

## تعیین پارامترهای هندسی اهداف استوانه ای پنهان در تصاویر GPR با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات (PSO)

رضا احمدی<sup>۱\*</sup>، سجاد نان بده<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۰۳

دریافت مقاله: ۹۷/۰۸/۱۲

### چکیده

روش ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) با ارسال امواج الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز به درون زمین و دریافت امواج بازتابی اهداف مدفون، قادر به آشکارسازی و شناسایی اهداف به ویژه استوانه‌های مدفون در اعماق کم، بدون ایجاد شکستگی و تخریب در محیط می‌باشد. در پژوهش حاضر از این روش برای شناسایی پارامترهای هندسی عمق دفن و شعاع اهداف استوانه‌ای مدفون، از طریق روابط ریاضی موجود بین این پارامترها و پارامترهای هذلولی پاسخ GPR، به کمک الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) استفاده شده است. برای این منظور ابتدا مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR با استفاده از روش تفاضل محدود دوبعدی حوزه زمان (FDTD) به کمک نرم‌افزار GPRMAX برای تعداد زیادی از مدل‌های مصنوعی متناظر با اهداف متداول در کاربردهای ژئوتکنیکی و شناسایی ساختارها و تاسیسات زیرسطحی استوانه‌ای انجام شد. در این پژوهش همچنین برداشت‌های میدانی متعددی در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان بر روی اهداف استوانه‌ای شکل مدفون از پیش شناخته شده، انجام شد و پاسخ GPR آن‌ها بعد از اعمال توالی‌های پردازشی مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون در مدل‌های مصنوعی و برداشت‌های واقعی، از الگوریتم PSO در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. عملکرد الگوریتم برای تعداد ۷ مدل مصنوعی تولید شده شامل اهداف استوانه‌ای با جنس‌ها، شعاع‌ها و عمق دفن‌های مختلف و نیز نگاشت‌های راداری واقعی GPR پروفیل‌های برداشت شده در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان، مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت که برای مدل‌های مصنوعی نتایج مطلوب و در مورد تصاویر واقعی، نتایج قابل قبولی حاصل نمود.

**کلید واژه‌ها:** رادار نفوذی به زمین (GPR)، مدل‌سازی پیشرو، هذلولی پاسخ، استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک Rezahmadi@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

اخیراً روش‌های غیرمخرب (Non-Destructive Evaluation) (NDE) برای آشکارسازی و شناسایی مشخصات ساختارهای زیرسطحی مدفون در زمینه‌های مختلف از جمله ژئوتکنیک و شناسایی ساختارها، مسائل زمین شناسی مهندسی، باستان شناسی، برف و یخ و یخبندان شناسی، تاسیسات (یافتن موقعیت انواع تاسیسات مدفون به‌ویژه انواع لوله‌ها)، مسائل زیست‌محیطی و غیره توسعه یافته‌اند (جفرسته و همکاران، ۱۳۹۴). رادار نفوذی به زمین (Ground-Penetrating) (GPR) بهترین روش برای آشکارسازی اشیاء مدفون در اعماق کم و شناسایی پارامترهای هندسی آن‌ها می‌باشد. GPR یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب و با قدرت تفکیک بالاست که با ارسال امواج الکترومغناطیسی (EM) با فرکانس زیاد به درون زمین و دریافت امواج بازتابی حاصل، به آشکارسازی و شناسایی ویژگی‌های ساختارهای مدفون در درون زمین می‌پردازد. این روش قادر به تصویربرداری جزئیات زیرسطحی محیط، بدون نیاز به هیچ گونه تخریب و یا دستکاری بوده و نتایج (داده‌های) برداشت شده GPR، به‌آسانی به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

تفکر استفاده از امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا در بررسی‌های زیرسطحی، به مطالعات و اختراعات ثبت شده توسط هولسمیر (Hulsmeyer) آلمانی در سال ۱۹۰۴ بازمی‌گردد (Apparao and Balkema, 1997). نخستین برداشت GPR توسط استرن (Stern, 1929) برای تعیین عمق یک رودخانه یخ زده در اتریش صورت گرفت. موری و آرت نخستین سامانه‌های تجاری رادار را در سال ۱۹۷۲ در آرت‌دریک (Art Derrick) ساختند (Morey, 1974). پس از تولید تجاری این دستگاه‌ها، افزایش بی‌نظیر کاربرد آنها و چاپ مقالات و تحقیقات با موضوع این روش آغاز شد (کامکار روحانی و همکاران، ۱۳۹۱). در زمینه نحوه آشکارسازی اهداف مدفون زیرسطحی و شناسایی ویژگی‌های فیزیکی و هندسی آن‌ها با استفاده از روش

GPR پژوهش‌های چندی انجام گرفته که در زیر به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

احمدی و همکاران (۱۳۹۴) از روش GPR برای تعیین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون همانند انواع ساختارهای تونلی استفاده کردند. دستیابی به چنین مقصودی براساس تعیین روابط پنهان بین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای و پارامترهای هذلولی پاسخ GPR، با استفاده از روش‌های هوشمند شناخت الگوی شبکه‌های عصبی مصنوعی و تطبیق الگو، انجام شده است. برای این منظور پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی استوانه‌ای شکل به‌عنوان الگو در الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و تطبیق الگو استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هر دو روش هوشمند استفاده شده، قابلیت کاربرد برجا (In situ)، 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 بیش‌تری برای پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون دارد. جفرسته و همکاران (۱۳۹۴) از الگوریتم ژنتیک بهینه شده برای شناسایی اجسام هذلولی شکل در تصاویر GPR و ادغام ریاضی و نقطه‌ای برای بهبود قابلیت جستجوی محلی الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. سپس کارآیی این الگوریتم را برای تعیین پارامترهای هذلولی با دو مجموعه داده مصنوعی شبیه سازی شده با استفاده از نرم‌افزار GPRMAX و داده‌های برداشت صحرائی ارزیابی نمودند. با استفاده از پارامترهای هذلولی، مشخصات و موقعیت جسم مدفون شناسایی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که متوسط خطای برآورد پارامترهای هندسی عمق و شعاع اهداف استوانه‌ای شکل برای لوله فاضلاب فلزی به ترتیب معادل ۶ و ۷ درصد است. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی مختلف متناظر با ساختارهای ژئوتکنیکی فرضی همانند استوانه افقی منفرد، منشور دوبعدی، استوانه افقی جفت، چندضلعی دوبعدی دلخواه و زمین لایه‌ای را با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرو به روش تفاضل محدود دوبعدی حوزه زمان

راستا ابتدا پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی اشیای استوانه‌ای با مشخصات مختلف با استفاده از مدل‌سازی پیشرو به روش تفاضل محدود دویعدی، شبیه‌سازی شده و برای شناسایی مشخصات مدل‌های مصنوعی و نیز داده‌های واقعی GPR از الگوریتم PSO استفاده می‌شود.

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. از آنجایی که سیگنال‌های GPR از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند، بنابراین الکترومغناطیس پایه و اساس GPR می‌باشد. معادلات ماکسول نیز پایه و اساس الکترومغناطیس را تشکیل می‌دهند، به گونه‌ای که تمام پدیده‌های الکترومغناطیس در مقیاس ماکروسکوپی توسط این معادلات قابل توصیف بوده و تمامی مسائل مربوطه نیز با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب قابل حل می‌باشند.

ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند، شامل گذردهی دی‌الکتریک  $\epsilon$ ، نفوذپذیری مغناطیسی (Magnetic permeability)  $\mu$  و هدایت الکتریکی  $\sigma$  می‌باشند. در بسیاری از کاربردهای زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی GPR، ویژگی‌های الکتریکی فاکتور غالب کنترل‌کننده پاسخ‌های GPR هستند. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی محیط‌ها معمولاً ضعیف بوده و بنابراین در روش GPR در اکثر مواقع  $\epsilon$  و  $\sigma$  مهم‌ترین پارامترها می‌باشند.

یک چشمه (Source) انرژی الکترومغناطیسی که سیگنال‌ها را به شکل امواج منتشر می‌کند، انرژی را به طرف هدف می‌فرستد و انرژی ارسال شده و بازتابیده به وسیله گیرنده آشکار می‌شود. سیگنال GPR ثبت شده به تغییرات فیزیکی درون محیط پیرامون و ویژگی‌های موج GPR یعنی سرعت فازی موج الکترومغناطیسی (v)، میزان تضعیف (Attenuation) میدان در محیط سیر موج ( $\alpha$ ) و مقاومت (Impedance) یا امپدانس الکترومغناطیسی (z) بستگی دارد

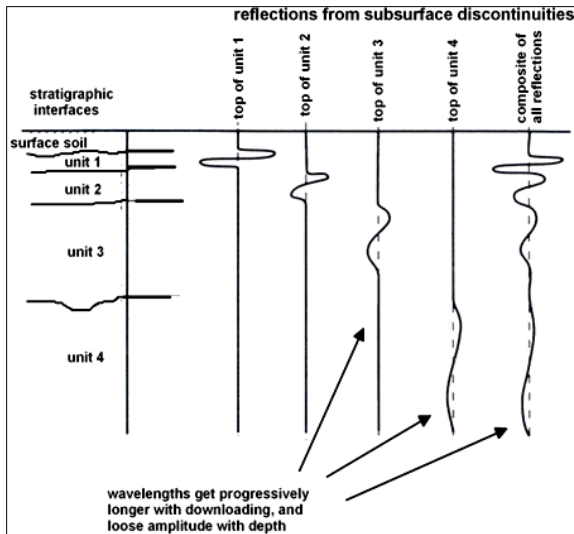
بهبود یافته در حوزه فرکانس مدل‌سازی کردند. در این تحقیق براساس پارامترهای ریاضی هذلولی و نتایج مدل‌سازی پیشرو داده‌های GPR هدف استوانه‌ای، نشان داده شده که بین نسبت ارتفاع به پهنای هذلولی با GPR پارامترهای هندسی هدف استوانه‌ای (قطر و عمق دفن) یک سری روابط خطی وجود دارد. این روابط می‌توانند به عنوان معیارهای کمی مناسب برای شناسایی مشخصات فیزیکی و هندسی اشیاء استوانه‌ای مدفون در زیر زمین با تصاویر GPR مورد استفاده قرار گیرند. شهباب و ال نوایمی (Shihab and Al-Nuaimy, 2005) شعاع اشیاء استوانه‌ای شناسایی شده توسط روش GPR را برآورد کردند. در این پژوهش یک مدل کلی جدید برای شکل پاسخ هذلولی ناشی از استوانه مدفون با شعاع معین ارائه شد و اثر عمق و شعاع هدف و گذردهی محیط دربرگیرنده نیز محاسبه گردید. با استفاده از این مدل جدید در رابطه با روش مخروطی برازش حداقل مربعات مستقیم، استخراج پارامترهای مهم هدف از نگاشت‌های راداری منفرد ممکن شده است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2016) روش جدیدی را برای تشخیص و پیش‌بینی قطر خطوط لوله زیرزمینی پر از مواد پراتلاف براساس GPR با استفاده از شکل دایره خاص تعیین شده توسط مختصات سه نقطه در این دایره پیشنهاد کردند. تعدادی از عوامل موثر بر صحت این روش شامل عمق دفن لوله، فرکانس، جنس لوله و فاصله نقاط اندازه‌گیری، با استفاده از روش تفاضل محدود FDTD تجزیه و تحلیل شدند.

## ۲. روش تحقیق

هدف اصلی از پژوهش حاضر استخراج دقیق پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون در زیرسطح زمین همانند عمق دفن و شعاع با استفاده از روابط ریاضی موجود بین پارامترهای هندسی این اهداف با هذلولی پاسخ GPR آن‌ها به کمک الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (Particle Swarm Optimization) (PSO) می‌باشد. گفتنی است که تاکنون از روش PSO برای این منظور استفاده نشده است. در این

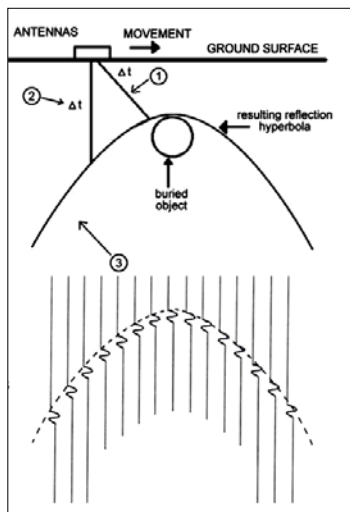
(Annan, 2002)

با ویژگی الکتریکی متفاوت قرار دارند.



شکل ۱. داده‌های نوعی ثبت شده توسط سیستم GPR.

دامنه در مقابل زمان تأخیر، ترسیم شده است [ویرایش شده از (Annan, 2001)].



(الف)

به منظور آشکار کردن یک شیء بایستی 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 دربرگیرنده آن وجود داشته باشد (Annan, 2001). تغییرات در گذردهی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی، سبب پراکندگی امواج رادیویی می‌شود. بایستی بین مدت زمان انتشار سیگنال چشمه و مدت زمانی که هر بازتاب به آشکارساز می‌رسد، یک تأخیر انتشار وجود داشته باشد. این تأخیر زمانی به وسیله فاصله گیرنده تا هدف، تقسیم بر سرعت انتشار امواج از میان محیط میزبان، تعیین می‌شود. پایه و اساس GPR (و تمام رادارها) اندازه‌گیری این تأخیر زمانی است. اساساً با فرض شرایط سرعتی یکنواخت، تأخیر زمانی طولانی‌تر به معنی بیشتر بودن فاصله تا هدف می‌باشد.

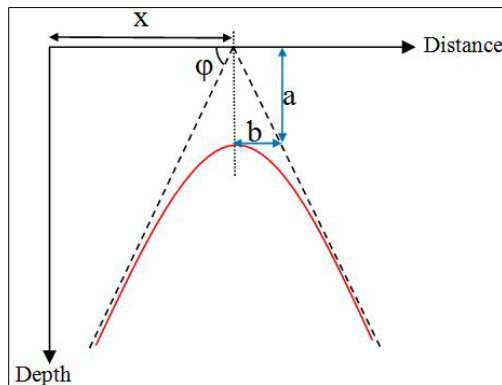
در تمام برداشت‌های GPR، یکی از مولفه‌های میدان الکترومغناطیسی (معمولاً مولفه میدان الکتریکی) اندازه‌گیری می‌شود و شدت مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و در مقابل زمان، ثبت می‌شود (Annan, 2003). متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج EM بازتابی در مقابل زمان تأخیر است که رد (Trace) نامیده می‌شود. بدین ترتیب در حقیقت رخدادهای فضای سه بعدی در یک نمودار زمان یک بعدی، ترسیم می‌شوند (شکل ۱).

در حالت کلی نگاشت راداری (Radargram) یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مطابق شکل ۲ (الف) مجموعه‌ای از ردهای بازتابی است و رخداد حاصل در تصویر نیز برای اغلب اهداف مدفون به صورت هذلولی است. برای آشکارسازی فرض می‌شود که دامنه سیگنال‌های بازتابیده از ناهمگنی‌های زیرسطحی، از سیگنال‌های زمینه بزرگ‌تر هستند. شکل ۲ (ب) مفهوم عمومی چگونگی انجام آشکارسازی را نشان می‌دهد. در این شکل اهداف و ساختارهای با ویژگی‌های الکتریکی معین، در یک محیط

با جایگزینی  $z$  با  $vt/2$  و  $z_0$  با  $vt_0/2$  در رابطه ۱ داریم:

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

که در آن  $t$  زمان رفت و برگشت موج است. رابطه ۲ معادله یک هذلولی به مرکز  $(x_0, -\frac{2R}{v})$  است.



شکل ۴. پارامترهای هذلولی پاسخ GPR یک استوانه مدفون با شعاع معین در حوزه مکانی.

با توجه به شکل ۴ و براساس معادله ریاضی هذلولی (Shihab and Al-Nuaimy, 2005) روابط بین پارامترهای هندسی و پاسخ GPR هدف استوانه‌ای به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$a = t_0 + \frac{2R}{v}, \quad b = \frac{v}{2}t_0 + R = \frac{v}{2}(a) \quad (3)$$

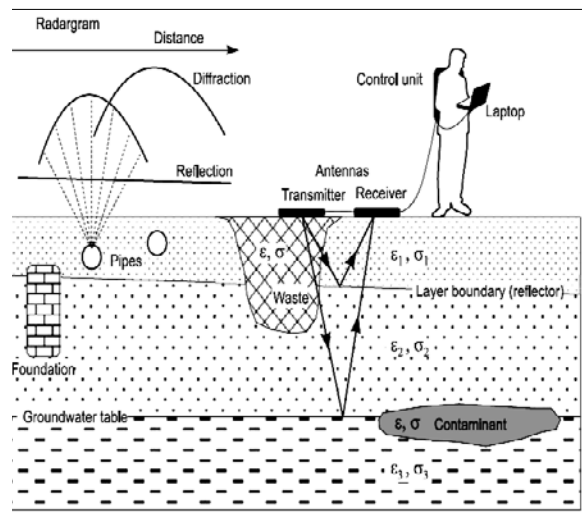
$$R = \frac{(2b-vt_0)}{2} = \frac{(a-t_0)v}{2} = \frac{b(a-t_0)}{a} \quad (4)$$

$$Z = \frac{vt_0}{2} = \frac{bt_0}{a} \quad (5)$$

$$\tan \phi = \frac{a}{b} = \frac{2}{v} \quad (6)$$

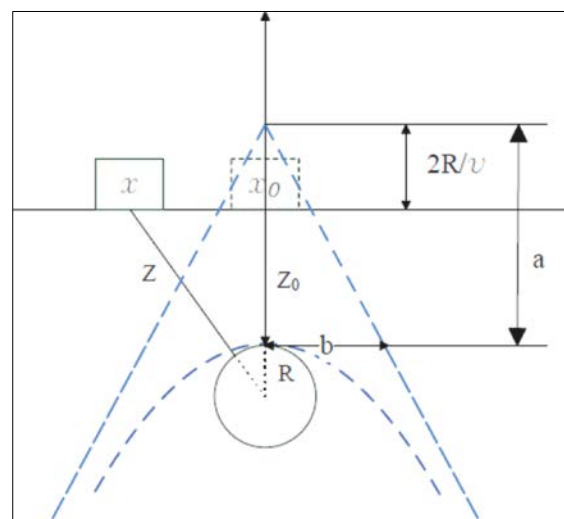
که در این روابط  $a$  و  $b$  پارامترهای هندسی شناخته شده هذلولی،  $t_0$  زمان سیر دو طرفه موج از چشمه واقع بر روی سطح زمین درست بالای مرکز شیء مدفون تا سطح فوقانی شیء،  $v$  سرعت سیر امواج EM در محیط و  $\phi$  زاویه شیب مجانب‌های هذلولی می باشد.

الگوریتم PSO که به نام الگوریتم ازدحام ذرات، تجمع ذرات، توده ذرات و پرندگان نیز معروف است، یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های هوش جمعی است که در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهارت معرفی شد. ایده اصلی در الگوریتم



شکل ۲. الف) برداشت داده‌های GPR بر روی یک هدف مدفون و رخداد مربوطه در نگاشت راداری به صورت یک هذلولی (خط چین)، ب) نمایش بعضی از کاربردهای متداول GPR (Knödel et al., 2007; Daniels, 2004).

شکل ۳ هذلولی پاسخ GPR یک شیء استوانه‌ای با شعاع  $R$  را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که:  $(z + R)^2 = (z_0 + R)^2 + (x - x_0)^2$  (۱) که در آن  $z_0$  عمق تا سطح فوقانی استوانه،  $R$  شعاع استوانه و  $z$  عمق ظاهری بازتاب از استوانه در موقعیت  $x$  که از موقعیت  $x_0$  استوانه جابجا شده است.



شکل ۳. هذلولی پاسخ GPR یک شیء استوانه‌ای با شعاع  $R$  در حوزه مکان-زمان [ویرایش شده از (Chen and

$v_i$  و فاصله بین موقعیت کنونی و  $pbest$  و فاصله بین موقعیت کنونی و  $gbest$ . بدین ترتیب سرعت هر ذره مطابق رابطه ۷ تغییر می‌کند (امامی میبدی و همکاران، ۱۳۸۸):

$$V_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t)V_{ij}(t) + c_1 r_{1j} (pbest_i(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j} (gbest(t) - x_{ij}(t)) \quad (7)$$

که در آن  $v_{ij}(t)$  سرعت ذره  $i$  ام در بعد  $j$  ام ( $j=1,2,3,\dots,D$ ) در گام زمانی (تکرار)  $t$  و  $\omega_{ij}(t)$  وزن اینرسی (Inertia weight) ذره  $i$  ام در بعد  $j$  ام می‌باشد. پارامتر وزن اینرسی برای تضمین همگرایی در PSO بکار می‌رود. مقدار مناسب  $\omega$  توازن بین توانایی الگوریتم برای جستجوی فراگیر (Global) و جستجوی محلی (Local) ایجاد می‌کند. یک مقدار مناسب پارامتر وزن اینرسی، معمولاً تعادلی را بین قابلیت اکتشاف فراگیر و محلی گروه ایجاد می‌نماید. با انتخاب مناسب مقدار پارامتر وزنی، تعداد تکرار برای یافتن جواب بهینه، کاهش می‌یابد. ضریب ثابت اینرسی بزرگ‌تر از یک، هرچند که سبب وسیع‌تر شدن فضای جستجوی الگوریتم می‌گردد، اما الگوریتم را ناپایدار می‌کند زیرا اثر سرعت پیشین را افزایش می‌دهد. پارامتر اینرسی براساس مطالعات شی و ابرهارت (Shi and Eberhart, 1999) (1998) مطابق رابطه ۸ می‌باشد:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \cdot iter \quad (8)$$

که در آن  $\omega_{\max}$  وزن ابتدایی،  $\omega_{\min}$  وزن انتهایی،  $iter$  شماره تکرار و  $iter_{\max}$  بزرگترین شماره تکرار می‌باشد.  $x_{ij}(t)$  موقعیت ذره  $i$  ام در بعد  $j$  ام در گام زمانی  $t$ ،  $pbest$  بهترین موقعیت خود ذره تا رسیدن به موقعیت فعلی است که به جزء شناختی معروف می‌باشد و  $gbest$  بهترین موقعیت حاصل شده توسط سایر ذرات را تا رسیدن به موقعیت فعلی نشان می‌دهد (جزء اجتماعی) (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴).  $C_1$  و  $C_2$  ثابت‌های مثبت شتاب هستند که به ترتیب برای مقیاس‌گذاری اجزاء شناختی و اجتماعی بکار می‌روند. در حالت کلی مقادیر  $C_1$  و  $C_2$  می‌توانند بسته به مورد، متفاوت انتخاب شوند اما همواره باید شرط  $C_1 + C_2 \leq 4$  رعایت شود.  $r_{1j}$  و  $r_{2j}$  برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه بکار می‌روند. مقدار مناسب این پارامترها در یکنواختی جواب‌ها

PSO مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت و رفتار گروهی پرندگان در جستجوی غذاست. هرچند الگوریتم PSO برخلاف تکنیک‌های محاسبه تکاملی (Evolutionary computation techniques) مانند الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، عملکردهای تکامل مانند هم‌گذری (Crossover) و جهش (Mutation) را ندارد، اما با این الگوریتم شباهت‌هایی هم دارد (Abraham et al., 2006).

این روش مانند بیشتر روش‌های جستجو، با یک گروه از جواب‌های تصادفی جستجو را به شکل موازی شروع می‌کند و سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با به‌هنگام کردن مکان ذره‌ها به جستجو ادامه می‌دهد. تغییر مکان هر ذره در فضای جستجو تحت تأثیر دانش خود و همسایگانش است. به عبارت دیگر ذرات در گروه از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش به دست آمده، به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند. بنابراین موقعیت ذرات دیگر ازدحام، روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. اساس کار PSO بر این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد، تنظیم می‌کند. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی، فرآیند جستجویی است که در آن ذرات به سمت نواحی مناسبی حرکت می‌کنند.

فرض کنید در یک فضای  $D$  بعدی ( $d$ -dimensional)  $i$  امین ذره از جمعیت (Population) می‌تواند با یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت (Position) نمایش داده شود. تغییر موقعیت هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان‌پذیر است. هر ذره امکاناتی شامل بهترین مقداری که تاکنون به دست آورده ( $pbest$ ) و موقعیت  $x_i$  را داراست. این اطلاعات از مقایسه تلاش‌هایی که هر ذره برای یافتن بهترین جواب انجام می‌دهد، به دست می‌آید. همچنین هر ذره بهترین جوابی که تاکنون (در گروه) از مقدار  $pbest$  ها به دست آمده را می‌شناسد ( $gbest$ ). هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب سعی می‌کند موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات زیر تغییر دهد: موقعیت کنونی  $x_i$  و سرعت کنونی

۶- تغییر سرعت و موقعیت ذره براساس روابط ۷ و ۹  
۷- اگر قیود، برآورده شد (معمولاً یک تطابق خوب یا بیشترین دفعات تکرار) از حلقه خارج شود.

۸- پایان حلقه

الگوریتم PSO به عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های بهینه‌سازی، قابل اعمال به مسائل بهینه‌سازی پیچیده شناخته شده است که دارای مزایای زیر است: این الگوریتم یک روش غیرمشتقی است؛ به عبارت دیگر به اطلاعات مربوط به مشتق معادلات مسئله نیاز ندارد. پیاده‌سازی الگوریتم PSO آسان است، بنابراین در کاربردهای عملی قابل استفاده می‌باشد. تعداد پارامترهای الگوریتم PSO محدود است و در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر تأثیر پارامترها روی جواب نهایی کم است. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم PSO در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی، بسیار پایدار و بهینه بوده و به لحاظ محاسباتی بسیار کارآمد می‌باشند. همچنین PSO امکان جستجوی محلی، سراسری و همگرایی سریع به بهینه سراسری را با تنظیم پارامترهای ساده فراهم می‌کند. مزیت اصلی این روش بر راهبردهای بهینه‌سازی دیگر آن است که تعداد فراوان ذرات ازدحام کننده، باعث پایداری روش در برابر مشکل پاسخ بهینه محلی می‌گردد (محمدی اقدم و همکاران، ۱۳۹۴؛ Shi and Eberhart, 1999).

### ۳. نتایج و بحث

۳-۱. استخراج پارامترهای هندسی مدل‌های مصنوعی

استوانه ای با PSO

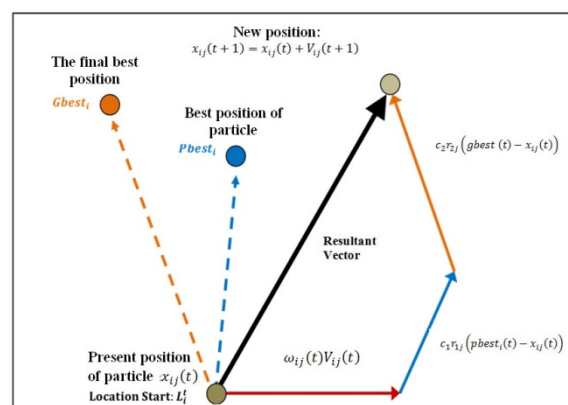
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم PSO در شناسایی پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون، الگوریتم پیشنهادی بر روی پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی شامل اهداف استوانه‌ای با عمق دفن و شعاع‌های مختلف تولید شده، اعمال گردید. برای این منظور هفت مدل مصنوعی توسط نرم افزار GPRMAX ایجاد شد و پاسخ GPR آن‌ها شبیه‌سازی گردید که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. این مدل‌ها همگی دارای یک هدف استوانه‌ای افقی توخالی (پر از هوا) بوده و پیمایش در راستای عمود

تأثیرگذار است و این پارامترها به صورت تصادفی در بازه [0,1] انتخاب می‌شوند. این مقادیر تصادفی مولفه تصادفی بودن الگوریتم را تعیین می‌کنند و به ذرات این اجازه را می‌دهند که در گام‌های تصادفی در محدوده بین pbest و gbest حرکت کنند (رجب پور و افشار، ۱۳۸۷).

موقعیت جدید هر ذره نیز به وسیله مجموع موقعیت گذشته و سرعت جدید، با استفاده از رابطه (۹) تعیین می‌شود (امامی میبدی و همکاران، ۱۳۸۸):

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \quad (9)$$

شکل ۵ نحوه تغییر موقعیت ذرات در الگوریتم PSO را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نحوه تغییر موقعیت ذرات در الگوریتم PSO

[ویرایش شده از (Camilli, 2015)].

بطورکلی مراحل الگوریتم پایه PSO به صورت زیر است (علی یاری و همکاران، ۱۳۸۷):

- ۱- مقداردهی اولیه جمعیت با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی در فضای D بعدی جستجو
- ۲- شروع حلقه
- ۳- ارزیابی تابع شایستگی برای هر ذره
- ۴- ارزش هر ذره با ارزش pbest<sub>i</sub> مربوط به خود مقایسه شود، اگر بهتر بود pbest<sub>i</sub> و  $\vec{P}_i$  (بهترین موقعیت قبلی) با توجه به موقعیت حال حاضر جایگزین شود.
- ۵- شناسایی ذره‌ای در جمعیت همسایگان که بهترین موقعیت را تجربه کرده است و لحاظ کردن آن به عنوان بهترین ذره با اندیس gbest.

دست آمد که با قرار دادن این مقادیر در روابط ۴ و ۵ شعاع و عمق دفن حاصل از اعمال الگوریتم PSO بر هذلولی پاسخ هدف مدفون محاسبه شد.

به عنوان نمونه نتایج اعمال الگوریتم PSO بر روی پاسخ GPR مدل ۷ در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل پاسخ GPR مدل در پایین و تصویر هذلولی انطباق یافته از طریق الگوریتم PSO بر هذلولی پاسخ GPR در قسمت بالا، نمایش داده شده است. مقادیر پارامترهای هذلولی برازش یافته، مقادیر واقعی و تخمینی پارامترهای هندسی شعاع و عمق دفن و میزان خطای برآورد آن‌ها برای اهداف استوانه‌ای مدل‌های مصنوعی تولید شده نیز، در جدول ۲ خلاصه شده است.

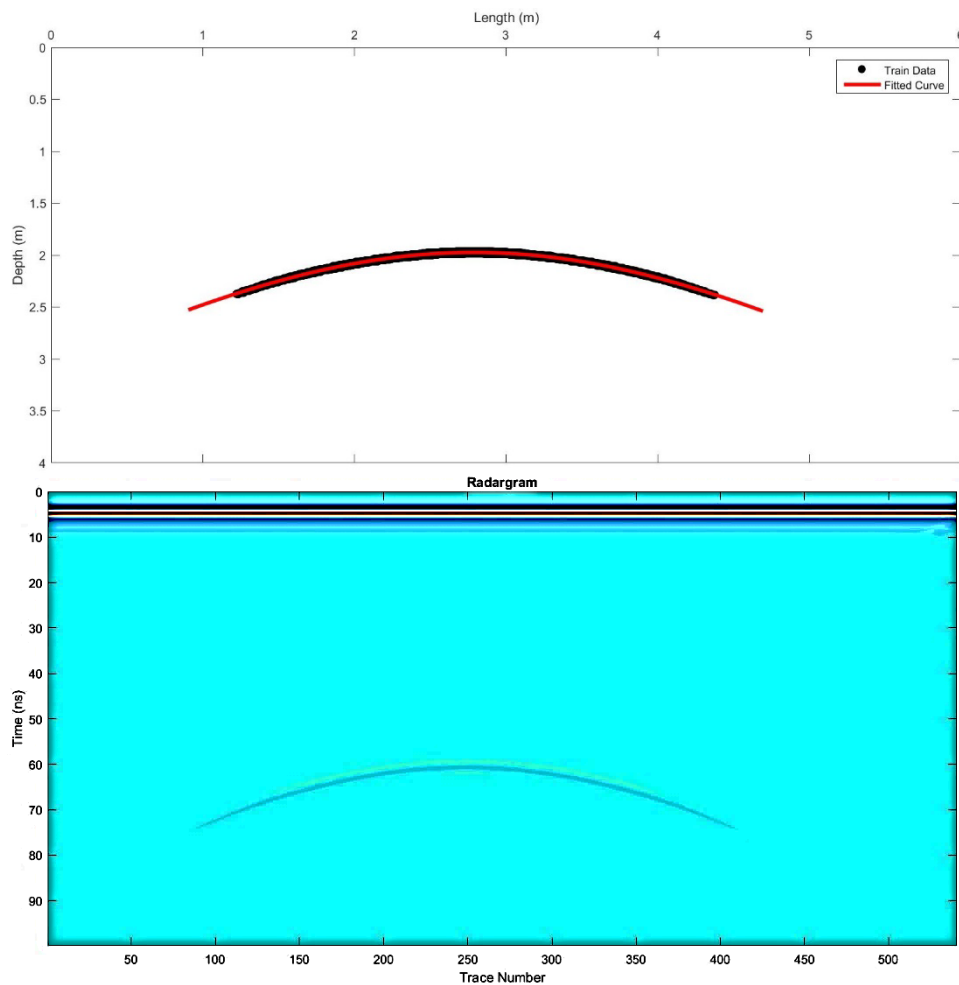
بر امتداد محور استوانه صورت گرفته است. قبل از انجام این مرحله، ابتدا تمام نگاشت‌های راداری مدل‌های مصنوعی تولید شده جهت انجام مراحل پردازشی بعدی در محیط نرم افزار MATLAB به مقیاس خاکستری تبدیل شدند. سپس با استفاده از روش‌های آماری متداول، یک حد آستانه (Threshold) برای شدت تصویر هر پیکسل در مقیاس خاکستری تعریف شد.

آستانه‌گذاری یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای قطعه‌بندی (Segmentation) تصویر است. با اعمال یک روش آستانه‌گذاری بر روی یک تصویر مقیاس خاکستری، تصویری باینری (Binary) به دست می‌آید که مرز اشیاء موجود در تصویر با دقت مناسبی مشخص می‌شود. روش‌های متعددی برای آستانه گذاری تصویر وجود دارد. در این پژوهش از روش آستانه‌گذاری اتسو (Otsu, 1979) برای باینری کردن تصاویر استفاده شد. پس از باینری کردن، تصویر دارای دو قطعه با پیکسل‌های صفر و ۱ می‌باشد. قطعه‌ای که مقدار پیکسل‌های آن ۱ است، شامل هذلولی پاسخ مدل‌های مصنوعی است. پس از این مرحله با استفاده از کدنویسی الگوریتم PSO در محیط نرم‌افزار MATLAB هذلولی بهینه‌ای بر هذلولی‌های پاسخ مدل‌های مصنوعی، برازش داده شد و پارامترهای هذلولی بهینه به

جدول ۱. مشخصات مدل‌های مورد استفاده جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم PSO.

Parameter	Model dimensions (m)	Host medium	Dielectric permittivity of host medium	Conductivity of host medium (mS/m)	Material type of target	Radius of target (m)	Burial depth of target (m)
Model 1	6*4	Wet clayey soil	19	10	Concrete	0.1	0.5
Model 2	6*4	Wet clayey soil	19	10	PVC Plastic	0.25	1
Model 3	6*4	Wet clayey soil	19	10	PVC Plastic	0.75	1
Model 4	6*4	Wet clayey soil	19	10	Metal	0.25	1.5
Model 5	6*4	Wet clayey soil	19	10	Metal	0.5	1.5
Model 6	6*4	Wet clayey soil	19	10	Metal	0.1	2
Model 7	6*4	Wet clayey soil	19	10	Metal	0.5	2





شکل ۶. هذلولی برازش یافته با الگوریتم PSO بر هذلولی پاسخ GPR مدل شامل هدف استوانه ای با شعاع ۰/۵ متر و عمق دفن ۲ متر (مدل ۷).

جدول ۲. نتایج به دست آمده از اعمال الگوریتم PSO بر روی مدل های مصنوعی.

Parameter	a	b	$t_0$ value	True	Estimated	Depth	True	Estimated	Radius
Model	parameter value (ns)	parameter value (m)	(ns)	burial depth (m)	burial depth (m)	estimation error (%)	radius (m)	radius (m)	estimation error (%)
Model 1	15.845	0.744	14.29	0.5	0.61	22	0.1	0.073	27
Model 2	33.95	1.395	28.57	1	1.174	17.4	0.25	0.221	11.6
Model 3	55.72	1.649	32	1	0.947	5.3	0.75	0.702	6.4
Model 4	51.66	1.644	45	1.5	1.432	4.53	0.25	0.212	15.2
Model 5	62.39	2.033	48	1.5	1.564	4.27	0.5	0.469	6.2
Model 6	62.74	1.809	60	2	1.73	13.5	0.1	0.072	21
Model 7	80.29	2.31	65	2	1.87	6.5	0.5	0.44	12

است. برداشت های میدانی متعدد GPR در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان با استفاده از یک سیستم GPR تک ثابت ساخت شرکت مالا (MALA) سوئد مجهز به آنتن های پوشش دار با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، بر روی اهداف استوانه ای شکل مختلف مدفون از پیش شناخته شده با پارامترهای برداشت مختلف انجام شد و پاسخ GPR آن

۲-۳. استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه ای

تصاویر واقعی با PSO

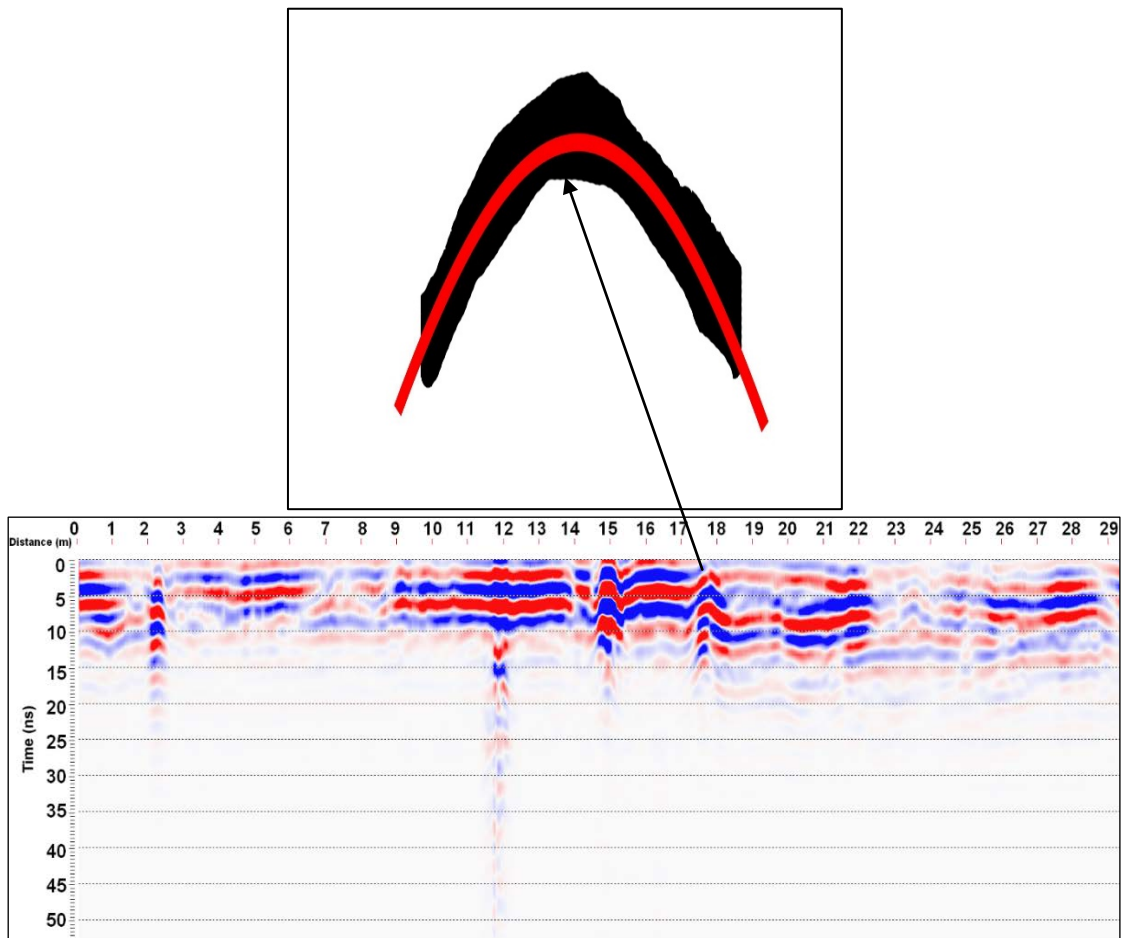
در این بخش آزمایش الگوریتم PSO پیشنهادی بر روی تصاویر واقعی GPR برداشت های میدانی انجام شده در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان به منظور استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه ای مدفون، انجام شده

به‌ویژه باترورث، حذف متوسط، حذف زمینه و انواع تقویت دامنه امواج بازگشتی، بر روی تصاویر واقعی انجام گرفت. سپس به‌منظور تمرکز بر روی بخش‌های مهم تصویر، قسمت‌های تهی (فاقد هذلولی‌های پاسخ اهداف) از تصاویر حذف شدند. در نهایت مقادیر پارامترهای هذلولی برازش یافته و مقادیر واقعی و تخمینی پارامترهای هندسی شعاع و عمق دفن و میزان خطای برآورد آن‌ها برای لوله‌های مدفون در محدوده برداشت، محاسبه شدند که نتایج آن‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است. علت بالاتر بودن میزان خطای تخمین شعاع لوله‌ها در این جدول، کوچک بودن قطر لوله-های مدفون و بالا بودن سطح نوفه در تصاویر واقعی محدوده برداشت می‌باشد.

ها بعد از اعمال توالی‌های پردازشی مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. در تمام مراحل برداشت GPR، با استفاده از امکانات دستگاه برداشت و براساس وضعیت محدوده مورد مطالعه، تمام پارامترهای برداشت قابل تنظیم، انتخاب و تنظیم گردیدند. مشخصات دو مورد از پروفیل‌های برداشت در جدول ۳ آورده شده است. نتایج اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی هذلولی‌های پاسخ GPR لوله انتقال فاضلاب و لوله انتقال گاز به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در شکل ۷ نگاشت راداری پروفیل برداشت Pro1 در قسمت پایین و تصویر هذلولی انطباق یافته از طریق الگوریتم PSO بر هذلولی پاسخ GPR در قسمت بالا، نمایش داده شده است. در شکل ۸ نیز نگاشت راداری مربوط به پروفیل OMP6 در قسمت پایین و تصویر هذلولی انطباق یافته از طریق الگوریتم PSO بر هذلولی پاسخ GPR در قسمت بالا، نشان داده شده است. گفتنی است که قبل از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی نگاشت‌های راداری واقعی GPR، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ReflexW مراحل پیش‌پردازشی شامل تصحیح زمان صفر، فیلترسازی دی‌واو (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها)، حذف شیفت جریان مستقیم، فیلترهای میان‌گذر

جدول ۳. مشخصات دو پروفیل برداشت Pro1 و Omp6.

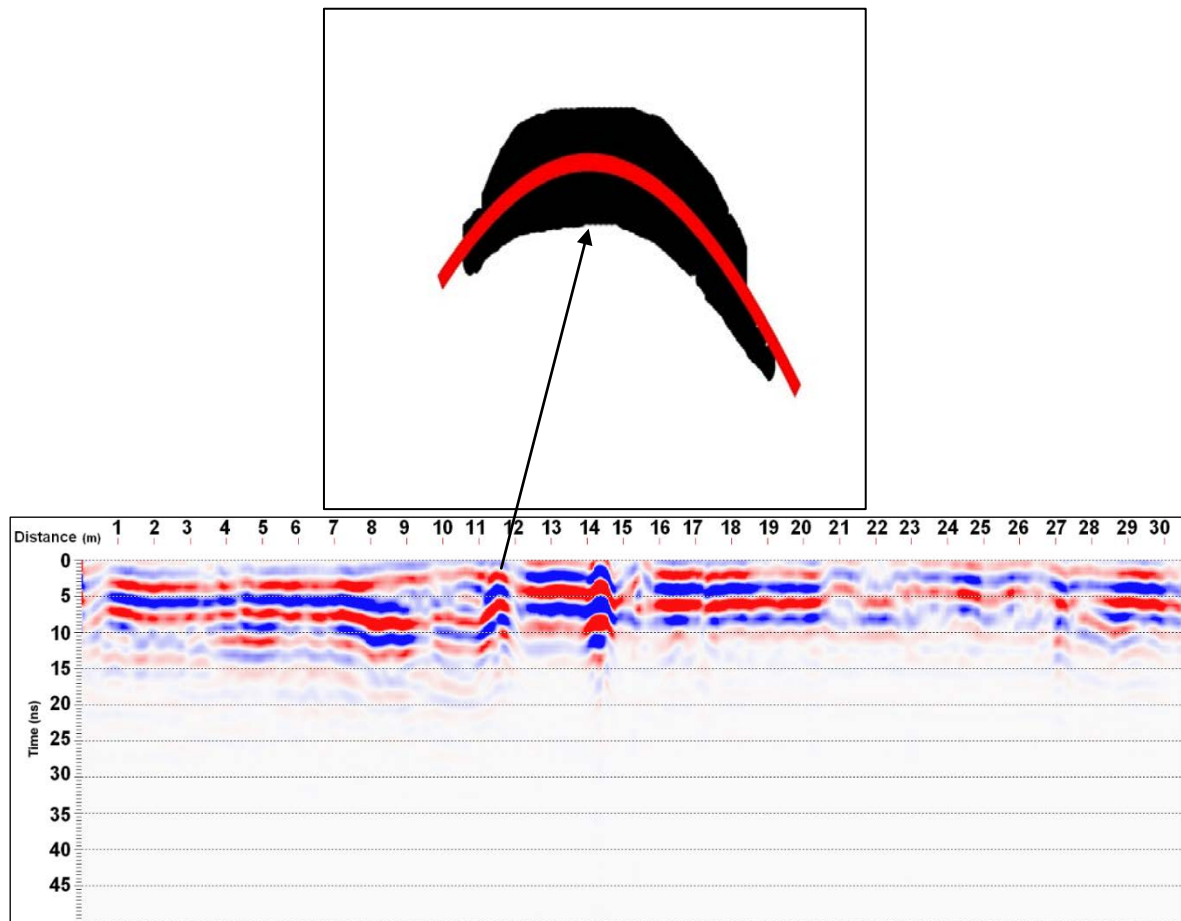
Surveyed profile	Transverse direction	Sampling frequency (MHz)	Sampling distance (m)	Time window (ns) (depth:m)	Number of stacked traces	Velocity of wave (m/ns)
Pro1	West to East	1954.73	0.02	53.2 (4.24)	Automatic	0.15
Omp6	East to West	1563.78	0.05	51.2 (4.08)	Automatic	0.15



شکل ۷. هذلولی برازش یافته با الگوریتم PSO بر روی هذلولی پاسخ لوله انتقال فاضلاب در نگاشت راداری واقعی مربوط به پروفیل Pro1.

جدول ۴. نتایج به دست آمده از اعمال الگوریتم PSO بر روی نگاشت‌های راداری واقعی برداشت‌های میدانی GPR در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان.

Parameter	a parameter value (ns)	b parameter value (m)	$t_0$ value (ns)	True burial depth (m)	Estimated burial depth (m)	Depth estimation error (%)	True radius (m)	Estimated radius (m)	Radius estimation error (%)
Waste water pipeline	5.28	2.583	5	2.2	2.447	11.23	0.1	0.116	16
Gas pipeline	1.617	1.469	3	1.2	1.363	13.58	0.075	0.096	28



شکل ۸. هذلولی برازش یافته با الگوریتم PSO بر روی هذلولی پاسخ لوله انتقال گاز در نگاشت راداری واقعی GPR مربوط به پروفیل Omp6.

#### ۴. نتیجه گیری

بکارگیری الگوریتم PSO به عنوان یک الگوریتم بهینه سازی، به منظور استخراج پارامترهای هندسی اهداف استوانه ای برای دست کم هفت مدل مصنوعی GPR نشان می دهد که این الگوریتم قادر به ارائه نتایج مطلوبی در این زمینه می باشد به گونه ای که در پژوهش حاضر توانست شعاع و عمق دفن اهداف استوانه ای مدل های مصنوعی مورد آزمایش را با متوسط خطای به ترتیب برابر با  $14/2\%$  و  $10/5\%$  درصد تخمین زند. همچنین عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای داده های واقعی GPR برداشت شده در محوطه دانشگاه صنعتی اصفهان بر روی اهداف استوانه ای مدفون شناخته شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که به عنوان نمونه برای یکی از پروفیل های برداشت، نتایج خطای تخمین

پارامترهای هندسی عمق دفن و شعاع برای لوله فلزی انتقال فاضلاب به ترتیب برابر با  $11/23\%$  و  $16\%$  درصد و برای لوله فلزی انتقال گاز به ترتیب برابر با  $13/58\%$  و  $28\%$  درصد است. نتایج تخمین پارامترهای هندسی اهداف استوانه ای با الگوریتم PSO نشان می دهد که خطای تخمین پارامترهای هندسی اهداف استوانه ای پنهان در نگاشت های راداری واقعی در مقایسه با مدل های مصنوعی، قدری بیشتر است که دلیل آن کوچک بودن قطر لوله های مدفون و بالا بودن سطح نوفه در محیط برداشت می باشد. با این وجود نتایج بکارگیری الگوریتم پیشنهادی در مورد تصاویر واقعی GPR نیز قابل قبول بوده و به منظور شناسایی اهداف ساختارهای استوانه ای مدفون در مناطق مختلف به ویژه نواحی شهری، قابل کاربرد می باشد.

## منابع

- احمدی، ر.، فتحیان پور، ن.، نوروزی، غ.ح.، ۱۳۹۴. تحلیل حساسیت پاسخ GPR اهداف ژئوتکنیکی مدفون به پارامترهای هندسی و فیزیکی با استفاده از مدل سازی عددی پیشرو. نشریه علمی- پژوهشی روشهای تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۹، بهار و تابستان ۱۳۹۴، ۱۳-۳۰.
- احمدی، ر.، فتحیان پور، ن.، نوروزی، غ.ح.، ۱۳۹۴. مقایسه عملکرد روش های هوشمند شبکه های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان در شناسایی خودکار اهداف استوانه ای پنهان در تصاویر رادار نفوذی به زمین. نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره دهم، شماره ۲۶، سال ۱۳۹۴، ۸۳-۹۸.
- امامی میبدی، ع.، خضری، م.، اعظمی، آ.، ۱۳۸۸. شبیه سازی تابع تقاضای انرژی در ایران با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO). فصل نامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال ششم، شماره ۲۰، بهار ۱۳۸۸، ۱۵۹-۱۴۱.
- جفرسته، ب.، فتحیان پور، ن.، طباطبائی، س.ح.، ۱۳۹۴. استخراج پارامترهای هندسی اشیاء مدفون استوانه ای در تصاویر GPR با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۱، شماره ۱، ۷۳-۶۳.
- رجب پور، ر.، افشار، م.ه.، ۱۳۸۷. بهره برداری بهینه از ایستگاه های پمپاژ متوالی با استفاده از الگوریتم PSO. نشریه آب و فاضلاب، شماره ۶۶، سال ۱۳۸۷، ۶۶-۵۶.
- صادقی، و.، عبادی، ح.، محمدزاده، ع.، فرنود، ف.، ۱۳۹۴. آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجنش از دور چندزمانه با حد آستانه گذاری شاخص تغییرات تلفیقی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات. نشریه علمی- پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، دوره پنجم، شماره ۳، بهمن ۱۳۹۴.
- علیاری شوره دلی، م.، تشنه لب، م.، خاکی صدیق، ع.، ۱۳۸۷. پیش بینی کوتاه مدت آلودگی هوا با کمک شبکه های عصبی پرسپترون چندلایه، خط حافظه دار تاخیر، گاما و ANFIS با روش های ترکیبی آموزشی مبتنی بر PSO. مجله کنترل، جلد ۲، شماره ۱، ۱۹-۱.
- کامکار روحانی، ا.، اسحاقی، ا.، عرب امیری، ع.ر.، ۱۳۹۱. پردازش و تفسیر داده های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی حفره های زیر سطحی و بررسی لایه بندی، دانه بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیر سطحی کم عمق. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۴، ۱۳۹۱، ۱۷۳-۱۵۵.
- محمدی اقدام، ک.، میرزایی، ا.، پورمحمدی، ن.، محمدپور، م.آ.ب.، ۱۳۹۴. الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی برای طراحی شبکه های توزیع آب. نشریه آب و فاضلاب، شماره ۴، سال ۱۳۹۴، ۹۹-۸۸.
- Abraham, A., Guo, H., Liu, H., 2006. Swarm intelligence: foundations, perspectives and applications. Swarm Intelligent Systems, Nedra Nedjah, Luiza Mourelle (Eds.), Studies in Computational Intelligence, 3-25.
- Annan, A.P., 2003. Ground penetrating radar: Principles, procedures and applications. Sensors and Software Inc. Technical Paper.
- Annan, A.P., 2001. Ground-penetrating radar workshop notes, Sensors and Software Inc. Mississauga, ON, Canada, 192 p.
- Annan, A.P., 2002. The history of ground penetrating radar. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 3(4), 303-320.
- Apparao, A., and Balkema, A.A., 1997. Development in geoelectrical methods. 293 p.
- Camilli, L., 2015. The evolution of swarm intelligence and applications for econometric modeling. technical report, December 2015, <https://www.researchgate.net/publication/3116454>
- 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.
- Daniels, D.J., 2004. Ground Penetrating Radar. 2nd edition, Radar, Sonar, Navigation and Avionics, Series 15. Institute of Electrical Engineers, London, UK.
- Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.J., 2007. Environmental geology: handbook of field methods and case studies. Google Books Result, 1357 p., Chapter 4, Geophysics.
- Morey, R.M., 1974. Continuous subsurface profiling by impulse radar, subsurface exploration for underground excavation and heavy construction. ASCE Specialty Conference, Henniker, New

- 
- Hampshire, 213-232.
- Shi, Y., and Eberhart, R.C., 1998. Parameter selection in particle swarm optimization. Porto, V.W., Saravanan, N., Waagen, D., Eiben, A.E. (eds.), In: Evolutionary programming VII, 611-616.
- Shi, Y., and Eberhart, R.C., 1999. Empirical study of particle swarm optimization. Proc. IEEE, International Congress Evolutionary Computation, Washington, D.C., USA, 1945-1950.
- Shihab, S. and Al-Nuaimy, W., 2005. Radius estimation for cylindrical objects detected by Ground penetrating radar. Subsurface Sensing Technologies and Applications, 6, 151-166.
- Stern, W., 1929. Versucheiner elektrodynamischen dickenmessung von gletschereis. Gerl. Beitr. Zur Geophysik, 23.
- Zhang, P., Guo, X., Muhammat, 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, 58, 99-108.