

## مقایسه روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات در وارون‌سازی امواج ری‌لی جهت مدلسازی پروفیل سرعت موج برشی: مطالعه موردی

راشد پورمیرزائی\*

استادیار گروه مهندسی معدن و مواد دانشگاه صنعتی ارومیه  
(دریافت: آبان ۱۳۹۵، پذیرش: دی ۱۳۹۶)

### چکیده

سرعت موج برشی یکی از شاخص‌های بسیار مهم در معرفی اثر ساختگاه و تخمین مقدار جنبش زمین در زمین لرزه‌ها است. امروزه کاملاً روشن است که بهترین روش برای کاهش خسارت‌های ناشی از زمین لرزه، طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زمین لرزه، بر اساس ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی و ژئوتکنیکی ساختگاه و نوع کاربری آنها است. در سال‌های اخیر امواج میکروترمور برای مدلسازی سرعت موج برشی، به دلیل هزینه پایین و سرعت بالای برداشت داده‌ها مورد استقبال قرار گرفته است. اما مشکل اساسی در پردازش این داده‌ها، وارون‌سازی منحنی پاشش برای تخمین سرعت امواج برشی است. امواج پاشش دارای رفتار غیرخطی بوده و الگوریتم‌های خطی موجود در حل آنها دچار ضعف هستند. در مقاله حاضر سعی شده است با پیشنهاد وارون‌سازی امواج میکروترمور شکست مرزی (امواج ری‌لی) با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی کلی یک روش تخمین سرعت موج برشی ارائه شود. در این مطالعه از دو روش الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات به عنوان روش‌های جدید در وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی استفاده شده است. برنامه الگوریتم‌های مذکور در محیط متلب نوشته شده است. روش‌های پیشنهاد شده در ابتدا به وسیله مدل‌های مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفت و در ادامه برای ارزیابی بیشتر روی داده‌های تجربی اعمال شد. بدین منظور یک ایستگاه در جنوب شهر تبریز، طراحی و برداشت شد. نتایج وارون‌سازی به دست آمده، در مورد مدل‌های مصنوعی و هم داده‌های تجربی بیانگر عملکرد قابل قبول الگوریتم‌های پیشنهاد شده، به عنوان روش‌های مؤثر در وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی است. همچنین با توجه به مقایسه نتایج حاصل شده دیده شد، روش گروه ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از کارایی و سرعت بالاتری برخوردار است.

### کلید واژه‌ها

وارون‌سازی، امواج ری‌لی، الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات، آرایش ونر

\*عهده دار مکاتبات: [rashed.poormirzaee@gmail.com](mailto:rashed.poormirzaee@gmail.com)

## ۱- مقدمه

اثر ساختگاه به عنوان یکی از مهم‌ترین جنبه‌های ارزیابی تحلیل خطر لرزه‌ای به شمار می‌آید. با شناخت اثر ساختگاه می‌توان طراحی‌های شهرسازی و ساخت سازه‌های ویژه را با کم‌ترین آسیب‌پذیری ممکن انجام داد. شرایط محلی ساختگاه بر کلیه خصوصیات مهم جنبش نیرومند زمین، شامل دامنه، محتوای فرکانسی و دوام اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد [۱]. این مطالعات را می‌توان توسط روش‌های تجربی و یا تئوری انجام داد. از جمله روش‌های کارآمد در این مطالعات استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی است که سهم عمده‌ای از این دسته مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. روش‌های ژئوفیزیک کلاسیک به دلایل مختلف دارای محدودیت‌هایی است که با پیشرفت‌های اخیر، روش‌هایی برای رفع این محدودیت‌ها انجام گرفته است. از جمله روش‌های کارآمد در این مطالعات می‌توان از روش‌های لرزه‌ای شکست مرزی، آنالیز طیفی امواج سطحی (Spectral analysis of surface wave) و آنالیز چند کاناله امواج سطحی (Multi-channel analysis of surface wave) نام برد. اما بیشتر روش‌های ژئوفیزیک به دلایل مختلف دارای محدودیت‌هایی مانند عدم کاربرد آنها در محیط‌های شهری و سایر محیط‌ها به دلیل وجود نوفه زیاد و یا هزینه‌های بالا است. اما با پیشرفت‌های اخیر، روش‌هایی برای رفع این محدودیت‌ها انجام شده است. از جمله روش‌های نوین می‌توان به داده‌های میکروترمور اشاره نمود که با توجه به دقت نسبی و سرعت آن بسیار حائز اهمیت هستند [۲، ۳]. با استفاده از این روش و با آرایه‌های مناسب می‌توان چشمه‌های لرزه‌ای همانند گسل‌ها را که در بسیاری موارد در حوضه‌های آبرفتی (محل احداث بیشتر شهرها) پنهان هستند، تشخیص داد. روش میکروترمور شکست مرزی (Refraction microtremor, ReMi) که توسط لویی (Louie) [۴] ارائه شده است در سال‌های گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته که یک روش آسان، کم هزینه و عملی (به دلیل عدم نیازمندی به منبع انفجار) برای استفاده در شهرها است [۵، ۶]. در بیشتر مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌ای شهرها به دلیل هزینه بالای برداشت داده‌ها و یا مساعد نبودن محیط برای برداشت داده‌ها (به دلیل نوفه و یا تأسیسات شهری)، با نقص همراه است. اما

روش رمی (ReMi)، یک روش مناسب برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی است که با استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار انکساری و با گیرنده‌های معمولی برداشت می‌گردد. اما، از مهم‌ترین مشکلات این داده‌ها، مانند سایر روش‌های مبتنی بر امواج سطحی، عدم وجود یک جواب یکتا در وارون‌سازی منحنی پاشش است [۷-۹].

بیشتر روش‌های وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی بر اساس راهکارهای خطی برای تخمین پارامترهای مدل هستند. بدین صورت که از یک الگوریتم بهینه‌سازی محلی (Local optimization) برای بهبود مدل اولیه که توسط کارشناس تعریف می‌گردد، استفاده می‌شود. این تخمین‌ها در تکرارهای معین محاسبه می‌شوند و تخمین با کم‌ترین مقدار هدف (تابع خطا) به عنوان حل نهایی معرفی می‌گردد [۱۰]. در این روش‌ها، حل‌ها ممکن است در کمینه‌های محلی افتاده و این نقاط به عنوان حل‌های نهایی معرفی گردند. در نتیجه موفقیت این روش‌ها به مدل اولیه، که چه مقدار به حل واقعی نزدیک باشد، وابسته است. اما روش‌های بهینه‌سازی کلی (Global optimization) این قابلیت را دارند که حل‌هایی مستقل از مدل اولیه تولید نمایند و فضای جستجو را به صورت جامع بررسی و حل واقعی یا بهینه کلی را ارائه نمایند [۱۱، ۱۲]. بنابراین با یافتن بهینه کلی تابع خطا، بهترین جواب ممکن به دست خواهد آمد. همراه با پیشرفت علوم کامپیوتر و توسعه الگوریتم‌های موجود در زمینه بهینه‌سازی، ابهام و عدم یکتایی جواب در بسیاری از مسائل مهندسی نیز رو به کاهش بوده است. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی مسائل مهندسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. که الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات از جمله روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری هستند که در زمینه‌های مختلفی از علوم به کار برده شده است.

در این مطالعه سعی شد برای تخمین صحیح سرعت موج برشی از نمودار پاشش امواج ری‌لی، از روش وارون‌سازی الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات، به عنوان روش‌های بهینه‌سازی کلی، استفاده شود. ابتدا الگوریتم پیشنهاد شده برای وارون‌سازی داده‌های میکروترمور در نرم‌افزار متلب نوشته شد و سپس به وسیله مدل‌های مصنوعی و داده‌های واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های تجربی در یک ایستگاه در جنوب تبریز، برداشت شد. شناخت صحیح ویژگی‌های سرعتی در این ایستگاه

فضای جستجو در مسائل بهینه‌سازی عبارت از تمامی جواب‌های ممکن برای مسئله مورد بررسی است. برای حل مسئله معمولاً جواب‌هایی جستجو می‌شود که بهترین جواب در میان مجموعه جواب‌های موجود باشد. هر نقطه از فضای جستجو، یک جواب ممکن را نشان می‌دهد و هر جواب را می‌توان بر اساس ارزش یا مطلوبیتش رتبه‌بندی کرد. هدف از پیدا کردن جواب قابل قبول، پیدا کردن حدود نهایی تابع مطلوب (مقدار کمینه یا بیشینه) در فضای جستجو است. در مسائل بهینه‌سازی معمولاً مطلوبیت تعداد نقاط کمی از فضای جستجو مشخص است و سعی می‌شود از طریق ایجاد نقاط جدید، یافتن جواب‌ها تا رسیدن به جواب بهینه ادامه یابد.

مشکل اصلی در این روش از بهینه‌سازی این است که جستجو می‌تواند خیلی پیچیده باشد. به بیان دیگر در بیشتر مسائل نمی‌توان مشخص کرد که باید در چه قسمت‌هایی از فضا جواب را جستجو کرد و اصولاً از چه نقطه‌ای شروع به جستجو کرد. روش‌های بهینه‌سازی متعددی برای پیدا کردن جواب بهینه وجود دارند. بنابراین برای پیدا کردن چنین جواب بهینه‌ای با صرف زمان و هزینه کمتر، روش‌های بهینه‌سازی کلی که به عنوان روش‌های فراابتکاری نیز شناخته شده هستند، انتخاب می‌شود. روش‌های فراابتکاری (Metaheuristic) معمولاً راهکارهای سطح بالایی هستند که یک یا چند روش ابتکاری که به مسئله وابسته هستند را راهنمایی نموده تا کیفیت عملکرد آنها را افزایش دهند. هدف اصلی روش‌های فراابتکاری جلوگیری از معایب بهبود تکراری و به طور ویژه، جلوگیری از افتادن در تله بهینه‌های محلی هستند. فرار از بهینه‌های محلی از طریق تولید جواب‌های برتر و یا تولید هوشمندانه جواب‌های جدید با استفاده از جواب‌های قبلی است. بسیاری از روش‌های فراابتکاری بر مبنای تصمیماتی هستند که به صورت تصادفی اخذ می‌شوند، با این تفاوت که بر خلاف روش‌های تصادفی محض، عنصر تصادفی بودن به صورت کورکورانه مورد استفاده قرار نگرفته و به صورت هوشمندانه‌ای در الگوریتم به کار گرفته می‌شود [۱۴]. مشخصه‌های عمده یک روش فراابتکاری را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

➤ روش‌های فراابتکاری راهکارهایی هستند که فرآیند جستجو را هدایت می‌کنند.

می‌تواند کمک ارزشمندی در مطالعه ویژگی‌های سرعتی آبرفت شهر تبریز در سایر مناطق تبریز نماید. چرا که آبرفت شهر تبریز از فرسایش مناطق در برگیرنده در این ایستگاه، تشکیل شده است.

## ۲- وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از روش‌های فراابتکاری

در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی، مقادیر خطا به شکل تابعی از پارامترهای مدل هستند که توسط عدم تطابق بین داده‌های تخمینی ( $d_i^{pre}$ ) و مشاهده‌ای ( $d_i^{obs}$ ) تعریف می‌شود (رابطه ۱).

$$e_i = d_i^{obs} - d_i^{pre} \quad (1)$$

این تابع خطا می‌تواند بسیار پیچیده و شامل چندین مقدار کمینه و بیشینه باشد. کوچک‌ترین این کمینه‌ها را کمینه کلی و تمامی کمینه‌های دیگر را کمینه محلی می‌نامند. برای به دست آوردن کمینه کلی از شاخه‌ای از ریاضیات که بهینه‌سازی نامیده می‌شود استفاده می‌گردد [۱۳]. بهینه‌سازهای محلی و الگوریتم‌های جستجو مانند روش‌های گرادیان نزولی، معمولاً سعی در پیدا کردن یک کمینه محلی در نزدیکی نقطه شروع دارند. تقریباً همه روش‌های جستجوی محلی، الگوریتم‌های قطعی هستند. این الگوریتم‌ها هنگامی که نقطه شروع نزدیک به یکی از کمینه‌های محلی است، در یافتن کمینه کلی موفق نخواهند بود. با توجه به ظهور رایانه‌های سریع و قوی، روش‌های بهینه‌سازی کلی در بسیاری از مسائل ژئوفیزیک کاربرد پیدا کرده‌اند. بر خلاف روش‌های بهینه‌سازی محلی، این روش‌ها سعی در پیدا کردن کمینه کلی تابع خطا دارند. اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلی دارای ماهیت آماری هستند و از اطلاعات عمومی‌تری از سطح خطا برای به روز کردن موقعیت جاری خودشان (در فضای خطا) استفاده می‌کنند. البته در این روش‌ها رسیدن به یک جواب بهینه کلی تضمین نمی‌شود. همچنین با داده‌های مشاهده‌ای واقعی، هیچ‌گاه امکان پذیر نیست که بتوان فهمید آیا جواب به دست آمده منطبق بر کمینه کلی هست یا خیر. با این وجود آزمایش‌های انجام شده مؤید این مطلب است که حتی با مدل‌های اولیه ضعیف نیز روش‌های کلی توانایی رسیدن به بسیاری از جواب‌های خوب را دارند [۱۴].

البته محدوده تعریف شده برای نسبت پواسون با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و اطلاعات کمکی قابل تغییر و تنظیم است. به طور مثال در صورتی که لایه‌های زمین‌شناسی نزدیک سطح تحکیم یافته‌تر باشند حد بالایی محدوده پواسون و نیز محدوده بالایی رابطه (۳) کاهش خواهد یافت.

برای هر مدل تولید شده نسبت  $\frac{v_p}{v_s}$  مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورتی که در محدوده تعریف شده قرار نداشته باشد تخمین این دو سرعت برای مدل مذکور تکرار می‌شود. همچنین برای تخمین چگالی می‌توان از رابطه (۴) استفاده نمود. با توجه به مطالعات انجام یافته چگالی تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی نمودار پاشش ندارد.

$$\rho = \log(0/23 + (kvp)^{0/25}) \quad (4)$$

که در رابطه (۴)  $K = \frac{1}{(0/3048)}$ ، یک مقدار ثابت برای تبدیل فوت به متر است [۱۶]. برای وارون‌سازی خطای جذر میانگین مربع به عنوان تابع هدف (OBF) در نظر گرفته شد (رابطه ۵).

$$OBF = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_p} (v_{obs} - v_{cal})^2}{n_p}} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $n_p$  تعداد نمونه‌ها،  $v_{obs}$  سرعت فاز مشاهده شده و  $v_{cal}$  سرعت فاز محاسبه شده است. به منظور حل مدل پیشرو و تخمین نمودار پاشش تئوری از کد ارائه شده توسط هرمن (Herrmann) [۱۷]، که بر اساس الگوریتم ماتریسی است، استفاده شد.

### ۳-۱- الگوریتم ژنتیک

در میان روش‌های بهینه‌ساز الهام گرفته شده از طبیعت جانداران، الگوریتم ژنتیک (genetic algorithm) از تکامل یافته‌ترین‌ها به شمار می‌رود. مفاهیم اولیه الگوریتم ژنتیک (GA) به وسیله هولاند (Holland) و همکارانش در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی بیان شد و سپس توسعه یافت [۱۸]. الگوریتم ژنتیک از تئوری تکامل الهام گرفته شده است که منشأ و اصل بشر را بیان می‌کند.

در الگوریتم ژنتیک یک بردار حل  $x \in X$  یک فرد و یا یک کروموزوم گفته می‌شود. کروموزوم‌ها از واحدهای گسسته‌ای تشکیل شده‌اند که ژن نامیده می‌شوند. هر ژن فرض می‌شود که به صورت ارقام دودویی است. اساساً هر کروموزوم در ارتباط با یک حل یکتا در فضای هدف است.

➤ هدف از این روش‌ها، جستجوی مؤثر فضای جستجو به گونه‌ای است که بتوان به جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه دست یافت.

➤ راهکارهایی که در این روش‌ها استفاده می‌شوند دامنه وسیعی از روش‌ها (از یک روش جستجوی محلی ساده تا فرآیندهای یادگیری پیچیده) را شامل می‌شوند.

➤ روش‌های فراابتکاری عموماً غیرقطعی و تقریبی هستند.

➤ این روش‌ها ممکن است فرآیندهایی را برای رهایی از فضاهای محدودکننده جواب به کار بگیرند.

در بیشتر این روش‌ها به نحوی از تجربه‌های قبلی (نوعی حافظه جستجو) برای هدایت کردن جستجو استفاده می‌نمایند [۱۵، ۱۴، ۱۲].

### ۳- وارون‌سازی امواج پاشش ری‌لی

شناخت پارامترهای تاثیرگذار در نمودار پاشش ری‌لی جهت طراحی هرچه بهتر الگوریتم بسیار مؤثر است. مهمترین پارامترهایی که بر نمودار پاشش یا حرکت امواج ری‌لی تأثیر می‌گذارند عبارتند از سرعت امواج برشی، ضخامت لایه‌ها، چگالی و سرعت امواج طولی در بین پارامترهای مذکور، سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را دارند [۴]. در وارون‌سازی نمودار پاشش امواج ری‌لی تصمیم گرفته شد هر دو پارامتر سرعت برشی و سرعت طولی برای تغییر و اختیار سرعت در فضای جستجو به صورت آزاد تغییر کنند که این دو پارامتر توسط نسبت پواسون کنترل می‌شود.

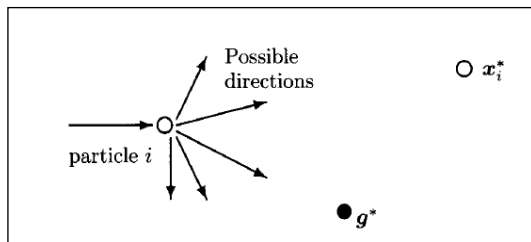
در مطالعه حاضر یک محدوده کلی برای نسبت سرعت طولی به سرعت برشی با توجه به رابطه (۲) در نظر گرفته شد:

$$v_p = v_s \left( \frac{\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{1/2-\sigma}} \right) \quad (2)$$

سپس نسبت پواسون برابر با مقدار (۰/۴۸، ۰/۱) در نظر گرفته شد، که رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) قابل بیان است:

$$1/5 < \frac{v_p}{v_s} < 6 \quad (3)$$

این الگوریتم فضای تابع هدف را با تنظیم خط سیر ارگان‌های مجزا، که ذرات نامیده می‌شوند، جستجو می‌کند، که این خط‌سیرها به شکل مسیرهایی تکه تکه (پاره‌خط) و شبه تصادفی هستند. حرکت گروهی ذرات شامل دو مؤلفه اصلی است. هر ذره به سمت بهترین مکان ( $g^*$ ) شناسایی شده در بین کل تجربه‌های ثبت شده و بهترین محل ( $x_i^*$ ) شناسایی شده توسط هر ذره، در زمان جذب می‌شود، در حالی که در همان زمان تمایل به حرکت تصادفی دارد. وقتی ذره‌ای محلی را که بهتر از هر محل پیدا شده قبلی است را پیدا می‌کند، سپس به عنوان جریان جدید بهترین برای ذره  $i$  به روز می‌شود. یک جریان بهترین برای تمام  $n$  ذره در هر زمان  $t$  در خلال تکرارها وجود دارد. هدف یافتن بهترین ذره در میان تمام جریان‌ها، تا زمانی که هدف دیگر بعد از تعداد خاصی تکرار بهبود نمی‌یابد، است. حرکت ذره به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۴].



شکل ۱: نمایش تصویری حرکت ذره در PSO. حرکت به سمت  $g^*$  و  $x_i^*$  برای هر ذره [14]  $i$

در سال‌های اخیر الگوریتم گروه ذرات که یکی از روش‌های بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات است، در زمینه‌های مختلفی از علوم به کار برده شده است. این روش بهینه‌سازی یک روش جدید و قوی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص به کارگیری این روش در وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی به کار رفته است که می‌توان به مراجع [۱۵، ۲۱، ۲۰] اشاره کرد.

### ۳-۳- وارون‌سازی داده‌های میکروترنور شکست مرزی (مدل مصنوعی)

برای ارزیابی الگوریتم‌های وارون‌سازی پیشنهاد شده در این مطالعه دو مدل مصنوعی مورد مطالعه قرار گرفت (مدل A و B). امواج پاشش تولید شده برای مدل‌های مورد بررسی در این بخش با فرض یک آرایش خطی با ۱۲ گیرنده (۴/۵ هرتز) که با فواصل ۴ متر قرار گرفته اند ایجاد شده است. برای مدلسازی مستقیم دو روش کلی روش ماتریس

این فرآیند نیازمند یک مکانیزم به نقش درآوردن است که رمزگذاری (coding) نامیده می‌شود [۱۴].

در حقیقت الگوریتم ژنتیک روی رمزگذاری مسائل کار می‌کند نه روی خود مسئله. الگوریتم ژنتیک روی یک مجموعه از کروموزوم‌ها عملیات انجام می‌دهد که جمعیت نامیده می‌شود. جمعیت در ابتدا به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. همان طور که جستجو شروع می‌شود جمعیت دربرگیرنده، به حل‌های بهتر (مناسب‌تر) همگرا می‌شود به این معنی که به یک حل منفرد می‌رسد [۱۸].

الگوریتم ژنتیک از دو عملگر برای تولید حل‌های جدید از جمعیت موجود استفاده می‌کند که عبارتند از پیوند (crossover) و جهش (mutation). پیوند مهم‌ترین عملگر در الگوریتم ژنتیک است. در عملیات پیوند دو کروموزوم، که پدر و مادر نامیده می‌شوند، با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا یک کروموزوم جدید که فرزند نامیده می‌شود، ایجاد شود. پدر و مادر از کروموزوم‌های موجود، با توجه به اولویت‌های شایستگی انتخاب می‌شوند. جهش فرآیندی می‌باشد که سبب ایجاد تغییرات تصادفی در ویژگی‌های کروموزوم‌ها می‌شود. جهش معمولاً در سطح ژن‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین پیوند جمعیت را با شبیه‌سازی کروموزوم‌ها به سمت همگرایی هدایت می‌کند اما جهش تنوع ژن‌ها را به جمعیت بر می‌گرداند و به این وسیله کمک می‌کند تا جستجو از یک بهینه محلی فاصله گیرد.

### ۳-۲- روش بهینه‌سازی گروه ذرات

بهینه‌سازی گروه ذرات توسط کندی (Kennedy) و ابرهارت (Eberhart) [۱۹] توسعه داده شد. بهینه‌سازی گروه ذرات (Particle swarm optimization) یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته شده از هوش گروه ماهی‌ها و پرندگان و حتی رفتارهای انسانی است. تعدادی الگوریتم مانند الگوریتم کلونی مورچه از رفتاری که اصطلاحاً هوش گروهی نامیده می‌شود، تبعیت می‌کنند. الگوریتم گروه ذرات برخی (PSO) شباهت‌ها با الگوریتم ژنتیک و مورچه دارد ولی از آنها ساده‌تر است زیرا از عملگرهای تلاقی، جهش یا فرمون استفاده نمی‌کند و به جای آن از اتفاقی بودن اعداد حقیقی و ارتباط عمومی بین گروه ذرات استفاده می‌کند. بدین ترتیب چون رمزگذاری و رمزگشایی پارامترها در رشته‌های دودویی وجود ندارد، اجرای آن هم راحت‌تر است.

حرکت به یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول با پارامتر  $z$  کاهش می‌یابد. در حالتی که با یک مجموعه لایه‌های افقی مواجه باشیم، این مسئله می‌تواند توسط روش ماتریس انتشار دهنده حل شود [۲۴].

مدل اول (مدل A)، یک مدل ساده، از یک لایه بر روی نیم فضا تشکیل شده است (که یک مدل دولا لایه نامیده می‌شود). جدول ۱ بیانگر پارامترهای این مدل بوده و فضای جستجو الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد. در جدول ۲ و شکل ۲ نتایج وارون‌سازی با الگوریتم‌های مورد نظر بیان شده است. به منظور ارزیابی بهتر الگوریتم‌های پیشنهاد شده، مدل B با تعداد لایه‌های بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۳). که نتایج وارون‌سازی برای این مدل در جدول ۴ و شکل ۳ نشان داده شده است.

انتشار دهنده (مانند ماتریس انتقال یا ماتریس سختی) و روش‌های عددی (مانند المان محدود یا تفاضل محدود) [۲۲] وجود دارد. برای تحلیل پاشش امواج، استفاده از روش‌های ماتریسی برای محیط‌های لایه‌ای کشسان بر روش‌های دیگر برتری دارد. در روش ماتریسی برای محیط‌های لایه‌ای، شرایط مرزی مربوط به مرزهای مختلف به یکدیگر مرتبط می‌شوند و رابطه‌ای برای محاسبه پاشش مشاهده می‌شود که همزمان با پیچیده‌تر شدن ساختار زمین، نمودارهای پاشش نیز پیچیده‌تر می‌شوند و بر نوسانات مدهای مختلف افزوده می‌شود. در این مطالعه از کد هرمن برای مدل مستقیم استفاده شد. در دستورالعمل هرمن اغلب به همان روش دانکین (Dunkin) [۲۳]، برای امواج ری‌لی و لاو استفاده شده است. در این حالت معادله

جدول ۱: پارامترهای مدل A و فضای جستجو برای آن

شماره لایه	Vp(m/s)	Vs(m/s)	H(m)	فضای جستجو	
				Vs(m/s)	H(m)
۱	۴۰۰	۲۰۰	۸	۳۰۰-۱۰۰	۴-۱۲
۲	۶۰۰	۴۰۰	نیم فضا	۶۰۰-۲۰۰	-

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی مدل A با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی GA و PSO

پارامترها	مدل A	GA	PSO
Vs1(m/s)	۲۰۰	۱۹۷	۱۹۹
Vs2(m/s)	۴۰۰	۳۹۹	۴۰۸
H1(m)	۸	۷/۸	۷/۹

جدول ۳: پارامترهای مدل B و فضای جستجو برای آن

شماره لایه	Vp(m/s)	Vs(m/s)	H(m)	فضای جستجو	
				Vs(m/s)	H(m)
۱	۶۶۳	۲۰۰	۴	۱۰۰-۳۰۰	۲-۶
۲	۹۹۵	۳۰۰	۲	۱۵۰-۴۵۰	۱-۳
۳	۱۳۲۷	۴۰۰	۶	۲۰۰-۶۰۰	۳-۹
۴	۱۶۵۸	۵۰۰	نیم فضا	۲۵۰-۷۵۰	-

جدول ۴: مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی مدل B با استفاده از GA و PSO

پارامترها	مدل B	GA	PSO
Vs1(m/s)	۲۰۰	۲۰۷	۲۰۴
Vs2(m/s)	۳۰۰	۳۳۵	۲۸۹
Vs3(m/s)	۴۰۰	۳۸۸	۳۸۶
Vs4(m/s)	۵۰۰	۵۱۲	۴۹۲
H1(m)	۴	۳/۸	۳/۸
H2(m)	۲	۱/۸	۲/۲
H3(m)	۶	۶/۳	۶/۱

می‌شود. ذرات در اینجا بردارهایی هستند که طول آنها متناسب با تعداد متغیرهای مسئله است. که در اینجا منظور از متغیر سرعت برشی، ضخامت و سرعت طولی است.

#### گام دوم، یافتن $X_i^*$ و $g^*$ :

در این مرحله مقدار ارزش یا خطا برای هر ذره با استفاده از معادلات حاکم بر الگوریتم PSO محاسبه می‌شود. پس از مقایسه مقادیر خطای ذرات، ذره با کمترین خطا به عنوان  $g^*$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین با مقایسه مقادیر خطای هر ذره در هر تکرار با مقادیر قبلی آن، بهترین مقدار به عنوان  $X_i^*$  در نظر گرفته می‌شود.

#### گام سوم، تکرار مرحله‌های زیر برای کل ذرات

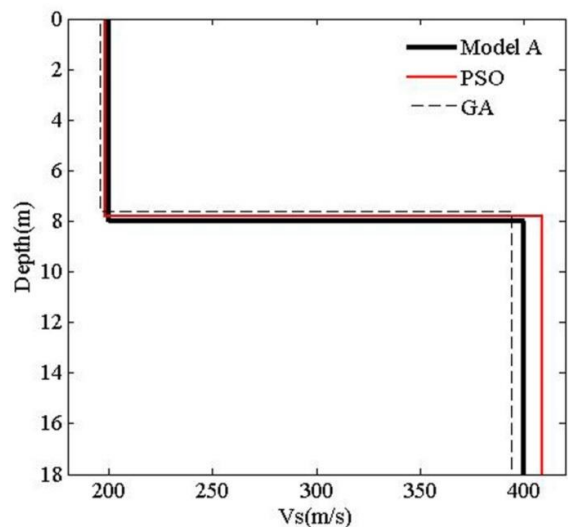
- به روز رسانی سرعت هر ذره
- به روز رسانی موقعیت هر ذره
- برای مقادیر جدید ذرات مقادیر  $X_i^*$  و  $g^*$  مشابه گام دوم یافت می‌شود.

#### گام چهارم، پایان تکرار

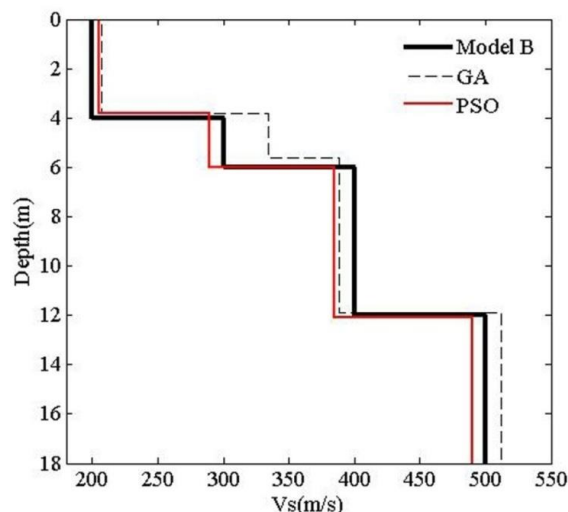
#### گام پنجم، ارائه حل نهایی یا $g^*$

### ۳-۴- وارون‌سازی داده‌های تجربی

پس از ارزیابی الگوریتم‌های پیشنهاد شده روی مدل‌های مصنوعی، در این بخش به وسیله داده‌های تجربی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بخش یک نقطه از شهر تبریز مورد مطالعه قرار گرفت. موقعیت این نقطه (ایستگاه شماره ۱) روی نقشه ماهواره‌ای گوگل مشخص شده است (شکل ۴). در این نقطه داده ReMi برداشت شد. همچنین داده‌های مقاومت ویژه (آرایش ونر) به عنوان داده‌های کمکی در تشخیص و تعیین محدوده‌های جستجو الگوریتم و نیز ارائه اطلاعاتی در خصوص وضعیت لایه‌های زیرین و جنس این لایه به کار برده شد (شکل ۵). پردازش داده‌ای میکروترنومر شامل سه مرحله اصلی: (۱) تشخیص امواج سطحی، (۲) استخراج نمودار پاشش و (۳) وارون‌سازی امواج پاشش (تخمین پروفیل سرعت موج برشی) است. برای پردازش داده‌ها (به دست آوردن نمودار پاشش و مقاومت ویژه) از نرم‌افزارهای تجاری موجود SeisImager/SW و Res2Dinv [۲۵، ۲۶] استفاده شد. این ایستگاه در مجاورت جاده ائل‌گلی (داخل محوطه اداره آب منطقه ۴) قرار دارد. بر اساس گزارش حفاری‌های



شکل ۲: پروفیل سرعت موج برشی تخمینی مدل A با استفاده از وارون‌سازی PSO و GA



شکل ۳: پروفیل سرعت موج برشی تخمینی مدل B با استفاده از وارون‌سازی PSO و GA

در استفاده از الگوریتم PSO در این بخش، با تکرار چندین باره وارون‌سازی با تعداد ذرات و نیز تعداد تکرار مختلف، بهینه تعداد ذرات ۶۰ و تعداد تکرار ۵۰ در نظر گرفته شد. همچنین برای وارون‌سازی با الگوریتم ژنتیک از تعداد جمعیت و نیز تعداد تکرار برابر ۵۰ استفاده شد. وارون‌سازی امواج سطحی، توسط دو روش تحت گام‌های زیر انجام گرفت (که در زیر الگوریتم PSO توضیح داده شده است).

#### گام اول، مقداردهی اولیه به موقعیت و سرعت ذرات:

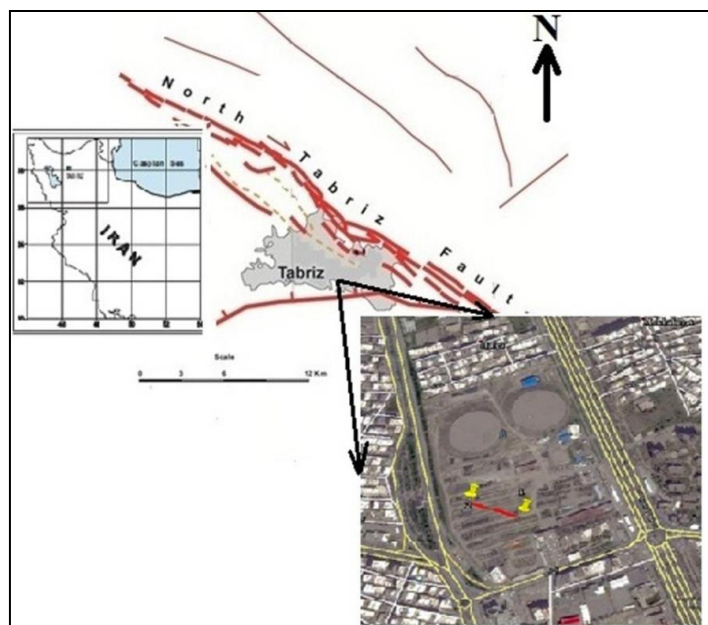
در این مرحله به طور تصادفی در محدوده تعریف شده برای موقعیت هر ذره و سرعت آن مقادیر نسبت داده

۱۰ متر انجام شد (شکل ۶). همچنین برای جمع‌آوری داده‌های مقاومت ویژه از دستگاه ژئوالکتریک RESECS استفاده شد. پس از برداشت داده‌ها و پردازش آنها نمودار پاشش به دست آمد (شکل ۷). که نمودار پاشش محاسبه شده به صورت یک فایل متنی، که شامل کندی و فرکانس است در برنامه‌های وارون‌سازی نوشته شده، مورد استفاده قرار گرفت.

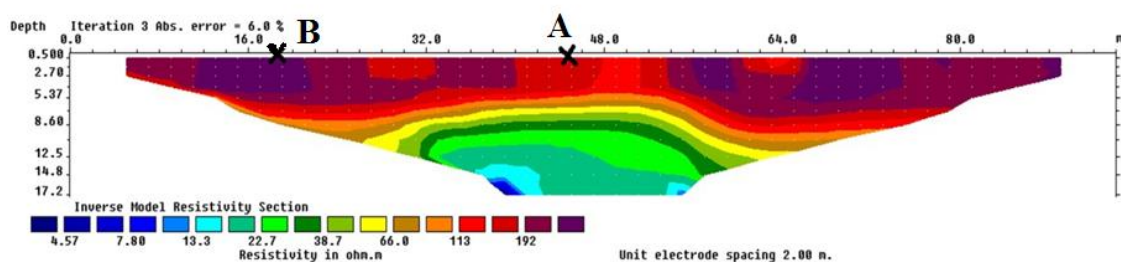
در ادامه برای وارون‌سازی داده‌های برداشت شده، مطابق با وارون‌سازی داده‌های مصنوعی یک فضای جستجو با توجه به اطلاعات اولیه در نظر گرفته شد (جدول ۵). نتایج وارون‌سازی نقطه مورد مطالعه در جدول ۵ و شکل ۸ نشان داده شده است.

موجود در مطالعات صورت گرفته برای خط یک مترو تبریز، عمق سنگ بستر در جاده ائل‌گلی در حدود ۱۰ متر و عمق آب‌های زیرزمینی در حدود ۸ متر است.

ناحیه ائل‌گلی تبریز و به طور کلی نیمه جنوبی تبریز بر روی لایه‌های آذر آواری سپند ساخته شده است این لایه‌ها بیشتر توف، خاکستر و برش آتشفشانی هستند. البته یک ضخامت کم از مواد رسوبی کواترنری که خود حاصل فرسایش و حمل این سنگ‌های بستر به گونه مخروط افکنه و تراس‌های رودخانه‌ای است بر روی این لایه‌ها دیده می‌شود [۲۷، ۲۸]. در نقطه مورد مطالعه داده میکروترمور شکست مرزی در ۱۷ ثانیه و با ۱۵ رکورد با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار OYO با ۱۲ گیرنده ۴/۵ هرتز، با فواصل

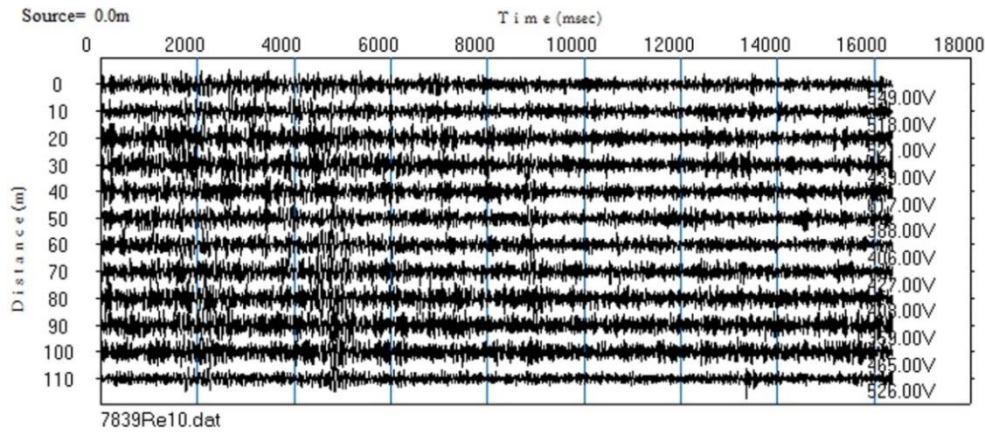


شکل ۴: موقعیت شهر تبریز و ایستگاه مورد مطالعه

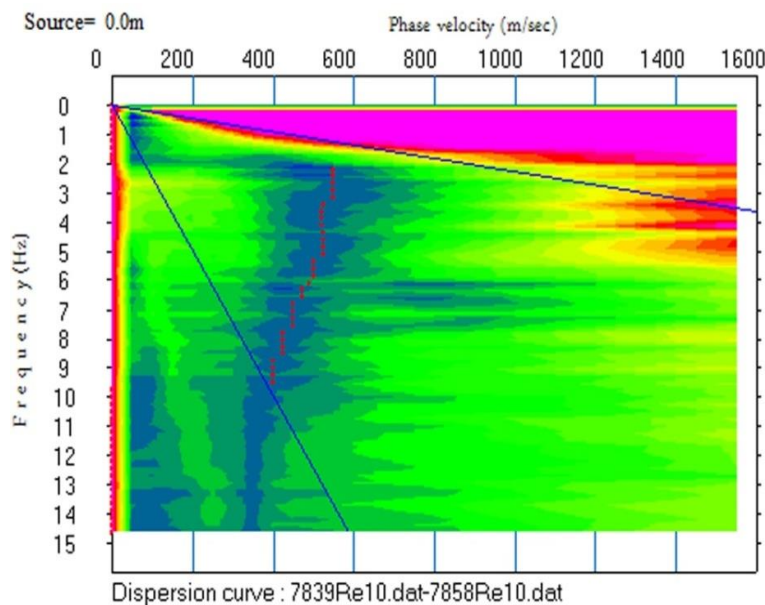


شکل ۵: مقطع مقاومت ویژه در ایستگاه شماره ۱ (A نقطه میانی پروفیل مورد مطالعه در ایستگاه شماره ۱)





شکل ۶: امواج میکروترمور ثبت شده در ایستگاه شماره ۱ (مربوط به نقطه A)



شکل ۷: نمودار پاشش (نقاط)، با انتخاب بیشینه دامنه در نمودار سرعت‌فاز - فرکانس (مربوط به نقطه A)

جدول ۵: نتایج وارون‌سازی GA و وارون‌سازی PSO مربوط به ایستگاه شماره ۱ و فضای جستجو آن

پارامترها	فضای جستجو	PSO	GA
H1(m)	۳-۱۲	۸/۶	۱۱
H2(m)	۲-۸	۷/۵	۶/۷
Vp1(m/s)	۴۰۰-۶۰۰	۵۷۴	۶۰۰
Vp2(m/s)	۵۰۰-۱۰۰۰	۶۴۵	۹۰۸
Vp3(m/s)	۹۰۰-۲۳۰۰	۲۱۱۵	۲۲۰۰
Vs1(m/s)	۲۵۰-۴۰۰	۳۸۵	۴۰۰
Vs2(m/s)	۲۰۰-۴۵۰	۲۷۸	۳۷۶
Vs3(m/s)	۴۰۰-۶۵۰	۵۸۶	۵۹۴

تعداد ایستگاه‌های برداشتی می‌شود. روش‌های لرزه‌ای بر مبنای امواج سطحی ری‌لی نظیر میکروترمور شکست مرزی می‌تواند یک روش آسان، سریع و کم هزینه برای مطالعات لرزه‌ای باشد. اما آنچه که تفسیر این داده‌ها را با مشکل

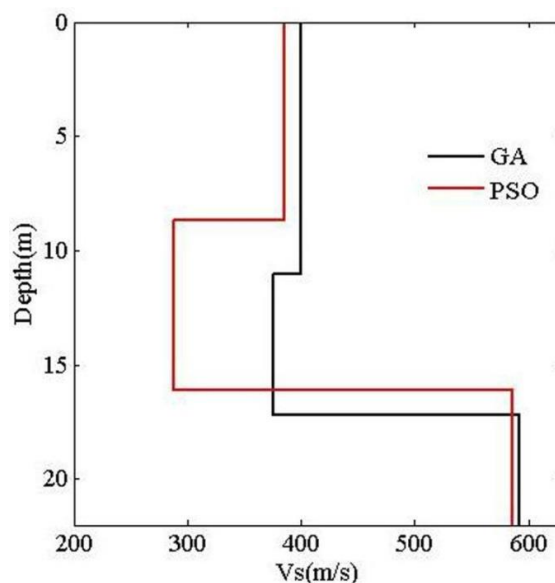
#### ۴- نتایج

یک عامل بسیار مهم در دقت پهنه‌بندی لرزه‌ای، تعداد ایستگاه‌های برداشتی است، اما هزینه بالای روش‌های درون چاهی و سایر روش‌های مرسوم ژئوفیزیکی سبب کاهش

در ادامه با الگوریتم‌های پیشنهاد شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در وارون‌سازی این ایستگاه از داده‌های مقاومت ویژه به عنوان اطلاعات کمکی استفاده شد. استفاده از اطلاعات مقاومت ویژه می‌تواند در کسب اطلاعات زیر سطحی نظیر عمق سنگ بستر و لایه‌بندی نواحی زیرین در تنظیم محدوده جستجو الگوریتم بسیار مفید و سبب کاهش ابهام در نتایج وارون‌سازی شود.

با توجه به نتایج حاصل از داده‌های لرزه‌ای اندازه‌گیری شده و تغییرات مقاومت ویژه در آن (شکل ۵)، سه لایه زمین‌شناسی را می‌توان از هم تفکیک نمود. لایه یا ناحیه اول با مقاومت ویژه بالا که تقریباً تا عمق ۶-۷ متری قرار دارد. این ناحیه می‌تواند همان بخش رسوبات آبرفتی که توصیف شد، نمایش دهد. در ناحیه زیرین نقطه B و نیز در حدفاصل ۶۰ تا ۸۰ متری پروفیل مقاومت ویژه نواحی با مقاومت بسیار بالا دیده می‌شود که می‌توان به عنوان ساخت‌های حفرشده و پر شده با رسوبات درشت در نظر داشت. لایه یا ناحیه دوم دارای مقاومت متوسط (بین ناحیه فوقانی با مقاومت بالا و ناحیه زیرین با مقاومت پایین) است. این ناحیه می‌تواند مواد آبرفتی تا حدی آبدار یا رسوبات دانه‌ریزتر در نظر گرفت (ناحیه دارای سرعت موج برشی نسبتاً پایین). اما نواحی زیرین یک روند کاهشی و یک کاهش مقاومت شدید را نشان می‌دهد، که بیانگر لایه‌ای توفی یا رسی است، که می‌توان سنگ بستر در نظر گرفته شود. عمق رسوبات در این ایستگاه کمتر از ۱۰ متر (حدود ۹ متر) تخمین زده می‌شود که ترکیبی از رس و ماسه است. بنابراین جهت وارون‌سازی یک مدل سه لایه در نظر گرفته شد. که نتایج با وارون‌سازی این دو الگوریتم نتایج با الگوی مشابهی را ارائه نمود که اطلاعات سرعتی به دست آمده در این ایستگاه همبستگی بسیار خوبی با اطلاعات زمین‌شناسی این منطقه دارد. با مقایسه نتایج کلی وارون‌سازی هم در خصوص مدل‌های مصنوعی و هم داده‌های واقعی برداشت شده، می‌توان بیان نمود که راهبرد وارون‌سازی با استفاده از روش‌های تصادفی هوشمند (روش‌های فراابتکاری) می‌تواند موجب کاهش خطر گیرافتادن در کمینه‌های محلی و در نتیجه تخمین‌های غیر واقع گردد. در مقایسه دو الگوریتم گروه ذرات و ژنتیک مشاهده شد که الگوریتم گروه ذرات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از دقت بالاتری برخوردار است و نیز بسبب سادگی

روبه‌رو کرده، وارون‌سازی امواج سطحی و در نتیجه ابهام در نتایج است. وارون‌سازی امواج سطحی با توجه به نوع معادله‌های حاکم بر حرکت آنها، دارای یک تابع هدف پیچیده و غیرخطی است. روش‌های وارون‌سازی مرسوم غالباً بر مبنای روش‌های خطی (گرادیان) بوده و وابستگی شدید به نقطه شروع جستجو، که توسط کارشناس مشخص می‌شود، دارد. در نتیجه این روش‌های وارون‌سازی در تخمین غیرصحیح و یافتن کمینه محلی بسیار محتمل هستند. در مقابل این روش‌ها، روش‌های بهینه‌سازی تصادفی که از یک استراتژی مشخص در مطالعه تابع هدف استفاده می‌کنند و در جستجوی فضای مورد هدف، وابسته به نقاط ابتدائی نیستند، از موفقیت بسیار خوبی برخوردار شده‌اند. استفاده از این روش‌ها در علوم مهندسی بسیار متداول شده است و در سال‌های اخیر در زمینه مطالعات ژئوفیزیکی مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۸: پروفیل سرعت موج برشی به دست آمده برای ایستگاه شماره ۱ (نقطه A) با دو روش مختلف وارون‌سازی GA و PSO

در این مطالعه دو الگوریتم گروه ذرات و ژنتیک در وارون‌سازی امواج ریلی میکروتومور شکست مرزی مورد ارزیابی قرار گرفت. الگوریتم‌های بالا در محیط MATLAB نوشته شد. سپس کارایی این دو الگوریتم در مورد داده‌های مصنوعی و واقعی مورد آزمون قرار گرفت. این دو روش پیشنهاد شده در وارون‌سازی امواج پانش مدل مصنوعی در تخمین ضخامت لایه و نیز سرعت برشی بسیار موفق و قابل قبول عمل کردند. داده‌های تجربی در این مطالعه در یک ایستگاه در جنوب تبریز برداشت شد و

Applications of hybrid genetic algorithms in seismic tomography, *J. of Applied Geophysics*, 75, 479–489.

[12] Sen, M. K. and Stoffa, P. L., (1995) *Global optimization methods in geophysical inversion*, Elsevier Science.

[13] Menke, W. (1989) *geophysical data analysis: discrete inverse theory*, international geophysics series, Dmowska.

[14] Yang, X.S., (2010) *Engineering Optimization: An Introduction with etaheuristic Applications*", Published by John Wiley & Sons, New Jersey.

[15] Poormirzaee, R., Hamidzadeh, R.M. and Zarean, A. (2014) *Inversion Seismic Refraction Data using Particle Swarm Optimization: a Case Study of Tabriz, Iran*, *Arabian Journal of Geosciences*, DOI: 10.1007/s12517-014-1662-x.

[16] Gardner, G.F., Gardner, L.W. and Gregory, A.R (1974) *Formation velocity and density the diagnostic basic for stratigraphic trap*, *Geophysics*, 39, page.770–780.

[17] Herrmann, R.B., (1987) *Computer Programs in Seismology, User's manual II*, St Louis University, Missouri, USA.

[18] Deb, K., Agrawal, S., Pratab, A. and Meyarivan, T., (2002) *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, *IEEE Transactions on evolutionary Computation*, 6, 182–197.

[19] Kennedy, J. and Eberhart, R.C., (1995) *Particle Swarm Optimization*, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks* (Perth, Australia), Piscataway, page.1942–1948.

[20] Naudet, V., Fernández Martínez, J. L., García Gonzalo, E. and Fernández, A., (2008) *Estimation of water table from self-potential data using particle swarm*, *Annual Meeting SEG*, page.1203–1207.

[21] Poormirzaee, R., (2016) *S-wave velocity profiling from refraction microtremor Rayleigh wave dispersion curves via PSO inversion algorithm*, *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (16), DOI: 10.1007/s12517-016-2701-6.

[22] Pei, D., J. N. Louie, and S. K. Pullammanappallil, (2007) *Application of simulated annealing inversion on high-frequency fundamental-mode Rayleigh wave dispersion curves*, *Geophysics*, 72, R77-R85.

[23] Aki, K. and P. G. Richards, (2002) *Quantitative seismology*, 2nd Edition, University Science Books, Sausalito, California.

الگوریتم و معادله‌های آن، دارای کاربرد آسان‌تر و سرعت همگرایی بیشتری است.

## مراجع

[1] Apostolidisa, P., Raptakis, D., Roumelioti, Z. and Pitolakis, K., (2004) *Determination of S-wave velocity structure using microtremors and SPAC method applied in Thessaloniki (Greece)*, *J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 49–67.

[2] Tokeshi, J.C., Karkee, M.B. and Sugimura, Y. (2006) *Reliability of 87ayleigh wave dispersion curve obtained from f-k spectral analysis of microtremor array measurement*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 163–174.

[3] Okada, H., (2006) *Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method*, *Exploration Geophysics*, 59, 73-85.

[4] Louie, J.N. (2001) *Faster, better: shear wave velocity to 100 meters depth from refraction Microtremor arrays*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 347–364.

[5] Rucker, M.L., (2003). *Applying the refraction microtremor (ReMi) shear wave technique to geotechnical characterization*. *Proc. In. Conf. of the third international conference on the application of geophysical methodologies and NDT to transportation and infrastructure (Florida)*, 8–12.

[6] Pullammanappallil, S., Honjas, B., Louie, J., and Siemens, J., (2003), *Miura, H., Comparative Study of the Refraction Microtremor Method: Using seismic noise and standard P-wave refraction equipment for deriving 1D shear-wave profiles*, 6th SEG-J International Symposium, Tokyo, Japan.

[7] DalMoro, G., (2010) *insights on surface wave dispersion and HVSR: Joint analysis via Pareto optimality*, *J. of Applied Geophysics*, 72, 129–140.

[8] Foti, S., (2010) *Surface Wave Testing for Geotechnical Characterization*, 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization Recife, Brazil.

[9] Kozlovskaya, E., (2001) *Theory and application of joint interpretation of multimethod geophysical data*, Ph.D. dissertation, Univ. of Oulu, Finland.

[10] Wathelet, M., (2005) *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*, Ph.D. Thesis in Universit\_e de Li\_ege Faculte des Sciences Appliquees.

[11] Soupios, P., Akca, I., Mpogiatis, P., Basokur, A.T. and Papazachos, C., (2011)

- [24] Dunkin, J. W., (1965) Computation of modal solutions in layered, elastic media at high frequencies. Bull. Seism. Soc. Am., 55, 335-358.
- [25] Res2Dinv for Windows XP/Vista/7 Manual, version 3.59, [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com) [2014, January 14].
- [26] SeisImager/SWTM Manual, Windows Software for Analysis of Surface Waves, Version 3.0, [www.geom.geometrics.com](http://www.geom.geometrics.com) [2014, February 5].
- [27] Faridi, M. and Khodabandelo, A., (2010) Geological map of Tabriz (1/25000), Geological survey of Iran (GSI).
- [28] Poormirzaee, R. and Moghadam, R.H., (2014) Determination of S-Wave structure via refraction microtremor technique in urban area: A case study, Journal of Tethys, 2 (4), 347-356.