

Surface-wave Inversion Using Metaheuristic Optimization Algorithm in Tabriz Land

Shahram Andardi

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Ramin Vafaei Poursorkhabi *

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Robotics & Soft Technologies Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

Ahmad Zarean

Department of Civil Engineering, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.

Rouzbeh Dabiri

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

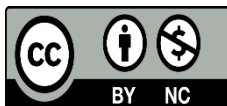
raminvafaei@yahoo.com

Keywords

Metaheuristic optimization, Neighborhood Algorithm, Surface waves, Dispersion curves inversion

Abstract

This study presents a novel approach for inverting surface wave dispersion curves using the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm in the MATLAB environment. Due to the problem's nonlinear nature and multiple extrema, this method demonstrates significant advantages over local search techniques. To evaluate the performance of the proposed algorithm, synthetic data from three six-layer geological models were analyzed. In these models, the velocity and thickness values were defined over a wide range, and the velocity variation with depth was determined based on the $\lambda/2$ rule. The simultaneous inversion process involved estimating shear wave velocity, compressional wave velocity, and layer thickness, assuming a variable Poisson's ratio (0.1 to 0.5) and a constant density. The results indicate that the average relative error in velocity parameters using the ACO method is 3.5%, whereas this error reaches 15% for the neighborhood algorithm available in the Geopsy software. These findings highlight the superiority of the proposed approach in terms of computational efficiency and reliability. Additional advantages include its independence from an initial model, the ability to explore the entire parameter space, and reduced sensitivity to local extrema. Finally, the algorithm was applied to experimental field data from a station in the Tabriz Plain, yielding results that closely matched available borehole data. Based on these findings, a 2D shear wave velocity model for the region was developed.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

بررسی وارون منحنی پاشش امواج سطحی با استفاده از بهینه‌سازی فراابتکاری به منظور برآورد ساختار سرعتی موج‌برشی زمین در دشت تبریز

شهرام انگردي

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

رامین وفایی پورسرخابی*

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

احمد زارعان

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

روزبه دبیری

گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

raminvafaei@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۰۴ دی ۱۴۰۳

چکیده

در این مطالعه، یک روش جدید برای وارون‌سازی منحنی پاشش امواج سطحی، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها، در محیط متلب ارائه شده است. این روش، به دلیل طبیعت غیرخطی مسئله و وجود اکسترم‌های متعدد، برتری قابل‌توجهی نسبت به روش‌های جستجوی محلی دارد. برای ارزیابی عمل‌کرد این الگوریتم، داده‌های مصنوعی مربوط به سه مدل زمین‌شناسی، شش‌لایه مورد بررسی قرار گرفتند. در این مدل‌ها، بازه‌ی مقادیر سرعت و ضخامت به‌صورت گسترده تعریف گردیده و روند تغییرات سرعت با عمق، بر اساس قانون $\lambda/2$ تعیین گردید. فرآیند وارون‌سازی، هم‌زمان شامل تعیین سرعت موج برشی، سرعت موج طولی و ضخامت لایه‌ها، با فرض نسبت پواسون متغیر (۰/۱ تا ۰/۵) و چگالی ثابت انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین خطای نسبی پارامترهای سرعت در روش کلونی مورچه ۳/۵ درصد است، در حالی که این مقدار برای الگوریتم همسایگی موجود در نرم‌افزار ژئوپسی ۱۵ درصد محاسبه شد. این یافته‌ها بیان‌گر برتری روش پیشنهادی، از نظر قابلیت اعتماد و توان محاسباتی است. از دیگر مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به مدل اولیه، توانایی جستجوی کل فضای پارامترها، و حساسیت کم به اکسترم‌های محلی اشاره کرد. این الگوریتم بر روی داده‌های تجربی ایستگاهی در مرکز دشت تبریز اعمال شد؛ که نتایج حاصل، همخوانی بالایی با اطلاعات گمانه‌های موجود داشت. بر اساس این نتایج، مدل دوبعدی سرعت موج برشی برای این منطقه استخراج شد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی فراابتکاری؛ الگوریتم همسایگی؛ امواج سطحی؛ منحنی پاشش.

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

سرعت موج برشی (V_s) یک پارامتر کلیدی برای مطالعات اثرات سایت است. تکنیک‌های مختلفی برای مدل‌سازی پروفیل V_s وجود دارد، اندازه‌گیری‌های حفرة‌ای و وارونگی منحنی‌های پراکندگی امواج سطحی از این روش‌ها هستند [۳،۲۰۱ و ۴]. از آنجایی که سرعت موج برشی پارامتری مهم برای تعیین خصوصیات ساختگاه در لرزه‌شناسی مهندسی به شمار می‌آید، خصوصیات جنبش زمین شامل دامنه و دوام در ساختگاه‌هایی که سنگ‌بستر سخت با لایه‌های خاک نرم پوشیده شده است به شدت تقویت می‌شوند [۵]. مقادیر سرعت موج برشی پاسخ دینامیکی ساختگاه و در نتیجه خرابی را کنترل می‌کند [۷ و ۶]. بنابراین، سرعت موج برشی برای ارزیابی اثر ساختگاه در تحلیل خطر زمین‌لرزه باید برآورد شود. سرعت موج برشی توسط روش‌های مختلفی مانند لرزه درون چاهی، مطالعات لرزه شکستی، بازتابی و روش امواج سطحی ارزیابی می‌شود [۹، ۱۰ و ۱۱]. در سالیان اخیر از امواج سطحی به‌طور گسترده‌ای برای تعیین پروفیل سرعتی موج برشی استفاده شده است [۱۲]. همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی، مطالعه امواج سطحی شامل سه مرحله اصلی برداشت داده تجربی، پردازش داده به‌منظور تعیین منحنی پاشش تجربی و حل مسئله وارون برای تخمین پارامترهای مدل است.

هر مرحله بسته به مقیاس مطالعه، هدف، پیچیدگی خصوصیات خاک زیرسطحی و ابزار در دسترس با استفاده از روش‌های مختلفی انجام می‌شود. استفاده از لرزه‌نگار چند کاناله و ژئوفن‌های فرکانس پایین (۲-۴ هرتز) با استفاده از چشمه فعال (MASW) یا چشمه غیرفعال (Re Mi) مرسوم است. برای اکتشافات عمیق‌تر از لرزه‌نگارهای سه مؤلفه‌ای (۱۰-۳۰) در غالب آرایه میکروترومور استفاده می‌شود. برای استخراج منحنی پاشش نیز بنا به نوع برداشت، از روش‌های متعددی از جمله تبدیل فرکانس عدد موج [۱۳] تابع خودهمبستگی مکانی [۱۴ و ۱۵]، تبدیل بازتاب‌های تکراری [۱۶]، تبدیل رادون [۱۷] استفاده می‌شود. امواج میکروترومور برای مدل‌سازی سرعت موج برشی به دلیل هزینه پایین و سرعت بالای برداشت داده‌ها مورد استقبال قرار گرفته‌اند. اما مشکل اساسی در پردازش این داده‌ها، وارون‌سازی منحنی پاشش برای تخمین سرعت امواج برشی است. امواج پاشش دارای رفتار غیر خطی بوده الگوریتم‌های خطی موجود در حل آنها دچار ضعف هستند. در مرحله سوم، وارون منحنی پاشش امواج سطحی برای به دست آوردن پروفیل سرعت موج برشی انجام می‌شود. در این مرحله چهار چالش مهم از جمله روش مدل‌سازی مستقیم، مدل‌های اولیه، اهمیت مدهای بالاتر و انتخاب الگوریتم وارون مناسب، وجود دارد [۱۸]. در مورد انتخاب الگوریتم وارون، روش‌های جستجوی محلی و روش‌های جستجوی سراسری وجود دارند. روش اول تابع عدم برازش بین داده‌های تجربی و مصنوعی را

استفاده از یک مدل اولیه و جستجو حول آن کمینه می‌کند ولی روش دوم تمام راه‌حل‌های موجود در گستره فضای انتخابی را جستجو می‌کند [۱۸]. روش‌های جستجوی سراسری مشکل خطی سازی نداشته و در کمینه محلی به تله نمی‌افتند. همچنین، نیازی به مدل اولیه ندارند. با این حال، به محاسبات بیشتری نیاز دارند [۱۹ و ۲۰]. تاکنون از روش‌های جستجوی سراسری مختلفی برای حل مسئله وارون استفاده شده است. برای مثال، می‌توان از الگوریتم ژنتیک [۲۱ و ۲۲]، سرمایه‌های شبیه‌سازی شده [۲۴]، همسایگی [۲۵]، مونت کارلو [۲۶]، استنتاجی عصبی فاز تطبیقی [۲۷] و مدل هوش مصنوعی [۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۳] نام برد. در این مطالعه یکی از روش‌های قدرتمند جستجوی سراسری به نام الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه برای حل مسئله وارون امواج سطحی انتخاب شد.

۲. روش تحقیق

۲.۱. الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری کلونی مورچه

مورچه

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده و از رفتار مورچه‌های طبیعی که در کلونی‌ها در کنار یکدیگر زندگی می‌کنند، الهام گرفته شده است [۳۴]. در این الگوریتم، عامل‌ها، مورچه‌های مصنوعی هستند که مشابه با مورچه‌های واقعی رفتار می‌کنند و با همکاری یکدیگر می‌توانند نتایج بسیار خوبی به دست آورند. هنگامی که مورچه‌ها برای یافتن غذا از کلونی خارج می‌شوند مسیر خود را به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌کنند و مورچه هیچ‌گاه به‌تنهایی نمی‌تواند منبع غذایی را بیابد، زیرا مورچه‌ها فاقد بینایی هستند و ارتباط آن‌ها با یکدیگر از طریق استشمام ماده شیمیایی به نام فرومون صورت می‌گیرد. فرومون، ماده شیمیایی است که مورچه‌های واقعی برای تعیین موقعیت و ارتباط غیرمستقیم روی زمین ترشح می‌کنند. هر مورچه هنگام حرکت، مقداری فرومون از خود به روی زمین باقی می‌گذارد و بدین ترتیب مسیر را به‌وسیله این ماده مشخص می‌سازد. البته، فرومون به‌سرعت تبخیر می‌شود اما در مدت‌زمان طولانی به‌عنوان رد مورچه به روی زمین باقی می‌ماند. الگوریتم‌های فراابتکاری انعطاف‌پذیری بالایی دارند یعنی با تغییر شرایط مسئله می‌توانند خود را با شرایط جدید تطبیق دهند؛ بنابراین، در الگوریتم مورچه نیز اگر مشکلی در روند حل مسئله ایجاد شود، نیازی نیست الگوریتم از ابتدا مسئله را حل کند بلکه از همان جایی که مشکل مطرح شده است، مورچه‌ها می‌توانند پس از مدت کوتاهی مسیر بهینه را بیابند. برای مثال، مطابق شکل (۱-الف)، اگر مانعی در مسیر مورچه‌ها قرار بگیرد، مورچه‌ها شروع به جستجوی مسیرهای جایگزین تصادفی نموده و مسیر خود را مطابق با موارد ذکر شده از قبل (اطلاعات فرومون) می‌یابند. اگر مطابق شکل (۱-ب)، دوباره مانع

در رابطه‌ی (۱)، ضریب α تأثیر فرومون و β تأثیر اطلاعات فراابتکاری را نشان می‌دهد. این دو ضریب توازن بین اطلاعات فراابتکاری و میزان فرومون برقرار می‌کنند. اگر $\alpha=0$ فرض شود معادله ۱ به فرم معادله ۲ تبدیل می‌شود و احتمال انتخاب فقط به اطلاعات فراابتکاری وابسته خواهد بود و با افزایش β احتمال انتخاب هم افزایش می‌یابد.

$$P_{ij}^k(t) = \frac{\eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_i \eta_{ii}^\beta(t)} \quad (2)$$

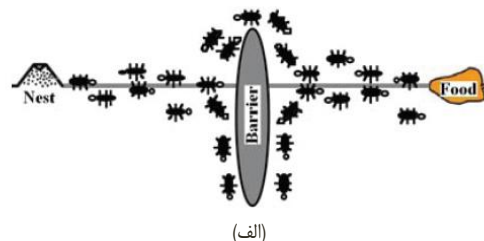
اگر $\beta=0$ فرض شود معادله ۱ به فرم معادله ۳ تبدیل می‌شود و احتمال انتخاب فقط به فرومون وابسته خواهد بود که با افزایش α احتمال انتخاب هم افزایش می‌یابد. وابستگی احتمال انتخاب به مقدار فرومون باعث همگرایی سریع و انحطاط راه‌حل الگوریتم می‌شود.

$$P_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)}{\sum_i \tau_{ii}^\alpha(t)} \quad (3)$$

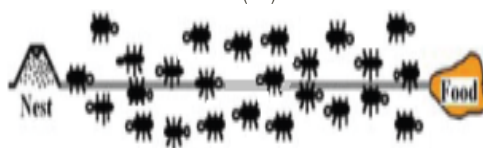
برای اینکه روش جستجوی مورچه‌ها به یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و غذا منتهی شود می‌بایست تعداد مورچه‌های جستجو کننده تا حد مناسبی زیاد باشد، به نحوی که با احتمال زیادی تمام مسیرهای ممکن جستجو شده و در نهایت، مسیر بهینه انتخاب شود. اگر تعداد مورچه‌های جستجو کننده زیاد نباشد، دو اتفاق نامطلوب رخ می‌دهد؛ اول این که حتی با فرض این که مورچه‌ای بتواند به محل غذا برسد، چون به تنهایی محل غذا را یافته است ممکن است فرومونی که روی مسیر به جا گذاشته است تبخیر شده باشد و باقی مورچه‌ها نتوانند مسیری که این مورچه رفته است را دنبال کنند. دوم اینکه اگر تعداد مورچه‌ها کم باشد، مسیرهای اندکی بررسی می‌شوند و لذا، اگر مسیر انتخاب شده توسط مورچه‌های پیشرو اشتباه بوده باشد این اشتباه توسط دیگر مورچه‌ها تصحیح نشده و مسیر بهینه پیدا نمی‌شود. بنابراین، برای رسیدن به مسیر بهینه همیشه باید تعداد مورچه‌های جستجوگر از حد خاصی بیشتر باشد.

پس از این که هر مورچه مسیر خود را کامل نمود مسیر هر مورچه با تابع شایستگی ارزیابی می‌شود. در این مرحله که شایستگی هر مسیر ارزیابی شد، تعدادی از بهترین آن‌ها به عنوان مورچه نامزد برگزیده می‌شوند تا فرومون برای آن‌ها ترشح شود. در حالت کلی برای به‌روزرسانی فرومون دو مرحله اجرا می‌شود؛ در مرحله اول، فرومون تمام یال‌ها یا نقاط دچار تبخیر فرومون می‌شود. ρ پارامتری است که ضریب تبخیر فرومون نام دارد. اگر ضریب تبخیر کوچک در نظر گرفته شود مسیر مورچه خوب تکرارهای قبلی بیشتر برجسته باقی می‌ماند و سرعت همگرایی کاهش می‌یابد و در صورتی که ضریب

برداشته با توجه به موارد ذکر شده، مورچه‌ها به راحتی می‌توانند مسیر خود را بازیابند. در واقع سه ویژگی ترشح فرومون، تبخیر شدن فرومون ترشح شده، احتمال و تصادف در انتخاب مسیر، باعث می‌شود تا مورچه‌ها بتوانند کوتاه‌ترین مسیر را پیدا کنند.



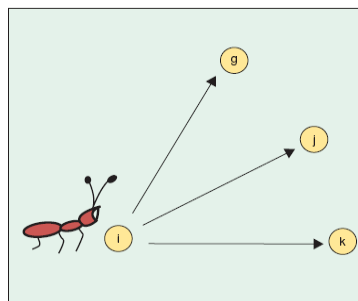
(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) قرار دادن مانع در مسیر حرکت مورچه‌ها از کلونی تا منبع غذایی. (ب) حذف مانع و انعطاف‌پذیری رفتار مورچه‌ها [۳۶]

در پیاده‌سازی الگوریتم کلونی مورچه، m مورچه مصنوعی مسیری را به طور موازی ایجاد می‌کنند. هر مورچه روی نقاط انتخابی تصادفی قرار می‌گیرد و اولین نقطه i را تصادفی انتخاب می‌کند. فرض بر این است که مورچه k در نقطه i قرار دارد (شکل ۲-۱)، لذا، نقطه‌ای را که می‌خواهد به سمت آن حرکت کند، متناسب با قانون احتمال انتخاب می‌کند. در ابتدا احتمال انتخاب تمام مسیرها توسط مورچه‌ها یکسان هست زیرا میزان فرومون اولیه برای تمام مسیرها یکسان است اما در هر تکرار الگوریتم، با توجه به تبخیر و ترشح فرومون برای برخی از مسیرها، احتمال انتخاب بر مبنای شدت فرومون و اطلاعات فراابتکاری مسئله است [۳۵]. رابطه ۱، احتمال انتخاب مسیر برای مورچه k را از نقطه i جهت رفتن به نقطه j نشان می‌دهد.



شکل ۲- انتخاب مسیر توسط مورچه در نقطه

$$P_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha * \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_i \tau_{ii}^\alpha * \eta_{ii}^\beta(t)}, \quad l, j \in others_k \quad (1)$$

۲،۲- اعمال الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری کلونی مورچه برای تحلیل امواج سطحی

در این بخش الگوریتم وارون‌سازی بر روی داده‌های مصنوعی حاصل از مدل مستقیم اعمال می‌شود. همچنین، اعتبارسنجی نتایج با داده‌های مصنوعی بررسی خواهد شد. منحنی‌های پاشش مصنوعی برای یک مدل زمین فرضی، توسط برنامه مستقیم تولید شده و پس از وارون‌سازی با مدل اولیه مقایسه خواهد شد. اساس مسئله مستقیم در این تحقیق، روش ماتریس انتقال هاسکل^۱ [۳۶] است. معادله ۶ پارامترهای تصادفی الگوریتم کلونی مورچه و مقدار عدم تطابق را نشان می‌دهد.

$$\text{misfit} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_f} \frac{(x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n_f}} \quad (6)$$

که در آن، x_{di} (داده‌های مشاهده‌شده) در فرکانس f_i ، x_{ci} (داده‌های محاسبه‌شده) در فرکانس f_i ، σ_i عدم قطعیت داده‌های مشاهده‌شده و n_f تعداد داده‌های مشاهده‌شده است. منحنی پاشش حاصل از پارامترهای مدلی که بعد از ۵۰ تکرار کمترین مقدار عدم برازش را با منحنی پاشش مصنوعی داشته باشد، به‌عنوان بهترین مدل در هر اجرا در نظر گرفته می‌شود. میانگین و انحراف معیار پارامترهای بهترین مدل در چند اجرا به‌دست‌آمده و در نهایت، درصد خطای بین مدل تخمینی و واقعی ارزیابی می‌شود. از مهمترین امتیازات این الگوریتم ها نسبت به مقادیر کمیته یا بیشینه محلی و عدم نیاز به مدل اولیه و تمام فضای پارامترهای مدل که از قبل رای حل مقصد تعریف می‌شوند می‌توان اشاره کرد همچنین این الگوریتم‌ها قابلیت خود اصلاحی را دارا بوده و در هر بار تکرار نسبت به قبل بهینه تر میشوند. یادگیری، تکامل و مقیاس پذیری از مزیت‌های دیگر این نوع از الگوریتم‌هاست.

۳- وارون داده‌های مصنوعی

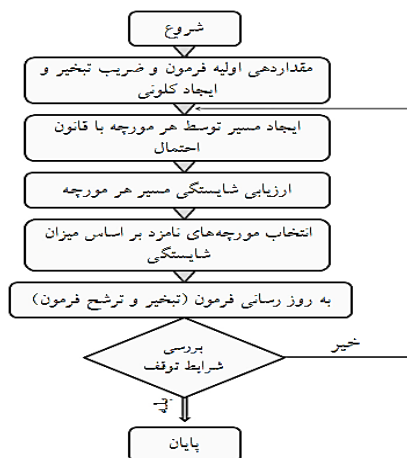
در این قسمت برای آزمایش و ارزیابی کارایی و پایداری الگوریتم مذکور، از یک مدل شش لایه مفروض استفاده شده است. سه حالت مختلف برای یک مدل شش لایه می‌توان در نظر گرفت (مدل A: افزایش سرعت موج با عمق، مدل B: یک لایه نرم که بین دو لایه سخت به تله افتاده باشد LVL و مدل C: یک لایه سخت که بین دو لایه نرم محصور شده باشد HVL). جدول ۱ خصوصیات سرعتی هر سه مدل شش لایه مفروض را نشان می‌دهد. محدوده فرکانسی در هر

تبخیر بزرگ فرض شود مسیر مورچه خوب تکرارهای قبلی سریع‌تر از بین می‌رود و همین امر باعث افزایش سرعت همگرایی می‌شود. در مرحله دوم، باید ترشح فرمون صورت بگیرد. در اکثر روش‌ها فرمون فقط برای بهترین مورچه (یک یا چند تا از بهترین مورچه‌ها) ترشح می‌شود [۳۵]. روابط ۴ و ۵، مرتبط با به‌روزرسانی مقدار فرمون در الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر مورچگان (ACO) هستند.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \sum \Delta \tau_{ij} \quad (4)$$

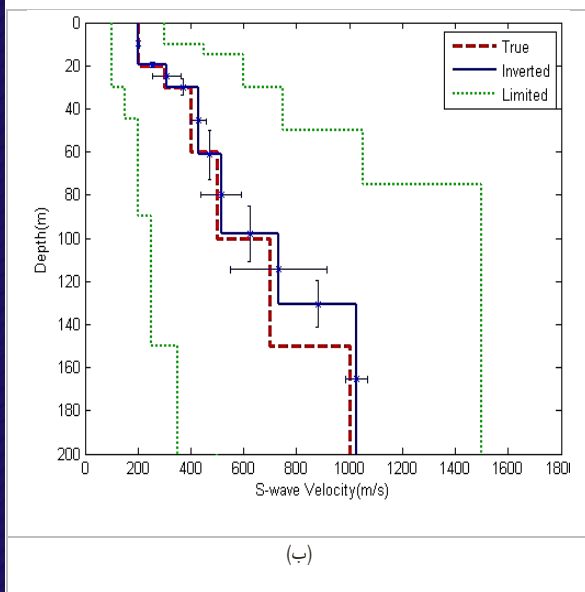
$$\Delta \tau_{ij} = \begin{cases} Q & \text{for edges of best ant} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

در صورتی که فرمون زیاد ترشح شود باعث برجستگی مسیر مورچه برگزیده می‌شود. باید توجه شود که در ابتدا مقدار فرمون اولیه را به‌صورت درصدی بین مقدار (۱,۰) در نظر می‌گیریم به عبارت بهتر فرمون هر المان بین یک یک‌هزارم خواهد بود. اگر فرمون اولیه را صفر انتخاب نماییم، در نهایت، پس از به‌روزرسانی فرمون، اکثر مسیر مورچه‌ها مقدار ۰ و مسیر مربوط به بهترین مورچه مقدار ۱ را اختیار می‌کند؛ بنابراین، تمامی مورچه‌ها در تکرارهای بعدی تا انتها تقریباً مسیر بهترین مورچه تصادفی اولیه را انتخاب می‌کنند و به مسیری همگرا می‌شوند که ممکن است بهینه نباشد و آن مسیری که دارای فرمون ۰ شده‌اند از فرآیند جستجو حذف می‌شوند پس فضای جستجو محدود به چند راه‌حل تصادفی اولیه شده و به‌خوبی بررسی نمی‌گردد. پس بهتر است مقدار فرمون اولیه مقداری بین بازه (۱,۰) یعنی ۰/۵ انتخاب گردد. به‌روزرسانی فرمون، بازخورد مثبت و منفی را در ارتباط غیرمستقیم در کلونی فراهم می‌کند. در شکل ۳ فلوچارت الگوریتم کلونی مورچه نشان داده شده است.



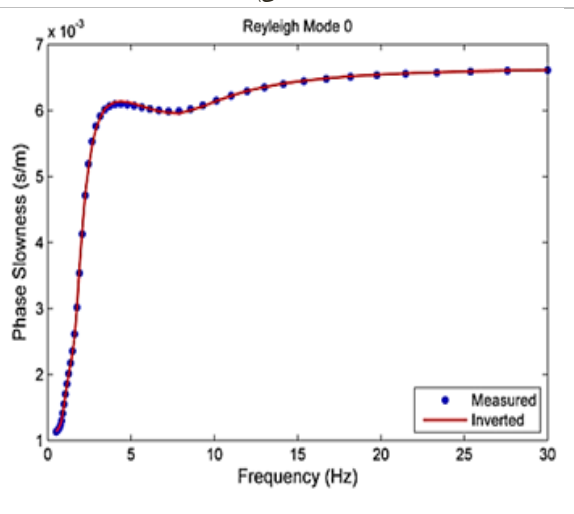
شکل ۳- فلوچارت کلی الگوریتم کلونی مورچه.

¹ Haskell



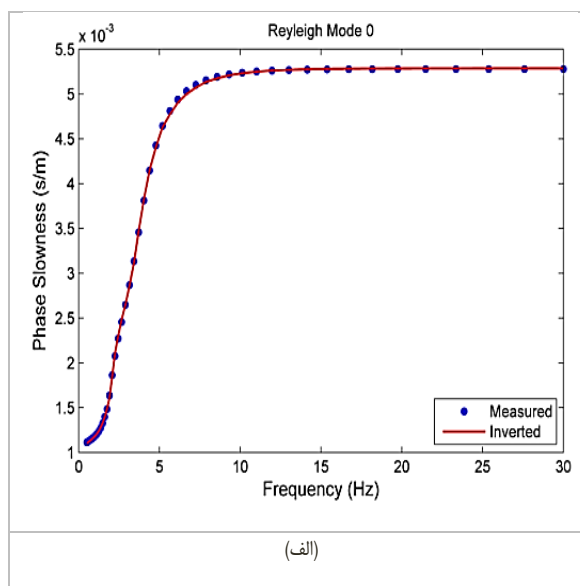
(ب)

شکل ۴- وارون منحنی پاشش مدل A با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه. الف) داده‌های مد پایه موج ری‌لی (نقاط آبی) و منحنی پاشش مدل‌سازی شده (خط قرمز). ب) حد پایین و بالای محدوده جستجو (۵۰٪) (نقطه چین سبز)، مدل واقعی (خط چین قرمز) و پروفیل سرعتی موج برشی به همراه مقادیر انحراف معیار (خط ممتد آبی).



(الف)

سه حالت ۰/۵ الی ۳۰ هرتز و فاصله نمونه‌برداری ۵۰، انتخاب شد. در این مطالعه وارون هم‌زمان سرعت موج طولی، برشی و ضخامت، با فرض نسبت پواسون بین ۰/۲ و ۰/۵، انجام شد. فضای جستجو اولیه نیز به اندازه $\pm 50\%$ درصد مقادیر مدل مفروض انتخاب شد. شکل‌های ۴ تا ۶ وارون مد پایه موج ری‌لی را برای مدل‌های A، B و C نشان می‌دهد. در تمام مدل‌ها، عملاً بعد از ۵۰ تکرار همگرایی تابع عدم برازش به کمینه مقدار ممکن رسیده و با افزایش تعداد تکرارها بر همگرایی تابع افزوده نمی‌شود. در تمام شکل‌ها مدل واقعی با مدل بدست آمده از روش وارون منحنی مد پایه موج ری‌لی مقایسه شده اند. مقادیر انحراف معیار و خطای نسبی نشان از تطابق بهتر مدل واقعی و تخمین زده‌شده در لایه‌های بالاتر نسبت به لایه‌های عمقی دارد. بیشترین مقدار خطا در وارون پارامترهای ضخامت لایه چهارم و پنجم دیده می‌شود. به‌طور کلی، مقادیر خطای محاسبه‌شده برای پارامترهای سرعت کمتر از پارامترهای ضخامت است. نتایج مدل B (LVL) نشان از دقت بالای روش در مدل‌سازی پارامترهای لایه کم‌سرعت دارد. روش شکست مرزی معمولاً قادر به تعیین لایه کم‌سرعت نیستند، در چنین شرایطی مطمئناً استفاده از وارون منحنی پاشش امواج سطحی مؤثر واقع خواهد شد. همین نتیجه در مورد مدل C (HVL) نیز صدق می‌کند. در مجموع، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده کارایی الگوریتم برای حل مسئله وارون منحنی پاشش امواج سطحی مورد تأیید است. داده‌های مصنوعی پژوهش‌های کلونی مورچه و کاربردهای آن را متحول کرده‌اند و بینش‌های بی‌سابقه‌ای در مورد ساختارهای پیچیده اجتماعی آنها ارائه داده‌اند. با ترکیب داده‌های مصنوعی و مشاهدات دنیای واقعی، پژوهشگران می‌توانند مرزهای علم زیست‌شناختی و فناوری‌های بهینه‌سازی را گسترش دهند و زمینه را برای پیشرفت‌هایی در حوزه‌ی رباتیک، حفاظت از محیط زیست و سایر حوزه‌ها فراهم کنند.



(الف)

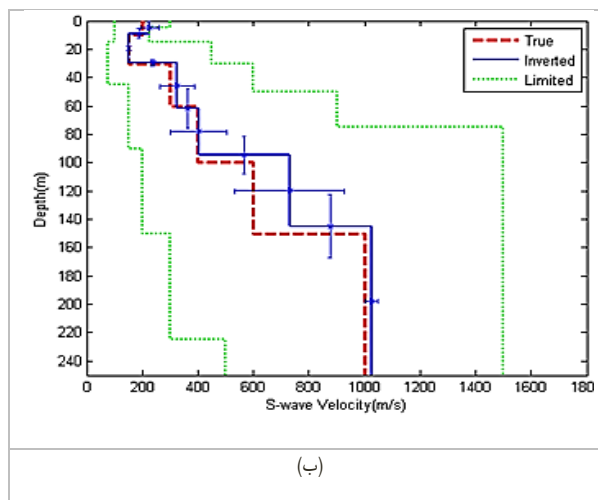
۱،۳- مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه با الگوریتم همسایگی مورد استفاده در نرم‌افزار ژئوپسی

برای مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه با الگوریتم همسایگی، از مدل A استفاده شد. برای وارون‌سازی در هر دو الگوریتم از فضای جستجوی یکسان و تعداد تکرار یکسان استفاده شد. در شکل ۷ نتایج وارون‌سازی با الگوریتم همسایگی نشان داده شده است. علیرغم تطابق خوب منحنی پاشش واقعی با منحنی پاشش مدل‌سازی شده، در مورد پروفیل سرعت موج برشی چنین تطابقی دیده نمی‌شود. وارون پارامترهای سرعت توسط الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه از خطای نسبی قابل قبولی برخوردار است در حالیکه این خطا در وارون پارامترهای سرعت توسط الگوریتم همسایگی بسیار بیشتر است. خطای میانگین نسبی پارامترهای سرعت با روش کلونی مورچه ۳/۵٪ است ولی در مورد الگوریتم همسایگی مقدار خطا به ۱۵٪ می‌رسد. مقایسه مذکور توانایی هر دو الگوریتم را برای وارون منحنی پاشش موج ری‌لی حاصل از مدل‌های پیچیده آشکار می‌سازد. باین‌حال، دقت و کارایی الگوریتم ارائه‌شده در این تحقیق بهتر به نظر می‌رسد.

۲،۳- وارون داده‌های تجربی

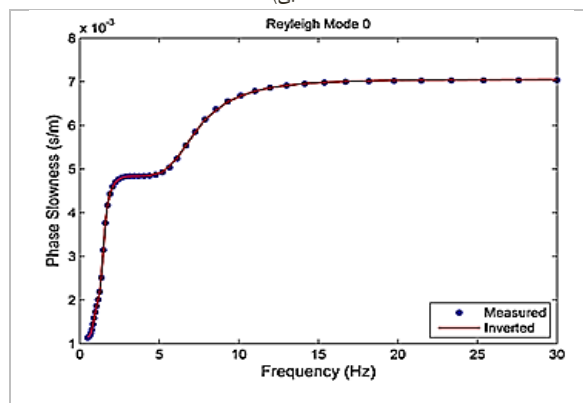
در این مرحله به‌جای استفاده از منحنی پاشش مصنوعی، از منحنی پاشش تجربی بدست آمده در ایستگاهی واقع در دشت مرکزی شهر استفاده شده است. مقادیر پارامتر سازی اولیه طبق جدول ۲، در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل منحنی پاشش بدست آمده، برای وارون‌سازی از مدل چهار لایه (شامل ۳ لایه‌ی آبرفت بر روی سنگ‌بستر) استفاده شد. با فرض نبود اطلاعات زمین‌شناسی زیرسطحی مکفی، برای ضخامت هر لایه، بازه‌ی نسبتاً گسترده‌ای در نظر گرفته شد. همچنین، بازه‌ی تغییرات سرعت موج برشی و طولی نسبتاً بزرگ انتخاب شد. هر دو پارامتر سرعت موج طولی و برشی در وارون‌سازی دخالت داده شدند. چگالی هر لایه به‌طور تقریبی، مقداری ثابت در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، پس از وارون‌سازی منحنی پاشش موج ری‌لی تفسیر کمی و کیفی مناسبی از لایه‌بندی خاک بدست آمد. برای کنترل صحت جواب نهایی، نتایج روش اول با داده‌های گمانه‌های موجود در منطقه مقایسه شده است. در شکل ۸ نتایج وارون‌سازی داده تجربی نشان داده شده است.

همانند کارایی مناسب الگوریتم کلونی مورچه در مدل‌سازی منحنی‌های پاشش مصنوعی، این الگوریتم در مورد وارون منحنی‌های پاشش تجربی عملکرد خوبی از خود نشان داد. در شکل ۸-الف نگاره گمانه حفاری شده نزدیک محل برداشت آورده شده است. در شکل ۸-ب،

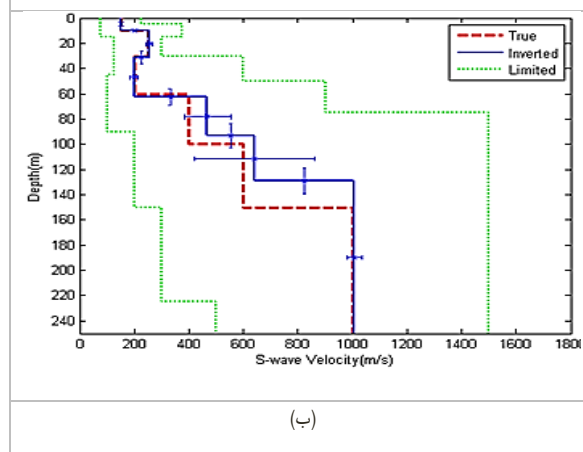


(ب)

شکل ۵- وارون منحنی پاشش مدل B با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه. الف) داده‌های مد پایه موج ری‌لی (نقاط آبی) و منحنی پاشش مدل‌سازی شده (خط قرمز). ب) حد پایین و بالای محدوده جستجو (۵۰٪) (نقطه چین سبز)، مدل واقعی (خط چین قرمز) و پروفیل سرعتی موج برشی به همراه مقادیر انحراف معیار (خط ممتد آبی).

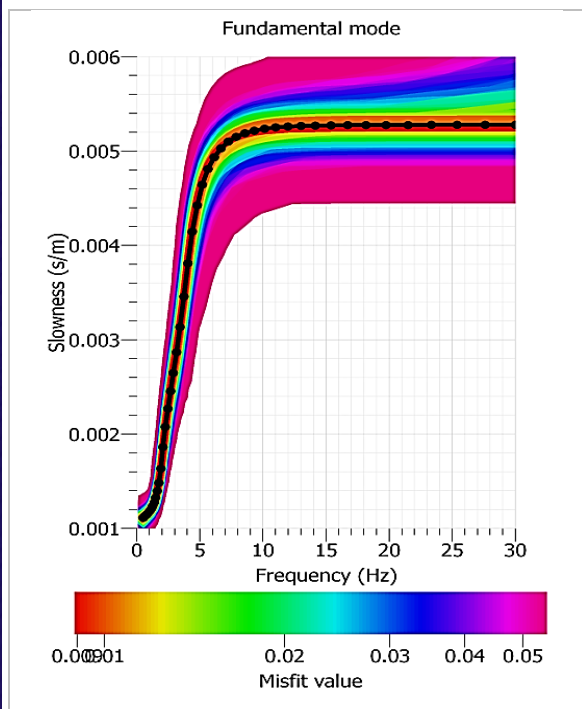


(الف)

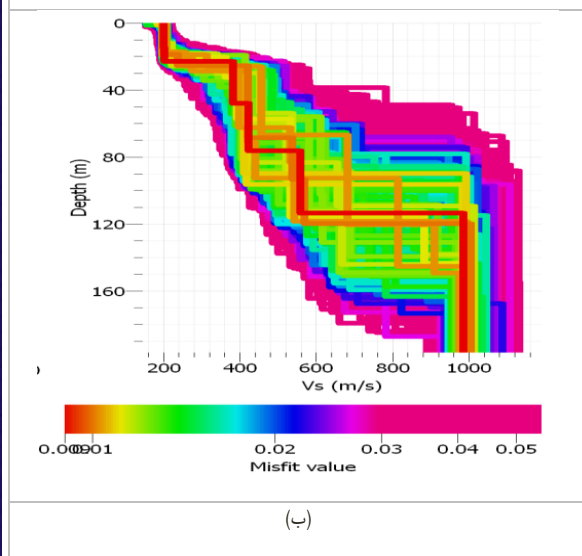


(ب)

شکل ۶- وارون منحنی پاشش مدل C با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه. الف) داده‌های مد پایه موج ری‌لی (نقاط آبی) و منحنی پاشش مدل‌سازی شده (خط قرمز). ب) حد پایین و بالای محدوده جستجو (۵۰٪) (نقطه چین سبز)، مدل واقعی (خط چین قرمز) و پروفیل سرعتی موج برشی به همراه مقادیر انحراف معیار (خط ممتد آبی).



(الف)



(ب)

شکل ۷- وارون منحنی پاشش مدل A با استفاده از الگوریتم همسایگی. الف) داده-های مد پایه موج ری لی (نقاط سیاه) و منحنی پاشش مدل سازی شده به همراه مقادیر تابع عدم برازش (خطوط رنگی). ب) مدل واقعی (خط چین سیاه)، پروفیل سرعتی موج برشی به همراه مقادیر تابع عدم برازش (خطوط رنگی).

نقطه چین سبزرنگ محدوده بالا و پایین جستجو و خطوط آبی رنگ پروفیل سرعتی موج برشی را به همراه مقادیر انحراف معیار نشان می دهد. در شکل ۸-ج، نقاط آبی رنگ منحنی پاشش تجربی بعلاوه و منتهای مقادیر انحراف معیار را نشان می دهد و خط قرمز منحنی پاشش مدل سازی شده را نشان می دهد. تطابق بسیار خوب منحنی پاشش تجربی و مدل سازی شده کاملاً مشهود است. شکل ۸-د رفتار تابع عدم برازش را در حین تکرارهای مختلف نشان می دهد. مقدار 0.0004 برای تابع عدم برازش پس از ۵۰ تکرار، نشان از تطابق بسیار خوب دو منحنی پاشش تجربی و مدل سازی شده دارد. مقایسه پروفیل سرعت موج برشی با داده های گمانه تطابق بسیار خوبی بین لایه بندی این دو پروفیل را نشان می دهد. همچنین، مقادیر سرعت موج برشی با عمق روند افزایشی از خود نشان می دهد.

۳،۳- مدل دوبعدی سرعت موج برشی دشت تبریز

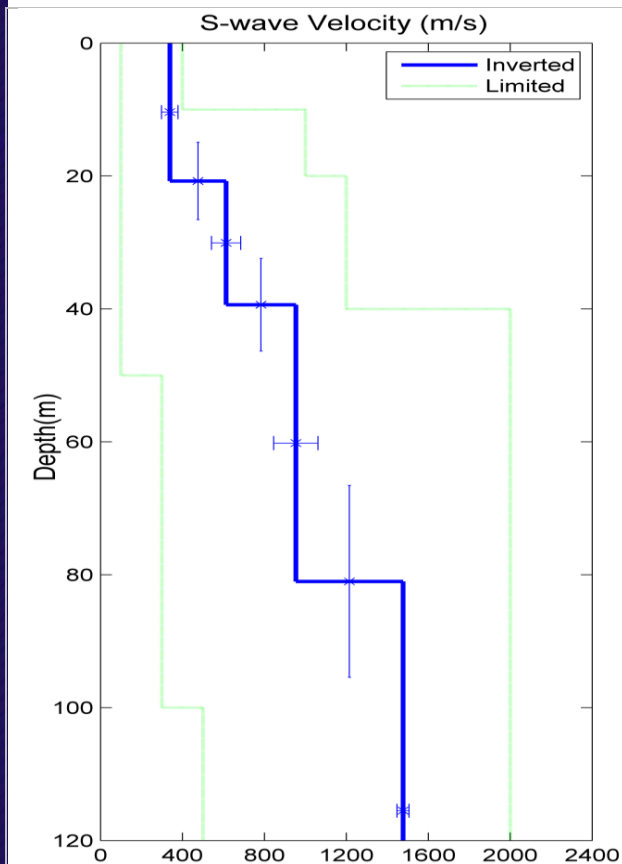
در این مرحله بر اساس مطالعات ژئوفیزیک (آرایه های میکروتورمور) سرعت های موج برشی ابتدا به صورت یک بعدی در شهر تبریز بدست آمده و در مرحله بعدی به صورت پروفیل های زمین شناسی دو بعدی (با تلفیق نتایج ژئوفیزیک، گمانه های موجود و نقشه زمین شناسی تبریز) ارائه گردیده است. در مورد کالیبره کردن داده ها با داده های جمع آوری شده اشاره به نکات زیر حائز اهمیت است. لوگ های حفاری شرکت آب منطقه ای با توجه به عمق مناسب دقت بسیار پایینی داشتند و هیچ گونه داده ژئوفیزیک درون چاهی در این گمانه ها موجود نیست و بیشتر آنها در خارج از محدوده قرار داشتند. مطالعات ژئوالکتریک انجام شده نیز در خارج محدوده شهری قرار داشتند و قابل استفاده نبودند. لوگ های حفاری شهرداری از دقت مناسبی برخوردار بودند ولی عمق بسیار کمی داشتند که با هدف این پژوهش سازگار نبود. معدود لوگ های سازمان مسکن و شهر سازی و داده های لرزه دورن چاهی انجام شده در آنها هم به دلیل عمق کم و هم به دلیل دقت بسیار پایین موج برشی (فقط موج طولی دارای دقت مناسب بود) زیاد قابل اعتماد نبود. تنها مرجع معتبر، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰ تبریز ۱ و ۲ است که قرار بود مطالعات این پژوهش بر اساس نقشه مذکور انجام شود ولی متأسفانه تا لحظه نگارش این نامه، نقشه ها تأیید نهایی نشده اند و قابل انتشار نبودند. در پایان بایستی خاطر نشان کرد هدف از این مطالعه تنها برآورد سرعت موج برشی در خاک است و نه لایه بندی خاک بر اساس لیتولوژی منطقه. در شکل ۹ پروفیل های برداشتی در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تبریز جانمایی شده است و در ادامه پروفیل های دو بعدی مدل سازی شده نشان داده شده اند.

جدول ۱- مدل مرجع شش لایه (A, B و C) برای ارزیابی کارایی و پایداری الگوریتم کلونی مورچه

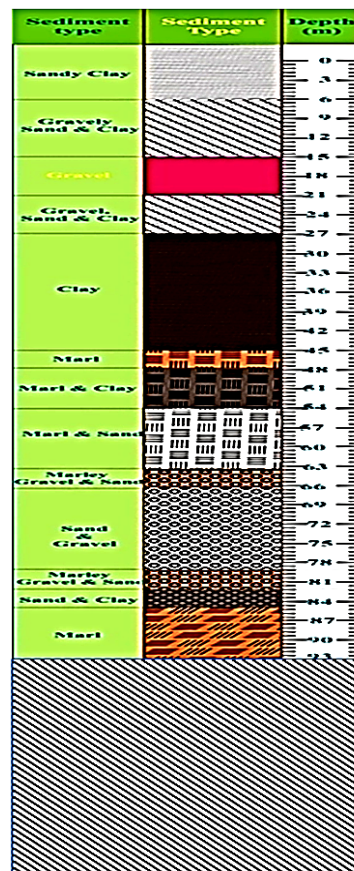
	نوع لایه	وزن مخصوص (kg/m ³)	پنجاه درصد	Vs (m/s)	پنجاه درصد	Vs (m/s)	پنجاه درصد	ضخامت (m)	لایه
مدل A	ماسه لای دار	۱۸۰۰	۳۰۰-۱۰۰	۲۰۰	۹۰۰-۳۰۰	۶۰۰	۳۰-۱۰	۲۰	۱
	شن ماسه لای	۱۹۰۰	۴۵۰-۱۵۰	۳۰۰	۱۳۵۰-۴۵۰	۹۰۰	۱۵-۵	۱۰	۲
	شن	۱۹۰۰	۶۰۰-۲۰۰	۴۰۰	۱۸۰۰-۶۰۰	۱۲۰۰	۴۵-۱۵	۳۰	۳
	ماسه و لای	۲۰۰۰	۷۵۰-۲۵۰	۵۰۰	۲۲۵۰-۷۵۰	۱۵۰۰	۶۰-۲۰	۴۰	۴
	لای و مارن	۲۰۰۰	۱۰۵۰-۳۵۰	۷۰۰	۳۱۵۰-۱۰۵۰	۲۱۰۰	۷۵-۲۵	۵۰	۵
	مارن	۲۱۰۰	۱۵۰۰-۵۰۰	۱۰۰۰	۴۵۰۰-۱۵۰۰	۳۰۰۰	نیم فضا	۶	
مدل B	ماسه لای دار	۱۸۰۰	۳۰۰-۱۰۰	۲۰۰	۹۰۰-۳۰۰	۶۰۰	۱۵-۵	۱۰	۱
	ماسه	۱۹۰۰	۲۲۵-۷۵	۱۵۰	۶۷۵-۲۲۵	۴۵۰	۳۰-۱۰	۲۰	۲
	شن ماسه لای	۱۹۰۰	۴۵۰-۱۵۰	۳۰۰	۱۳۵۰-۴۵۰	۹۰۰	۴۵-۱۵	۳۰	۳
	لای و مارن	۲۰۰۰	۶۰۰-۲۰۰	۴۰۰	۱۸۰۰-۶۰۰	۱۲۰۰	۶۰-۲۰	۴۰	۴
	لای و مارن	۲۰۰۰	۹۰۰-۳۰۰	۶۰۰	۲۷۰۰-۹۰۰	۱۸۰۰	۷۵-۲۵	۵۰	۵
	مارن	۲۱۰۰	۱۵۰۰-۵۰۰	۱۰۰۰	۴۵۰۰-۱۵۰۰	۳۰۰۰	نیم فضا	۶	
مدل C	ماسه	۱۸۰۰	۲۲۵-۷۵	۱۵۰	۶۷۵-۲۲۵	۴۵۰	۱۵-۵	۱۰	۱
	شن ماسه ولای	۱۹۰۰	۳۷۵-۱۲۵	۲۵۰	۱۱۲۵-۳۷۵	۷۵۰	۳۰-۱۰	۲۰	۲
	ماسه ولای	۱۹۰۰	۳۰۰-۱۰۰	۲۰۰	۹۰۰-۳۰۰	۶۰۰	۴۵-۱۵	۳۰	۳
	ماسه و مارن و	۲۰۰۰	۶۰۰-۲۰۰	۴۰۰	۱۸۰۰-۶۰۰	۱۲۰۰	۶۰-۲۰	۴۰	۴
	لای و مارن	۲۰۰۰	۹۰۰-۳۰۰	۶۰۰	۲۷۰۰-۹۰۰	۱۸۰۰	۷۵-۲۵	۵۰	۵
	مارن	۲۱۰۰	۱۵۰۰-۵۰۰	۱۰۰۰	۴۵۰۰-۱۵۰۰	۳۰۰۰	نیم فضا	۶	

جدول ۲- نحوه پارامتر سازی منحنی پاشش تجربی جهت ارزیابی الگوریتم ACO

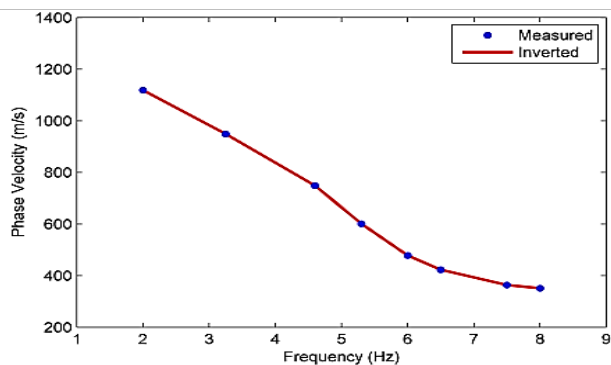
	لا	ضخامت (m)	VP (m/s)	VS (m/s)	وزن مخصوص (kg/m ³)
داده های میدانی	۱	۵۰-۱۰	۱۲۰۰-۴۰۰	۴۰۰-۱۰۰	۱۸۰۰
	۲	۵۰-۱۰	۲۰۰۰-۸۰۰	۱۰۰۰-۳۰۰	۲۰۰۰
	۳	۶۰-۲۰	۳۰۰۰-۱۰۰۰	۱۲۰۰-۵۰۰	۲۰۰۰
	۴	نیم فضا	۴۰۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۸۰۰	۲۱۰۰



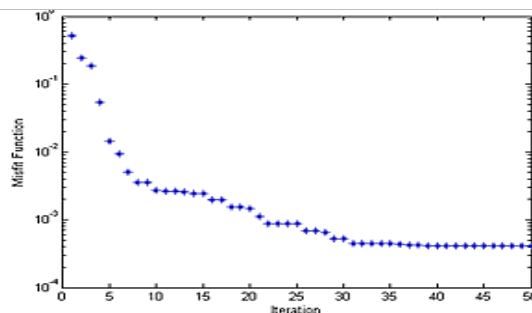
(ب)



(الف)



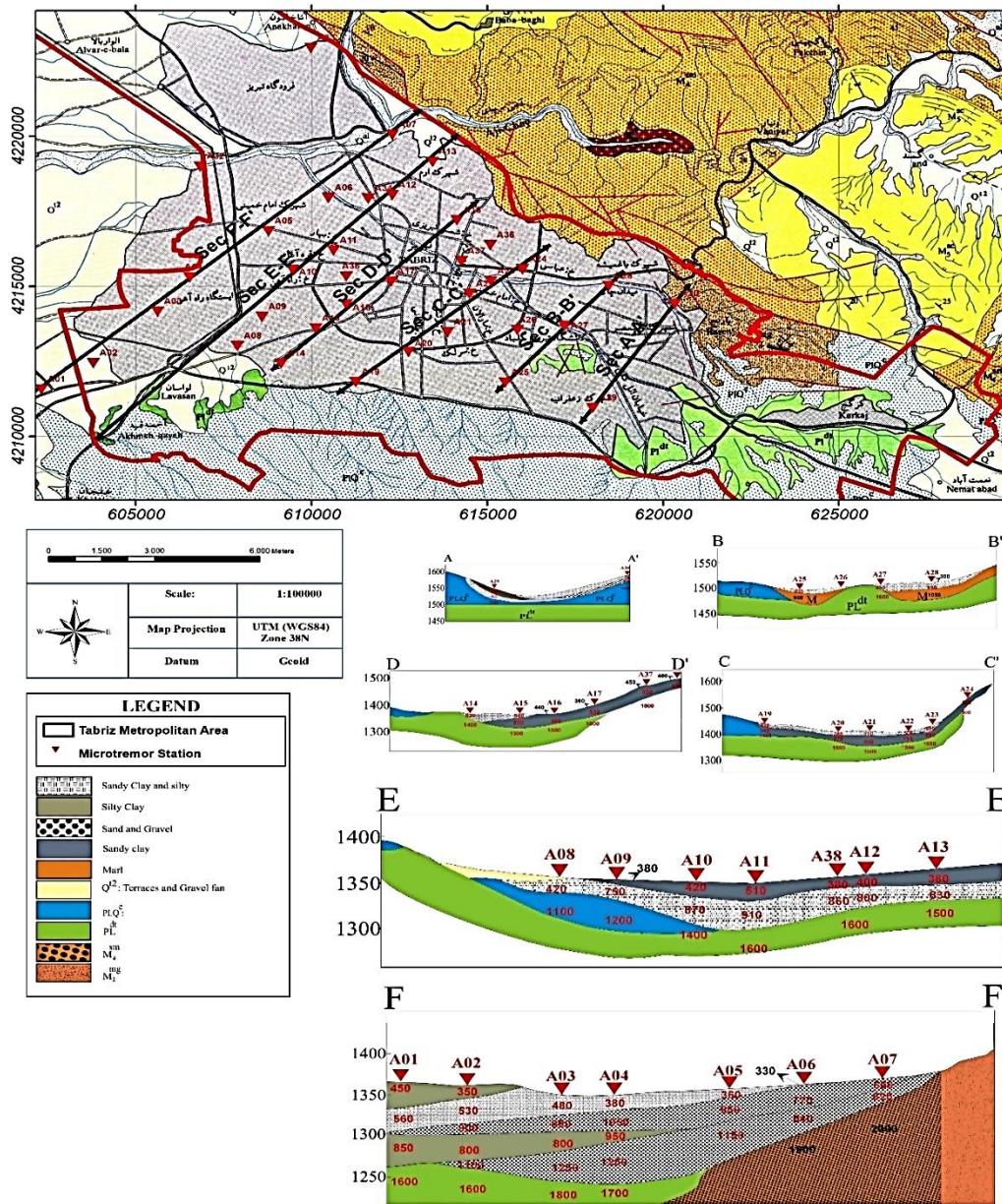
(د)



(ج)

شکل ۸- وارون داده‌های تجربی، الف) لاگ گمانه، ب) پروفیل سرعت موج برشی (خط آبی) و فضای جستجو (نقطه چین سبز)، ج) منحنی پاشش تجربی (نقاط آبی) و منحنی پاشش مدل‌سازی شده (خط قرمز)، د) تغییرات تابع عدم برازش در برابر تکرار

Location of Microtremor Sites in Tabriz City (Iran)



شکل ۹- مکان نقاط برداشتی آرایه‌های میکروترمور و پروفیل‌های مدل‌سازی شده VS بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تبریز (واحد سرعت موج برشی در پروفیل‌ها m/s).

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی این مطالعه ارائه الگوریتمی جدید به منظور بهبود وارون سازی منحنی پاشش امواج سطحی برای بدست آوردن ساختار سرعتی موج برشی زمین است. الگوریتم های هوش جمعی مانند کلونی مورچه به عنوان شاخه ای از روش های جستجوی سراسری، در مورد حل مسائل غیرخطی با اکسترمم های چندگانه بسیار خوش رفتار هستند. حساسیت کم این الگوریتم ها نسبت به مقادیر کمینه یا بیشینه محلی بر جذابیت آن ها می افزاید. همانند سایر روش های جستجوی سراسری، این روش ها نیازی به مدل اولیه ندارند و تمام فضای پارامترهای مدل که از قبل برای حل مسئله تعریف می شوند، مورد جستجو قرار می گیرند. لذا، امکان به تله افتادن در کمینه یا بیشینه محلی وجود ندارد. در این الگوریتم ها تعداد لایه ها زیاد و مرز مقادیر سرعت و ضخامت بسیار گسترده انتخاب می شوند. روند عمومی که در آن مقادیر سرعت با عمق افزایشی یا کاهش می باشد، بر اساس شکل منحنی پاشش و با استفاده از قانون سرانگشتی $\lambda/2$ قابل تعیین است. اجرای چندباره الگوریتم ها برای بدست آوردن مدل نهایی در بهبود نتایج وارون مؤثر است. بطوریکه با استفاده از این روش مدل میانگین و انحراف معیار هر یک از پارامترهای مدل قابل تعریف است. برای آزمودن کارایی الگوریتم های معرفی شده، از وارون منحنی پاشش حاصل از سه حالت مختلف مدل شش لایه استفاده شد. از آنجایی که سرعت موج طولی اثر کمی نسبت به سرعت موج برشی در منحنی پاشش امواج سطحی دارد، وارون هم زمان هر دو پارامتر جهت بهبود نتایج انجام شد. بر خلاف روش لرزه نگاری شکستی، استفاده از وارون امواج سطحی در تفکیک لایه های با سرعت پایین عملکرد خوبی دارد. سطح خطای محاسبه سرعت موج برشی تمام لایه ها پایین بوده ولی خطای نسبی پارامتر ضخامت خصوصاً در لایه های میانی زیاد است. به طور کلی، استفاده از الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه نشان از وارون موفق منحنی پاشش امواج سطحی مصنوعی دارد. همچنین، در این تحقیق از الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه در کنار الگوریتم همسایگی استفاده شد. مقایسه الگوریتم ارائه شده با الگوریتم همسایگی مورد استفاده در نرم افزار ژئوپسی نشان از همگرایی و دقت بالاتر الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه دارد. مدل سازی دو بعدی به طور کلی نشان می دهد سرعت موج برشی در شهر تبریز با افزایش عمق به سرعت افزایش می یابد و در لایه های سطحی نیز بجز لایه های هوازده، مقادیر سرعت ها متوسط می باشد. از مهمترین پارامترهای موثر میتوان به تعدادالمان های جستجو کننده، تعداد لایه ها و ضریب پواسون اشاره کرد. به طور کلی، استفاده از الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه نشان از وارون موفق منحنی پاشش امواج سطحی مصنوعی

دارد. همچنین، در این تحقیق از الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه در کنار الگوریتم همسایگی استفاده شد. بعلاوه محدودیت تعداد و عمق نمونه برداری، دست خوردگی نمونه ها، ایجاد نوفه ها و نویزها و عوامل دیگر، میتوان گفت نمی توان به طور مستقیم از این الگوریتم برای تعیین نوع خاک بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ استفاده نمود. ولی می توان یک دید اولیه ی کم هزینه، به همراه تخمینی از سرعت موج برشی ارائه کرد. همچنین، مطالعه پروفیل های سرعت موج برشی نتایج نشان می دهد که در قسمت شمال و جنوب، سرعت موج برشی بیشتر است که نشان دهنده بالا آمدگی سنگ بستر می باشد.

منابع

1. Yang J, Lin N, Zhang K, Jia L, Zhang D, Li G, Zhang J. A Parametric Study of MPSO-ANN Techniques in Gas-Bearing Distribution Prediction Using Multicomponent Seismic Data. Remote Sensing. 2023;15(16):3987. <https://doi.org/10.3390/rs15163987>
2. Poormirzaee R. S-wave velocity profiling from refraction microtremor Rayleigh wave dispersion curves via PSO inversion algorithm. Arab J Geoscience. 2016; 9:673. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2701-6>
3. Maghami S, Sohrabi-Bidar A, Bignardi S, Zarean A, Kamalian M. Extracting the shear wave velocity structure of deep alluviums of "Qom" Basin (Iran) employing HVSr inversion of microtremor recordings. Journal of Applied Geophysics. 2021;185:104246. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104246>
4. Asare EN, Affam M, Ziggah YY. A stacked generalization methodology for estimating the uniaxial compressive strength of rocks. Smart Constr Sustain Cities. 2023;1(1):8. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00010-6>
5. Renalier F, Jongmans D, Savvaidis A, Wathelet M, Endrun B, Cornou C. Influence of parameterization on inversion of surface wave dispersion curves and definition of an inversion strategy for sites with a strong Vs contrast. Geophysics. 2010;75(6): B197-209. <https://doi.org/10.1190/1.37306556>
6. Trung GK, Vinh ND. An overview of seismic ground response methods over the world and their applications in Vietnam. Geofizicheskiy Zhurnal. 2021;43(2):131-51. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i2.230193>
7. Somerville PG, Graves RW. Characterization of earthquake strong ground motion. Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions.

- Established approaches and new perspectives. *Geophysics*. 2010;75(5):75A83-102. <https://doi.org/10.1190/1.3479491>
19. Foti S, Comina C, Boiero D, Socco LV. Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009; 1;29(6):982-93. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.11.004>
20. Cercato M. Addressing non- uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion. *Geophysical Prospecting*. 2009; 5;57(1):27-47. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00719.x>
21. Yamanaka H, Ishida H. Application of genetic algorithms to an inversion of surface-wave dispersion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1996; 1;86(2):436-44. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860020436>
22. Pezeshk S, Zarrabi M. A new inversion procedure for spectral analysis of surface waves using a genetic algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2005; 1;95(5):1801-8. <https://doi.org/10.1785/0120040144>
23. Dal Moro G, Pipan M, Gabrielli P. Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and marginal posterior probability density estimation. *Journal of Applied Geophysics*. 2007; 1;61(1):39-55. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.04.002>
24. Beaty KS, Schmitt DR, Sacchi M. Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure. *Geophysical Journal International*. 2002;1;151(2):622-31. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01809.x>
25. Wathelet M, Jongmans D, Ohrnberger M. Surface- wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near-surface geophysics*. 2004;18;2(4):211-21. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2004018>
26. Socco, LV, Boiero, D. Improved Monte Carlo inversion of surface wave data. *Geophysical Prospecting*. 2008; (56): 357-371. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00678.x>
27. Khanmohammadi, M, Razavi, S. Proposing New Artificial Intelligence Models to Estimate Shear Wave Velocity of Fine-grained Soils: A Case Study. *International Journal of Engineering*. 2024; (37): 1164-1174. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.06c.13>
28. Anushka, J, Balasubramanian, RC, Krishna, M, Linga, R. A new machine learning approach for estimating shear wave velocity profile using borelog data. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024; (177):108424 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108424>
- 2003:1811-28. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2407-z>
8. Hunter JA, Benjumea B, Harris JB, Miller RD, Pullan SE, Burns RA, Good RL. Surface and downhole shear wave seismic methods for thick soil site investigations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2002; 1;22(9-12):931-41. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00117-3](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00117-3)
9. Olutoki JO, Zhao J, Siddiqui NA, Elsaadany M, Haque AE, Akinyemi OD, Said AH, Zhao Z. Shear wave velocity prediction: A review of recent progress and future opportunities. *Energy Geoscience*. 2024; 10:100338. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100338>
10. Dasios, McCann, Astin, McCann, Fenning. Seismic imaging of the shallow subsurface: shear- wave case histories. *Geophysical Prospecting*. 1999;47(4):565-91. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1999.00138.x>
11. Jongmans D. L'application de Méthodes de prospection sismique pour la caractérisation des sols en génie parasismique. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*. 1992; 46:63-9. <https://doi.org/10.1007/BF02595035>
12. Kovach RL. Seismic surface waves and crustal and upper mantle structure. *Reviews of Geophysics*. 1978;16(1):1-3. <https://doi.org/10.1029/RG016i001p00001>
13. Gadallah MR, Fisher R, Gadallah MR, Fisher R. Seismic data processing. *Exploration Geophysics*. 2009:85-148. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85160-8_5
14. Castellani A, Zembaty Z. Stochastic modeling of seismic surface rotations. *Natural hazards*. 1994; 10: 181-91. <https://doi.org/10.1007/BF00643451>
15. Roberts JC, Asten MW. Resolving a velocity inversion at the geotechnical scale using the microtremor (passive seismic) survey method. *Exploration geophysics*. 2004;35(1):14-8. <https://doi.org/10.1071/EG04014>
16. McMechan, GA, Yedlin, MJ. Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*. 1981; (46): 869-874. <https://doi.org/10.1190/1.1441225>
17. Luo, Y, Xia, J, Miller, RD, Xu, Y, Liu, J, Liu, Q. Rayleigh-wave mode separation by high-resolution linear Radon transform. *Geophysical Journal International*. 2009; 179(1):254-264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04277.x>
18. Socco LV, Foti S, Boiero D. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models—

29. Bekdaş G, Aydın Y, Işıkdag U, Nigdeli SM, Hajebi D, Kim TH, Geem ZW. Shear Wave Velocity Prediction with Hyperparameter Optimization. *Information*. 2025 Jan 16;16(1):60. <https://doi.org/10.3390/info16010060>
30. Dorigo, M, Maniezzo, V, Colorni, A. The Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1996; (26): 29-41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
31. Angardi, S, Poursorkhabi, RV, Shirvanehdeh, AZ, Dabiri, R. Vs Profiling by the Inversion of Rayleigh Wave Ellipticity Curve Using a Hybrid Artificial Intelligence Method. *Pure and Applied Geophysics*, 2024; 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03514-z>
32. Khalili-Maleki M, Poursorkhabi RV, Nadiri AA, Dabiri R. Prediction of hydraulic conductivity based on the soil grain size using supervised committee machine artificial intelligence. *Earth Science Informatics*. 2022;15(4):2571-83. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00848-x>
33. Poursorkhabi RV, Ghasempour R. Possibilities to use the meta model and classical approaches to evaluate the impact of hydraulic conditions in the prediction of the critical submergence depth ratio. *Water Supply*. 2019; 19(4):1055-65. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.153>
34. Poursorkhabi, RV, Gharehaghaji, AH, Naseri, A. An Investigation of the Performance of the ANN Method for Predicting the Base Shear and Overturning Moment Time-Series Datasets of an Offshore Jacket Structure. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 2023; 14(4), 79-93. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.04.007>
35. Nemati, Sh, Basiri, ME. Text-independent speaker verification using ant colony optimization-based selected features. *Expert Systems with Applications*. 2011; (38): 620-630. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.011>
36. Haskell, NA. The dispersion of surface waves on a multi-layered medium. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1953;(43):17-34. <https://doi.org/10.1785/BSSA0430010017>