

## تخمین پروفیل سرعت موج برشی با استفاده از وارون‌سازی همزمان امواج میکروترمور و شکست مرزی با استفاده از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه

راشد پورمیرزائی<sup>۱\*</sup>، رسول حمیدزاده مقدم<sup>۲</sup> و احمد زارعان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران

۳. استادیار، گروه عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

(دریافت: ۹۳/۱۱/۶، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

### چکیده

مطالعه و مدل‌سازی ویژگی‌های سرعتی مناطق نزدیک سطح زمین به دلیل ارتباط مستقیم آن با تأسیسات شهری واقع بر روی آن، از لحاظ ژئوتکنیکی و مهندسی زلزله از اهمیت خاصی برخوردار است. در سال‌های اخیر میکروترمور شکست مرزی (ReMi) برای تخمین منحنی‌های پاشش و در نهایت مدل‌سازی سرعت موج برشی، به دلیل هزینه کم و سرعت زیاد برداشت داده‌ها، مورد استقبال قرار گرفته است. اما مشکل اساسی در پردازش این داده‌ها، وارون‌سازی منحنی پاشش جهت تخمین سرعت امواج برشی است. در مقاله حاضر سعی شده است با پیشنهاد وارون‌سازی همزمان امواج ReMi (امواج ریلی) و امواج انکساری (زمان سیر امواج) با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه و استفاده از مفهوم جبهه پارتو، تخمینی از ساختار سرعت موج برشی ارائه شود. برنامه الگوریتم گفته شده در محیط متلب نوشته شده است. روش پیشنهادی در ابتدا به وسیله مدل‌های مصنوعی ارزیابی شد و در ادامه برای ارزیابی بیشتر روی داده‌های تجربی اعمال شد. بدین منظور یک ایستگاه در جنوب تبریز که بیشتر در برگزیده واحدهای سنگی میوسن-پلیوسن و رسوبات آذرآواری هستند، برداشت شد. در این ایستگاه داده‌های میکروترمور و لرزه‌نگاری انکساری در آرایه‌ای خطی به طول ۱۱۰ متر جمع‌آوری شد. نتایج به دست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و با روش وارون‌سازی منفرد داده ReMi با استفاده از روش وارون‌سازی گروه ذرات مقایسه شد. نتایج وارون‌سازی، در مورد مدل‌های مصنوعی و نیز داده‌های تجربی بیانگر عملکرد پذیرفتنی الگوریتم پیشنهادی، به عنوان روشی مؤثر در وارون‌سازی همزمان داده‌های ژئوفیزیکی، در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم است. این الگوریتم راهکاری مناسب برای کاهش عدم یکتایی نتایج وارون‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، امواج انکساری، بهینه‌سازی چندهدفه، سرعت موج برشی، میکروترمور، وارون‌سازی همزمان.

### ۱. مقدمه

می‌توان طراحی‌های شهرسازی و ساخت سازه‌های ویژه را با کمترین آسیب‌پذیری ممکن اجرا کرد؛ از جمله روش‌های کارآمد در این مطالعات روش‌های ژئوفیزیکی است که از آن جمله می‌توان روش‌های لرزه‌ای شکست مرزی، آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW) و آنالیز چندکاناله امواج سطحی (MASW) را نام برد. بیشتر روش‌های ژئوفیزیکی به دلایل مختلف دارای محدودیت‌هایی مانند عدم کاربرد در محیط‌های شهری و سایر محیط‌ها به دلیل وجود نوفه زیاد یا هزینه فراوان است، اما با پیشرفت‌های اخیر روش‌هایی برای رفع این محدودیت‌ها ایجاد شده است. از جمله روش‌های نوین

اثر ساختگاه از مهم‌ترین جنبه‌های ارزیابی تحلیل خطر لرزه‌ای به‌شمار می‌آید. امروزه کاملاً روشن است که بهترین روش برای کاهش خسارت‌های ناشی از زمین‌لرزه، طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر آن، براساس ویژگی‌های مهندسی زلزله و ژئوتکنیکی ساختگاه و نوع کاربری آن‌هاست (موسوی بفرولی و همکاران، ۱۳۹۳). شرایط محلی ساختگاه بر همه خصوصیات مهم جنبش نیرومند زمین شامل دامنه، محتوای فرکانسی و دوام، اثر درخورملاحظه‌ای می‌گذارد (گراسیاز-جرز و همکاران، ۲۰۰۸؛ آپوستولیدیس و همکاران، ۲۰۰۴). با شناخت اثر ساختگاه

می‌توان به داده‌های میکروترمور اشاره کرد که با توجه به دقت نسبی و سرعت آن بسیار حائز اهمیت است (تاکشی و همکاران، ۲۰۰۶؛ اوکادا، ۲۰۰۶). با استفاده از این روش و با آرایه‌های مناسب می‌توان چشمه‌های لرزه‌ای همانند گسل‌ها را تشخیص داد که در بسیاری موارد در حوضه‌های آبرفتی (محل احداث بیشتر شهرها) پنهان هستند.

روش ReMi (ریزلرزه‌های با فرکانس بالا) که توسط لویی (۲۰۰۱) ارائه شده، در سال‌های گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است و روشی آسان، کم‌هزینه و عملی (به دلیل بی‌نیازی به منبع انفجار) برای استفاده در شهرهاست. روش ReMi روشی مناسب برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی است که با استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار انکساری و با گیرنده‌های معمولی برداشت می‌شود. محدوده فرکانسی مورد مطالعه در روش میکروترمور شکست مرزی بین ۵ تا ۲۰ هرتز است، اما از مهم‌ترین مشکلات این داده‌ها، مانند سایر روش‌های مبتنی بر امواج سطحی، نبود جواب یکتا در وارون‌سازی منحنی پاشش است (دالمورو و پیمان، ۲۰۰۷؛ فوتی، ۲۰۱۲؛ کوزلوسکی، ۲۰۰۱). برای غلبه بر این مشکل در این مطالعه سعی شده است با استفاده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی مانند روش لرزه‌انکساری این ضعف تا حدود زیادی کاهش یابد. همچنین می‌توان از روش مقاومت ویژه برای کسب اطلاعات مفید در خصوص سنگ بستر و ساختارهای زیر سطحی (گسل‌ها) استفاده کرد.

حل مسائلی که دارای دو یا چند هدف برای بهینه‌سازی هستند، در چند سال اخیر بسیار متداول شده و مورد توجه قرار گرفته است. این مسائل چندهدفه را می‌توان با برنامه‌نویسی بر پایه روش‌های قطعی (حساب دیفرانسیل و ...) یا با استفاده از روش‌های تصادفی (روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری) حل کرد. در بین روش‌های فراابتکاری موجود (الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه و ...) الگوریتم‌های تکاملی به دلیل کاربرد آسان و کارایی فراوان آن مورد توجه بسیاری قرار گرفته است

(دب و همکاران، ۲۰۰۲؛ زیتزلر و تیله، ۱۹۹۹). طبق مطالعات انجام گرفته، ۹۰ درصد از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه شامل تخمین جبهه پارتو برای این مسائل است. اساس بیشتر این روش‌ها برای حل این مسائل الگوریتم‌های فراابتکاری است که ۷۰ درصد این روش‌ها برمبنای روش‌های تکاملی بوده است. اولین الگوریتم ژنتیک چندهدفه، بردار ارزیابی الگوریتم ژنتیک (VEGA) بود که توسط شافر پیشنهاد شد (شی و ابرهات، ۱۹۹۸). بعد از آن چندین الگوریتم تکاملی چندهدفه پیشنهاد شد که شامل الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه بودند. از آن‌ها می‌توان الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ (NPGA)، الگوریتم ژنتیک وزنی (WBGA) و الگوریتم ژنتیک با وزن‌دهی تصادفی (RWGA) را نام برد. وجود این الگوریتم‌های متعدد در روش ژنتیک بیانگر قابل‌اعتماد بودن این روش است که در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است (شی و ابرهات، ۱۹۹۸). در این مقاله برای تخمین سرعت برشی وارون‌سازی همزمان داده‌های ReMi و امواج لرزه‌انکساری از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه و مفهوم جبهه پارتو استفاده شده است. این روش وارون‌سازی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک کارایی بسیاری دارد. استفاده از جبهه پارتو می‌تواند معیاری کیفی برای ارزیابی نتایج و نیز تحلیل مناسب بودن مدل فرضی اولیه و فضای جست‌وجو باشد. ابتدا الگوریتم پیشنهاد شده برای وارون‌سازی داده‌های میکروترمور و شکست مرزی در نرم‌افزار متلب، نوشته و به وسیله مدل‌های فرضی و داده‌های واقعی ارزیابی شد. داده‌های تجربی (میکروترمور شکست مرزی و لرزه‌نگاری انکساری) در این مطالعه از طراحی یک ایستگاه، به صورت آرایه خطی به طول ۱۱۰ متر در جنوب تبریز، برداشت شد. داده‌های لرزه‌ای (میکروترمور و شکست مرزی) با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار OYO برداشت شد. در برداشت داده‌های میکروترمور شکست مرزی از ۱۲ گیرنده ۴/۵ هرتز با فواصل ۱۰ متر و در برداشت داده‌های انکساری از ۲۴ گیرنده با فواصل ۵ متر استفاده شد. شناخت صحیح

برخی از پارامترهای مهم مدل به دست می آیند و برای وارون سازی داده های دوم، به عنوان اطلاعات اولیه و یک محدودیت به کار می روند. علاوه بر نقش مؤثر فاعل در انتخاب داده هایی که در ابتدا وارون سازی می شوند، ممکن است توجهی به دقت کم یک روش نشده باشد و در نتیجه خروجی اشتباه وارون سازی اول، تأثیر مضاعف در ارائه مدل زمین شناسی نهایی داشته باشد. مدل دیگر برای ترکیب روش های ژئوفیزیکی، وارون سازی همزمان نامیده می شود. وارون سازی همزمان چند داده ژئوفیزیکی در یک منطقه موجب کاهش ابهام می شود که در ذات یک روش منفرد وجود دارد. در روش وارون سازی همزمان، یک مدل زیرسطحی در ارتباط با خصوصیات فیزیکی متفاوت از داده های ژئوفیزیکی مختلف تخمین زده می شود. در وارون سازی همزمان، انواع روش ها توسط یک تابع هدف وارون می شوند و خصوصیات ژئوفیزیکی می تواند از طریق روابط پتروفیزیکی، مشابهت های ساختاری یا روابط آماری به یکدیگر مرتبط شوند (بوچدا و همکاران، ۲۰۱۲). بسیاری از محققان از وارون سازی همزمان در زمینه مطالعات ژئوفیزیکی بهره برده اند که از جمله آن ها می توان به ووزوف و ژوپ (۱۹۷۵)، کوزلوسکی (۲۰۰۱)، دالمورو (۲۰۱۰) و پورمیرزائی و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد. همراه با پیشرفت علوم کامپیوتر و توسعه الگوریتم های موجود در زمینه بهینه سازی، ابهام و عدم یکتایی جواب در بسیاری از مسائل مهندسی نیز روبه کاهش بوده است. از جمله روش های موفق در بهینه سازی چند تابع هدف، استفاده از مفهوم بهینه سازی چندهدفه است که همزمان می تواند بهترین جواب یا جواب ها را برای چند تابع هدف ارائه کند. از مفهوم بهینه سازی چندهدفه در وارون سازی همزمان داده های ژئوفیزیکی می توان بهره برد. استفاده از این مفهوم در وارون سازی داده های ژئوفیزیکی بسیار جدید است که مطالعات انجام گرفته (دالمورو و پیمان، ۲۰۰۷) بیانگر نتایج قابل قبول و ارائه مدل صحیح تر در مقایسه با روش های دیگر است.

ویژگی های سرعتی در این ایستگاه می تواند کمک ارزشمندی در مطالعه ویژگی های سرعتی آبرفت ها در سایر مناطق شهر تبریز باشد؛ چراکه آبرفت شهر تبریز از فرسایش ارتفاعات اطراف شهر حاصل شده است که ضخامت این رسوبات نیز به سمت مرکز شهر افزایش می یابد؛ بنابراین شناخت دقیق سرعت موج برشی این نواحی می تواند در مطالعه ریزپهنه بندی لرزه ای شهر تبریز بسیار مفید باشد. همچنین در سال های اخیر توسعه ساخت وسازها در این نواحی که عمدتاً دارای رسوبات با ضخامت کم هستند، بسیار چشمگیر بوده است، اما مطالعات دقیقی در خصوص شناخت ساختار موج برشی در این نواحی انجام نگرفته است. همچنین جهت به تصویر کشیدن ساختارها و لایه های زیرسطحی و نیز سنگ بستر از روش مقاومت ویژه استفاده شد که به عنوان داده های کمکی در وارون سازی استفاده شد. برای ارزیابی بهتر الگوریتم بهینه سازی چندهدفه نتایج هم در مدل های مصنوعی و هم در داده های تجربی با روش وارون سازی الگوریتم گروه ذرات مقایسه شد. در پایان نتایج به دست آمده از داده های تجربی با اطلاعات لرزه نگاری درون چاهی موجود در مجاورت ایستگاه مورد مطالعه، مقایسه شد. نتایج بیانگر اهمیت وارون سازی همزمان در کاهش عدم یکتایی و در نتیجه افزایش صحت در تفسیر یافته هاست.

## ۲. وارون سازی همزمان

ترکیب روش های ژئوفیزیکی که به پارامترهای مختلف حساس اند، می توانند برای مدل سازی های مستقل به کار روند و سپس با یکدیگر مقایسه یا تلفیق شوند تا یک مدل زمین شناسی صحیح به دست دهند. این روش با وجود مدل سازی مفید، از نبود یک چارچوب کمی قوی رنج می برد. برای وارون سازی داده های مختلف ژئوفیزیکی و ترکیب آن ها برخی محققان وارون سازی سری (گایاردو و موجو، ۲۰۰۳) را پیشنهاد کردند. در این روش ابتدا داده های یک روش ژئوفیزیکی وارون سازی می شوند و

ملاحظه‌ای روی نمودار پاشش ندارد.

$$P = \log(0/23 + (kVp)^{0/25}) \quad (3)$$

که در آن،  $K = \frac{1}{(0/3048)}$ ، مقداری ثابت برای تبدیل فوت به متر است (گاردنر و همکاران، ۱۹۷۴). برای وارون‌سازی خطای جذر میانگین مربع‌ها به‌عنوان تابع هدف (OBF) در نظر گرفته شد (رابطه ۴).

$$OBF2 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_p} (v^{obs}_j - v^{cal}_j)^2}{n_p}} \quad (4)$$

که در آن،  $n_p$  تعداد نمونه‌ها،  $v^{obs}$  سرعت فاز مشاهده‌شده و  $v^{cal}$  سرعت فاز محاسبه‌شده است. به‌منظور حل مدل پیشرو و تخمین نمودار پاشش تئوری از کد ارائه‌شده توسط هرمن (۱۹۸۷) که براساس الگوریتم ماتریسی است، استفاده شد.

همچنین در مورد داده‌های شکست مرزی، زمان سیر  $t_n$  یک پرتو که در سطح بالایی  $n$  امین لایه شکست می‌یابد، با معادله (۵) بیان می‌شود:

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Z z_i \cos \theta_{in}}{v_i} \quad (5)$$

$$\theta_{in} = \sin^{-1}(v_i/v_n)$$

تابع هدف روش شکست مرزی بر طبق معادله (۶) است که در آن، هدف کمینه‌سازی زمان سیر مشاهده‌شده و محاسبه‌شده است.

$$OBF1 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_p} (t^{obs}_j - t^{cal}_j)^2}{n_p}} \quad (6)$$

در معادله (۶)  $n_p$  تعداد نمونه‌ها،  $t^{obs}$  زمان سیر مشاهده‌شده و  $t^{cal}$  زمان سیر محاسبه‌شده است. همچنین از مدل پیشرو پرتویابی (Ray tracing) یک‌بعدی برای زمان سیر امواج طولی، به‌منظور وارون‌سازی استفاده شد.

### ۳. بهینه‌سازی چندهدفه

فرایند بهینه‌سازی سیستماتیک و همزمان یک مجموعه از توابع هدف، بهینه‌سازی چندهدفه یا بردار بهینه‌سازی نامیده می‌شود (مارلر و آرورا، ۲۰۰۴). بهینه‌سازی چندهدفه در حقیقت یافتن مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری است که در ارتباط با مقدار بهینه بیشتر از یک هدف است. برخلاف بهینه‌سازی یک هدف که یک حل بهینه

شناخت پارامترهای تأثیرگذار در نمودار پاشش و امواج انکساری جهت طراحی هرچه بهتر الگوریتم وارون‌سازی همزمان و ایجاد ارتباط مناسب بین پارامترهای مشترک این داده‌ها در موفقیت 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 این پارامترها، سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها بیشترین تأثیر را دارند (لویی، ۲۰۰۱). در وارون‌سازی همزمان نمودار پاشش امواج ریلی و زمان سیر امواج انکساری تصمیم گرفته شد تا هردو پارامتر سرعت برشی و سرعت طولی برای تغییر و اختیار سرعت در فضای جست‌وجو به‌صورت آزاد تغییر کنند که این دو پارامتر توسط نسبت پواسون کنترل می‌شوند. همچنین ضخامت یک متغیر مشترک در نظر گرفته شد.

در مطالعه حاضر محدوده‌ای کلی برای نسبت سرعت طولی ( $v_p$ ) به سرعت برشی ( $v_s$ ) با توجه به رابطه (۱) در نظر گرفته شد:

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

سیس نسبت پواسون برابر با مقدار (۰/۴۸، ۰/۱) در نظر گرفته شد که رابطه فوق را می‌توان به شکل رابطه (۲) بیان کرد:

$$1/5 < \frac{v_p}{v_s} < 5 \quad (2)$$

البته محدوده تعریف‌شده برای نسبت پواسون با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و اطلاعات کمکی قابل تغییر و تنظیم است؛ به‌طور مثال در صورتی که لایه‌های زمین‌شناسی نزدیک سطح تحکیم یافته‌تر باشند، حد بالایی محدوده پواسون و نیز محدوده بالایی رابطه (۲) کاهش خواهد یافت.

برای هر مدل تولیدشده نسبت  $\frac{v_p}{v_s}$  بررسی می‌شود و در صورتی که در محدوده تعریف‌شده قرار نداشته باشد، تخمین این دو سرعت برای مدل مذکور تکرار می‌شود. همچنین برای تخمین چگالی می‌توان از رابطه ۳ استفاده کرد. با توجه به مطالعات انجام‌یافته چگالی تأثیر در خور

را ارائه می‌دهد، حل‌های بهینه زیادی در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌شود. از این رو بهینه‌سازی چندهدفه شامل روش‌های ویژه است که بیشتر از یک هدف را بررسی و نتایج را آنالیز می‌کند (رانگایا، ۲۰۰۹). در دهه اخیر بهینه‌سازی چندهدفه مورد توجه بسیاری از محققان و دانشمندان بوده است و رشد بسیار سریعی در زمینه کاربرد آن در علوم مختلف به خصوص در علوم مهندسی داشته است. جهت استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه آشنایی با مفاهیم پایه‌ای که در تعاریف زیر مطرح شده است، بسیار اهمیت دارد.

۳.۱. مفهوم غلبه (Dominate) یا مغلوب شدن یک حل از حل دیگر

در بررسی یک مسئله کمینه‌سازی معادله‌ای به شکل رابطه (۷) خواهیم داشت:

که محدود به شرایط روابط (۸) و (۹) است:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \vec{f}(\vec{x}) \\ & := [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})] \end{aligned} \quad (7)$$

$$g_i(\vec{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

که در آن، بردار تصمیم متغیرهاست و برای  $i = 1, 2, \dots, m$  تابع هدف به صورت  $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  بوده و توابع محدودیت مسئله  $g_i$  و  $h_j$  هستند که  $j = 1, 2, \dots, p$  (کوئلو کوئلو، ۲۰۰۲). برای توصیف مفهوم انتخاب بهینه، بیان چند تعریف دیگر ضرورت دارد که در ادامه توضیح داده می‌شود. در تمام تعاریف فرض بر کمینه‌سازی مسئله است.

تعریف اول:

برای دو بردار داده شده  $\vec{y}, \vec{x} \in \mathbb{R}^k$ ، می‌گوییم  $\vec{x} \leq \vec{y}$ ، اگر  $x_i \leq y_i$  برای تمام  $i = 1, 2, \dots, k$  برقرار باشد و همچنین می‌گوییم  $\vec{x}$  بر  $\vec{y}$  غلبه می‌کند،  $(\vec{x} < \vec{y})$  اگر  $\vec{x} \leq \vec{y}$  و  $\vec{x} \neq \vec{y}$  که شکل زیر یک بیان از این تعریف (غلبه یک هدف بر دیگری) برای مسئله‌ای با دو هدف است.

تعریف دوم:

می‌توان بیان کرد یک بردار متغیرهای تصمیم‌گیری

می‌گوییم بردار متغیرهای تصمیم‌گیری  $\vec{x}^* \in \mathcal{F} \subset \mathbb{R}^n$  (که  $\mathcal{F}$  فضای محتمل است) بهینه پارتو است اگر جواب‌های آن با توجه به فضای  $\mathcal{F}$  مغلوب نباشد. تعریف چهارم:

مجموعه جواب‌های بهینه پارتو  $\mathcal{P}^*$  به شکل رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند:

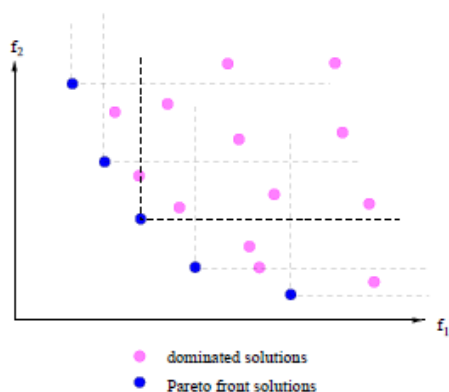
$$\mathcal{P}^* = \{\vec{x} \in \mathcal{F} | \vec{x} \text{ is pareto - optimal}\} \quad (10)$$

تعریف پنجم:

جبهه پارتو به شکل رابطه (۱۱) بیان می‌شود:

$$\mathcal{PF}^* = \{\vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k | \vec{x} \in \mathcal{P}^*\} \quad (11)$$

شکل ۱ نمونه‌ای از جبهه پارتو را در مورد یک مسئله دوهدفه نشان می‌دهد؛ بنابراین هدف اصلی مشخص کردن مجموعه پارتو از مجموعه  $\mathcal{F}$ ، از تمام بردارهای متغیر است که تعریف دوم و سوم را ارضا کنند. با این حال باید توجه کرد که در عمل به طور معمول تمام مجموعه بهینه پارتو مورد نظر نیست (به عبارتی یافتن حل‌های مختلفی که یک مقدار مشابه را در فضای تابع هدف ترسیم می‌کنند، مورد نظر نیست). همان‌طور که اشاره شد در مسائل چندهدفه یک حل مشخص وجود ندارد و چندین حل مختلف موجودند. به عبارتی هدف اصلی یافتن یک مجموعه جواب است که جواب‌های بهینه پارتو نامیده می‌شود.



شکل ۱. نمایش مفهوم غلبه و مغلوب شدن در یک فضای دو هدفه (کوئلو کوئلو، ۲۰۰۲).

### ۲.۳. الگوریتم ژنتیک

در میان روش‌های بهینه‌ساز الهام گرفته شده از طبیعت جانداران، الگوریتم ژنتیک از تکامل یافته‌ترین‌ها به شمار می‌رود. مفاهیم اولیه الگوریتم ژنتیک توسط هولاند و همکارانش در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی بیان شد و توسعه یافت. 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 یا یک کروموزوم گفته می‌شود. کروموزوم‌ها از واحدهای گسسته‌ای تشکیل شده‌اند که ژن نامیده می‌شوند. فرض می‌شود که هر ژن به صورت ارقام دودویی است. اساساً هر کروموزوم با یک حل یکتا در فضای هدف در ارتباط است. این فرایند نیازمند یک مکانیزم به نقش در آوردن است که رمزگذاری (coding) نامیده می‌شود (یانگ، ۲۰۱۰).

در حقیقت الگوریتم ژنتیک روی رمزگذاری مسائل کار می‌کند نه روی خود مسئله. الگوریتم ژنتیک روی یک مجموعه از کروموزوم‌ها عملیات اجرا می‌کند که جمعیت نامیده می‌شود. جمعیت در ابتدا به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. همان‌طور که جست‌وجو شروع می‌شود، جمعیت در برگیرنده حل‌های بهتر (مناسب‌تر) می‌شود تا اینکه همگرا می‌شود، به این معنا که به یک حل منفرد می‌رسد (دب و همکاران، ۲۰۰۲).

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. انتخاب پدر و مادر از کروموزوم‌های موجود و با توجه به اولویت‌های شایستگی صورت می‌گیرد. جهش فرایندی است 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 بدین وسیله کمک می‌کند تا جست‌وجو از یک بهینه محلی فاصله گیرد.

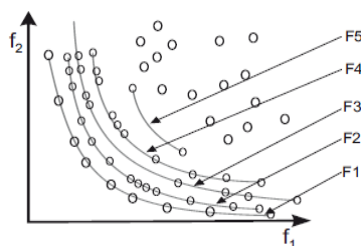
### ۳.۳. بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های تکاملی به‌ویژه برای حل مسائل چندهدفه، به دلیل توانایی آن‌ها برای اجرای یک مجموعه از عملیات به یک روش در یک زمان و نیز توانایی آن‌ها در حل مسائل با پارامترهای مختلف بدون نیاز به داشتن اطلاعاتی خاص در خصوص آن‌ها، بسیار مناسب هستند. روش الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های پرکاربرد و بااهمیت در بهینه‌سازی مسائل چندهدفه است. این روش با الهام از تکامل زیستی، زمان لازم برای همگرایی را کاهش می‌دهد (دب و همکاران، ۲۰۰۲).

الگوریتم ژنتیک چندهدفه یک روش جمعیت‌محور است که برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بسیار مناسب است. به‌طور کلی با اصلاح یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله یک هدفه می‌تواند یک مجموعه از چندین جواب نامغلوب در یک بار اجرای آن به دست آید. قابلیت الگوریتم ژنتیک برای جست‌وجوی همزمان نواحی گوناگون فضای حل، این امکان را فراهم می‌آورد که مجموعه گوناگونی از حل‌ها را برای مسائل پیچیده بیابد. عملگر پیوند الگوریتم ژنتیک از ساختار حل‌های خوب، با توجه به اهداف مختلف به منظور ایجاد حل‌های نامغلوب در بخش‌های بررسی‌نشده جهت پارتو، بهره می‌برد. به علاوه بیشتر الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه به اولویت‌بندی، مقیاس یا وزن‌دهی اهداف نیاز ندارند؛ بنابراین الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های فراابتکاری کارا و مؤثر در طراحی و بهینه‌سازی مسائل چندهدفه است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک روش Non-Dominate Sorting

ذرات با الگوریتم ژنتیک و مورچه برخی شباهت‌هایی دارد ولی از آن‌ها ساده‌تر است، از این رو که از عملگرهای تلاقی، جهش یا فرومون (pheromone) استفاده نمی‌کند و به‌جای 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.

این الگوریتم فضای تابع هدف را با تنظیم خط سیر ارگان‌های مجزا که ذرات نامیده می‌شوند، جست‌وجو می‌کند. این خط سیرها به شکل مسیرهایی تکه‌تکه (پاره‌خط) و شبه‌تصادفی 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 پیدا می‌کند که بهتر از هر محل پیدا شده قبلی است، به‌عنوان جریان جدید بهترین برای ذره  $i$  به‌روز می‌شود. یک جریان بهترین برای تمام  $n$  ذره در هر زمان  $t$  در خلال تکرارها وجود دارد. هدف یافتن بهترین در میان تمام جریان‌هاست تا زمانی که بعد از تعداد خاصی تکرار هدف دیگر بهبود نمی‌یابد. حرکت ذره به‌طور شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است (یانگ، ۲۰۱۰).

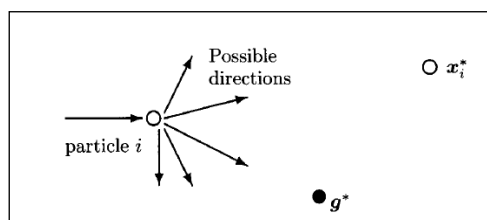


شکل ۲. طبقه‌بندی جمعیت بر مبنای رتبه در مغلوب‌شدگی آن‌ها در فضای اهداف (دب و همکاران، ۲۰۰۲).

Genetic Algorithm-II است. این روش توسط دب و همکاران (۱۹۹۴) ارائه شده است (زیتزلر و تیله، ۱۹۹۹). این الگوریتم در حقیقت بهینه‌شده الگوریتم NSGA است. در الگوریتم NSGA-II قبل از انتخاب و ورود سرگروه‌ها به مخزن، کل جمعیت بر حسب غیرمغلوب بودن امتیازدهی می‌شوند. عضوهایی که توسط هیچ عضو دیگری مغلوب نشده‌اند امتیاز یا رتبه مشخص (به‌طور مثال رتبه یک) دریافت می‌کنند و این مجموعه از سایر اعضا جدا می‌شود ( $F1, F2, \dots$  در شکل ۲). در ادامه مجموعه‌ای که رتبه بعدی (به‌طور مثال رتبه دو) را دارند، به‌عنوان یک مجموعه دیگر جدا می‌شوند و این طبقه‌بندی تا آنجا ادامه می‌یابد که تمام اعضای جمعیت در عضویت مجموعه‌های مشخص شده باشند. اعضای جبهه پارتو بر طبق تعداد مشخص شده برای آن از اعضای این مجموعه‌های تفکیک شده، انتخاب می‌شوند؛ بنابراین مجموعه اول که دارای ارزش بیشتری هستند، همواره شانس بیشتری برای حضور در جبهه پارتو یا حل‌های نهایی دارند. این راهبرد سبب همگرایی ذرات به مجموعه با ارزش بیشتر یا دارای عضوهای با ارزش‌تر می‌شود، درحالی که روش NSGA تنها از راه‌کار نخبه‌گزینی برای انتخاب سرگروه‌ها استفاده می‌کند (دب و همکاران، ۲۰۰۲).

#### ۴. روش بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO)

بهینه‌سازی گروه ذرات توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) توسعه داده شد. بهینه‌سازی گروه ذرات 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



شکل ۳. نمایش تصویری حرکت ذره در PSO، حرکت به سمت  $g^*$  و  $x_i^*$  برای هر ذره  $i$  (یانگ، ۲۰۱۰).

مطالعه، یک مدل مصنوعی (مدل A) مطالعه شد. در وارون‌سازی این مدل مصنوعی برای تولید منحنی پاشش مربوط به آن از محدوده فرکانسی ۵ هرتز تا ۲۰ هرتز استفاده شد. همچنین برای داده‌های شکست انکساری یک آرایش خطی از ۱۲ گیرنده با فواصل ۵ متر در نظر گرفته شد. پس از وارون‌سازی همزمان با روش پیشنهادشده، نتایج با روش وارون‌سازی تک‌هدفه یا منفرد داده میکروترموور شکست مرزی با استفاده از الگوریتم گروه ذرات مقایسه شد. برای وارون‌سازی مدل A با استفاده از NSGA-II تعداد افراد جمعیت، ۸۵ فرد و تعداد تکرار الگوریتم، ۶۰ بار در نظر گرفته شد. همچنین در روش گروه ذرات از ۷۰ ذره و ۴۷ تکرار استفاده شد. مدل A و فضای جست‌وجوی الگوریتم‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. همچنین مدل تخمینی در جدول ۲ و شکل ۴ و ۵ آمده است. در شکل ۶ جهت پارتوی به دست آمده از وارون‌سازی همزمان مدل A نشان داده شده است.

در سال‌های اخیر الگوریتم گروه ذرات که یکی از روش‌های بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات است، در زمینه‌های مختلفی از علوم به کار رفته است. این روش بهینه‌سازی روشی جدید و قوی در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص به کارگیری این روش در وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات پورمیرزائی و همکاران (۲۰۱۴)، سانگ و همکاران (۲۰۱۲) و نودت و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. در این مطالعه برای مقایسه نتایج حاصل از وارون‌سازی همزمان با یک روش وارون‌سازی تک‌هدفه، از وارون‌سازی گروه ذرات برای وارون‌سازی داده‌های ReMi استفاده شد.

۵. وارون‌سازی همزمان داده‌های میکروترموور شکست مرزی و لرزه انکساری (مدل مصنوعی)  
برای ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده در این

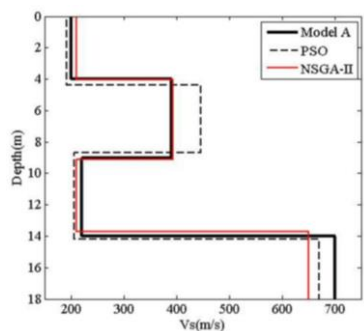
جدول ۱. مدل A و فضای جست‌وجو برای الگوریتم‌های وارون‌سازی

شماره لایه	Vs (m/s)	Vp (m/s)	H (m)	فضای جست‌وجو		
				Vs (m/s)	Vp (m/s)	H (m)
۱	۲۰۰	۴۰۰	۴	۳۰۰-۱۰۰	۶۰۰-۲۰۰	۶-۲
۲	۳۹۰	۷۰۰	۵	۶۰۰-۲۰۰	۱۰۰۰-۳۵۰	۷-۲
۳	۲۲۰	۴۳۰	۵	۳۳۰-۱۱۰	۵۴۰-۲۱۰	۷-۲
۴	۷۰۰	۱۱۵۰	نیم فضا	۱۰۰۰-۳۵۰	۱۷۰۰-۵۵۰	-

جدول ۲. مقایسه وارون‌سازی همزمان و منفرد (یک‌هدفه) مربوط به مدل مصنوعی A

پارامترها	وارون‌سازی همزمان	وارون‌سازی تک‌هدفه
	(NSGA-II)	(PSO)
Vs <sub>1</sub> (m/s)	۲۱۰	۱۹۳
Vs <sub>2</sub> (m/s)	۳۹۴	۴۴۶
Vs <sub>3</sub> (m/s)	۲۱۱	۲۰۷
Vs <sub>4</sub> (m/s)	۶۵۰	۶۷۱
H <sub>1</sub> (m)	۴/۰۵	۴/۴
H <sub>2</sub> (m)	۴/۵۸	۴/۳
H <sub>3</sub> (m)	۴/۶۱	۵/۵
Vp <sub>1</sub> (m/s)	۴۰۹	۴۷۴
Vp <sub>2</sub> (m/s)	۷۰۸	۶۶۲
Vp <sub>3</sub> (m/s)	۴۱۳	۵۱۱
Vp <sub>4</sub> (m/s)	۹۸۸	۱۱۰۲

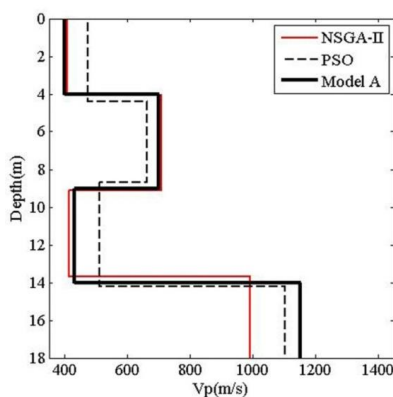




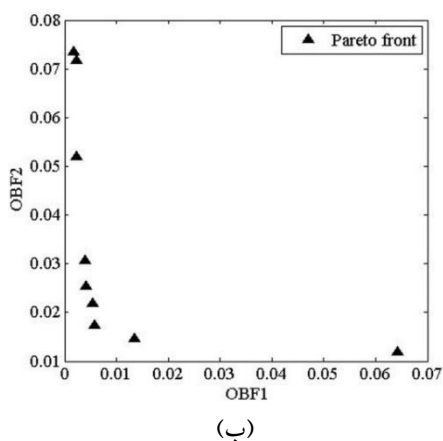
شکل ۴. پروفیل سرعت برشی تخمینی مدل A با استفاده از وارون‌سازی همزمان NSGA-II (خط قرمز) و وارون‌سازی منفرد منحنی پاشش با استفاده از الگوریتم PSO (خط چین سیاه).

سرعت برشی برای لایه سوم به ۳۰۰ تا ۵۵۰ متر بر ثانیه تغییر یافت و مانند حالت قبل وارون‌سازی همزمان انجام گرفت. همان‌طور که در شکل ۶-ب دیده می‌شود، یک کشیدگی در جبهه پارتو دیده می‌شود که بیانگر عدم فرض صحیح در وارون‌سازی یا کیفیت پایین نتایج تخمینی است.

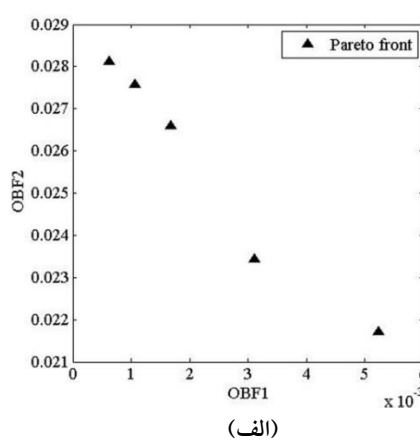
به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم وارون‌سازی همزمان پیشنهادشده و نیز اهمیت جبهه پارتو، در وارون‌سازی همزمان مدل A فضای جست‌وجو تغییر داده شد؛ به عبارتی یک فرض اشتباه در وارون‌سازی وارد شد تا اهمیت جبهه پارتو بررسی شود. در این حالت فضای جست‌وجو برای ضخامت لایه‌ها به ۱ تا ۳ متر و برای



شکل ۵. پروفیل سرعت طولی تخمینی مدل A با استفاده از وارون‌سازی همزمان NSGA-II (خط قرمز) و وارون‌سازی منفرد منحنی پاشش با استفاده از الگوریتم PSO (خط چین سیاه).



(ب)



(الف)

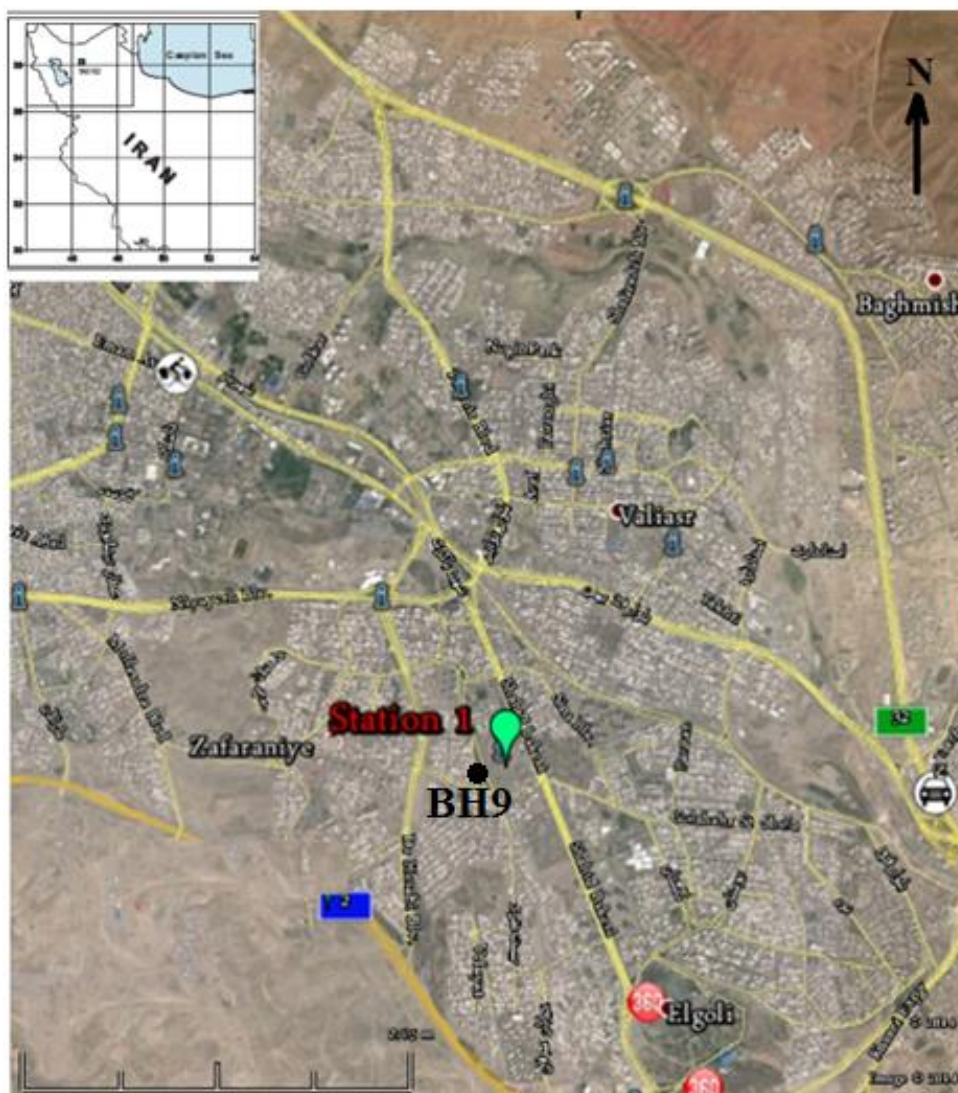
شکل ۶. جبهه پارتوی به‌دست‌آمده برای مدل A: (الف) جبهه پارتوی متقارن (بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم وارون‌سازی همزمان است) و (ب) جبهه پارتوی نامتقارن (کشیدگی به سمت یک هدف بیانگر فرض اشتباه در وارون‌سازی است).

### ۶. وارون‌سازی همزمان داده‌های تجربی

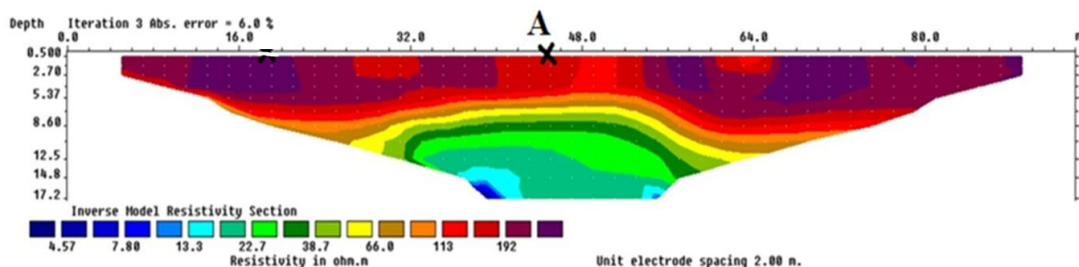
پس از ارزیابی الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک روی مدل مصنوعی در این بخش به وسیله داده‌های تجربی ارزیابی می‌شود. در این بخش یک نقطه از شهر تبریز مطالعه شد. موقعیت این نقطه (ایستگاه شماره ۱) روی نقشه ماهواره‌ای گوگل مشخص شده است (شکل ۷). در این نقاط دو نوع داده میکروترمور شکست‌مرزی (ReMi) و لرزه‌انکساری جمع‌آوری شد. سپس این داده‌های میکروترمور و لرزه‌انکساری همزمان مورد وارون‌سازی قرار گرفتند. همچنین داده‌های مقاومت ویژه (آرایش و نر) به‌عنوان داده‌های کمکی در تشخیص و تعیین محدوده‌های جست‌وجوی الگوریتم و

نیز ارائه اطلاعاتی در خصوص وضعیت لایه‌های زیرین و جنس این لایه به‌کار رفت (شکل ۸). برای جمع‌آوری داده‌های مقاومت ویژه از دستگاه ژئوالکتریک RESECS استفاده شد.

داده‌های لرزه‌ای (میکروترمور و شکست‌مرزی) با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار OYO با گیرنده‌های ۴/۵ و ۲۵ هرتز تهیه شد. همچنین از چکش به‌عنوان چشمه انرژی استفاده شد. برای پردازش داده‌ها (به‌دست آوردن نمودار پاشش، زمان سیر امواج و مقاومت ویژه) از نرم‌افزارهای تجاری موجود SeisImager/SW، SeisImager/Pickwin و Res2Dinv استفاده شد.



شکل ۷. موقعیت ایستگاه برداشت‌شده (Station 1) و گمانه BH9 در شهر تبریز (تصویر ماهواره‌ای Google Earth).

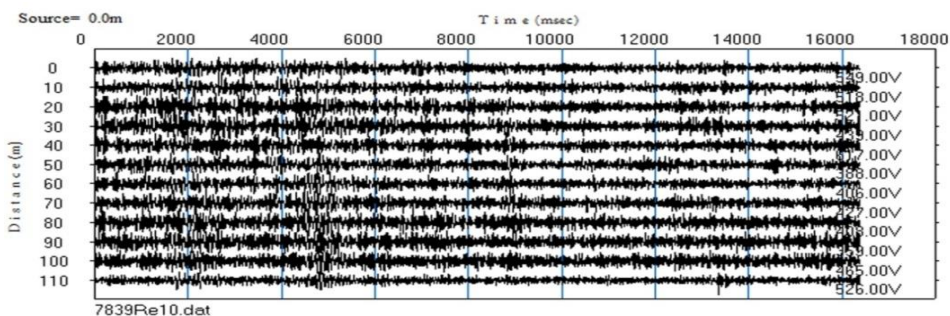


شکل ۸. مقطع مقاومت ویژه در ایستگاه شماره ۱، با توجه به این مقطع می‌توان یک روند کاهشی را در مقاومت ویژه از سطح به عمق تشخیص داد (A نقطه میانی پروفیل مورد مطالعه در ایستگاه شماره ۱).

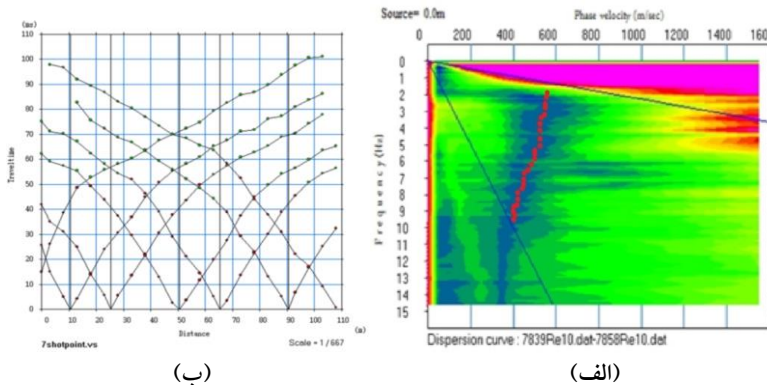
داده‌های میکروترموور، ۱۵ رکورد به مدت ۱۷ ثانیه برداشت شد. پس از برداشت داده‌ها و پردازش آن‌ها نمودار پاشش به دست آمد که از این نتایج مستقیماً برای وارون‌سازی همزمان استفاده شد. مراحل به دست آوردن نمودار پاشش با استفاده از نرم‌افزار SeisImager/Sw اجرا شد (شکل ۹ و الف-۱۰). پس از محاسبات لازم نمودار پاشش به صورت یک فایل متنی که شامل کندی و فرکانس است در برنامه نوشته شده است، استفاده شد. همچنین در این نقطه داده‌های شکست مرزی با استفاده از ۲۴ گیرنده ۲۶ هرتزی با فواصل ۵ متر برداشت شد. در برداشت داده‌های شکست مرزی برای هر برداشت ۳ تا ۵ بار تکرار و برنبارش (Stack) آن‌ها صورت گرفت. در این ایستگاه با جابه‌جایی چشمه انرژی با دورافت (Offset) مختلف، برداشت انجام گرفت (شکل ب-۱۰). برای وارون‌سازی همزمان با داده میکروترموور یک خط برداشت از داده‌های لرزه‌انکساری و منطبق با پروفیل میکروترموور انتخاب شد. برای وارون‌سازی همزمان، زمان رسید امواج شکست در نقطه فوق به صورت فایل متنی در برنامه نوشته شده در متلب، استفاده شد.

این ایستگاه در مجاورت جاده ائل‌گلی (داخل محوطه اداره آب منطقه ۴) قرار دارد. بر اساس گزارش حفاری‌ها در مطالعات صورت گرفته برای خط یک متروی تبریز، عمق سنگ بستر در جاده ائل‌گلی در حدود ۱۰ متر و عمق آب‌های زیرزمینی در حدود ۸ متر است. ناحیه ائل‌گلی تبریز و به‌طور کلی نیمه جنوبی تبریز روی لایه‌های آذر آواری سهند ساخته شده است. این لایه‌ها بیشتر توف، خاکستر و برش آتشفشانی هستند و گاه برخی از لایه‌های آن‌ها به سبب نبود ماتریس و سیمان مناسب در محیط رسوبی کمتر تحکیم یافته‌اند و با ضربه چکش فرو می‌ریزند، ولی بسیاری از لایه‌ها تحکیم یافته و سنگی شده‌اند و به گونه یک پی‌سنگ تمام‌عیار در عبوردهی امواج رفتار می‌کنند؛ البته یک ضخامت کم از مواد رسوبی کواترنری (Quaternary) که خود حاصل فرسایش و حمل این سنگ‌های بستر به گونه مخروط افکنه و تراس‌های (trace) رودخانه‌ای است، روی این لایه‌ها دیده می‌شود (فریدی و خداپنده، ۱۳۹۰؛ شرکت مهندسی مشاور تهران پادیر، ۱۳۸۸).

در این ایستگاه داده‌های میکروترموور با ۱۲ گیرنده ۴/۵ هرتزی و با فواصل ۱۰ متر برداشت شد. برای



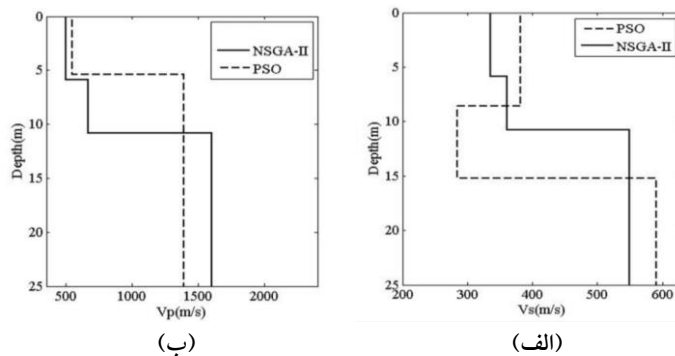
شکل ۹. امواج میکروترموور ثبت شده در ایستگاه شماره ۱ (مربوط به نقطه A).



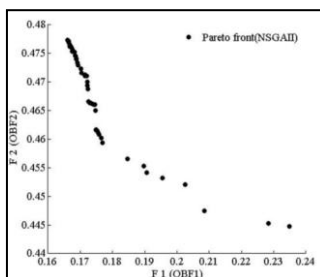
شکل ۱۰. داده‌های تجربی مربوط به ایستگاه شماره ۱: (الف) نمودار پاشش (نقاط قرمز) با انتخاب بیشینه دامنه در نمودار سرعت-فاز-فرکانس و (ب) نمودار زمان-مکان داده‌های لرزه‌انکساری که بیانگر وجود دولاية افقی در زیر این ایستگاه است.

جدول ۳. نتایج وارون‌سازی NSGA-II و وارون‌سازی PSO مربوط به ایستگاه شماره ۱ و فضای جست‌وجو

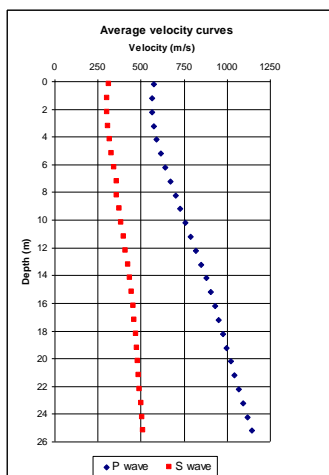
پارامترها	فضای جست‌وجو	NSGA-II	PSO
$H_1(m)$	۱۰-۳	۵/۸۹	۸/۶
$H_2(m)$	۹-۲	۴/۶۶	۷/۸
$Vp_1(m/s)$	۶۵۰-۴۰۰	۵۰۰	۵۷۱
$Vp_2(m/s)$	۱۰۰۰-۵۰۰	۶۶۵	۶۲۹
$Vp_3(m/s)$	۲۴۰۰-۹۰۰	۱۶۰۱	۲۱۱۰
$Vs_1(m/s)$	۴۰۰-۲۰۰	۳۲۱	۳۸۲
$Vs_2(m/s)$	۵۰۰-۲۵۰	۳۶۵	۲۷۵
$Vs_3(m/s)$	۶۵۰-۳۰۰	۵۴۷	۵۹۰



شکل ۱۱. (الف) پروفیل سرعت موج برشی به‌دست‌آمده برای ایستگاه شماره ۱ (نقطه A) با دو روش مختلف وارون‌سازی (در شکل فوق خط‌چین بیانگر وارون‌سازی فقط داده‌های میکروترمور، با روش PSO است) و (ب) پروفیل سرعت طولی به‌دست‌آمده برای ایستگاه شماره ۱ (نقطه A) با دو روش مختلف وارون‌سازی (در شکل فوق خط‌چین بیانگر وارون‌سازی فقط داده‌های انکساری، با روش PSO است).



شکل ۱۲. توزیع جبهه پارتو NSGA-II برای مدل سه لایه پذیرفته‌شده برای ایستگاه شماره ۱ (نقطه A).



شکل ۱۳. نمودار سرعت متوسط امواج طولی و برشی به دست آمده از گمانه BH9 در شهر تبریز (شرکت مهندسين مشاور تهران پادير، ۱۳۸۸).

جدول ۴. نتایج به دست آمده از ایستگاه مورد مطالعه و داده‌های لرزه‌نگاری درون چاهی (گمانه BH9) در شهر تبریز.

شماره لایه	عمق (متر)	سرعت متوسط موج برشی در گمانه BH9	
		مدل سرعت موج برشی در این مطالعه (متر بر ثانیه)	سرعت متوسط موج برشی در گمانه BH9 (متر بر ثانیه)
۱	۶/۲	۳۲۱	۳۴۶
۲	۱۰/۲	۳۶۵	۳۸۷
۳	۱۵/۲	۵۴۷	۴۷۳

روش‌های ژئوفیزیکی بر مبنای امواج سطحی نظیر میکروترمور شکست مرزی می‌تواند برای مطالعات لرزه‌ای، آسان، سریع و کم هزینه باشد؛ اما آنچه تفسیر این داده‌ها را با مشکل روبه‌رو کرده، وارون‌سازی امواج سطحی و در نتیجه ابهام در نتایج است. همچنین روش‌های بر مبنای امواج سطحی در تخمین ضخامت و تا حدودی سرعت طولی با ضعف روبه‌رو هستند. استفاده از لرزه‌انکساری در وارون‌سازی همزمان می‌تواند یک عامل مهم در رفع ابهام و نیز تخمین صحیح ضخامت و نیز سرعت شود. در این مطالعه راهکار وارون‌سازی همزمان امواج میکروترمور شکست مرزی و لرزه‌انکساری برای غلبه بر این مشکل پیشنهاد شد. الگوریتم وارون‌سازی همزمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مفهوم جبهه پارتو ابتدا به وسیله مدل مصنوعی آزمون شد و سپس برای ارزیابی بیشتر آن از داده تجربی استفاده شد. روش پیشنهاد شده در وارون‌سازی همزمان مدل مصنوعی در تخمین ضخامت لایه و نیز سرعت برشی و طولی بسیار موفق عمل کرد و در مقایسه با وارون‌سازی منفرد

در ادامه جهت ارزیابی نتایج، از اطلاعات لرزه‌نگاری درون چاهی که از یک گمانه (گمانه BH9) در مجاورت این ایستگاه برداشت شده است (شکل ۱۳)، استفاده شد. مقایسه سرعت موج برشی تخمینی با روش ارائه شده در این مطالعه و نتایج لرزه‌نگاری درون چاهی در جدول ۴ نشان داده شده است.

#### ۷. نتیجه‌گیری

شناخت ساختارهای سرعتی و شناخت ویژگی‌های لرزه‌ای یک منطقه می‌تواند کمک شایان توجهی در مسائل مرتبط با شهرسازی و مقابله با خسارات زلزله‌ها داشته باشد. با توجه به لرزه‌خیز بودن کشورمان به خصوص شهر تبریز، این مطالعات برای کاهش تلفات انسانی و مالی از اهمیتی مضاعف برخوردار است. یک عامل بسیار مهم در دقت پهنه‌بندی لرزه‌ای، تعداد ایستگاه‌های برداشتی است، اما هزینه بسیار روش‌های درون‌چاهی و سایر روش‌های مرسوم ژئوفیزیکی سبب کاهش تعداد ایستگاه‌های برداشتی می‌شود.



(تک هدفه) گروه ذرات از دقت بیشتری برخوردار بود. نکته دیگر که موجب برتری الگوریتم استفاده شده است، کاربرد مفهوم جبهه پارتو است. شکل جبهه پارتو می تواند یک معیار کیفی در خصوص قضاوت در فرض صحیح برای فضای جست و جو و در نتیجه صحت نتایج باشد. به طوری که در شکل ۶ دیده شد، ایجاد فرض اشتباه در فضای جست و جو سبب کشیدگی و عدم تقارن در جبهه پارتو می شود. این در حالی است که وارون سازی منفرد گروه ذرات با هر دامنه جست و جو یک حل را ارائه خواهد داد که در صورت عدم وجود اطلاعات کمکی و مهارت بالای مفسر، سبب ابهام و اشتباه در نتایج می شود. داده های تجربی در این مطالعه در قسمت جنوبی تبریز برداشت شد. این ایستگاه (ایستگاه شماره ۱) در مجاورت جاده ائل گلی قرار دارد.

با توجه به نتایج حاصل از داده های لرزه ای اندازه گیری شده و تغییرات مقاومت ویژه در آن، سه لایه زمین شناسی را می توان از هم تفکیک کرد (شکل ۸). لایه یا ناحیه اول با مقاومت ویژه بالا که تقریباً تا عمق ۶ متری قرار دارد. این ناحیه می تواند همان بخش رسوبات آبرفتی را 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 می شود که می توان آن را به عنوان ساخت های حفر شده 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 می تواند مواد آبرفتی تا حدی آبدار یا رسوبات دانه ریزتر در نظر گرفته شود. اما نواحی زیرین یک روند کاهشی و یک کاهش مقاومت شدید را نشان می دهد که بیانگر لایه ای توفی یا رسی است که می توان آن را سنگ بستر در نظر گرفت. عمق رسوبات در این ایستگاه کمتر از ۱۰ متر (حدود ۹ متر) تخمین زده می شود که ترکیبی از شن و ماسه تا ترکیبی از رس و ماسه است. این اطلاعات کمک ارزشمندی به تفکیک لایه بندی و سنگ بستر خواهد کرد. جهت وارون سازی همزمان فضای جست و جو و

مدل هایی با تعداد لایه های مختلفی در نظر گرفته شد، اما معیار انتخاب صحیح فضای جست و جو علاوه بر داده های مقاومت ویژه، جبهه پارتو بود. به طوری که در شکل ۱۲ دیده می شود شکل توزیع جبهه پارتو متقارن است. این در حالی است که در داده های انکساری یک مدل دولایه به نظر می رسد، اما با وارون سازی همزمان و استفاده از اطلاعات امواج سطحی یک لایه سرعتی با ضخامت کم آشکار شد. اطلاعات سرعتی به دست آمده در این ایستگاه همبستگی بسیار خوبی با اطلاعات زمین شناسی این منطقه دارد. همچنین مدل سرعتی تخمین زده شده در این ایستگاه توسط اطلاعات سرعتی حاصل از لرزه نگاری درون چاهی در گمانه BH9 (در مجاورت ایستگاه مورد مطالعه) راستی سنجی شد. این مقایسه با توجه به جدول ۴، بیانگر دقت مناسب مدل تخمینی سرعت در ایستگاه مورد مطالعه است.

با مقایسه نتایج کلی وارون سازی همزمان داده های میکروترمو و لرزه انکساری با وارون سازی منفرد آن ها، می توان بیان کرد که راهبرد وارون سازی همزمان می تواند موجب کاهش چشمگیر خطا در تفسیر شود. با بهره گیری از مفاهیم بهینه سازی چندهدفه می توان ابهام در تفسیر داده های ژئوفیزیکی را کاهش داد. استفاده از مفهوم جبهه پارتو می تواند در فهم مدل های صحیح، جهت وارون سازی بسیار مفید باشد. روش وارون سازی همزمان داده های میکروترمو و لرزه انکساری با استفاده از مفهوم الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش وارون سازی منفرد گروه ذرات دارای قابلیت اعتماد بیشتری است.

#### مراجع

موسوی بفرولی، س.ح.، میرزائی، ن.، شعبانی، ا. و اسکندری، م.، ۱۳۹۳، پهنه بندی خطر زمین لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان ها، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۴)، ۳۸-۱۵.

فریدی، م. و خدا بنده لو، ع.، ۱۳۹۰، نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰ تبریز، سازمان زمین شناسی کشور، ویرایش سوم.

مهندسین مشاور تهران پادیر، مطالعات ریزپهنه بندی

و شهرسازی آذربایجان شرقی، جلد ششم.

- Apostolidisa, P., Raptakis, D., Roumelioti, Z. and Ptilakis, 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.
- Bouchedda, A., Chouteau, M., Binley, A. and Giroux, B., 2012, 2-D joint structural inversion of cross-hole electrical resistance and ground penetrating radar data, *J. of Applied Geophysics*, 78, 52-67.
- Coello Coello, C. A., 2002, MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimizations, *IEEE*, doi: 0-7803-7282-4/02.
- Dalmoro, G., 2010, Insights on surface wave dispersion and HVSR: joint analysis via Pareto optimality, *J. of Applied Geophysics*, 72, 129-140.
- Dalmoro, G. and Pipan, M., 2007, Joint inversion of surface wave dispersion curves and reflection travel times via multi-objective evolutionary algorithms, *J. of Applied Geophysics*, 61, 56-81.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratab, A. and Meyarivan, T., 2002, A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6, 182-197.
- Foti, S., 2012, Surface wave testing for geotechnical characterization, 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization Recife, Brasil, September.
- Gallardo, L. and Meju, M. A., 2003, Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data, *Geophysical Research Letters*, 30, 1658-1670.
- García-Jerez, A., Luzón, F., Navarro, M. and Pérez-Ruiz, J., 2008, determination of elastic properties of shallow sedimentary deposits applying a spatial autocorrelation method, *J. Geomorphology*, 93, 74-88.
- Gardner, G. F., Gardner, L. W. and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density the diagnostic basic for stratigraphic trap, *Geophysics*, 39, 770-780.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C., 1995, Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia)*, Piscataway, pp 1942-1948.
- Kozlovskaya, E., 2001, Theory and application of joint interpretation of multimethod geophysical data, Ph.D. dissertation, Univ. of Oulu, Finland.
- Louie, J. N., 2001, Faster, better: shear wave velocity to 100 meters depth from refraction Microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91 347-364.
- Marler, R. T. and Arora, J. S., 2004, Survey of ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر تبریز، ۱۳۸۸، سازمان مسکن multi-objective optimization methods for engineering, *Struct Multidisc Optim*, 26, 369-395.
- 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*, 1203-1207.
- Okada, H., 2006, Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method, *Exploration Geophysics*, 59, 73-85.
- 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.
- Poormirzaee, R., Hamidzadeh, R. M. and Zarean, A., 2015, The application of PSO to joint inversion of microtremor Rayleigh waves dispersion curves and refraction travel times, *Journal of Seismic Exploration*, (In press).
- Rangaiah, G. P., 2009, *Advances in process systems engineering*, World Scientific Publishing Co., London.
- Res2Dinv for Windows XP/Vista/7 manual, version 3.59, [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com), Jan. 2014.
- SeisImager/SWTM Manual, Windows software for analysis of surface waves, version 3.0, <ftp://geom.geometrics.com/pub/>, October 2009.
- Shi, Y. and Eberhart, R. C., 1998, A modified particle swarm optimizer *proc. of IEEE In. Con. on Evolutionary Computation Anchorage, AK USA*, 69-73.
- Song, X. H., Tang, L., Lv, X., Fang, H. and Gu, H., 2012, Application of particle swarm optimization to interpret Rayleigh wave dispersion curves, *J. of Applied Geophysics*, 84, 1-13.
- Tokeshi, J. C., Karkee, M. B. and Sugimura, Y., 2006, Reliability of ayleigh wave dispersion curve obtained from f-k spectral analysis of microtremor array measurement, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 163-174.
- Vozoff, K. and Jupp, D., 1975, Joint inversion of geophysical data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42, 977-991.
- Yang, X. S., 2010, *Engineering optimization: an introduction with etaheuristic applications*, Published by John Wiley & Sons, New Jersey.
- Zitzler, E. and Thiele, L., 1999, Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3, 257-271.