

طراحی الگوریتم کاربردی برای استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون در روش رادار نفوذی به زمین (GPR)

حسین فریدونی^۱، رضا احمدی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

(دریافت مهر ۱۳۹۶، پذیرش دی ۱۳۹۷)

چکیده

در پژوهش حاضر از روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) برای شناسایی پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون و سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در محیط، استفاده شده است. برای این منظور ابتدا مدلسازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود دو بُعدی حوزه زمان (FDTD) به کمک نرم‌افزارهای GPRMAX، ReflexW و Radexplorer برای چندین مدل مصنوعی متناظر با اهداف متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی و تاسیسات زیرسطحی انجام شد. سپس به منظور استخراج پارامترهای فیزیکی و هندسی اهداف استوانه‌ای مدل‌های مصنوعی، یک الگوریتم کاربردی در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد که رفتار پاسخ GPR را در حوزه مکانی، مورد بررسی قرار می‌دهد. عملکرد این الگوریتم برای چندین مدل مصنوعی از جمله استوانه افقی فلزی توخالی، استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی و مدل شامل جفت استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی مورد ارزیابی قرار گرفت که در تمام موارد دقت بسیار بالایی را در برآورد پارامترهای مدل نشان داد. الگوریتم گفته شده برای استفاده در مورد تصاویر واقعی GPR که آمیخته با مقدار زیادی از انواع نوفه هستند، بهبود داده شد. در این الگوریتم ابتدا با به کارگیری الگوریتم آشکارکننده متوالی اشیاء، ناحیه مطلوب تعریف شده است؛ به گونه‌ای که نواحی تهی، حذف شده و الگوریتم بر روی ناحیه محدود مطلوب، اجرا می‌شود. از جمله قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی که بر اساس تعریف تصاویر مثبت و منفی آموزش می‌بیند، آن است که می‌تواند بدون نیاز به اعمال مراحل پیش‌پردازشی، مراحل پردازشی پیشرفته را بر روی تصاویر واقعی GPR سرشار از نوفه، اعمال نماید. عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای نگاشت راداری واقعی GPR یکی از پروفیل‌های برداشت شده در میدان امام حسین (ع) روبروی شهرداری شهر اصفهان، مورد ارزیابی قرار گرفت که در این مورد نیز نتیجه مطلوبی از برآورد پارامترهای هندسی و فیزیکی هدف زیرسطحی حاصل شد.

کلید واژه‌ها

رادار نفوذی به زمین (GPR)، پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای، الگوریتم آشکارکننده متوالی اشیاء (COD)، هذلولی پاسخ، تصاویر مثبت و منفی

* عهده دار مکاتبات: Rezahmadi@gmail.com

۱- مقدمه

تعیین پارامترهای هندسی و فیزیکی اشیاء مدفون زیرسطحی در اغلب مطالعات از جمله ژئوتکنیک و شناسایی ساختار، باستان‌شناسی، تاسیساتی و اکتشافی به عنوان یک هدف مطرح است. در واقع یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مهندسی، شناسایی و استخراج پارامترهای هندسی ناهمگنی‌های زیرسطحی مدفون است که تا حدودی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مانند GPR قابل حل است. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از پاسخ شبیه‌سازی شده مدل‌های مصنوعی مختلف به روش مدلسازی پیشرو، رفتار پاسخ‌های حاصل در حوزه مکانی^۱ مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. در مرحله بعد پس از استخراج رابطه‌های پنهان بین مدل‌های ریاضی موجود و پاسخ سیستم GPR حاصل، از طریق به کارگیری الگوریتم‌های مناسب و روش‌های پردازش تصویر، اقدام به شناسایی پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای و فیزیکی محیط میزبان مدفون می‌شود. از آنجایی که اشیاء استوانه‌ای در پاسخ GPR توسط پارامترهایی همانند شعاع، عمق دفن، موقعیت افقی و نیز ویژگی‌های محیط میزبان همانند سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی مشخص می‌شوند، بنابراین با استفاده از مدل ریاضی هذلولی می‌توان رابطه‌های بین پارامترهای هذلولی پاسخ و پارامترهای هندسی اشیاء مدفون و فیزیکی محیط میزبان را استخراج نمود.

در این پژوهش ابتدا برای استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای زیرسطحی و سرعت سیر موج الکترومغناطیسی در محیط در برگیرنده مدل‌های مصنوعی، یک الگوریتم کاربردی در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد. در ادامه الگوریتم کامل‌تری معرفی می‌شود که اساس ساختار آن را الگوریتم پیشنهادی قبلی تشکیل داده و برای تصاویر واقعی، بهبود یافته است. خطای تخمین پارامترهای هندسی بر روی مدل‌های مصنوعی و واقعی در همه موارد مقدار قابل قبولی بوده و الگوریتم در بیش‌تر موارد با خطای زیر ده درصد پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای را تخمین زده است.

۲- مرور پیشینه پژوهش

در زمینه استخراج پارامترهای هندسی اشیاء مدفون با روش GPR به کمک تکنیک‌های مختلف، پژوهش‌های معدودی صورت گرفته که مهم‌ترین آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند. احمدی و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعات خود به شناسایی مشخصات اهداف استوانه‌ای پنهان در تصاویر GPR با استفاده از دو روش هوشمند شبکه‌های عصبی و تطبیق الگو پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که هر دو روش هوشمند استفاده شده، قابلیت کاربرد برجا، سریع، دقیق و خودکار را برای اهداف ژئوتکنیکی واقعی دارند، هرچند در مجموع روش شبکه‌های عصبی نسبت به روش تطبیق الگو خطای کم‌تر و در نتیجه قدرت تخمین بیش‌تر برای پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون را دارد [۱]. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) از روش GPR به کمک روش‌های هوشمند شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان برای تعیین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون همانند انواع ساختارهای تونلی استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در مجموع روش شبکه‌های عصبی نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان خطای کم‌تر و در نتیجه قدرت تخمین بیش‌تری برای پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون دارد [۲]. حسینی و همکاران (۱۳۹۵) با برداشت سه‌بعدی یا شبکه‌ای، توانایی و عملکرد روش GPR را در آشکارسازی تجهیزات زیرسطحی در یک منطقه شهری با شبکه نسبتاً پیچیده‌ای از تأسیسات زیرسطحی متشکل از لوله‌های فلزی و غیرفلزی، کابل‌ها و کانال‌های زیرسطحی انتقال آب، مورد بررسی قرار دادند که در این مقاطع علاوه بر آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی، قطر لوله‌های غیرفلزی محتوی آب با دقت حدود یک سانتی‌متر تخمین زده شده است [۳]. شیهاب و ال نوایمی (۲۰۰۵) با استفاده از رابطه ریاضی هذلولی و به کمک روش مخروطی برازش حداقل مربعات مستقیم، شعاع اشیاء استوانه‌ای شناسایی شده توسط روش GPR را برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از این تکنیک در داده‌های واقعی، نتایج خوبی نشان داده البته گسترش این مدل برای بررسی اثرات خارج از سطح، وقتی که جهت لوله نسبت به جهت پیمایش ناشناخته است، همچنان نیازمند پژوهش بیش‌تر است [۴]. توکسوز و همکاران (۲۰۱۶) قابلیت استفاده از روش GPR

موج الکترومغناطیسی (V)، میزان تضعیف^۳ میدان در محیط سیر موج (α) و مقاومت^۴ (امپدانس) الکترومغناطیسی (Z) بستگی دارد. به منظور آشکار کردن یک شیء باید بخشی از انرژی موج رادیویی که به سطح شیء برخورد می‌کند، بازتابیده شود. این امر مستلزم آن است که تفاوتی بین ویژگی‌های الکتریکی شیء و محیط در برگیرنده آن وجود داشته باشد. تغییرات در گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی، سبب پراکندگی امواج رادیویی می‌شود. با آشکار کردن این انرژی پراکنده شده، تعیین محل و موقعیت چشمه‌های پراکنده کننده انرژی، امکان‌پذیر می‌شود [۱۰]. در تمام برداشت‌های GPR، یکی از مولفه‌های میدان الکترومغناطیسی، معمولاً مولفه میدان الکتریکی، اندازه‌گیری می‌شود و شدت مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان، ثبت می‌شود [۱۱]. قدرت نفوذ و تفکیک‌پذیری روش GPR وابسته به فرکانس موجی است که توسط دستگاه به درون زمین ارسال می‌شود. هر چه این موج فرکانس پایین‌تری داشته باشد، قدرت نفوذ آن افزایش می‌یابد و می‌توان لایه‌های عمیق‌تری از زمین را توسط این موج شناسایی نمود. اما در مقابل، قدرت تفکیک و در نتیجه دقت روش، کم‌تر می‌شود. یعنی در عمق‌های کم‌تر، قدرت تفکیک بالاتری وجود دارد و اجسام با ابعاد کوچک‌تر را نیز می‌توان شناسایی نمود. اما هر چه عمق بیشتر می‌شود، اجسام باید ابعاد بزرگ‌تری داشته باشند تا توسط این روش، قابل شناسایی باشند [۱۲].

در یک اندازه‌گیری GPR استاندارد، در حالی که آنتن‌ها در راستای مسیر برداشت، کشیده می‌شوند، ردها در بازه‌ای ثابت به وسیله چرخ اندازه‌گیری که به پشت آنتن متصل است، برداشت می‌شوند. این کار موجب به دست آمدن مجموعه‌ای از ردها می‌شود که در نهایت به وسیله نرم‌افزار اندازه‌گیری و بر حسب تابعی از مکان و زمان در قالب نموداری موسوم به نگاشت راداری^۵ نمایش داده می‌شوند. در حالت کلی نگاشت راداری یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۱ مجموعه‌ای از ردهای بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اهداف استوانه‌ای مدفون به صورت هذلولی است. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده

برای شناسایی اشیاء مدفون در عمق کم را با استفاده از آنتن‌های با فرکانس مرکزی ۲۵۰ و ۸۰۰ مگاهرتز ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که آنتن ۲۵۰ مگاهرتز برای تشخیص ابعاد و عمق اشیاء مدفون مورد استفاده، مناسب‌تر است [۵]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) روش جدیدی را برای تشخیص و پیش‌بینی قطر خطوط لوله زیرزمینی پر از مواد پراتلاف بر اساس GPR با استفاده از شکل دایره خاص تعیین شده توسط مختصات سه نقطه در این دایره پیشنهاد کردند. آنها از این روش برای تشخیص قطر خطوط لوله زیرزمینی مدل تجربی و پروژه تشخیص شبکه لوله فاضلاب در یک پارک صنعتی شیمیایی استفاده کردند [۶]. احمدی و فتحیان‌پور (۲۰۱۷) به تخمین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای با استفاده از روش GPR و به کارگیری الگوریتم تطبیق الگو به عنوان یکی از روش‌های شناخت الگو پرداختند. الگوریتم پیشنهادی توسط آنها ابتدا بر روی مدل‌های مصنوعی و سپس بر روی یک هدف واقعی پیاده‌سازی شده که با مقدار خطای قابل قبول (بیشینه ۱۵ درصد) قادر به تخمین پارامترهای هندسی اهداف شده است. الگوریتم ارائه شده توسط آنها پارامترهای هندسی را به صورت خودکار استخراج می‌نماید [۷].

۳- اصول و مبانی روش GPR

سیستم GPR سیگنال‌های الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز را از طریق فرستنده ارسال کرده و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را از طریق گیرنده آشکار می‌کند [۸]. گذردهی دی‌الکتریک ϵ ، هدایت الکتریکی σ و نفوذپذیری مغناطیسی μ به ترتیب مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در GPR هستند. این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند. در بسیاری از کاربردهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی GPR، ویژگی‌های الکتریکی فاکتور غالب کنترل کننده پاسخ‌های GPR هستند. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف بوده و بنابراین در روش GPR در بیش‌تر مواقع ϵ و σ مهم‌ترین پارامترها هستند [۹].

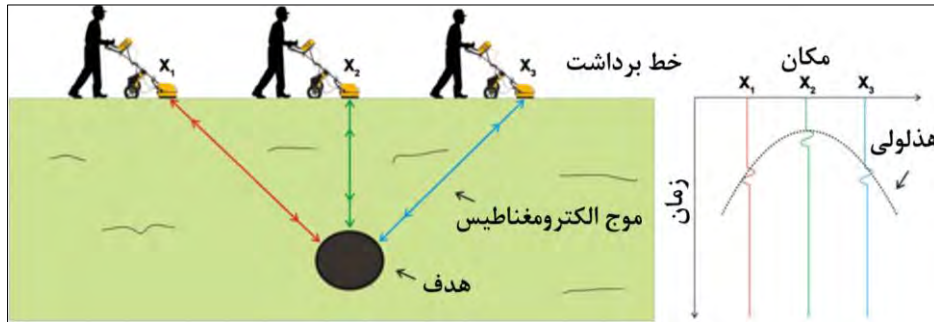
سیگنال GPR ثبت شده به تغییرات فیزیکی درون محیط پیرامون و ویژگی‌های موج GPR یعنی سرعت فازی

برای یک هدف استوانه‌ای مدفون با شعاع R را نشان می‌دهد که در آن x و a به ترتیب موقعیت مکانی افقی و قائم راس هذلولی در حوزه مکانی، φ زاویه شیب‌های مجانب‌های هذلولی و b فاصله افقی از راس تا مجانب‌های هذلولی است. همچنین مقدار a در مقیاس زمانی فاصله از راس هذلولی تا محل برخورد مجانب‌های هذلولی است.

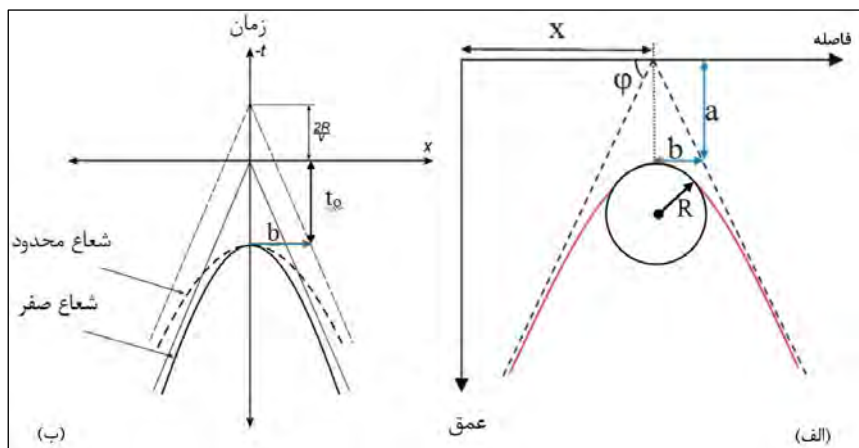
از ناهمگنی‌های زیرسطحی از سیگنال‌های زمينه، بزرگ‌تر هستند.

۴- رابطه‌های بین پارامترهای هندسی و پاسخ GPR یک مدل استوانه‌ای

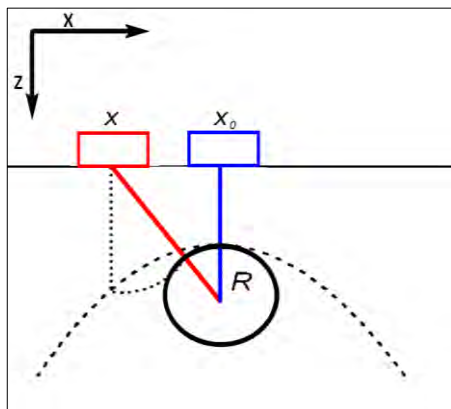
شکل ۲ پاسخ نوعی سیستم GPR به صورت هذلولی



شکل ۱: برداشت داده‌های GPR بر روی اهداف مدفون و رخداد مربوطه در نگاشت راداری (ویرایش شده از [۱۳])



شکل ۲: الف) پاسخ نوعی GPR به صورت هذلولی برای یک هدف استوانه‌ای مدفون همراه با نمایش پارامترهای هندسی در حوزه مکانی؛ ب) پارامترهای مشخصه هذلولی در حوزه زمان- مکان (ویرایش شده از [۴])



شکل ۳: نمایی از چگونگی روابط بین متغیرهای اصلی در بازتاب هذلولی.

این فاصله زمانی برای یک هدف نقطه‌ای مدفون برابر با t_0 و برای یک هدف غیرنقطه‌ای برابر با $t_0 + \frac{2R}{v}$ است [۴] که t_0 زمان سیر دوطرفه موج از چشمه واقع بر روی سطح زمین درست در بالای مرکز شیء مدفون تا سطح فوقانی شیء و v سرعت سیر امواج الکترومغناطیسی در محیط است. اگر Z_0 عمق دفن استوانه و Z عمق ظاهری بازتاب در موقعیت مکانی X در جابجایی از X_0 بر روی استوانه‌ای با شعاع R باشد (شکل ۳) آنگاه معادله حاکم بین آنها به صورت رابطه (۱) است:

$$(Z + R)^2 = (Z_0 + R)^2 + (X - X_0)^2 \quad (1)$$

شعاع این اهداف را تخمین زد. برای این منظور ابتدا باید بتوان زمان و موقعیت بازتاب درست اهداف زیرسطحی را تعیین نمود و سپس معادله هذلولی را بر آن برازش کرد. معمولاً به دست آوردن نقاط بازتاب، فرآیندی بسیار پیچیده و همراه با خطا است.

۵- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش برای استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای زیرسطحی و سرعت سیر موج الکترومغناطیس در محیط در برگیرنده در مدل‌های مصنوعی، یک الگوریتم کاربردی در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شد که نمودار جریان مراحل انجام عملیات مربوط به این الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است.

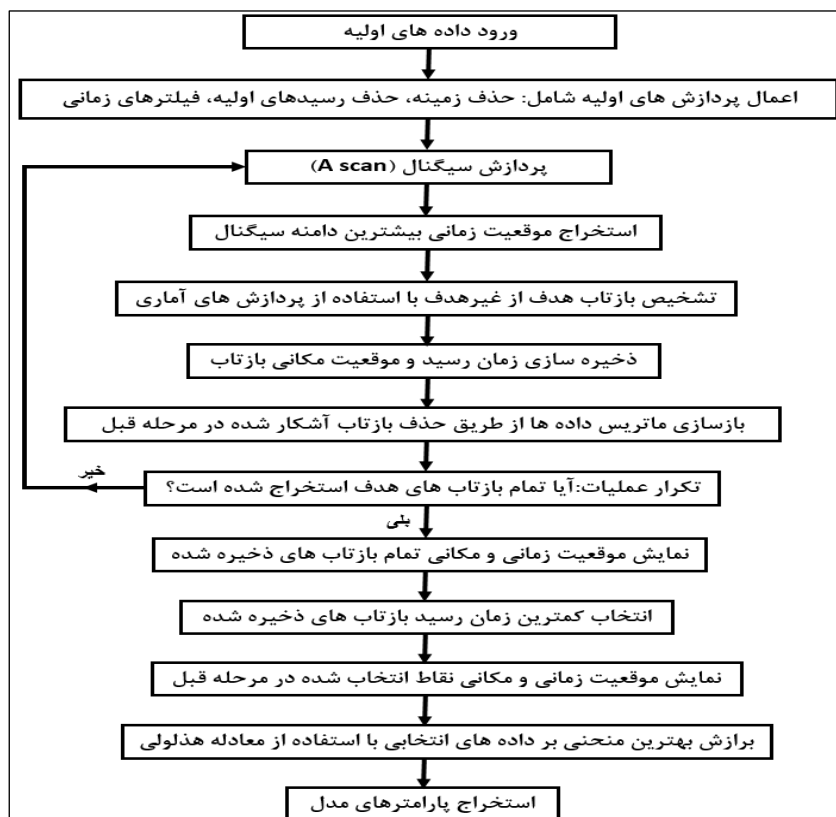
اگر در رابطه (۱) به جای Z مقدار برابر با آن یعنی $\frac{vt}{2}$ و به جای Z_0 مقدار معادل آن یعنی $\frac{vt_0}{2}$ قرار گیرد، با ساده کردن آن رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\left(\frac{t + \frac{2R}{v}}{t_0 + \frac{2R}{v}}\right)^2 - \left(\frac{x - x_0}{\frac{v}{2}t_0 + R}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

که در آن t زمان سیر دوطرفه موج است. رابطه (۲) در واقع معادله یک هذلولی با مرکز به مختصات $(x_0, \frac{-2R}{v})$ است. باید توجه داشت که در رابطه (۲)، x متغیر مستقل و t متغیر وابسته است. رابطه (۲) پس از ساده‌سازی به صورت رابطه (۳) در می‌آید:

$$t = \left\{ \left(\frac{2}{v}\right) \times \sqrt{\left(\frac{vt_0}{2} + R\right)^2 + (x - x_0)^2} \right\} - \frac{2R}{v} \quad (3)$$

همان‌گونه که از رابطه (۳) مشاهده می‌شود با تعیین نقاط هذلولی بازتاب اهداف استوانه‌ای می‌توان عمق دفن و



شکل ۴: نمودار جریان مراحل عملکرد الگوریتم پیشنهادی جهت استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدل‌های مصنوعی

بازتاب، مربوط به هدف زیرسطحی باشد، الگوریتم، موقعیت زمانی این دامنه بازتاب را در حافظه ذخیره می‌کند و به همین ترتیب فرآیند، تکرار شده و الگوریتم تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که هیچ بازتابی از هدف زیرسطحی دریافت

مطابق این شکل پس از اعمال پردازش‌های لازم، الگوریتم به استخراج مقدار دامنه بیشینه در هر رد پرداخته، سپس با استفاده از پردازش‌های آماری تعریف شده به بررسی صحت این بازتاب از هدف می‌پردازد. اگر

پارامترهای هندسی (عمق دفن و شعاع) معین، صورت گرفت که در جدول ۱ برخی از ویژگی‌های الکتریکی مواد مورد مطالعه در پژوهش حاضر از جمله گذردهی دی‌الکتریک نسبی، هدایت الکتریکی و سرعت سیر امواج (نوعاً در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز) آورده شده است.

۶-۱- مدل شامل استوانه افقی فلزی توخالی

شکل ۵ مدل هندسی- فیزیکی شامل یک استوانه افقی توخالی با جداره فلزی به ضخامت سه سانتی‌متر، قطر ۰/۵ متر و عمق دفن ۱/۵ متر در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی و پاسخ نگاشت راداری مربوط به این مدل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل نیز مشاهده می‌شود، پاسخ GPR این مدل که در محیط نرم‌افزار MATLAB ترسیم شده است، به لحاظ مشاهده‌ای از کیفیت چندان خوبی برخوردار نیست.

جدول ۱: برخی از ویژگی‌های مواد مورد مطالعه [۱۴]

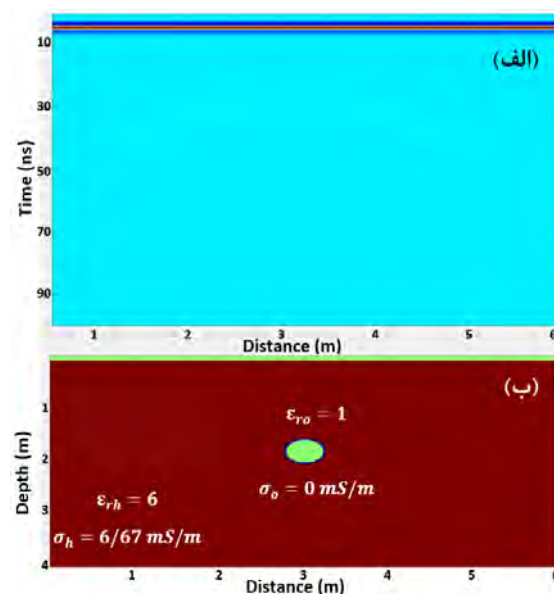
ماده (محیط)	گذردهی دی‌الکتریک نسبی	هدایت الکتریکی (mS/m)	سرعت موج (m/ns)
خاک رس سیلتی	۶	۶/۶۷	۰/۱۲
هوا	۱	۰	۰/۳
فلز	۱۰۰-۳۰۰	۱۰ ^۷ -۱۰ ^۴	۰/۰۱۷
پلاستیک پی‌وی‌سی	۳/۳	۱/۳۴	۰/۱۶

مزیت الگوریتم پیشنهادی آن است که با اعمال الگوریتم بر روی داده‌ها بدون استفاده از هیچ‌گونه عملیات پردازش تصویر، تنها از طریق پردازش سیگنال (A scan) و به آسانی، تصویر خروجی مطلوب حاصل می‌شود. در شکل ۶ (الف) خروجی الگوریتم پس از ذخیره‌سازی اطلاعات مربوط به نقاط بازتاب هدف زیرسطحی، نمایش داده شده است. مطابق این شکل الگوریتم در مرحله هشتم ذخیره‌سازی، متوقف شده و نشان دهنده آن است که نقاط بازتاب بعدی مربوط به هدف زیرسطحی نیست. در مرحله بعد، الگوریتم ۸ دسته اطلاعات ذخیره شده را پردازش کرده و نقاط بازتابی از هدف مدفون با کم‌ترین زمان را نگهداری می‌کند (شکل ۶ (ب)). سپس رابطه ریاضی هذلولی (رابطه (۳)) بر روی این نقاط منحنی برازش شده و پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل، استخراج می‌گردند. در شکل ۶ (ج) نتایج برازش منحنی هذلولوی توسط رابطه (۳) بر داده‌های تجربی نشان داده شده است. برازش در سطح

نشود. سپس موقعیت‌های زمانی دریافتی، مورد پردازش قرار گرفته و کمینه آنها انتخاب و نگهداری می‌شود. در مرحله بعد موقعیت مکانی کمینه آنها انتخاب و نگهداری می‌شود. سپس موقعیت مکانی متناظر با این مقدار زمانی نیز استخراج شده و با استفاده از زوج نقاط مکان و زمان، هذلولی بازتاب تولید می‌شود. در آخرین مرحله با استفاده از دستور برازش منحنی بر نقاط تجربی (رابطه (۳))، برازش شده و با تنظیم پارامترها در نهایت پارامترهای هندسی شعاع و عمق دفن هدف زیرسطحی و پارامتر فیزیکی سرعت سیر موج در محیط، تعیین می‌شود.

۶-۲- اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌های مصنوعی

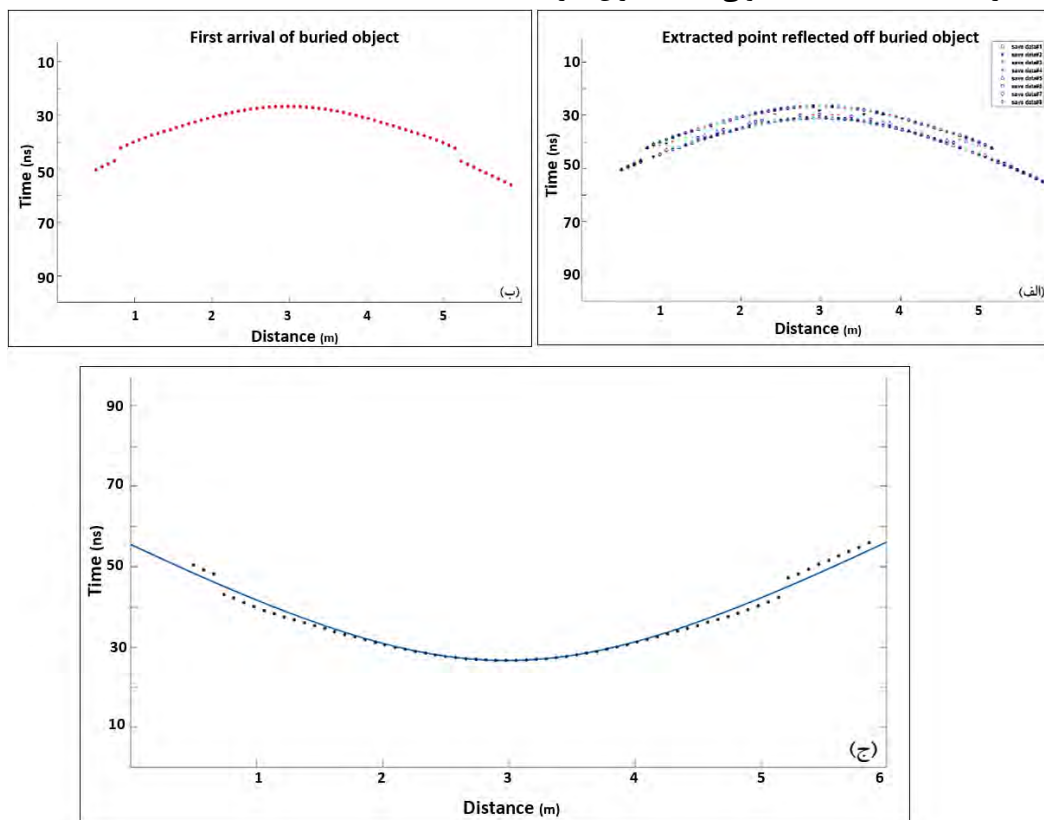
به منظور بررسی نتایج و ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، آزمایش بر روی چند مدل مصنوعی شامل اهداف استوانه‌ای افقی با جنس‌های مختلف و



شکل ۵: (الف) پاسخ GPR و (ب) مدل هندسی- فیزیکی هدف استوانه‌ای فلزی توخالی با قطر ۰/۵ متر واقع در عمق ۱/۵ متری h: محیط میزبان و 0: شیء

سیر امواج در محیط نیز $0/116$ متر بر نانوثانیه محاسبه شد.

اعتماد 95 درصد و با روش سطح اعتماد انجام گرفته است. ضریب تعیین منحنی برازش شده برابر با $0/9795$ یا $97/95$ درصد است که نتیجه مطلوبی است. میزان سرعت



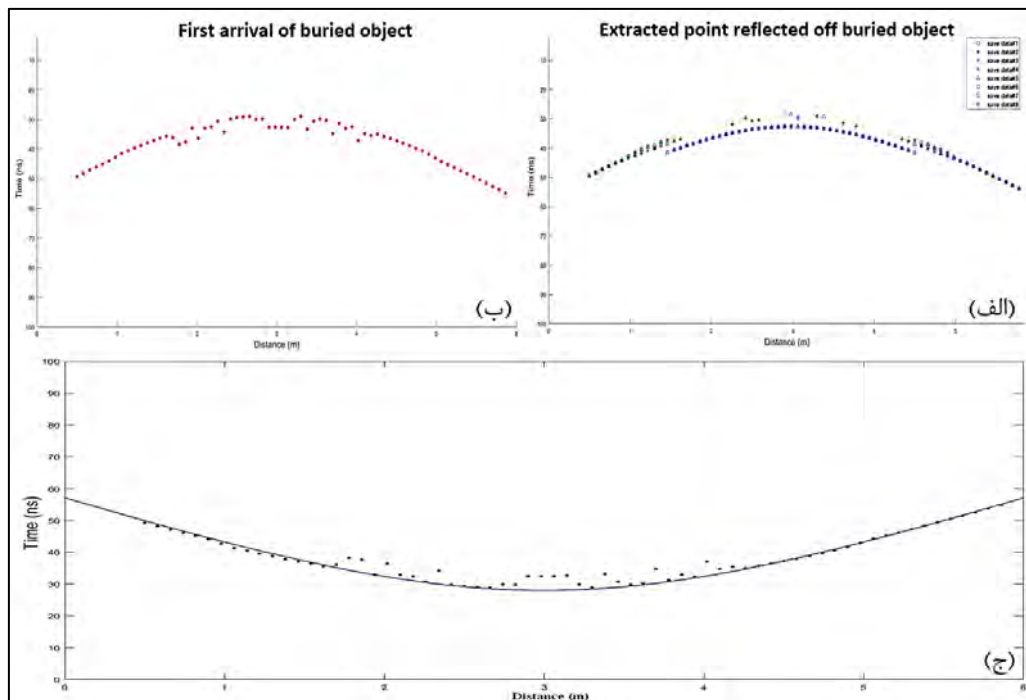
شکل ۶: الف) نمایش موقعیت نقاط بازتابی از هدف استوانه‌ای فلزی بعد از پایان مراحل ذخیره‌سازی، ب) اولین نقاط بازتاب از هدف زیرسطحی مدفون و ج) برازش هذلولی بر داده‌های تجربی با استفاده از معادله ریاضی هذلولی.

شکل ۸ مدل هندسی- فیزیکی شامل جفت استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی با قطر $0/5$ متر واقع در عمق $1/25$ متری در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی و پاسخ نگاشت راداری مربوط به این مدل را نشان می‌دهد. در شکل ۹ پاسخ الگوریتم پیشنهادی بر روی این مدل نمایش داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود، بازتاب‌های اهداف استوانه‌ای در قسمت میانی مدل، دارای همپوشانی بالایی هستند. در این مورد الگوریتم، معادله هذلولی را در دو قسمت مجزا بر داده‌های تجربی برازش کرده است و از آنجایی که بازتاب‌ها به صورت هذلولی کامل نیستند، از این رو باید انتظار داشت که ضریب تعیین مدل برازش شده، نسبت به حالتی که دو استوانه بازتاب کامل دارند، کم‌تر باشد.

۲-۶- مدل شامل استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی

مدل هندسی- فیزیکی مورد مطالعه شامل یک استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی به ضخامت سه سانتی‌متر، قطر 50 سانتی‌متر و عمق دفن $1/5$ متر در محیط میزبان از جنس خاک رس سیلتی است. در شکل ۷ پاسخ الگوریتم پیشنهادی بر روی این مدل نمایش داده شده است. برازش در سطح اعتماد 95 درصد و با روش سطح اعتماد انجام شده؛ ضریب تعیین منحنی برازش شده برابر با $0/9269$ یا $92/69$ درصد است که نتیجه مطلوبی است. میزان سرعت سیر امواج در محیط نیز $0/115$ متر بر نانوثانیه محاسبه شد.

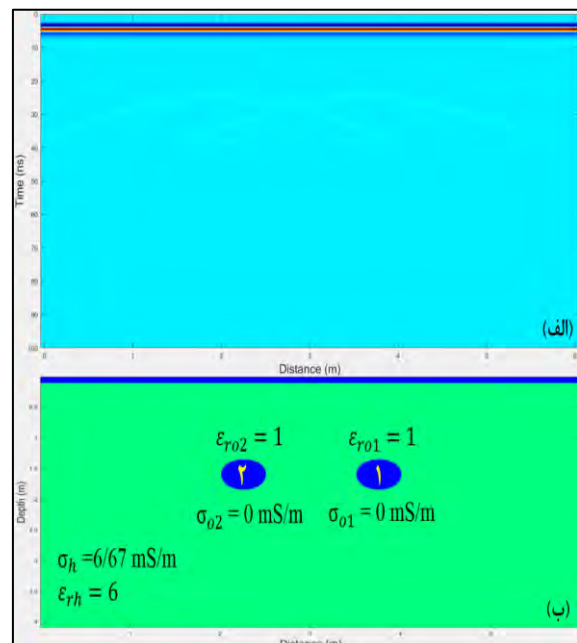
۳-۶- مدل شامل جفت استوانه افقی توخالی



شکل ۷: الف) نمایش موقعیت نقاط بازتابی از هدف استوانه‌ای پلاستیکی بعد از پایان مراحل ذخیره‌سازی، ب) اولین نقاط بازتاب از هدف استوانه‌ای مدفون و ج) برازش هذلولی بر داده‌های تجربی با استفاده از معادله ریاضی هذلولی

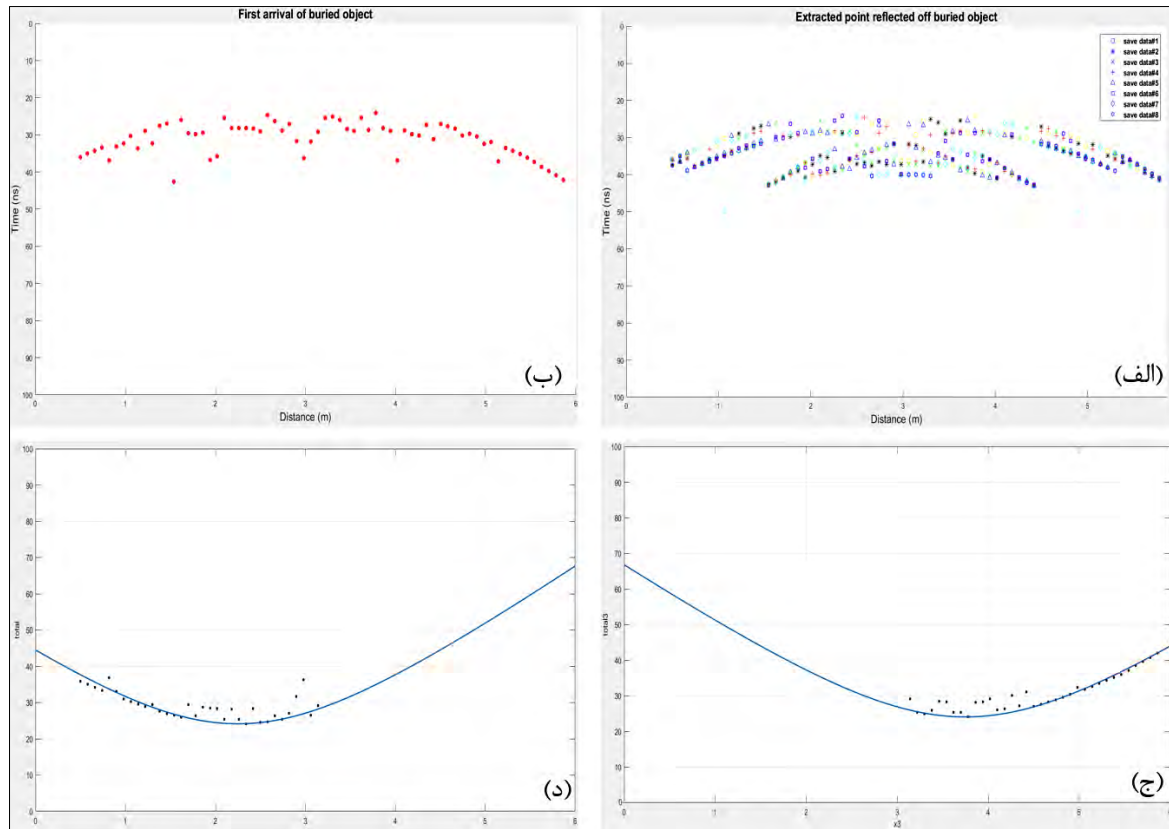
نتیجه خوبی است. میزان سرعت سیر امواج در محیط نیز ۰/۱۱۴ متر بر نانوثانیه محاسبه شد. همچنین ضریب تعیین منحنی برازش شده برای استوانه ۲ برابر با ۰/۴۳۹۸ یا ۴۳/۹۸ درصد است که این نتیجه نیز تاحدودی قابل قبول است. میزان سرعت سیر امواج در محیط ۰/۱۱۵ متر بر نانوثانیه محاسبه شد.

در جدول ۲ پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مختلف آزمایش شده و میزان دقت برازش معادله هذلولی بر داده‌ها با استفاده از معیار سنجش آماری ضریب تعیین، آورده شده است. همان‌گونه که داده‌های این جدول نشان می‌دهند، الگوریتم پیشنهادی پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای را با دقت بالایی تخمین زده است. در شرایط یکسان محیطی نتایج تخمینی برای عمق دفن و شعاع استوانه مربوط به مدل جفت استوانه افقی تا حدودی با هم اختلاف دارد که این اختلاف ناشی از همپوشانی نقاط بازتاب اهداف است. از آنجایی که مرز مشخصی بین دو بازتاب در مرکز وجود ندارد، برازش منحنی در شرایط یکسان رخ نداده است. اگر دو هدف استوانه‌ای به اندازه کافی از هم دور باشند به‌گونه‌ای که بازتاب‌ها همپوشانی نداشته باشند، آنگاه این اختلاف وجود نخواهد داشت.



شکل ۸: الف) پاسخ GPR و ب) مدل هندسی - فیزیکی جفت استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی با قطر ۰/۵ متر واقع در عمق ۱/۲۵ متری. h: محیط میزبان و 0: شیء

برازش در سطح اعتماد ۹۵ درصد و با روش سطح اعتماد انجام شده است. ضریب تعیین منحنی برازش شده برای استوانه ۱ برابر با ۰/۸۰۳۵ یا ۸۰/۳۵ درصد است که



شکل ۹: الف) نمایش موقعیت نقاط بازتابی از اهداف استوانه‌ای بعد از پایان مراحل ذخیره‌سازی، ب) اولین نقاط بازتاب از اهداف استوانه‌ای مدفون، ج) برازش هذلولی بر داده‌های تجربی استوانه ۱ با استفاده از معادله ریاضی هذلولی و د) برازش هذلولی بر داده‌های تجربی استوانه ۲ با استفاده از معادله ریاضی هذلولی

جدول ۲: پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مختلف آزمایش شده و میزان دقت برازش معادله هذلولی بر داده‌ها با استفاده از معیار ضریب تعیین

هدف	پارامتر	شعاع (سانتی‌متر)		عمق دفن (متر)		موقعیت مکانی افقی (متر)		ضریب تعیین
		واقعی	تخمینی (%)	واقعی	تخمینی (%)	واقعی	تخمینی (%)	
استوانه فلزی	۲۵	۲۶/۶۲	۶	۱/۵	۱/۵۴	۳	۳	۰/۹۷۹۵
استوانه پلاستیکی	۲۵	۲۳	۸	۱/۵	۱/۶۱	۳	۳	۰/۹۲۶۹
جفت استوانه (راست)	۲۵	۲۷	۸	۱/۲۵	۱/۳۸	۲/۲۵	۲/۴	۰/۸۰۳۵
پلاستیکی (چپ)	۲۵	۲۴	۴	۱/۲۵	۱/۳۷	۳/۷۵	۳/۷	۰/۴۳۹۸

شخصی عملگر و نتایج مورد نظر وی می‌شوند. بنابراین به منظور جلوگیری از اعمال مراحل پیش‌پردازشی نادرست مبتنی بر سلیقه شخصی عملگر و کمینه کردن دخالت کاربر، نیاز به استفاده از الگوریتمی است که تا حد ممکن تاثیر این عوامل را کاهش دهد.

در ادامه، الگوریتم کامل‌تری معرفی می‌شود که اساس ساختار آن را الگوریتم پیشنهادی قبلی تشکیل داده و برای تصاویر واقعی، بهبود یافته است. از جمله قابلیت‌های

۷- الگوریتم پیشنهادی جهت استخراج پارامترهای هندسی اهداف واقعی GPR

تصاویر واقعی GPR همواره آمیخته با مقدار زیادی از انواع نوفه است که عملیات پردازش و در نتیجه تفسیر را با مشکل مواجه می‌سازد. از طرف دیگر جهت حذف نوفه‌ها در مراحل ابتدایی و پیش‌پردازش، تصاویر دست‌خوش سلیقه

مجموعه تصاویر مثبت و منفی، به الگوریتم معرفی می‌شوند و سپس تابع آشکارساز متوالی اشیاء^{۱۱} به وسیله تصاویر مثبت و منفی معرفی شده، تحت آموزش قرار می‌گیرد و طبقه‌بندی کننده متوالی با استفاده از تابع آشکارساز متوالی، نحوه ارتباط بین تصاویر مثبت و منفی آموزش دیده را به صورت یک فایل با پسوند xml ذخیره می‌کند. در آخرین مرحله، تصاویر دلخواه توسط فایل xml ذخیره شده، مورد پردازش قرار گرفته و اهداف مورد نظر بر روی تصاویر دلخواه به صورت جعبه‌های محدود^{۱۱} (bbox) به تصویر کشیده می‌شوند. فرآیند کلی آشکارسازی اشیاء به صورت یک نمودار جریان از چپ به راست در شکل ۱۰ نشان داده شده که شامل ۴ مرحله بوده و هر یک از این مرحله‌ها در بخش‌های بعدی به طور مختصر توضیح داده می‌شوند.



شکل ۱۰: روند کلی آشکارسازی با استفاده از تابع آشکار کننده متوالی اشیاء

ساده‌ای هستند که پایه‌های تصمیم‌گیری^{۱۴} نامیده می‌شوند. هر مرحله به وسیله تکنیکی به نام پیشروی^{۱۵} آموزش داده می‌شود. پیشروی توانایی آموزش یک طبقه‌بندی بسیار دقیق با در نظر گرفتن میانگین وزن دار تصمیم‌گیری‌های ایجاد شده توسط فراگیرهای ضعیف را فراهم می‌کند [۱۷، ۱۶]. در هر مرحله پنجره‌ای در طول تصویر تعریف می‌شود که با قرار گرفتن در یک موقعیت مکانی مشخص، به آن منطقه، برچسب^{۱۶} مثبت و منفی می‌زند. مثبت بدان معنی است که یک هذلولی (پاسخ شیء) در این منطقه آشکار شده و منفی مشخص کننده این است که هیچ هذلولی در این منطقه یافت نشده است. اگر برچسب منفی باشد، طبقه‌بندی این منطقه کامل شده و پنجره آشکارساز به منطقه بعدی می‌رود. اگر برچسب مثبت باشد، طبقه‌بندی کننده، این منطقه را به مرحله بعد عبور می‌دهد و در نهایت زمانی که در آخرین مرحله به این منطقه برچسب مثبت زده شود، این پنجره به عنوان هذلولی (پاسخ شیء) شناخته می‌شود [۱۸]. مراحل طوری طراحی شده‌اند که در کم‌ترین زمان ممکن نمونه‌های منفی

الگوریتم پیشنهادی آن است که می‌تواند بدون نیاز به اعمال مراحل پیش‌پردازشی، مراحل پردازشی پیشرفته را بر روی تصاویر واقعی GPR سرشار از نوفه، اعمال نماید. به منظور افزایش سرعت عملکرد و تمرکز بر روی نواحی شامل پاسخ هدف، در این الگوریتم ابتدا ناحیه مطلوب^۶ با به کارگیری الگوریتم آشکار کننده متوالی اشیاء^۷ تعریف شده (نواحی تهی حذف می‌شوند) و سپس الگوریتم پیشنهادی بر روی این ناحیه محدود، به کار گرفته می‌شود.

۷-۱- روند کلی آشکارسازی با استفاده از آشکار کننده متوالی اشیاء (COD)

الگوریتم COD یکی از الگوریتم‌های شناخته شده در یادگیری ماشین^۸ است که بر پایه الگوریتم یادگیری وایولا جونز^۹ است [۱۵]. به منظور آشکار کردن هدف ابتدا

۷-۲- معرفی تصاویر مثبت و منفی

در مرحله اول باید مجموعه تصاویر شامل هذلولی بازتاب (تصاویر مثبت) و فاقد هذلولی (تصاویر منفی) معرفی شوند. در تصاویر مثبت باید موقعیت مکانی هذلولی بازتاب نیز دقیقاً مشخص شود که برای این منظور از دستور گرافیکی trainingImageLabeler در محیط MATLAB استفاده شده و موقعیت مکانی رخدادهای هذلولی شکل در تصاویر مثبت، در حافظه ذخیره می‌شوند.

۷-۳- طبقه‌بندی کننده متوالی^{۱۲} با استفاده از آموزش تابع آشکارساز متوالی اشیاء

پس از معرفی نمونه تصاویر مثبت و منفی طبقه‌بندی کننده متوالی با استفاده از تابع آشکارساز متوالی اشیاء به کار گرفته شده و تابع طبقه‌بندی کننده خروجی (با پسوند xml) به منظور تشخیص شیء مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبقه‌بندی کننده متوالی شامل چندین مرحله عملیات است که هر مرحله دربرگیرنده یک بسته از فراگیرهای ضعیف^{۱۳} است. فراگیرهای ضعیف، طبقه‌بندی کننده‌های

قرار گیرند و ج) پنجره به عنوان زمینه (منفی) شناسایی شود در حالی که وجود هذلولی در آن تایید شود؛^{۱۹} این حالت زمانی رخ می‌دهد که نمونه تصاویر مثبت به اشتباه در طبقه‌بندی منفی قرار گیرند. به منظور کارایی بهتر در هر مرحله، توالی باید به گونه‌ای عمل شود که احتمال رخ دادن حالت سوم، کمینه شود [۱۹]. در شکل ۱۱ مراحل انجام کار طبقه‌بندی کننده متوالی با استفاده از آموزش تابع آشکارساز اشیا متوالی در هر مرحله به اختصار توضیح داده شده است. در نهایت خروجی این قسمت یک فایل با پسوند xml است که در مرحله آخر جهت آشکارسازی اهداف روی هر تصویر دلخواهی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از پردازش خارج شوند، زیرا تصور بر این است که اکثریت قریب به اتفاق پنجره‌ها تهی بوده و شامل هدف مورد نظر نیستند. در مقابل، نمونه‌های مثبت (هذلولی) نادر بوده ولی بررسی آنها نیازمند صرف زمان بیشتری است. پاسخ می‌تواند یکی از سه حالت ممکن باشد: الف) پنجره به عنوان هذلولی شناسایی شود و وجود هذلولی در آن پنجره تایید شود؛^{۱۷} این حالت زمانی رخ می‌دهد که نمونه تصاویر مثبت (دارای هذلولی) درست طبقه‌بندی شوند، ب) پنجره به عنوان هذلولی شناسایی شود ولی وجود هذلولی در آن پنجره تایید نشود؛^{۱۸} این حالت زمانی رخ می‌دهد که نمونه تصاویر منفی (فاقد هذلولی) به اشتباه در طبقه‌بندی مثبت

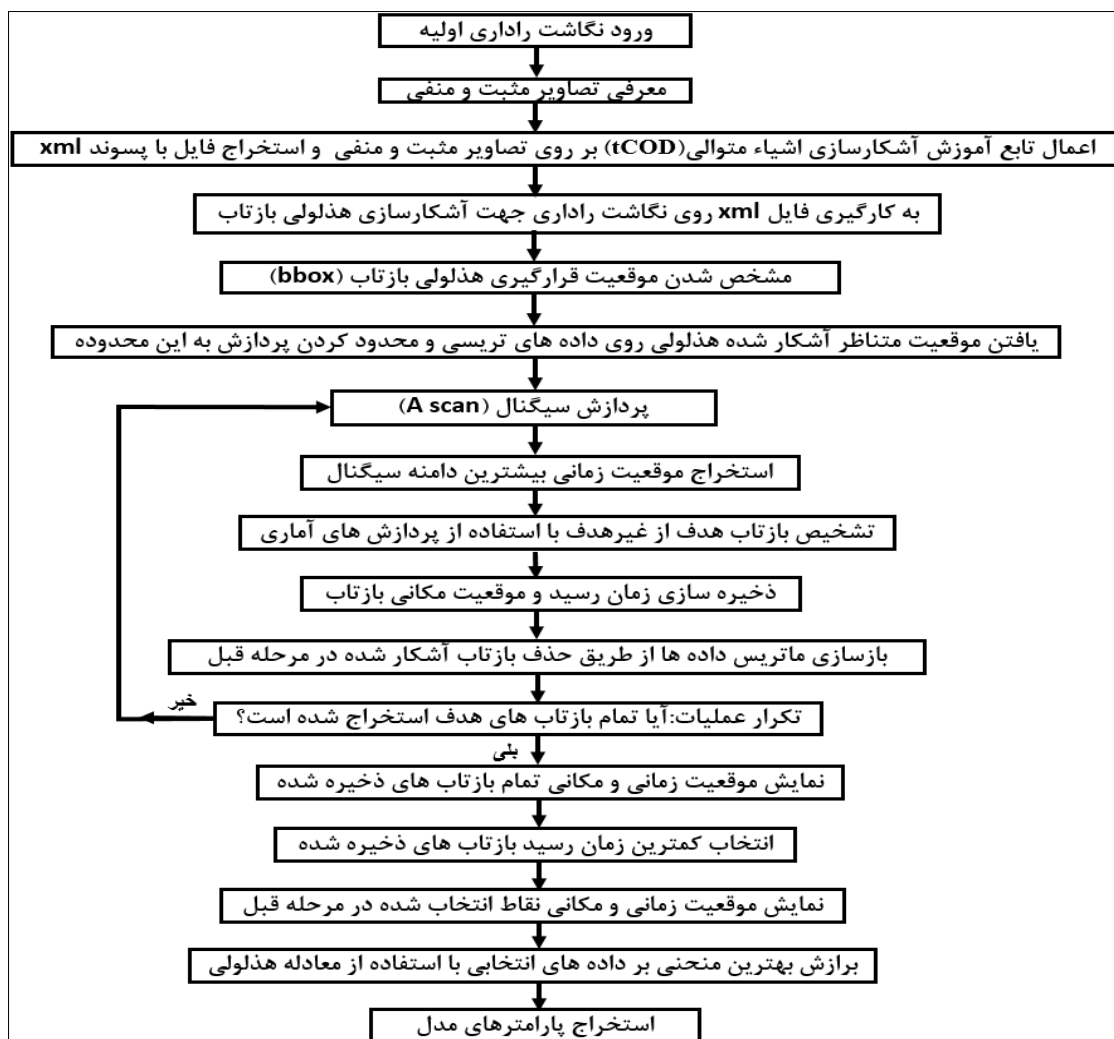


شکل ۱۱: مراحل عملکرد طبقه‌بندی کننده متوالی با استفاده از آموزش تابع آشکارساز اشیا متوالی

هستند. با مشخص شدن محدوده بازتاب هدف زیرسطحی، تمام پردازش‌های لازم تنها بر روی این محدوده مطلوب، اعمال می‌شود. از این رو در این مرحله الگوریتم پیشنهادی در بخش قبل با الگوریتم آشکارساز معرفی شده در این بخش، با یکدیگر ادغام شده و یک الگوریتم ترکیبی کامل برای استخراج پارامترهای اهداف زیرسطحی در یک محیط واقعی را تشکیل می‌دهند. در شکل ۱۲ نمودار جریان مراحل عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی جهت استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای واقعی، نشان داده شده است.

۷-۴- بینایی آشکارساز اشیا متوالی^{۲۰}

در این مرحله فایل با پسوند xml ایجاد شده در مرحله قبل، با استفاده از الگوریتم بینایی ماشین به یک آشکارساز با قابلیت جستجو تبدیل می‌شود. سپس تصویر دلخواه، معرفی شده و این آشکارساز با گام‌های مشخصی بر روی تصویر ورودی دلخواه شروع به جستجو نموده و مناطق دارای هدف را روی این تصویر دلخواه توسط جعبه‌های محدود مشخص می‌کند (`bbbox`ها بیانگر مناطق شناسایی شده به عنوان هدف هستند). هر سطر از `bbbox` دارای ۴ مولفه است که به ترتیب نشان دهنده موقعیت مکانی x و y گوشه بالا سمت چپ `bbbox`، عرض `bbbox` و طول `bbbox`

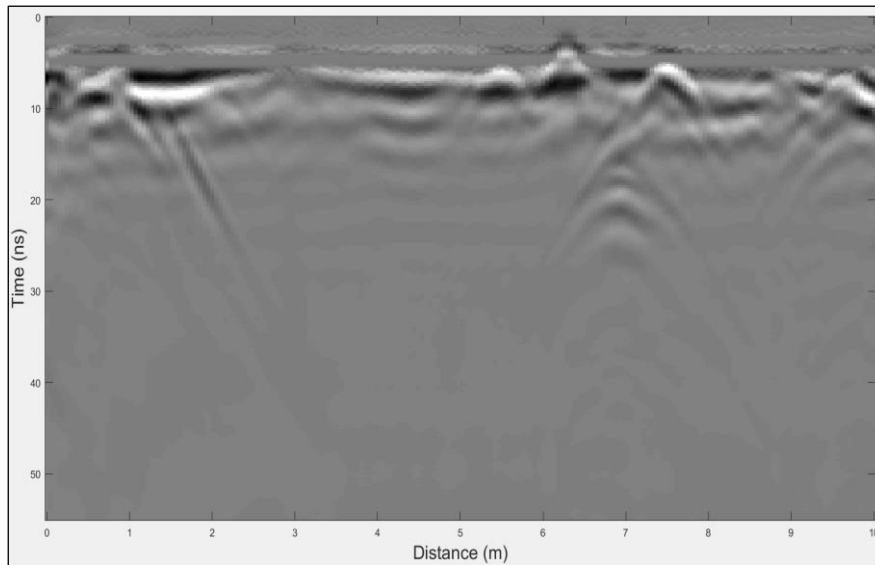


شکل ۱۲: نمودار جریان مراحل عملکرد الگوریتم بهبود یافته پیشنهادی جهت استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای واقعی

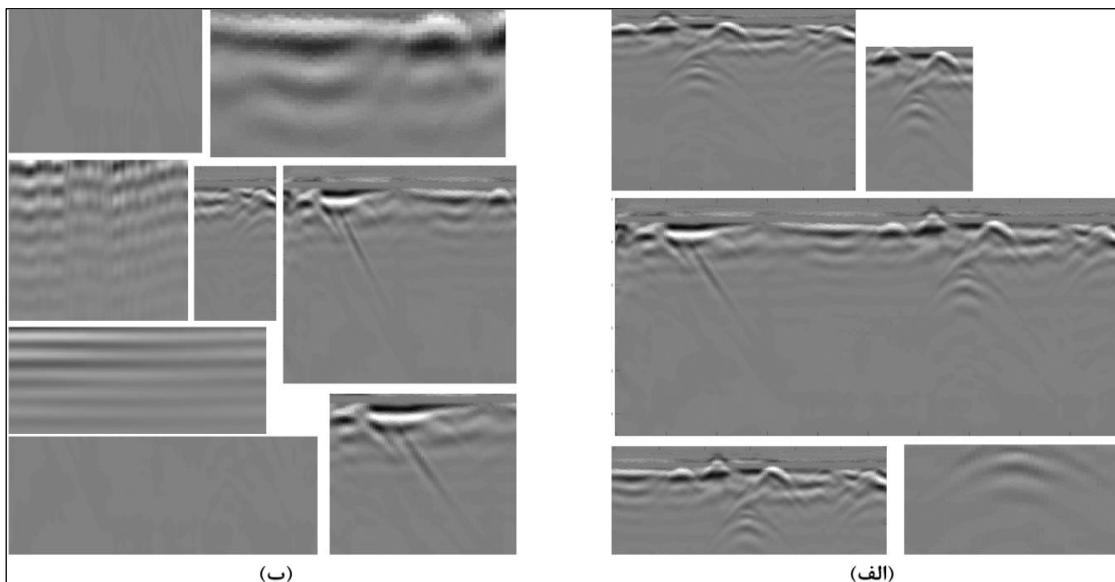
نانوتانیه است. شکل ۱۳ مقطع GPR منطبق بر پروفیل برداشت شده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل نگاشت راداری در ۷ متری طول پروفیل، یک بازتاب هذلولی مانند نشان داده است. جنس محیط میزبان دقیقاً مشخص و معلوم نبوده و نگاشت راداری دارای انواع نوفه است. الگوریتم پیشنهادی جهت تشخیص هذلولی پاسخ هدف، بر روی تصویر نگاشت راداری این شکل اعمال شد. نمونه تصاویر مثبت (شامل هذلولی) و منفی (فاقد هذلولی) به کارگرفته شده جهت آموزش الگوریتم در شکل ۱۴ نشان داده شده و آموزش داده‌ها در پنج مرحله صورت پذیرفت.

۸- ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی با داده‌های واقعی GPR

برای این منظور از داده‌های یکی از پروفیل‌های برداشت شده در میدان امام حسین (ع) روبروی شهرداری شهر اصفهان استفاده شد. محدوده مورد پیمایش شامل یک لوله غیرفلزی (لوله فاضلاب) در عمق ۰/۹ متری است. طول پروفیل حدود ۱۰ متر است که با انتخاب فاصله نمونه‌برداری ۵ سانتی‌متر، تعداد ۲۰۶ رد در طول آن برداشت شده است. همچنین با تنظیم فرکانس نمونه‌برداری ۴۲۱۷ مگاهرتز، تعداد ۲۳۲ نمونه در طول پنجره زمانی، اندازه‌گیری شده که فاصله نمونه‌برداری زمانی، ۰/۲۳۷۱



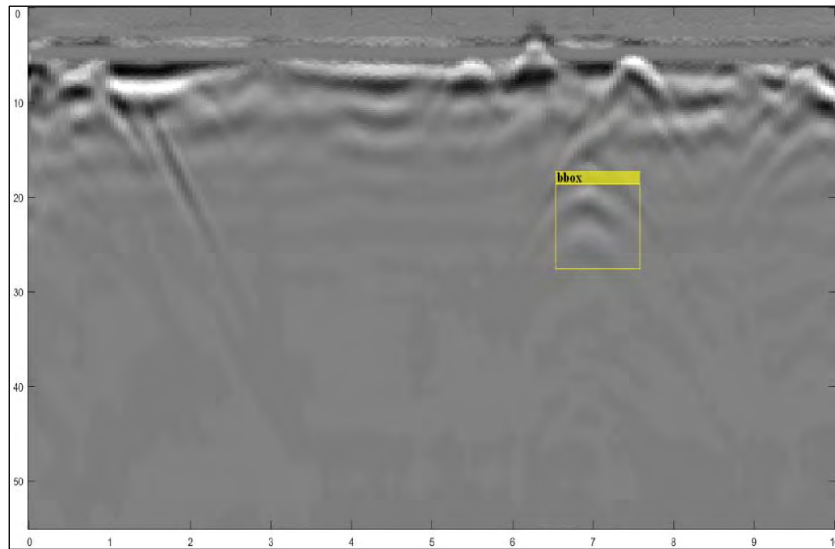
شکل ۱۳: نگاشت راداری داده‌های پروفیل برداشت شده در میدان امام حسین (ع)



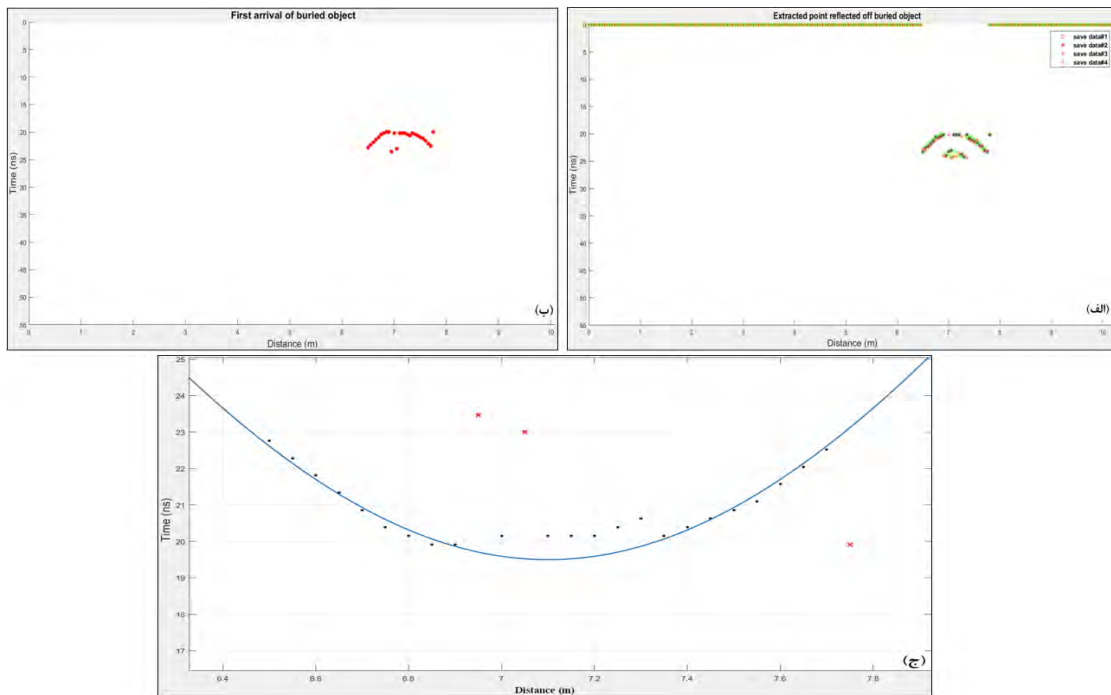
شکل ۱۴: نمونه تصاویر الف) مثبت (شامل هذلولی) و ب) منفی (فاقد هذلولی) به کارگرفته شده جهت آموزش الگوریتم

نسبت‌های بانندی اجرا شود تا bbox های نادرست، از تصویر خروجی حذف شوند. در مرحله بعد خروجی الگوریتم پیشنهادی پس از ذخیره‌سازی اطلاعات مربوط به نقاط بازتاب هدف زیرسطحی به صورت شکل ۱۶ (الف) نشان داده شده است. مطابق این شکل الگوریتم در مرحله چهارم ذخیره‌سازی، متوقف شده و نشان دهنده آن است که نقاط بازتاب بعدی، مربوط به هدف زیرسطحی نیست.

در نهایت الگوریتم مورد استفاده منجر به آشکار شدن جعبه محدود مطابق شکل ۱۵ شد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، پاسخ الگوریتم COD موفقیت آمیز بوده و منجر به آشکارسازی خودکار موقعیت هذلولی بازتاب از هدف زیرسطحی شد. باید توجه کرد که اگر خروجی الگوریتم شامل bbox نادرست باشد، باید روی این محدوده‌ها پردازش‌های لازم همانند حد آستانه یا



شکل ۱۵: آشکار شده شامل هذلولی بازتاب (پاسخ هدف) با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ترکیبی با COD



شکل ۱۶: الف) نمایش موقعیت نقاط بازتابی از هدف زیرسطحی بعد از پایان مراحل ذخیره‌سازی، ب) اولین نقاط بازتاب از هدف مدفون و ج) برازش هذلولی بر داده‌های تجربی با استفاده از معادله ریاضی هذلولی

در مرحله بعد، الگوریتم ۴ دسته اطلاعات ذخیره شده را پردازش کرده و نقاط بازتابی از هدف مدفون با کم‌ترین زمان را نگهداری می‌کند (شکل ۱۶ ب)). سپس یک منحنی از طریق رابطه ریاضی هذلولی (رابطه ۳) بر روی این نقاط برازش یافته است (شکل ۱۶ ج)). در این مرحله سه نقطه بازتاب که با علامت ضربدر قرمز رنگ نشان داده شده‌اند، از عملیات برازش حذف شده و پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل، استخراج می‌گردند. برازش در سطح اعتماد ۹۵ درصد و با روش سطح اعتماد انجام شده است. ضریب تعیین منحنی برازش شده برابر با 0.8399 یا 83.99 درصد است که نتیجه مطلوبی است. مشخصات هندسی و فیزیکی واقعی این مدل با مقادیر برآورد شده توسط الگوریتم پیشنهادی، در جدول ۳ مقایسه شده و میزان درصد خطای مربوطه نیز محاسبه گردیده است. سرعت موج الکترومغناطیسی در محیط نیز برابر با 0.094 متر بر نانوثانیه تخمین زده شده است.

در مرحله بعد، الگوریتم ۴ دسته اطلاعات ذخیره شده را پردازش کرده و نقاط بازتابی از هدف مدفون با کم‌ترین زمان را نگهداری می‌کند (شکل ۱۶ ب)). سپس یک منحنی از طریق رابطه ریاضی هذلولی (رابطه ۳) بر روی این نقاط برازش یافته است (شکل ۱۶ ج)). در این مرحله سه نقطه بازتاب که با علامت ضربدر قرمز رنگ نشان داده شده‌اند، از عملیات برازش حذف شده و پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل، استخراج می‌گردند. برازش در سطح اعتماد

جدول ۳: مقایسه مقادیر واقعی پارامترهای هندسی هدف استوانه‌ای معلوم با مقادیر تخمینی توسط الگوریتم پیشنهادی و محاسبه میزان درصد خطای مربوطه

پارامتر	شعاع (سانتی‌متر)	عمق دفن (متر)	موقعیت مکانی افقی (متر)
واقعی	۲۶	۰/۹	۷
تخمینی	۲۴	۰/۹۱۶	۷/۰۸
خطا (%)	۷/۶	۱/۷	۱/۱

استوانه‌ای مدفون، به ویژه در مناطق شهری که تخریب مجاز نیست، با سرعت و دقت زیاد و با کمترین دخل و تصرف عملگر، قابل پیاده‌سازی و کاربرد است.

مراجع

- [1] Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2016). Detecting cylindrical targets characteristics hidden in GPR images using artificial neural network and template matching, *Journal of Engineering Geology*, 9(4), 3069-3092 (In Persian).
- [2] Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G.H. (2016). Comparison of the performance of ANN and SVM methods in automatic detection of hidden cylindrical targets in GPR images, *Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)*, 10(26), 83-98 (In Persian).
- [3] Hosseini, M., Kamkar-Rouhani, A., Mohammadi-Vizhe, M., & Parnow, S. (2017). Importance of three-dimensional ground penetrating radar surveys in accurate display of the images of subsurface installations, Case study: Shahrood University of Technology, *Journal of Research on Applied Geophysics (JRAG)*, 2(2), 67-76 (In Persian).
- [4] Shihab, S., & Al-Nuaimy, W. (2005). Radius estimation for cylindrical objects detected by ground-penetrating radar, *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Vol. 6, pp. 151-166.
- [5] Toksoz, D., Yilmaz, I., Seren, A., & Mataraci, I. (2016). A study on the performance of GPR for detection of different types of buried objects, *Procedia Engineering*, Vol. 161, pp. 399-406.
- [6] Zhang, P., Guo, X., Muhammad, N., & Wang, X. (2016). Research on probing and predicting the diameter of an underground pipeline by GPR during an operation period, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 58, pp. 99-10
- [7] Ahmadi, R., & Fathianpour, N. (2017). Estimating geometrical parameters of cylindrical

۹- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی نتایج و ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، آزمایش بر روی چندین مدل مصنوعی با جنس‌های مختلف و پارامترهای هندسی (عمق دفن و شعاع) معین، از جمله استوانه افقی فلزی توخالی، استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی و مدل شامل جفت استوانه افقی توخالی از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی صورت گرفت که الگوریتم پیشنهادی در تمام موارد نتایج مطلوبی حاصل نمود. درصد خطای تخمین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مختلف آزمایش شده و نیز میزان دقت برازش معادله هذلولی بر داده‌ها با استفاده از معیار سنجش آماری ضریب تعیین (که معرف دقت برازش است) نشان می‌دهد که میزان این ضریب برای تمام اهداف به جز جفت استوانه افقی، بیش از ۰/۹۳ یا ۹۳ درصد است که مقدار بسیار بالایی بوده و نشان از دقت بسیار زیاد الگوریتم دارد. مقدار ضریب تعیین در حد متوسط برای استوانه افقی جفت از جنس پلاستیک پی‌وی‌سی، بدان دلیل است که بازتاب اهداف زیرسطحی دارای همپوشانی بوده و در این حالت تمام نقاط بازتاب، در برازش شرکت نمی‌کنند. از آنجایی که تصاویر واقعی GPR همواره آلوده به مقدار زیادی از انواع نوفه است، بنابراین برای این گونه از تصاویر، الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده برای تصاویر مصنوعی، به طور متناسب بهبود یافت. عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی نگاشت راداری واقعی GPR یکی از پروفیل‌های برداشت شده در میدان امام حسین (ع) روبروی شهرداری شهر اصفهان، مورد ارزیابی قرار گرفت که در این مورد نیز، نتیجه مطلوبی به دست آمد. به گونه‌ای که الگوریتم توانست مقادیر شعاع، عمق دفن و موقعیت مکانی افقی استوانه افقی مدفون را به ترتیب با خطای ۷/۶، ۱/۷ و ۱/۱ درصد تخمین زند. نتایج این پژوهش برای شناسایی اهداف

[19] Dalal, N., & Triggs, B. (2005). Histograms of oriented gradients for human detection, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Volume 1, pp. 886–893.

-
- 1- Spatialdomain
 - 2- Magnetic permeability
 - 3- Attenuation
 - 4- Impedance
 - 5- Radargram
 - 6- Region of interest
 - 7- Cascade Object Detector
 - 8- Machine learning
 - 9- Viola-Jones learning algorithm
 - 10- Train Cascade Object Detector
 - 11- bounding boxes
 - 12- Cascade Classifier
 - 13- Weak learners
 - 14- Decision stumps
 - 15- Boosting
 - 16- label
 - 17- True positive
 - 18- False positive
 - 19- False negative
 - 20- vision.CascadeObjectDetector

targets detected by Ground-Penetrating Radar using template matching algorithm, Arab J Geosci, pp. 10: 140.

[8] Sadiku, M.N.O. (2001). Numerical techniques in electromagnetics. Second edition, Boca Raton London New York Washington, D.C. CRC press.

[9] Annan, A.P. (2002). The history of ground-penetrating radar, Subsurface Sensing Technologies and Applications, 3(4), pp. 303–320.

[10] Annan, A.P. (2001). Ground-penetrating radar workshop notes, Sensors and Software Inc, Mississauga, ON, Canada, 192 pages.

[11] Annan, A.P. (2003). Ground- penetrating radar: Principles, procedures & applications, Sensors & Software Inc. Technical Paper.

[12] Annan, A.P., & Cosway, S.W. (1992). Ground-penetrating radar survey design, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP'92, April 26-29, Oakbrook, IL, pp. 329-351.

[13] Poluha, B., Porsani, J.L., Almeida, E.R., Santos, V., & Allen, S.J. (2017). Depth estimates of buried utility systems using the GPR method: studies at the IAG/USP geophysics test site, DOI: 10.4236/ijg.2017.85040.

[14] Davis, J.L., & Annan, A.P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophysical Prospecting, 37, pp. 531-551

[15] Viola, P., & Michael, J. J. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Volume: 1, pp. 511–518.

[16] Lienhart, R., Kuranov, A., & Pisarevsky, V. (2003). Empirical analysis of detection cascades of boosted classifiers for rapid object detection, Proceedings of the 25th DAGM Symposium on Pattern Recognition. Magdeburg, Germany.

[17] Ojala, T., Pietikäinen. M., & Mäenpää, T. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns, In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Volume 24, Issue 7, pp. 971-987.

[18] Kruppa, H., Castrillon-Santana, M., & Schiele, B. (2003). Fast and robust face finding via local context, Proceedings of the Joint IEEE International Workshop on Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracking and Surveillance, pp. 157–164.