

علمی-پژوهشی

تعیین عمق و قطر اهداف هادی استوانه‌ای مدفون در محیط پس‌زمینه نامعلوم با استفاده از

رادار نفوذ در زمین

مصطفی صاحبکاری^۱، سیدمحمدسعید ماجدی^{۲*}، امیررضا عطاری^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، ۳- استاد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

رادار نفوذ در زمین یکی از ابزارهای توانمند برای تشخیص غیر مخرب اهداف مدفون در زمین است. این رادار می‌تواند بر اساس سیگنال دریافت شده ناشی از ارسال موج الکترومغناطیسی به درون زمین، مکان و شکل هدف را به‌دست آورد. هدف از این مقاله، تعیین عمق و قطر اهداف هادی استوانه‌ای مدفون در محیط پس‌زمینه نامعلوم با کمک رادار نفوذ در زمین است. از جمله مصادیق این مسئله می‌توان به تشخیص لوله‌های آب، نفت و یا گاز در زیر سطح زمین اشاره کرد. بدین منظور، الگوریتم راداری SAR مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش جدیدی برای تخمین عمق و قطر پراکنده‌ساز با فرض نامعلوم بودن ضریب گذردهی محیط میزبان پیشنهاد می‌شود. هندسه مسئله دوبعدی و پیکربندی آنتن‌ها مشابه ساختارهای تجاری چندتک‌پایه است. به‌منظور ارزیابی، روش پیشنهادی بر روی داده‌های خام مرتبط با اهداف مدفون در عمق یک متری پیاده‌سازی می‌شود. برای دستیابی به این داده‌ها جهت بازسازی شکل پراکنده‌ساز از نرم‌افزار GPRMAX_2D استفاده شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی نشان می‌دهند که عمق و قطر اهداف با دقت قابل قبولی تخمین زده می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم SAR، بازسازی شکل پراکنده‌ساز، تشخیص غیر مخرب، رادار نفوذ در زمین

۱. مقدمه

بورن [۳]، کیرششف [۴] و روش رادار دهانه ترکیبی^۲ [۵] اشاره کرد.

در مقاله [۶] از روش تقریب بورن برای بازسازی شکل لوله‌های فلزی و پلاستیکی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تقریب بورن برای بازسازی شکل اهدافی مناسب است که اختلاف ثابت دی الکتریک آن با محیط میزبان ناچیز باشد. بنابراین استفاده از این الگوریتم برای بازسازی شکل اهداف فلزی پیشنهاد نمی‌شود. در مقاله [۷]، الگوریتم کیرششف (یا PO^۳) و عملکرد آن برای بازسازی اهداف هادی استوانه‌ای در ابعاد مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد این الگوریتم برای بازسازی اهداف هادی استوانه‌ای بزرگ مناسب است. برای بازسازی شکل اهداف هادی، الگوریتم SAR نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم از لحاظ تئوری و پیاده‌سازی نرم‌افزاری نسبت به الگوریتم کیرششف پیچیدگی و بار عملیاتی کمتری دارد [۵].

یکی از مسائل مهم در حوزه تشخیص لوله‌های زیرزمینی، تعیین قطر سطح مقطع پراکنده‌ساز است. تمرکز بیشتر مقالات مرتبط با تخمین قطر، بر روی تحلیل داده‌های خام GPR است.

رادار نفوذ در زمین^۱ به‌عنوان یک ابزار مناسب در زمینه تشخیص مکان‌یابی و بازسازی شکل اهداف مدفون در زمین استفاده می‌شود. این رادار به‌دلیل غیر مخرب بودن و سرعت قابل قبول در بررسی ساختارهای غیرشفاف، در زمینه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این زمینه‌ها می‌توان به بررسی یک‌پارچگی ساختار بتونی پل‌ها، تحقیقات زمین‌شناسی، بررسی سلامت درختان، نظارت بر شبکه آب و فاضلاب شهری و کاربردهای نظامی همچون مین‌یابی و تونل‌یابی اشاره کرد [۱-۲].

چالش مهم در استفاده از رادار نفوذ در زمین، نیاز به تحلیل داده‌های خام آن است که مستلزم داشتن تجربه کافی در زمینه استفاده از چنین راداری است. بنابراین استفاده از الگوریتم‌هایی که تصاویر قابل اعتماد از ناحیه مورد بررسی را بازسازی کنند، اهمیت زیادی دارد. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های مبتنی بر پراکندگی معکوس با تقریب خطی سازی

^۲ Synthetic Aperture Radar (SAR)

^۳ Physical Optics (PO)

* نویسنده پاسخگو: majedi@um.ac.ir

^۱ Ground Penetrating Radar (GPR)

عمق هدف است و اثر دیگری که رخ می‌دهد عدم تمرکز هدف بازسازی شده است. بنابراین، ضریب گذردهی نسبی متناظر با بیشترین تمرکز هدف بازسازی شده، برابر با مقدار واقعی ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان در نظر گرفته می‌شود.

مقاله [۱۴]، اثر ندانستن ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان را بر روی بازسازی شکل هدفی غیر نقطه‌ای، به کمک الگوریتم کیرشهف بررسی می‌کند. این مقاله نشان می‌دهد که ضریب گذردهی نسبی متناظر با بیشترین تمرکز هدف بازسازی شده، همواره کمتر از مقدار واقعی ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان است.

در این مقاله روش جدیدی بر پایه تحلیل داده‌های پردازش شده برای تعیین عمق و قطر پراکنده‌ساز هادی استوانه‌ای مدفون درون محیط پس‌زمینه نامعلوم ارائه شده است. این روش مبتنی بر تطبیق رویه بازسازی شده با دایره متناظر با سطح مقطع پراکنده‌ساز است. بدین منظور، از هندسه دوبعدی شکل (۱) برای جمع‌آوری داده‌های خام و از الگوریتم SAR برای بازسازی رویه پراکنده‌ساز استفاده می‌شود.

هدف مورد بررسی، استوانه‌ای فلزی با سطح مقطع دایروی به قطر $D_a = 2r_a$ است که مرکز آن در مختصات (x_a, y_a) قرار دارد. نیم‌فضای بالایی، هوا و نیم‌فضای پایینی، خاک همگن با ضریب گذردهی نسبی $\epsilon_a = 4$ و رسانندگی صفر در نظر گرفته شده است. بازه در نظر گرفته شده برای حرکت آنتن فرستنده و گیرنده به منظور جمع‌آوری داده‌های میدان $[-x_M, x_M]$ و مجموعاً به طول $2x_M = 4$ m است. این مسیر حرکت که خط اسکن^۲ نامیده می‌شود، موازی با مرز دو محیط است. برای جمع‌آوری داده‌ها، پیکربندی چندتک‌پایه^۳ در نظر گرفته شده است. این نوع پیکربندی مشابه پیکربندی رادارهای نفوذ در زمین تجاری است. در این پیکربندی فرض می‌شود که آنتن‌های فرستنده و گیرنده در یک نقطه قرار دارند. به بیان دیگر نقطه منبع و مشاهده بر هم منطبق هستند. در طول خط اسکن، آنتن‌ها ۱۶۱ بار عمل ارسال و دریافت سیگنال را انجام می‌دهند. فاصله بین نقاط ارسال/دریافت سیگنال در طول خط اسکن، ۲/۵ سانتی‌متر معادل با یک چهارم طول موج متناظر با بیشترین فرکانس کاری رادار ($f_{\max} = 1500$ MHz) درون محیط پس‌زمینه است.

مباحث ارائه شده در این مقاله به ترتیب زیر هستند. در بخش دوم الگوریتم تصویربرداری SAR و نحوه پیاده‌سازی آن را توضیح می‌دهیم. در بخش سوم به بیان روش پیشنهادی برای

مقاله [۸]، نشان می‌دهد که شکل هذلولی به دست آمده از اسکن هدف استوانه‌ای دارای اطلاعات مربوط به مکان، عمق و قطر پراکنده‌ساز است. مقاله [۹]، با تحلیل نقاط واقع بر روی هذلولی به دست آمده از داده‌های خام و حل معادلات هذلولی، شعاع هدف استوانه‌ای به قطر ۸۰ سانتی‌متر و مدفون در عمق ۱ متری را با خطای تقریباً ۳ درصد تخمین می‌زند.

یکی دیگر از مسائلی که در تشخیص اهداف مدفون در زمین باید بررسی شود، تعیین پارامتر ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان است. روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان وجود دارد. روش‌های تعیین ضریب گذردهی نسبی در حوزه اندازه‌گیری GPR را می‌توان به دو دسته روش‌های مخرب مثل روش TDR^۱ و روش‌های غیرمستقیم از روی داده‌های تصویربرداری GPR تقسیم کرد [۱۰]. در برخی از کاربردها امکان تخریب محیط میزبان برای اندازه‌گیری ضریب گذردهی نسبی به کمک روش TDR وجود ندارد. همچنین در کاربردهایی که ناحیه وسیعی را مورد بررسی قرار می‌دهیم، استفاده از چنین روشی بسیار زمان‌بر خواهد بود. در طرف مقابل روش‌هایی که مبتنی بر تحلیل داده‌های رادار نفوذ در زمین برای اندازه‌گیری ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان هستند، علاوه بر غیرمخرب بودن، زمان اندازه‌گیری را نیز به شدت کاهش داده‌اند. این روش‌ها مبتنی بر استفاده از داده‌های خام GPR یا داده‌های پردازش شده هستند [۱۱]. در روش مبتنی بر تحلیل داده‌های خام GPR، ضریب گذردهی خاک با بررسی شکل هذلولی تخمین زده می‌شود. در مرجع [۲]، ضریب گذردهی تخمین زده شده به کمک این روش برای داده‌های بدون نویز، نویزی و عبور داده شده از فیلتر پایین‌گذر برای محیطی با ضریب گذردهی ۱۰ به ترتیب برابر با ۸/۶، ۷۳ و ۱۲ گزارش شده است. نتایج این روش حساس به نویز بوده و برای حالت بدون نویز هم جواب قابل قبولی را ارائه نمی‌دهد.

مقاله [۱۲]، اثر ندانستن ضریب گذردهی نسبی را بر روی مسئله یک بعدی مورد بررسی قرار داده و نشان می‌دهد که اصلی‌ترین تأثیر آن بر روی عمق هدف بازسازی شده است. برای تعیین مکان هدف از روش توموگرافی یک بعدی با تقریب بورن استفاده شده است. مقاله [۱۳] رویکردی مشابه مقاله [۱۲] دارد با این تفاوت که اثر ندانستن ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان بر روی بازسازی شکل هدفی دو بعدی، به کمک الگوریتم توموگرافی بررسی می‌شود. پراکنده‌ساز به صورت هدف نقطه‌ای در نظر گرفته شده است. این مقاله نشان می‌دهد که انتخاب اشتباه ضریب گذردهی نسبی محیط میزبان برای الگوریتم تصویربرداری می‌تواند دو اثر مهم داشته باشد. اولین مورد مربوط به تغییر در

^۲ Scan Line

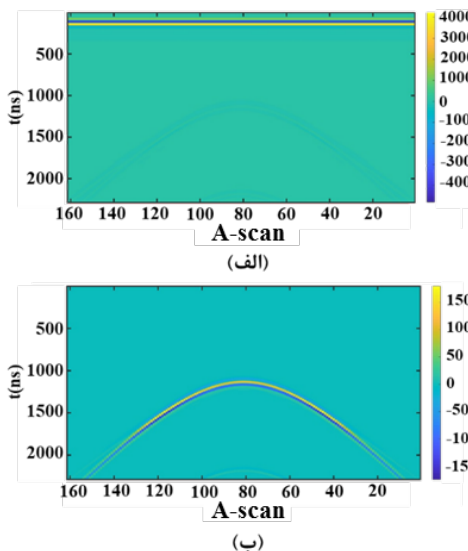
^۳ Multi-Monostatic

^۱ Time Domain Reflectometer (TDR)

در الگوریتم SAR، هندسه شکل (۱) با استفاده از نرم‌افزار GPRMax شبیه‌سازی می‌شود. این نرم‌افزار که در مدل‌سازی سیگنال‌های دریافتی توسط رادار نفوذ در زمین کاربرد دارد، از الگوریتم Yee و روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی زمان^۱، برای حل معادلات ماکسول در فضای دو بعدی استفاده می‌کند. دستورهای این نرم‌افزار به زبان پایتون^۲ نوشته می‌شوند [۱۵].

شبیه‌سازی‌ها در بازه فرکانسی $f_{\min} = 500 \text{ MHz}$ تا $f_{\max} = 1500 \text{ MHz}$ با گام فرکانسی 25 MHz (۴۱ فرکانس) انجام می‌شوند. این بازه فرکانسی متداولی است که برای GPR تجاری در نظر گرفته می‌شود. گام فرکانسی به‌گونه‌ای انتخاب شده است تا موقعیت هدف مدفون تا عمق ۳ متر را بتوان بدون ابهام تعیین کرد. آنتن در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی نیز خط جریان به طول بی‌نهایت است.

خروجی این نرم‌افزار داده‌های میدان کل در حوزه زمان است. میدان کل شامل میدان تابشی و میدان پراکنده‌شده از هدف و مرز دو محیط است. به‌منظور استفاده از این داده‌ها جهت تصویرسازی به کمک الگوریتم SAR، باید ابتدا میدان بازگشتی از مرز دو محیط حذف شده و سپس با استفاده از تبدیل فوریه، داده‌های میدان از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل شوند.

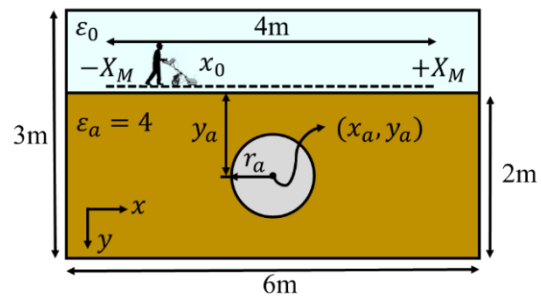


شکل (۲): داده‌های خام به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار

GPRMax به‌ازای یک پراکنده‌ساز هادی استوانه‌ای با شعاع ۲۵۰ میلی‌متر و عمق ۱ متر، (الف) قبل از حذف پس‌زمینه، (ب) بعد از حذف پس‌زمینه.

روش‌های مختلفی برای حذف میدان بازگشتی از مرز دو محیط ارائه شده است که از آن میان می‌توان به روش‌های کم

تعیین عمق و قطر پراکنده‌ساز می‌پردازیم. در بخش چهارم نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی را بر روی یک ساختار مشخص بررسی می‌کنیم. نهایتاً در بخش پنجم اثر عواملی همچون فرکانس کار، طول خط اسکن، عمق پراکنده‌ساز، حضور هم‌زمان دو پراکنده‌ساز و رسانندگی محیط را بر الگوریتم پیشنهادی بررسی کرده و عملکرد آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.



شکل (۱): هندسه مسئله برای جمع‌آوری داده‌های خام

۲. الگوریتم تصویربرداری SAR

الگوریتم SAR، یکی از روش‌های راداری پردازش داده‌های خام رادار نفوذ در زمین است که بر روی داده‌های حوزه فرکانس اجرا می‌شود. در روش SAR، محیط مورد بررسی، به سلول‌های کوچکی تقسیم شده و برای هر سلول، فاصله تا محل آنتن‌های فرستنده و گیرنده تعیین می‌شود. سپس اختلاف فاز حاصل از ارسال و دریافت موج از هر یک از سلول‌ها محاسبه شده و قرینه آن به سیگنال‌های دریافت‌شده توسط آنتن مورد نظر در فرکانس‌های مختلف اعمال می‌شود. رابطه زیر مجموع این اعمال فازها را در طول یک خط اسکن و به ازای فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$R(x, y) = \int_{-X_M}^{X_M} \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} \hat{S}_R(x_0, k) \exp(j 2k \sqrt{(x-x_0)^2 + y^2}) dx_0 dk \quad (1)$$

که در آن $\hat{S}_R(x_0, k)$ سیگنال دریافتی در محل آنتن قرار داده شده در نقطه $x_0 \in [-X_M, X_M]$ (متعلق به خط اسکن) در حوزه فرکانس بوده، دامنه تصویر در محل x و y و $k = \omega/c$ است.

از آنجا که فقط فاز دریافتی از سلولی که دارای پراکنده‌ساز است، با قرینه فاز محاسبه شده برابری می‌کند، دامنه حاصل از رابطه (۱) در محل آن سلول به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد [۵]. بنابراین با نمایش رابطه (۱) به صورت تصویر دوبعدی، نقاط دارای پراکنده‌ساز، پررنگ‌تر از سایر نقاط مشاهده خواهند شد.

در این مقاله برای تولید داده‌های خام مورد نیاز برای استفاده

^۱ Finite-Difference Time-Domain (FDTD)

^۲ Python

در این بخش روش جدیدی را پیشنهاد می‌دهیم که عمق و قطر پراکنده‌ساز هادی استوانه‌ای در محیط پس‌زمینه با ضریب گذردهی نامعلوم را بر پایه تصویرسازی از داده‌های خام رادار نفوذ در زمین، به‌دست می‌آورد. روش پیشنهادی مبتنی بر تطبیق رویه بازسازی‌شده با دایره‌ی متناظر با سطح مقطع پراکنده‌ساز است. جهت درک بهتر، ابتدا مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی با فرض معلوم بودن محیط پس‌زمینه توضیح داده می‌شود. سپس در ادامه تعمیم این روش برای محیط پس‌زمینه نامعلوم ارائه خواهد شد.

۳-۱. تعیین موقعیت و قطر پراکنده‌ساز استوانه‌ای در

محیط پس‌زمینه با ضریب گذردهی معلوم

مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است. توضیح این مراحل به‌ترتیب زیر است.

گام اول: پیاده‌سازی الگوریتم تصویرسازی و تعیین فاصله

هر نقطه واقع بر رویه بازسازی‌شده تا عمق فرضی

در ابتدا به کمک الگوریتم SAR و با استفاده از ضریب گذردهی محیط، تصویر رویه پراکنده‌ساز را که کماتی از دایره متناظر با سطح مقطع پراکنده‌ساز است، مشابه شکل (۳)، بازسازی می‌کنیم. حال باید با استفاده از این تصویر، عمق (یا مرکز دایره) پراکنده‌ساز و شعاع آن را تعیین کنیم. عمق صحیح، مکانی است که فاصله آن تا نقاط رویه مقداری ثابت (که همان شعاع است) باشد.

برای این منظور ابتدا با توجه به کاربرد مورد نظر، بازه‌ای مناسب برای عمق پراکنده‌ساز $([y_{MIN}, y_{MAX}])$ تعیین می‌کنیم. سپس به ترتیب از هرکدام از نقاط این بازه (y_c) خطوطی را به نقاط واقع بر روی خط اسکن متصل می‌کنیم. برای مسئله تعریف شده تعداد نقاط واقع بر خط اسکن ۱۶۱ عدد بوده و در نتیجه ۱۶۱ خط از مرکز فرضی به این نقاط متصل می‌شود. ماکزیمم مقدار تصویر دوبعدی در راستای هر خط محاسبه شده و مقدار آن برابر با یک و باقی‌مقادیر صفر در نظر می‌گیریم. به این ترتیب رویه پراکنده‌ساز بازسازی می‌شود.

شکل (۵) به‌عنوان نمونه نحوه بازسازی رویه را برای تصویر شکل (۳) و به ازای مرکز فرضی منطبق بر مرکز واقعی $(y_c = y_a)$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که رویه بازسازی‌شده منطبق بر سطح مقطع پراکنده‌ساز شده است.

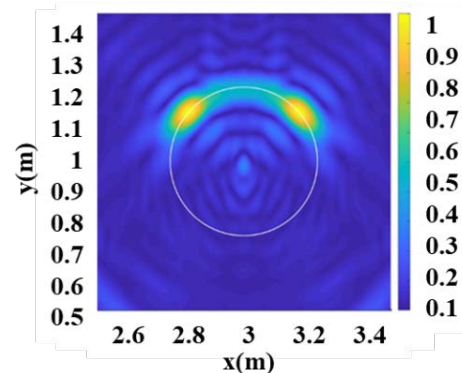
در ادامه فاصله نقاط واقع بر رویه بازسازی‌شده تا عمق فرضی را به کمک رابطه زیر محاسبه می‌کنیم.

$$R = \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_c)^2} \quad (2)$$

کردن پس‌زمینه^۱، پنجره زمانی^۲ و حذف میانگین^۳ اشاره کرد [۱۶]. از میان این روش‌ها، در این مقاله روش کم کردن پس‌زمینه به‌دلیل پیاده‌سازی ساده‌تر بر روی داده‌های شبیه‌سازی، انتخاب شده است. در این روش ابتدا میدان را در حضور پراکنده‌ساز و سپس در غیاب آن اندازه‌گیری می‌کنیم. میدان پراکنده‌شده از هدف از تفریق این دو میدان به‌دست می‌آید.

شکل (۲-الف) داده‌های خام حاصل از نرم‌افزار GPRMax را به ازای یک پراکنده‌ساز هادی استوانه‌ای با شعاع ۲۵۰ میلی‌متر و عمق ۱ متر قبل از حذف پس‌زمینه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بازگشتی از پراکنده‌ساز نسبت به پس‌زمینه بسیار کمتر است و نمی‌توان میدان بازگشتی از پراکنده‌ساز را تشخیص داد. شکل (۲-ب) داده‌های خام پس از حذف پس‌زمینه را نشان می‌دهد. در این حالت بازگشتی از پراکنده‌ساز به‌راحتی قابل تشخیص است.

با اعمال الگوریتم SAR بر روی داده‌های خام حاصل از نرم‌افزار GPRMax، پس از حذف پس‌زمینه و انتقال به حوزه فرکانس، تصویر نشان داده شده در شکل (۳)، به‌دست می‌آید.



شکل (۳): تصویر به‌دست‌آمده از اعمال الگوریتم SAR به همراه سطح مقطع پراکنده‌ساز هادی استوانه‌ای با شعاع ۲۵۰ میلی‌متر و عمق ۱ متر همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، در تصویر بازسازی‌شده، برخلاف انتظار رویه به‌دست آمده دارای ناپیوستگی است. دلیل این امر اثر تغییر الگوی تشعشعی^۴ آنتن در مجاورت سطح زمین است. در بخش بعد خواهیم دید که وجود نقصان در رویه بازسازی‌شده، در روند تعیین موقعیت و قطر پراکنده‌ساز با استفاده از روش ارائه شده، اثری نخواهد داشت.

۳. روش پیشنهادی

¹ Background Subtraction

² Time Gating

³ Subtraction of the average track

⁴ Radiation Pattern

در رابطه (۲)، (x_a, y_c) مختصات مرکز فرضی پراکنده‌ساز و (x, y) مختصات نقاط واقع بر رویه بازسازی شده هستند. این روند را برای تمام عمق‌های فرضی که در بازه تغییرات قرار دارند تکرار کرده و ماتریس D را مطابق زیر تکمیل می‌نماییم.

$$D = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & \dots & R_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

D یک ماتریس $m \times n$ است که m تعداد نقاط واقع بر رویه بازسازی شده و n تعداد عمق‌های فرضی در نظر گرفته شده برای پراکنده‌ساز است. بنابراین هر یک از درایه‌های این ماتریس نمایانگر فاصله یک نقطه واقع بر رویه بازسازی شده تا عمق فرضی است.

گام دوم: تعیین عمق و شعاع پراکنده‌ساز

اگر پراکنده‌ساز دایره‌ای به شعاع R باشد، انتظار می‌رود که فواصل نقاط واقع بر رویه بازسازی شده تا عمق صحیح (که همان مرکز پراکنده‌ساز است) دارای کمترین انحراف معیار^۱ باشند. بنابراین به منظور تعیین عمق پراکنده‌ساز، انحراف معیار عناصر هر ستون از ماتریس D را محاسبه نموده و مطابق رابطه (۴) آن را بردار STD می‌نامیم.

$$STD = [std_1 \quad \dots \quad std_n] \quad (4)$$

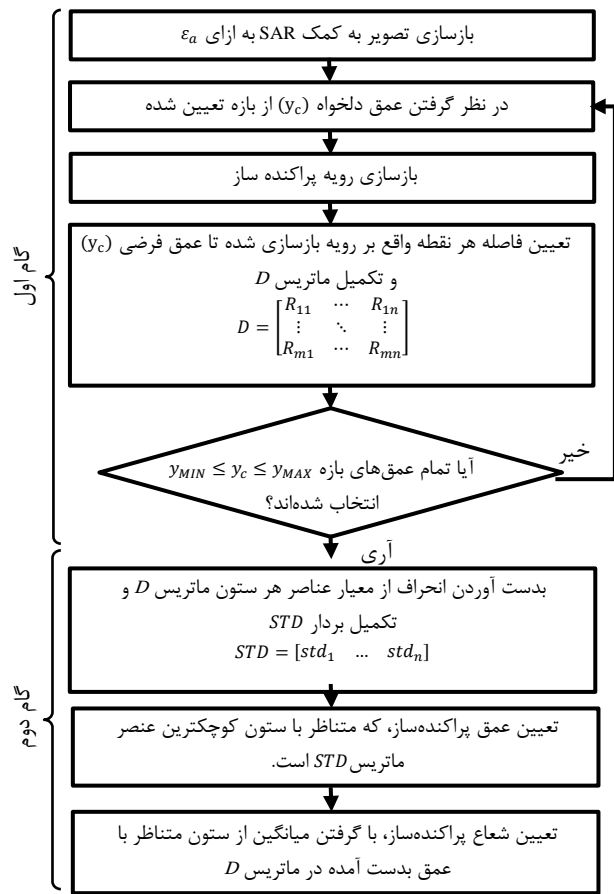
در رابطه بالا، STD یک بردار به طول n است که n تعداد عمق‌های در نظر گرفته شده برای پراکنده‌ساز است. بنابراین هر چه انحراف معیار کوچک‌تر باشد، بدین معنی است که عمق پراکنده‌ساز به دست آمده به مقدار واقعی نزدیک‌تر است.

در انتها، با توجه به ستون متناظر با کوچک‌ترین درایه ماتریس STD ، عمق پراکنده‌ساز تعیین می‌شود. برای محاسبه شعاع پراکنده‌ساز نیز از ستون متناظر با عمق به دست آمده در ماتریس D میانگین گرفته می‌شود.

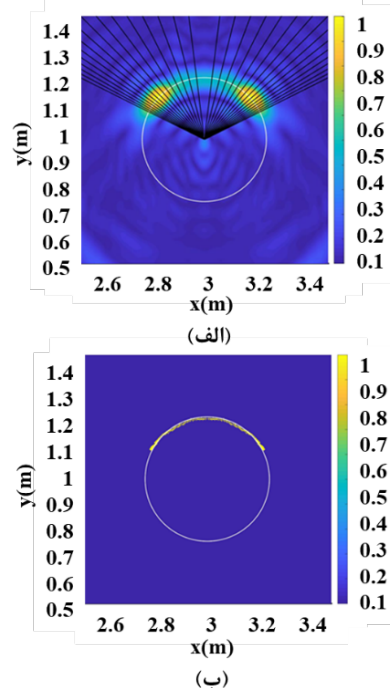
۳-۲. تعیین موقعیت و قطر پراکنده‌ساز استوانه‌ای در محیط پس‌زمینه با ضریب گذردهی نامعلوم

در این قسمت روش ارائه شده در بخش ۳-۱ را با فرض نامعلوم بودن ضریب گذردهی محیط پس‌زمینه تعمیم می‌دهیم.

مراحل پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این حالت نیز شامل دو گام بوده که در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. این دو گام مشابه گام‌های ارائه شده در قسمت قبل است، با این تفاوت که گام اول را باید به ازای ضرایب گذردهی نسبی مختلف برای



شکل (۴): روند پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای حل مسئله با فرض معلوم بودن ضریب گذردهی محیط پس‌زمینه



شکل (۵): (الف) تصویر بازسازی شده به کمک الگوریتم SAR به همراه خطوط رسم شده از مرکز فرضی. (ب) رویه به دست آمده با استفاده از ماکزیمم‌گیری بر روی مقادیر متناظر با خطوط.

¹ Standard Deviation

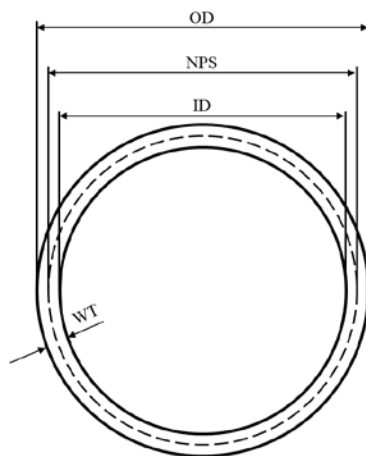
مقادیر فرضی برای ضریب گذردهی نسبی محیط و عمق پراکنده‌ساز هستند. در این حالت نیز مشابه حالت قبل، هر چه انحراف معیار کوچک‌تر باشد، بدین معنی است که رویه بازسازی‌شده به کمائی از دایره نزدیک‌تر و در نتیجه ضریب گذردهی نسبی محیط و عمق پراکنده‌ساز به‌دست آمده به مقدار واقعی نزدیک‌تر هستند.

در انتها، با توجه به سطر و ستون متناظر با کوچک‌ترین درایه ماتریس STD ، ضریب گذردهی محیط و عمق پراکنده‌ساز محاسبه می‌شود. برای محاسبه شعاع پراکنده‌ساز نیز ابتدا ماتریس D متناظر با ضریب گذردهی به‌دست‌آمده را تعیین کرده و سپس از ستون متناظر با عمق به‌دست‌آمده در این ماتریس میانگین گرفته می‌شود.

۴. نتایج

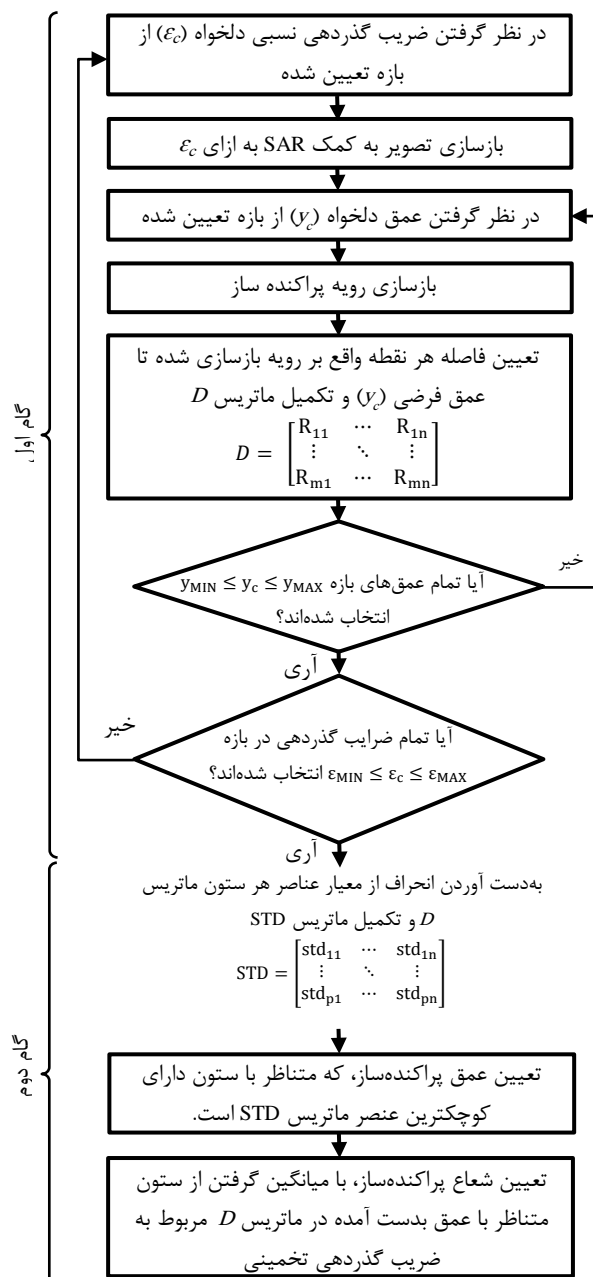
در این بخش روش پیشنهادی را بر روی هندسه معرفی‌شده در شکل (۱)، پیاده‌سازی کرده و نتایج آن را ارائه می‌دهیم. برای این که بتوانیم اثر قطرهای مختلف پراکنده‌ساز را بر روش پیشنهادی بررسی کنیم، پنج قطر را مطابق با استانداردهای فلزی (ISO 6708:1995)، برای پراکنده‌ساز مدفون در عمق یک متری در نظر می‌گیریم.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده قطر استوانه هادی را برابر با مقادیر نامی ارائه شده در جدول (۱) قرار می‌دهیم. برای درک بهتر، پارامترهای مربوط به ابعاد لوله شامل قطر نامی لوله (NPS^1)، قطر خارجی (OD^2)، قطر داخلی (ID^3) و ضخامت دیواره (TW^4) در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.



شکل (۷): پارامترهای مربوط به ابعاد سطح مقطع لوله

محیط پس‌زمینه اجرا کنیم. برای این منظور ابتدا با توجه به اطلاعات اولیه، بازه‌ای مناسب برای ضریب گذردهی نسبی محیط پس‌زمینه ($[\epsilon_{MIN}, \epsilon_{MAX}]$) تعیین می‌کنیم. خروجی گام اول D ماتریس است که هر کدام متناظر با یک ضریب گذردهی نسبی هستند.



شکل (۶): روند پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای حل مسئله با فرض نامعلوم بودن ضریب گذردهی محیط پس‌زمینه

در گام دوم ماتریس دوبعدی STD را تشکیل می‌دهیم که هر سطر آن انحراف از معیار ستون‌های یکی از ماتریس‌های D است. بنابراین سطرها و ستون‌های ماتریس STD به ترتیب متناظر با

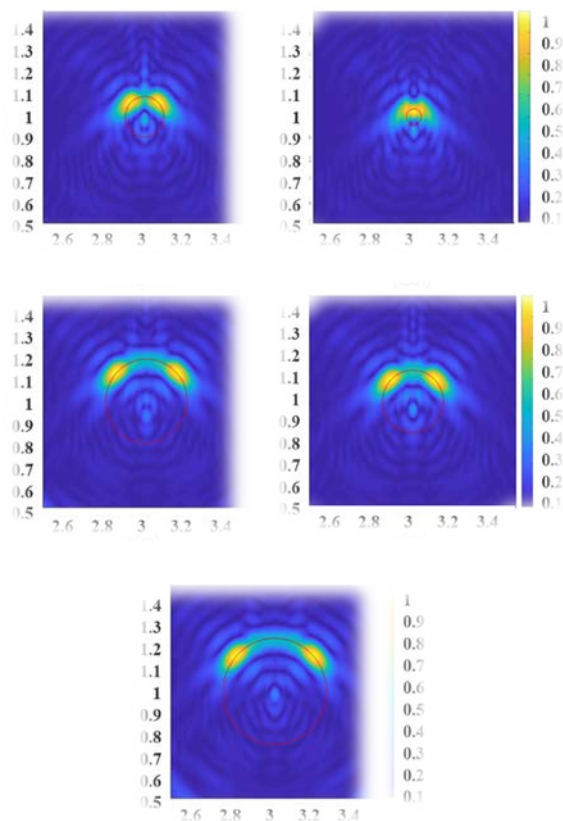
¹ Nominal Pipe Size

² Outside Diameter

³ Inside Diameter

⁴ Wall Thickness

شده و دیگر کمانی از یک دایره نخواهد بود. این باعث افزایش خطا در تخمین قطر پراکنده‌ساز می‌شود.



شکل (۸): تصویر رویه بازسازی‌شده به همراه دایره متناظر با عمق و قطر پیش‌بینی‌شده برای اهداف مدفون در عمق یک متر با قطر واقعی (الف) ۱۰۰ میلی‌متر، (ب) ۲۰۰ میلی‌متر، (ج) ۳۰۰ میلی‌متر، (د) ۴۰۰ میلی‌متر و (ه) ۵۰۰ میلی‌متر.

۲-۴. پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای محیط پس‌زمینه با ضریب گذردهی نامعلوم

در این قسمت نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، برای تعیین قطر و عمق پراکنده‌ساز با فرض نامعلوم بودن ضریب گذردهی محیط میزبان گزارش شده است. هندسه شبیه‌سازی مشابه حالت قبل و گام انتخابی برای بازه تغییرات ضریب گذردهی فرضی، یک صدم است.

در جدول (۳)، نتایج حاصل از تخمین عمق و قطر پراکنده‌ساز در عمق یک متری ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نامعلوم بودن ضریب گذردهی محیط، افزایش خطا در تخمین قطر پراکنده‌ساز را نسبت به حالتی که ضریب گذردهی محیط معلوم است، به همراه دارد.

جدول (۱): ابعاد در نظر گرفته‌شده برای سطح مقطع استوانه مدفون بر اساس استاندارد ISO 6708:1995

قطر نامی لوله (میلی‌متر)	قطر خارجی لوله (میلی‌متر)	ضخامت دیواره (میلی‌متر)	قطر داخلی لوله (میلی‌متر)
۱۰۰	۱۱۴/۳	۲/۱۱	۱۱۰/۰۸
۲۰۰	۲۱۹/۱	۲/۷۷	۲۱۳/۵۶
۳۰۰	۳۲۳/۸	۳/۹۶	۳۱۵/۸۸
۴۰۰	۴۰۶/۴	۴/۷۵	۳۹۶/۸۴
۵۰۰	۵۰۸	۵/۵۴	۴۹۶/۹۲

۱-۴. پیاده‌سازی روش پیشنهادی در محیط پس‌زمینه با ضریب گذردهی معلوم

در جدول (۲)، نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی پراکنده‌سازهای مدفون در عمق یک متری با قطرهای مختلف و با فرض دانستن ضریب گذردهی محیط میزبان ($\epsilon_a = 4$) ارائه شده است. گام انتخابی برای بازه تغییرات عمق فرضی، یک سانتی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد که به کمک این روش می‌توان عمق پراکنده‌ساز را با خطای کمتر از یک سانتی‌متر (با توجه به گام در نظر گرفته شده) محاسبه کرد. پراکنده‌ساز برای قطرهای برابر و بیشتر از ۲۰۰ میلی‌متر با خطای کمتر از ۵ درصد محاسبه شده است. اما برای قطر کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر خطا افزایش یافته است.

جدول (۲): نتایج به‌دست‌آمده برای تخمین قطر و عمق پراکنده‌ساز در عمق واقعی یک متر

قطر واقعی (D_a) (میلی‌متر)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
عمق تخمینی (سانتی‌متر)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
قطر تخمینی (میلی‌متر)	۷۵/۷	۱۹۱/۵	۲۹۲/۹	۳۹۵/۷	۴۹۸/۰
درصد خطا	۲۴/۲۷	۴/۲۷	۲/۳۸	۱/۰۷	۰/۴۰

همان‌طور که در شکل (۸)، نشان داده شده است، هر چه قطر پراکنده‌ساز کوچک‌تر شود، انحنای رویه بازسازی‌شده کم

اگرچه به نظر می‌رسد باید با افزایش قطر هدف دقت بهبود یابد، اما باید توجه داشت که در فرآیند حل مسئله ممکن است به ازای یک ضریب گذردهی نادرست، عمقی وجود داشته باشد که انحراف از معیار فاصله‌های به‌دست‌آمده از آن تا تمام نقاط واقع بر رویه بازسازی‌شده نسبت به حالتی که ضریب گذردهی و عمق واقعی در نظر گرفته می‌شوند، کمتر باشد. این به معنای بد طرح بودن مسئله مورد بررسی است. بنابراین همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، لزوماً با افزایش قطر پراکنده‌ساز، دقت حل مسئله افزایش نمی‌یابد. با این حال علیرغم خطای موجود در تعیین قطر اهداف، می‌توان برای کاربرد مورد نظر (تشخیص

لوله‌های زیرزمینی)، با استفاده از مقادیر تخمین زده‌شده توسط الگوریتم پیشنهادی و در نظر گرفتن استاندارد لوله‌های فلزی در جدول (۱)، نوع لوله تشخیص داده شده را از نظر ابعاد با دقت قابل قبولی تعیین کرد.

لازم به ذکر است که زمان لازم برای تعیین عمق و قطر پراکنده‌ساز با فرض ندانستن ضریب گذردهی محیط حدود ۱۰ دقیقه است. زمان گزارش‌شده مربوط به پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی سامانه‌ای با مشخصات زیر است.

Processor: Intel(R) Core(TM) i5-4200M

Installed RAM: 6.00 GB

۵- بحث و بررسی

در این بخش در نظر داریم اثر فرکانس کاری رادار، طول خط اسکن، عمق پراکنده‌ساز، حضور هم‌زمان دو پراکنده‌ساز و همچنین اثر رسانندگی محیط را روی روش پیشنهادی مورد بررسی قرار دهیم.

۵-۱- بررسی اثر فرکانس کاربر عملکرد روش

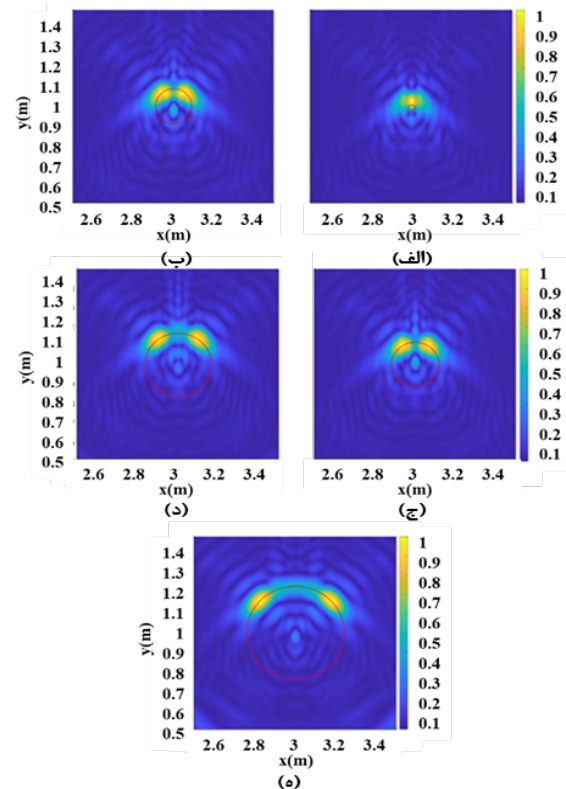
پیشنهادی

در این قسمت روش پیشنهادی روی داده‌های به‌دست‌آمده از هندسه شکل (۱) در چهار بازه فرکانسی مختلف [۲۰۰-۱۲۰۰]، [۵۰۰-۱۵۰۰]، [۱۰۰۰-۲۰۰۰] و [۱۵۰۰-۲۵۰۰] مگاهرتز پیاده‌سازی می‌شود. عمق و قطر هدف به ترتیب برابر ۱ متر و ۵۰۰ میلی‌متر است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی با فرض ندانستن ضریب گذردهی محیط میزبان در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است الگوریتم پیشنهادی در بازه فرکانسی ۱۵۰۰-۵۰۰ مگاهرتز عملکرد مطلوبی دارد.

جدول (۳): نتایج به‌دست‌آمده برای تخمین قطر و عمق پراکنده‌ساز در عمق واقعی یک متر با فرض ندانستن ضریب گذردهی محیط میزبان

قطر واقعی (D_0) (میلی‌متر)	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
عمق تخمینی (سانتی‌متر)	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
قطر تخمینی (میلی‌متر)	۳۲/۷	۱۸۰/۲	۲۳۵/۴	۳۳۱/۴	۴۸۳/۰
ضریب گذردهی تخمینی	۳/۹۶	۳/۹۴	۳/۸۱	۳/۸۰	۳/۹۵
عمق	۱	۰	۰	۰	۰
درصد خطا	قطر ۶۷/۳۴	۹/۹۴	۲۱/۵۳	۱۷/۱۵	۳/۴
ضریب گذردهی	۱/۰۰	۱/۵۰	۴/۷۵	۵/۰۰	۱/۲۵

عمق محاسبه‌شده پراکنده‌ساز به ازای تمام قطرهای در نظر گرفته‌شده با خطای کمتر از یک سانتی‌متر (با توجه به گام در نظر گرفته‌شده) محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از بازسازی رویه به ازای ضریب گذردهی به‌دست‌آمده به همراه دایره متناظر با قطر و عمق تخمینی در شکل (۹) گزارش شده است.



شکل (۹): تصویر رویه بازسازی‌شده به ازای ضریب گذردهی تخمین زده شده به همراه دایره متناظر با عمق و قطر پیش‌بینی‌شده برای اهداف مدفون در عمق یک متر با قطر واقعی (الف) ۱۰۰ میلی‌متر، (ب) ۲۰۰ میلی‌متر، (ج) ۳۰۰ میلی‌متر، (د) ۴۰۰ میلی‌متر و (ه) ۵۰۰ میلی‌متر.

۳-۵. بررسی اثر عمق پراکنده ساز بر عملکرد روش پیشنهادی

یکی از عوامل مهم که تأثیر آن بر روش پیشنهادی بررسی شده است، عمق استوانه مدفون است. در واقعیت، لوله‌گذاری در عمقی بیشتر از عمق یخبندان اجرا می‌شود. عمق یخبندان، عمقی است که پایین‌تر از آن احتمال یخ‌زدگی لوله کم است. این عمق برای مناطق معتدل ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر، مناطق نیمه سردسیر ۱۰۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر و مناطق سردسیر ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. مطابق با آنچه گفته شد سه عمق مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری در نظر گرفته می‌شود. در ضمن قطر پراکنده‌ساز ۵۰۰ میلی‌متر است.

نتایج حاصل از تخمین قطر و عمق پراکنده‌ساز با فرض ندانستن ضریب گذردهی محیط میزبان در جدول ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که از نتایج بالا پیداست، به ازای یک قطر مشخص هرچه عمق پراکنده‌ساز بیشتر باشد قطر آن با خطای بیشتری تخمین زده می‌شود اما همچنان عمق پراکنده‌ساز با خطای ناچیز در حد یک سانتی‌متر با توجه به گام در نظر گرفته شده محاسبه می‌شود.

جدول (۶): نتایج به‌دست‌آمده برای تخمین قطر و عمق پراکنده‌ساز به قطر ۵۰۰ میلی‌متر در سه عمق واقعی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری

عمق واقعی (میلی‌متر)			
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	
عمق تخمینی (سانتی‌متر)			
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	
قطر تخمینی (میلی‌متر)			
۴۰۵/۸	۴۸۳/۰	۴۸۳/۴	
ضریب گذردهی تخمینی			
۳/۷۹	۳/۹۵	۳/۸۹	
عمق			
۰	۰	۰	
درصد خطا			
قطر			
۱۸/۸۴	۳/۴۰	۳/۳۲	
ضریب گذردهی			
۵/۲۵	۱/۲۵	۲/۷۵	

۴-۵. بررسی اثر حضور هم‌زمان دو پراکنده‌ساز بر عملکرد روش پیشنهادی

در این بخش روش پیشنهادی را بر روی هندسه شامل دو پراکنده‌ساز، مشابه شکل (۱۳) پیاده‌سازی کرده و اثر حضور هم‌زمان دو پراکنده‌ساز در فاصله‌های مختلف نسبت به هم را

جدول (۴): نتایج به‌دست‌آمده برای تخمین قطر و عمق پراکنده‌ساز در عمق واقعی یک متر و قطر ۵۰۰ میلی‌متر برای چهار بازه فرکانسی مختلف

بازه فرکانسی (مگاهرتز)				
۱۵۰۰-	۱۰۰۰-	۵۰۰-	۲۰۰-	
۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۲۰۰	
عمق تخمینی (سانتی‌متر)				
۹۰	۹۱	۱۰۰	۹۴	
قطر تخمینی (میلی‌متر)				
۷۳۲	۷۲۹	۴۸۳	۶۰۴	
ضریب گذردهی تخمینی				
۴/۳۹	۴/۴۱	۳/۹۵	۴/۰۲	
عمق				
۱۰	۹	۰	۶	
درصد قطر				
۴۶/۴	۴۵/۹	۳/۴	۲۰/۷	
خطا ضریب گذردهی				
۹/۷۵	۱۰/۲۵	۱/۲۵	۰/۵۰	

۲-۵. بررسی اثر طول خط اسکن بر عملکرد روش پیشنهادی

در این قسمت اثر طول خط اسکن بر روی الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا هندسه شکل (۱) با طول خط اسکن ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ متر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است الگوریتم پیشنهادی در ساختاری با خط اسکن به طول ۴ متر، عملکرد مطلوبی دارد.

جدول (۵): نتایج به‌دست‌آمده برای تخمین قطر و عمق پراکنده‌ساز در عمق واقعی یک متر و قطر ۵۰۰ میلی‌متر برای چهار بازه فرکانسی مختلف

طول خط اسکن (متر)					
۶	۵	۴	۳	۲	
عمق تخمینی (سانتی‌متر)					
۹۱	۹۱	۱۰۰	۹۸	۹۴	
قطر تخمینی (میلی‌متر)					
۷۳۴	۷۳۴	۴۸۳	۴۷۶	۶۰۱	
ضریب گذردهی تخمینی					
۴/۳۹	۴/۳۹	۳/۹۵	۳/۸۱	۴/۰۱	
عمق					
۹	۹	۰	۲	۶	
درصد قطر					
۴۶/۷۶	۴۶/۷۶	۳/۴	۴/۸۵	۲۰/۱۵	
خطا ضریب گذردهی					
۹/۷۵	۹/۷۵	۱/۲۵	۴/۸۵	۰/۲۵	

- [11] A. Klotzsche, F. Jonard, M. C. Looms, J. van der Kruk, and J. A. Huisman, "Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress," *Vadose Zone Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 1-9, 2018.
- [12] R. Persico and F. Soldovieri, "Effects of uncertainty on background permittivity in one-dimensional linear inverse scattering," *JOSA A*, vol. 21, no. 12, 2004.
- [13] F. Soldovieri, G. Prisco, and R. Persico, "A strategy for the determination of the dielectric permittivity of a lossy soil exploiting GPR surface measurements and a cooperative target," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 67, no. 4, pp. 288-295, 2009.
- [14] M. Sahebkar, R. Roohi, H. Atefi, M. S. Majedi, and A. R. Attari, "Positioning of A 2-D PEC Buried Object in an Unknown Host Medium Using Kirchhoff-Based Shape Reconstruction Algorithm," in *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on, IEEE*, pp. 716-719, 2018.
- [15] C. Warren, A. Giannopoulos, and I. Giannakis, "gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar," *Computer Physics Communications*, vol. 209, pp. 163-170, 2016.
- [16] R. Solimene, A. Cucaro, A. Dell'Aversano, I. Catapano, and F. Soldovieri, "Background removal methods in GPR prospecting," in *2013 European Radar Conference, IEEE*, pp. 85-88, 2013.

حالات، کمینه باشد. این روش مبتنی بر تکرار به ازای ضرایب گذردهی و عمق‌های فرضی مختلف است. نتایج حاکی از آن است که دقت تعیین عمق برای پراکنده‌ساز چه با فرض دانستن یا ندانستن ضریب گذردهی محیط، با توجه به گام در نظر گرفته شده، یک سانتی‌متر است. اما خطای ناشی از تعیین قطر پراکنده‌ساز برای حالتی که ضریب گذردهی محیط را می‌دانیم بسیار کمتر از حالتی است که ضریب گذردهی محیط مجهول است. با این حال نکته قابل بیان این است که هر چند دانستن ضریب گذردهی باعث می‌شود خطای ناشی از تخمین قطر افزایش یابد، اما می‌توان از مقدار تخمین زده شده برای تعیین ابعاد لوله‌ای مدفون در زمین با دقت قابل قبولی استفاده کرد.

۶. مراجع

- [1] E. C. Utsi, "Ground penetrating radar: theory and practice," Butterworth-Heinemann, 2017.
- [2] D. J. Daniels, "Ground penetrating radar," *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, 2005.
- [3] E. R. Almeida, J. L. Porsani, I. Catapano, G. Gennarelli and F. Soldovieri, "Microwave Tomography-Enhanced GPR in Forensic Surveys: The Case Study of a Tropical Environment," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 1, pp. 115-124, Jan. 2016.
- [4] R. Solimene, A. Buonanno, R. Pierri, and F. Soldovieri, "Shape reconstruction of 3D metallic objects via a physical optics distributional approach," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 64, no. 2, pp. 142-151, 2010.
- [5] R. Solimene, I. Catapano, G. Gennarelli, A. Cucaro, A. Dell'Aversano, and F. Soldovieri, "SAR Imaging Algorithms and Some Unconventional Applications: A unified mathematical overview," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 4, pp. 90-98, July 2014.
- [6] E. Pettinelli et al., "GPR response from buried pipes: Measurement on field site and tomographic reconstructions," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 8, pp. 2639-2645, 2009.
- [7] R. Pierri, A. Liseno, R. Solimene, and F. Soldovieri, "Beyond physical optics SVD shape reconstruction of metallic cylinders," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 2, pp. 655-665, 2006.
- [8] A. V. Ristic, D. Petrovacki, and M. Govedarica, "A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data," *Computers & Geosciences*, vol. 35, no. 8, pp. 1620-1630, 2009.
- [9] R. Ghozzi, S. Lahouar, and C. Souani, "An Innovative Technique for Estimating the Radius of Buried Cylindrical Targets Using GPR," in *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications: Springer*, pp. 151-154, 2019.
- [10] A. Cataldo, E. De Benedetto, G. Cannazza, G. Leucci, L. De Giorgi, and C. Demitri, "Enhancement of leak detection in pipelines through time-domain reflectometry/ground penetrating radar measurements," in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 696-702, 2017.