

## نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

## چکیده

زلزله یکی از خطرناک‌ترین بلایای طبیعی عصر حاضر به شمار می‌رود که همواره اهمیت خود را به‌طور عینی نمایان کرده است. زلزله سانحه‌ای طبیعی است که بر اساس میزان بزرگی خود می‌تواند در مدت کوتاهی فجایعی عظیم به وجود آورد. هدف این مقاله، استخراج و ارائه مدلی برای تغییرات سرعت امواج زلزله ( $V_{p_n}$ ) با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از مرکز لرزه‌نگاری کشوری مربوط به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران دریافت شده است. در این تحقیق، سه استان کرمانشاه، آذربایجان شرقی و کرمان انتخاب شدند. به منظور استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابتدا داده‌های دریافت شده از مرکز لرزه‌نگاری کشوری برای این سه استان با هم ادغام شده که بالغ بر تعداد ۱۸۶۳ رخداد زلزله برآورد گردید. پس از استخراج داده‌های مربوطه، نسبت به محاسبه سرعت امواج زلزله ( $V_{p_n}$ ) اقدام شد. سپس با نادیده گرفتن حدود ۲۵ درصد از این داده‌ها، نسبت به استخراج مدل ریاضی برای سرعت امواج زلزله، اقدام شد. در انتها، فرمول به‌دست آمده در مورد داده‌های چشم‌پوشی شده اولیه (۲۵ درصد) اعمال گردید که نتایج مشابهی به دست آمد.

**واژگان کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، مدل‌سازی، سرعت امواج زلزله، زلزله.

## ارائه مدل تغییرات سرعت امواج زلزله ( $V_{p_n}$ ) بر اساس الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی - ایران)

### رسول مظلوم (نویسنده مسئول)

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران،  
r.mazloom@ut.ac.ir

### احسان معانی میان‌دوآب

استادیار، دانشکده علوم مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

### ۱- مقدمه

نایب‌وستگی‌های مربوط به خصوص در اعماق ژرف‌تر بدون استفاده از زمان سیر امواج زمین لرزه‌ها امکان‌پذیر نیست و این دو لازم و ملزوم یکدیگرند [۲]. مدل ساختار سرعتی پوسته در فهم درست لرزه‌زمین ساخت ناحیه و نیز تعیین موقعیت زمین لرزه‌ها با دقت بهتر نقش ویژه‌ای دارد [۳]. مثلاً در فلات تبت، ضخامت تقریبی هفتاد کیلومتری پوسته به دو لایه اصلی تقسیم می‌شود. بخش پوسته بالایی با ضخامت ۱۶ کیلومتری با سرعت ۵/۵۵ کیلومتر بر ثانیه موج P و پوسته پایینی با ضخامت ۵۴ کیلومتر با سرعت ۶/۵۲ کیلومتر بر ثانیه می‌باشد [۴]. شناخت هرچه بهتر ساختار پوسته زمین در نواحی گوناگون دنیا و همین‌طور در کشور ما ایران، می‌تواند به تعیین دقیق‌تر مکان وقوع زمین لرزه‌ها و در نتیجه گسل‌های فعال کمک بسیار زیادی می‌کند. دلیل اصلی وجود خطای زیاد در تعیین موقعیت زمین لرزه‌های ایران، پراکنده بودن دستگاه‌های لرزه‌نگاری و نبود مدل‌های سرعتی دقیق برای پوسته است [۵]. مطالعه ساختار سرعتی پوسته و گوشته بالایی، درک

در یک رویداد لرزه‌ای انرژی از کانون منتشر می‌شود و به سراسر سنگ بستر و لایه‌های مختلف خاک برده می‌شود و به صورت چشمگیری به وسیله خصوصیات مکانیکی در لایه‌های سطحی نفوذ می‌کنند، این لایه‌ها ممکن است به وسیله یک سیال اشباع باشند و یا به‌طور کامل اشباع نشده باشند که خاک‌های غیراشباع نامیده می‌شوند و در نهایت این انرژی آزاد شده با تغییراتی که حاصل عبور از لایه‌های مختلف می‌باشد به سطح زمین می‌رسد. در زلزله‌های مختلفی که همه‌ساله در نقاط مختلف دنیا اتفاق می‌افتد دیده می‌شود که امواج زلزله با پارامترها و خصوصیات مختلف و متفاوتی از نظر فرکانس، طول موج، سرعت و غیره منتشر می‌شوند و از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند بر نحوه انتشار امواج مؤثر باشد نوع خاک از نظر ساختاری (اشباع، غیراشباع، تک‌فاز و غیره) می‌باشد [۱]. داشتن یک مدل سرعتی مناسب برای هر منطقه امکان یافتن دقیق‌تر محل زمین لرزه‌ها را فراهم می‌سازد. از طرفی شناخت ساختار سرعتی زمین و

این تحقیق، از داده‌های مربوط به زلزله‌های ثبت شده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ میلادی، با عمق کانونی ۱ تا ۳۰ کیلومتر و بزرگای ۴ تا ۸، مربوط به استان‌های کرمان، آذربایجان شرقی و کرمانشاه، استفاده شده است.

فاطمی‌زاده و تاتار [۱۱] مدل سرعتی پوسته در منطقه قیر-کارزین در زون زاگرس مرکزی را به کمک زمین‌لرزه‌های محلی ثبت شده در یک شبکه لرزه‌نگاری موقت، مورد تحقیق قرار دادند. لذا ابتدا بر اساس قرائت زمان‌های رسید امواج Pg شکست مرزی از سطح مشترک لایه‌های مختلف، تلاش شد سرعت این امواج در لایه‌های مختلف پوسته و گوشته بالایی در منطقه قیر-کارزین تعیین گردد. نتیجه تحلیل نشان می‌دهد که سرعت امواج P در لایه‌های دوم و سوم به ترتیب ۵/۹ و ۶/۴۵ کیلومتر بر ثانیه و سرعت میانگین ظاهری ۸/۰ کیلومتر بر ثانیه برای این امواج به دست آمد [۱۱]. نوری‌تبار و همکاران [۱۲] با استفاده از روش برگردان هم‌زمان توابع گیرنده و منحنی‌های پاشندگی سرعت فاز و گروه امواج رایلی، عمق ۴۷ تا ۴۸ کیلومتری برای ایران مرکزی در زیر ایستگاه کرمان (KRBR) را به دست آوردند. نتایج حاصل از پژوهش مقصودی و همکاران [۱۳] نشان می‌دهد که عمق موهو در شمال شرقی ایران و نسبت  $V_p/V_s$  بین ۳۴ تا ۵۱ کیلومتر و ۱/۶۸ تا ۱/۸ تغییر می‌کند. عمق موهو در شمال شرق ایران، ۵۰ تا ۵۲ کیلومتر برای ایستگاه‌های مجاور بینالود و کپه‌داغ، در مجاورت ایران مرکزی ۴۲ تا ۴۴ کیلومتر، در ایستگاه‌های مجاور سیاه‌کوه و انتهای غربی بینالود ۴۶ تا ۴۸ کیلومتر و در جنوب شرقی دریای خزر ۳۲ تا ۳۴ کیلومتر برآورد شده است [۱۳]. در پژوهش موسویان و تاتار [۱۴] با استفاده از داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های دور ثبت شده در سه ایستگاه قزوین، زنجان و رودبار واقع در زون البرز غربی، ضخامت و در صورت امکان ساختار سرعتی پوسته در این زون به روش برگردان هم‌زمان تابع‌های گیرنده انتقال و اطلاعات پاشندگی سرعت گروه امواج رایلی تعیین شد. محمدی‌پور و همکاران [۱۵] با مطالعه خرد زمین‌لرزه‌ها در خاور سامانه گسلی زندان-میناب-پالامی شواهدی از راندگی کم‌شیب در منطقه گذر زاگرس به مکران را

بهتری از تکامل و تاریخچه زمین‌ساختی پهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی در اختیار می‌گذارد. همچنین جهت تعیین پارامترهای زلزله (مختصات کانونی، زمان، بزرگای و عمق)، مطالعه لرزه‌خیزی و شناسایی گسل‌های فعال و لرزه‌زا، در اختیار داشتن اطلاعات دقیقی از ساختار سرعتی پوسته و گوشته فوقانی بسیار ضروری است. محققان زیادی با روش‌های مختلف به مطالعه این موضوع پرداخته‌اند که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

جان میچل در سال ۱۷۶۰ با استفاده از مکانیک نیوتنی، امواج زلزله را به حرکت سنگ‌ها در اعماق زمین ربط داد. او امواج زلزله را به دو دسته تقسیم کرد، یک لرزش شدید اولیه که بعد از آن تلاطم‌های موجی شکل می‌آیند [۶]. او برای اولین بار پیشنهاد کرد که با اندازه‌گیری زمان رسید امواج زلزله در دو نقطه می‌توان سرعت امواج زلزله را اندازه‌گیری کرد. پرسرعت‌ترین موج زلزله، موج طولی است. سرعت امواج لرزه‌ای تابعی از حالت ماده، نوع ماده و دمای آن است. امواج درونی اولیه یا موج P، اولین موج زلزله دریافتی در یک زلزله‌نگار هستند [۶]. بویو به بررسی سرعت انتشار امواج الاستیک در محیط دو فاز اشباع در دو بخش فرکانس‌های پایین و بالا پرداخت [۷]. اسلامی با بررسی ۵۹ زمین‌لرزه با بزرگای ۴/۲ تا ۵/۸ که در دو ایستگاه شیراز و کرمانشاه ثبت شده بودند، سرعت موج طولی را در زیر موهو ۸/۱۱ کیلومتر بر ثانیه به دست آورد [۴]. عکاشه با بررسی ۲۹ زلزله سطحی که مراکز آنها در ایران و در ایستگاه شیراز ثبت شده بود، ضخامت پوسته در ایران را ۴۹ کیلومتر و سرعت موج طولی را در زیر موهو ۸/۱۳ کیلومتر بر ثانیه نتیجه گرفت [۸]. مطالعات و تحقیقات سنگ‌شناسی و زلزله‌شناسی نشان می‌دهد که مرز بین پوسته پایینی و گوشته بالایی (مرز موهو) بخش لیتوسفر قاره‌ای مرز هندسی ساده‌ای نبوده و از آن به‌عنوان زون انتقالی پوسته و گوشته یاد می‌شود که در آن تبادل جرم و انرژی صورت می‌گیرد [۹]. در تحقیق لین و وانگ [۱۰] که برای تعیین ساختار سرعتی پوسته و عمق موهو در کوه‌های هزار مسجد منطقه کپه‌داغ در شمال شرق ایران صورت گرفت عمق موهو ۴۴ تا ۵۰ کیلومتر تشخیص داده شده است. در

## ۲- الگوریتم ژنتیک (GA)

این الگوریتم روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد که از طبیعت الهام گرفته شده و فرآیندهای آن بر اساس تکامل زیستی انجام می‌شود. GA مکرراً جمعیتی از راه‌حل‌های منفرد مسئله را تغییر می‌دهد که از این تغییرات تحت عنوان تکامل یاد می‌شود. در هر گام از این تکامل، دو عضو از جمعیت را به‌طور تصادفی به‌عنوان والدین انتخاب کرده و فرزند آنها را به‌عنوان نسل بعدی در نظر می‌گیرد. به این ترتیب جمعیت به سمت یک راه‌حل بهینه تکامل می‌یابد. با استفاده از این الگوریتم می‌توان بسیاری از مسائل بهینه‌سازی را که با الگوریتم‌های استاندارد بهینه‌سازی حل نمی‌شوند، حل نمود. از جمله این مسائل می‌توان به مسائلی که تابع هدف در آنها ناپیوسته، غیر قابل تشخیص، اتفاقی و یا به‌شدت غیر خطی است اشاره کرد.

تابع هدف (شایستگی) تابعی است که ما قصد بهینه‌سازی آن را داریم. در الگوریتم‌های استاندارد بهینه‌سازی این تابع تحت عنوان تابع هدف شناخته می‌شود. در این جعبه‌ابزار سعی بر یافتن مقدار مینیمم تابع شایستگی است. یک فرد در الگوریتم ژنتیک عبارت است از هر نقطه‌ای که می‌توانیم به تابع شایستگی اعمال کنیم. مقدار تابع شایستگی به ازای هر فرد امتیاز آن فرد تلقی می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر تابع شایستگی به صورت  $f(x_1, x_2, x_3) = (2x_1 + 1)^2 + (3x_2 + 4)^2 + (x_3 - 2)^2$  باشد، بردار  $(1, 3, 2)$  یک فرد تلقی می‌شود. امتیاز این فرد برابر است با  $f(2, 3, 1) = 51$  و گاهی اوقات از افراد تحت عنوان ژنوم (genome) و از بردار کلیه افراد تحت عنوان ژن (gen) یاد می‌شود. جمعیت یک آرایه از افراد است. به‌عنوان مثال اگر اندازه جمعیت ۱۰۰ و تعداد متغیرهای شایستگی ۳ باشد، ماتریس جمعیت به صورت یک ماتریس  $100 \times 3$  خواهد بود. در هر تکرار، الگوریتم ژنتیک یک سری محاسبات بر روی جمعیت حاضر انجام داده و جمعیت جدید را تولید می‌کند. این جمعیت جدید تحت عنوان یک نسل جدید شناخته می‌شود. مقدار شایستگی یک فرد عبارت است از مقدار تابع شایستگی به ازای آن فرد. از آنجا که جعبه‌ابزار GA مینیمم تابع شایستگی را تعیین می‌کند، بهترین مقدار شایستگی برای جمعیت کوچک‌ترین مقدار

یافته‌اند. این مطالعات نتایج زمین‌شناسی که نشان‌دهنده‌ی گذر تدریجی از منطقه برخوردی زاگرس به فرورانش مکران است را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که مرز میان زاگرس و مکران یک گسل انتقالی امتداد لغز منفرد در مقیاس پوسته‌ای نیست. در تحقیق یمنی فرد و مرادی [۱۶] ساختار سرعتی پوسته زیر تهران با استفاده از ۳۰۹ دورلرز و ۲۵۳ انفجار معدن ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری شهر تهران وابسته به سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران از تاریخ تیر ۱۳۸۳ تا دی ۱۳۸۵ مورد بررسی قرار گرفته است. افرا و همکاران [۱۷] با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های وابسته به سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران و نیز مرکز لرزه‌نگاری کشوری در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ و با استفاده از زمان رسید امواج p ثبت شده از زمین‌لرزه‌های با بزرگای کوچک‌تر از ۴، ساختار سه‌بعدی سرعتی در تهران را تعیین نمودند. در مطالعه به‌عمل آمده توسط اظه‌ری و همکاران [۱۸] با استفاده از داده‌های ثبت شده در شبکه‌های لرزه‌نگاری مشهد و قوچان ساختار سرعتی تعیین شد. در این تحقیق، ابتدا به منظور مطالعه ساختار سرعتی پوسته، نسبت سرعت امواج لرزه‌ای  $V_p/V_s$  به دو روش wadati و اختلاف زمان رسید برابر  $1/72$  تعیین و سپس با اعمال فیلترهای مختلف و انتخاب تعدادی زمین‌لرزه مدل سرعتی یک‌بعدی تعیین شد.

در این تحقیق، نویسندگان به دنبال ارائه یک فرم تحلیلی ساده برای سرعت انتشار امواج هستند که با وجود مطالعات پیشین که اشاره گردید، این موضوع چندان مورد توجه نبوده است. با به دست آوردن یک فرم تحلیلی ساده و بسته؛ امکان تخمین سرعت انتشار امواج بر حسب فاصله از مرکز کانونی زلزله فراهم می‌گردد. برای این منظور با توجه به نتایج ثبت شده، یک فرم تحلیلی ارائه شده و سعی می‌شود پارامترهای آن با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تعیین گردد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که فرم تحلیلی ارائه شده برای تخمین سرعت انتشار دارای دقت مناسب است ولی برای تعیین محل زلزله باید تعداد داده‌ها و ایستگاه‌های بیشتری در نظر گرفته شده و مسئله امکان‌سنجی شود.

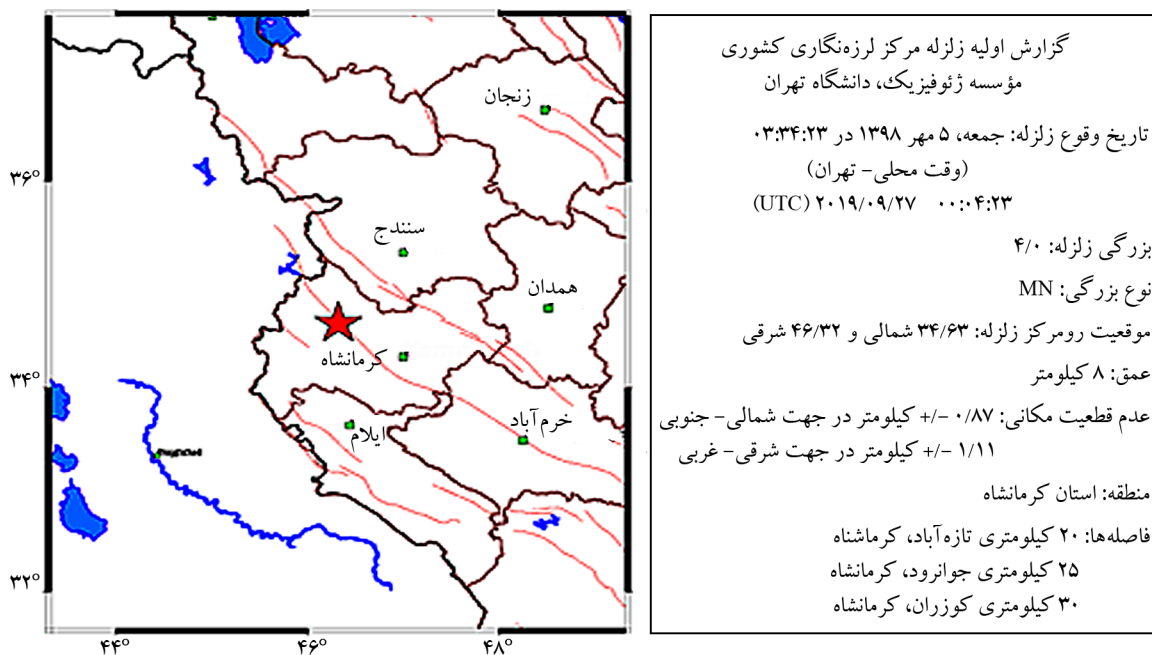
شرقی و کرمانشاه انتخاب شدند. با استفاده از مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مشخصات رخداد‌های زلزله هر یک از این سه استان در بازه زمانی سال‌های بین ۲۰۰۶ تا پایان سال ۲۰۱۸ و با عمق کانونی تا ۳۰ کیلومتر و بزرگای بین ۴ تا ۸ انتخاب شدند. داده‌های تجمیع شده مربوط به سه استان کرمانشاه، آذربایجان شرقی و کرمان بالغ بر ۱۸۶۳ مورد می‌باشد. ۷۴۸ مورد مربوط به استان کرمانشاه، ۶۸۵ مورد مربوط به استان آذربایجان شرقی و بقیه مربوط به استان کرمان می‌باشد. در جدول (۲) که در ادامه همین مقاله آمده است، نمونه‌ای از داده‌های تجمیع شده سه استان مذکور و سرعت محاسبه شده نشان داده شده است. ستون اول: فاصله ایستگاه‌های ثبت‌کننده زلزله از محل اصلی رخداد زلزله - کیلومتر، ستون دوم: زمان رخداد اصلی زلزله، ستون سوم: زمان ثبت زلزله در ایستگاه‌ها، ستون چهارم: مدت زمان ثبت زلزله در ایستگاه‌ها. ایستگاه‌های دیگری که در فاصله‌های مختلف و زیادی نسبت به مکان اصلی رخداد زلزله قرار دارند در حقیقت با مدت زمان بیشتری رخداد را ثبت خواهند نمود و در حقیقت لرزه‌نگاشت‌ها با تأخیر زمانی زلزله را ثبت خواهند کرد. ستون پنجم: تبدیل مدت زمانی به واحد ثانیه، ستون ششم: محاسبه سرعت (حاصل تقسیم ستون اول بر ستون پنجم) - کیلومتر بر ثانیه.

شایستگی به ازای کلیه افراد جمعیت می‌باشد [۱۹].

در این پژوهش، ابتدا داده‌های دریافت شده از مرکز لرزه‌نگاری کشوری برای این سه استان با هم ادغام شده که بالغ بر تعداد ۱۸۶۳ رخداد زلزله برآورد گردید. پس از استخراج داده‌های مربوطه، نسبت به محاسبه سرعت امواج زلزله ( $V_p$ ) اقدام شد. سپس با نادیده گرفتن حدود ۲۵ درصد از این داده‌ها، نسبت به استخراج مدل ریاضی برای سرعت امواج زلزله اقدام شد. برای این منظور یک فرم تحلیلی ساده در نظر گرفته شده و پارامترهای آن با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. در انتها، فرمول به‌دست‌آمده در مورد داده‌های چشم‌پوشی شده اولیه (۲۵ درصد) اعمال شد که نتایج مشابهی به دست آمد. در ادامه نمونه‌ای از اطلاعات به‌دست‌آمده در مورد استان کرمانشاه از مرکز لرزه‌نگاری کشور نشان داده می‌شود (شکل ۱). لازم به توضیح است فاز Pn به علت فراوانی موجود در داده‌های به‌دست‌آمده، انتخاب شده است. جدول (۱) نیز ثبت داده‌های زلزله فوق را در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد.

### ۳- روش تحقیق

برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، سه استان کرمان، آذربایجان



شکل (۱): نمونه‌ای از اطلاعات زلزله.

جدول (۲): نمونه‌ای از داده‌های تجمیع شده و محاسبات انجام شده.

| فاصله<br>کانونی<br>(کیلومتر) | رویداد<br>زمانی | زمان<br>رسیدن | زمان<br>(ثانیه:دقیقه:ساعت) | انتقال به<br>دوم | سرعت<br>(کیلومتر بر ثانیه) |
|------------------------------|-----------------|---------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| ۵۸۰                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۴۳      | ۰۰:۰۱:۲۰                   | ۸۰               | ۷/۲۵                       |
| ۴۲۶                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۲۵      | ۰۰:۰۱:۰۲                   | ۶۲               | ۶/۸۷۰۹۶۸                   |
| ۷۰۳                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۵۹      | ۰۰:۰۱:۳۶                   | ۹۶               | ۷/۳۲۲۹۱۷                   |
| ۳۳۹                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۱۴      | ۰۰:۰۰:۵۱                   | ۵۱               | ۶/۶۴۷۰۵۹                   |
| ۲۴۷                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۰۳      | ۰۰:۰۰:۴۰                   | ۴۰               | ۶/۱۷۵                      |
| ۷۹۷                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۶:۱۰      | ۰۰:۰۱:۴۷                   | ۱۰۷              | ۷/۴۴۸۵۹۸                   |
| ۵۳۱                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۳۷      | ۰۰:۰۱:۱۴                   | ۷۴               | ۷/۱۷۵۶۷۶                   |
| ۸۳۸                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۶:۱۴      | ۰۰:۰۱:۵۱                   | ۱۱۱              | ۷/۵۴۹۵۵                    |
| ۵۹۷                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۴۶      | ۰۰:۰۱:۲۳                   | ۸۳               | ۷/۱۹۲۷۷۱                   |
| ۴۷۴                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۳۱      | ۰۰:۰۱:۰۸                   | ۶۸               | ۶/۹۷۰۵۸۸                   |
| ۴۱۲                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۲۳      | ۰۰:۰۱:۰۰                   | ۶۰               | ۶/۸۶۶۶۶۷                   |
| ۴۸۴                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۳۲      | ۰۰:۰۱:۰۹                   | ۶۹               | ۷/۰۱۴۴۹۳                   |
| ۴۰۳                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۲۲      | ۰۰:۰۰:۵۹                   | ۵۹               | ۶/۸۳۰۵۰۸                   |
| ۲۵۹                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۰۴      | ۰۰:۰۰:۴۱                   | ۴۱               | ۶/۳۱۷۰۷۳                   |
| ۲۵۰                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۰۳      | ۰۰:۰۰:۴۰                   | ۴۰               | ۶/۲۵                       |
| ۴۱۴                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۲۳      | ۰۰:۰۱:۰۰                   | ۶۰               | ۶/۹                        |
| ۳۰۸                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۱۰      | ۰۰:۰۰:۴۷                   | ۴۷               | ۶/۵۳۱۹۱                    |
| ۴۸۴                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۳۱      | ۰۰:۰۱:۰۸                   | ۶۸               | ۷/۵۳۱۹۱                    |
| ۳۹۰                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۲۰      | ۰۰:۰۰:۵۷                   | ۵۷               | ۶/۸۴۲۱۰۵                   |
| ۵۰۷                          | ۰۰:۰۴:۲۳        | ۰۰:۰۵:۳۵      | ۰۰:۰۱:۱۲                   | ۷۲               | ۷/۰۴۱۶۶۷                   |

جدول (۱): ثبت وقوع زلزله در ایستگاه‌های مختلف.

| شماره | ایستگاه  | فاز | زمان رسیدن موج | فاصله تا محل زلزله<br>(کیلومتر) |
|-------|----------|-----|----------------|---------------------------------|
| ۱     | ABH1 BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۴۳       | ۵۸۰                             |
| ۲     | AHWZ BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۵       | ۴۲۶                             |
| ۳     | ANAR BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۵۹       | ۷۰۳                             |
| ۴     | AZR SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۱۴       | ۳۳۹                             |
| ۵     | BDRS BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۰۳       | ۲۴۷                             |
| ۶     | CHK SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۶:۰۳       | ۷۹۷                             |
| ۷     | DMV SPE  | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۷       | ۵۳۱                             |
| ۸     | DSBU BHE | Pn  | ۰۰:۰۶:۱۴       | ۸۳۸                             |
| ۹     | FIR BHZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۴۶       | ۵۹۷                             |
| ۱۰    | GAS1 BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۱       | ۴۷۴                             |
| ۱۱    | GIDE BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۳       | ۴۱۲                             |
| ۱۲    | GRMI BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۲       | ۴۸۴                             |
| ۱۳    | GZV SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۲       | ۴۰۳                             |
| ۱۴    | HAGD BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۰۴       | ۲۵۹                             |
| ۱۵    | HGHA BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۰۳       | ۲۵۰                             |
| ۱۶    | HRS SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۳       | ۴۱۴                             |
| ۱۷    | HSH SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۱۰       | ۳۰۸                             |
| ۱۸    | JHBN BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۱       | ۴۸۴                             |
| ۱۹    | JIR1 BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۰       | ۳۹۰                             |
| ۲۰    | KLH SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۵       | ۵۰۷                             |
| ۲۱    | KLNJ BHN | Pn  | ۰۰:۰۵:۵۰       | ۶۳۶                             |
| ۲۲    | KRSH BHN | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۸       | ۵۴۰                             |
| ۲۳    | LAS SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۴۷       | ۶۱۱                             |
| ۲۴    | MAHB BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۰۲       | ۲۴۳                             |
| ۲۵    | PIR SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۰       | ۴۷۶                             |
| ۲۶    | QABG BHZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۱۲       | ۳۲۰                             |
| ۲۷    | QAMS SPZ | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۱       | ۴۷۸                             |
| ۲۸    | QOM SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۵       | ۴۳۵                             |
| ۲۹    | RAM SPE  | Pn  | ۰۰:۰۵:۵۱       | ۶۴۶                             |
| ۳۰    | SFB BHZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۹       | ۵۴۴                             |
| ۳۱    | SHB SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۲۲       | ۴۱۰                             |
| ۳۲    | TAPT BHZ | Pn  | ۰۰:۰۶:۳۴       | ۹۹۲                             |
| ۳۳    | TKDS BHZ | Pn  | ۰۰:۰۶:۳۶       | ۱۰۰۲                            |
| ۳۴    | TPRV BHZ | Pn  | ۰۰:۰۶:۳۲       | ۹۷۵                             |
| ۳۵    | VRN BHZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۳۳       | ۴۹۶                             |
| ۳۶    | ZEF SPZ  | Pn  | ۰۰:۰۵:۴۵       | ۵۸۹                             |

شکل (۲) نمودار تغییرات سرعت متوسط انتشار بر حسب فاصله را برای زلزله‌های مختلف ثبت شده مربوط به سه استان منتخب نشان می‌دهد.

سرعت انتشار امواج با تغییر محیط انتشار تغییر می‌کند. عوامل متعددی می‌تواند بر سرعت انتشار موج فشاری در یک محیط مؤثر باشد از قبیل مدول الاستیسیته، مدول برشی، دانسیته، درجه‌ی اشباع، تخلخل، ضریب پواسون و فشار همه‌جانبه، بررسی‌ها نشان داده‌اند که تغییر درجه‌ی اشباع محیط باعث تغییر سرعت انتشار موج فشاری می‌شود. این تغییرات در سنگ‌ها و خاک‌ها متفاوت است. در محیط‌های خاک به‌طور معمول با افزایش درجه‌ی اشباع کاهش در سرعت انتشار موج فشاری تا درجه‌ی اشباع حدود ۹۹ درصد مشاهده می‌شود و بعد از آن

ملاحظه ناگهانی در سرعت در مرز موهو تنها می‌تواند در ارتباط با تغییر ناگهانی جنس سنگ‌ها باشد. پوسته عمدتاً از انواع سنگ‌های آذرین اسیدی تا بازی تشکیل شده ولی گوشته از سنگ‌های الترامافیک که کانی غالب آنها الیوین می‌باشد، تشکیل شده است. ضخامت پوسته‌ای در کراتون‌ها و شیلدها که پوسته بسیار قدیمی و پایدار است در حدود ۳۰ کیلومتر است ولی ضخامت پوسته قاره‌ای در زیر کوه‌ها زیاد است. در ایران ضخامت تقریبی پوسته حدود ۴۵ کیلومتر می‌باشد. با توجه به مقدمه اشاره شده در بالا، افزایش تدریجی سرعت در نمودار، احتمالاً به علت نزدیک شدن مسیر موج به مرز موهو بوده و این افزایش تحت تأثیر سرعت زیادتر در بخش زیرین مرز موهو قرار گرفته است. در ادامه، روند ثابت و تمایل به یک مقدار حدی در نمودار نیز احتمالاً مربوط به انتخاب داده‌های این تحقیق در اعماق تا حداکثر سی کیلومتر می‌باشد [۶].

#### ۴- ارائه مدل

همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است با افزایش فاصله از مرکز زلزله سرعت انتشار امواج افزایش یافته و به یک مقدار حدی میل می‌کند. این روند در مورد داده‌های زلزله مربوط به هر سه استان مشاهده می‌شود. برای پیدا کردن مدل مناسبی بین فاصله و سرعت رابطه زیر برای آن در نظر گرفته می‌شود.

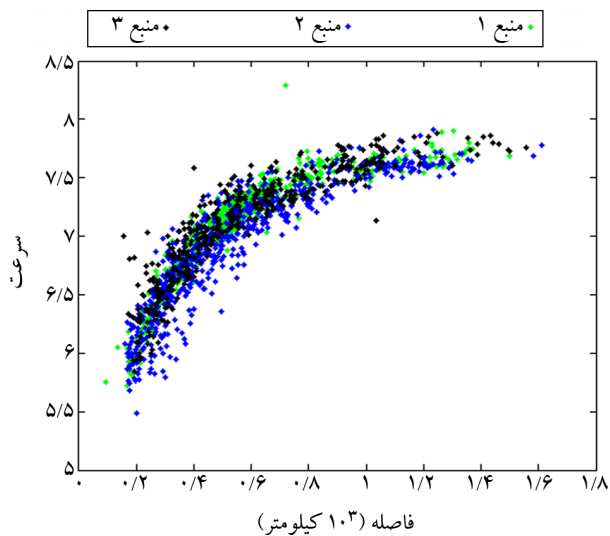
$$V(x) = a + be^{-kx} \quad (1)$$

در این رابطه  $a$ ،  $b$  و  $k$  ضرایب ثابت و  $k$  فاصله از محل وقوع زلزله بر حسب هزار کیلومتر می‌باشد. در معادله فوق باید ضرایب طوری تعیین شود که خروجی این مدل با داده‌های ثبت شده دارای کمترین مقدار خطا باشد. برای این منظور از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. برای این منظور تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(a,b,k) = \sum_{i=1}^N |V_i - V(x_i)| \quad (2)$$

در این رابطه  $V_i$  سرعت به دست آمده به صورت اندازه‌گیری

افزایش ناگهانی در سرعت رخ می‌دهد. در محیط‌های سنگی عموماً با افزایش درجه‌ی اشباع، افزایش در سرعت موج فشاری مشهود است [۷]. همان‌طور که از شکل فوق مشخص است با افزایش فاصله ایستگاه‌های ثبت زلزله از مرکز اصلی رخداد زلزله (رومکز زلزله)، سرعت انتشار امواج درونی  $Pn$  افزایش یافته و به یک مقدار حدی میل می‌کند. این روند در مورد داده‌های زلزله مربوط به هر سه استان مشاهده می‌شود.

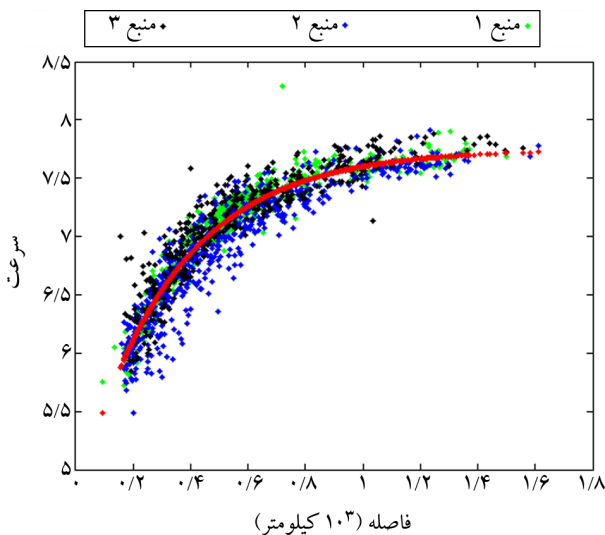


شکل (۲): سرعت متوسط انتشار امواج بر حسب فاصله از محل وقوع.

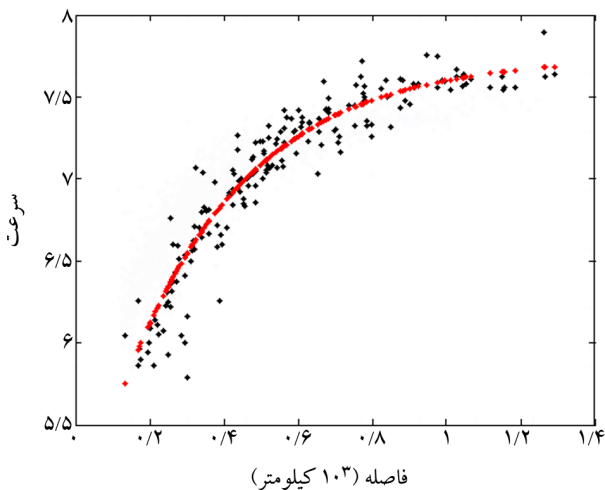
یادآوری: به عنوان مقدمه‌ای کوتاه یادآوری می‌شود، سرعت امواج درونی  $p$  در هوا، آب و سنگ گرانیت به ترتیب ۳۳۰، ۱۴۵۰ و ۵۰۰ متر بر ثانیه است. سرعت این امواج در لایه‌های درونی زمین به ۱۲۰۰۰ متر بر ثانیه هم می‌رسد. طبق مطالعات انجام شده، امواج طولی بعد از فاصله ۱۶۰ کیلومتری از رومکز زلزله، سرعتشان از ۶ به ۸ کیلومتر بر ثانیه می‌رسد. موج طولی با سرعت ۸ کیلومتر بر ثانیه همان  $Pn$  می‌باشد. البته در رشته کوه‌ها فاصله مذکور بیشتر است. فرض اولیه بر اساس تحقیقات آقای موهو بر این مبنا بود که زمین از دو لایه تشکیل شده است. در واقع یک لایه کم سرعت (۶ کیلومتر بر ثانیه) بر روی یک لایه پرسرعت‌تر (۸ کیلومتر بر ثانیه) قرار دارد. ضخامت لایه سطحی هم ۳۰ کیلومتر مشخص شد. مرز بین لایه سطحی (پوسته) و زیرین (گوشته) به نام مرز «موهو» نام گرفت. این تغییر قابل

$$\begin{aligned} a &= 7.74 \\ b &= 2.98 \\ k &= 3.02 \end{aligned} \quad (3)$$

بر اساس ضرایب به دست آمده، خروجی مدل (۱) در شکل (۴) با داده‌های ثبت شده مقایسه شده است. در این شکل داده‌های آموزش که برای استخراج مدل از آنها استفاده شده است نشان داده می‌شود. از این شکل مشخص است که رابطه (۱) برای داده‌های زلزله مربوط به هر سه استان دارای دقت مناسب است. همچنین خروجی مدل ۱ با داده‌های ثبت شده برای داده‌های تست در شکل (۵) مقایسه شده است که در این حالت نیز تطابق مناسبی بین خروجی مدل و داده‌های واقعی مشاهده می‌شود.



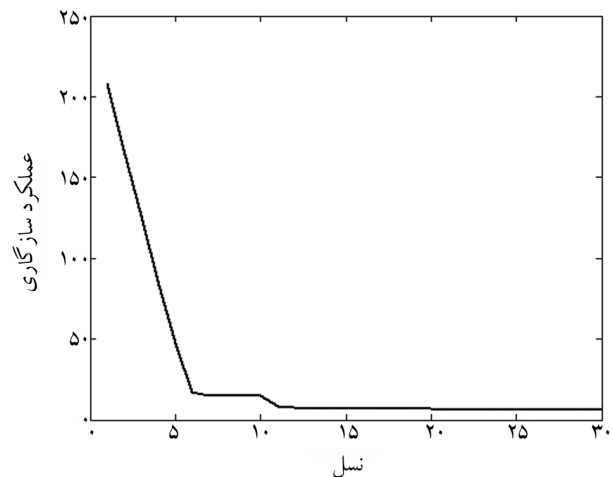
شکل (۴): خروجی مدل ۱ با داده‌های ثبت شده برای داده‌های آموزش.



شکل (۵): خروجی مدل ۱ با داده‌های ثبت شده برای داده‌های تست.

و  $V(x_i)$  مقدار سرعت به دست آمده طبق رابطه (۱) می‌باشد. مسئله بهینه‌سازی به این صورت تعریف می‌شود که پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $k$  به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی و تابع معادله (۲) به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. بنابراین الگوریتم ژنتیک با افزایش نسل‌ها سعی بر کمینه کردن تابع  $f(a,b,k)$  دارد که با رسیدن به این هدف خطای بین مدل و داده‌های ثبت شده کمینه خواهد شد. برای اجرای برنامه فایل اکسلی شامل اطلاعات فاصله و سرعت که نمونه آن در جدول (۲) آمده است در برنامه بارگذاری می‌شود. در هر مرحله از الگوریتم، خروجی مدل با نتایج این جدول مقایسه شده و خطای حل که همان تابع برازندگی یا شایستگی می‌باشد تعیین می‌شود. الگوریتم بهترین افراد (پارامترهایی که کمترین خطا را دارند) به نسل بعد منتقل کرده و روند مجدداً تکرار می‌شود.

برای اجرای الگوریتم از ۲۰۰۰ جمعیت و ۳۰ نسل استفاده شده است. همچنین ضریب همگذری برابر ۷۰ درصد و ضریب فرجهش برابر ۲ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین ۲۵ درصد داده‌ها برای تست مدل ارائه شده کنار گذاشته شده و در استخراج مدل از آنها استفاده نشده است. شکل (۳) تغییرات تابع هدف کمینه هر نسل با افزایش نسل‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقدار تابع هدف کاهش پیدا کرده و بعد از تقریباً ۲۵ نسل به مقدار ثابت همگرا شده است. مقدار ثابت‌های  $a$ ،  $b$  و  $k$  به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید.



شکل (۳): تغییرات تابع هدف با افزایش نسل‌ها.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی سرعت متوسط انتشار امواج طولی زلزله بر حسب فاصله از محل وقوع زلزله پرداخته شد. برای این منظور سه زلزله مختلف در سه نقطه متفاوت ایران در نظر گرفته شده و زمان رسیدن این امواج و ثبت آنها در ایستگاه‌های مختلف از اطلاعات مؤسسه ژئوفیزیک استخراج و با داشتن فاصله ایستگاه‌ها و اختلاف زمان انتقال موج، سرعت متوسط امواج محاسبه گردید. در همه موارد رفتار کلی یکسانی مشاهده شد و آن افزایش سرعت امواج زلزله با انتشار و طی مسافت و میل کردن آن به مقدار ۷/۷۴ کیلومتر بر ثانیه برای هر سه مورد تست می‌باشد که در متن مقاله به علت فیزیکی آن اشاره شده است. برای مدل‌سازی تغییرات سرعت امواج بر حسب تغییرات مسافت، یک رابطه ریاضی به صورت تابع‌نمایی در نظر گرفته شده و پارامترهای مجهول مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شد. برای این منظور خطای بین خروجی مدل و داده‌های واقعی به‌عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و متغیرهای بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن این تابع هدف تعیین شدند. نمایش خروجی مدل برای داده‌های آموزش و تست نشان داد که مدل ارائه شده دارای دقت قابل قبول برای مدل‌سازی سرعت امواج طولی می‌باشد. این مدل می‌تواند در تعیین زمان رسیدن امواج یک زلزله به نقاط مختلف استفاده شود. همچنین با ثبت وقوع زلزله در چندین نقطه مختلف و با استفاده از رابطه ارائه شده امکان تخمین محل زلزله امکان‌پذیر می‌باشد که نویسندگان به‌عنوان کارهای آتی این موضوع را پیشنهاد می‌دهند.

## مراجع

1. Ashayeri, I., Biglari, M., and Rezaei Sefat, M. (2015) Deriving rayleigh wave velocity equation at surface of semi-infinite unsaturated media. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **1**(1), 51-57 (in Persian).
2. Ansaripour M. and Rezapour M. (2015) Crustal velocity in the Busher region and analyses of 2013 Mw 6.3 Kaki-Busher Earthquake. *Journal of the Earth and Space Physics*, **41**(3), 351-361 (in Persian).
3. Javan Mehri, M., Bayramnejad, I., Gheitanchi, M.R., and Azhari, S.M. (2012) Crustal seismic velocity structure study in Kope Dagh using simultaneous inversion modeling. *Journal of Earth and Space Physics*, **41**(3), 351-361 (in Persian).
4. Zhao, Z. and Zeng, R. (1993) The P and S wave velocity structures of the crust and upper mantle beneath Tibetan Plateau. *Acta Seismologica Sinica*, **6**, 299-304, <https://doi.org/10.1007/BF02650942>.
5. Abd Etedal, M. and Gheitanchi, M.R. (2011) Investigation of one dimensional upper crust velocity structure in northeast Khorasan by the travel time inversion of P waves. *Journal of Earth and Space Physics*, **37**(2), 139 (in Persian).
6. Ghods, A. and Sobouti, F. (2005) Quality assessment of seismic recording: Tehran seismic telemetry network. *Asian Journal of Earth Sciences*, **25**, 687-694.
7. Eliassy, M., Biglari, M., and Ashayeri, I. (2018) Empirical Modeling of Compressional wave Velocity of Fine Grained Unsaturated Soils Subject to Drying. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, **18**(4) (in Persian).
8. Bayramnejad, I., Mirzaei, M., and Gheitanchi, M.R. (2007) Determination of improved velocity model for the north west Iran region, using simultaneous inversion of local earthquake travel times. *Journal of Earth and Space Physics*, **33**(3), 47-59 (in Persian).
9. Nowrouzi, Gh., Priestley, K.F., Ghafory-Ashtiany, Mohsen, Javan Doloei, Gh., and Rham, D.J. (2007) Crustal velocity structure in Iranian Kopeh-Dagh, from analysis of P-waveform receiver functions. *JSEE*, **8**(4), 187-194.
10. Lin, G. and Wang, Y. (2005) The P-wave velocity structure of the crust-mantle transition zone in the continent of China. *J. Geophys. Eng.*, **2**, 268-276.
11. Fatemizadeh, A. and Tatar, M. (2006) Estimation of crustal velocity structure of the central Zagros using refracted waves. *Journal of Earth Sciences*, **15**(60), 2-11 (in Persian).
12. Rostami, Sh., Sepahvand, M.R., Mahood, M., and Nasrabadi, A. (2021) Quick estimation of the magnitude and epicentral distance of the



- earthquake in eastern half of Kerman Province by single station (B- $\Delta$ ) method. *Journal of Research on Applied Geophysics*, 7(1), 91-102 (in Persian).
13. Paul, A., Hatzfeld, D., Kaviani, A., Tatar, M., and Péquegnat, C. (2010) Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros mountain belt (Iran). *Geological Society*, London, Special Publications.
  14. Mousavian, S. and Tatar, M. (2014) Crustal Structure of the Western Alborz by joint inversion of the receiver function and surface wave dispersion curve. *Iranian Journal of Geophysics*, 7(4), 94-81 (in Persian).
  15. Mohammadipour, Z., Yaminifard, F., and Tatar, M. (2016) Three-dimensional upper structure of the eastern Zagros (Iran) using local tomography. *Journal of Earth Sciences*, 25(98), 72-67 (in Persian).
  16. Yaminifard, F. and Moradi, A. (2011) Crustal velocity structure beneath Tehran based on teleseismic and mining explosion data recorded by Tehran City seismic network (TCSN). *Quarterly Journal of Earth and Space Physics*, 37(3), 59 (in Persian).
  17. Afra, M., Naghavi, M., and Shirzad, T. (2016) Velocity structure in Tehran using P-Wave tomography. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> Iranian Geophysical Conference*, 63-60 (in Persian).
  18. Azhari, S.M., Rezapour, M., and Mottaghi, A.A. (1397) Determination of upper crustal velocity structure in north eastern part of Iran between Kashfarud and Binalood faults. *Journal of Earth Sciences*, 27(108), 95-104.
  19. Whitley, D. (1994) A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4(2), 65-85.

## Presenting a Model of Earthquake Wave Velocity Changes ( $V_{P_n}$ ) Based on Genetic Algorithm (Case Study - Iran)

Rasool Mazloom<sup>1\*</sup> and Ehsan Maani Miyandoab<sup>2</sup>

1. M.Sc. Graduate, Seismological Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: r.mazloom@ut.ac.ir
2. Assistant Professor, Faculty of Engineering Science, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Earthquake is one of the most dangerous natural disasters of the present age, which has always shown its importance objectively. An earthquake is a natural disaster that, depending on its magnitude, can cause massive catastrophes in a short time. In this study, the authors seek to provide a simple analytical form for the propagation speed of waves, which despite previous studies, has not received much attention. Therefore, the purpose of this paper is to extract and present a model for earthquake wave velocity changes ( $V_{P_n}$ ) using Genetic Algorithm (GA).

### Research Methods

The data used in this study were received from the National Seismological Center of the Institute of Geophysics, University of Tehran. In this study, three provinces of Kermanshah, East Azerbaijan and Kerman were selected. Earthquake event characteristics of each of these three provinces in the period between 2006 and the end of 2018, with a focal depth of up to 30 km and magnitude between 4 and 8 were selected. In order to use the Genetic Algorithm (GA), first the data received from the National Seismological Center for these three provinces were merged, which was estimated at 1863 earthquake events. After extracting the relevant data, the earthquake wave velocity ( $V_{P_n}$ ) was calculated. Then, ignoring about 25% of this data, a mathematical model for earthquake velocity was extracted. Finally, the obtained formula was applied to the initial ignored data (25%), which had similar results. To model the changes in wave velocity according to distance changes, a mathematical relation was considered as an exponential function and the unknown parameters of the model were determined using a Genetic Algorithm (GA). To find a suitable model between distance and speed, the following relation is considered for it.

$$V(x) = a + be^{-kx} \quad (1)$$

In this regard,  $a$ ,  $b$  and  $k$  are constant coefficients and  $x$  is the distance from the earthquake site in terms of one thousand kilometers. In the above equation, the coefficients must be determined so that the output of this model with the recorded data has the least amount of error. For this purpose, the Genetic Algorithm (GA) optimization method is used, and the error between the model output and the actual data was considered as the objective function of the optimization problem, and the optimization variables were determined with the aim of minimizing this objective function. The objective function is defined as follows:

$$f(a, b, k) = \sum_{i=1}^N |V_i - V(x_i)| \quad (2)$$

In this connection,  $V_i$  is the velocity obtained as a measure and  $V(x_i)$  the amount of speed obtained according to the Equation (1). For implementation, the Genetic Algorithm (GA) has been used 2000 populations and 30 generations. Also the coefficient of crossover is equal to 70% and coefficient mutation is equal to 2%.

The output of the model for training and test data showed that the proposed model has acceptable accuracy for modeling the velocity of longitudinal waves. This model can be used to determine the arrival time of waves of an earthquake to different points. It is also possible to estimate the location of the earthquake by recording the occurrence of the earthquake at several different points and using the provided relationship.

**Keywords:** Genetic Algorithm (GA), Modeling, Wave Velocity.