش موجود برای پیاده سازی لایه های کاملاً منطبق شناخته می شود. اگر از معادله ی ۴ عکس تبدیل فوریه گرفته شود، معادله ی ۸ به دست می آید [۱۴].

$$s_k^{-1}(t) = \frac{\delta(t)}{k_k} - \frac{\sigma_k}{\epsilon_0 k_k^2} \quad (8)$$

$$\exp[-\frac{t}{\epsilon_0}(\frac{\sigma_k}{k_k} + \alpha_k)]u(t) = \frac{\delta(t)}{k_k} + \zeta_k(t)$$

که در آن $\delta(t)$ تابع دلتای دیراک و $u(t)$ تابع پله ی هویساید است. با در نظر گرفتن این طرز نوشتار و موادی که دارای مشخصات مستقل از فرکانس هستند، معادله های ۵ تا ۷ به شکل زیر، به حوزه ی زمان در می آیند [۱۴].

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{k_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (9)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{k_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} + \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (10)$$

$$\sigma E_y + \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{k_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{k_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} + \zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (11)$$

که در این معادلات، * نشان دهنده کانولوشن است. برای معرفی یک منبع میدان الکتریکی در شبکه در طول مدل سازی تفاضل محدود حوزه زمان تابع منبع پالسی به مؤلفه ی میدان Ey در جهت مکانی مطلوب، اضافه می شود. برای منبع پالس در کدها، از مشتق اول تابع پنجره ای نرمالیزه شده ی بلکمن-هریس^۱ استفاده شده است [۱۶]، که در [۱۷] مدل سازی ژئوفیزیکی FDTD توضیح داده شده است:

$$f(t) = \begin{cases} a_n \cos(\frac{2n\pi t}{T}) \\ 0 \end{cases} \quad (12)$$

که در آن T طول تابع منبع است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$T = \frac{1.55}{f_c} \quad (13)$$

متغیر f_c در معادله ۱۳، فرکانس مرکزی منبع است. ضرایب برابرند با:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.35322222 \\ a_1 &= -0.488 \\ a_2 &= 0.145 \\ a_3 &= -0.10222222 \end{aligned} \quad (14)$$

به منظور از بین بردن پالس بعد از دوره ی زمانی T، این ضرایب کمی متفاوت از نمونه اصلی بیان شده توسط هریس در [۱۶] انتخاب شده اند. شکل (۲) پالسهای بلکمن-هریس با دامنه ی فرکانسی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاهرتز را نشان می دهد. زمانی که این پالس به مؤلفه ی میدان Ey در مکان منبع دلخواه داده شود، در طول شبکه حرکت می کند و در، مکان های در نظر گرفته شده برای گیرنده ها ثبت می شود.

متغیرهای مختلط بسط مختصاتی هستند که در جهت k تغییر

می کنند، α_k ، σ_k و k_k مؤلفه هایی هستند که به گونه ای انتخاب می شوند که باعث انتشار موج در داخل شبکه ی مدل سازی و در مقابل جذب آن در مناطق مرزی لایه های کاملاً منطبق می شوند. لازم به ذکر است که مقادیر α_k ، σ_k و k_k مشخصات الکتریکی واقعی نیستند. بلکه آنها مؤلفه هایی هستند که در دستگاه مختصات مختلط، برای پیاده سازی مرزهای لایه های کاملاً منطبق به معادله های ماکسول درجه های آزادی اضافه می کنند. با در نظر گرفتن معادله های ۱ و ۲ و در نظر گرفتن معادله ی ۳ و با فرض این که جهت نامتغیر در مسئله در جهت محور (y) از سیستم مختصات دکارتی قرار دارد، معادلات ماکسول به صورت شناخته شده ی TM در می آید [۱۴].

$$i\omega\mu H_x = -\frac{1}{s_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (5)$$

$$i\omega\mu H_z = \frac{1}{s_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (6)$$

$$\partial E_y + i\omega\epsilon E_y = \frac{1}{s_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{s_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (7)$$

برای GPR های مد بازتابش که در حال حاضر، مشخصاً این مد از GPR مورد بررسی قرار می گیرد، از این معادلات استفاده می شود. لازم به ذکر است، وقتی مؤلفه های بسط برابر با یک قرار داده می شوند، معادله های بالا همان معادله های حالت استاندارد در مد TM، در یک فضای مختصاتی بسط داده نشده، می شوند [۱۵]. بنابراین در داخل شبکه ی مدل سازی، s_x و s_y برابر با یک قرار داده می شود. اما در نواحی مرزی لایه های کاملاً منطبق، s_x و s_y مقادیر مختلط قرار داده می شوند که باعث جذب امواج به صورت کامل می شود. برخلاف حالت ساده تری که تغییر در رسانایی الکتریکی در این نواحی پدید می آید (که خود نیز باعث جذب می شود)، تغییر مؤلفه های بسط مختصاتی، باعث تغییر در امپدانس الکترومغناطیسی نسبت به شبکه ی داخلی نمی شود، و بنابراین هیچ بازتابشی از لبه های دامنه ی لایه های کاملاً منطبق اتفاق نخواهد افتاد. در اینجا، برای پیاده سازی مرزهای جذب لایه های کاملاً منطبق در کدهای مدل سازی خود از لایه کاملاً منطبق پیچیده استفاده شده است. این روش توسط رادن و گدنی در سال ۲۰۰۰ معرفی شده است. در این روش از عبارات حوزه ی زمان برای $1/s_x$ و $1/s_z$ در فرمول بندی FDTD استفاده شده است، و از جداسازی میدان های الکتریکی و مغناطیسی که در روشهای دیگر لایه های کاملاً منطبق رایج است، خودداری می کند. به همین دلیل

¹ Blackman-Harris

$$\Delta t_{\max} = \frac{6}{7c} \sqrt{\frac{\mu_{\min} \varepsilon_{\min}}{(1/\Delta x^2 + 1/\Delta z^2)}} \quad (15)$$

که در آن c سرعت نور، $\mu_{\min}$ و $\varepsilon_{\min}$ مقادیر حداقل نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی دی الکتریکی موجود در شبکه ی مدل سازی است. در تمام شبیه سازی ها، $\Delta t = 0.9 \Delta t_{\max}$ انتخاب شده تا پایداری تضمین گردد. با کاهش ابعاد سلول از ۲ سانتی متر به ۱ سانتی متر و ۰.۵ سانتی متر، مقدار SNR کمتر از ۲٪ تغییر کرد که نشان دهنده همگرایی روش است (نتیجه در بخش ۲-۳ آورده شده است). برای کنترل پاشندگی عددی، طرح $O(2.4)$ باید پنج نمونه ی میدانی در کوچکترین طول موج خود داشته باشد [۲۰].

۲-۱-۲- پیاده سازی شرایط مرزی جذب

برای مدل سازی عددی یک پدیده ی انتشار موج در حوزه ای که به بی نهایت گسترش می یابد، این یک امر بدیهی است که بایستی دامنه ی محاسباتی به یک دامنه ی متناهی، محدود شود. مرزهای تازه به وجود آمده راه، مرزهای مصنوعی می نامند. برای از بین بردن بازتاب های عددی ناخواسته، رفتار خاصی در این مرزها مورد نیاز است. پاسخ مورد نظر باید تا جایی که امکان دارد به پاسخی که در دامنه بی نهایت فیزیکی اصلی محاسبه شده است، نزدیک باشد. روش FDTD، همان طور که پیش از این بیان شد، دارای اهمیت زیادی در حل مسائل الکترومغناطیس است و به عنوان یکی از محبوب ترین الگوریتم های الکترومغناطیسی محاسباتی به شمار میرود. این روش برای مسائل فضای باز نیز به کار می رود. برای مدل سازی مسائل محیط های باز بایستی از مرزهای مصنوعی استفاده شود؛ از آنجا که مؤلفه های مماس میدان الکتریکی، در امتداد مرز خارجی ناحیه محاسباتی با استفاده از الگوریتم پایه ی ۴، قابلیت به روزرسانی ندارد، برای مدل سازی مسائل محیط های باز بایستی از مرزهای مصنوعی استفاده شود. به طور عمده از دو نوع ABC برای کاهش دامنه محاسباتی استفاده می شود [۲۱].

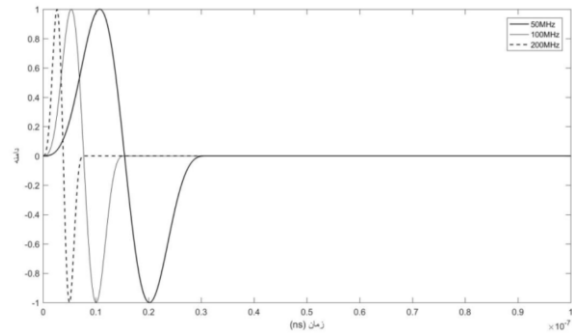
(۱) ABC از نوع دیفرانسیل: ABC هایی که بر مبنای

دیفرانسیل هستند، به طور کلی به وسیله ی فاکتور گرفتن معادله ی موج و اجازه دادن به یک راه حل که تنها موجهای خروجی را مجاز می داند، به دست می آیند.

(۲) ABC از نوع مواد: از طرف دیگر، ABC های مبتنی بر

مواد به گونه ای ساخته شده اند که میدانها وقتی که آنها را در یک محیط جذب منتشر می شوند، میرا می شوند.

در مقایسه با سایر روشهای اعمال شرایط مرزی جذب، روش لایه های کاملاً منطبق که از نوع دوم به حساب می آید، دارای شماری از فوائد مهم است. اول این که، رویکرد لایه های کاملاً منطبق میرایی بهتری از بازتاب های لبه های شبکه ی مدل سازی ارائه می کند و با



شکل ۲- پالسهای بلکمن- هریس با فرکانس مرکزی متفاوت

این امر منجر به جمع تابع منبع مذکور با مؤلفه ی y از عبارت چگالی جریان در معادلات ماکسول می شود. برای مدل سازی گیرنده ها در کدها، به سادگی مؤلفه ی میدان E_y به عنوان تابعی از زمان، در محل مورد نظر به عنوان گیرنده، در حافظه ذخیره می شود. لازم به ذکر است، به دلیل این که کدهای مورد نظر در فضای دو بعدی طراحی شده است، همه ی این منابع و گیرنده ها در واقع عناصر خطی هستند که در جهت های مثبت و منفی تا بینهایت در راستای عمود بر صفحه ی نقشه برداری، گسترده شده اند. در نتیجه، الگوهای تابش و هندسه ی واقع گرایانه از آنتن های GPR دوقطبی^۱ در اینجا قابل مدل سازی نیستند؛ این موارد نیازمند استفاده از یک روش تمام یا شبه سه بعدی (که اصطلاحاً به آنها روش دو و نیم بعدی نیز می گویند) است که نمونه هایی از آنها در [۱۸] و [۱۹] مشاهده می شود. با این وجود، لازم به ذکر است، در کدهای دوبعدی ارائه شده در این بخش، بسیاری از ویژگی های مهم بازتابش نقشه برداری GPR به دست آورده می شود و می توان بینش بسیار زیادی از تعامل موج های EM با یک زیرلایه ی پیچیده، به دست آورد. با این حال، وقتی که الگوی تابش آنتن، نقش مهمی در چگونگی تجزیه و تحلیل اطلاعات بازی میکند، باید با احتیاط از این کد استفاده کرد.

۲-۱-۱- پایداری عددی^۲ و معیار پاشندگی^۳

یک گام مهم در مدل سازی FDTD، انتخاب مناسب فواصل گسسته ی زمانی و مکانی برای یک شبیه سازی است. در حالت ایده آل، مطلوب است که Δx ، Δz و Δt تا حد امکان بزرگ انتخاب شود تا بتوان شبیه سازی را با بیشترین سرعت ممکن انجام داد. اما آشکار است که اگر Δt بسیار بزرگ انتخاب شود، طرح FDTD که در بخش های قبل نشان داده شد، دچار ناپایداری عددی می شود. به علاوه اگر Δx و Δz بسیار بزرگ انتخاب شوند، میدان های الکتریکی و مغناطیسی، به اندازه ی کافی در فضا نمونه برداری نمی شوند و در نتیجه پاشندگی عددی به وجود می آید. برای طرح $O(2.4)$ که در اینجا به کار گرفته شده است، حداکثر فاصله ی زمانی که می تواند استفاده شود، تا طرح دارای پایداری عددی باشد، عبارت است از [۲۰]:

⁴ Yee

¹ dipole-type GPR antennas

² numerical stability

³ dispersion criteria

۲-۲- مدل نویز و تعریف SNR

نویز محیط به صورت نویز سفید گاوسی افزودنی (AWGN) با میانگین صفر و واریانس محاسبه شده از ناحیه بدون هدف (پیش از رسیدن موج به هدف) مدل شده است. توان سیگنال از دامنه پیک میدان بازگشتی در پنجره زمانی هدف محاسبه می‌شود. توان نویز از واریانس سیگنال در ناحیه مقدم (۲۰ نانوثانیه اول) به دست می‌آید. نسبت سیگنال به نویز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SNR(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\max |E_{\text{signal}}(t)|}{\sigma_{\text{noise}}} \right) \quad (۱۶)$$

آستانه آشکارسازی برابر ۱۲ دسی‌بل در نظر گرفته شده است (بر اساس مطالعات مرجع [۲۳]).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معرفی مدل مورد نظر برای تشخیص استخوان با

رادار GPR - شبیه سازی

مدل مورد نظر برای شبیه سازی زمین یک لایه می باشد. در عمق این زمین یک لایه، استخوان هایی با ابعاد و زوایای مختلف و همچنین فلزاتی با ابعاد متنوع وجود دارند. شکل (۳) مدل مفهومی برای خاک یک لایه را نشان می‌دهد که می‌تواند برای به دست آوردن یک مدل شبیه سازی استفاده شود. همان طور که در شکل نشان داده شده، استخوان انسانی که هنوز مواد آلی، آب و چربی خود را حفظ کرده است، به تصویر کشیده شده و علاوه بر نفوذپذیری بالاتر نسبت به استخوان های خشک و قدیمی، می‌توان به آن رسانایی نیز اختصاص داد. از سوی دیگر، در این مدل می‌توان استخوان هایی را تصور کرد که در طول زمان فرسوده شده و تنها قسمت معدنی آن باقی مانده است. در این حالت، مقدار رسانایی صفر است و نفوذپذیری الکتریکی می‌تواند نزدیک به زمینه یا خاک در نظر گرفته شود. پارامتر دیگری که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، پراکندگی استخوان ها در زیر زمین است که ممکن است به دلیل یک انفجار رخ دهد. برای مواجهه واقعی با مسئله، باید مدل واقعی تحلیل شود. به دلیل عدم امکان مدل سازی تمام شرایط زمین، چگالی استخوان و دیگر اهداف، عمق دقیق و اهداف خاص، طبقه بندی دقیق خاک، رطوبت، فشردگی و سختی خاک، و همچنین تعیین لایه های زمین، باید منطقاً با نتایج واقعی تشخیص متفاوت باشد. در مدل سازی و در نتیجه شبیه سازی، تا حد امکان، شرایط باید به طور عادلانه و منطقی اعمال شود. مدل مورد نظر برای شبیه سازی حالت مطلق شکل (۳) است.

تعداد بسیار کمی از سلول، می تواند مؤثر واقع شود. دوم این که، برای پیاده سازی لایه های کاملاً منطبق، تنها متغیرهای بسط مختصاتی در مناطق مرزی باید تغییر کنند و نه معادله های به روزرسانی تفاضل محدود حوزه زمان. به عبارتی معادلات به روز رسانی یکسانی در همه جای شبکه، مورد استفاده قرار می گیرد. به همین دلیل، لایه های کاملاً منطبق برای پیاده سازی های موازی ۱ بسیار مناسب است. در آخر، روش لایه های کاملاً منطبق پیچیده که در اینجا برای کدنویسی انتخاب شد دارای مزیت استقلال از محیط است [۲۲]. این به این معناست که این رویکرد به شکل ثابتی پیاده می شود، فارغ از این که محیطی که در حال مدل سازی آن هستیم دارای چه مشخصاتی است. برای مثال، حتی می توان فرمول های مربوط به تفاضل محدود حوزه زمان را به منظور در نظر گرفتن پراکندگی مدل سازی محیط مورد نظر، با مشخصات μ ، ϵ و σ تغییر داد.

۳-۱-۲- تعیین محدوده فرکانسی

یکی از مهم ترین متغیرها در GPR، محدوده فرکانسی است. انتخاب فرکانس مناسب، در عملکرد سیستم تاثیر بسزایی دارد. به طور کلی با توجه به جدول می توان عمق نفوذ نسبت به فرکانس را مشاهده نمود.

جدول ۱- عمق نفوذ و میدان دید بر حسب فرکانس [۲۳]

فرکانس	نفوذ تقریبی در خاک رس مرطوب متراکم	نفوذ تقریبی در شن و ماسه خشک
۱۰۰ مگاهرتز	۶ متر	بیش از ۱۸ متر
۲۵۰ مگاهرتز	۴ متر	۱۲ متر
۵۰۰ مگاهرتز	۱٫۸ متر	۴٫۴ متر
۱۰۰۰ مگاهرتز	۹۰ سانتیمتر	۱٫۸ متر

۳-۱-۲- مشخصات الکتریکی چند ماده

جدول ۲ مشخصات الکتریکی چند ماده کاربردی را با توجه به منبع [۲۴] نمایش می دهد.

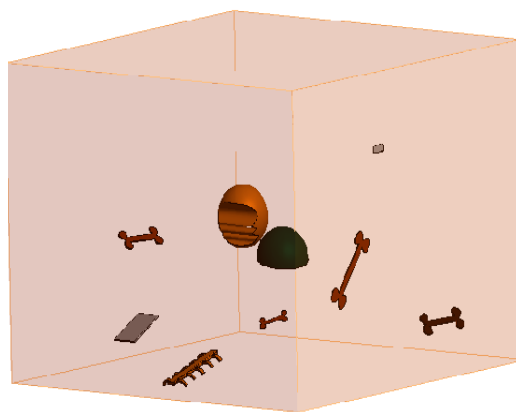
جدول ۲- مشخصات الکتریکی چند ماده مختلف [۲۴]

ماده	ϵ_r	$\sigma(mS/m)$	$V(m/ns)$	$\alpha(dB/m)$
استخوان کهنه	۵	۰٫۰۰۱	-	-
استخوان تازه	۲-۹	۰٫۰۰۵	-	-
ماسه خشک	۳-۵	۰٫۰۱	۰٫۱۵	۰٫۰۱
ماسه اشباع شده	۲۰-۳۰	۰٫۱-۱	۰٫۰۶	۰٫۰۳-۰٫۰۳
لای	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰٫۰۷	۱-۱۰۰
خاک رس	۵-۴۰	۲-۱۰۰۰	۰٫۰۶	۱-۳۰۰

¹ parallel implementations

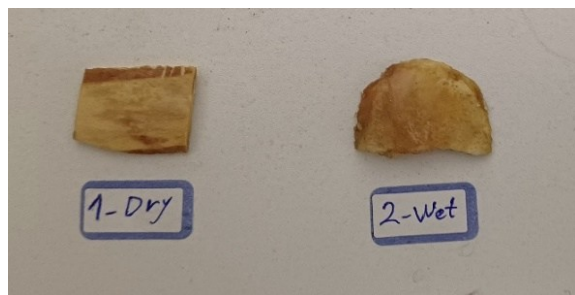


شکل ۵- برش و سوهان کاری نمونه های استخوان
شکل (۶) نمونه های مورد اندازه گیری را نشان می دهد.



شکل ۳- مدل مفهومی برای خاک یک لایه

برای مدل سازی واقع گرایانه ای که می تواند در شبیه سازی عددی به کار رود، یک لایه خاک با ضخامت ۵ متر، چندین استخوان با ضخامت ۵ سانتی متر و طول ۴۰ سانتی متر، یک استخوان با ضخامت ۲۰ سانتی متر و طول ۳۰ سانتی متر و استخوان دیگری با ضخامت ۱۵ سانتی متر و طول ۵۰ سانتی متر، البته با ویژگی های متناسب با استخوان تازه، و یک کلاه خود فلزی با ارتفاع ۷ سانتی متر و طول ۳۰ سانتی متر (که در جدول (۳) مشخص شده اند) در نظر گرفته شده است تا در عمق های مختلف قرار گیرد. برای دو نمونه استخوان جدید و قدیمی (مربوط به پیکر مطهر شهید) در آزمایشگاه آنتن مرکز صا ایران اندازه گیری انجام گرفت. شکل (۴) دو نمونه استخوان را نشان می دهد.



شکل ۶- نمونه های تحت اندازه گیری

در بازه فرکانسی ۲۰۰ مگاهرتز تا ۲ گیگاهرتز این اندازه گیری به روش خازنی انجام گرفت. روش خازن صفحه موازی، یکی از سریع ترین و دقیق ترین روش های تعیین ضریب دی الکتریک می باشد. در این روش، لایه نازکی از ماده جامد مسطح و یا مایع تحت آزمایش میان دو الکترود مسطح ساندویچ می شود. به این ترتیب خازن صفحه موازی تشکیل می شود و به کمک ظرفیت این خازن، ضریب دی الکتریک ماده محاسبه می شود. شکل (۷) دستگاه اندازه گیری HEWLETT PACKARD Model 16453A را نشان می دهد.



شکل ۴- دو نمونه استخوان جدید و قدیم انسانی

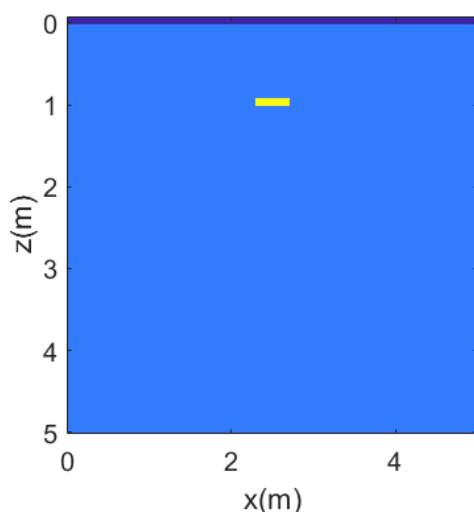
این استخوان ها برای اندازه گیری باید در ابعاد استاندارد برش داده شوند. در شکل (۵) مراحل این فرآیند آورده شده است.

۳-۱-۱-۱- نسبت سیگنال به نویز در عمق‌های ۱ متر، ۲ متر، ۳ متر و ۴ متر زمانی که استخوان قرار داده شده است

در شکل (۸)، آشکار سازی با سناریو B-Scan در عمق‌های مختلف انجام شده است. آنتن از در ارتفاع ۳ سانتیمتری از سطح خاک قرار گرفته و اسکن بطور کامل در عرض جعبه (۰ تا ۵ متر) خاک انجام شده است. در این شکل، نسبت سیگنال به نویز (SNR) برای هر عمق محاسبه شده است. بین زمان ارسال و دریافت سیگنال به مقصد و عمق آن رابطه‌ای وجود دارد که رابطه ۱ این موضوع را بیان می‌کند.

$$t_{depth} = \frac{depth \sqrt{\epsilon_r}}{2c} \quad (17)$$

که در آن c سرعت نور، $depth$ عمق قرارگیری هدف و ϵ_r ثابت دی الکتریک پس‌زمینه است.

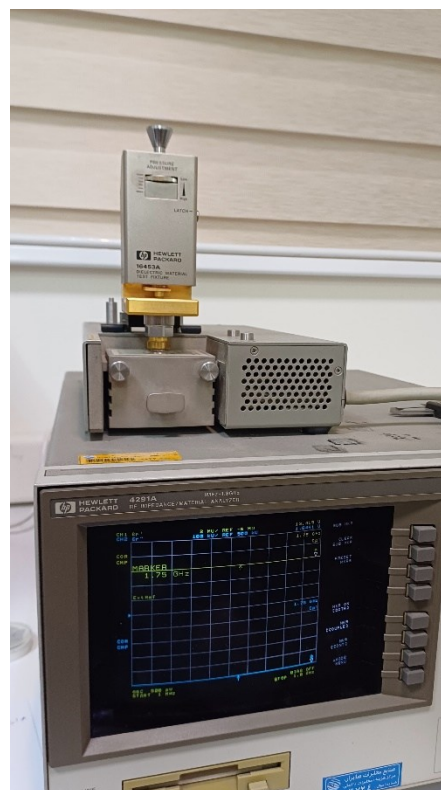


شکل ۱۸- قرارگیری استخوان در عمق ۱ تا ۴ متر

نتایج مربوط به شکل ۸ الف در شکل ۸ ب مشاهده می‌شود.

۳-۱-۱-۲- نسبت سیگنال به نویز در اندازه‌های مختلف استخوان

در این بخش، شبیه سازی تشخیص ۳ استخوان تازه ۱، تازه ۲ و تازه مرطوب که در جدول ۳ فهرست شده‌اند، در عمق ۲ متر انجام شده است، با این حال تمام شرایط شبیه سازی با شرایط بخش قبلی در عمق ۲ متر مطابقت دارد تا نسبت سیگنال به نویز مقایسه شود. شکل (۹) مدل هندسی شبیه سازی را نشان می‌دهد. در این مدل، استخوان قدیمی، مجسمه و استخوان تازه از راست به چپ در شکل (۹) نشان داده شده‌اند که هر کدام متناسب با ابعاد واقعی هستند. نتایج شبیه سازی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شوند. نسبت سیگنال به نویز ۲۵.۹۷ دسی بل است که بالاتر از مقدار هدف ۱۲.۲ دسی بل در عمق ۲ متر می‌باشد. حال در شکل (۱۱)، کلاه خود به همراه استخوان مدل سازی و شبیه سازی شده است.



شکل ۷- دستگاه اندازه گیری مشخصات الکترومغناطیسی استخوان جدول ۳ به توصیف مدل مورد نظر مربوط می‌شود.

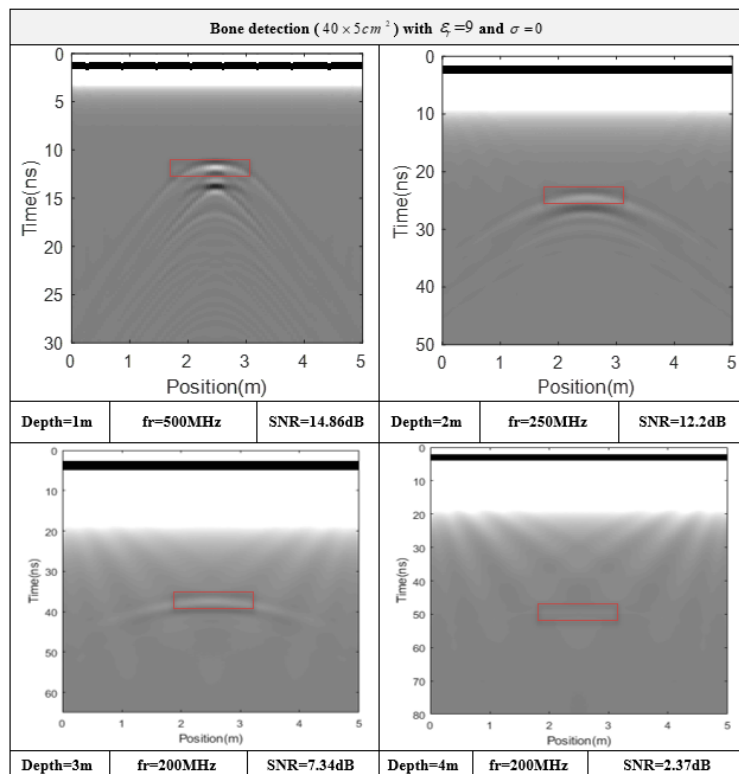
جدول ۳- مشخصات الکترومغناطیسی اهداف مورد استفاده در

مدل [۲۴]

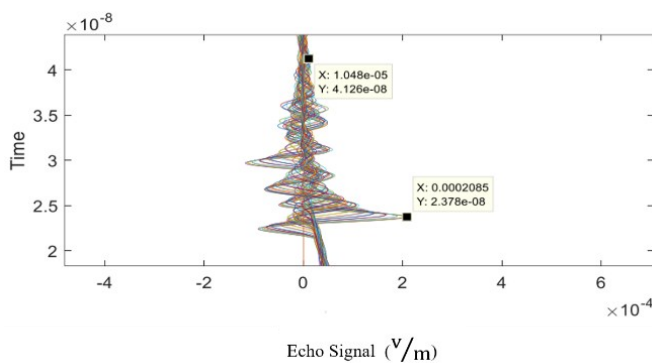
آیتم	اندازه	σ	ϵ_r
خاک خشک	$5 \times 5 m^2$	۰.۰۱	۳
استخوان تازه ۱	$40 \times 5 cm^2$	۰	۹
استخوان تازه ۲	$20 \times 30 cm^2$	۰	۹
استخوان تازه مرطوب	$50 \times 15 cm^2$	۰.۰۲	۲۰

۳-۱-۱-۳- شبیه سازی و نتایج مربوط به جدول ۳

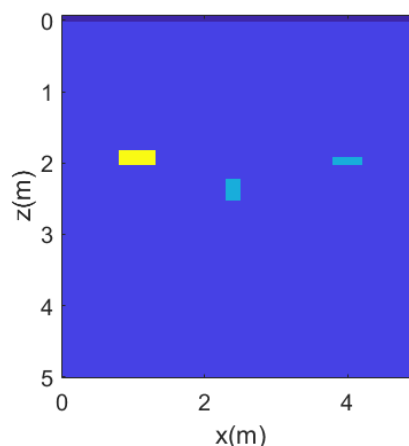
در این بخش، مدل تشخیص استخوان که مدل ایده آل آن توصیف شده است، به صورت عددی در دو بعدی FDTD با کد متلب شبیه سازی شده و نتایج آن ارائه شده است. هدف این بخش انتخاب الگوریتم تشخیص استخوان است. روش عددی یک لایه زمین با خاک خشک و نرمی متوسط را شبیه سازی می‌کند که در آن استخوان‌ها با تعداد و ویژگی‌های مختلف، به همراه برخی اشیاء فلزی، شبیه سازی شده‌اند. چندین بخش از تحلیل بر محاسبه نسبت سیگنال به نویز با توجه به عمق قرارگیری استخوان، محاسبه نسبت سیگنال به نویز با توجه به تعداد استخوان‌ها و محاسبه نسبت سیگنال به نویز با توجه به ابعاد استخوان‌ها تمرکز دارد تا اهداف مذکور را تحلیل و تفسیر کند. احتمال تشخیص با در نظر گرفتن پارامترهای تعداد، ابعاد و عمق محاسبه می‌شود.



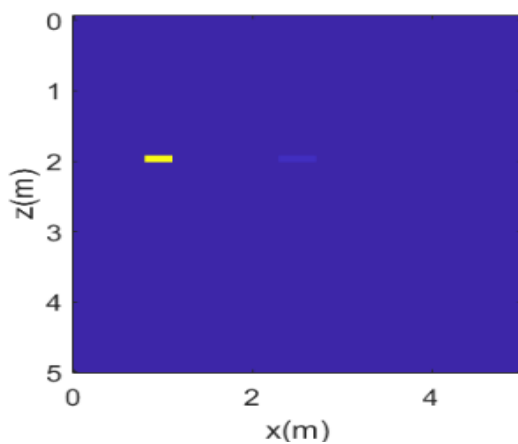
شکل ۸- آشکارسازی در ۴ عمق مختلف



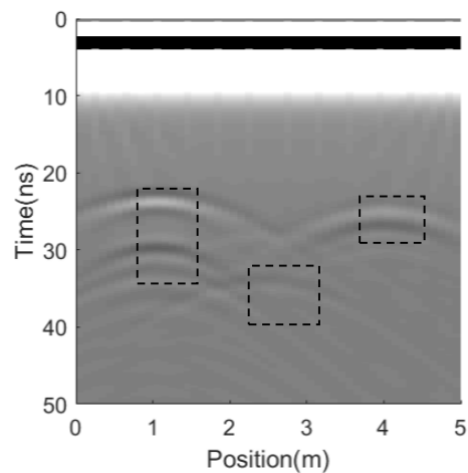
شکل ۱۰- دامنه سیگنال میدان الکتریکی برگشتی از هدف در طول زمان (نانوثانیه)



شکل ۹- استخوان با سایز های مختلف



شکل ۱۱ الف- مدل هندسی کلاه خود فلزی و استخوان کنار آن به فاصله ۱ سانتیمتر.



شکل ۱۰ الف- آشکارسازی رادار گرام مربوط به B-Scan
شکل (۹)

جدول ۴- تغییرات سیگنال به نویز نسبت به تغییرات اندازه

سلول شبکه

اندازه سلول (cm)	SNR(dB)	نسبت به ۰.۵ سانتیمتر
۲	۱۴.۲	۲.۱ درصد
۱	۱۴.۶	۰.۷ درصد
۰.۵	۱۴.۸۶	مرجع

۳-۲-۲- احتمال آشکارسازی

به منظور ارزیابی آماری عملکرد آشکارساز، احتمال آشکارسازی (P_d) و احتمال هشدار کاذب (P_{fa}) با فرض توزیع آماری رایلی برای پوش سیگنال (در حضور نویز) تخمین زده می‌شود [۱۸]. روابط تقریبی به صورت زیر هستند:

$$P_{fa} = \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (18)$$

$$P_d = Q_M(\sqrt{2SNR_{lin}}, \sqrt{-2\ln(P_{fa})})$$

که در آن λ آستانه در حوزه ولتاژ مربوط به (۱۲ دسیبل) و Q_M تابع توزیع استاندارد است. مقادیر محاسبه شده مطابق جدول ۵ می باشد.

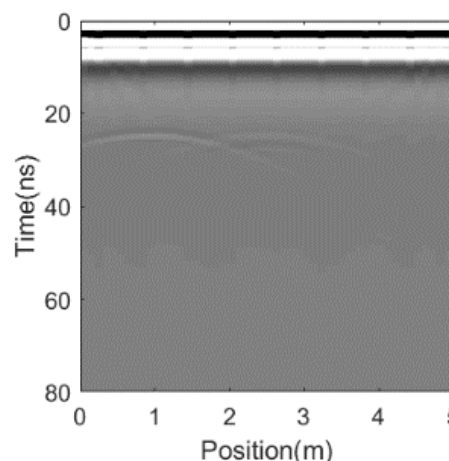
جدول ۵- احتمال آشکارسازی

عمق (m)	SNR (dB)	SNR_lin	Pd (تخمینی)	Pfa (تخمینی)
۲	۱۴.۸۶	۵/۵۳	۰/۹۶	۰/۰۰۸
۳	۷.۲	۲.۲۹	۰/۴۵	۰/۱۲
۴	۲.۳۷	۱/۳۱	<۰/۱	۰/۳۵

توجه: این مقادیر مبتنی بر ساده‌سازی‌های آماری بوده و برای کاربرد عملی نیاز به کالیبراسیون میدانی دارند.

۳-۳- نتایج شبیه سازی GPR دوبعدی B-scan و CST studio suite

برای مدل کردن زمین در برگیرنده استخوان از پروفایل خاک منطقه خوزستان استفاده شده است. از بین این مناطق در حال حاضر منطقه شلمچه و طلائیه به عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است. جدول (۶) مربوط به مشخصات فنی خاک منطقه می باشند. کلاس‌های بافت خاک^۱ برای ۶ عمق خاک (۰، ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر) در قدرت تفکیک زمینی ۲۵۰ متر مشخص شده است. این اطلاعات از کسرهای پیش بینی شده بافت خاک با استفاده از بسته بافت خاک آذر زبان برنامه نویسی R به دست آمده است. گذردهی الکتریکی نسبی خاک و استخوان به فرکانس وابسته است. برای لحاظ کردن این اثر در شبیه‌سازی FDTD، از مدل Deby مرتبه اول استفاده شده است:



شکل ۱۱-ب- آشکارسازی مدل هندسی شکل (۱۱ الف).

SNR=31dB

در این بخش، با افزایش تعداد استخوان‌ها با اندازه‌ها و قدمت‌های مختلف، همچنین با اضافه شدن کلاه خود، مشاهده می‌شود که نسبت سیگنال به نویز نسبت به استخوان به تنهایی که در بخش قبلی مورد بررسی قرار گرفت، افزایش می‌یابد. در شکل (۱۱) حضور کلاه خود فلزی در کنار استخوان باعث افزایش SNR از حدود ۱۵ دسی‌بل به ۳۱ دسی‌بل شده است. این افزایش غیرخطی است زیرا میدان کل حاصل جمع میدان‌های پراکنده شده از استخوان و فلز به اضافه جمله کوپلینگ برهم‌کنش متقابل می‌باشد:

$$E_{total} = E_{bone} + E_{metal} + E_{coupling}$$

و این افزایش به دلیل تعامل الکترومغناطیسی بین اهداف، غیرخطی است. جمله $E_{coupling}$ ناشی از بازتاب موج بین دو هدف بوده و بسته به فاصله و فاز می‌تواند به افزایش یا کاهش دامنه منجر شود. در این سناریو، فاصله ۱ سانتی‌متر و فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز منجر به هم‌فازی تقریبی و افزایش قابل توجه گردیده است. این پدیده برای اولین بار در این مقاله گزارش می‌شود. می‌توان گفت هرچه تعداد استخوان‌ها بیشتر باشد، نسبت سیگنال به نویز به طور قابل توجهی افزایش نمی‌یابد. مادامی که یک شیء فلزی با این توزیع مرتبط باشد. که در این حالت طبق شکل‌های (۱۰) و (۱۱) می‌توان دید که میدان پراکنده شده از اهداف و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که شناسایی کامل تنها با یک شیء فلزی امکان پذیر نیست، بلکه وجود استخوان نیز باید در اطراف آن شناسایی و مشخص شود و همچنین منطقی است که اگر شیء فلزی خود کلاه خود باشد، استخوانی نیز در اطراف آن وجود دارد.

۳-۲- جمع بندی نتایج

۳-۲-۱- همگرایی

جدول ۴ تغییرات SNR را با کاهش اندازه سلول (در عمق ۲ متر، فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز) نشان می‌دهد.

² soil texture

¹ USDA

جدول ۶- جنس خاک برخی از مناطق مرزی خوزستان (شیپ فایل خاک استان خوزستان)

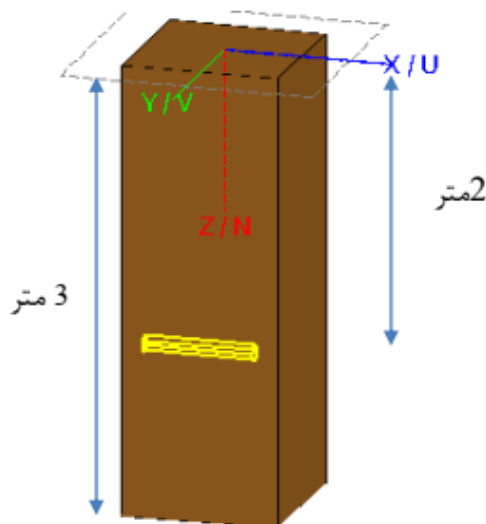
منطقه	سطح	عمق ۱۰ cm	عمق ۱۰۰ cm	عمق ۲۰۰ cm
شلمچه	لوم رسی ^۱	لوم رسی	لوم رسی	لوم رسی
نفت گاز				
اروندان				
منطقه دارخوین	لوم رسی	لوم رسی	لوم رسی	لوم رسی
طلایه	لوم رسی	لوم رسی	لوم رسی	لوم

مشخصات الکترومغناطیسی خاک منطقه واستخوان در جدول ۸ آورده شده است.

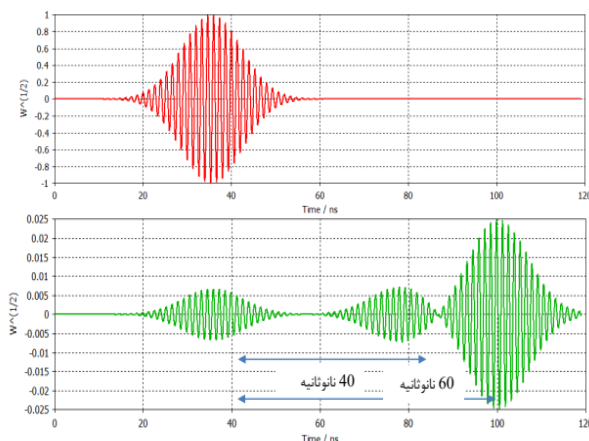
جدول ۸- جنس یک نمونه خاک از برخی از مناطق مرزی خوزستان به همراه استخوان

مشخصه	استخوان	خاک لوم رسی
ϵ_r	۵	۹
σ	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷
اندازه	استوانه (شعاع ۵ cm و طول ۴۰ cm)	مکعب (طول و عرض ۱ m و ارتفاع ۳ m)

مدل هندسی استخوان مدفون با ابعاد استوانه مطابق جدول (۳) در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. برای تابش میدان به عنوان فرستنده از پورت موجبری با شکل موج گوسی در فرکانس ۵۰۰ مگاهرتز استفاده شده است. سناریوی مونو استاتیک مد نظر می باشد. (نرم افزار CST studio suite).

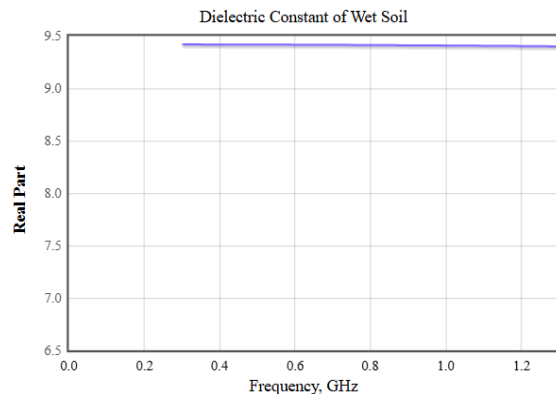


شکل ۱۳- مدل هندسی استخوان مدفون در خاک

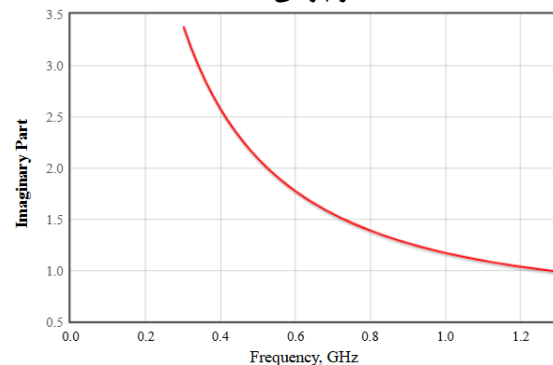


شکل ۱۴- سیگنال تابشی (قرمز رنگ) و سیگنال بازگشتی از هدف (سبز رنگ)

نمودار مقدار حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی خاک لوم رسی در بازه ۰.۳ تا ۱.۳ گیگاهرتز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ الف- نمودار مقادیر حقیقی گذردهی الکتریکی خاک لوم رسی



شکل ۱۲ ب- نمودار مقادیر موهومی گذردهی الکتریکی خاک لوم رسی

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_0} + \frac{\sigma_s}{j\omega\epsilon_0} \quad (19)$$

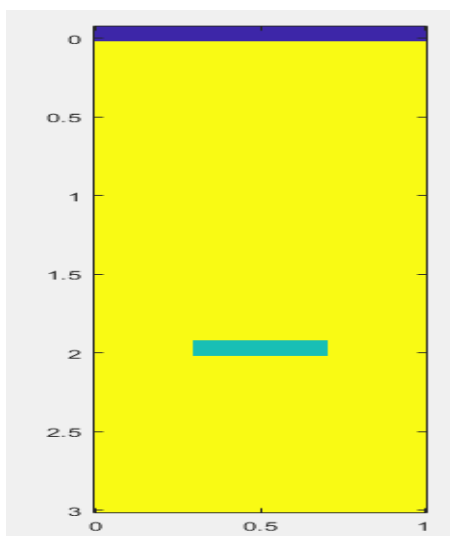
پارامترهای مدل برای خاک لوم رسی و استخوان تازه بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل ۱۲ الف و ب) با روش منحنی برازش استخراج گردید و در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- پارامترهای مدل Debye برای مواد مورد استفاده

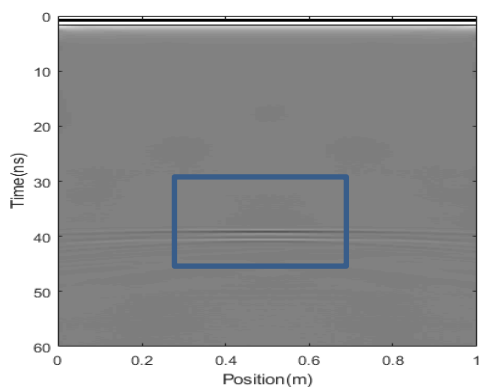
ماده	ϵ_∞	ϵ_s	$\tau_0 (ps)$	$\sigma_s (S/m)$
خاک لوم رسی	۴.۲	۹.۵	۵۰	۰.۰۰۷
استخوان تازه	۳.۵	۸	۳۰	۰.۰۱

¹ Clay loam

۱۴۰۸۶ دسی بل و در عمق ۴ متر و فرکانس ۲۰۰ مگاهرتز، این مقدار به ۲۰۳۷ دسی بل رسید.



الف



ب

شکل ۱۵ الف- مدل هندسی ب- آشکارسازی استخوان

تأثیر مشخصات هدف: ابعاد و ویژگی های دی الکتریک هدف تأثیر مستقیمی بر قدرت سیگنال بازگشتی دارد. هدف های بزرگ تر با گذردهی الکتریکی بالاتر سیگنال قوی تری تولید کرده و امکان تشخیص در عمق بیشتر را فراهم می کنند.

تأثیر حضور اهداف فلزی: حضور یک هدف فلزی در مجاورت استخوان منجر به افزایش قابل توجه و غیرخطی SNR تا ۳۱ دسی بل شد. این پدیده ناشی از برهم کنش الکترومغناطیسی بین اهداف و تشدید میدان های پراکنده شده است.

بهینه فرکانسی: مشاهدات حاکی از آن بود که فرکانس های پایین تر (۲۰۰-۲۵۰ مگاهرتز) برای نفوذ به اعماق بیشتر و فرکانس های بالاتر (۵۰۰ مگاهرتز) برای تشخیص اهداف با ابعاد کوچک تر و کسب وضوح بهتر مناسب تر هستند.

ارزیابی محیط انتشار: تأثیر پارامترهای الکترومغناطیسی خاک، به ویژه رسانایی و گذردهی، بر تضعیف موج و در نتیجه بر عملکرد سیستم به

۳-۳-۱- تعیین عمق هدف با استفاده از شکل موج پالس های خروجی

در این شبیه سازی به علت داشتن دو محیط متفاوت سرعت انتشار موج در هر یک از آن ها فرق دارد به صورتی که در فضای آزاد سرعت آن بیشتر و در محیط دوم (جعبه خاک) سرعت آن کمتر می باشد. سرعت موج الکترومغناطیسی در هر محیط متناسب با ثابت گذردهی الکتریکی نسبی (ϵ_r) آن محیط و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی (μ_r) تغییر پیدا می کند. سرعت موج از رابطه (۲۰) بدست می آید.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{m/s}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{m/ns}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (20)$$

عمق نفوذ امواج سامانه های راداری زمین نفوذ D با دانستن سرعت موج در محیط موردنظر و محاسبه زمان رفت و برگشت موج Δt امکان پذیر بوده و از رابطه (۲۱) بدست می آید. طبق رابطه (۲۱) به دست آوردن فواصل قرارگیری هر یک از عناصر کافی است، میزان تأخیر سیگنال برگشتی (Δt) از آن عنصر در نصف سرعت موج در آن محیط ضرب شود.

$$D_{(m)} = \frac{1}{2} v \Delta t \quad (21)$$

هدف و سکوی انتشاری هر دو در یک محیط قرار دارند فاصله پورت انتشاری تا سطح جعبه D1 برابر است:

$$D_1 = \frac{1}{2} v \Delta t_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \Delta t_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{3 \times 10^8}{\sqrt{9}} \right) (0) = 0$$

حال سیگنال برگشتی استخوان در جعبه زمین با تأخیر متفاوت دریافت می شود. فاصله پورت تا استخوان از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$D_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \Delta t_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{3 \times 10^8}{\sqrt{9}} \right) (40 \times 10^{-9}) = 2m$$

فاصله پورت تا کف جعبه نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$D_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \Delta t_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{3 \times 10^8}{\sqrt{9}} \right) (60 \times 10^{-9}) = 3m$$

مدل هندسی اعمال شده به شبیه سازی مطابق شکل ۱۵ الف) می باشد. تمامی مقادیر جدول (۳) در این شبیه سازی رعایت شده است. با توجه به شکل ۱۵ ب) هدف استخوان در عمق ۲ متری با تأخیر ۴۰ نانو ثانیه آشکار شده است.

۴- بحث و نتیجه گیری

یافته های کلیدی این تحقیق به شرح زیر است:

امکان تشخیص در اعماق مختلف: نتایج نشان داد که تحت شرایط ایده آل و با فرض محیطی همگن، تشخیص اهداف استخوانی تا عمق ۴ متر با نسبت سیگنال به نویز (SNR) قابل قبول میسر است. به طور مشخص، در فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز و عمق ۲ متر، SNR در حدود

وضوح مشاهده شد. این موضوع اهمیت مشخصات دقیق محیط زیرسطحی را پیش از انجام مطالعات میدانی نشان می‌دهد.

۴-۱- مقایسه و تبیین نوآوری

۱- در زمینه داده‌های الکترومغناطیسی ماده مختلف

مقالات مشابه (مانند [۴] و [۵]): این مطالعات عمدتاً بر روی استخوان‌های خشک حیوانات تمرکز داشته‌اند یا از داده‌های فرضی و کلی برای "جسد" استفاده کرده‌اند. این امر می‌تواند منجر به عدم دقت در مدل سازی برهم‌کنش موج با استخوان انسان در شرایط مختلف شود.

نوآوری پژوهش حاضر: در این مقاله، برای اولین بار، پارامترهای الکترومغناطیسی (گذردگی و تلفات) نمونه‌های واقعی استخوان انسان (هم نمونه‌های قدیمی و هم نمونه‌های جدید) در بازه فرکانسی وسیع ۲۰۰ مگاهرتز تا ۲ گیگاهرتز، در آزمایشگاه و با روش خازنی اندازه‌گیری شد (مستند در شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ و جداول ۲، ۳ و ۵). این مجموعه داده‌های آزمایشگاهی منحصر به فرد، پایه‌ای با صحت بسیار بالا برای مدل سازی‌های عددی فراهم کرده و یکی از ستون‌های اصلی نوآوری این کار محسوب می‌شود.

۲- در زمینه معیار سنجش عملکرد سیستم

مقالات مشابه (مانند [۱] و [۵]): بسیاری از مطالعات پیشین، کیفی هستند و عمدتاً به گزارش "تشخیص" یا "عدم تشخیص" هدف در شرایط میدانی بسنده می‌کنند. مطالعه [۷] نیز اگرچه عددی است، اما معیار آن "انرژی کل پالس" بوده که ارتباط مستقیم و خطی با قابلیت اطمینان تشخیص ندارد.

نوآوری پژوهش حاضر: این مقاله به ارائه یک تحلیل کمی، سیستماتیک و مهندسی بر مبنای پارامتر حیاتی نسبت سیگنال به نویز پرداخته است (نتایج کمی در بخش ۳ و شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱)، (ارائه مقادیر عددی مانند ۱۴.۸۶ دسی‌بل در عمق ۲ متر و ۲.۳۷ دسی‌بل در عمق ۴ متر) معیاری مستقیم، قابل مقایسه و بسیار کاربردی برای ارزیابی کارایی سیستم و تعیین آستانه‌های تشخیص در طراحی سخت‌افزارهای عملیاتی فراهم می‌کند.

۳- در زمینه بررسی تأثیر اهداف مرکب:

مقالات مشابه: تا آنجا که نویسندگان بررسی کرده‌اند، هیچ یک از مطالعات مشابه مرجع، به بررسی اثر حضور همزمان یک هدف فلزی در مجاورت مستقیم استخوان نپرداخته‌اند.

نوآوری پژوهش حاضر: این پژوهش برای اولین بار پدیده افزایش غیرخطی و قابل توجه SNR در حضور هدف فلزی مجاور را کشف، گزارش و تحلیل کرده است (شکل ۱۱). در سناریوی شبیه سازی شده، حضور یک کلاه خود فلزی در کنار استخوان، SNR را تا ۳۱ دسی‌بل افزایش داد. این یک یافته کاملاً نوآورانه است که می‌تواند مبنایی برای توسعه الگوریتم‌های تشخیصی هوشمندتر که از این "اثر تشدید" استفاده می‌کنند، باشد.

۴- در زمینه مدل سازی محیط انتشار (خاک)

مقالات مشابه: اغلب مطالعات موجود، محیط خاک را به صورت یک محیط همگن با پارامترهای الکتریکی فرضی یا عمومی مدل می‌کنند. نوآوری پژوهش حاضر: در این کار، از داده‌های واقعی مربوط به خاک مناطق مرزی استان خوزستان (شلمچه و طلائییه) استفاده شده و ویژگی‌های فیزیکی و بافت خاک این مناطق با نرم‌افزار تخصصی R تحلیل گردیده است (جدول ۴ و بخش ۳-۲). این امر باعث شده مدل سازی به شرایط واقعی میدان نزدیک‌تر شود و نتایج برای کاربرد در مناطق مورد مطالعه در ایران، از صحت و قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار باشد.

۵- در زمینه روش شبیه‌سازی و اعتبارسنجی:

مقالات مشابه (مانند [۷] و [۸]): معمولاً از یک روش یا نرم‌افزار واحد برای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند. نوآوری پژوهش حاضر: این مقاله از یک رویکرد ترکیبی و اعتبارسنجی متقابل بهره برده است. پیاده‌سازی روش FDTD با شرایط مرزی پیشرفته CPML در محیط MATLAB، همراه با شبیه‌سازی مستقل در نرم‌افزار CST Studio Suite و قسمت time domain است، انجام پذیرفت. این رویکرد، صحت و قابلیت اطمینان نتایج عددی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

مقاله حاضر به مدل سازی و شبیه‌سازی عددی سامانه‌ی رادار نفوذی زمین (GPR) با هدف تشخیص اهداف استخوانی دفن شده در محیط زیرسطحی پرداخت. با بهره‌گیری از روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) و اعمال شرایط مرزی جاذب پیشرفته ی (CPML)، شبیه‌سازی‌های دوطرفه در محیط‌های MATLAB و CST Studio Suite انجام شد. پارامترهای الکترومغناطیسی مورد استفاده در این پژوهش، مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده از نمونه‌های خاک مناطق مرزی استان خوزستان و نمونه‌های استخوان انسانی (کهنه و تازه) در بازه فرکانسی ۲۰۰ مگاهرتز تا ۲ گیگاهرتز بود.

مراجع

- [1] J. J. Schultz, "Using ground-penetrating radar to locate clandestine graves of homicide victims: Forming forensic archaeology partnerships with law enforcement," *Homicide Stud.*, vol. 11, no. 1, pp. 15–29, Feb. 2007, doi: 10.1177/1088767906296234.
- [2] M. S. A. L. Soliman, "Microwave techniques for the detection of buried objects," Ph.D. dissertation, School Elect. Electron. Eng., Univ. Manchester, Manchester, U.K., 2008.
- [3] D. J. Daniels, *Surface-Penetrating Radar*, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6. Stevenage, U.K.: Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [4] B. B. Schneider, G. P. Tsofilas, D. W. Steeples, R. D. Mandel, and J. Hofman, "Bone permittivity and its effect on using ground-penetrating radar," *Geophysics*, vol. 83, no. 1, pp. H1–H11, Jan.–Feb. 2018, doi: 10.1190/geo2017-0128.1.
- [5] W. Widodo, I. F. Aditama, K. Syaifullah, M. J. Mahya, and M. Hidayat, "Detecting buried human bodies using

- Part I: Theory,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 44, no. 1, pp. 134–142, Feb. 2002, doi: 10.1109/74.997945.
- [21] Eastern Mediterranean University, “Absorbing boundary conditions,” OpenCourseWare. Accessed: Jun. 22, 2026. [Online]. Available: https://opencourses.emu.edu.tr/pluginfile.php/2641/mod_resource/content/1/ABC.pdf
- [22] J. A. Roden and S. D. Gedney, “Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 334–339, Dec. 2000, doi: 10.1002/1098-2760(20001205)27:5<334::AID-MOP14>3.0.CO;2-A.
- [23] R. D. Grisso, M. M. Alley, D. L. Holshouser, and W. E. Thomason, *Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity*. Blacksburg, VA, USA: Virginia Cooperative Extension, Publ. 442-508, 2005.
- [24] A. P. Annan, “GPR—History, trends, and future developments,” *Subsurf. Sens. Technol. Appl.*, vol. 3, no. 4, pp. 253–270, Oct. 2002, doi: 10.1023/A:1020657129590.
- ground-penetrating radar,” *Earth Sci. Res.*, vol. 5, no. 2, p. 59, 2016, doi: 10.5539/esr.v5n2p59.
- [6] B. B. Schneider, “GPR imaging of prehistoric animal bone-beds,” Ph.D. dissertation, Dept. Geology, Univ. Kansas, Lawrence, KS, USA, 2017.
- [7] A. Akinsunmade, J. Karczewski, E. Mazurkiewicz, and S. Tomecka-Suchoń, “Finite-difference time-domain (FDTD) modeling of ground-penetrating-radar pulse energy for locating burial sites,” *Acta Geophys.*, vol. 67, no. 6, pp. 1945–1953, Dec. 2019, doi: 10.1007/s11600-019-00352-9.
- [8] K. Özkap, E. Pekşen, İ. Kaplanvural, and D. Çaka, “3D scanner technology implementation to numerical modeling of GPR,” *J. Appl. Geophys.*, vol. 179, Art. no. 104086, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.104086.
- [9] R. Ahmadi, “Detecting the location of unmarked graves for archaeological purposes using ground-penetrating radar (GPR),” *J. Res. Archaeometry*, vol. 5, no. 2, pp. 15–33, 2019, doi: 10.29252/jra.5.2.15.
- [10] J. S. Mellett, “Location of human remains with ground-penetrating radar,” in *Proc. 4th Int. Conf. Ground Penetrating Radar*, Rovaniemi, Finland, 1992, pp. 359–365, doi: 10.3997/2214-4609-pdb.303.45.
- [11] S. M. Patch, “Identification of unmarked graves at B. F. Randolph Cemetery using ground-penetrating radar (GPR), Richland County, South Carolina,” New South Associates, Stone Mountain, GA, USA, Tech. Rep. 1748, 2009, report submitted to the Historic Columbia Foundation.
- [12] P. M. Barone, K. J. Swanger, N. Stanley-Price, and A. Thursfield, “Finding graves in a cemetery: Preliminary forensic GPR investigations in the Non-Catholic Cemetery in Rome (Italy),” *Measurement*, vol. 80, pp. 53–57, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2015.11.023.
- [13] J.-P. Fernández-Álvarez, D. Rubio-Melendi, A. Martínez-Velasco, J. K. Pringle, and H.-D. Aguilera, “Discovery of a mass grave from the Spanish Civil War using ground-penetrating radar and forensic archaeology,” *Forensic Sci. Int.*, vol. 267, pp. e10–e17, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.forsciint.2016.05.040.
- [14] W. C. Chew and W. H. Weedon, “A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell’s equations with stretched coordinates,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 13, pp. 599–604, Sep. 1994, doi: 10.1002/mop.4650071304.
- [15] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York, NY, USA: Wiley, 1989.
- [16] F. J. Harris, “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform,” *Proc. IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, Jan. 1978, doi: 10.1109/PROC.1978.10837.
- [17] Y. H. Chen, W. C. Chew, and M. L. Oristaglio, “Application of perfectly matched layers to the transient modeling of subsurface EM problems,” *Geophysics*, vol. 62, no. 6, pp. 1730–1736, Nov.–Dec. 1997, doi: 10.1190/1.1444273.
- [18] M. Moghaddam, E. J. Yannakakis, W. C. Chew, and C. Randall, “Modeling of the subsurface interface radar,” *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 5, no. 1, pp. 17–39, 1991, doi: 10.1163/156939391X00455.
- [19] T. Xu and G. A. McMechan, “GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions,” *Geophysics*, vol. 62, no. 2, pp. 403–414, Mar.–Apr. 1997, doi: 10.1190/1.1444151.
- [20] S. V. Georgakopoulos, C. R. Birtcher, C. A. Balanis, and R. A. Renaut, “Higher-order finite-difference schemes for electromagnetic radiation, scattering, and penetration,