



## وارون سازی هموار توموگرافی زمان سیر بین چاهی با استفاده از بهینه سازی سراسری

محمد رضا ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، محمد علی ریاحی<sup>۲</sup> و محمد صنیعی آباده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲- استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، دانشکده برق و مهندسی کامپیوتر، دانشگاه شهید مدرس

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۴

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [mrebrahimi@ut.ac.ir](mailto:mrebrahimi@ut.ac.ir)

### واژگان کلیدی

### چکیده

توموگرافی زمان سیر  
داده بین چاهی  
وارون سازی غیرخطی  
بهینه سازی سراسری  
بهینه سازی ازدحام ذرات

توموگرافی زمان سیر داده های لرزه ای بین چاهی اغلب برای به دست آوردن تصویری از ساختار سرعتی بین دو چاه به کار می رود. این مدل سرعت طوری محاسبه می شود که خطای بین داده اندازه گیری شده و داده حاصل از مسئله مستقیم (Forward problem) کمینه گردد. از آنجا که مسیر پرتوها در واقعیت تابع بی هنجاری های سرعتی است؛ مسئله توموگرافی زمان سیر مسئله ای غیرخطی قلمداد می شود. الگوریتم های مرسوم حل مسئله وارون توموگرافی، روش های بهینه سازی محلی (Local) هستند؛ که با خطی سازی طی یک فرآیند تکراری با یک مدل اولیه که توسط کاربر انتخاب می شود، مدل سرعتی بین دو چاه را به دست می آورند. یکی از مشکلات این روش ها وابستگی مدل نهایی به مدل اولیه است؛ که ممکن است تابع هدف در کمینه محلی همگرا شود و از کمینه سراسری (Global) فاصله داشته باشد. لذا روش های بهینه سازی سراسری برای حل این مشکل معرفی شده اند. یکی از جدیدترین و قوی ترین روش های بهینه سازی سراسری، بهینه سازی ازدحام ذرات است؛ که این مقاله از وارون سازی هموار با استفاده از این الگوریتم بهره برده است. روش های بهینه سازی سراسری بدون توجه به مدل اولیه، به کمینه سراسری تابع هدف همگرا می شوند. الگوریتم معرفی شده بر روی داده های مصنوعی بدون نوفه و با نوفه گاوسی اعمال شد و پس از مشاهده عملکرد مناسب آن بر روی این داده ها، داده واقعی بین چاهی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصل با الگوریتم مارکوارت- لوبنبرگ (LM) که یک روش بهینه سازی محلی است، مقایسه شد و عدم قطعیت مدل واقعی به دست آمده نیز محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان دهنده عملکرد مناسب تر الگوریتم مورد استفاده در وارون سازی مدل سرعتی است.

## ۱- مقدمه

یکی از محدودیت‌های روش‌های لرزه‌شناسی سطحی (بازتابی و شکست مرزی) که چشمه‌ها و گیرنده‌ها در روی سطح زمین قرار دارند؛ این است که لایه‌های هوازه سطحی، فرکانس‌های بالای امواج ارسالی را میرا می‌کنند و مانع از داشتن تصویری از زیر سطح با تفکیک‌پذیری بالا می‌شوند. از روش‌های مرسوم برای غلبه بر این مشکل استفاده از داده‌برداری بین‌چاهی است (Bregman et al., 1989). در این روش دو چاه حفر شده با یک فاصله مشخص از یکدیگر قرار گرفته‌اند؛ که درون یکی از چاه‌ها، چشمه‌های امواج لرزه‌ای و درون دیگری گیرنده‌ها قرار می‌گیرند. با هر بار عملکرد چشمه‌ها، گیرنده‌ها امواج دریافتی را ثبت می‌کنند. برای به دست آوردن مدل سرعت (کندی) محیط بین دو چاه، ساده‌ترین روش، استفاده از توموگرافی زمان سیر است. توموگرافی (tomography) در علم لرزه‌شناسی به معنای به دست آوردن تصویری از لایه‌های زیرسطحی با استفاده از خواص فیزیکی امواجی است؛ که از محیط مورد مطالعه عبور نموده و تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند. در توموگرافی زمان سیر فقط اولین زمان رسید موج به هر گیرنده اهمیت دارد.

مدل سرعتی به دست آمده از داده‌های بین‌چاهی در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارد. به طور مثال بررسی مشخصات لایه آبخوان (Ehosioko and Fechner, 2014; Becht et al., 2007)، ارزیابی مناطق سست و کم سرعت در دیواره تونل (Sangong et al., 2012; Sule and Octova, 2012)، اکتشاف مواد معدنی (Wong, 2003; Greenhalgh et al., 2000)، برآورد پارامترهای ژئوتکنیکی و مهندسی (Yamamoto et al., 1994; Angioni et al., 2003) و نمونه‌هایی از این کاربردها هستند.

روش‌های مرسوم وارون سازی غیرخطی (مانند روش‌های اکام، کمترین مربعات و مارکوارت-لونبرگ)، سیستمی خطی شده از معادلات زمان سیر را با یک مدل اولیه (مدل شروع) حل می‌کنند و در هر چرخه به مدل بهینه نزدیک‌تر می‌شوند. این حل که بهترین مدل در بین مدل‌های موجود است؛ ممکن است از حل بهینه سراسری آن فاصله داشته باشد. به این روش‌های حل، روش‌های بهینه‌سازی محلی نیز گفته می‌شود. از آنجایی که در این الگوریتم‌ها مدل اولیه توسط کاربر انتخاب می‌شود، ممکن است پاسخ روش‌های محلی از بهینه سراسری (پاسخ بهینه مسئله) فاصله داشته باشد و در کمینه محلی تابع هدف همگرا شود (Sen and Stoffa, 2013).

برای غلبه بر این مشکل روش‌های بهینه‌سازی سراسری معرفی شده‌اند. روش‌های بهینه‌سازی سراسری بسیار متنوع هستند. این الگوریتم‌ها، روش‌هایی هستند که به منظور پیدا کردن کمینه یا بیشینه سراسری یک تابع هدف ارائه شده‌اند. بسته به نوع روش موردنظر، نحوه جستجوی الگوریتم در یافتن کمینه سراسری تفاوت دارد. این روش‌ها عموماً از پدیده‌های طبیعی و علوم فیزیکی الهام

گرفته‌اند و با به کارگیری ترفندهایی از کمینه محلی عبور می‌کنند. برخلاف روش‌های محلی، روش‌های سراسری در کمینه‌های محلی همگرا نمی‌شوند. اصول کلی این روش‌ها این است که نخست یک مدل تصادفی ایجاد می‌کنند و سپس با بروز رسانی مدل در هر تکرار و جستجوی هوشمندانه، مدل نهایی که همان کمینه با بیشینه تابع هدف است را می‌یابند (Locatelli and Schoen, 2013).

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سراسری در ژئوفیزیک از دهه ۸۰ میلادی آغاز شد. محققان متعددی از آن زمان تاکنون روش‌های مختلف را برای کاربردهای مختلف لرزه‌شناسی به کار برده‌اند (Pullammanappallil and Louie, 1994; Boschetti et al., 1996; Sambridge and Drijkoningen, 1992; Ma, 2002; Fernández Martínez et al. 2012; Paasche and Tronick, 2014; Saraswat and Sen, 2010).

در این مقاله یکی از معتبرترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری به نام بهینه‌سازی ازدحام ذرات در حل مسئله توموگرافی استفاده شده است. ابتدا این الگوریتم توصیف می‌شود. سپس با اعمال آن بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی توانایی آن در تخمین مدل سرعت بررسی خواهد شد و نتایج با روش وارون سازی محلی مارکوارت-لونبرگ مقایسه می‌گردد. عدم قطعیت مدل واقعی به دست آمده با الگوریتم PSO نیز محاسبه خواهد شد.

## ۲- قابلیت پوشش (Exploration) و انتفاع (Exploitation) در بهینه‌سازی سراسری

به دلیل تنوع بالای فضای جستجو در روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی سراسری، این نوع الگوریتم‌ها باید دو خصیصه را در نظر بگیرند؛ که این خصیصه‌ها قابلیت پوشش و انتفاع است. قابلیت پوشش به توانایی الگوریتم در جستجوی آزادانه و بدون هرگونه توجه به دستاوردهای آن در طول فرایند جستجو است. در مقابل قابلیت انتفاع به میزان توجه الگوریتم به دستاوردهایش در طول فرایند جستجو است. بدیهی است که به هر میزان که میزان پوشش در یک الگوریتم بیشتر باشد، این الگوریتم رفتاری تصادفی‌تر و غیر قابل پیش‌بینی‌تر خواهد داشت. در نقطه مقابل، تقویت انتفاع در یک الگوریتم سبب می‌شود که این الگوریتم رفتاری حساب شده‌تر و محتاطانه‌تر داشته باشد. از آنجا که تقریباً بیشتر روش‌های جستجو دارای پارامترهای قابل تنظیمی هستند؛ می‌توان میزان قابلیت‌های پوشش و انتفاع را در آن‌ها کنترل نمود. به عنوان مثال برای یک مسئله که دارای یک کمینه است، باید قابلیت انتفاع را در الگوریتم بیشتر کرد. در نقطه مقابل، اگر تابع هدف دارای چندین کمینه محلی باشد، برای یافتن کمینه سراسری، بایستی قابلیت پوشش را افزایش داد. به هر حال در حل بیشتر مسائل، قابلیت پوشش بالا پیشنهاد می‌شود (صنعی آبا و جبل عاملیان، ۱۳۹۲).

**نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۱، ۱۳۹۷.**

سپس با به هنگام سازی ذرات در هر تکرار به دنبال جواب بهینه می‌شود. بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک گروه از ذرات را در یک محیط M بعدی تعریف می‌کند؛ که برای i امین ذره به صورت قبلی خود یا  $p_i = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^M)$  و سرعت  $v_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^M)$  را در حافظه‌اش نگه می‌دارد. در هر چرخه، سرعت ذره با استفاده از بهترین مکان قبلی ذره و بهترین مکان گروه تنظیم می‌شود؛ سپس سرعت جدید برای محاسبه مکان جدید ذره استفاده می‌شود.

فرض کنیم مکان و سرعت فعلی ذره i ام در k امین چرخه به ترتیب  $m_i^k$  و  $v_i^k$  باشند و بهترین مکان به دست آمده ذره تا به حال برابر با  $m_i^l$  باشد. از طرفی بهترین مکان حاصله از گروه ذرات تا چرخه k ام را  $m^g$  بنامیم. حال مکان و سرعت جدید ذره i ام در چرخه k+1 ام از رابطه (۱) حاصل می‌شود (Du and Swamy, 2016):

$$v_i^{k+1} = w * v_i^k + b * rand(.) (m_i^l - m_i^k) + c * rand(.) (m^g - m_i^k) \quad (1)$$

$$m_i^{k+1} = m_i^k + v_i^{k+1}$$

که  $k=1, 2, \dots$  و برای تمامی ذرات  $v_i^0=0$  است. ضرایب ثابت b و c به ترتیب بیانگر ضریب یادگیری (Learning rate) یا ضریب شتاب (Acceleration coefficient) حاصل از رفتار هر ذره و گروه ذرات است. W بیانگر ضریب وزنی اینرسی (Inertia weight) است. علائم rand(.) نیز بیانگر عددی تصادفی هستند؛ که از توزیع یکنواخت در بازه (0,1) بیرون کشیده می‌شوند. این دو ضریب از یکدیگر مستقل هستند.

در شکل ۱ نحوه عملکرد الگوریتم PSO نشان داده شده است.

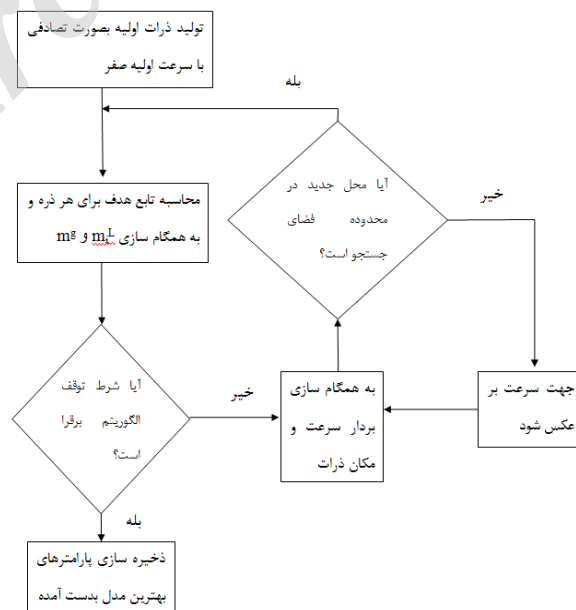
قدیمی‌ترین روش بهینه‌سازی سراسری که بر پایه حرکت‌های تصادفی پایه‌ریزی شده بود و هیچ‌گونه جهت‌دهی خاصی در بروز رسانی مدل وجود نداشت، روش مونت کارلو (Monte- Carlo) نام دارد. به عبارتی دیگر روشی کاملاً انتفاعی است. از آنجا که روش مونت کارلو بسیار زمان‌بر است و هیچ‌گونه جهت‌دهی در جستجوی آن وجود ندارد، محققان روش‌های مختلف جستجو را برای بهینه‌سازی سراسری ارائه کرده‌اند؛ تا زمان بهینه‌سازی کاهش یابد و تنها بر اساس جستجوی تصادفی، بهینه‌سازی انجام نشود (Sen and Stoffa, 2013). الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از جدیدترین روش‌های فرا ابتکاری است.

**۳- بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)**

این الگوریتم با الهام از رفتار اجتماعی گروهی از پرندگان مهاجر که در تلاش برای دستیابی به مقصد ناشناخته‌ای هستند، توسط "Kennedy and Eberhart, (1995)" توسعه داده شده است. در الگوریتم PSO، جمعیت جواب‌ها، گروه (swarm) نامیده می‌شود و هر جواب مانند یک پرنده در گروهی از پرندگان است و ذره (particle) نام دارد. تمامی ذرات دارای مقدار شایستگی هستند؛ که با استفاده از تابع شایستگی (fitness function) محاسبه می‌شوند و این تابع باید بهینه گردد.

جهت حرکت هر ذره با بردار سرعت آن معین می‌شود. در فرآیند تکاملی الگوریتم مذکور، پرندگان جدیدی از نسل قبل (جواب‌های جدید از جواب‌های قبلی) ایجاد نمی‌گردد؛ بلکه هر پرنده رفتار اجتماعی خود را با توجه به تجربیاتش و رفتار سایر پرندگان گروه تکامل بخشیده و مطابق آن حرکت خود را به سوی مقصد بهبود می‌دهد.

الگوریتم PSO با گروهی از جواب‌های (ذرات) تصادفی آغاز و



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (After Shaw and Srivastava, 2007).

بالتری داشته باشد، اثر قید گذاشته شده و اطلاعات پیشین پر رنگ می‌گردد. برای به دست آوردن مقدار بهینه  $\alpha$  روش‌های مختلفی ارائه شده است. مشهورترین این روش‌ها، استفاده از منحنی  $(L - L)$  curve است (Aster et al., 2013).

در مواردی مانند این مقاله که به مدلی هموار نیاز باشد؛ ماتریس  $L_1$  می‌تواند عملگر مشتق‌گیری مرتبه یک ( $L_1$ ) یا مرتبه دوم ( $L_2$ )، به صورت ماتریس‌های رابطه (۳) باشند.

$$L_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & \\ 0 & -1 & 1 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \dots & \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

در این مقاله از عملگر مشتق مرتبه دوم استفاده شده تا مدلی هموار به دست آید.

می‌توان مراحل حل مسئله توموگرافی زمان سیر با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات را به صورت زیر شرح داد:

(۱) پارامترهای اصلی مرتبط با PSO یعنی تعداد ذرات، شرط همگرایی، مقدار وزن، پارامترهای  $b$  و  $c$ ، حداکثر تکرار، تعداد پارامترهای مدل (تعداد سلول‌های سرعت یا کندی)، کمینه و بیشینه تغییرات پارامترهای مدل، حداکثر سرعت مجاز ذرات مشخص می‌شوند.

(۲) ذرات به صورت تصادفی در مدل پخش می‌گردند.

(۳) مدل سرعتی تخمین زده می‌شود.

(۴) تابع هدف ذکر شده در رابطه (۲)، محاسبه می‌گردد. اگر الگوریتم هنوز همگرا نشده باشد، پارامترهای مرتبط با بهینه‌سازی، همگام‌سازی می‌شود.

(۵) موارد ۳ و ۴ تا همگرایی ادامه پیدا می‌کند. در این مقاله برای بررسی همگرایی، بیشینه تکراری در ابتدای الگوریتم مشخص می‌شود. در صورتی که میزان تابع هدف در دو تکرار پشت سر هم از ۰/۱ درصد کمتر شود، الگوریتم متوقف می‌گردد. در غیر این صورت تا بیشینه تکرار مورد نظر اجرا می‌شود.

## ۶- نتایج عددی

### ۶-۱- داده مصنوعی

در ادامه الگوریتم PSO بر روی داده مصنوعی بدون اعمال می‌گردد و با روش وارون سازی محلی مارکوارت-لنبرگ مقایسه می‌گردد. برای بررسی پایدار بودن الگوریتم در برابر نوفه، دو داده با سطوح مختلف نوفه نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نوفه‌های اضافه شده به داده دارای توزیع گاوسی با میانگین صفر و انحراف معیارهای  $\pm 0.15ms$  و

## ۴- مسئله مستقیم (Forward problem)

در حل مسائل وارون غیرخطی، به مسیر پرتو و زمان رسید موج نیاز است. روش‌هایی که این دو مهم را با دانستن مدل سرعتی بین دو چاه، برآورده می‌کنند؛ مسئله مستقیم نامیده می‌شوند. روش‌های حل مسئله مستقیم به سه دسته (۱) ردیابی پرتو، (۲) انتشار جبهه موج و (۳) روش‌های مبتنی بر نظریه گراف‌ها تقسیم می‌شوند.

در این مقاله از ردیابی پرتو دو نقطه سریع (Um and Thurber, 1987) استفاده شده است. در الگوریتم ردیابی پرتو دو نقطه سریع مسیر پرتو اولیه به طور تکراری آشفته می‌شود تا زمانی که اصل پایداری زمان سیر فرما (Fermat) برآورده شود و زمان سیر در طول قطعات مسیر پرتو به حداقل برسد.

## ۵- حل مسئله توموگرافی زمان سیر

اولین و مهم‌ترین قسمت برای حل یک مسئله بهینه‌سازی، معرفی تابع هدف مناسب برای آن مسئله است. ساده‌ترین تابع هدف استفاده شده در بررسی‌های توموگرافی، کمینه‌سازی خطای جذر میانگین مربعات بین زمان رسیده‌های واقعی و زمان رسید محاسبه شده در هر مرحله است؛ اما با این تابع هدف ساده، معمولاً نمی‌توان به پاسخ مناسبی دست پیدا کرد؛ زیرا یکی از مشکلات حل مسائل وارون ناپایداری آن‌هاست. ناپایداری به این معناست که تغییرات کوچک در اندازه‌گیری‌ها، تغییرات عمده‌ای در مدل تخمین زده شده ایجاد می‌کنند. در داده‌های ژئوفیزیکی این تغییرات کوچک همان نوفه‌ها هستند. وجود نوفه در داده‌ها، وابستگی هندسی پرتوها به مدل، پارامتری کردن (گسسته سازی) مدل، خطای ناشی از عدم قرائت صحیح اولین زمان رسید، خطای ناشی از تعیین محل دقیق فرستنده و گیرنده باعث ایجاد عدم یکتایی، ناپایداری و بد وضع بودن مسئله می‌شوند. (Rawlinson and Sambridge, 2003). به همین دلیل در روش‌های وارون از مقیدسازی استفاده می‌شود. مسائل وارونی که این مشکلات را دارند، مسائل بد وضع (ill-posed) نامیده می‌شوند. تیخنوف برای حل مسائل بد وضع استفاده از منظم سازی (regularization) را پیشنهاد نمود (Tikhonov and Arsenin, 1977). ایده منظم‌سازی به این صورت است که از میان جواب‌های ممکن، گروه خاصی از جواب‌ها انتخاب شوند، به طوری که این پاسخ‌ها دارای ویژگی خاصی باشند. این ویژگی‌های به عنوان اطلاعات پیشین شناخته می‌شوند. اطلاعات پیشین به کاهش تعداد پاسخ‌ها کمک می‌نماید. در این حالت تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$\varphi = \|G(m) - d\|_2^2 + \alpha^2 \|L_1 m\|_2^2 \quad (2)$$

که  $G$  عملگر ارتباط‌دهنده غیرخطی بین داده و مدل  $m$  مدل، داده‌ها،  $\alpha$  پارامتر منظم سازی و  $L_1$  پایه یا حوزه مطلوب است. اگر  $\alpha$  برابر با صفر باشد، هیچ‌گونه منظم سازی انجام نمی‌گیرد و مسئله همان مسئله کمترین مربعات خواهد بود. هر چقدر  $\alpha$  مقدار

سرعتی داده نوفه‌ای دوم، باز هم مقدار  $\alpha$  بالاتر برده می‌شود و همان‌طور که مشخص است، افتادگی سرعت قابل تشخیص نیست؛ اما لایه کم سرعت آشکار شده است. شکل ۴ نیز نشان‌دهنده منحنی همگرایی الگوریتم PSO (منحنی مقدار تابع هدف بر حسب تعداد تکرار) در هر سه حالت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش تکرار الگوریتم، مقدار تابع هدف در هر سه حالت کاهش می‌یابد؛ تا الگوریتم همگرا گردد. از آنجایی که در هر سه حالت،  $\alpha$  در معادله ۲ دارای مقادیر مختلفی بوده است؛ بنابراین نمی‌توان مقایسه جزئی بین منحنی‌های همگرایی داشت اما به طور کلی می‌توان گفت که مقدار تابع هدف در هر تکرار، با افزایش نوفه، کاهش می‌یابد.

برای بررسی کمی نتایج حاصل از وارون سازی از دو پارامتر استفاده می‌شود ۱- خطای جذر میانگین مربعات بین داده مشاهده‌ای و داده محاسبه شده (RMS error) و ۲- فاصله اقلیدسی (نرم دوم) بین مدل واقعی و مدل به دست آمده (Euclidean distances) هر چقدر مقدار خطای RMS پایین‌تر باشد، مشخص کننده برازش بهتر داده‌ها است. از طرفی مقادیر کم‌تر فاصله اقلیدسی بیانگر شباهت مدل به دست آمده به مدل واقعی است. نتایج حاصل از خطای RMS و فاصله اقلیدسی سه توموگرام شکل ۳ در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، خطای RMS و فاصله اقلیدسی در داده بدون نوفه کمترین مقدار را داراست و این مقادیر برای داده نوفه‌ای دوم، بیشترین مقدار را دارد.

شکل ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج به ترتیب مقایسه‌ای بین زمان رسیدن محاسبه شده توسط الگوریتم PSO و زمان رسیدن مشاهده شده برای چشمه شانزدهم را پس از وارون سازی داده بدون نوفه، داده نوفه‌ای اول و داده نوفه‌ای دوم، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش درصد نوفه در داده‌ها، تطابق بین نقاط آبی رنگ (داده مشاهده شده) و خطوط قرمز رنگ (داده محاسبه شده) کاهش می‌یابد.

از الگوریتم مارکوارت-لونیبرگ (LM) در برگردان مدل سرعتی نیز استفاده شد. برای نشان دادن وابستگی نتیجه نهایی روش‌های غیرخطی محلی به مدل اولیه، وارون سازی با استفاده از دو مدل اولیه ساده‌ی همگن ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ متر بر ثانیه انجام شد و به داده بدون نوفه برای وارون سازی محلی بسنده شده است. شکل ۶ بیانگر نتایج حاصل از اعمال الگوریتم LM بر روی مدل شکل ۲ است. مدل شروع شکل ۶-الف، مدل همگن ۱۰۰۰ متر بر ثانیه و مدل اولیه شکل ۶-ب، مدل همگن ۲۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. دو نکته از این شکل قابل استنباط است: ۱) مقدار مقیاس سرعت تخمین زده شده در هر دو حالت با مقیاس سرعت مدل مصنوعی تفاوت دارد و ۲) در کناره‌های مدل که پوشش پرتو ضعیف‌تر است، سرعت بازسازی شده به سمت مقدار سرعت مدل اولیه همگرا شده است. این مشکل در شکل ۶-ب بیشتر دیده می‌شود؛ زیرا گسترش لایه پرسرعت پایینی را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد.

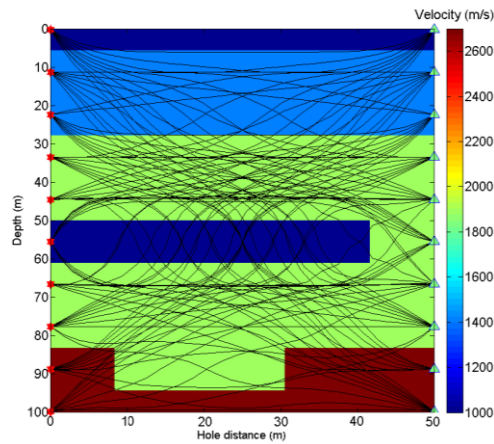
$\pm 0.4\text{ms}$  است. در این متن به داده نوفه‌ای با انحراف معیار  $\pm 0.15\text{ms}$  داده نوفه‌ای اول و به داده نوفه‌ای با انحراف معیار  $\pm 0.4\text{ms}$  داده نوفه‌ای دوم گفته می‌شود. تمامی مراحل مدل‌سازی و بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB انجام پذیرفته است.

فاصله چاه‌ها در این مدل ۵۰ متر و عمق آن‌ها نیز ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد. این مدل دارای لایه‌های افقی با ضخامت‌های مختلف، لایه کم سرعت با ضخامت ۱۴ متر از عمق ۴۸ تا ۶۲ متر و افتادگی سرعت از عمق ۸۲ تا ۹۵ متر است. تغییرات سرعت مدل بین ۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰ متر بر ثانیه است. تعداد ۱۰ چشمه در چاه سمت راست و ۱۰ گیرنده در چاه سمت چپ قرار داده شد؛ که مجموعاً ۱۰ پرتو ایجاد می‌گردد. فاصله بین چشمه‌ها و گیرنده‌ها از یکدیگر  $11/08$  متر در نظر گرفته شد. اولین و آخرین چشمه و گیرنده به ترتیب در عمق  $0/1$  و  $99/9$  متری می‌باشند.

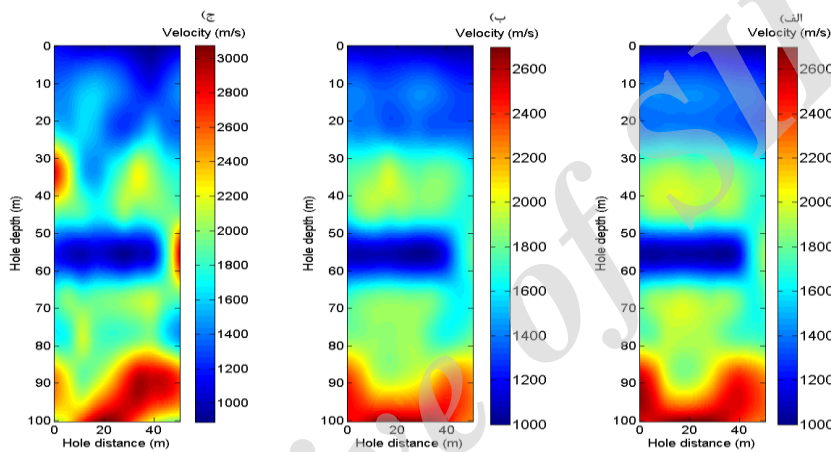
شکل ۲ نشان‌دهنده پوشش پرتوی این آزمایش به همراه محل چشمه‌ها و گیرنده‌ها است. پرتوهای رسم شده در این شکل، به کمک الگوریتم دونقطه سریع حاصل شده‌اند. طبیعت غیرخطی انتشار پرتوها در این شکل کاملاً مشخص است. برای وارون سازی مدل، محیط بین دو چاه به ۱۰۰ پیکسل گسسته شد (۱۰ سلول در راستای طولی و ۱۰ سلول در راستای عرضی). پارامترهای مرتبط با الگوریتم PSO در این آزمایش به صورت جدول ۱ تعریف گردیدند. زمان تقریبی اجرا در رایانه شخصی با CPU چهار هسته‌ای و RAM 4G حدود ۱۵ دقیقه است. البته الگوریتم PSO به تنهایی دارای سرعت بالایی است و عمده زمان صرف شده به محاسبات الگوریتم مستقیم (Forward) در هر تکرار بازمی‌گردد. یک چرخه از الگوریتم PSO با مشخصات موجود در جدول ۱، بدون در نظر گرفتن محاسبات مستقیم، حدود  $0/01$  ثانیه طول می‌کشد.

پس از اعمال الگوریتم بر روی داده‌های زمان رسیدن، شکل ۳-الف، ۳-ب و ۳-ج به ترتیب برگردان هموار شده مدل سرعتی در داده بدون نوفه، داده نوفه‌ای اول و داده نوفه‌ای دوم را نشان می‌دهند. مدل اولیه برای شروع الگوریتم PSO یک مدل همگن با سرعت ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که حتی با در نظر گرفتن مدل اولیه کاملاً تصادفی نیز، پاسخ الگوریتم بسیار شبیه به شکل ۳ می‌گردد و در واقع پاسخ به مدل اولیه بستگی ندارد.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، داده بدون نوفه تطابق خوبی با مدل اصلی دارد، هر چند که در کناره‌های مدل مخصوصاً نزدیک به چاه گیرنده‌ها، به علت پوشش ضعیف پرتو، کمی مدل تخمین زده شده از مدل اصلی متفاوت شده است. در داده نوفه‌ای اول نیز تقریباً مدلی شبیه به مدل اصلی به دست آمده است؛ اما برای پایداری مسئله در برابر نوفه، مقدار  $\alpha$  در معادله ۲ عدد بزرگ‌تری قرار داده شده است؛ که منجر به نرم شدگی بیشتر مدل در قسمت مربوط به افتادگی سرعت شده است. در برگردان مدل



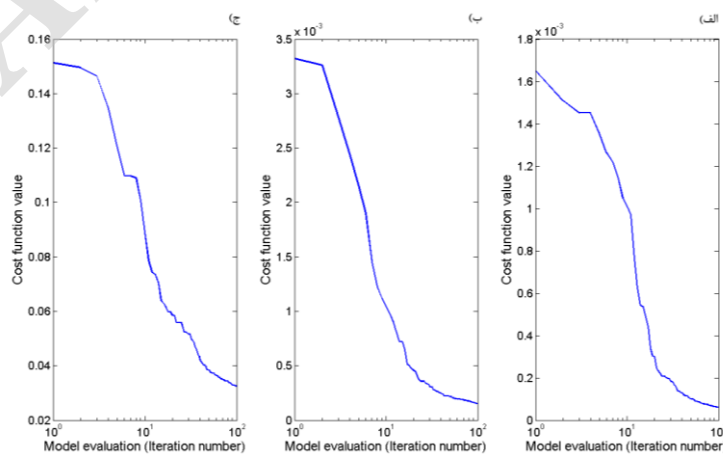
شکل ۲: مدل مصنوعی ایجاد شده به همراه پوشش پرتوی حاصل از مدل سازی مستقیم. ستاره‌ها در سمت چپ و مثلث‌ها در سمت راست به ترتیب به چشمه‌ها و گیرنده‌ها اشاره دارند.



شکل ۳: الف) مدل به دست آمده با الگوریتم PSO در داده بدون نوفه، ب) مدل تخمین زده شده با الگوریتم PSO در داده نوفه‌ای اول و ج) مدل تخمین زده شده با الگوریتم PSO در داده نوفه‌ای دوم.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مدل مصنوعی بدون نوفه.

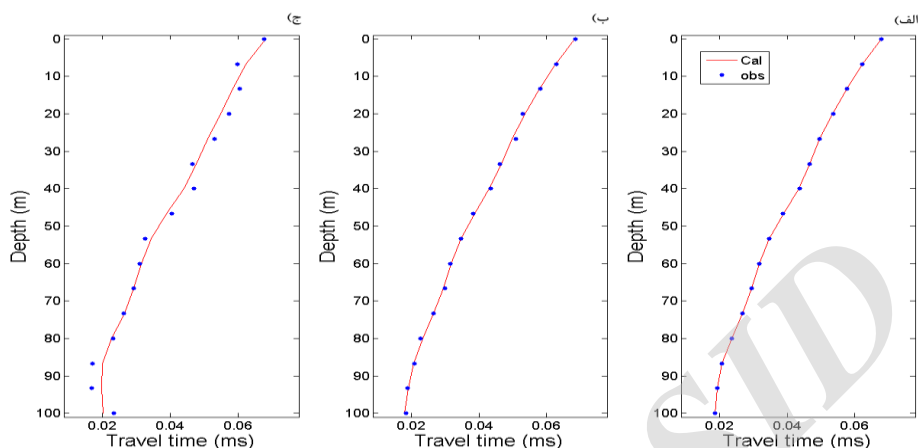
حداکثر سرعت مجاز ذرات	c	b	w	حداکثر تکرار	تعداد ذرات	تعداد پارامتر مدل
۱۷۰	۲	۲	۰/۸	۲۰۰	۵۰	۱۰۰



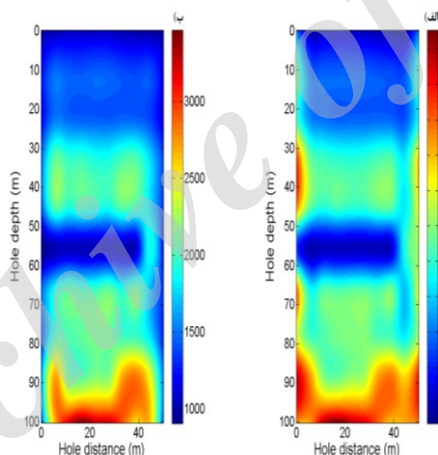
شکل ۴: منحنی همگرایی الگوریتم PSO در الف) داده بدون نوفه، ب) داده نوفه‌ای اول و ج) داده نوفه‌ای دوم.

جدول ۲: نتایج حاصل از وارون سازی برای مدل مصنوعی.

خطای جذر میانگین مربعات (ثانیه)	فاصله اقلیدسی (متر بر ثانیه)
۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۲۹
۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۳۶
۰/۰۳۷۶	۰/۰۰۴۴



شکل ۵: مقایسه زمان سیر مشاهده شده و محاسبه شده در وارون سازی الف) داده بدون نوفه، ب) داده نوفه‌ای اول و ج) داده نوفه‌ای دوم.



شکل ۶: مدل‌های به دست آمده حاصل از اعمال الگوریتم LM بر روی مدل مصنوعی شکل ۲ با دو مدل سرعت اولیه متفاوت الف) مدل سرعتی شروع همگن برابر با ۲۵۰۰ متر بر ثانیه و ب) مدل سرعتی شروع همگن برابر با ۱۰۰۰ متر بر ثانیه.

شرکت IGT موجود است و برای وارون سازی از این داده‌ها بهره برده شد. به منظور وارون سازی، محیط بین دو چاه به ۳۲۴ سلول (۱۲ سلول در راستای طولی و ۲۷ سلول در راستای عرضی) تقسیم‌بندی شد. داده ورودی به الگوریتم زمان رسید موج از هر چشمه به گیرنده‌ها است.

ابتدا با استفاده از الگوریتم LM و دو سرعت اولیه متفاوت، وارون سازی انجام پذیرفت. شکل ۸-الف، نشان‌دهنده مدل به دست آمده با مدل اولیه همگن برابر با ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است و در شکل ۸-ب، مدل اولیه آن مدل همگن با سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه است. همان‌طور که مشخص است، همانند مدل مصنوعی وارون شده با

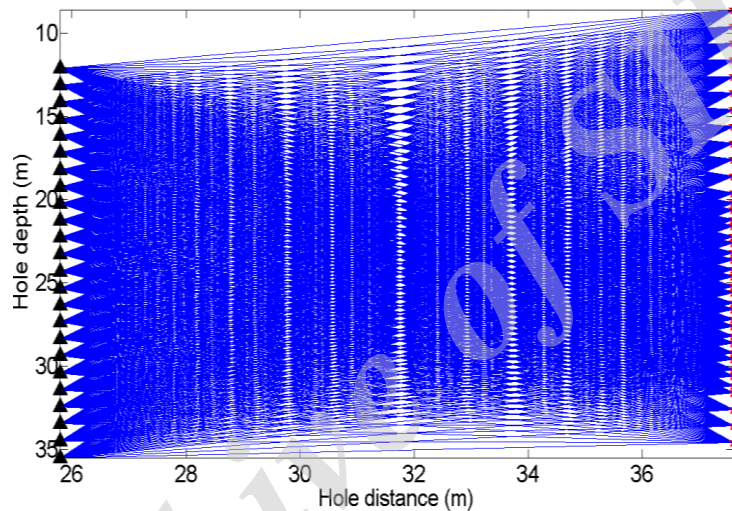
## ۲-۶- مدل واقعی

به منظور یافتن گالری مربوط به معادن قدیمی احتمالی در یکی از فرودگاه‌های شهر مادرید، شرکت International Geophysical Technology (IGT) داده‌برداری بین‌چاهی انجام داده است. به این منظور دو چاه با فاصله ۱۱٫۸ متر از یکدیگر حفر شده‌اند و اندازه‌گیری‌ها در محدوده عمقی ۸٫۶ تا ۳۵٫۵ متر انجام پذیرفت. تعداد ۲۴ گیرنده و ۳۹ چشمه در این عملیات مورد استفاده قرار گرفت که در مجموع ۹۳۶ پرتو بکار تولید گردید. شکل ۷ نشان‌دهنده پوشش پرتوی مستقیم و محل گیرنده‌ها و فرستنده‌های این داده‌برداری است. داده‌های پردازش شده این مدل، در سایت

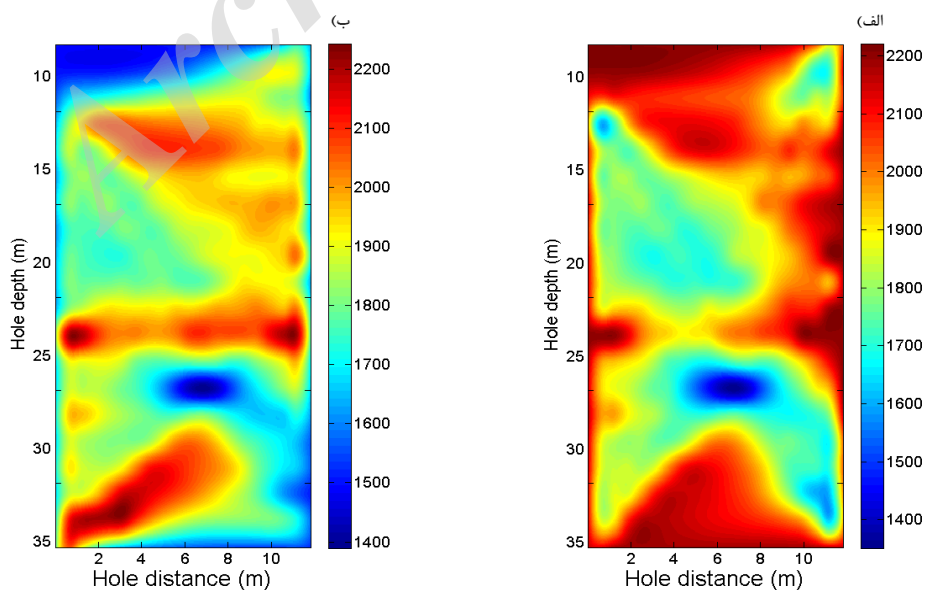
محل آن با یکی از گالری‌های حاوی آب تطبیق دارد و این آنومالی در این مدل نیز دیده می‌شود. دیگر ناهمگنی‌های مدل نیز شبیه به خروجی‌های مطالعات Göktürkler و Dantas and Medeiros است. (Göktürkler, 2011; Dantas and Medeiros, 2015).

شکل ۱۰ نشان‌دهنده نتایج دو محقق ذکر شده است. در شکل ۱۱ مقایسه‌ای بین زمان رسیدهای محاسبه شده توسط الگوریتم PSO و زمان رسید مشاهده شده برای چهار چشمه مختلف دیده می‌شود. در این شکل تطابق مناسبی بین زمان رسیدهای ذکر شده وجود دارد. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم PSO بر روی این داده به شرح جدول ۳ است. زمان اجرای الگوریتم در این حالت تقریباً ۲۰ دقیقه است.

استفاده از LM، اطراف مدل که پوشش پرتو کمتری وجود دارد، به سمت مدل اولیه ورودی به الگوریتم سوق پیدا می‌کند. این مشکل وقتی بیشتر در دسترس می‌گردد؛ که اطلاعات اضافی مانند نگار چاه، مغزه و ... در دسترس نباشد. هر چند هر دو مدل به دست آمده، یک بی‌هنجاری منفی را در حدود عمق ۲۵/۵ تا ۲۷/۵ متر نشان می‌دهند؛ اما گسترش لایه‌ی پرسرعت پائینی در هر دو حالت بسیار فرق دارد. شکل ۹-الف مدل سرعت به دست آمده از الگوریتم PSO را نشان می‌دهد. خطای جذر میانگین مربعات در این حالت حدود ۰/۰۴۱ ثانیه شده است. شکل ۹-ب بیانگر منحنی همگرایی الگوریتم PSO اعمال شده بر روی داده واقعی است. روند کاهشی این منحنی با افزایش تکرار، مشخص است. طبق گزارش شرکت IGT، در حدود عمق ۲۵ تا ۲۸ متری آنومالی کم سرعتی دیده می‌شود؛ که

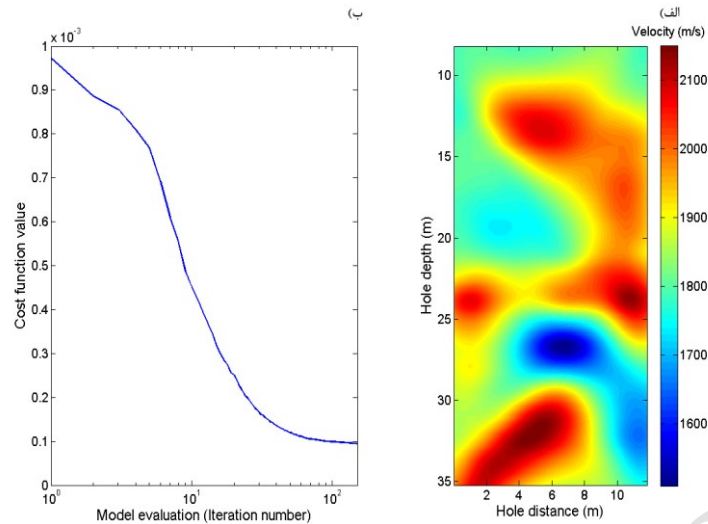


شکل ۷: محل چشمه‌ها و گیرنده‌ها به همراه پوشش پرتو داده واقعی مورد استفاده در فرآیند وارون سازی.

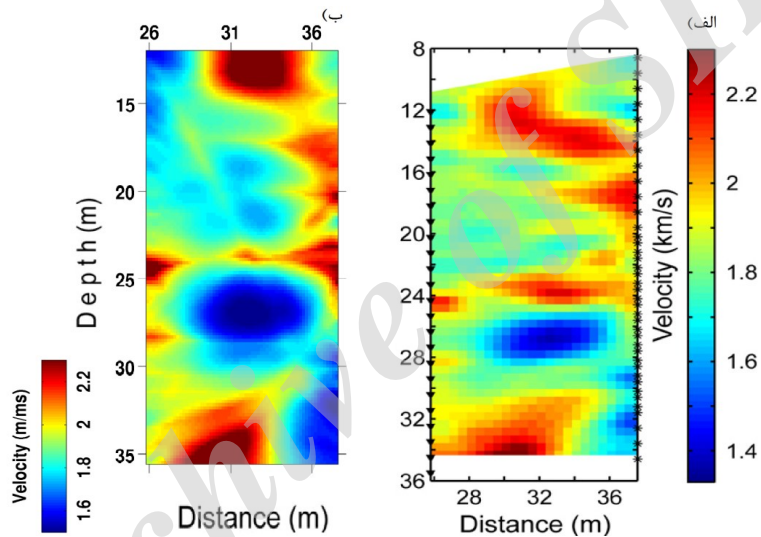


شکل ۸: مدل‌های به دست آمده حاصل از اعمال الگوریتم LM بر روی داده واقعی شرکت IGT با دو مدل سرعت اولیه متفاوت (الف) مدل سرعتی شروع همگن برابر با ۲۵۰۰ متر بر ثانیه و (ب) مدل سرعتی شروع همگن برابر با ۱۵۰۰ متر بر ثانیه.

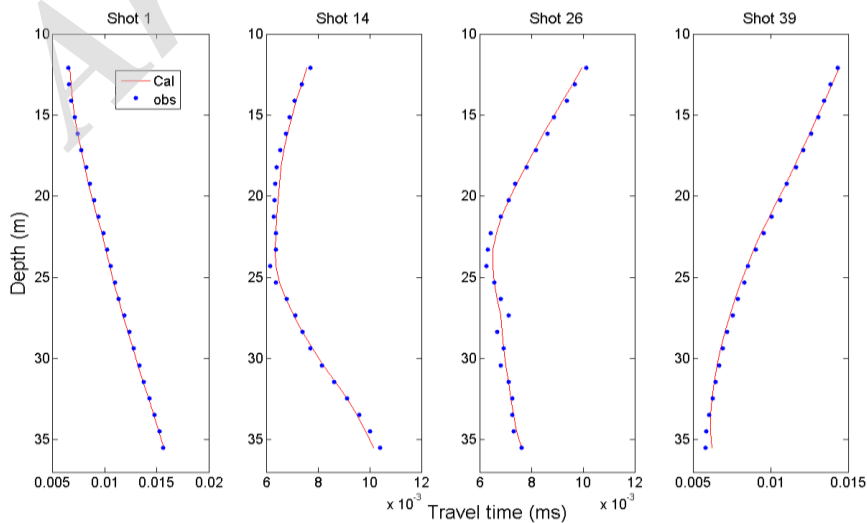




شکل ۹: الف) مدل سرعت تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم PSO بر روی داده‌های واقعی شرکت IGT و ب) منحنی همگرایی الگوریتم PSO.



شکل ۱۰: نتایج تحقیق نویسندگان ذکر شده بر روی داده واقعی شرکت IGT.



شکل ۱۱: مقایسه زمان رسیدهای محاسبه شده توسط الگوریتم PSO و زمان رسید مشاهده شده در داده واقعی برای چهار چشمه مختلف. شماره هر چشمه بالای آن آورده شده است.

ابراهیمی و همکاران، وارون سازی هموار توپوگرافی زمان سیر بین‌جاهی با استفاده از بهینه‌سازی سراسری، صفحات ۸۰-۶۷.  
جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده در بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مدل واقعی.

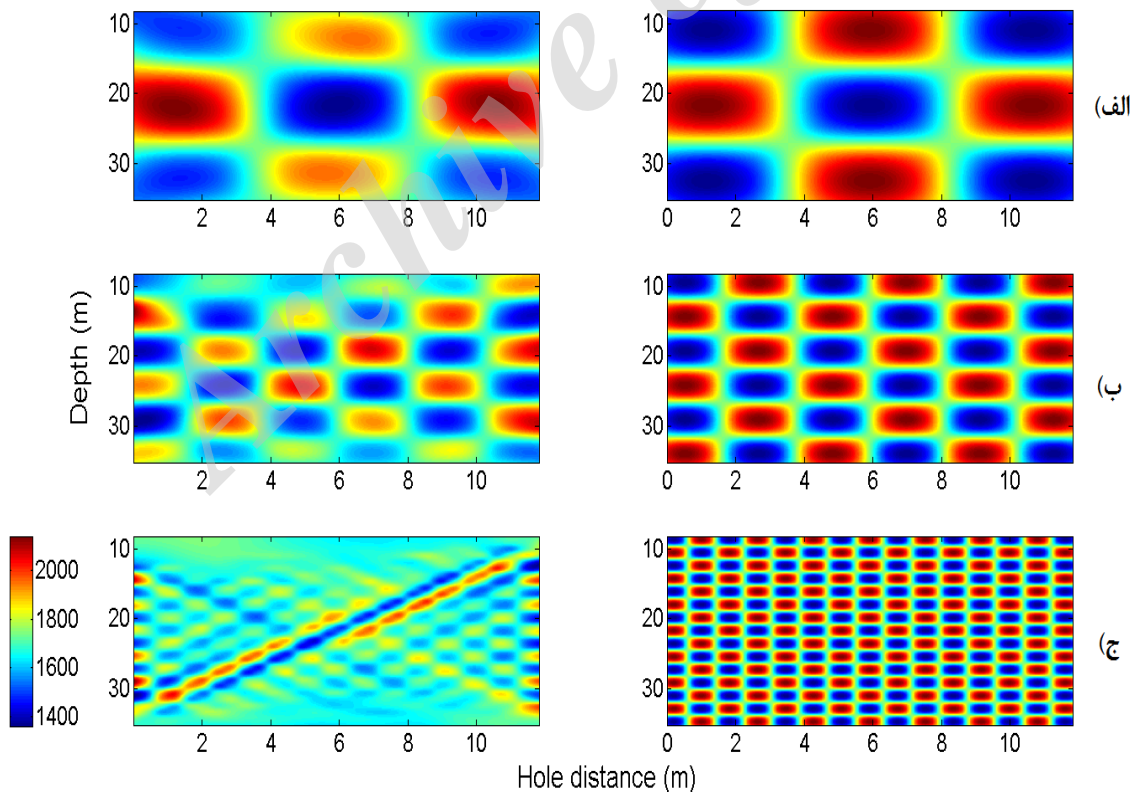
تعداد پارامتر مدل	تعداد ذرات	حداکثر تکرار	w	b	c	حداکثر سرعت مجاز ذرات
۳۲۴	۶۰	۱۵۰	۰/۸	۲	۲	۱۰۰

### ۶-۳- آزمایش مدل صفحه شطرنجی

یکی از روش‌های آزمایش تفکیک‌پذیری روش‌های غیرخطی در استفاده از مدل صفحه شطرنجی (Checkerboard) است (Lévêque et al., 1993). در این روش، مدلی مصنوعی همانند صفحه شطرنج، متناوباً پیکسل‌هایی با بی‌هنجاری مثبت و منفی تکرار می‌شوند. تمامی پارامترهای مورد استفاده در این آزمایش شبیه به پارامترهای استفاده شده در مدل واقعی است (محل چشمه و گیرنده، عمق چاه‌ها، فاصله چاه‌ها و تعداد پیکسل‌ها). در مدل شطرنجی استفاده شده سرعت پیکسل‌ها ۱۵۰۰ (معادل سرعت لایه کم سرعت موجود در داده واقعی) و ۲۰۰۰ متر بر ثانیه تنظیم شده است. نتایج حاصل از وارون سازی الگوی شطرنجی در سه حالت مختلف، با اندازه الگوهای شطرنجی متفاوت، امتحان شده است و نتایج در شکل ۱۲ دیده می‌شود. در شکل ۱۲-الف تعداد ۹ پیکسل سرعتی وجود دارد و همان‌طور که مشخص است، نتیجه وارون سازی الگوریتم در این حال تطابق مناسبی با مدل اصلی دارد. البته همان‌طور که مشخص است

به علت پوشش پرتوی ضعیف در بالا و پایین مدل، پیکسل‌های تخمین زده شده در این محدوده‌ها، کمی متفاوت از مدل شطرنجی شده‌اند. در شکل ۱۲-ب تعداد ۳۶ پیکسل انتخاب شده است. پیکسل‌های بالا و پایین این مدل نیز به خوبی مشخص نشده‌اند، اما پیکسل‌های مرکزی تطابق خوبی با مدل اصلی دارند. در شکل ۱۰-ج نیز آزمایش را با تعداد بالاتری پیکسل تکرار کرده‌ایم (۲۲۵ پیکسل). در این مدل اثر پوشش پرتو بر خروجی نهایی بیشتر مشخص گردیده است و تفکیک‌پذیری مدل به نسبت دو مدل قبل، ضعیف‌تر گردیده است. این امر به خاطر بالاتر بودن تعداد پیکسل‌ها (ریزتر شدن آنومالی‌ها) است.

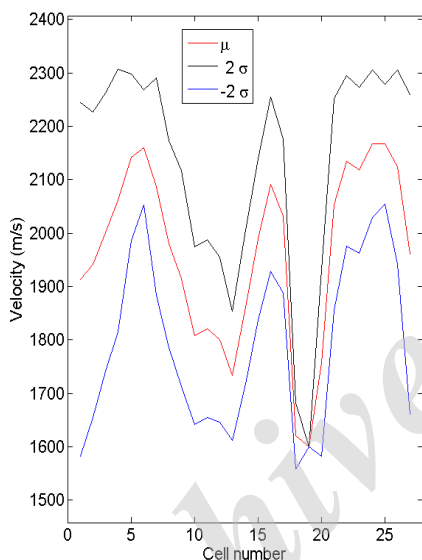
به طور کلی در آزمایش صفحه شطرنجی انجام شده می‌توان گفت که در داده‌های واقعی، محل‌هایی که پوشش پرتو مناسب دارند، آنومالی‌های کم سرعت و پرسرعت با دقت مناسبی مشخص می‌شوند هر چند همان‌طور که در شکل ۱۲-ج نیز مشخص است، هر چه وسعت آنومالی‌ها ریزتر شود، تفکیک‌پذیری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲: نتایج حاصل از مدل شطرنجی با الگوهای شطرنجی مختلف. الف) ۹ پیکسل، ب) ۳۶ پیکسل و ج) ۲۲۵ پیکسل. شکل‌های سمت راست مدل شطرنجی و شکل‌های سمت چپ مدل به دست آمده توسط الگوریتم PSO است.

۱۳- الف بیانگر انحراف معیار به دست آمده برای هر سلول است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بالا و پایین مدل که پوشش پرتو نداریم، عدم قطعیت (انحراف معیار) مقادیر بالایی دارد. عدم قطعیت به دست آمده برای آنومالی کم سرعت، کمترین مقدار است؛ که نشان‌دهنده این است که این آنومالی به مدل واقعی زمین مورد مطالعه شبیه خواهد بود. به منظور بررسی جزئی‌تر عدم قطعیت، یک برش عمودی در فاصله ۷ متری از چاه چشمه‌ها زده شد و مقادیر میانگین ( $\mu$ )،  $\mu - 2\sigma$  و  $\mu + 2\sigma$  برای هر سلول رسم گردید. شکل ۱۳-ب معرف این تغییرات است. آنومالی کم سرعت در این برش در سلول‌های شماره ۱۸ و ۱۹ دیده می‌شوند؛ که تغییرات کمی را نشان می‌دهند.

ب)



شکل ۱۳: الف) توزیع انحراف معیار حاصل از اجرای الگوریتم PSO به تعداد ۵۰ بار. ب) بررسی عدم قطعیت بر روی یک برش عمودی در فاصله ۷ متری از چاه چشمه‌ها.

کارساز خواهد بود. الگوریتم ذکر شده بر روی مصنوعی بدون نوفه و با نوفه‌های گاوسی با سطوح مختلف با موفقیت امتحان گردید و نتایج با الگوریتم بهینه‌سازی محلی مارکوارت- لونیبرگ مقایسه شد. در نهایت داده واقعی شرکت IGT مورد امتحان قرار گرفت و یک بی‌هنجاری کم سرعت در حدود عمق ۲۵ تا ۲۸ متر مشخص گردید. عدم قطعیت به دست آمده نیز، در محدوده این آنومالی بسیار اندک به دست آمد.

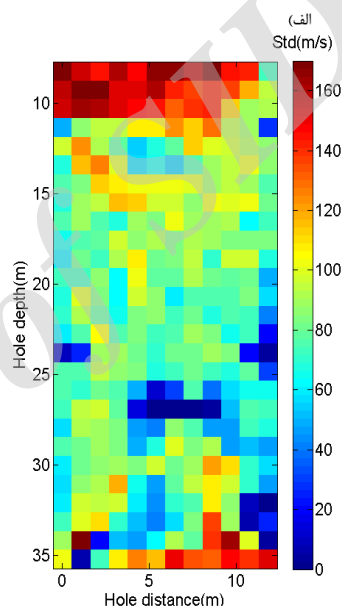
## ۸- منابع

صنّعی آباد، م. و جبل عاملیان، ز.، ۱۳۹۲، الگوریتم‌های تکاملی و محاسبات زیستی، انتشارات نیاز دانش.

Angioni, T., Rechten, R.D., Cardimona, S.J. and Luna, R., 2003, Crosshole seismic tomography and

## ۴-۶- بررسی عدم قطعیت

یکی از مزایای روش‌های بهینه‌سازی سراسری، به دست آوردن عدم قطعیت مدل‌های به دست آمده است. از آنجایی که در این گونه‌ها روش‌ها، فرآیندهای تصادفی در بروز رسانی مدل، دخیل هستند، بنابراین حتی با داشتن پارامترهای اولیه ثابت، با هر بار اجرای برنامه، مدل به دست آمده تا حدی متفاوت از مدل قبل خواهد بود. یکی از مزایای این ویژگی در روش‌های سراسری، به دست آوردن عدم قطعیت مدل است. در این مقاله برای به دست آوردن عدم قطعیت داده واقعی به دست آمده، الگوریتم PSO ۵۰ بار اجرا شد و ۵۰ مدل مختلف سرعت از داده واقعی حاصل گردید. سپس انحراف معیار حاصل از مدل‌های به دست آمده در هر سلول محاسبه گردید. شکل



## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله توموگرافی زمان سیر داده‌های لرزه بین‌چاهی با استفاده از یکی از روش‌های بهینه‌سازی سراسری با نام الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بررسی گردید. از آنجایی که اغلب مسائل وارون ژئوفیزیکی بد وضع هستند، از منظم سازی با مشتق درجه دوم در تابع هدف آن استفاده شد.

روش‌های غیرخطی محلی دارای سرعت اجرای بالاتری نسبت به روش‌های سراسری هستند؛ اما از آنجایی که متداول‌ترین روش حل این مسائل، استفاده از خطی سازی با استفاده از بسط تیلور است و با یک مدل اولیه شروع به وارون سازی می‌کند، احتمال اینکه در کمینه محلی تابع هدف همگرا شوند، بسیار زیاد است. در نتیجه اگر در منطقه مورد مطالعه اطلاعات زمین‌شناسی، نمودار چاه و هر داده کمکی دیگر وجود نداشته باشد، استفاده از روش‌های سراسری

- Locatelli, M. and Schoen, F., 2013, Global optimization: theory, algorithms, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Ma, X.Q., 2002, Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing, *Geophysics*, 67 (6), 1877-1885.
- Paasche, H. and Tronicke, J., 2014, Nonlinear joint inversion of tomographic data using swarm intelligence, *Geophysics*, 79 (4), R133-R149.
- Pullammanappallil, S.K. and Louie, J.N., 1994, A generalized simulated-annealing optimization for inversion of first-arrival times, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (5), 1397-1409.
- Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2003, Seismic traveltimes tomography of the crust and lithosphere, *Advances in Geophysics*, 46, 81-199.
- Sagong, M., Park, C.S., Lee, B. and Chun, B.S., 2012, Cross-hole seismic technique for assessing in situ rock mass conditions around a tunnel, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, 86-93.
- Sambridge, M. and Drijkoningen, G., 1992, Genetic algorithms in seismic waveform inversion, *Geophysical Journal International*, 109 (2), 323-342.
- Saraswat, P. and Sen, M.K., 2010, Simultaneous stochastic inversion of prestack seismic data using hybrid evolutionary algorithm, *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010 (2850-2854)*. Society of Exploration Geophysicists.
- Sen, M.K. and Stoffa, P.L., 2013, *Global optimization methods in geophysical inversion*, Cambridge University Press.
- Shaw, R. and Srivastava, S., 2007, Particle swarm optimization: A new tool to invert geophysical data, *Geophysics*, 72 (2), F75-F83.
- Sule, M.R. and Octova, A., 2012, Cross-hole seismic travel time Tomography applied before tunnel excavation by using TBM, *Near Surface Geoscience-18<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Um, J. and Thurber, C., 1987, A fast algorithm for two-point seismic ray tracing, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77, 972-986
- Wong, J., 2000, Crosshole seismic imaging for sulfide orebody delineation near Sudbury, Ontario, Canada, *Geophysics*, 65, 1900-1907.
- Yamamoto, T., Nye, T. and Kuru, M., 1994, Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry, *Geophysics*, 59 (10), 1530-154.
- borehole logging for engineering site characterization in Sikeston, MO, USA, *Tectonophysics*, 368 (1), 119-137.
- Aster, R.C., Borchers, B. and Thurber, C.H., 2013, *Parameter Estimation and Inverse Problems second edition* Elsevier Inc.
- Becht, A., Bürger, C., Kostic, B., Appel, E. and Dietrich, P., 2007, High-resolution aquifer characterization using seismic cross-hole tomography: An evaluation experiment in a gravel delta, *Journal of Hydrology*, 336 (1), 171-185.
- Boschetti, F., Dentith, M.C. and List, R.D., 1996, Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms, *Geophysics*, 61 (6), 1715-1727.
- Bregman, N.D., Bailey, R.C. and Chapman, C.H., 1989, Crosshole seismic tomography, *Geophysics*, 54 (2), 200-215.
- Dantas, R.R. and Medeiros, W.E., 2015, Interpreting crosswell traveltimes tomograms considering the available illumination, In *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*, Rio de Janeiro, Brazil, Brazilian Geophysical Society.
- Du, K.L. and Swamy, M.N.S., 2016, Particle swarm optimization. In *Search and Optimization by Metaheuristics (153-173)*, Springer International Publishing.
- Ehosioko, S.I. and Fechner, T., 2014, Application of Cross-hole Seismic Tomography in Characterization of Heterogeneous Aquifers, *Near Surface Geoscience 2014-20<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Fernández Martínez, J.L., Mukerji, T., García Gonzalo, E. and Suman, A., 2012, Reservoir characterization and inversion uncertainty via a family of particle swarm optimizers, *Geophysics*, 77 (1), M1-M16.
- Göktürkler, G., 2011, A hybrid approach for tomographic inversion of crosshole seismic first-arrival times, *Journal of Geophysics and Engineering*, 8 (1), 99-108.
- Greenhalgh, S., Zhou, B. and Cao, S., 2003, A crosswell seismic experiment for nickel sulphide exploration, *Journal of Applied Geophysics*, 53 (2), 77-89.
- Kennedy, J. and Eberhart, R.C., 1995, Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, pp. 1948- 1942.
- Lévêque, J.J., Rivera, L. and Wittlinger, G., 1993. On the use of the checker-board test to assess the resolution of tomographic inversions, *Geophysical Journal International*, 115 (1), 313-318.



## Smooth inversion of travel-time tomography of crosshole data by global optimization

Mohammad Reza Ebrahimi<sup>1\*</sup>, Mohammad Ali Riahi<sup>2</sup> and Mohammad Saniee Abadeh<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, School of Electrical & Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 5 August 2017; Accepted: 6 October 2017

Corresponding author: mrebrahimi@ut.ac.ir

### Keywords

Travel-Time Tomography  
Crosshole Data  
Non-Linear Inversion  
Global Optimization  
Particle Swarm Optimization

### Extended Abstract

#### Summary

Crosshole seismic travel-time tomography is often applied to image the velocity structure of an inter-well medium and involves in finding a velocity model that minimizes the error energy between the measured and the theoretical travel times. Travel-time tomography is a non-linear inverse problem because the ray paths depend on the unknown velocity field. Linearized techniques are usually employed to reconstruct the velocity field in

an iterative manner. A limitation, inherent to deterministic methods, is the strong relation between the starting model and local minima entrapment. Global optimization methods such as particle swarm optimization (PSO) can be applied to such problems. Regardless of the starting model, global optimization ideally finds the region of the solution space containing global minima without calculating derivatives. In this paper, the regularized PSO approach to seismic travel-time tomography is described, and is tested on synthetic as well as real seismic data, and is also compared with a local optimization method that is Levenberg-Marquart (LM) algorithm. The results show that the proposed method estimates the velocity model better than LM, especially in the absence of good prior information.

### Introduction

The purpose of this paper is to study a particular class of methods for imaging subsurface structures called crosshole seismic travel-time tomography. Crosshole tomography has been used extensively in recent years to estimate velocity model of the earth. Some of the important tomographic applications include: geotechnical and engineering parameter estimation, hydrological parameter estimation, mineral exploration, etc.

In this paper, we focus on the regularized non-linear inversion of travel time tomography of crosshole data using PSO approach. Applications of this method to each of the synthetic and real data are then presented.

### Methodology and Approaches

If we represent some elastic property of the subsurface (e.g. velocity) by a set of model parameters  $m$ , then a set of data (e.g. travel-times)  $d$  can be predicted for a given source-receiver array. The non-linear relationship between data and model parameters,  $d = G(m)$ , forms the basis of any tomographic method. For an observed dataset  $d_{obs}$  and an initial model  $m_0$ , the difference  $d_{obs} - G(m_0)$  gives an indication of how well the current model predictions satisfy the data. The inverse problem in tomography is then to manipulate  $m$  in order to minimize the difference between observed and predicted data subject to any regularization that may be imposed. The end result will be a mathematical representation of the true structure whose accuracy will depend on a number of factors including: 1) assumptions made in parameterizing the model, 2) errors in the observed data, 3) dependence of the ray geometry on the model, and 4) the measurement errors due to errors in source/receiver locations and 5) incorrect first break picking. A regularization term is often included in the objective function to provide additional constraints on the model parameters, thereby reducing the non-uniqueness of the solution.

In this paper, we propose regularized PSO method for solving non-linear crosshole seismic travel-time tomography. PSO method is a recently developed and population based stochastic optimization method, inspired by the social behavior of bird flocking and fish schooling.

Linearized techniques are usually employed to reconstruct the velocity field in an iterative manner, i.e., a local optimization approach is used to modify a user-defined initial model.

Compared with standard linearized inversion approaches, the higher computational effort is usually considered as a major limitation of global optimization methods. However, their advantages include the ability to produce results independent of the starting model, to explore the model space in more details and thus, may provide a better chance to find the global minimum.

The forward problem of finding source-receiver ray paths and travel-times is solved using two-point ray tracing technique.

According to the tests on the synthetic data sets, the tomograms resulted from the proposed approach could image the subsurface in terms of the model velocities and geometries very well. As expected, the image exhibited the velocity variations at a good resolution.

We then presented the results of field crosshole data set made available by International Geophysical Technology (IGT). The travel-time data were inverted using PSO algorithm. The recovered models indicated a low velocity anomaly at depths between 25 and 28 m. Moreover, some high velocity zones were observed above and below the low velocity anomaly.

### **Results and Conclusions**

In this paper, a non-linear PSO algorithm was proposed to solve the crosshole seismic travel-time tomography problem. The tests with free-noise and noisy synthetic models and a real data set showed that the global optimization PSO approach yielded a high resolution solution. Moreover, the inversion results of noise-free synthetic data with the local optimization method of Levenberg-Marquart showed that the final model of local search approaches was sensitive to starting model.

---

Archive of SID