شناسایی مشخصات اهداف استوانه‌ای پنهان در تصاویر GPR با استفاده از دو روش هوشمند شبکه‌های عصبی و تطبیق الگو

رضا احمدی*؛ دانشگاه صنعتی اراک، دانشکدهٔ مهندسی معدن
نادر فتحیان‌پور؛ دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکدهٔ مهندسی معدن
غلامحسین نوروزی؛ دانشگاه تهران، دانشکدهٔ مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۲/۳/۱ **پذیرش** ۹۳/٦/۲۲

چکیده

رادار نفوذی زمین (GPR) روش ژئوفیزیکی غیرمخرب و با قدرت تفکیک زیاد است که از بازتاب امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا برای آشکارسازی اشیاء مدفون استفاده می‌کند. در پژوهش حاضر این روش برای تعیین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون نظیر انواع ساختارهای تونلی استفاده شده است. دست‌یابی به‌چنین مقصودی براساس تعیین روابط پنهان بین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای و پارامترهای هذلولی پاسخ GPR، با استفاده از روش‌های هوشمند شبکه‌های عصبی مصنوعی و شناخت الگو، انجام شده است. برای این منظور پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی استوانه‌ای شکل تولید شده با مدل‌سازی پیش‌رو به روش اختلاف محدود دوبعدی، به‌عنوان الگو در الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و تطبیق الگو استفاده شده است. ساختار شبکه عصبی استفاده شده براساس استخراج ویژگی‌های متمایز و منحصر به‌فرد (مقادیر ویژه و نرم مقادیر ویژه) از تصاویر GPR و تعیین تمام پارامترهای هندسی اهداف، به‌طور هم‌زمان بنا شده است. عملیات تطبیق الگو نیز با به‌کارگیری دو روش شباهت مختلف هم‌آمیخت حوزهٔ فضایی و هم‌بستگی متقابل نرمالیزه شده در حوزهٔ عدد موج دوبعدی، صورت گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که هر دوروش هوشمند استفاده شده، قابلیت کاربرد برجا، سریع، دقیق و خودکار را برای اهداف ژئوتکنیکی واقعی دارند، هرچند درمجموع روش شبکه‌های عصبی نسبت به روش تطبیق الگو خطای کم‌تر و در نتیجه قدرت تخمین بیش‌تر برای پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون دارد.

واژه‌های کلیدی: رادار نفوذی زمین (GPR)، مشخصات هندسی اهداف استوانه‌ای، شبکه‌های عصبی مصنوعی، تطبیق الگو، هم‌بستگی متقابل نرمالیزه.

* **نویسنده مسئول** Rezahmadi@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

مقدمه

رادار نفـوذی زمیـن یا GPR[1] تکنیک ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک زیاد است که با ارسال امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا (عموماً در محدودهٔ فرکانس یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز) به‌درون زمین و دریافت امواج بازتابی حاصل، به آشکارسازی و شناسایی ویژگی‌های ساختارهای مدفون در درون زمین می‌پردازد. تکنیک غیرمخرب GPR قادر به شناسایی و به‌نقشه درآوردن جزئیات زیرسطحی، بدون نیاز به هرگونه تخریب و یا دست‌کاری است و نتایج برداشت، به‌آسانی به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه بعدی، ارائه می‌شوند.

ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط، کنترل می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک، ε، نفوذپذیری مغناطیسی، μ و هدایت الکتریکی، σ هستند. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی محیط‌ها به‌ویژه در کاربردهای زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، معمولاً ضعیف است و بنا بر این در کاربرد روش GPR، در اکثر مواقع، ε و σ مهم‌ترین پارامترها هستند. برداشت داده‌های GPR معمولاً از طریق سه مد صورت می‌گیرد که متداول‌ترین شیوه عملیات برداشت، مطابق شکل ۱ پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک حالت است. در تمام شیوه‌های برداشت GPR، اندازه‌گیری از یک مؤلفهٔ میدان الکترومغناطیسی (معمولاً مؤلفهٔ میدان الکتریکی)، به‌عمل می‌آید و شدت مؤلفهٔ میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده، به یک سیگنال ولتاژ، تبدیل شده و در مقابل زمان، ثبت می‌شود [۱].

متداول‌ترین شیوهٔ نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنهٔ سیگنال امواج الکترومغناطیسی بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که تریس نامیده می‌شود. در حالت کلی نگاشت راداری[2] برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه‌ای از تریس‌های بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون، به‌شکل هذلولی است (شکل ۱الف). برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنهٔ سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، از سیگنال‌های زمینه بزرگ‌ترند.

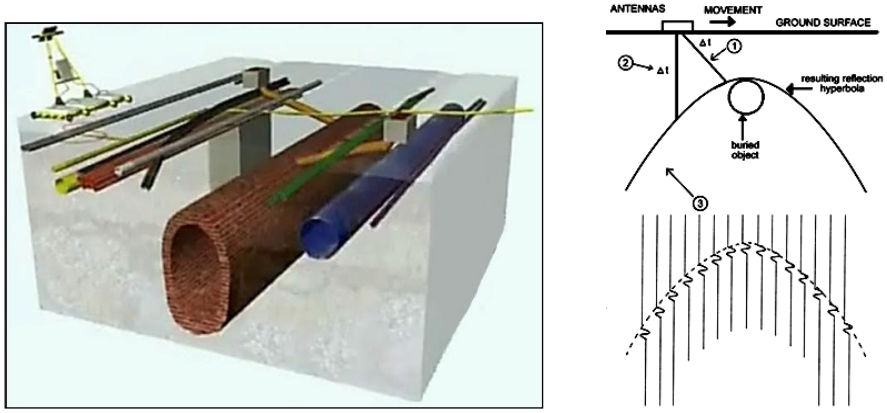
GPR دارای طیف وسیعی از کاربردهاست به‌گونه‌ای‌که در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله در زمینه‌های ژئوتکنیک، شناسایی ساختار و مسائل زمین‌شناسی مهندسی، معدن‌کاری،

1. Ground-Penetrating Radar 2. Radargram

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

تصویر کردن آب‌های زیرزمینی، باستان‌شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، برف و یخ و یخ‌بندان‌شناسی، تأسیسات و مسائل زیست‌محیطی کاربرد دارند. از مهم‌ترین کاربردهای آن در زمینهٔ مهندسی ژئوتکنیک است (شکل ۱ب) که به‌طور اخص هدف آن آشکارسازی و شناسایی انواع ساختارهای استوانه‌ای (شامل انواع تونل‌ها، کانال‌ها، قنات‌ها و خطوط انتقال آب و فاضلاب که در اغلب موارد نیز در زیر شاهراه‌های نواحی شهری قرار دارند)، آشکارسازی فضاهای خالی[1] و شکستگی‌های درون توده‌های سنگی، بررسی نشست‌های زمین و شناسایی نواحی همگن و غیرهمگن است. به‌منظور استخراج اطلاعات مطلوب از داده‌های خام (تصاویر) GPR، علاوه بر پیش‌پردازش‌های معمول و متداول ضروری، نیاز به اعمال پردازش‌های پیشرفته، سریع و مؤثر از جمله تکنیک‌های شناخت الگو[2] است.

تکنیک‌های شناخت الگو در موارد معدودی در ارتباط با تصاویر GPR به‌کار گرفته شده، هرچندکه هر مورد دارای محدودیت‌ها و کاستی‌هایی است، در تمامی آن‌ها نتایج قابل قبولی ارائه نموده است که از جمله آن‌ها کپینری[3] و همکاران (۱۹۹۸) از تبدیل کلاسیک هاف[4] به‌منظور شناسایی بخش‌های خطی در تصویر GPR استفاده کردند [۲]. الـنوایمی[5] و همکاران (۲۰۰۰) یک طبقه‌بندی‌کننده شبکه عصبی را برای شناسایی نواحی بالقوه حاوی هدف و تبدیل



ب الف

شکل ۱. الف) برداشت داده‌های GPR بر روی یک هدف مدفون و رخداد مربوطه در نگاشت راداری به‌شکل هذلولی (خط چین)، ب) بعضی از کاربردهای ژئوتکنیکی GPR

1. Cavity 2. Pattern recognition 3. Capineri 4. Hough 5. Al-Nuaimy

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

هاف را به‌عنوان تکنیک شناخت الگو، برای تعیین موقعیت پیک آنومالی‌های هذلولوی مربوط به اهداف مدفون نظیر لوله و مین‌های زمینی، به‌کار بردند [۳]. آن‌ها از داده‌های دو سایت آزمایشی برای آموزش شبکه عصبی استفاده کرده و نتایج را نیز بر روی همان سایت‌ها آزمایش کردند. گامبا[1] و بلوتی[2] (۲۰۰۳) از دو روی‌کرد شبکه عصبی و تطبیق الگو برای آشکارسازی و تحلیل داده‌های GPR با هدف شناسایی موقعیت لوله‌های مدفون در نواحی شهری استفاده کردند. ورودی شبکه عصبی بخشی از تصویر باینریزه شده است که از تصویر GPR پیش‌پردازش شده اقتباس می‌شود. برای استفاده از تکنیک تطبیق الگو، یک پایگاه داده از هذلولی‌های با ابعاد مختلف تهیه شده؛ با انتخاب هریک از رخدادهای هذلولی شکل موجود در تصویر GPR به‌طور دستی با عمل‌گر[3]، مناسب‌ترین هذلولی از پایگاه داده‌ها بر آن انطباق می‌یابد [٤]. بزرگ‌ترین محدودیت این روش، محدود بودن انتخاب، تنها به هذلولی‌های موجود در پایگاه داده و دستی (غیرخودکار) بودن آن است. سانتوس[4] و همکاران (۲۰۰۹) یک طبقه‌بندی کننده پرسپترون چندلایه‌ای را براساس ویژگی‌های استخراج شده از اهداف مدفون در زیر خاک به‌منظور شناسایی اهداف فلزی از غیرفلزی طراحی کردند [۵]. این روش تنها قادر به شناسایی فلز از غیرفلز است. کای[5] و همکاران (۲۰۱۰) یک سیستم آشکارسازی ویژگی و تطبیق الگو را برای شناسایی تصاویر GPR به‌کار گرفتند. استراتژی منطق فازی برای انطباق ویژگی‌های آشکار شده از تصویر، بر ویژگی‌های موجود در پایگاه داده‌های الگو، برای شناسایی استفاده شد [٦]. در این مورد نیز یک پایگاه داده از یک سری ویژگی‌های الگوهای شناخته شده، ایجاد شده و کار تطبیق الگو با استفاده از منطق فازی و با استفاده از این ویژگی‌های الگوهای موجود در پایگاه داده، صورت می‌گیرد. کوباشیگاوا[1] و همکاران (۲۰۱۱) از دو روش شبکه‌های عصبی و برنامه‌نویسی ژنتیکی برای طبقه‌بندی اشیاء از نوع مهمات منفجر نشده از سایر اشیاء دیگر، استفاده و نتیجه‌گیری کردند که روش برنامه‌نویسی ژنتیکی نسبت به شبکه عصبی، عمل‌کرد بهتری داشته است [۷]. زیونگیو[2] و همکاران (۲۰۱۳) از روش واهم‌امیخت[3] پیشگو برای تضعیف امواج چندگانه ایجاد شده با میله‌های فولادی مدفون در ساختارهای بتن مسلح، در تصاویر مصنوعی ایجادشده با روش FDTD استفاده کردند. سپس

1. Gamba 2. Belotti 3. Operator 4. Santos 5. Cui

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

برای تشخیص اتوماتیک حفرات در تصاویر پیش‌پردازش شده، از الگوریتم SVM استفاده کردند [۸]. روش آن‌ها صرفاً برای تصاویر مصنوعی آزمایش شده است.

در پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های هوشمند شناخت الگو، شامل روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و تکنیک تطبیق الگو، اهداف پنهان در تصاویر GPR، به‌طور کامل ناسایی می‌شوند.

مدل‌سازی عددی پیش‌رو داده‌های GPR به‌روش اختلاف محدود

هدف از انجام این پژوهش شناسایی اهداف استوانه‌ای مدفون، تحت شرایط مختلف محیطی براساس اطلاعات معقول داده‌های GPR است. برای دست‌یابی به این هدف می‌توان از روش‌های عددی مختلفی نظیر ردیابی پرتو[4]، تکنیک‌های حجم محدود تبدیل z، اجزاء گسسته[5] [۹]، تکنیک‌های عبور- بازتاب یک تا سه‌بعدی اختلاف محدود [۱۰]-[۱۳] و اجزاء محدود به‌منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی، استفاده کرد که در همهٔ آن‌ها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، براساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و نحوهٔ عمل‌کرد آن‌ها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود. روش اختلاف محدود به‌دلیل داشتن مزیت‌هایی نظیر درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل‌قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد به‌کار رفته، در میان روش‌های عددی مذکور، مقبولیت و کاربرد بیش‌تری یافته و بنا بر این در این پژوهش نیز از روش اختلاف محدود دوبعدی استفاده شده است.

برای مدل‌سازی پیش‌رو دوبعدی داده‌های GPR به‌روش اختلاف محدود، بازتاب امواج GPR ارسالی از سطح زمین (فرستنده و گیرنده هر دو روی سطح زمین قرار دارند)، با استفاده از فرمول‌بندی روش میدان مغناطیسی عرضی یا مود TM[1]، شبیه‌سازی می‌شود.

تئوری پایه کدهای مدل‌سازی پیش‌رو GPR، معادلات کرل ماکسول در حوزهٔ فرکانس هستند که عبارتند از:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -i\omega\mu\boldsymbol{H} \qquad (۱)$$

1. Kobashigawa 2. Xiongyao 3. Deconvolution 4. Ray tracing 5. Discrete elements

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \sigma \boldsymbol{E} + i\omega\varepsilon \boldsymbol{E} \quad (۲)$$

که در آن $i = \sqrt{-1}$ ،ω فرکانس زاویه‌ای، ε گذردهی دی‌الکتریک، μ نفوذپذیری مغناطیسی و σ هدایت الکتریکی است، E و H نیز به‌ترتیب بردارهای شدت میدان الکتریکی و شدت میدان مغناطیسی هستند.

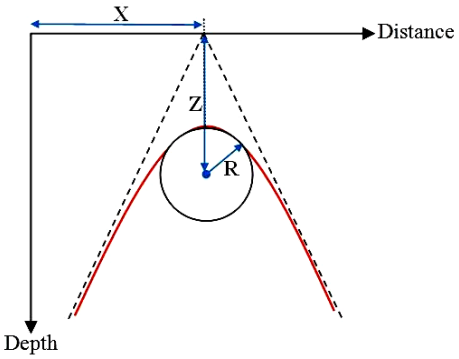
از آن‌جاکه در عمل اغلب ساختارهای ژئوتکنیکی نظیر ساختارهای تونلی شامل انواع تونل‌ها، کانال‌ها و قنات‌ها، به‌صورت استوانه‌ای شکل هستندند بنا بر این مدل‌سازی عددی پیش‌رو به‌روش اختلاف محدود دوبعدی بهبود یافته، برای شبیه‌سازی پاسخ GPR برای اشیای مصنوعی فرضی به‌شکل استوانهٔ افقی، با طراحی مناسب و کدنویسی‌های لازم، صورت گرفت تا علاوه بر سهولت و تسریع در عملیات ورود مشخصات هندسی و فیزیکی مدل به نرم‌افزار، سرعت اجرای برنامه الگوریتم‌های معمول را افزایش داده و در نتیجه زمان کل محاسبات کاهش یابد [۱٤]. مؤلفان این مقاله، تمام کدهای مورد نیاز را در محیط MATLAB آماده کردند و کافی است که با اجرای این کدها و وارد کردن مقادیر ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی (نفوذپذیری مغناطیسی نسبی μ_r، گذردهی دی‌الکتریک نسبی ε_r و هدایت الکتریکیσ) محیط میزبان و هدف، ابعاد مدل GPR، فواصل گسسته‌سازی مکانی و فرکانس مرکزی آنتن، هدف مورد نظر، انتخاب شود.

روابط بین پارامترهای هندسی و پاسخ GPR مدلی استوانه‌ای

از مهم‌ترین مسائل در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مهندسی، شناسایی و استخراج پارامترهای هندسی و فیزیکی ناهمگنی‌های زیرسطحی مدفون است که تاحدودی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی نظیر GPR قابل حل است. چنان‌که قبلاً نیز بیان شد پاسخ سیستم GPR برای اغلب اشیاء مدفون (به‌ویژه اهداف استوانه‌ای) مطابق شکل ۲ به‌صورت هذلولی است که در این شکل R شعاع استوانه افقی، X موقعیت مکانی افقی راس هذلولی و Z موقعیت مکانی قائم یا عمق دفن (فاصله از سطح زمین تا مرکز استوانه) است.

1. Transverse Magnetic field

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]



شکل ۲. پاسخ تیپیک سیستم GPR به‌صورت هذلولی، برای هدف مدفون به‌شکل استوانه افقی (در مقطع دوبعدی)، همراه با نمایش پارامترهای هندسی آن در حوزه مکانی

شکل ۳ پاسخ تیپیک سیستم GPR به‌صورت هذلولی برای هدف استوانه‌ای شکل را نشان می‌دهد که در این شکل x و a به‌ترتیب موقعیت مکانی افقی و قائم راس هذلولی، φ زاویهٔ شیب مجانب‌های هذلولی و b فاصله افقی از راس تا مجانب‌های هذلولی است. هم‌چنین می‌دانیم که مقدار a که در مقیاس زمانی، فاصله از راس هذلولی تا محل برخورد مجانب‌های هذلولی تعریف می‌شود برای هدف نقطه‌ای مدفون برابر با t_0 و برای هدف غیرنقطه‌ای (مثلاً استوانه‌ای با شعاع R) برابر با $t_0 + \frac{2R}{v}$ است [۱۵] که t_0 زمان سیر دو طرفه موج از چشمه واقع بر روی سطح زمین درست بالای مرکز شیء مدفون تا سطح فوقانی شیء و v سرعت سیر امواج EM در محیط است. روابط موجود بدین‌صورت خلاصه می‌شوند:

$$a = t_0 + \frac{2R}{v} \quad , \quad b = \frac{v}{2}t_0 + R = \frac{v}{2}(a) \tag{۳}$$

$$R = \frac{(2b - vt_0)}{2} = \frac{(a - t_0)}{2}v = \frac{b(a - t_0)}{a} \tag{٤}$$

$$Z = \frac{Vt_0}{2} = \frac{bt_0}{a} \tag{٥}$$

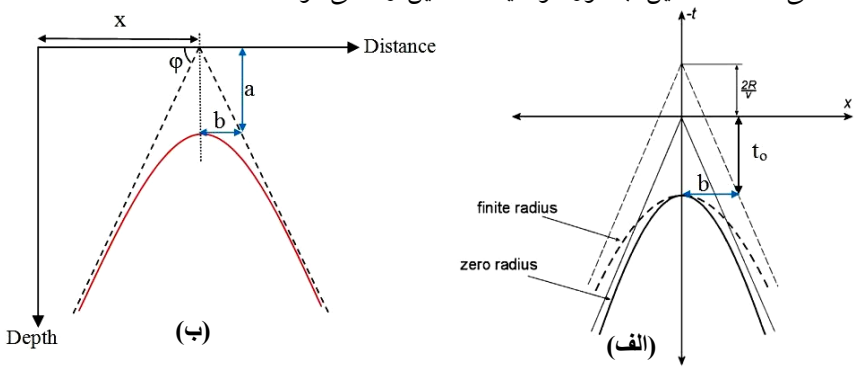
$$\tan\varphi = \frac{a}{b} = \frac{2}{v} \tag{٦}$$

از آن‌جاکه اشیاء استوانه‌ای در پاسخ GPR، با پارامترهایی نظیر شعاع، موقعیت قائم (عمق دفن) و موقعیت افقی و نیز ویژگی‌های محیط میزبان نظیر سرعت سیر امواج EM مشخص

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

می‌شوند بنا بر این با استفاده از مدل ریاضی هذلولی می‌توان روابط بین پارامترهای هندسی هذلولی و پارامترهای فیزیکی و هندسی اشیاء مدفون را استخراج کرد.

در بخش‌های بعدی با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و تطبیق الگو از روی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی استوانه‌ای شکل و براساس روابط موجود بین پارامترهای پاسخ هذلولی شکل با مشخصات هندسی مدل شامل شعاع، موقعیت افقی و عمق دفن، پارامترهای هندسی اهداف نامعین، به‌طور اتوماتیک تخمین زده می‌شوند



شکل ۳. الف) تعریف پارامترهای مشخصه هذلولی در حوزهٔ مکان- زمان، ب) پاسخ تیپیک GPR به‌صورت هذلولی برای هدف، همراه با نمایش پارامترهای هندسی آن در حوزهٔ مکانی

به‌کارگیری روش‌های شناخت الگو برای تصاویر GPR

طبق تعریف واتاناب[1]، الگو درست مخالف بی‌نظمی تعریف می‌شود [۱٦]. مثلاً اثر انگشت دارای الگو است. شناخت الگو شاخه‌ای از علم مهندسی برق است که موضوع بحث آن شامل بررسی چگونگی مشاهدات محیطی با ماشین، نحوهٔ یادگیری شناسایی الگوهای مورد نظر (هدف) از زمینه و تصمیم‌گیری معقول و مطمئن در خصوص طبقه الگوها است. انواع تکنیک‌های شناخت الگو با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و با اعمال محدودیت‌های مناسب، قادر به شناسایی پاسخ اهداف مختلف در تصاویر GPR هستند. شبکه‌های عصبی و تطبیق الگو از جمله روش‌های هوشمند، سریع و کاربردی شناخت الگو هستند که در پژوهش حاضر به‌منظور شناسایی اهداف استوانه‌ای مدفون در تصاویر GPR استفاده می‌شود.

1. Watanabe

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)

۱. مبانی شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی به‌منظور یافتن ارتباطات پنهان در میان داده‌های حجیمی که سازگار نیز باشند استفاده می‌شوند و معمولاً به‌عنوان ابزاری برای طبقه‌بندی هستند. شبکه‌های عصبی از نوع پرسپترون چندلایه‌ای یا MLP[1]، از کاربردی‌ترین شبکه‌های عصبی به‌شمار می‌روند.

عمل‌کرد کلی شبکه عصبی با ساختار[2] شبکه، خصوصیات عصب منفرد، روش یادگیری و داده‌های آموزشی، تعیین می‌شود. معمولاً فرآیند یادگیری[3] با استفاده از تعدادی مثال، مهم‌ترین فرآیند یا مرحله در شبکه‌های عصبی به‌حساب می‌آید. تقسیم‌بندی داده‌ها به سه بخش یادگیری یا آموزش، اعتبارسنجی[4] و آزمون یا آزمایش[5] به‌صورت تصادفی انجام می‌گیرد که معمولاً ٦٠ درصد از کل داده‌ها به داده‌های یادگیری، ۲۰ درصد به داده‌های اعتبارسنجی و ۲۰ درصد به داده‌های آزمون اختصاص داده می‌شود. داده‌های اولیه (ورودی) باید نرمالیزه شوند که در نتیجه این کار معمولاً طیف داده‌ها به ۱- تا ۱ و یا ۰ تا ۱ تغییر می‌یابد.

۲. شناسایی اتوماتیک پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای

هدف این بخش شناسایی و استخراج الگوهای موجود در داده‌های پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی استوانه‌ای مشابه با ساختارهای تونلی متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی، با استفاده از روش هوشمند شبکه‌های عصبی است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش مدل‌سازی عددی اختلاف محدود دوبعدی، پاسخ GPR برای تعداد ۱۹٤ مدل مصنوعی حاوی اشیاء استوانه‌ای شکل مختلف به شعاع ۱۰ تا ۷۵ سانتی‌متر، مدفون در اعماق ٤۰ سانتی‌متری تا ۲/٦ متری و واقع در فواصل افقی ۱ تا ۵ متری طول پروفیل، مدل‌سازی شد. قابل ذکر است که در تمام موارد، ابعاد مقطع (نگاشت) راداری، ۳×٦ متر است، تمام مدل‌های مصنوعی استفاده شده پر از هوا و محیط میزبان تمام مدل‌ها، همواره خاک رس سیلتی با مشخصات فیزیکی $\varepsilon_r=6$، $\mu_r=1$ و $\sigma=6.67mS/m$ (r: نسبی) انتخاب شده است.

1. Multi Layer Perceptrons 2. Topology 3. Training 4. Validation 5. Test

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

به‌منظور به‌کارگیری شبکه‌های عصبی لازم است تا داده‌های ورودی مناسب و پارامترهای هندسی اهداف معین، به‌وسیلهٔ شبکه آموزش داده شوند. داده‌هایتولید شده در مرحلهٔ قبلبه‌روش مرتب‌سازی بر حسب خروجی‌ها به سه بخش آموزشی (۷۰ درضد)، اعتبارسنجی (۱۵ درصد) وآزمون (۱۵ درصد) تقسیم شدند. از آن‌جاکه پاسخ GPR اغلب اهداف زیرسطحی در تصاویر نگاشت راداری، به‌صورت هذلولی‌گون با ویژگی‌های آماری بسیار نزدیک و مشابه هستند از این رو، باعث کاهش کارآیی روش‌های تشخیص الگوی مبتنی بر آماره‌های توصیفی تصاویر می‌شود. بنا بر این لازم است که ابتدا ویژگی‌های مشخصه و منحصر به‌فرد تصاویر، استخراج شده و با شبکه، آموزش داده شوند. یادآوری می‌شود که از خصوصیات مهم ویژگی‌های مورد نیاز در فرایند آموزش شبکه عصبی، یکتا بودن آن‌ها است.

مراحل پیش‌پردازش و مدل‌سازی داده‌های GPR به‌روش شبکه عصبی

از آن‌جاکه شبکه‌های عصبی متداول برای دریافت داده‌های ورودی، به‌صورت برداری طراحی شده‌اند بنا بر این لازم است که ابتدا از روش‌هایی، به‌منظور استخراج ویژگی‌های موجود در تصاویر GPR به‌صورت برداری، استفاده کرد. بدین‌منظور پاسخ‌های GPR تعداد ۱۹٤ مدل مصنوعی مختلف حاوی اشیاء استوانه‌ای افقی در مقاطع دوبعدی، به‌صورت تابعی از پارامترهای هندسی مدل، استفاده شد که پارامترهای هندسی با اهمیت به‌ترتیب شامل شعاع (R)، عمق دفن مرکز استوانه (Z) و موقعیت افقی (X) هستند (شکل ۲). سپس ابعاد هندسی طول پروفیل‌ها و پنجرهٔ زمانی مقاطع GPR بی‌بعد شده و به محدودهٔ صفر تا یک تبدیل شدند. این عمل برای قابلیت تعمیمو مقایسه با پروفایل‌هاییبا ابعاد مختلف ضروری است. داده‌های GPR نیز با استفاده از رابطهٔ (۷) به محدودهٔ ۰/۱ تا ۰/۹ تبدیل شدند که در این رابطه y، داده تبدیل‌یافته، x_i، iامین، x_{min}، کوچک‌ترین و x_{max}، بزرگ‌ترین داده ورودی هستند.

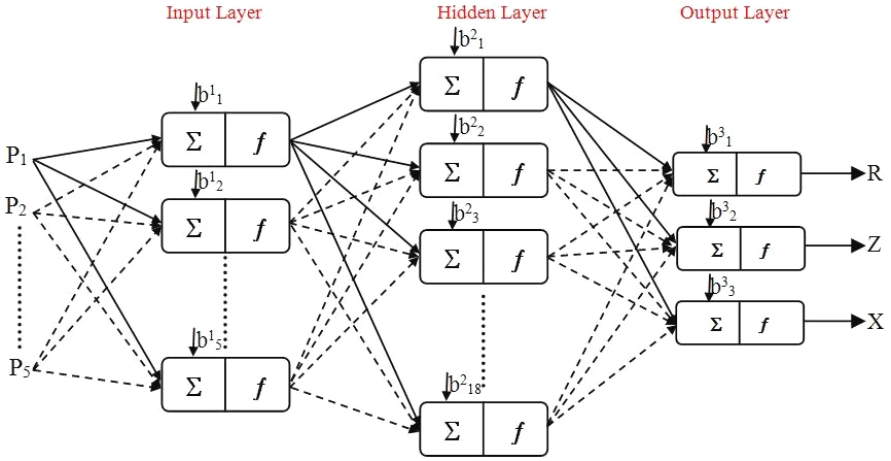
$$y = 0.8 \times \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} + 0.1 \qquad (۷)$$

در این تحقیق آماره‌های توصیفی قطعه‌بندی شده تصویر و مقادیر ویژه تعمیم یافته، بررسی شده و ویژگی‌های آماری متمایز تصاویر از طریق حذف فضاهای تهی[1] تعیین شد به‌گونه‌ای‌که

1. Null space

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

از مقادیر ویژه متمایز و یکتای تعیین شده در راستاهای افقی (فضای بین تریسی) و عمودی (فضای درون تریسی)، سه مقدار ویژه اول راستای افقی، انتخاب و نرم مقادیر ویژه در جهات افقی و عمودی نیز تعیین شد که این پنج مقدار به‌عنوان ورودی‌های شبکه عصبی برگزیده شدند. بدین ترتیب ساختار شبکه MLP سه لایه‌ای (دارای یک لایه پنهان) از نوع تغذیه پیش‌رو پس انتشار خطا با تابع آموزش لونبرگ- مارکوارت[1] و تابع عملکرد میانگین مربعات خطا (MSE)، با ۵ ورودی، تعداد نرون‌های بهینه‌سازی شده در لایه پنهان و ۳ خروجی مطابق شکل ٤ تشکیل شد. تابع تحریک (انتقال) لایه میانی از نوع Tansig و برای لایه خروجی از نوع Purelin انتخاب شد. تعداد دوره‌ها[2] برابر با ۲۰۰، پارامتر تعدیل مارکوارت (Mu) یا نرخ یادگیری برابر با ۰/۰۰۱ و فاکتور کاهش و افزایش این پارامتر نیز به‌ترتیب ۰/۱ و ۱۰ انتخاب شد.

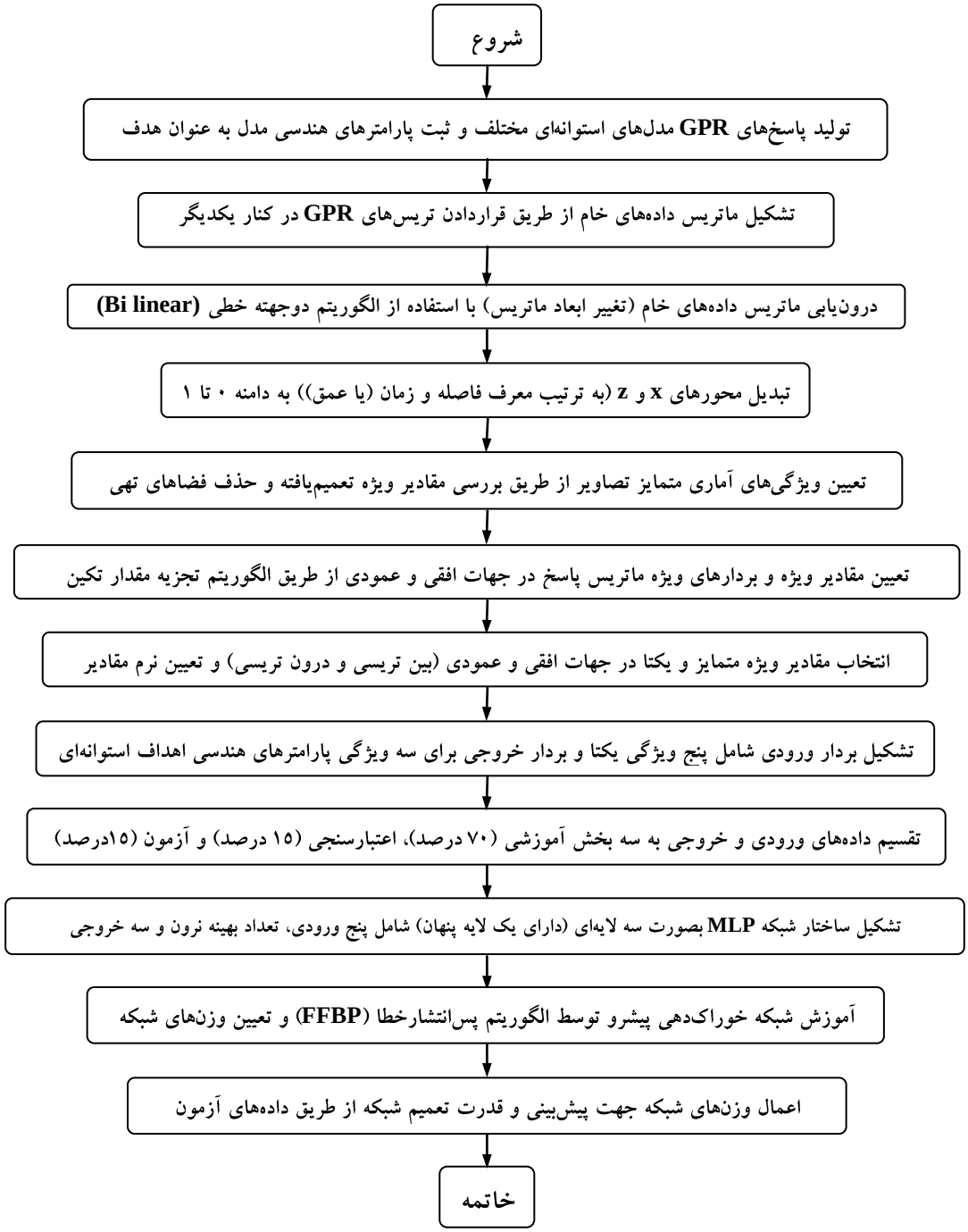


شکل ٤. شمایی از ساختار شبکه MLP سه‌لایه‌ای (دارای یک لایه پنهان) استفاده شده در پژوهش حاضر با ۵ ورودی، ۱۸ نرون در لایه پنهان و ۳ خروجی

بعد از آموزش و تعیین وزن‌های شبکه، عملکرد آن، اعتبارسنجی شد و قدرت تعمیم آن از طریق داده‌های آزمون تعیین شد. به‌طورکلی می‌توان مراحل عملیات پردازشی مورد نیاز برای استخراج پارامترهای هندسی اشیای مدفون در تصاویر GPR را به‌صورت نمودار جریان (فلوچارت) شکل ۵ خلاصه کرد.

1. Levenberg-Marquardt 2. Epoch

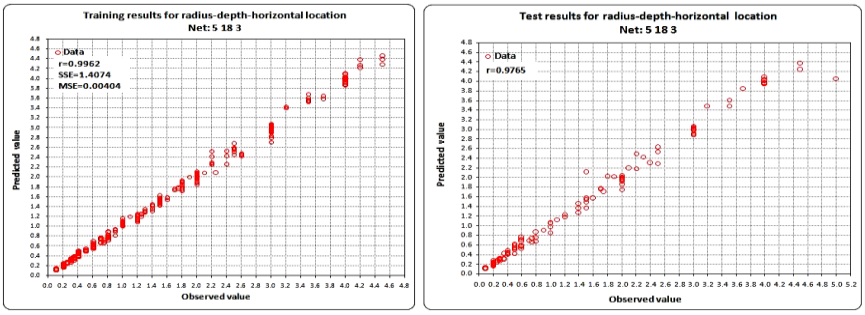
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]



شکل ۵. نمودار جریان مراحل عملیات پردازشی داده‌های GPR با شبکه‌های عصبی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

در این تحقیق مشخصات هندسی شیء به‌عنوان سه خروجی شبکه، به‌طور هم‌زمان تعیین می‌شوند. شکل ٦ نتایج حاصل از آموزش یک شبکه با سه خروجی با میزان هم‌بستگی بیش از ۹۹ درصد برای مرحلهٔ آموزش و بیش از ۹۷ درصد برای داده‌های آزمون را نشان می‌دهد که نتیجهٔ بسیار مطلوبی است. در این شکل علاوه بر مقادیر ضریب هم‌بستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی (r)، مجموع مربعات خطا (SSE) و میانگین مربعات خطای تخمین شبکه (MSE) نیز نشان داده شده‌اند.



شکل ٦. نمودار پراکندگی مقادیر مشاهده‌ای پارامترهای هندسی (شعاع، عمق دفن و موقعیت افقی بطور همزمان) در مقابل مقادیر تخمینی برای مراحل آموزش (بالا) و آزمون (پایین) با شبکه عصبی بهینه ۳×۱۸×۵

هم‌چنین تمایز رفتار پاسخ‌های GPR اهداف استوانه‌ای افقی در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل نمودارهای تغییرات مقادیر ویژه و نرم مقادیر ویژه بین تریسی (در راستای افقی) و نیز نرم مقادیر ویژه درون تریسی (در راستای قائم) برای اهداف استوانه‌ای با شعاع‌های مختلف، واقع در عمق یک و نیم متری و فاصلهٔ افقی سه متر، ترسیم شده است. چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود رفتار تغییرپذیری مقادیر ویژه پاسخ‌های متفاوت GPR، یکتا است و به‌خوبی می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی پارامترهای هندسی بهره جست.

روش تطبیق الگو

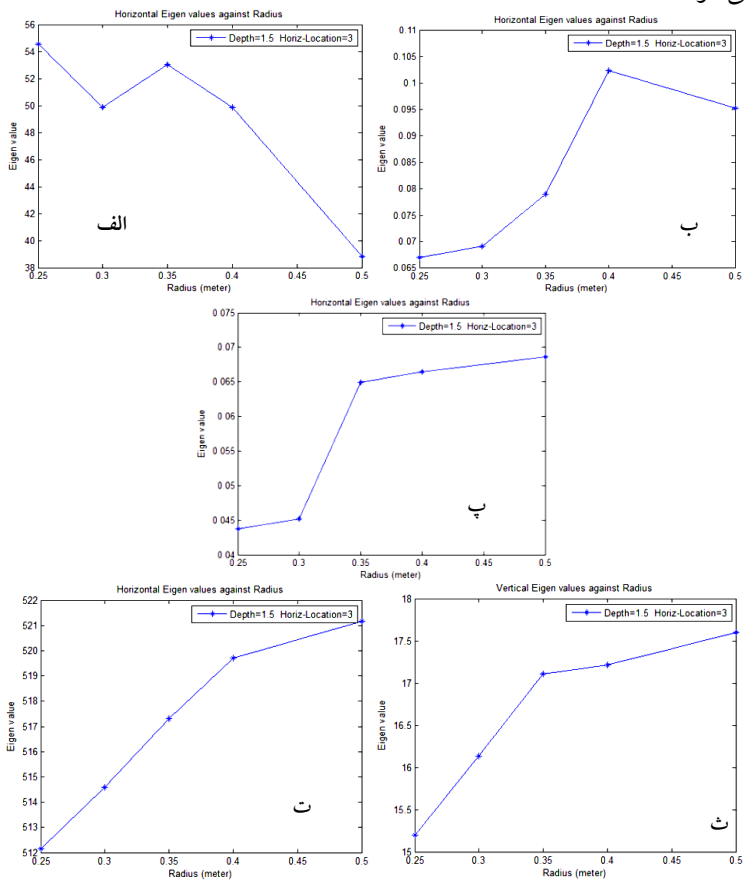
۱. مبانی تئوریک روش تطبیق الگو

روش تطبیق الگو از جمله ساده‌ترین و قدیمی‌ترین و در عین حال سریع‌ترین روش‌های شناخت الگو است که براساس شباهت[1] بین دو پدیده هم‌نوع (نقاط، منحنی‌ها و یا شکل‌ها)

1. Similarity

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

استوار است. در این روش معمولاً الگویی مبنا یا هدفی که غالباً شکلی دوبعدی است و یا نمونه‌ای اولیه[1] از الگویی معلوم، در مقابل تصویر، تطبیق داده می‌شود (شکل ۸). در این تطبیق، معمولاً از معیارهای شباهت آماری نظیر روش‌های هم‌بستگی متقابل[2]، فاصله چندمتغیره و غیره استفاده می‌شود.



شکل ۷. نمودارهای تغییرات مقادیر ویژه بین تریسی (الف تا پ)، نرم مقادیر ویژه بین تریسی (ت) و نرم مقادیر ویژه درون تریسی (ث) برای پارامتر هندسی شعاع

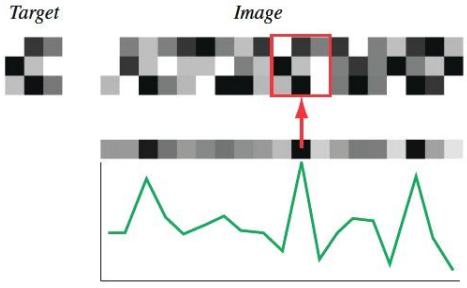
به‌طورکلی هدف روش تطبیق الگو پاسخ‌گویی به این سوالات است [۱۸]: آیا تصویر دارای بعد مشخصی از هدف مورد تجسس است؟ و در صورت مثبت بودن پاسخ سوال قبل، موقعیت هدف در کجای تصویر قرار دارد؟ بنا بر این اساس تطبیق الگو هم‌بستگی متقابل بین

1. Prototype 2. Cross correlation

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

تصویر و هدف است که آن نیز مبتنی بر تعریف فاصله (مربع فاصله) اقلیدسی است. برای توابع دوبعدی پیوسته، هم‌بستگی متقابل تصویر بدین‌صورت محاسبه می‌شود:

$$c(i,j) = \iint f(x,y)g(x-i,y-j)\,dxdy \qquad (۸)$$



شکل ۸. هم‌بستگی متقابل یک الگو با مقیاس خاکستری با تصویر هدف برای حصول بهترین انطباق. در این مورد هدف ۳×۳ پیکسل به‌کار رفته و مقادیر حاصل به‌صورت نمودار نشان داده شده است. موقعیت مشخص شده بیش‌ترین شباهت را به هدف دارد [۱۷]

جای‌گزینی انتگرال‌ها با مجموع‌های محدود روی ابعاد تصویر، رابطهٔ (۹) را به‌دست می‌دهد. برای نرمالیزه کردن نتیجه این تطبیق الگو یا هم‌بستگی، بدون مقدار روشنایی مطلق ناحیهٔ تصویر معمولاً عملیات در حوزهٔ مکانی و به‌صورت نسبت مجموع حاصل سلول‌های (پیکسل‌های) روشن به میانگین هندسی آن‌ها محاسبه می‌شود.

$$\frac{\sum_{i,j} f_{x+i,y+j} \cdot g_{i,j}}{\sqrt{\sum \quad \sum}} \qquad (۹)$$

که ابعاد مجموع بزرگ است و در نتیجه این عملیات در مقایسه با عملیات معادل آن در حوزهٔ فرکانسی، فرآیندی کند و غیرمؤثر است.

اگر f تصویر باشد و عملیات در بازهٔ پنجره (x,y) که موقعیت هدف در آن (u,v) است انجام گیرد هم‌بستگی متقابل بدین‌صورت در می‌آید:

$$C(u,v) = f(x,y)t(x-u,y-v) \qquad (۱۰)$$

رابطهٔ (۱۰) معیاری از میزان شباهت بین تصویر و هدف است.

استفاده از رابطهٔ (۱۰) به‌عنوان هم‌بستگی متقابل، اشکالات چندی دارد [۱۹]. این اشکالات با نرمالیزه کردن بردارهای تصویر و هدف به واحد طول، مرتفع می‌شود که ضریب هم‌بستگی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

شبه‌کسینوسی، مطابق رابطهٔ (۱۱) به‌دست آمده و باعنوان هم‌بستگی متقابل نرمالیزه شده شناخته می‌شود:

$$\gamma(u,v) = \frac{\sum_{x,y}[f(x,y)-\overline{f_{u,v}}][t(x-u,y-v)-\bar{t}]}{\{\sum_{x,y}[f(x,y)-\overline{f_{u,v}}]^2 \sum_{x,y}[t(x-u,y-v)-\bar{t}]^2\}^{0.5}} \quad (۱۱)$$

که در آن $\bar{t}$ میانگین هدف و $\overline{f_{u,v}}$ میانگین f(x,y) در ناحیهٔ شامل هدف است. هنگامی‌که فرآیند در حیطهٔ فوریه صورت می‌گیرد عملیات هم‌امیخت به عملیات ضرب تبدیل می‌شود البته با شیفت فازی ۱۸۰ درجه‌ای مقادیر تبدیل فوریه و در نتیجه عملیات هم‌بستگی متقابل در حوزهٔ فرکانسی به‌سادگی بدین‌صورت است [۱۹]:

$$C(u,v) = F(u,v)G^*(u,v) \quad (۱۲)$$

که علامت * مزدوج مختلط مقادیر تابع است. مزدوج مختلط فقط بر روی فاز مقادیر مختلط تأثیر می‌گذارد به‌گونه‌ای‌که عملیات خیلی شبیه به هم‌امیخت است.

۲. به‌کارگیری تکنیک تطبیق الگو برای تصاویر GPR

در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش مدل‌سازی عددی اختلاف محدود دوبعدی، پاسخ سیستم GPR برای تعداد ۷۱ مدل مصنوعی مختلف شامل مدل‌های حاوی یک، دو و سه شیء استوانه‌ای افقی به‌شعاع ۱۲/۵ سانتی‌متر تا ۱/۵ متر، مدفون در اعماق ۰ تا ۲/۵ متری (فاصله از سطح زمین تا قسمت فوقانی استوانه) و واقع در فاصله ۱ تا ۵ متری طول پروفیل، با استفاده از نرم‌افزار GPRMAX2D/3D مطابق جدول ۱ مدل‌سازی شد. قابل ذکر است که در تمام موارد، ابعاد مقطع (نگاشت) راداری، ۳×٦ متر، تمام مدل‌های مصنوعی استفاده شده از جنس فلز رسانای کامل الکتریکی یا PEC[1] و محیط میزبان تمام مدل‌ها، همواره خاک رس سیلتی (با مشخصات فیزیکی $\varepsilon_r=6$، $\mu_r=1$ و $\sigma=6.67mS/m$؛ r: نسبی) انتخاب شد.

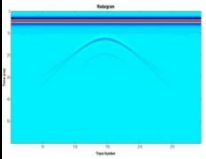
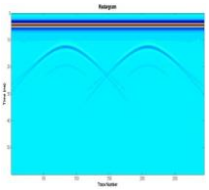
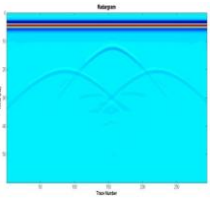
سپس از طریق تلفیق آخرین الگوریتم‌های تطبیق الگوی سریع[2] [۱۹] عملیات تطبیق الگو برای مدل‌های مصنوعی مختلف، به‌صورت تعیین هم‌بستگی متقابل بین تصویر و هدف (الگو) با دو روش هم‌امیخت فضایی دوبعدی و حوزهٔ عدد موج (تبدیل فوریه دوبعدی تصاویر) صورت گرفت. در به‌کارگیری الگوریتم‌های مذکور در کدهای تهیه شده برای این منظور، بسته به ابعاد تصویر هدف، به‌طور خودکار الگوریتمی که در مدت زمان کوتاه‌تری اجرا شود (سرعت بیش‌تری)

1. Perfectly Electrical Conductive 2. Fast template matching

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

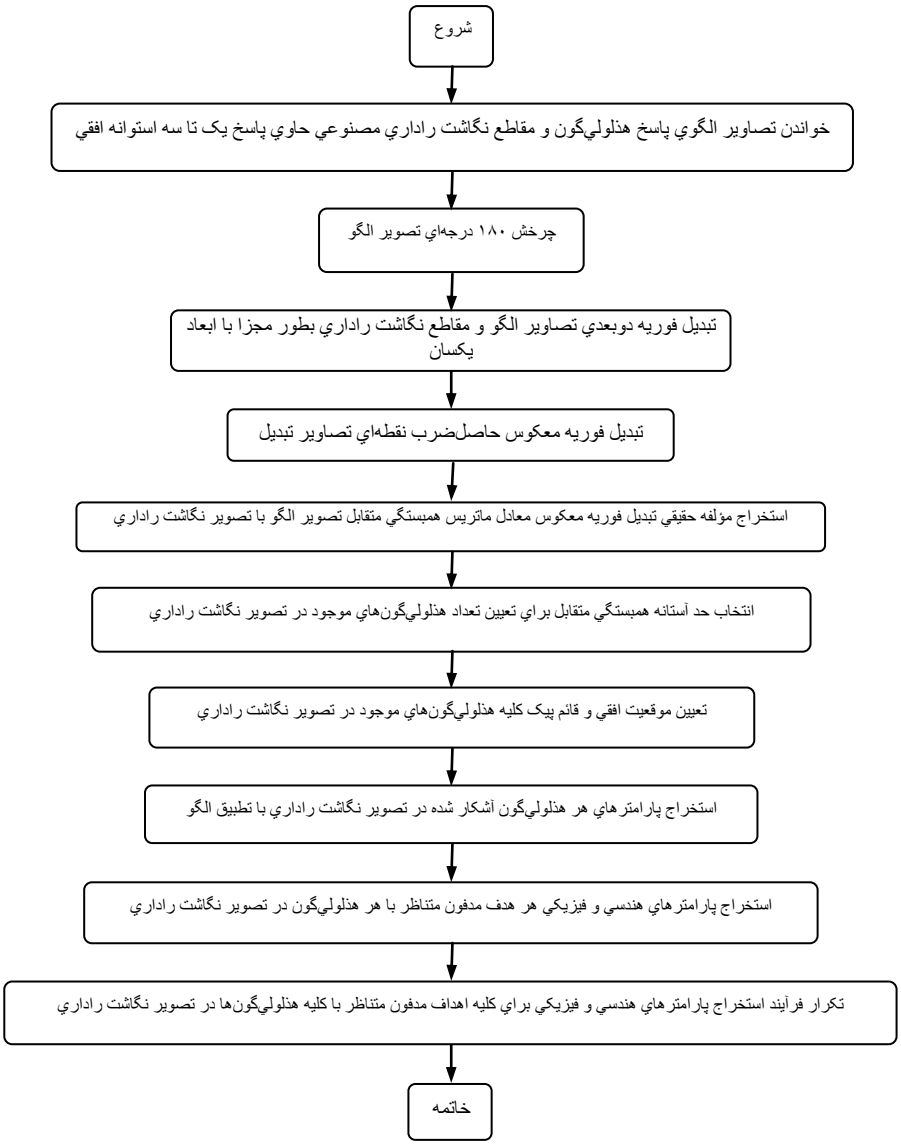
داشته باشد) استفاده می‌شود. نمودار جریان این مرحله از عملیات پردازشی در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی و شکل پاسخ سیستم GPR مدل‌های مصنوعی حاوی یک، دو و سه شی استوانه‌ای افقی

نوع مدل			عمق دفن مدل (متر) / شعاع مدل (متر)	مدل تک استوانه‌ای	مدل دو استوانه‌ای		مدل سه استوانه‌ای		
				۰/۵	استوانه راست ۰/۵	استوانه چپ ۰/۵	استوانه راست ۱	استوانه وسط ۰/۵	استوانه چپ ۱
نوع مدل	مدل تک استوانه‌ای		۰/۲۵						
	مدل دو استوانه‌ای	استوانه راست	۰/۲۵						
		استوانه چپ	۰/۲۵						
	مدل سه استوانه‌ای	استوانه راست	۰/۲						
		استوانه وسط	۰/۱						
		استوانه چپ	۰/۳						

نتایج برای تصاویر متداول و حتی کوچک نگاشت‌های راداری و ابعاد تصویری ۱۰۰۰×۵۰۰ پیکسل، حاکی از سرعت بیش‌تر روش تشخیص الگو در حوزهٔ عدد موجی نسبت به هم‌امیخت حوزهٔ فضایی دارد به‌طوری‌که در مثال‌های مصنوعی آزمون شده، تا بیش از ۲۳ برابر، سریع‌تر است. با استفاده از این الگوریتم، موقعیت (افقی و قائم) و نیز سایر مشخصات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]



شکل ۹. نمودار جریان عملیات تطبیق الگوی سریع پیشنهادی برای تصاویر GPR.

هندسی و فیزیکی اهداف مدفون، شناسایی شد. الگوریتم پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شد که همهٔ مراحل شناسایی و تخمین پارامترهای هندسی اشیاء مدفون، به‌طور اتوماتیک و با حداقل دخالت کاربر تخمین زده شود. پارامترهای زمانی و مکانی الگوی آشکار شده، از طریق

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

برازش (انطباق) تصویر الگو روی تصویر نگاشت راداری (با هم‌بستگی بسیار بالای ۹۹/۷۳ درصد مطابق شکل ۱۰) تعیین شد. مشخصات هندسی هدف زیرسطحی نیز از طریق روابط ریاضی موجود بین این پارامترها با پارامترهای هذلولی پاسخ، شناسایی شد. الگوریتم فوق برای سه نوع مدل مصنوعی شامل یک، دو و سه استوانه افقی مدفون، به‌طور هم‌زمان در یک مقطع نگاشت راداری، با میزان پارازیت‌های تصادفی مختلف (از ۵ تا ۱۰ درصد) به‌کار گرفته شد و نتایج قابل قبولی ارائه کرد.

مطالعه موردی برداشت واقعی GPR

برای ردیابی هدفی معین در تصویر GPR بررسی شده با استفاده از تبدیل فوریه در حوزۀعدد موج، باید ابعاد دو تصویر یک‌سان باشد. بنا بر این ابعاد تصویر الگو با ابعاد تصاویر تمام مدل‌های مصنوعی، هم‌سان شد تا بتوان از روش تطبیق الگو در مورد آن‌ها استفاده کرد.

در جدول ۲ مقادیر شعاع و عمق دفن واقعی با مقادیر تخمینی اهداف مدفون در تصاویر مصنوعی GPR، مقایسه شده و میزان درصد خطای مربوط نیز محاسبه شده است. چنان‌که از شروع داده‌های این جدول مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی توانسته پارامترهای از پیش شناخته شده مدفون را با خطای متوسط ۱۳/٦ درصد، تخمین بزند.

به‌منظور بررسی کارآیی و صحت‌سنجی عمل‌کرد الگوریتم‌های استفاده شده در این تحقیق برای داده‌های واقعی GPR، از داده‌های برداشت شده در خیابان چهارباغ شهر اصفهان در محدودۀ میدان امام حسین(ع) (روبروی شهرداری اصفهان) استفاده شد. این داده ها در قالب یک پروژه به‌منظور شناسایی زیرسطحی کامل محدوده، از طریق برداشت تعداد ١٤ پروفیل GPR به‌طول کلی ۷۸۹ متر با استفاده از یک سیستم GPR مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار[1] ساخت شرکت مالا[2] سوئد با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز [۲۰]، با روش پروفیل زنی بازتابی فاصلۀ ثابت تک حالته برداشت شد.

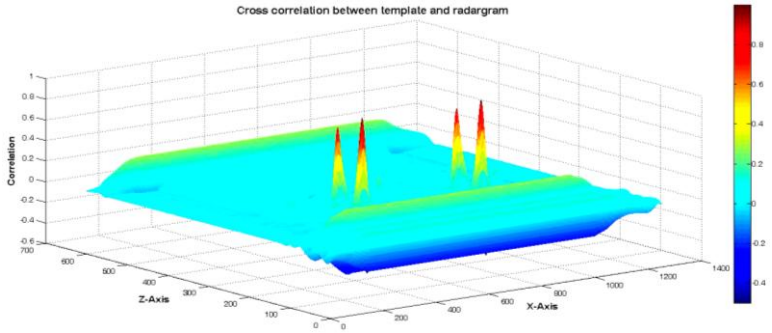
الگوریتم‌های پژوهش حاضر روی تمامی نگاشت‌های راداری حاصل از این برداشت GPR به‌ویژه پاسخ‌های انواع لوله‌های مدفون، پیاده‌سازی شد و نتایج مطلوبی به‌دست آمد. شکل ۱۱ مقطع GPR منطبق بر پروفیل به‌طول ۱۰ متر برداشت شده در راستای تقریباً شمال-

1. Shielded 2. MALA

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

جدول ۲. مقایسهٔ مقادیر تخمینی شعاع و عمق دفن حاصل از تصاویر مصنوعی GPR با مقادیر واقعی، و محاسبه میزان درصد خطای مربوط

مشخصات هندسی / مدل / نوع مدل		شعاع واقعی (متر)	شعاع تخمینی (متر)	خطای شعاع (٪)	عمق دفن واقعی (متر)	عمق دفن تخمینی (متر)	خطای عمق دفن (٪)
مدل تک استوانه‌ای		۰/۲۵	۰/۲۲	۱٤	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
مدل دو استوانه‌ای	استوانه راست	۰/۲۵	۰/۲۲	۱٤	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
	استوانه چپ	۰/۲۵	۰/۲۲	۱٤	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
مدل سه استوانه‌ای	استوانه راست	۰/۲۰	۰/۱۷	۱۸	۱	۱/۱٤	۱٤
	استوانه وسط	۰/۱۰	۰/۱۱	۲۰	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
	استوانه چپ	۰/۳۰	۰/۲٦	۱۵	۱	۱/۱٤	۱٤



شکل ۱۰. نمایش میزان هم‌بستگی متقابل بین تصویر الگو و تصویر نگاشت راداری مدل حاوی دو استوانه افقی با هم‌بستگی بسیار زیاد

جنوبی در محدودهٔ بررسی شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱الف نگاشت راداری داده‌های خام نمایش داده شده است؛ شکل ۱۱ب نیز نگاشت راداری را بعد از اعمال پیش‌پردازش‌های مورد نیاز شامل تصحیح زمان صفر[1]، فیلتر کردن وای[2] (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها)، حذف شیفت جریان مستقیم[3]، حذف زمینه[4]، فیلتر میان گذر باترورث[5] و تقویت[6]

1. Time zero correction 2. Dewow 3. DC shift removal 4. Background removal
5. Butterworth 6- Gain

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

دامنه امواج بازگشتی با عمق با استفاده از نرم‌افزار Radexplorer نشان می‌دهد. پاسخ GPR هدف مورد نظر که یک لوله فاضلاب استوانه‌ای شکل از جنس بتن با موقعیت و مشخصات هندسی معلوم است با بیضی زردرنگ در تصاویر مشخص شده است.

مشخصات هندسی واقعی این لوله با مقادیر پیش‌بینی شده با روش‌های شبکه عصبی و تطبیق الگو، در جدول ۳ مقایسه شده و میزان درصد خطای مربوط نیز محاسبه شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که متوسط خطای مقادیر پارامترهای هندسی لوله استوانه‌ای شکل پیش‌بینی شده با روش‌های شبکه عصبی و تطبیق الگو، به‌ترتیب حدود ۹ و ۱۲/۱ درصد است که با توجه به‌حضور انواع نوفه‌ها در داده‌های واقعی، نتایج قابل قبولی به‌حساب می‌آیند.

نتیجه‌گیری

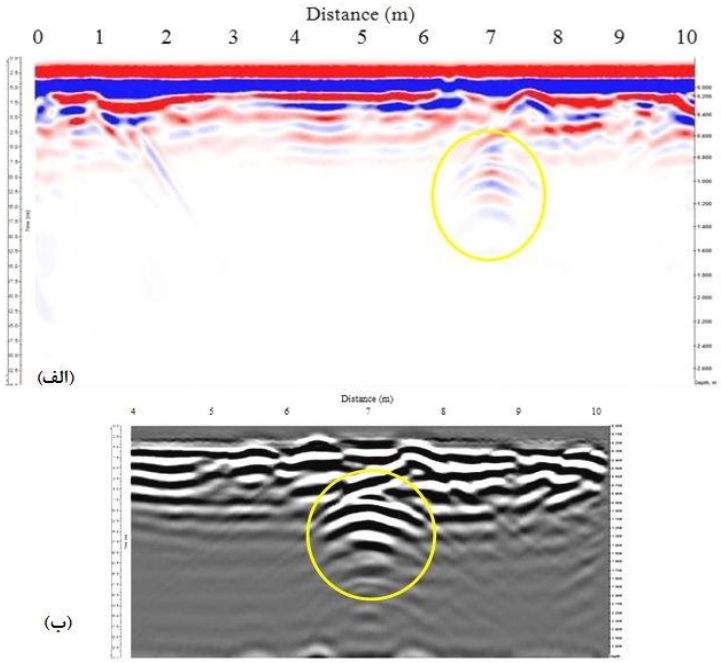
نتایج حاصل از مدل‌سازی پاسخ سیستم GPR تعداد زیادی مدل مصنوعی استوانه‌ای شکل (۲٦۵ مدل) حاوی یک، دو و سه شیء استوانه‌ای افقی متناظر با اهداف و ساختارهای ژئوتکنیکی واقعی و به‌کارگیری تکنیک‌های هوشمند شبکه‌های عصبی و تطبیق الگوی آماری برای یافتن اهداف پنهان در تصاویر GPR حاصل نشان می‌دهد که تکنیک‌های به‌کار رفته برای تشخیص پارامترهای هندسی و فیزیکی مدل‌های مصنوعی استوانه‌ای، قدرت شناسایی و سرعت اجرای زیاد دارند. در هر صورت روش شبکه‌های عصبی نسبت به‌روش تطبیق الگو دقت تخمین بیش‌تر و سرعت اجرای کم‌تری دارد. در پژوهش حاضر دو روی‌کرد مختلف برای روش تطبیق الگو استفاده شد که در مجموع این روی‌کردها با متوسط خطای ۱۳/٦ درصد، شعاع و عمق دفن اهداف استوانه‌ای کوچک را تخمین زدند. در هر صورت نتایج برای تصاویر متداول و حتی کوچک نگاشت‌های راداری و ابعاد تصویری ۱۰۰۰*۵۰۰ پیکسل، حاکی از سرعت بیش‌تر روش تشخیص الگو در حوزهٔ عدد موجی نسبت به همامیخت حوزه فضایی دارد به‌طوری‌که در مثال‌های مصنوعی آزمون شده، تا بیش از ۲۳ برابر، سریعتر است.

پیاده‌سازی و بررسی عمل‌کرد الگوریتم‌های استفاده شده در این تحقیق برای داده‌های واقعی GPR مطالعهٔ موردی، حاکی از آن است که نتایج پژوهش حاضر برای شناسایی اتوماتیک انواع ساختارهای استوانه‌ای مدفون به‌ویژه اهداف ژئوتکنیکی در نواحی شهری با دقت و سرعت عمل زیاد در محل فیلد و بدون دخالت و تفسیر مبتنی بر سلیقه شخصی کاربر، استفاده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

جدول ۳: مقایسهٔ مقادیر واقعی پارامترهای هندسی لوله استوانه‌ای معلوم با مقادیر تخمینی با روش‌های شبکه عصبی و تطبیق الگو، و محاسبهٔ میزان درصد خطای مربوط

مشخصات هندسی هدف / روش تخمین	شعاع واقعی (متر)	شعاع تخمینی (متر)	خطای شعاع (٪)	عمق دفن واقعی (متر)	عمق دفن تخمینی (متر)	خطای عمق دفن (٪)	موقعیت افقی واقعی (متر)	موقعیت افقی تخمینی (متر)	خطای موقعیت افقی (٪)
شبکه عصبی	۰/۵	۰/٤٤	۱۳/٦	۰/۹۵	۱/۰٤	۹/۵	۷	٦/۷۱	٤/۳
تطبیق الگو	۰/۵	۰/٤۰	۲۰	۰/۹۵	۱/۰۸	۱۳/۷	۷	۷/۱۹	۲/۷



شکل ۱۱: الف) نگاشت راداری داده های خام، ب) بخشی از نگاشت راداری بعد از اعمال مراحل پردازشی مورد نیاز

منابع

1. Annan A.P., "GPR for infrastructure imaging", International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering (2003).
2. Capineri L., Grande P., Temple J.A.G., "Advanced image-processing technique for real-time interpretation of ground-penetrating radar

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

images", International Journal of Imaging System Technology, vol 9, no. 1 (1998) 51-59.

3. Al-Nuaimy W., Huang Y., Nakhkash M., Fang M.T.C., Nguyen V.T., Eriksen A., "Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition", Journal of Applied Geophysics, No. 43 (2000) 157-165.
4. Gamba P., Belotti V., "Two fast buried pipe detection schemes in ground penetrating radar images", Int. J. Remote Sens., vol. 24, no. 12 (2003) 2467-2484.
5. Santos R.N., dos V., Porsani L.J., Hirata S.T.N., "Automatic classification of metallic targets using pattern recognition of GPR reflection: a study in the IAG-USP Test Site, Sao Paulo (Brazil)", IEEE Conference Publications (2009) 1-4.
6. Cui Y., Wang L., Xiao J., "Automatic Feature Recognition for GPR Image Processing", World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 61 (2010) 176-179.
7. Kobashigawa J.S., Hyoung-sun Youn, Iskander M.F., Zhengqing Yun, "Classification of Buried Targets Using Ground Penetrating Radar: Comparison Between Genetic Programming and Neural Networks", IEEE Antennas and Propagation Society, vol. 10 (2011) 971-974.
8. Xiongyao Xie, Hui Qin, Chao Yu, Lanbo Liu, "An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids", Journal of Applied Geophysics, vol. 99 (2013) 125-134.
9. Bourgeois J.M., Smith G.S., "A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 34 no.1 (1996) 36-44.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]

10. Cassidy N.J.,"The Application of Mathematical Modelling in the Interpretation of Ground Penetrating Radar Data", Ph.D. Thesis, Keele University (2001).

11. Giannopoulos A., "Modelling ground penetrating radar by GprMax. Construction and Building Materials", vol. 19 (2005) 775-762.

12. Irving J., Knight R., "Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB", Computers & Geosciences, Vol 32, (2006) 1247-1258,.

13. Bergmann T., Robertsson J.O.A., Holliger K., "Numerical properties of staggered finite-difference solutions of Maxwell's equations for ground-penetrating radar modeling", Geophysical Research Letters, vol. 23 no. 1 (1996) 45-48.

١٤. احمدی ر.، فتحیان‌پور ن.، و نوروزی غ. ح.، *شبیه‌سازی پاسخ پالس‌های رادار نفوذی زمین (GPR) با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش اختلاف محدود*، اولین کنفرانس مهندسی الکترومغناطیس ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ٦ و ٧ دی ماه، تهران (١٣٩١).

15. Shihab S., AL-Nuaimy W., "Radius estimation for Cylindrical Objects Detected by Ground Penetrating Radar", Subsurface sensing technologies and applications, vol. 6 (2005) 151-166.

16. Watanabe S., "Pattern Recognition: Human and Mechanical", New York: Wiley (1985).

17. Russ J.C., "The image processing Handbook", Taylor & Francis, Fifth edition, (2007).

18. Duda R.O., Hart P.E.,"Pattern Classification and Scene Analysis", New York: Wiley (1973).

19. Lewis J. P., "Fast Normalized Cross-Correlation", Vision Interface (1995) 120-123.

20. www.malags.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.1.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3069]