

# کاربرد الگوریتم ژنتیک در آنالیز معکوس منحنی پراکندگی امواج رایلی میکروترموهای آرایه‌ای

محمد صادق صحرائیان\*<sup>۱</sup>، عباس قلندرزاده<sup>۲</sup> و علی کاوند<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی زلزله، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۶/۲۶، تاریخ دریافت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۱۱/۱۶، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳)

## چکیده

آنالیز معکوس منحنی پراکندگی امواج سطحی یکی از مسائل کاربردی در شناسایی لایه‌های زمین می‌باشد. روش‌های خطی آنالیز معکوس به علت طبیعت غیرخطی مسأله و امکان درگیر شدن عملیات بهینه‌یابی تابع هدف با جواب‌های بهینه محلی، چندان قابل اعتماد نمی‌باشند. به همین منظور جهت افزایش اطمینان از عملیات آنالیز معکوس و دستیابی به جواب‌های بهینه کلی مسأله، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هدف نهایی الگوریتم ژنتیک در این مسأله عبارت است از یافتن پارامترهای مجهول مسأله که عبارتند از: ضخامت و سرعت موج برشی لایه‌های خاک به گونه‌ای که بیشترین تطابق میان منحنی پراکندگی تجربی به دست آمده از میکروترموهای ثبت شده به صورت آرایه‌ای و منحنی پراکندگی تئوری به دست آمده از روابط ارائه شده توسط هسکل (۱۹۵۳) براساس تئوری انتشار امواج در محیط‌های لایه‌ای حاصل شود. الگوریتم ژنتیک در ابتدا بهینه‌یابی را با فرض تصادفی مجهولات آغاز می‌نماید و با به کارگیری عملگرهای انتخاب، پیوند، جهش و نخبه‌گرا و تولید مجموعه جواب‌های جدید در مسیر بهبود جواب‌ها پیش می‌رود به گونه‌ای که جواب‌های هر نسل از جواب‌های نسل قبل بهتر می‌باشند. قابلیت‌های روش ارائه شده به وسیله مثالی نمونه بررسی شده است. در این مثال نشان داده شده است که اولاً روش ارائه شده تطابق بسیار خوبی بین منحنی‌های پراکندگی تئوری و تجربی ایجاد می‌نماید و ثانیاً پروفیل سرعت موج برشی به دست آمده از این روش از مطابقت خوبی با سایر روش‌های تعیین پروفیل سرعت موج برشی برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** سرعت موج برشی، اندازه‌گیری آرایه‌ای، میکروترمو، الگوریتم ژنتیک، روش فرانکس- عدد موج.

## مقدمه

تمامی موارد فراهم نباشد، به خصوص در مواردی که تعیین خواص رسوبات عمیق مد نظر است و یا منطقه وسیعی باید مورد مطالعه قرار گیرد نظیر مطالعات ریزپهنه‌بندی شهرها. هزینه حفاری گمانه‌های عمیق برای روش‌های ژئوفیزیکی درون چاهی بسیار بالاست و به علاوه صحت نتایج به دست آمده توسط این روش‌ها در اعماق زیاد به دلیل محدودیت‌های عملی اغلب مورد تردید بوده است [۱]. به منظور غلبه بر این مشکلات می‌توان از روش‌های مبتنی بر امواج سطحی استفاده نمود. روش‌های مبتنی بر امواج سطحی این امکان را فراهم می‌آورند که بتوان بدون حفر هیچ گونه گمانه‌ای ساختار پروفیل Vs ساختگاه را به دست آورد. در میان سایر روش‌های سطحی که مبتنی بر اندازه‌گیری خصوصیات امواج حجمی (Body Wave) می‌باشند همانند آزمایشات انعکاسی و انکساری، روش‌های مبتنی بر امواج سطحی قابل اعتمادتر

سرعت موج برشی یکی از مهمترین پارامترهای کنترل‌کننده پاسخ دینامیکی خاک به شمار می‌رود، بنابراین برای ارزیابی اثرات ساختگاهی با استفاده از روش‌های تئوریک تحلیل پاسخ زمین و تعیین پهنه‌بندی خطر زلزله باید پروفیل سرعت موج برشی رسوبات (Vs) را تا سنگ بستر لرزه‌ای به دست آورد. پروفیل Vs معمولاً در محل و با به کارگیری روش‌های ژئوفیزیکی متداول همانند روش‌های انعکاسی، انکساری و درون چاهی تعیین می‌شود. یکی دیگر از روش‌های تعیین پروفیل Vs در محل، استفاده از روش‌های ژئوتکنیکی همانند انجام آزمایشات SPT یا CPT و استفاده از روابط تجربی بین مقادیر Vs و عدد SPT یا CPT می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی درون چاهی و یا ژئوتکنیکی برای تعیین پروفیل Vs خاک اکثراً نیازمند حفر گمانه است و لذا ممکن است امکان انجام آن‌ها در

۳. تعیین منحنی پراکندگی تئوری امواج رایلی با استفاده از روابط ارائه شده توسط هسکل (۱۹۵۳) بر اساس تئوری انتشار امواج در محیط‌های لایه‌ای.

۴. فرآیند آنالیز معکوس جهت تخمین پروفیل سرعت موج برشی.

فرآیند آنالیز معکوس منحنی پراکندگی هدف بسیاری از تحقیقات سال‌های اخیر بوده‌است. علاوه بر روش‌های سنتی مبتنی بر گرادینان تابع هدف، امروزه روش‌هایی مثل Simulated Annealing و الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) توسط محققین مختلف استفاده شده‌است.

در این تحقیق جهت عملیات آنالیز معکوس از روش جدیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است. الگوریتم ژنتیک تکنیک بهینه‌یابی است که فرضیه سیر تکامل موجودات در طبیعت را شبیه‌سازی می‌کند که بر اساس نظریه بقا داروین پایه‌ریزی شده‌است. این روند ابتدا با استفاده از یک سری جواب تصادفی منحنی پراکندگی تئوری را محاسبه می‌نماید و سپس با بهینه و منطبق کردن منحنی پراکندگی تئوری بر منحنی پراکندگی تجربی روند ادامه می‌یابد. زمانی که بیشترین تطابق بین منحنی پراکندگی تئوری و تجربی حاصل شد، جواب‌های نهایی بهینه‌یابی، پروفیل سرعت موج برشی سایت می‌باشند.

### فرآیند آنالیز معکوس

آنالیز معکوس آخرین و مهمترین مرحله در به دست آوردن پروفیل سرعت موج برشی در روش اندازه‌گیری آرایه‌ای است. اگر سرعت‌های فاز به دست آمده از اندازه‌گیری‌های میکروترموور ( $C_{ei}$ )، برای  $I$  فرکانس مختلف معلوم باشد، هدف نهایی آنالیز معکوس عبارت است از یافتن مدل لایه‌های خاک به صورتی که معادله حداقل مربعات به صورت زیر را ارضا نماید:

$$S = \sum_{i=1}^I (C_{ei} - C_{si})^2 = \min \quad (1)$$

در این رابطه  $C_{si}$  عبارت است از سرعت فاز تئوریک امواج رایلی که با استفاده از معادلات انتشار امواج به دست می‌آید. معادله ۱ را می‌توان توسط روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی حل نمود [۳].

به نظر می‌رسند و حتی قادر به شناسایی لایه‌های سست موجود در زیر یک لایه سخت نیز می‌باشند [۲]. به علاوه در آزمایشات انعکاسی و انکساری باید از منابع مصنوعی تحریک همانند انفجار یا لرزش استفاده نمود، در حالی که این کار در نواحی شهری با مشکلات زیادی روبروست. همچنین ابعاد آرایه‌های مورد نیاز در این روش‌ها با توجه به عمق نفوذ مورد نظر ممکن است بزرگ باشد که به کارگیری آن را در نواحی پرجمعیت شهری با مشکل روبرو می‌سازد. اخیراً به کارگیری امواج سطحی در میکروترموورها نیز به جامعه مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای معرفی گردیده‌است و برای تعیین سرعت موج برشی در ساختگاه و یا تعیین اثرات محلی ساختگاه به کار می‌رود. هم‌اکنون استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترموور در ارزیابی اثرات ساختگاهی به عنوان یکی از روش‌های بسیار مؤثر و سریع به شمار می‌رود. سهولت انجام اندازه‌گیری‌های میکروترموور در سطح زمین و سرعت قابل توجه آن باعث گردیده‌است تا استفاده از این روش به خصوص در مطالعات ریزبهینه‌بندی لرزه‌ای شهرها و نواحی پرجمعیت به عنوان ابزاری مناسب در دست مهندسين زلزله قرار گیرد. از کاربردهای متداول میکروترموورها در ارزیابی اثرات ساختگاهی که تاکنون بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌است می‌توان به تعیین پریود غالب رسوب و همچنین میزان تشدید در رسوبات اشاره نمود. با این حال در چند سال اخیر اندازه‌گیری‌های میکروترموور به طور موفقیت آمیزی برای تعیین سختی برشی ساختگاه نیز به کار رفته‌است. این مورد یکی از جنبه‌های جدید کاربردهای میکروترموور در ارزیابی شرایط ساختگاهی به شمار می‌رود. در مطالعه حاضر با یک روش جدید آنالیز معکوس منحنی پراکندگی، امکان به کارگیری روش آرایه‌ای میکروترموورها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی ساختگاه بررسی خواهد شد. به طور کلی روش آرایه‌ای میکروترموورها از مراحل زیر تشکیل شده‌است:

۱. اندازه‌گیری و ثبت امواج میکروترموور به صورت آرایه‌ای به وسیله سنسورهای سرعت که به صورت دایره‌ای بر روی زمین قرار گرفته‌اند.
۲. تعیین منحنی پراکندگی تجربی (پراکندگی پدیده‌ای است که در اثر آن موج‌های با فرکانس مختلف با سرعت‌های متفاوت منتشر می‌شوند) امواج رایلی با استفاده از تئوری‌های روش فرکانس - عدد موج (F-K).

در رابطه بالا  $P_{I \times J}$  ماتریسی است دارای  $I$  سطر و  $J$  ستون که عناصر آن عبارتند از  $\partial C_{si} / \partial a_j$ .  $C_{I \times 1}$  نیز ماتریسی است ستونی که عناصر آن عبارتند از  $C_{ei} - C_{si}$ . بعد از محاسبه بردار تصحیح، ماتریس  $A_{J \times 1}$  با ماتریس  $A_{J \times 1} + \Delta A_{J \times 1}$  جایگزین می‌گردد. این محاسبات تا جایی تکرار می‌شود که معادله حداقل مربعات (۱) تقریباً برابر صفر شود یا به عبارتی اختلاف بین منحنی پراکندگی تئوری و تجربی حداقل شود (شکل ۱). عناصر نهایی ماتریس  $A_{J \times 1}$  به عنوان پارامترهای مجهول موجود در مدل خاک در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله جهت فرآیند آنالیز معکوس از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک استفاده شده و نتایج حاصل با نتایج روش مرسوم مقایسه شده‌است.

### الگوریتم ژنتیک

مهمترین هدف این مقاله استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت به دست آوردن پروفیل سرعت موج برشی با استفاده از داده‌های به دست آمده از منحنی پراکندگی تجربی است در واقع جهت مینیمم کردن رابطه (۱) و به دست آوردن پروفیل بهینه سرعت موج برشی از تکنیک الگوریتم ژنتیک استفاده شده‌است.

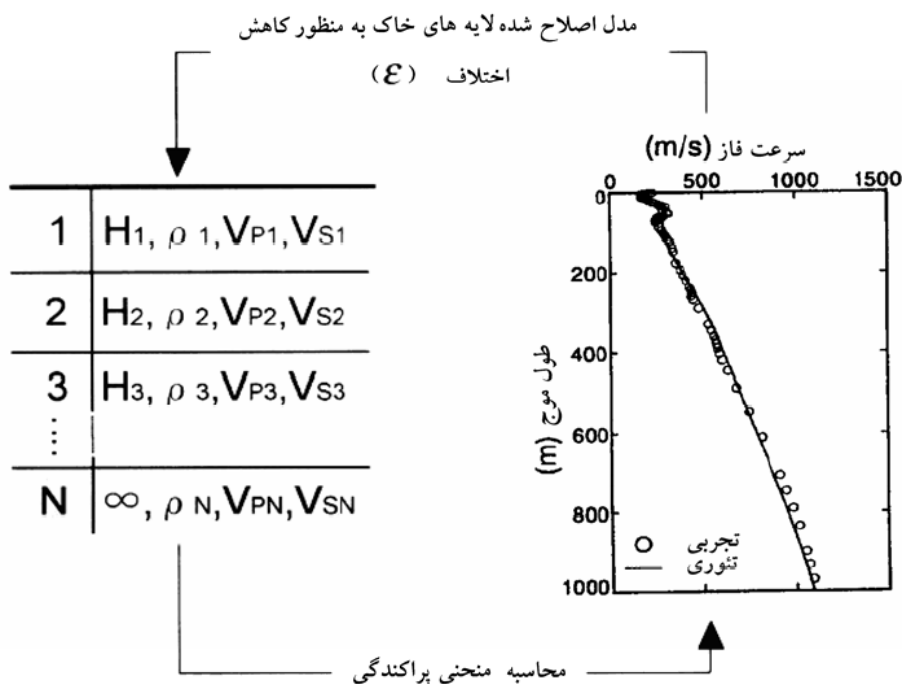
در فرآیند آنالیز معکوس فرض می‌شود که مدل لایه‌های خاک به صورت افقی بوده و مطابق شکل (۱) از  $N$  لایه تشکیل شده‌است. به دلیل اثرات ناچیز چگالی و سرعت موج حجمی لایه‌ها بر خواص پراکندگی، مقادیر این پارامترها در ابتدا معین فرض شده و تنها پارامتر سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌ها مجهول فرض می‌شوند. بنابراین تعداد کل مجهولات عبارت است از  $2N-1$  و معادله منحنی پراکندگی تئوری که در مرجع [۴] ارائه شده‌است به صورت زیر درمی‌آید:

$$F_R(V_s, d) = 0 \quad (2)$$

که در آن  $V_s$  عبارت است از بردار سرعت موج لایه‌های مختلف که دارای  $N$  عضو می‌باشد و  $d$  بردار ضخامت لایه‌هاست و  $N-1$  عضو دارد زیرا لایه آخر دارای ضخامت بینهایت می‌باشد.

در روش مرسوم آنالیز معکوس ارائه شده در مرجع [۲] مقادیر اولیه پارامترهای مجهول  $(a_1, a_2, \dots, a_j)$ ، به صورت ماتریس ستونی  $A_{J \times 1}$  نشان داده می‌شوند. بنابراین بردار تصحیح برای  $A_{J \times 1}$  عبارت است از  $\Delta A_{J \times 1}$  که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{I \times J} \Delta A_{J \times 1} = C_{I \times 1} \quad (3)$$



شکل ۱: فرآیند آنالیز معکوس در روش آرایه‌ای [۲]

شانس تبدیل شدن به پدر و مادر در نسل بعد را خواهند داشت.

۳- در عملگر پیوند (CROSSOVER) دو رشته‌ای که به عنوان پدر و مادر انتخاب می‌شوند نسل بعدی جواب‌ها را تولید می‌کنند. در این روش ابتدا رشته‌های والدین به قسمت‌هایی تقسیم می‌شوند سپس بعضی از بخش‌های رشته پدر با بعضی از بخش‌های رشته مادر جابه‌جا می‌گردد. چند مدل از مدل‌های مختلف این روش عبارتند از: تک نقطه‌ای (one point)، چند نقطه‌ای (multiple point) و یکنواخت (uniform).

۴- عملگر جهش (mutation) باعث تنوع رشته‌ها در یک جمعیت می‌شود. در این روش به صورت تصادفی بخشی از رشته انتخاب می‌شود و اعضای بیت‌ها از ۰ به ۱ و یا برعکس تبدیل می‌شوند و باعث تولید یک رشته جهش یافته می‌شود. جهش مانع می‌شود که مدل خاصی از یک نسل به نسل بعد منتقل شود. این عملگر باعث می‌شود که فرزندهایی با خصوصیات تولید شوند که این خصوصیات در والدین آن‌ها نبوده‌است.

۵- عملگر نخبه‌گرا (Elitism) با انتقال بهترین اعضاء جمعیت از هر نسل به نسل دیگر مانع از بین رفتن بهترین‌های هر نسل می‌گردد. در نتیجه عملگر نخبه‌گرا سرعت تسلط افراد بسیار مناسب را بر جمعیت افزایش می‌دهد و باعث افزایش بهره‌وری الگوریتم ژنتیک می‌گردد. در مطالعه حاضر با استفاده از TOOLBOX الگوریتم ژنتیک در محیط نرم افزار MATLAB عملیات بهینه‌یابی انجام گرفته‌است و تابع هدف، نرم افزاری نوشته شده در محیط MATLAB می‌باشد که بر اساس تئوری‌های گفته شده در بالا مقدار تفاضل منحنی پراکندگی تجربی و تئوری را محاسبه می‌کند.

### آنالیز معکوس منحنی پراکندگی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

هدف از این مقاله ارائه روشی جدید جهت آنالیز معکوس منحنی پراکندگی تجربی با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این روش ترکیب بهینه‌ای از ضخامت لایه‌های خاک و سرعت موج برشی مربوط به هر لایه را جستجو می‌کند به گونه‌ای که تفاضل منحنی پراکندگی تجربی و تئوری حداقل گردد.

الگوریتم ژنتیک یکی از انواع تکنیک‌های بهینه‌یابی است که در آن فرضیه سیر تکاملی موجودات در طبیعت شبیه‌سازی می‌شود. الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجوی کلی است که دارای الگوریتم تصادفی است و بر مبنای ایده بقای بهترین جواب پایه‌ریزی شده‌است [۵]. نتایج به دست آمده از این تکنیک در یک مسأله آنالیز معکوس، دارای قابلیت اطمینان بیشتری هستند [۶ و ۷] زیرا:

- الگوریتم ژنتیک مستقل از اطلاعات اولیه می‌باشد و نیازی به حدس اولیه متغیرها ندارد.
- الگوریتم ژنتیک از تابع اصلی و یک روند انتقال احتمالی بین متغیرها استفاده می‌کند و از مشتق تابع استفاده نمی‌کند.
- الگوریتم ژنتیک از فرم تبدیل یافته و کد گذاری شده متغیرها استفاده می‌کند نه خود متغیرها.
- الگوریتم ژنتیک روی مجموعه‌ای از جواب‌های محتمل کار می‌کند نه یک جواب واحد.

این روش با الهام گرفتن از طبیعت موجودات زنده و نقش وراثت در تکامل تدریجی آن‌ها به محاسبه مقدار بهینه سیستم‌های ریاضی می‌پردازد. این تکنیک بر مبنای یک رابطه خاص بین تابع هدف و شرایط مرزی نمی‌باشد [۷].

این تکنیک اساساً به صورت زیر توصیف می‌شود:

۱- الگوریتم‌های ژنتیک روی مجموعه‌ای از متغیرهای مسأله که معمولاً به صورت تصادفی تولید می‌شوند کار می‌کنند. متغیرها به صورت مجموعه‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند که هر کدام از آن‌ها یک رشته (string) نامیده می‌شوند که تشکیل شده‌اند از یک سری پارامترهایی که بیان‌کننده یک مجموعه جواب برای مسأله می‌باشند. پارامترهای تشکیل دهنده هر رشته معمولاً به صورت اعدادی بر مبنای دودویی (binary) می‌باشند، سپس این پارامترها به صورت اعداد صحیح کدگشایی (decoding) می‌شوند تا مقدار تابع هدف برای آن مجموعه جواب خاص به دست آید.

۲- میزان مقبولیت یک مجموعه جواب به وسیله برآزندگی هر رشته جواب در تابع هدف تعیین می‌شود. هر رشته که جواب بهتری در تابع هدف داشته باشد ارزش بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین همانند آنچه در طبیعت رخ می‌دهد بهترین و مناسب‌ترین مجموعه جواب‌ها باقی می‌مانند و

مود اصلی ارتعاش در آنالیز معکوس مورد استفاده قرار گرفته است. در عملیات آنالیز معکوس به وسیله الگوریتم ژنتیک می‌توان هر دو پارامتر ضخامت و سرعت موج برشی را به عنوان مجهول وارد محاسبات کرد و یا ضخامت‌ها را فرض کرد و سرعت موج متناظر را به دست آورد.

### حل مثال نمونه

به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده، تعیین پروفیل سرعت موج برشی در یک سایت نمونه بررسی می‌شود. این مثال عبارت است از ارزیابی روش ارائه شده در تعیین مجموعه‌ای از ضخامت‌ها و سرعت‌های موج برشی به گونه‌ای که بهترین تطبیق بین منحنی‌های پراکندگی تجربی و تئوری صورت پذیرد. در این مثال منحنی پراکندگی تجربی که به وسیله اندازه‌گیری‌های میدانی به دست آمده است موجود می‌باشد. این اندازه‌گیری میدانی میکروترمورها در شهر ارومیه انجام شده است.

در این مثال، به بررسی و مقایسه پروفیل‌های سرعت موج برشی به دست آمده از روش آنالیز معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روش مرسوم آنالیز معکوس، روش ژئوتکنیکی و روش ژئوفیزیک سطحی پرداخته شده است. منحنی پراکندگی تجربی مورد استفاده در این سایت با استفاده از آنالیز فرکانس - عدد موج میکروترموهای ثبت شده به صورت آرایه‌ای به دست آمده است. در این مثال سایت با ۵ لایه تخمین زده شده است و متغیرهای طراحی در این مسأله عبارتند از ۹ پارامتر مجهول، ۴ پارامتر ضخامت لایه و ۵ پارامتر سرعت موج برشی. منحنی پراکندگی تجربی در این مسأله از ۲۱ نقطه تشکیل شده است که داده‌های ورودی مسأله می‌باشند. تعداد افراد هر نسل در این مسأله برابر ۵۰ می‌باشد و تا ۴۵۰ نسل، عملیات پیش رفته است. ۸۰ درصد افراد هر نسل با عملگر پیوند تولید شده‌اند که این مقدار با پیشرفت روند کاهش یافته است و در هر نسل ۴ رشته با عملگر نخبه‌گرا و بقیه افراد با عملگر جهش تولید شده‌اند. شکل ۲ منحنی پراکندگی تجربی را به همراه بهترین منحنی پراکندگی تئوری در ۲۱ نقطه نشان می‌دهد و منحنی همگرایی عملیات در شکل ۳ نشان داده شده است.

با داشتن منحنی پراکندگی تجربی و نقاط تشکیل دهنده آن و با استفاده از رابطه منحنی پراکندگی تئوری، فرکانس متناظر با مقادیر مختلف سرعت فاز (C) که از نقاط تشکیل‌دهنده منحنی پراکندگی تجربی به دست آمده‌اند، به دست می‌آید که این مقادیر سرعت فاز و فرکانس مربوطه تشکیل‌دهنده منحنی پراکندگی تئوری در هر رشته جواب می‌باشند و با حداقل کردن تفاضل این دو منحنی که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید می‌توان به مجموعه جواب مطلوب که دارای منحنی پراکندگی تئوری با حداقل تفاضل با منحنی پراکندگی تجربی است دست یافت.

$$S = \sum_{i=1}^l (f_{ei} - f_{si})^2 = \min \quad (4)$$

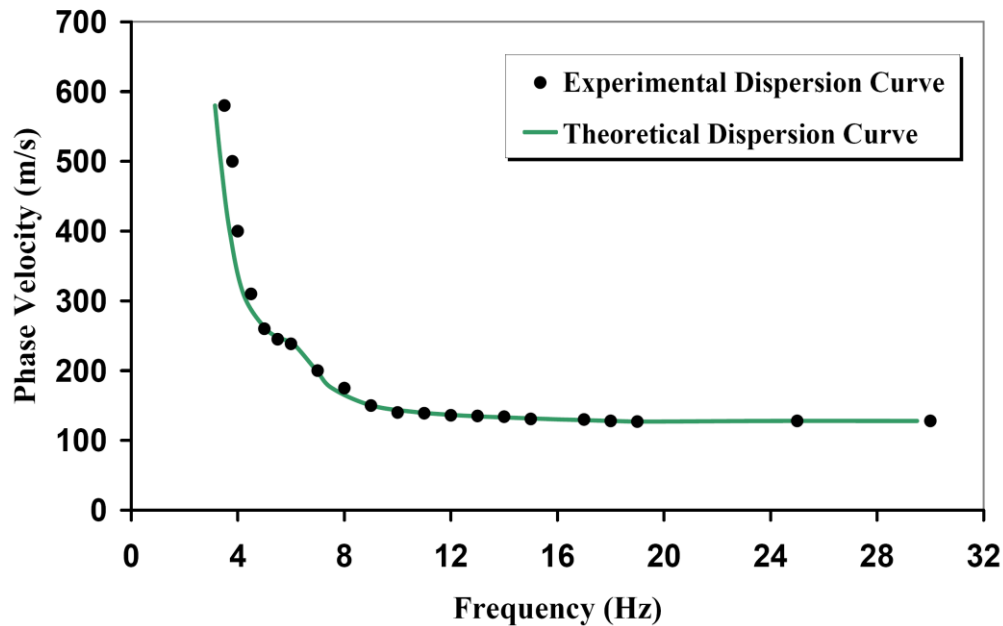
در رابطه بالا  $f_{ei}$  عبارت است از فرکانس مربوط به سرعت فازی خاص (C) در منحنی پراکندگی تجربی و  $f_{si}$  عبارت است از فرکانس مربوط به همان سرعت فاز (C) در منحنی پراکندگی تئوری. در واقع  $f_{si}$  و  $f_{ei}$  عبارتند از ماتریس‌هایی با ابعاد  $n \times 1$  که در آن  $n$  برابر است با تعداد نقاط تشکیل‌دهنده منحنی پراکندگی تجربی. عملیات بهینه‌یابی با اعمال شرایط مرزی همراه می‌باشد که عبارتند از:

$$V_s^{\min} \leq V_s \leq V_s^{\max} \quad (5)$$

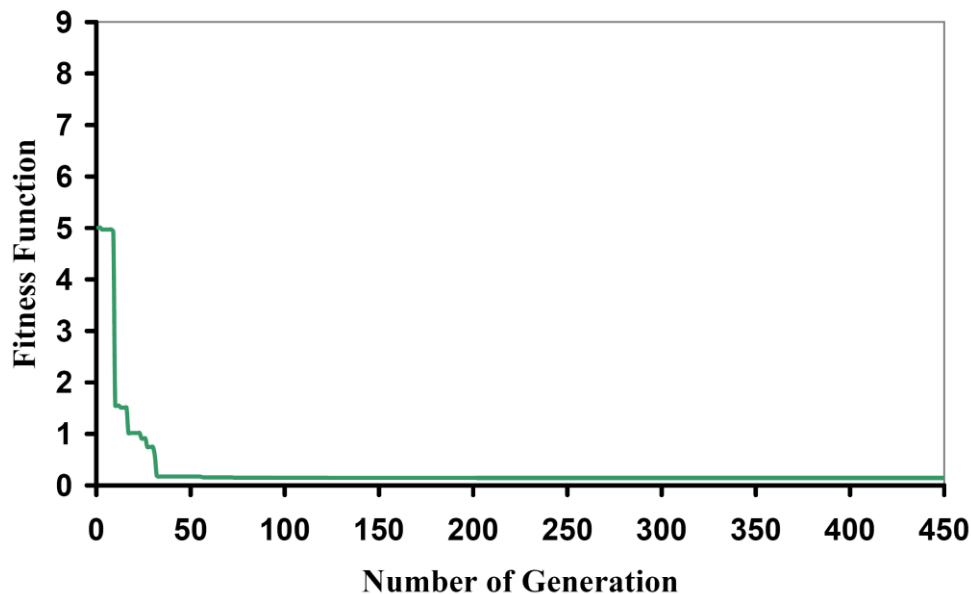
$$d_s^{\min} \leq d_s \leq d_s^{\max} \quad (6)$$

در روابط بالا  $V_s^{\min}, V_s^{\max}$  عبارتند از بردار شرایط مرزی که به سرعت موج برشی لایه‌های مختلف اعمال می‌گردد و  $d_s^{\min}, d_s^{\max}$  نیز برابر است با بردار شرایط مرزی که به ضخامت لایه‌ها اعمال می‌گردد این مقادیر مشخص‌کننده حد بالا و پایین سرعت موج برشی و ضخامت در لایه‌های مختلف می‌باشند.

حل رابطه  $F_R(V_s, d) = 0$  که منجر به منحنی پراکندگی تئوری می‌گردد برای مودهای مختلف انتشار امکان‌پذیر است. در حالت کلی امواج سطحی به صورت ترکیبی از مودهای مختلف ارتعاش می‌باشند با این وجود معمولاً مود اصلی ارتعاش غالب خواهد بود. در این مطالعه



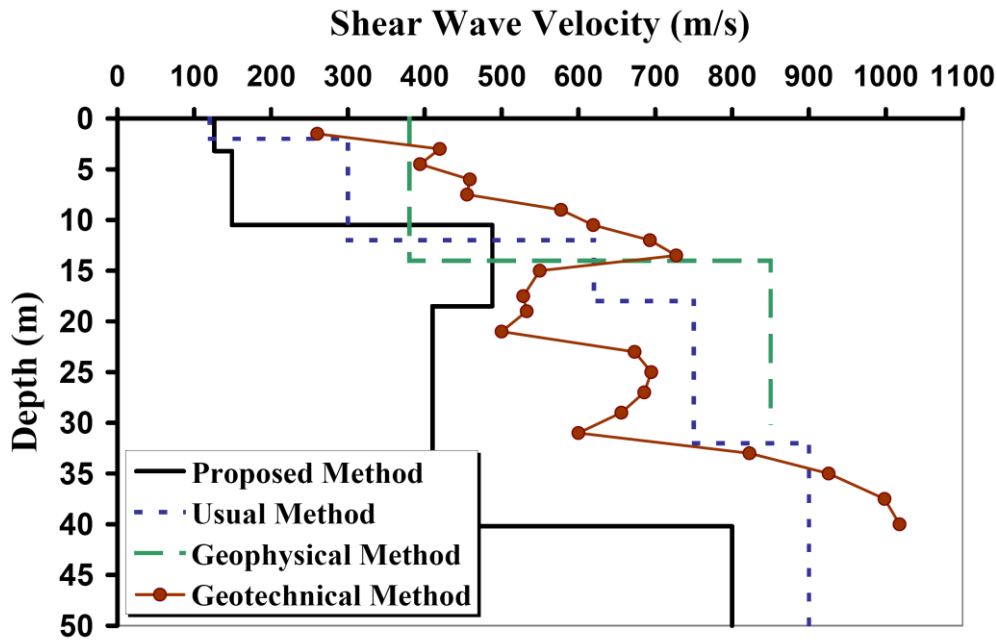
شکل ۲: مقایسه منحنی پراکندگی تجربی و منحنی پراکندگی تئوری بهینه به دست آمده از الگوریتم ژنتیک



شکل ۳: نمودار همگرایی عملیات الگوریتم ژنتیک

روش مرسوم و روش ژئوفیزیکی این توانایی را نداشته‌اند. با این وجود پروفیل ارائه شده با روش جدید نسبت به روش ژئوتکنیکی مقادیر کمتری برای سرعت موج برشی برآورد کرده‌است که این مسأله می‌تواند به دلیل عدم دقت کافی در روابط تجربی بین  $V_s$  و  $N_{spt}$  که در روش ژئوتکنیکی استفاده شده‌است باشد.

برآورد پروفیل سرعت موج برشی توسط روش ارائه شده در شکل ۴ نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل مشخص است روش جدید آنالیز معکوس تخمین خوبی از پروفیل سرعت موج برشی در اعماق مختلف در مقایسه با روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی ارائه کرده‌است. همچنین روش ارائه شده توانسته است یک لایه سست در زیر یک لایه سخت را برآورد کند در صورتی که



شکل ۴: مقایسه پروفیل سرعت موج برشی به دست آمده از روش ارائه شده با پروفیل روش‌های مرسوم، ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی

## نتیجه‌گیری

روشی جدید جهت عملیات آنالیز معکوس منحنی پراکندگی امواج رایلی میکروترموهای ثبت شده به صورت آرایه‌ای ارائه گردید که این روش با استفاده از الگوریتم ژنتیک منحنی پراکندگی تئوری بهینه‌ای را که منطبق بر منحنی پراکندگی تجربی است جستجو می‌نماید. الگوریتم می‌تواند مجموعه‌ای از ضخامت‌ها و سرعت موج مربوط به لایه‌ها را به عنوان مجهول تعیین نماید یا اینکه با مشخص بودن ضخامت لایه‌ها سرعت موج مربوطه را به دست آورد. هر نسل تولید شده در این روش همانند چرخه طبیعت دارای عملیات جفتگیری، جهش و پیوند می‌باشد و این عملیات ادامه می‌یابد تا یک مجموعه جواب بهینه حاصل شود. جواب بهینه عبارت است از پروفیلی از خاک با

منحنی پراکندگی تئوری که بیشترین انطباق را با منحنی پراکندگی تجربی دارد. این روش دقیق می‌باشد و نسبت به روش‌های بهینه‌یابی سنتی از امتیازاتی برخوردار است. نتایج به دست آمده در مثال نمونه، نشان دهنده تطابق خوب دو منحنی پراکندگی تجربی و تئوری می‌باشد. پروفیل سرعت موج برشی به دست آمده در این مثال از تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی برخوردار است همچنین این پروفیل نسبت به پروفیل به دست آمده از روش مرسوم آنالیز معکوس از مزیت‌هایی برخوردار است از جمله توانایی تشخیص لایه سست موجود در زیر یک لایه سخت که روش مرسوم آنالیز معکوس و روش ژئوفیزیکی این توانایی را نداشته‌اند.

## مراجع

1. Apostolidis, A., Raptakis, D., Roumelioti, Z., and Kyriazis, P., (2004). "Determination of S-wave velocity structure using microtremors and spac method applied in Thessaloniki." *Soil dynamics and earthquake engineering*, no. 24, 49-67.
2. Tokimatsu, K., (1995). "Geotechnical site characterization using surface waves." Proc., *First international conference on earthquake geotechnical engineering, Tokyo, Japan*.
3. Dorman, J., Ewing, M., (1962). "Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in New York-Pennsylvania area." *J. Geophys. Res.* 67, no. 13, 5227-5241.

4. Haskel, N.A., (1953). "The dispersion of surface waves on multi-layered media." *Bull. Seism. Soc. Am.* 43, no. 1, 17-34.
5. Holland, J. H. (1975). "Adaptation in natural and artificial systems", *Ann Arbor, the University of Michigan Press*.
6. Goldberg, D. E. (1989). "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", *Addison-Wesley, Reading, Massachusetts*.
7. Pezeshk, S., and C. V. Camp (2002). "State of the art on the use of genetic algorithms in design of steel structures, in recent advances in optimal structural design", *S. Burns (Editor), American Society of Civil Engineering*.