

استخراج پارامترهای هندسی اشیاء مدفون استوانه‌ای در تصاویر GPR با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده

بهرام جفرسته^{۱*}، نادر فتحیان‌پور^۲ و سید حسن طباطبایی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

(دریافت: ۹۱/۱۰/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۳/۷/۱)

چکیده

روش رادار نفوذی زمین (GPR) روشی غیرمخرب برای موقعیت‌یابی اشیاء مدفون یا مرز بین سطوح است. با استفاده از این روش می‌توان اهداف فلزی و غیرفلزی را در یک زمینه غیررسانا یا نسبتاً رسانا شناسایی کرد. این روش در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی به‌خصوص ژئوتکنیک، بررسی خاک، زمین‌شناسی، شناسایی حفره‌ها، یافتن موقعیت کانال‌های مدفون و لوله‌ها، تحقیقات باستان‌شناسی، بررسی منابع آب‌های زیرزمینی کم‌عمق و آلودگی‌های زیر سطحی، کاربردهای گسترده‌ای دارد. برای یافتن اشیاء مدفون در اعماق کم، پرکاربردترین روش، رادار نفوذی زمین (GPR) است. در این روش ارسال و بازتاب امواج الکترومغناطیسی از یک سامانه فرستنده-گیرنده با عمق اکتشافی نسبتاً کم (تا چند ده متر) و قدرت تفکیک تا چند سانتی‌متر، ثبت می‌شود. رادارگرام‌های حاصل از GPR، برای اشیاء مدفون با مقطع استوانه‌ای شکل عمدتاً به صورت شبه هذلولی‌اند. تفسیر رادارگرام‌های حاصل توسط افراد متخصص نیاز به وقت و زمان زیادی دارد و اغلب دقت لازم را ندارد. در تحقیق حاضر از یک الگوریتم ژنتیک بهینه شده برای شناسایی اجسام هذلولی شکل در تصاویر GPR استفاده می‌شود. از ادغام ریاضی و نقطه‌ای برای بهبود قابلیت جستجوی محلی الگوریتم ژنتیک استفاده شد و سپس کارایی الگوریتم برای تعیین پارامترهای هذلولی با دو مجموعه داده مصنوعی شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار GprMax و داده‌های برداشت صحرایی ارزیابی شد. با استفاده از پارامترهای هذلولی، مشخصات و موقعیت جسم مدفون شناسایی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که متوسط خطای برآورد پارامترهای هندسی عمق و شعاع ناهمگنی‌های استوانه‌ای شکل برای لوله فاضلاب فلزی به ترتیب معادل ۶ و ۷ درصد است.

واژه‌های کلیدی: رادار نفوذی زمین، اشیاء مدفون، تشخیص خودکار، نرم‌افزار GprMax2D، الگوریتم ژنتیک بهینه شده

Geometrical parameter extraction of cylindrical buried objects in GPR sectional images using a modified genetic algorithm

Jafrasteh, B.¹, Fathianpour, N.² and Tabatabaei, S. H.³

¹Ph.D. Student, Faculty of Mining, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

²Associate Professor, Faculty of Mining, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

³Assistant Professor, Faculty of Mining, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

(Received: 07 Jan 2013, Accepted: 23 Sep 2014)

Summary

Ground Penetration Radar (GPR) as a nondestructive method for identifying underground objects has been successfully applied to different fields of science such as geotechnical investigations, oil and gas exploration, geology, pipe detection and archeology investigations. Metallic and nonmetallic objects can be identified by this method. The depth of penetration is dictated by the GPR antennas. Low frequency antennas (from 25-200 MHz) explore materials from deeper depths in the low cost resolutions. High-frequency antenna (>200 MHz) obtains reflections from shallow depths with higher resolutions.

E-mail: b.jafrasteh@mi.iut.ac.ir

*نگارنده رابعا:

Ground penetrating radar is considered as the most suitable approach to detect shallow buried objects. Transmitter and receiver antenna are closely spaced together and can detect changes in the electromagnetic properties of an object. Electromagnetic waves are transmitted through an antenna and the reflected waves from various buried objects or contacts between different materials are received and stored in digital control unit. Antenna shielding is performed to eliminate interferences from other intruder sources. Electromagnetic waves are emitted by the transmitting antenna and distorted by the soil conductivity variation, dielectric permittivity, and magnetic permeability. The reflected waves are recorded by the receiving antenna in nanoseconds. The shape of GPR radargrams, vertical map of the radar reflection returned from subsurface objects, of cylindrical objects is similar to a hyperbola. Interpretation of acquired GPR data needs an expert geoscientist with a lot of knowledge and time.

The classical Hough transform is a common method for identification of buried objects (Capineri et al. 1998, Simi et al. 2008). However, this method is time-consuming and computationally expensive. Alternatively, artificial neural network used by some authors (Al-Nuaimy et al. (2000), Gamba and Lossani (2000)), but these methods also need many training data to gain high accuracy and producing such data is difficult. Genetic optimization algorithm has been applied by Pasoli (2009) to detect the hyperbolic objects in GPR images. Local search of original genetic algorithm is poor. Chen and Cohn (2010) have presented a method for detecting hyperbola shapes based on probabilistic mixture model. However, the method is computationally expensive and is not robust with respect to noise.

In the current study, a modified genetic optimization algorithm has been applied to GPR sectional images for identifying hyperbola signatures of small-buried objects (mainly pipes and channels). The performance of genetic algorithm highly depends on genetic operators. Arithmetic crossover is used to improve the local search ability and point-wise crossover is applied to explore new regions. The hyperbolas are searched through the edge image resulting from an image pre-processing step. Hyperbola detection is achieved with sub-pixel accuracy. After identifying each hyperbolic object, the object is removed from the image and algorithm searches for new possible hyperbolas in the GPR image.

The performance of proposed method is evaluated using synthetic and real data. The synthetic data were generated with GprMax 2D, a computer program that generates GPR images using an electromagnetic simulator, based on the finite-difference time-domain (FDTD) method in 2D, and real data surveyed in campus of Isfahan University of Technology (IUT). Some preprocessing steps including dewow filtering and removing DC bias, background removal, manual gain function, and image thresholding were applied to the data, before employing the proposed method. Then, hyperbola parameters extracted using a modified genetic algorithm. Depth and radius of the buried object were estimated by hyperbola parameters. The results show that the proposed method gains high accuracy in estimating depth and radius of buried objects.

Keywords: Ground penetration radar (GPR), Buried objects, Automatic detection, GprMax2d, Modified genetic algorithm

۱ مقدمه

مزیت این روش در برداشت‌های صحرائی این است که لزوماً نیازی به اتصال آنتن‌ها به زمین نیست. اخیراً روش‌های غیرمخرب برای اکتشاف و بازیابی اطلاعات سازندهای زیرسطحی در زمینه‌های گوناگون از جمله

روش رادار نفوذی زمین (GPR) روشی غیرمخرب برای موقعیت‌یابی اشیاء مدفون یا مرز بین سطوح است. با استفاده از این روش می‌توان اهداف فلزی و غیرفلزی را در یک زمینه غیر رسانا یا نسبتاً رسانا شناسایی کرد. بهترین

یک ضرورت بشمار می‌رود.

در میان مقاله‌های منتشر شده تا کنون، مطالب بسیار کمی در مورد الگوهای تشخیص خودکار مرتبط با اشیاء مدفون دیده می‌شود. کاپینری و همکاران (۱۹۹۸) از تبدیل کلاسیک هاف (Hough) برای شناسایی الگوهای خطی در تصاویر (که نمایانگر اختلاف در امپدانس دی‌الکتریک بین لایه‌های گوناگون هستند) استفاده کردند (کاپینری و همکاران، ۱۹۹۸). همچنین مؤلفان، روشی برای استخراج آثار هذلولی مانند، اشیاء مدفون و برآورد موقعیتشان عرضه کرده‌اند. نوآمی و همکاران (۲۰۰۰) فرایند تشخیص را در سه مرحله به اجرا درآوردند: (۱) پیش‌پردازش داده‌ها برای کاهش نوفه و آثار سیگنال‌های ناخواسته دستگاهی (۲) قطعه‌بندی تصویر با یک طبقه‌بندی کننده شبکه عصبی برای شناسایی نواحی که بازتاب شیء را مشخص می‌کنند (۳) تبدیل هاف برای شناسایی الگوهای سهموی. لوسانی و گامبا، در ابتدا برخی از پیش‌پردازش‌ها را برای بهبود آثار اهداف مدفون، اجرا و سپس یک تفسیر خودکار تصویر مبتنی بر آموزش و پیش‌بینی شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد کردند (لوسانی و گامبا، ۲۰۰۰). دلبو و همکاران (۲۰۰۰) نیز قبل از حذف کردن نوفه از یک روش طبقه‌بندی فازی برای یافتن هذلولی‌های موجود در تصاویر GPR استفاده کردند. پاسولی و همکاران (۲۰۰۹) برای فرایند تشخیص ۴ مرحله شامل پیش‌پردازش، قطعه‌بندی، تشخیص شیء و تشخیص جنس مواد استفاده کردند. در مرحله تشخیص شیء برای شناسایی الگوهای خطی و شبه هذلولی در تصاویر GPR از یک راه‌برد غیر نظارتی با الگوریتم ژنتیک (GA) بهره گرفتند. همچنین در مرحله تشخیص جنس مواد که موضوعی مربوط به طبقه‌بندی است از طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده کردند. چن و کن (۲۰۱۰) روشی برای یافتن اشکال هذلولی براساس فاصله قائم، در مدل مختلط احتمالی عرضه کردند.

در این تحقیق، داده‌های واقعی با استفاده از دستگاه

اکتشافات گاز و نفت، زمین‌شناسی، علوم مهندسی، باستان‌شناسی و ژئوتکنیک (یافتن موقعیت کانال‌های مدفون و لوله‌ها) توسعه یافته‌اند. بسته به زمینه مورد بررسی از یک حس‌گر مناسب برای تصویر گرفتن از زیرزمین استفاده می‌شود. برای یافتن اشیاء مدفون در اعماق کم، رادار نفوذی زمین (GPR) یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها است. امواج رادیویی، با بسامد بین ۱ تا ۱۰۰۰ MHz، برای تصویرسازی ساختار و ویژگی‌های اشیاء مدفون در زمین (یا ساختارهای مصنوعی ایجاد شده از فعالیت‌های انسانی) توسط یک فرستنده به درون زمین فرستاده می‌شوند و بازتاب امواج الکترومغناطیسی توسط یک دستگاه گیرنده دریافت می‌شود. عمق اکتشافی روش GPR نسبتاً کم (در حدود چند ده متر) می‌باشد ولی قدرت تفکیک آن، می‌تواند حدود چند سانتی‌متر باشد.

از جمله مهم‌ترین کاربردهای GPR می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) زمین‌شناسی مهندسی، در بررسی محل ساخت سد، یافتن موقعیت کانال‌ها و تونل‌های مدفون، تعیین موقعیت نشست‌های احتمالی در مسیر جاده‌ها و ریل‌های راه‌آهن و مانند آن (۲) محیط زیست، تعیین سطح ایستایی و به نقشه در آوردن مناطق آلوده (۳) زمین‌شناسی و اکتشاف معادن کم‌عمق، تعیین ضخامت خاک‌های سطحی و یا ضخامت آبرفت‌ها، تعیین ضخامت یخ (۴) سایر کاربردها مانند تحقیقات باستان‌شناسی و نظامی.

سامانه GPR بدون نیاز به حفاری، یک مقطع پیوسته از زیر زمین را در اختیار ما قرار می‌دهد. نیم‌رخ‌های GPR به منظور ارزیابی موقعیت و عمق اجسام مدفون و بررسی وجود و پیوستگی شرایط و عوارض زیر زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیش‌پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های حجیم به دست آمده از برداشت‌های GPR زمان بر هستند و نیاز به کارشناس با تجربه و متخصص در این زمینه دارند، لذا توجه به توسعه روش‌های خودکار نگاشت زیرسطحی قدرتمند و سریع، با قابلیت استخراج مشخصات هندسی مربوط به جسم مدفون به منظور کاهش این هزینه‌ها

بازتاب‌های ناخواسته سطحی (۳) ترمیم امواج بازتاب شده تضعیف یافته. اثرات نوفه با اعمال فیلتر میانه کاهش داده شده و اثر بازتاب‌های سطحی با عملیات ساده متوسط‌گیری برطرف شده است. همچنین از فیلتر بهره-زمان (Time-gain) برای ترمیم دامنه سیگنال استفاده شد.

این نوع پردازش‌ها معمولاً برای داده‌های خام و بدون نیاز به اطلاعات اضافی از زیر زمین به کار می‌روند و اغلب به شکل ویرایش ردها، فیلترینگ و تصحیح داده‌ها هستند. این پردازش‌ها طوری هستند که کمترین آریبی عملگری را به داده‌ها اعمال می‌کنند. در عمل، اگر به همه این مراحل برای تفسیر نیاز نباشد، به کارگیری اکثر آنها واجب است.

کاربرد پردازش‌های مورد استفاده در جدول ۱ خلاصه شده است. در توالی روش‌های پردازشی، اولین مرحله شامل تصحیح رابرندینگ است که از آن برای درون‌یابی ردها به منظور یکسان کردن فاصله بین ردها و عملی ساختن تفسیرهای دقیق‌تر، بهره گرفته می‌شود. اما در اینجا از یک کیلومتر شمار استفاده شده است که پس از واسنجیدن در فواصل منظم و تعیین شده از سوی کاربر، به فرستنده دستور ارسال تپ (پالس) را می‌دهد و در نتیجه فاصله بین ردها عملاً مستقل از سرعت حرکت دستگاه می‌شود. تصحیح دیگر شامل حذف بخش‌های اولیه سیگنال DC یا آریبی DC و سپس فیلتر دی‌واو برای کاهش "wow" یا ترند بسامد پایینی که در داده ظاهر می‌شود است که روی داده‌ها اعمال شد. سپس برای کم کردن اثر پارازیت‌های ایجاد شده از دستگاه اندازه‌گیری و دیگر پارازیت‌های موجود، عملیات فیلترینگ روی داده‌ها اعمال شد. در نهایت از تابع‌های بهره، به منظور بهبود ظاهری امواج پایانی که به علت میرایی سیگنال مغشوش شده‌اند استفاده شد (شکل ۱). در این تحقیق به علت اینکه موقعیت بی‌هنجاری در مقاطع مشخص است از تابع بهره تعریف شده از سوی کاربر (Manual gain function) برای پردازش داده‌های واقعی استفاده شده است.

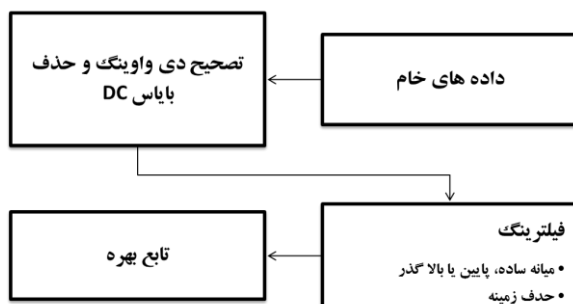
Mala X3M با بسامد مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز برداشت شد و داده‌های مصنوعی با استفاده از یک نرم‌افزار مدل‌سازی پیشرو پاسخ GPR مدل‌سازی شد. پس از پردازش‌های اولیه برای آشکارسازی آثار هدف مدفون، با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک بهینه شده، هذلولی‌های مربوط به اجسام هدف شناسایی و پارامترهای هندسی مدل استخراج شدند. نتایج، نشان‌دهنده قابلیت مناسب روش پیشنهادی در شناسایی و استخراج پارامترهای هندسی اشیاء مدفون (عمدتاً با مقطع استوانه‌ای) دارد. هدف از این تحقیق عرضه روشی جدید برای آنالیز خودکار تصاویر GPR است به طوری که روش پیشنهادی قابلیت برآورد پارامترهای هندسی اشیاء مدفون را داشته باشد.

۲ روش تحقیق

روش مطرح شده شامل سه مرحله پیش‌پردازش، قطعه‌بندی و تشخیص شیء می‌شود. به منظور استخراج اطلاعات هندسی موجود در مقاطع GPR لازم است تا پیش‌پردازش‌های لازم برای تهیه تصاویر ورودی به الگوریتم پیشنهادی صورت گیرد. ابتدا برای کاهش اثرات نوفه، حذف بازتاب‌های سطحی و ترمیم امواج بازتاب شده و تضعیف یافته، داده‌های موجود پیش‌پردازش شدند. سپس برای جدا سازی زمینه از هدف و برجسته سازی آثار ناشی از آن، تصویر موجود باینریزه شد. در گام بعدی، پارامترهای هندسی هذلولی‌های موجود در تصویر با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی استخراج شدند. در نهایت با استفاده از پارامترهای استخراج شده، مشخصات هندسی اجسام مدفون (مقطع استوانه‌ای) از جمله عمق و شعاع تخمین زده شد.

۱-۲ پیش‌پردازش

فرایند پیش‌پردازش به منظور دست یافتن به سه هدف اصلی صورت می‌گیرد: (۱) کاهش اثرات نوفه (۲) حذف



شکل ۱. نمایش مسیر پردازشی مورد استفاده.

۲-۲ قطعه بندی

بزرگ هستند. این عمل با استفاده از روش حد آستانه‌ای کاپور (Kapur) که اساس آن حداکثرسازی آنتروپی است، صورت گرفت. گام بعدی شناسایی اهداف در تصویر باینری (Binerized) به دست آمده با روشی غیر نظارتی (Unsupervised) است. الگوهای شبه‌هذلولی که نشان‌دهنده اهداف بالقوه‌اند، با یک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک که در آن موقعیت نقطه اوج و انحنای مرتبط با الگوی مورد بررسی مدل می‌شوند، مشخص می‌شوند.

برای غلبه بر مسائل معکوس‌سازی فاز، که از اشیایی با خواص دی‌الکتریک متفاوت ایجاد می‌شوند، تصویر پیش‌پردازش شده به یک عملگر، فرستاده می‌شود. سپس برای جداسازی زمینه از اشیاء در تصویر مربوط، روش حد آستانه‌ای (Thresholding) به کار گرفته شد. با این عمل قسمت‌هایی از تصویر که شامل اهداف بالقوه هستند روشن می‌شوند. این روش عموماً بر این اساس استوار است که اشیاء مدفون، عموماً مرتبط با بازتاب‌های با دامنه نسبتاً

جدول ۱. روش‌های پردازشی استفاده شده و عملکرد آنها (جول، ۲۰۰۹).

عملکرد	روش پردازشی		
حذف ترند بسامد پایین، حذف بخش DC سیگنال	تصحیح دی واو (De wow) و حذف آربی DC		
حذف زمان تأخیر موج مستقیم رسیده از فرستنده به گیرنده ناشی از فاصله فرستنده و گیرنده از یکدیگر و سطح زمین	تصحیح زمان صفر		
حذف پارازیت‌هایی با بسامد بسیار بالا	میانگین ساده	زمانی	فیلترگذاری
حذف ناهنجاری‌ها از مقطع	میانه ساده		
حذف پارازیت‌ها، حذف رانه (Drift) و بسامدهای پایین	پایین یا بالاگذر (فیلترهای حوزه بسامد)		
حفظ یک بازه بسامدی در پهنای باند فرستنده	میان‌گذر (فیلترهای حوزه بسامد)		
حذف پدیده حلقوی شدن، حذف اثر کوپلینگ آنتن و زمین	تفاضل میانگین (حذف زمینه)	مکانی	
تقویت سیگنال کاهیده شده در عمق	تابع تعریف شده از سوی کاربر	تابع بهره	

۳-۲ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، که در دهه ۶۰ توسط هلند عرضه شدند، خانواده‌ای از الگوریتم‌ها هستند که به فرایندهای تکامل مصنوعی (artificial evolution) اعمال می‌شوند تا فرایندها را عملی سازند. هدف از تکامل، ایجاد یک مشخصه محاسباتی است که به بهترین نحو یک مسئله مشخص را حل کند. از الگوریتم ژنتیک، به طور گسترده‌ای برای حل مسائل بهینه‌سازی و طبقه‌بندی الگو استفاده شده است. برای اعمال آنها به مسائل تشخیص الگو، باید مسئله تشخیص الگو را به منزله یک مسئله بهینه‌سازی در نظر بگیریم، سپس باید عناصر کلیدی را برای تشخیص الگو مشخص کنیم (ورما و بلومنستاین، ۲۰۰۸).

یک تابع کُدگذاری و کُدگشایی (encoding and decoding) نیز وجود دارد که به ما اجازه می‌دهد از فضای جواب به فضای کروموزوم برویم. برای یافتن بهترین جواب‌ها از بین جمعیت، هر مشخصه محاسباتی ارزیابی می‌شود. برای اختصاص دادن برآزش به هر جواب احتمالی، نیاز به تعریف یک تابع برآزش است. مقدار برآزش، دانشی را که ما در مورد مشخصات بهترین جواب داریم کُددهی می‌کند و سعی می‌کند به جواب‌های احتمالی که این ویژگی‌ها را به بهترین شکل نشان می‌دهد، پاداش دهد. تا وقتی که شرایط توقف فراهم شود، بهترین جواب‌ها نگهداری می‌شوند و امتیاز ادغام (Crossover) برای تولید یک جواب جدید به آنها داده می‌شود. عملگرهای ژنتیک مانند ادغام و جهش (Mutation) به طور مستقیم روی رشته بیتی که نماینده مشخصه‌های والدین است اعمال می‌شوند، تا الگوهای بیتی تولید کنند که نماینده بهترین جواب‌های منطبق برای حل مسئله باشد. عمده‌ترین مزیت این نوع بهینه‌سازی تصادفی، امکان فرار از کمینه‌های محلی با عمل‌های جهش، انتخاب و ادغام است. اصلی‌ترین مشکل این روش، نیاز به تعریف یک تابع برآزش خوب است که نشان دهد هر الگوی بیت در فضای

جواب تا چه اندازه عملکرد مناسبی داشته است. در این تحقیق برای استفاده از الگوریتم ژنتیک مسئله تشخیص الگو در حکم یک مسئله بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از یک الگوریتم ژنتیک بهینه‌شده برای یافتن و استخراج پارامترهای هندسی تصاویر به دست آمده از GPR استفاده شد. در این الگوریتم، جمعیت اولیه به گونه‌ای تعریف شد که بتواند برآوردی از شکل‌های هذلولی مانند در تصاویر به دست دهد. امتیاز برآزش همیشه کلیدی برای تصمیم‌گیری در مورد باقی ماندن مشخصه‌ها در جمعیت GA است. بنابراین برای محاسبه برآزش، باید از یک تابع هدف استفاده شود. در این تحقیق برای محاسبه برآزش، پیکسل‌های روشن تصویر با پیکسل‌های محتمل مقایسه شدند و مقدار برآزش محاسبه شد. باید تعیین کنیم که چه تعداد از مشخصه‌های والدین برای ادغام و تولید یک جمعیت جدید در GA انتخاب می‌شوند و نیز چه مقدار از آنها در نسل بعدی GA شرکت می‌کنند. سازوکار انتخاب به ما اجازه می‌دهد که راهبردهای نجات را در چارچوب تکامل تنظیم کنیم. یکی از ساده‌ترین راهبردهای نجات، نجات بهترین تطبیق‌ها است. در این روش، مشخصه‌هایی که امتیاز برآزش بهتری دارند برای شرکت در تکرار بعدی جمعیت GA نگهداری می‌شوند. در این تحقیق از سازوکار انتخاب بریندل (پنگ-پنگ، ۱۹۹۹) استفاده شد. برای تولید یک جمعیت اولیه از جواب‌های نامزد، از یک عملگر ادغام استفاده می‌شود. ما والدین را برای ادغام و چگونگی مشخصه‌های ژنتیکی برای تولید مشخصه‌های جدید تعیین می‌کنیم. نرخ ادغام، که احتمال تبادل یک کُد ژنتیکی را تعیین می‌کند، از سوی کاربر و بسته به نوع مسئله معمولاً بین ۰/۶ تا ۱ در نظر گرفته می‌شود (بیسلی و همکاران، ۱۹۹۳)، که در این تحقیق برابر ۰/۹ در نظر گرفته شد. در هر نسل تعدادی از مشخصه‌ها در حکم مشخصه‌های ممتاز (Elite) نگهداری می‌شوند. آنها امتیاز بهترین برآزش‌ها را در بین جمعیت ژنوتیپ مورد تحلیل نگهداری می‌کنند و برای تعقیب رفتار یکنواخت در تکامل زمانی تابع

فاز ادغام و جهش می‌شوند که در نهایت، یک جواب بهینه برای هذلولی پیش‌گفته مشخص می‌شود. پس از تشخیص یک هذلولی، هذلولی پیش‌گفته از تصویر حذف می‌شود تا عملیات شناسایی هذلولی بعدی آسان‌تر صورت گیرد. لازم به ذکر است که همه جواب‌های با پتانسیل زیاد، در هر مرحله، نگهداری می‌شوند تا بتوانند در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۴ تعیین مشخصات هندسی

پس از استخراج پارامترهای هذلولی مربوط، لازم است که مشخصات هندسی اجسام مدفون (با مقطع استوانه) با استفاده از این پارامترها مشخص شود. در سال‌های اخیر، تمایل به مدل‌سازی آثار هذلولوی مربوط به برداشت‌های GPR افزایش یافته است. برای مثال مدلی که نوآمی و همکاران (۲۰۰۴) عرضه کردند، زمان رفت و برگشت موج (t) را با موقعیت افقی و سرعت پراکنش مرتبط می‌سازد:

$$\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 - \left(\frac{2(x-x_0)}{vt_0}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

که در آن، (x_0, t_0) مختصات مرکز هدف هستند. در معادله بالا فرض شده است که یک استوانه بی‌نهایت بلند در محیطی همگن قرار دارد و در صفحه‌ای عمود بر جهت خطی حرکت آنتن واقع شده است.

این مدل فرض می‌کند که آثار هذلولی شکل از بازتاب‌دهنده‌های نقطه‌ای به‌دست آمده‌اند، و به همین علت فرض می‌شود که شعاع برابر صفر است، این حالت یک مورد کاملاً استثنایی است، چون در اکثر موارد اهداف مطلوب، اشیاء استوانه‌ای شکل با شعاع محدودند مانند لوله‌ها و تانک‌ها. استفاده از این مدل برای مشخص کردن آثار این قبیل اهداف منجر به دریافت اطلاعات نادرست می‌شود.

اگر یک معادله کلی‌تر داده شود که امکان محدود کردن شعاع در آن وجود داشته باشد می‌توان این مسئله را

برازش نگهداری می‌شوند. روش‌های گوناگونی برای ادغام وجود دارد که در اینجا فقط از دو روش ادغام ریاضی و ادغام تک‌نقطه‌ای استفاده شده است. از ادغام ریاضی برای محدود کردن جست‌وجو پیرامون والدین با مقدار برازش زیاد و از ادغام تک‌نقطه‌ای برای توسعه ناحیه اکتشافی در فضای جست‌وجو استفاده می‌شود. عملگر بعدی عملگر جهش است که یک عملگر آشفستگی (Perturbation) تصادفی است که برای تغییر در مشخصات ژنتیکی کروموزوم مورد بررسی به کار می‌رود. این عملگر یک ژن از یک کروموزوم را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و سپس محتوای آن را تغییر می‌دهد. مثلاً اگر بیت یک باشد، آن را صفر می‌کند. کاربرد این عملگر ایجاد تنوع در جمعیت و جلوگیری از همگرایی زود هنگام الگوریتم در کمینه محلی است. این عملگر با مقدار احتمال جهش مشخص می‌شود. این مقدار متناسب با آسانی یک تغییر تصادفی در هر بیت ژنوتیپ است. توصیه می‌شود که از مقادیر کوچک برای این احتمال استفاده شود (آیلارمیرز و همکاران، ۲۰۰۸). در این تحقیق احتمال جهش برابر ۰/۱ در نظر گرفته شد. نمودار بلوکی یک الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ آورده شده است.

پس از اجرای پیش‌پردازش‌های موردنیاز و ایجاد تصویر باینری، از نقاط مشکی مشخص شده در تصویر باینری که می‌توانند نشان‌دهنده هذلولی بالقوه باشند، به صورت تصادفی چهار نقطه انتخاب و یک هذلولی بر این نقاط برازش داده می‌شود.

همان‌طور که می‌دانیم، شکل پارامتری معمول برای یک شبه-هذلولی قائم به صورت رابطه (۱) است:

$$\begin{aligned} x &= a_1 + b \sinh \alpha \\ y &= a_2 - c \cosh \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

با توجه به این رابطه می‌توان یک هذلولی را با داشتن چند نقطه از آن ایجاد کرد. بدین ترتیب مجموعه‌ای از هذلولی‌های بالقوه که می‌توانند حاوی جواب باشند، ساخته می‌شوند. سپس برازش آنها محاسبه می‌شود و وارد

با جانشین کردن z با $\frac{vt}{2}$ و z_0 با $\frac{vt_0}{2}$ در رابطه (۳) داریم

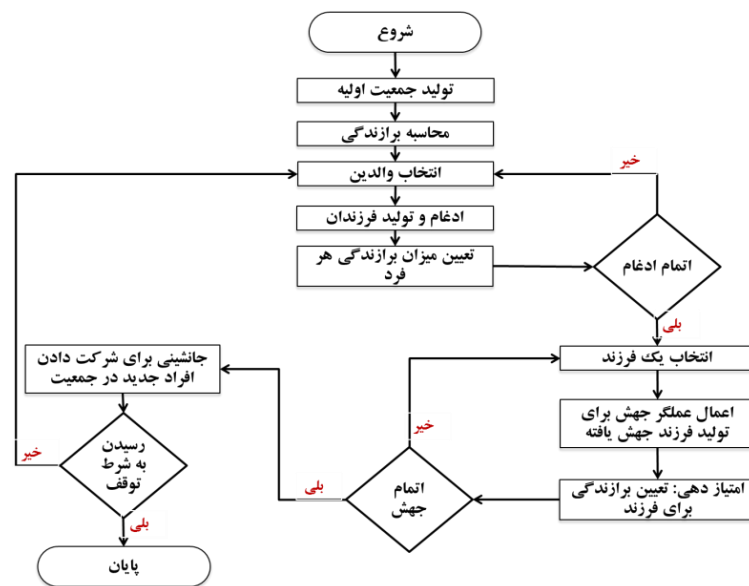
$$\left(\frac{t + \frac{2R}{v}}{t_0 + \frac{2R}{v}}\right)^2 - \left(\frac{x - x_0}{\frac{v}{2}t_0 + R}\right)^2 = 1 \quad (۴)$$

که در آن t زمان رفت و برگشت موج است. رابطه (۴) معادله یک هذلولی به مرکز $(x_0, -\frac{2R}{v})$ است. همچنین می توان دریافت که اگر شعاع صفر باشد رابطه (۴) شبیه رابطه (۲) می شود.

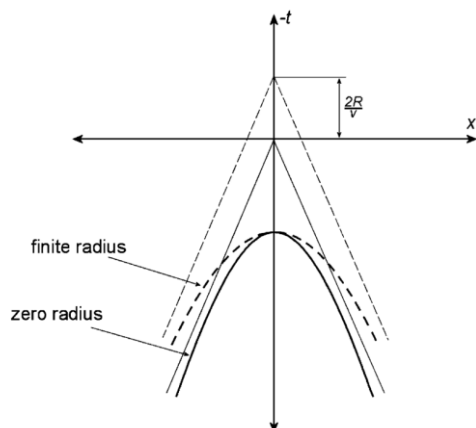
حل کرد. شکل ۳ یک هذلولی تولید شده به سبب تغییر در موقعیت GPR و یا احتمال اینکه هذلولی نتیجه یک شیء استوانه ای با شعاع R باشد را نشان می دهد. می توان دریافت که

$$(z + R)^2 = (z_0 + R)^2 + (x - x_0)^2 \quad (۳)$$

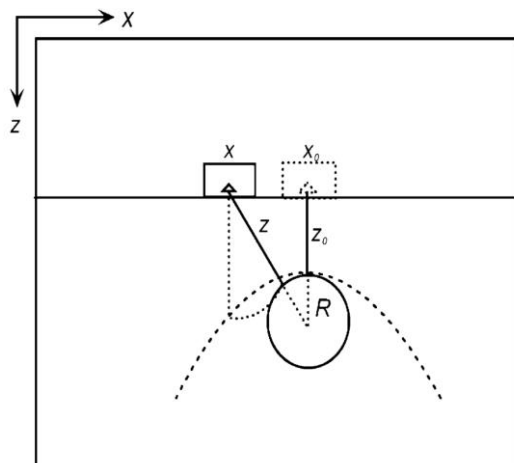
که در آن، z_0 عمق تا بالای استوانه و z عمق ظاهری بازتاب از استوانه در یک موقعیت x است که از موقعیت x_0 استوانه جابه جا شده و R شعاع استوانه است.



شکل ۲. نمودار بلوکی یک الگوریتم ژنتیک.



شکل ۴. اثر تغییر شعاع استوانه مدفون روی هذلولی حاصل و مجانب آن (شهاب و نوآمی، ۲۰۰۵).



شکل ۳. تأثیر تغییر مقدار R روی هذلولی به دست آمده (شهاب و ناومی، ۲۰۰۵).

$$R = \frac{b(a-t_0)}{a} \quad (۸)$$

$$dpth = \frac{vt_0}{2} = \frac{bt_0}{a} \quad (۹)$$

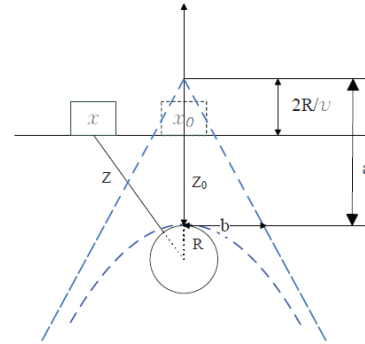
در این مدل فرض می‌شود که یک استوانه بلند در یک محیط همگن قرار دارد و حرکت آنتن GPR عمود بر استوانه است (چن و کن، ۲۰۱۰).

۳ بحث

برای بررسی کارایی روش پیشنهاد شده، از چندین مجموعه داده استفاده شد. تعدادی تصویر مصنوعی GPR با استفاده از نرم‌افزار GPRMax ساخته شد. این تصاویر با استفاده از قسمت GPRMax2D که یک مدل‌سازی پیشرو پاسخ روش GPR است و داده‌های مقاطع دوبعدی تولید می‌کند، ساخته شد (جیانوپولوس، ۲۰۰۵). مقاطع دوبعدی با فرض همگن بودن زمین ایجاد می‌شوند که موجب سهولت تفسیر نتایج مربوط، نسبت به حالت زمین ناهمگن می‌شود، در نتیجه صحت نتایج روش پیشنهادی را می‌توان با جواب‌های تولید شده با استفاده از این نرم‌افزار بررسی کرد. یکی از نتایج مدل‌سازی و نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم روی این مدل در شکل ۶ نشان داده شده است. در مدل، گام مکانی برابر ۱ سانتی‌متر و پنجره زمانی ۲۰ نانوثانیه در نظر گرفته شده است. بسامد سیگنال ۴۰۰ مگاهرتز ثابت در نظر گرفته شد. مدل فرضی شبیه‌سازی شده شامل سه لوله فلزی است که در زمینی همگن از جنس ماسه‌سنگ خشک قرار داده شده‌اند. مشخصات و موقعیت آنها در جدول ۲ خلاصه شده است. نتایج نشان می‌دهد که خطای برآورد عمق برای مدل‌های شبیه‌سازی شده به طور متوسط برابر ۳ درصد و برای شعاع، برابر ۴ درصد است. همچنین برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در برابر اثر نوفه در تصویر، پس از ایجاد تصویر باینری مقدار ۵ درصد نوفه مصنوعی به تصویر باینری اضافه شد، نتایج به دست آمده نشان‌دهنده موفقیت روش در برابر وجود نوفه‌های احتمالی در تصاویر باینری است (شکل ۷). الگوریتم پیشنهادی روی

جدول ۲. مشخصات لوله‌های شبیه‌سازی شده.

شعاع (متر)	موقعیت عمقی (متر)	موقعیت طولی (متر)	استوانه شماره
۰/۱	۱/۱	۴	استوانه شماره ۱
۰/۲	۱/۵	۸	استوانه شماره ۲
۰/۱	۱/۳	۱۲	استوانه شماره ۳



شکل ۵. یک هذلولی عمومی با مجانبش و پارامترهای مرتبط با آن (چن و کن، ۲۰۱۰).

شکل ۴ اثر تغییر شعاع را روی شکل هذلولی نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که وقتی R با صفر برآورد می‌شود، فرض بر این است که پهنای هذلولی از مقدار بالاتری از سرعت انتشار v، ایجاد شده است. در نتیجه، محاسبات عمق شیء و ثابت دی‌الکتریک محیط اشتباه به دست می‌آید.

یک هذلولی معمولاً شکلی شبیه به شکل ۵ دارد، اگر مرکز هذلولی در (x_0, y_0) واقع شده باشد، معادله آن به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{(y-y_0)^2}{a^2} - \frac{(x-x_0)^2}{b^2} = 1 \quad (۵)$$

با مقایسه این رابطه با رابطه (۴)، مقادیر a و b به صورت

زیر در می‌آیند (شهاب و نوآمی، ۲۰۰۵):

$$a = t_0 + \frac{2R}{v} \quad (۶)$$

$$b = \frac{v}{2} \left(t_0 + \frac{2R}{v} \right) \quad (۷)$$

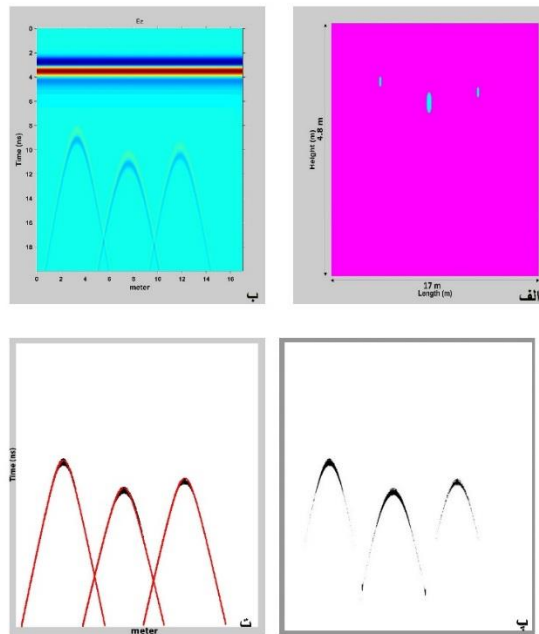
اگر بتوانیم پارامترهای مرتبط با هذلولی (a, b) را بیابیم، می‌توان عمق و شعاع را با روابط زیر به دست آورد:

داده واقعی برداشت شده از یک لوله فاضلاب با قطر ۴۰ سانتی متر و عمق ۱ متر واقع در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان نیز اعمال شد (جدول ۳). این داده‌ها از محوطه دانشگاه صنعتی با استفاده از دستگاه MALA X3M با بسامد آنتن ۲۵۰ مگاهرتز برداشت شد. برداشت با گام‌های مکانی برابر ۵ سانتی متر و پنجره زمانی ۶۰ نانوثانیه صورت گرفت. طول مقطع حاصل ۲۲ متر و عرض آن ۷۰ نانوثانیه و طول و بی‌هنجاری مربوط به آن در ۱۰ متری و عرض ۲۰

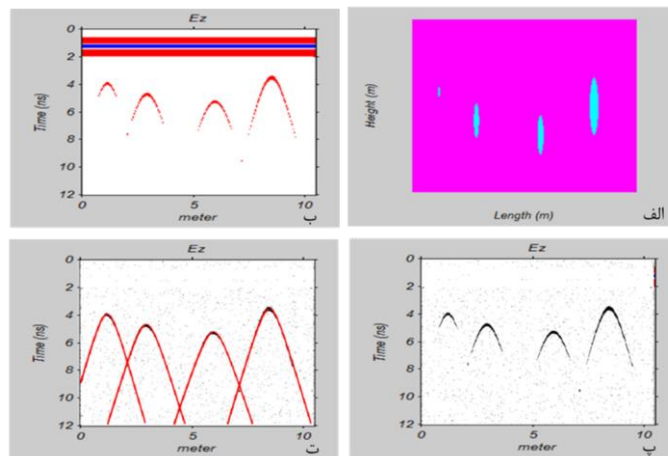
داده واقعی برداشت شده از یک لوله فاضلاب با قطر ۴۰ سانتی متر و عمق ۱ متر واقع در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان نیز اعمال شد (جدول ۳). این داده‌ها از محوطه دانشگاه صنعتی با استفاده از دستگاه MALA X3M با بسامد آنتن ۲۵۰ مگاهرتز برداشت شد. برداشت با گام‌های مکانی برابر ۵ سانتی متر و پنجره زمانی ۶۰ نانوثانیه صورت گرفت. طول مقطع حاصل ۲۲ متر و عرض آن ۷۰ نانوثانیه و طول و بی‌هنجاری مربوط به آن در ۱۰ متری و عرض ۲۰

جدول ۳. مشخصات لوله فاضلاب فلزی.

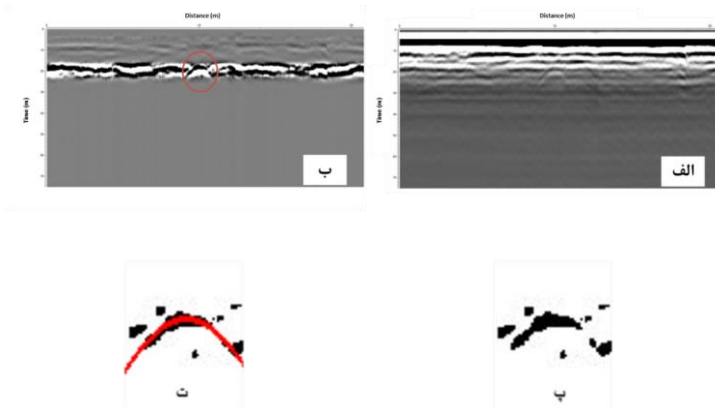
جنس	قطر (cm)	عمق (cm)	ساختار مدفون
فلزی	۴۰	۱۰۰	لوله فاضلاب



شکل ۵. عرضه نتایج اجرای الگوریتم برای شناسایی یک لوله فلزی، (الف) مدل شبیه‌سازی شده، (ب) تصویر پیش‌پردازش شده، (پ) تصویر قطعه‌بندی شده و (ت) الگوی شناسایی شده با الگوریتم پیشنهادی.



شکل ۶. عرضه نتایج اجرای الگوریتم برای شناسایی یک لوله فلزی با اضافه شدن ۵٪ نویز گاوسی، (الف) مدل شبیه‌سازی شده، (ب) تصویر پیش‌پردازش شده، (پ) تصویر قطعه‌بندی شده همراه با اضافه شدن نویز گاوسی و (ت) الگوی شناسایی شده با الگوریتم پیشنهادی.



شکل ۸. عرضه نتایج اجرای الگوریتم برای شناسایی یک لوله فلزی (الف) تصویر داده‌های خام، (ب) تصویر پیش‌پردازش شده، (پ) تصویر قطعه‌بندی شده و (ت) الگوی شناسایی شده با الگوریتم پیشنهادی.

- Capineri, L., Grande, P. and Temple, J. A. G., 1998, Advanced image-processing technique for real-time interpretation of ground-penetrating radar images, *International Journal of Imaging Systems and Technology*, **4**(2), 51-59.
- Chen, H. and Cohn, A. G., 2010, Probabilistic robust hyperbola mixture model for interpreting ground penetrating radar data, *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1-8.
- Delbò, S., Gamba, P. and Roccatò, D., 2000, A fuzzy shell clustering approach to recognize hyperbolic signatures in subsurface radar images, *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1447-1451.
- Giannopoulos, A., 2005, Modelling ground penetrating radar by GprMax, *Construction and Building Materials*, **19**(10), 755-762.
- Joll, H. M., 2009, *Ground penetrating radar: theory and applications*, Elsevier, 147-172 p.
- Lossani, P. and Gamba, S., 2000, Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar images, *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 790-797.
- Pasolli, E., 2009, Automatic analysis of GPR images: a pattern-recognition approach, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**(7), 2206-2217.
- Peng-Yeng, Y., 1999, A new circle/ellipse detector using genetic algorithms, *Pattern Recognition Letters* **20**(7), 731-740.
- Shihab, S. and Al-Nuaimy, W., 2005, Radius estimation for cylindrical objects detected by ground penetrating radar., *Subsurf Sens Technol Appl.*, **6**(2), 151-166.
- Verma, B. and Blumenstein, M., 2008, Pattern recognition technologies and applications: recent advances, *IGI Global*, 463-478 p.

۴ نتیجه‌گیری

مدلسازی رفتار پاسخ‌های اشیاء دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار GprMax2D نشان می‌دهد که با تغییر قطر شیء موقعیت خمیدگی و کانون هذلولی تغییر می‌کند. این نتیجه به وضوح نشان‌دهنده اطلاعات هندسی موجود در شکل پاسخ هذلولی گون GPR است.

در این مقاله از روشی نوین مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تشخیص خودکار اشیاء (عمدتاً لوله‌ها) در تصاویر GPR استفاده شد. این روش در پیدا کردن اشیاء مدفون در زمین و همچنین موقعیت آنها می‌تواند بسیار مفید واقع شود. متوسط خطای نتایج حاصل از معکوس‌سازی برای لوله فاضلاب مدفون به تفکیک شعاع و عمق به ترتیب ۶ و ۷ درصد ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این روش خودکار، سریع و نسبتاً دقیق است و از آن می‌توان به طور موثر و مفید برای تشخیص خودکار اشیاء زیرسطحی در تصاویر GPR استفاده کرد.

مراجع

- Al-Nuaimy, W., Huang, Y., Nakhkash, M. and Fang, M., 2000, Automatic detection of buried utilities and solid objects using neural networks and pattern recognition, *Applied Geophysics*, **43**, 157-165.
- Beasley, D., Bull, D. R. and Martin, R. R., 1993, An overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals, Technical report, University of Purdue.