

Attenuation relationships of Arias intensity for Iranian plateau using intelligent Gene Expression Programming

Ali Tavassolian¹, Mohammad Shamekhi Amiri^{2*}, Attieh Eshaghi³

1- MSc Student, Dept. of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT

The earthquake is one of the natural hazards that have caused many casualties and financial losses throughout the world over the years. This has been the reason why the earthquake hazard analysis studies should be studied more seriously. Iran is also located in one of the seismically active regions of the world, the Himalayan- Alpine belt, which experiences many earthquakes every year. The Arias intensity function, as one of the important earthquake strong motion parameters, contributes greatly to the analysis of seismic hazard, which can be used to estimate the stability of slopes during the earthquake. The purpose of this research is to develop a new attenuation relationship for Arias intensity function in the Iranian plateau using intelligent methods. In this research, 1012 strong motion data were used. Initially, the data required to be filtered were corrected and then all data was analyzed. In this study, parameters such as magnitude of earthquake, focal depth, shear wave velocity and geographic position of the region were used as a variable for the attenuation relationship. Moment magnitude (M_w) was used as earthquake magnitude and earthquakes with magnitudes of above 4 were used in this research. The geographic location of Iran was divided into two regions of Central Alborz and the Zagros region. Gene Expression Programming (GEP), a kind of intelligent algorithm, was used as a method for regression and calculation of the objective function. The advantage of this method is that at first the model for the objective function is not specified and the model is presented optimally by the intelligent method. The fitness function is also defined based on the root least squared error (RMSE). Finally, the attenuation relation based on this fitness function was calculated and the observed results have a high fitness.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 November 2018

Revise Date: 10 April 2019

Accept Date: 21 April 2019

Keywords:

Attenuation Relationship

Arias Intensity

GEP

Zagros

Alborz-Central Iran

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.156437.1719

*Corresponding author: Mohammad Shamekhi Amiri

Email address: shamekhi@shahroodut.ac.ir

ارائه رابطه کاهندگی تابع شدت اریاس در فلات ایران با استفاده از الگوریتم هوشمند

توسعه ژنی

علی توسلیان^۱، محمد شامخی امیری^{۲*}، عطیه اسحاقی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

چکیده

زلزله یکی از خطرهایی است که در طول سالیان گذشته تلفات و خسارات مالی زیادی به جای گذاشته است. ایران نیز به دلیل قرارگیری در یکی از مناطق لرزه-خیز دنیا یعنی نوار آلپ-همیالیا در معرض این خطرات واقع است. به همین دلیل مطالعات تحلیل خطر لرزه ای در ایران از اهمیت خاصی برخوردار است. از ملزومات تحلیل خطر، استفاده از روابط کاهندگی پارامترهای لرزه ای است. تابع شدت اریاس بعنوان یکی از پارامترهای مهم جنبش نیرومند زمین، در تجزیه و تحلیل خطر لرزه ای استفاده می شود که به موجب آن می توان پایداری شیب ها در اثر زلزله را تخمین زد. هدف این پژوهش، ارائه رابطه کاهندگی تابع شدت اریاس در فلات ایران با استفاده از روش های هوشمند می باشد. در این پژوهش از ۱۰۱۲ داده شتاب نگاری استفاده شد. در ابتدا داده هایی که نیازمند فیلتر شدن بودن اصلاح گردیدند و سپس تمام داده ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پارامترهایی از قبیل بزرگای زلزله، فاصله کانونی، سرعت موج برشی خاک و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر، بعنوان متغیر برای رابطه کاهندگی استفاده شد. بزرگای زلزله بزرگتر یا مساوی ۴ در مقیاس بزرگای گشتاوری (MW) در این تحقیق بکار گرفته شد. همچنین از نظر موقعیت جغرافیایی ایران به دو ناحیه البرز-ایران مرکزی و ناحیه زاگرس تقسیم شد. در نهایت الگوریتم توسعه ژنی (GEP) که نوعی الگوریتم هوشمند است، بعنوان روش رگرسیون گیری و محاسبه تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت. مزیت این روش این است که در ابتدا الگویی برای تابع هدف مشخص نشده و الگو هم توسط روش هوشمند بصورت بهینه ارائه می گردد. تابع برازندگی نیز براساس ریشه حداقل مربعات خطا (RMSE) تعریف گردید. در نهایت رابطه کاهندگی براساس این تابع برازندگی محاسبه شد و نتایج مشاهده شده دارای ضریب تناسب بالا و برازندگی ۱۸۶۷ از ۱۰۰۰ می باشد. همچنین رابطه ارائه شده در مقایسه با تحقیقات گذشته، مطابقت خوبی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: رابطه کاهندگی، تابع شدت اریاس، الگوریتم توسعه ژنی، زاگرس، البرز- ایران مرکزی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2019.156437.1719					
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.156437.1719	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۰۱	۱۳۹۸/۰۲/۰۱	۱۳۹۸/۰۱/۲۱	۱۳۹۷/۰۹/۰۵
محمد شامخی امیری shamekhi@shahroodut.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

هر ساله وقوع حوادث طبیعی در کشورهای مختلف دنیا موجب زیان‌های اقتصادی و تلفات انسانی بسیاری می‌شود. رویارویی با این حوادث یکی از مظاهر ضعف انسان در برابر بسیاری از پدیده‌های جهان است. یکی از مهمترین حوادث طبیعی، زلزله است که در حال حاضر پیش‌بینی زمان و مکان دقیق وقوع آن امکان‌پذیر نیست و تلاش پژوهشگران برای انجام این هدف هنوز در مرحله تحقیق می‌باشد. به همین دلیل وقوع ناگهانی زلزله در بیشتر اوقات جوامع بشری را غافلگیر می‌کند و نتایج نامطلوبی به جای می‌گذارد. برخی مواقع بروز تلفات و خسارت‌های اقتصادی منتج از زلزله تا سال‌ها در یک ناحیه ادامه خواهد داشت و این عدم آسایش روانی جامعه، ضرورت مطالعه و پژوهش بر روی این پدیده طبیعی را افزایش می‌دهد.

مناطق مختلفی در دنیا درگیر پدیده زلزله هستند و هرکدام خسارت‌های جانی و مالی مختلفی را در طی سالیان گذشته متحمل شده‌اند. ژاپن در حد فاصل سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۹۵، ۱۴ زلزله با بزرگای بیشتر از ۶/۵ را تجربه کرده است و تا قبل از زلزله کوبه در سال ۹۵ میلادی در مجموع بیش از ۸۰۰۰ نفر جان خود را بر اثر زلزله از دست دادند، اما زلزله فوکوشیما (۲۰۱۱) یکی از نقاط عطف تاریخ زلزله‌ای جهان بود. این زلزله با بزرگای گشتاوری حدود ۹ از شدیدترین زلزله‌های ژاپن از سال ۱۹۰۰ میلادی بوده است که تمام محاسبات محققان ژاپنی و دیگر کشورها را دگرگون کرد. ایالات متحده آمریکا هم جزء کشورهای زلزله‌خیز است بطوریکه ایالت‌های کالیفرنیا و آلاسکا زلزله‌های شدیدی را تجربه کرده‌اند. شیلی کانون رخداد بزرگ‌ترین زلزله تاریخ بوده است که با بزرگای ۹/۵ در سال ۱۹۶۰ میلادی به وقوع پیوسته است. همچنین چین، هند و نیوزیلند دیگر کشورهای زلزله‌خیز دنیا هستند [۱].

ایران نیز به دلیل قرارگیری روی کمربند لرزه‌ای فعال آلپ - هیمالیا از مناطق لرزه‌خیز دنیا محسوب می‌شود و هر از چندگاه یکبار، زلزله‌ای مخرب در بخش‌های مختلف آن روی می‌دهد. در میان زلزله‌های بزرگی که در سال‌های اخیر در ایران رخ داده است و موجب خسارات جانی و مالی زیادی شده است، می‌توان به زلزله رودبار و منجیل گیلان (۱۳۶۹) با بزرگای ۷/۳ که به موجب آن بیش از ۴۰ هزار نفر کشته و ۲۰۰ هزار نفر بی‌خانمان شدند [۲]، زلزله بم کرمان (۱۳۸۲) با بزرگای ۶/۵ که باعث تخریب بنای تاریخی ۲۰۰۰ ساله ارگ بم شد، بصورتیکه شهری که ۹۰ هزار نفر جمعیت داشت، بیش از یک سوم از ساکنانش را از دست داد و در آمار رسمی ۳۳ هزار نفر کشته، هزاران نفر زخمی و هزاران زن و کودک بی‌سرپرست شدند، زلزله بوشهر (۱۳۹۲) با بزرگای ۶/۳، سراوان سیستان و بلوچستان (۱۳۹۳) با بزرگای ۷/۸ [۳] و زلزله ازگله کرمانشاه (۱۳۹۶) با بزرگای ۷/۳ اشاره نمود.

درک کامل مراحل مختلف وقوع زلزله و اثر آنها بر حرکات زمین، لازمه‌ی مطالعه و تحقیق در زمینه ژئوتکنیک لرزه‌ای است. علوم مرتبط با لرزه‌شناسی در طی سال‌های متمادی با شناخت بیشتر ساختار و رفتار داخلی زمین، پیشرفت‌های قابل توجهی کرده است. بنابراین هر چند وقوع زلزله با پیچیدگی‌های زیادی همراه است، درعین حال درک مطلوبی از مکانیزم وقوع زلزله در اغلب مناطق لرزه‌خیز جهان حاصل شده است. مهندسان و زلزله‌شناسان در شناخت و تعیین پارامترهای جنبش نیرومند زمین تلاش‌های زیادی انجام داده‌اند، بخصوص در سال‌های اخیر براساس روش‌های مختلف تجربی و تئوری پیشرفت‌های زیادی بوجود آمده است و روش‌های مختلفی با هدف تخمین حرکت نیرومند زمین ارائه شده است.

حرکت زمین بر روی خاک به: مکانیک منبع، بزرگای، زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی سطح، فاصله سایت تا منبع و خواص دینامیکی انتشار ماده نسبت داده می‌شود [۴]. همچنین برخی پارامترها مثل رفتار غیرخطی خاک، جهت‌داری، انتشار گسیختگی، اثرات حوزه و اثر افت تنش بر روابط پیش‌بینی جنبش زمین حتی در مواردی بیشتر از برخی متغیرهای مستقل فوق مؤثرند [۵].

ثبت جنبش نیرومند زمین که در اثر زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ ایجاد می‌شود از اهمیت خاصی برخوردار است. ثبت این داده‌ها برای فهم طبیعت فرایندهای شکست پوسته لرزه‌زا، الگوی تابش امواج لرزه‌ای از چشمه و الگوی عبور امواج کاربرد دارد. همچنین ثبت جنبش نیرومند زمین می‌تواند در توسعه روابط تجربی و خصوصیات جنبش نیرومند، مؤثر باشد. اهداف اصلی لرزه‌شناسی جنبش نیرومند، بهبود فهم و درک علمی فرایندهای فیزیکی مؤثر بر جنبش نیرومند و توسعه برآوردهای قابل اعتماد خطرات لرزه‌ای برای کاهش خسارات جانی و مالی در طی زمین‌لرزه‌های آتی به منظور طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه هستند. امروزه از اطلاعات جنبش نیرومند زمین (شتاب‌نگاشت‌ها)

بطور گسترده در پروژه‌های تحلیل خطر زمین لرزه، طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زمین لرزه، محاسبه و بدست آوردن طیف‌های طراحی، تدوین روابط کاهندگی و بسیاری زمینه‌های مطالعاتی دیگر استفاده می‌شود.

۲- تعریف مسأله

تابع شدت اریاس یکی از پارامترهای لرزه‌ای است که معمولاً در تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای برای تشخیص پتانسیل آسیب‌رسانی زلزله استفاده می‌شود و بعنوان مقیاسی از لرزش‌های مرتبط با زلزله از نظر مقدار انرژی ذخیره شده توسط یک سری بی‌نهایت از نوسانگرهای دارای وزن واحد، با یک درجه آزادی و فرکانس از صفر تا بی‌نهایت تعریف شده است. این پارامتر با انتگرال مربع مدول شتاب زمین در تمام تاریخچه زمانی یک زلزله نسبت مستقیم دارد. بطور معمول، این پارامتر بر اساس یک نوسان‌ساز بدون میرایی، با توجه به رابطه زیر مورد سنجش قرار می‌گیرد [۶]:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt$$

که در این رابطه I_A تابع شدت اریاس در واحد سرعت، متر بر ثانیه (m/s) است و $a(t)$ تاریخچه زمانی شتاب زمین در واحد میانگین گرانج معادل (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه) می‌باشد، همچنین t زمان بر اساس ثانیه و T_d کل مدت زمان حرکت زمین خواهد بود. تابع شدت اریاس پارامتری است که شامل ویژگی‌هایی نظیر دامنه و مدت زمان حرکت زمین برای طیف گسترده‌ای از فرکانس‌های ثبت شده است؛ بنابراین در مقایسه با پارامترهای مبتنی بر حداکثر مقادیر حرکت زمین، به منظور ارزیابی اثرات زلزله برای اهداف مهندسی بسیار مؤثرتر می‌باشد. در واقع، تابع شدت اریاس به منظور ایجاد رابطه متناسب با آسیب زلزله بیان شده است و برای توصیف لرزش‌های با قابلیت ایجاد زمین‌لغزش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

دامنه امواج لرزه‌ای به دو علت غیرکشسان بودن زمین و گسترش هندسی با افزایش فاصله و با دور شدن از مرکز زمین لرزه، کاهش یافته و جنبش زمین با شدت کمتری احساس می‌شود که این مطلب نشان‌دهنده میرا بودن جنبش زمین می‌باشد. میزان این میرایی به عوامل مختلفی از جمله شرایط زمین‌شناسی و نوع حرکت گسل مرتبط است. بنابراین میرایی در مناطق مختلف، متفاوت می‌باشد. در نقاط مختلف دنیا در چند دهه گذشته تعیین این روابط میرایی برای یک ناحیه، به منظور بررسی‌های تحلیل خطر زلزله، همواره مورد توجه بوده است و مطالعات گسترده‌ای توسط محققان انجام شده است که در اصطلاح به این روابط، روابط کاهندگی می‌گویند. رابطه کاهندگی یعنی رابطه‌ای که بتواند میزان کاهش پارامترهای جنبشی نیرومند زمین را به پارامترهایی همچون فاصله سایت از منبع زمین-لرزه، شرایط تکنوتیکی، زمین‌شناسی، بزرگای زلزله و ... پیوند دهد [۴]. هدف این تحقیق ارائه یک رابطه کاهندگی برای پارامتر شدت اریاس در فلات ایران است که در تحلیل خطر لرزه‌ای ایران کاربرد دارد.

۳- تاریخچه

تابع شدت اریاس نخستین بار در سال ۱۹۷۰ توسط آرتور اریاس معرفی شد و پس از آن بطور گسترده‌ای در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای به کار رفته است. در دو دهه گذشته، محققان مختلف رابطه‌های کاهندگی را بطور خاص برای شدت اریاس ارائه کرده‌اند، که برخی بر اساس مطالعات منطقه‌ای، و برخی هم بر اساس مجموعه داده‌های جهانی می‌باشند.

ویلسون و کایفر [۸] در سال ۱۹۸۵ با استفاده از ۳۰ زلزله بزرگ که در کالیفرنیا آمریکا رخ داد، بطور خاص بر اساس ارزیابی خطر لرزه‌ای زمین لغزش، یک رابطه میان شدت اریاس، بزرگا و فاصله منبع به فرم زیر پیشنهاد کردند:

$$\text{Log } I_a = -4.1 + M - 2\text{Log}R \quad (1)$$

در این رابطه (I_a) تابع شدت اریاس بر اساس متر بر ثانیه، (M) بزرگای گشتاوری زلزله و (R) فاصله سایت از منبع لرزش بر اساس کیلومتر می باشد.

جیسون [۹] در سال ۱۹۸۷ از مجموعه داده های مشابهی مانند ویلسون و کایفر استفاده کرد، اما تلفیق اطلاعات زمین لرزه ۱۹۷۸ طیس ایران، مقادیر زیادی از تابع شدت اریاس را به مجموعه داده اضافه کرد. ایشان با استفاده از این داده ها و رگرسیون چندگانه رابطه زیر را ارائه داده است:

$$\text{Log } I_a = 0.98M - 1.35 \text{Log}R - 4.9 \quad (2)$$

ضریب همبستگی محاسبه شده توسط جیسون برای این رابطه، ۰/۴۸ بوده است. در این رابطه (I_a) تابع شدت اریاس بر اساس متر بر ثانیه، (M) بزرگای گشتاوری، (R) فاصله منبع زمین لرزه تا سایت مورد نظر که واحد آن کیلومتر می باشد.

سبتا و پاگلیس [۱۰] در سال ۱۹۹۶ با استفاده از تعریف متفاوت تری از تابع پیش بینی شدت اریاس نسبت به رابطه ویلسون، یک رابطه مبتنی بر اثرات منطقه ای را بر مبنای یک پایگاه داده شتاب نگار ایتالیایی شامل ۹۵ داده ناشی از ۱۷ زمین لرزه با بزرگای ۴/۶ تا ۶/۸ ارائه کردند:

$$\text{Log } I_a = 0.729 + 0.911M - 1.8181 \text{Log} \sqrt{R^2 + 28.1} + 0.244s_1 + 0.139s_2 \pm 0.397 \quad (3)$$

در این رابطه (M) بزرگای گشتاوری زلزله، (I_a) تابع شدت اریاس بر اساس متر بر ثانیه و (R) فاصله سایت از منبع لرزش بر اساس کیلومتر می باشد. (S_1 ، S_2) نمایانگر پارامترهای شرایط منطقه می باشند (۰، ۰) برای سنگ های سخت، (۱، ۰) برای خاک های کم عمق و (۱، ۰) برای خاک های عمیق در نظر گرفته می شود.

هاوان و همکاران [۱۱] روابط کاهندگی تابع شدت اریاس را برای چهار سطح از شرایط سایت، بر اساس داده های لرزه ای قوی ثبت شده در زلزله چی چی تایوان را ارائه کرده اند که بصورت ذیل می باشد:

$$\text{Ln } I_a = aM + b \text{Ln } R + C \quad (4)$$

ضرایب از طریق رگرسیون دو مرحله ای که به منظور جداسازی تعیین وابستگی فاصله و بزرگای استفاده شد، بدست آمده است.

تراواسارو و همکاران [۱۲]، در سال ۲۰۰۳ با استفاده از ۱۲۰۸ داده جنبش نیرومند زمین حاصل از ۷۵ زمین لرزه در مرزهای فعال بین صفحات لیتوسفریک، همچنین برخی مناطق ایران، رابطه ای برای کاهندگی اریاس به شرح ذیل ارائه نمودند:

$$\text{Ln } I_a = b_1 + b_2(M - 6) + b_3 \text{Ln} \left(\frac{m}{6}\right) + b_4 \text{Ln } R + (b_5 + b_6(M - 6))S_C + (b_7 + b_8(M - 6))S_D + b_{10}F_N + b_{11}F_R \quad (5)$$

در این رابطه، عبارات دارای نقش در مکانیزم شکست مرتبط با منبع معرفی شده اند. F_N و F_R متغیرهایی هستند که نوع گسل، معکوس و عادی را نشان می دهند، و S_C و S_D به ترتیب بیانگر شرایط سایت برای سطح های C و D می باشند که تأثیر آن وابسته به بزرگای زلزله است.

مهدویفر و همکاران [۱۳]، در سال ۲۰۰۷ به دنبال این بودند که وابستگی پارامترهای لرزش نسبت به فاصله را در یک فرم پیچیده تر از یک رابطه لگاریتمی ساده، با معرفی ترکیبی از یک رابطه لگاریتمی و یک رابطه خطی به منظور نشان دادن اثر ترکیبی گسترش هندسی و کاهندگی غیرالاستیک بر روی کاهش دامنه امواج لرزه ای؛ ارائه دهند. بدین منظور رابطه کاهندگی تابع شدت اریاس برای البرز و مرکز ایران بر اساس ۲۲ شتاب نگاشت ثبت شده از ۱۹ زلزله بصورت زیر ارائه نمودند:

$$\text{Log } I_a = -3.88 + 0.81M - \text{Log}R - 0.002R \quad (6)$$

که در آن (I_a) شدت اریاس بر اساس متر بر ثانیه و (M) بزرگای گشتاوری و (R) فاصله بین منبع تا محل زلزله بر حسب کیلومتر می باشد که از رابطه $\sqrt{r^2 + h^2} = R$ بدست می آید و R بعنوان نزدیک ترین فاصله بین شتابنگار و گسیختگی گسل در عمق h معرفی می شود.

رجبی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از نرم افزار متلب اقدام به تحلیل رگرسیونی بر اساس فرم های تابعی برخی مدل های موجود، نسبت به تدوین روابط کاهندگی تابع شدت اریاس نمودند. از داده های مربوط به ناحیه زاگرس استفاده و رابطه زیر ارائه شده است:

$$\text{Log} I_a = 0.512M - 0.017R - 0.279 \text{Log} R - 2.848 S_1 - 2.961 S_2 - 3.123 S_3 - 2.714 S_4 \quad (7)$$

در این رابطه (I_a) تابع شدت اریاس بر اساس متر بر ثانیه، (M) بزرگای گشتاوری، (R) فاصله سطحی منبع زمین لرزه تا سایت مورد نظر بر حسب کیلومتر، (S_1, S_2, S_3, S_4) برای خاک نوع ۱ بصورت (۱،۰،۰،۰)، برای خاک نوع ۲ بصورت (۰،۱،۰،۰)، برای خاک نوع ۳ - بصورت (۰،۰،۱،۰) و برای خاک نوع ۴ بصورت (۰،۰،۰،۱) می باشد.

۴- داده ها

برای بدست آوردن رابطه کاهندگی نیاز به جمع آوری داده های ثبت شده است که از نظر تعداد و دقت دارای کیفیت لازم باشند. در این پژوهش، از داده های شتابنگاری ثبت شده از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۸ که از نظر مهندسی قابل استفاده باشد، استفاده شد. این رکوردها از شبکه شتابنگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی که در حال حاضر مهم ترین شبکه ملی ثبت و پایش رخداد زلزله در داخل کشور می باشد، جمع آوری شده است. در انتخاب رکوردها، در دسترس بودن اطلاعات زلزله، از قبیل دقت و صحت بزرگا، فاصله از منبع زمین لرزه و امکان تعیین نوع زمین در نظر گرفته شد. پراکندگی داده های انتخابی به گونه ای است که شامل بیشتر مناطق کشور بوده است. این رکوردها مورد تحلیل و پردازش قرار گرفتند. عوامل مختلفی از قبیل ویژگی های ساختگاه و ژئوتکنیکی مثل نوع خاک منطقه، تعداد لایه ها، ضخامت و شیب آنها، توپوگرافی، شرایط آب زیرزمینی و ... نقش مهمی در دامنه و محتوای فرکانسی شتابنگاشت و فرکانس تصحیح آنها دارد. طیف دامنه فوریه رکوردهای ثبت شده در ساختگاه سنگی در پرپیوندهای کوتاه قوی تر است و این در حالی است که در رکوردهای ثبت شده در ساختگاه خاکی، طیف فوریه در فرکانس های پایین تر قوی تر است. در این مطالعه برای تصحیح رکوردها در شرایط ساختگاهی مختلف، از محدوده مناسب انتخاب فرکانس تصحیح که توسط قدرتی و همکاران پیشنهاد شده است و در جدول ۱ ارائه شده است، استفاده شد [۱۵].

همچنین در این مطالعه بزرگای زلزله، فاصله منبع زلزله تا ساختگاه ثبت کننده، نوع خاک و موقعیت جغرافیایی منطقه از نظر تحت تأثیر البرز-ایران مرکزی یا زاگرس بودن بعنوان متغیر در نظر گرفته شدند که در ادامه به اختصار توضیح داده خواهند شد. تابع شدت اریاس نیز بعنوان تابع هدف در نظر گرفته شد.

جدول ۱: محدوده مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها [۱۵]

محدوده مناسب F_H	محدوده مناسب F_L	نوع دستگاه ثبت	
۳۰ - ۳۳	۰/۱۵ - ۰/۲	SSA2	سنگ
۲۰ - ۲۳	۰/۱۵ - ۰/۲۵	SMA1	
۳۰ - ۳۳	۰/۰۷ - ۰/۲	SSA2	خاک
۲۰ - ۲۳	۰/۱۵ - ۰/۲	SMA1	

۴-۱- بزرگا (Mw)

اولین پارامتری که بعنوان متغیر در این رابطه کاهندگی مورد استفاده قرار گرفت، بزرگا است. بزرگا بصورت‌های مختلف تعریف و ثبت می‌شود که دلیل آن تنوع امواج زلزله و مؤسسات و سازمان‌هایی که وظیفه ثبت زلزله را برعهده دارند، است. مقیاس محلی (M_L)، مقیاس بزرگی موج حجمی (mb) و مقیاس بزرگی موج سطحی (M_s)، کمیت‌هایی تجربی هستند که بر پایه اندازه‌گیری دامنه‌های مختلف جنبش زمین، توسط دستگاه ثبت می‌شوند. در هنگام زلزله انرژی کل آزاد شده افزایش می‌یابد اما خصوصیات لرزه‌ای لزوماً با همان سرعت افزایش نمی‌یابد. این بزرگاها در زلزله‌های بزرگ دچار پدیده اشباع شدگی می‌شوند، بنابراین در زلزله‌های بزرگ مقیاس‌های فوق نمی‌توانند کاملاً قابل اطمینان باشند، اما مقیاس بزرگای گشتاوری (M_w)، بر پایه گشتاور زلزله می‌باشد و به سطوح لرزش زمین بستگی ندارد و بحث اشباع شدن در آن مطرح نیست، در نتیجه برای زلزله‌های بزرگ مقیاس قابل اطمینانی است [۴]. بنابراین در این پژوهش از بزرگای گشتاوری (M_w) استفاده شده است. در نتیجه داده‌هایی که براساس بزرگای موج سطحی (M_s)، بزرگای حجمی (mb) و یا مقیاس محلی (M_L) بوده است، با استفاده از رابطه‌های پیشنهادی نشریه ۶۲۶ به بزرگای گشتاوری تبدیل شدند [۱۶]:

تبدیل M_s به M_w :

$$M_w = 0.66M_s + 2.11 \quad 2.8 \leq M_s < 6.2 \quad (8)$$

$$M_w = 0.93M_s + 0.45 \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2$$

تبدیل mb به M_w :

$$M_w = 0.85M_b + 1.03 \quad 3.5 \leq m_b \leq 6.2 \quad (9)$$

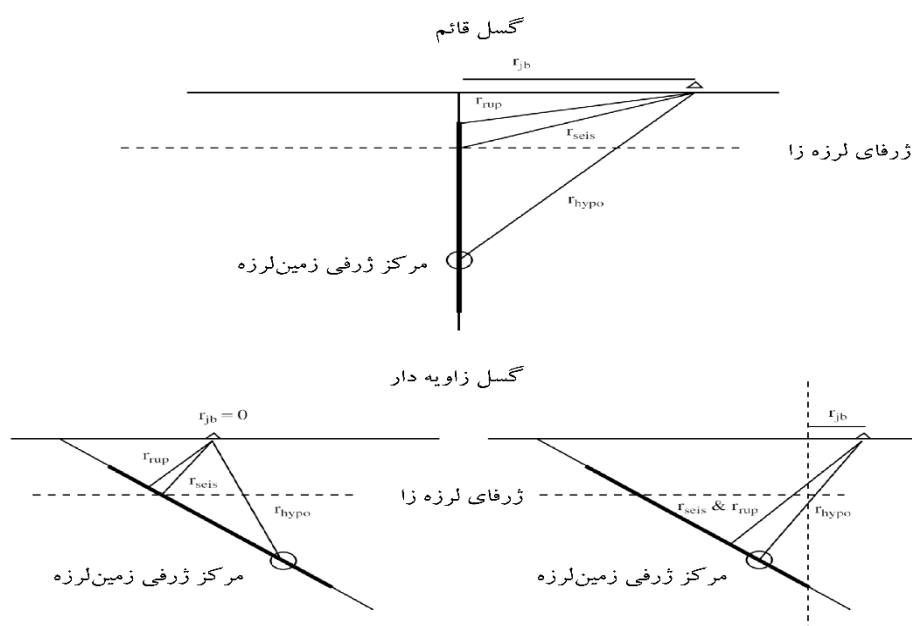
تبدیل M_L به M_w :

$$M_w = 3.73 \ln(M_L) - 0.51 \quad 4.5 \leq M_L \leq 7.5 \quad (10)$$

در انتخاب رکوردهای مورد نظر، داده زلزله‌های با بزرگای ۴ و یا بیشتر از آن و در مقیاس بزرگای گشتاوری (M_w) مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده از شبکه شتاب‌نگاری، بزرگای زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش از ۴ تا ۷/۳ در مقیاس بزرگای گشتاوری می‌باشند.

۴-۲- فاصله (R)

پارامتر دومی که در این پژوهش، برای ارائه رابطه کاهندگی استفاده شد، فاصله است. فاصله پارامتری بسیار مهم و تأثیرگذار در روابط کاهندگی می‌باشد زیرا این پارامتر نشان‌دهنده طول مسیر پیموده شده امواج از منبع زمین‌لرزه تا سایت مورد نظر است. تعاریف متفاوتی برای فاصله میان چشمه لرزه‌زا نسبت به ساختگاه ارائه شده که می‌توان به نزدیک‌ترین فاصله افقی به تصویر قائم گسیختگی (r_{jb})، نزدیک‌ترین فاصله به سطح گسیختگی (r_{rup})، نزدیک‌ترین فاصله به سطح گسیختگی لرزه‌زا (r_{seis}) و فاصله از کانون زمین‌لرزه (r_{hypo}) اشاره کرد که تمامی این فاصله‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۱۷]. در این پژوهش از فاصله کانونی یا همان وتر مثلث قائم‌الزاویه‌ای که یکی از اضلاع عمق کانونی و ضلع دیگر فاصله رو مرکزی تشکیل داده است، بعنوان فاصله در نظر گرفته شد. همچنین بازه فاصله‌های در نظر گرفته شده در داده‌های شتاب‌نگاری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند از ۵ تا ۲۵۰ کیلومتر بوده است.



شکل ۱: فواصل تعریف شده برای مدل‌های مختلف کاهندگی [۱۷]

۳-۴- سرعت موج برشی (V_s)

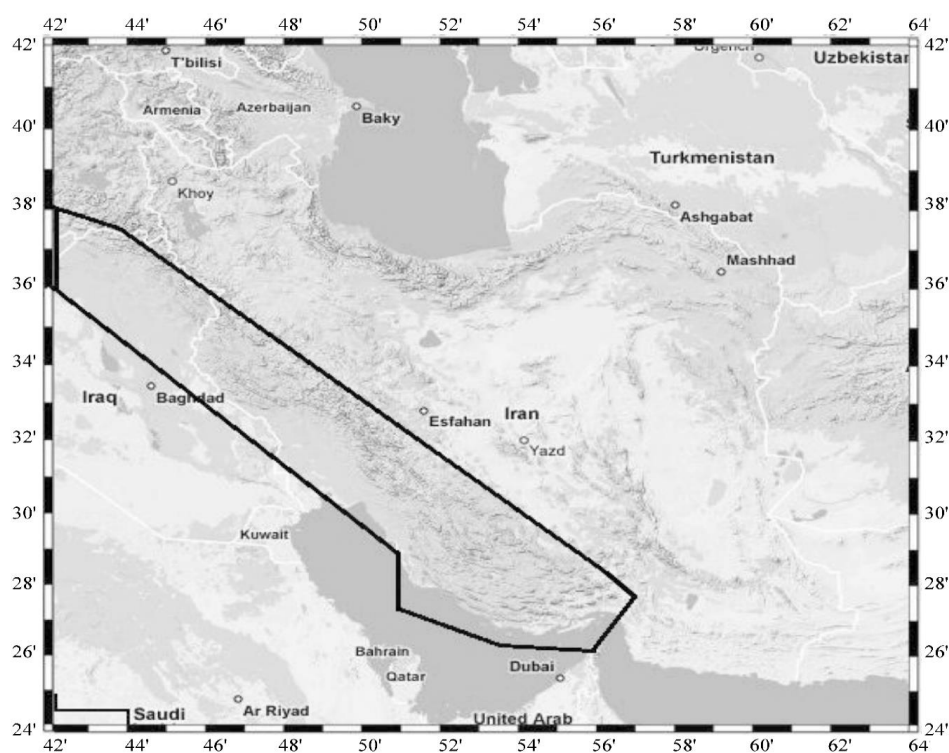
میزان بزرگنمایی حرکات زمین به خصوصیات دینامیکی ساختمان که از طریق آزمایش‌های مختلف تعیین می‌شوند، وابسته است. این خصوصیات مجموعه‌ای از پارامترهای دینامیکی خاک بوده که شامل سختی، میرایی و سرعت موج برشی لایه‌های بستر ساختمان می‌باشند. از این میان، سرعت موج برشی و پارامترهای وابسته به آن در لایه‌های قرارگرفته بر روی بستر سنگی یا لرزه‌ای یکی از پرکاربردترین این پارامترها می‌باشد. برخی از خصوصیات مهم جنیش نیرومند زمین نظیر دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان، متأثر از شرایط ساختمان است که میزان این تأثیر به هندسه، خواص مصالح لایه‌های زیرسطحی، خصوصیات حرکت ورودی و توپوگرافی ساختمان بستگی دارد [۱۸]. مطالعات جهت تعیین نوع ساختمان در ایران در ابتدا بیشتر بر مبنای مشاهدات عینی صورت گرفته است. در ادامه مطالعات جدی‌تری برای تعیین شرایط ساختمانی ایستگاه‌های ثبت زلزله صورت گرفت که می‌توان به مطالعه صورت‌گرفته توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله اشاره کرد. پارامتری که بعنوان متغیر و تعیین‌کننده شرایط ساختمانی در تعیین روابط کاهندگی در این مقاله استفاده شد، سرعت موج برشی است. از تفاوت‌های عمده این پژوهش نسبت به مطالعات گذشته، در نظر گرفتن سرعت موج برشی بعنوان یک متغیر است. در صورتی که در تحقیقات گذشته برای لحاظ کردن شرایط ساختمانی از طبقه‌بندی خاک که عمدتاً شامل بازه‌های بزرگی از سرعت موج برشی بوده استفاده گردیده است. همین فاکتور شاید باعث افزایش دقت پژوهش در تعیین متغیر شرایط ساختمانی نسبت به سایر تحقیقات انجام شده، باشد.

جدول ۲: طبقه‌بندی خاک بر اساس آئین‌نامه ۲۸۰۰ [۱۹]

نوع زمین	حدود تقریبی V_s (متر بر ثانیه)
I	بیشتر از ۷۵۰
II	$275 \leq V_s \leq 750$
III	$175 \leq V_s \leq 275$
IV	کمتر از ۱۷۵

۴-۴- موقعیت جغرافیایی منطقه (N)

آخرین متغیری که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر است. تفاوت‌های زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی ناحیه البرز-ایران مرکزی با ناحیه زاگرس موجب شده بود تا نتوان یک رابطه کاهندگی واحد برای این دو ناحیه مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که رابطه مهدویفر و همکاران برای ناحیه البرز-ایران مرکزی [۱۳] و رابطه رجیبی و همکاران برای ناحیه زاگرس [۱۴] در سال‌های اخیر ارائه شد. در این پژوهش پارامتری جدید با عنوان موقعیت جغرافیایی برای رابطه کاهندگی این پژوهش استفاده شد که به موجب آن رابطه‌ای واحد برای هر دو ناحیه البرز-ایران مرکزی و ناحیه زاگرس تحت عنوان رابطه کاهندگی ایران ارائه گردد. با توجه به تقسیم‌بندی انجام شده، حوزه هر کدام از این ناحیه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به این تقسیم بندی مناطق البرز-ایران مرکزی برابر ۱ (N=1) و مناطقی که تحت پوشش ناحیه زاگرس هستند برابر ۲ (N=2) در نظر گرفته شد. از مجموع ۱۰۱۲ داده شتاب‌نگاری ۵۳۱ رکورد مربوط به ناحیه البرز ایران مرکزی و ۴۸۱ رکورد دیگر از ناحیه زاگرس هستند. مطابق با شکل ۲ محدوده داخل منحنی بعنوان ناحیه زاگرس در نظر گرفته شده است که مختصات این ناحیه در جدول ۳ ارائه شده است.



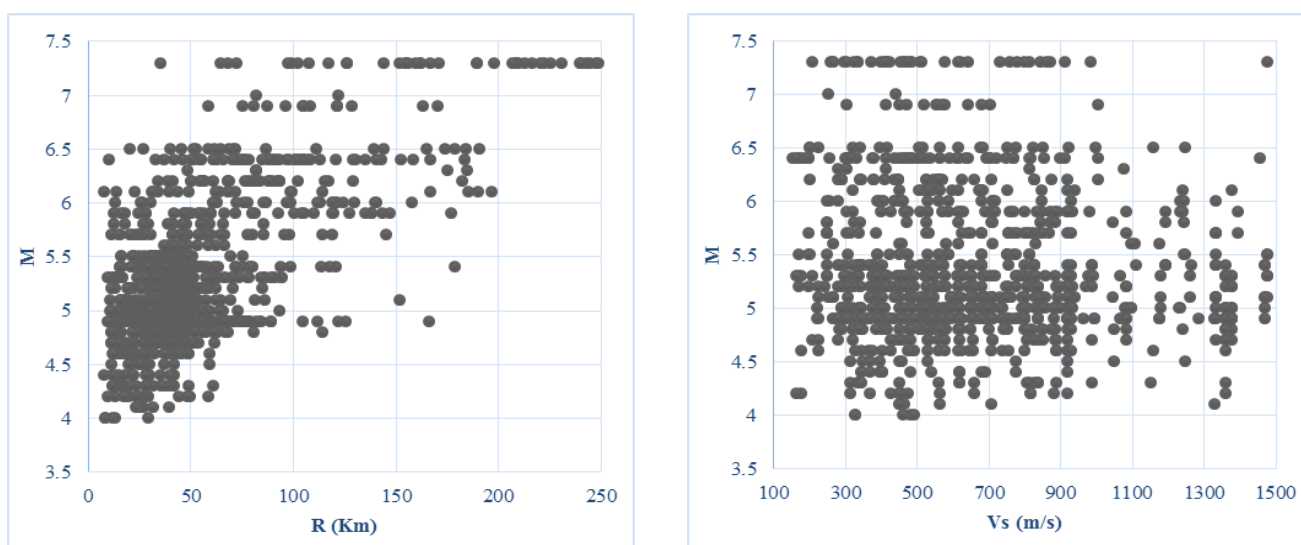
[شکل ۲: محدوده نواحی زاگرس و البرز-ایران مرکزی (محدوده داخل منحنی ناحیه زاگرس می‌باشد)]

جدول ۳: مختصات چندضلعی در نظر گرفته شده بعنوان ناحیه زاگرس [۲۰]

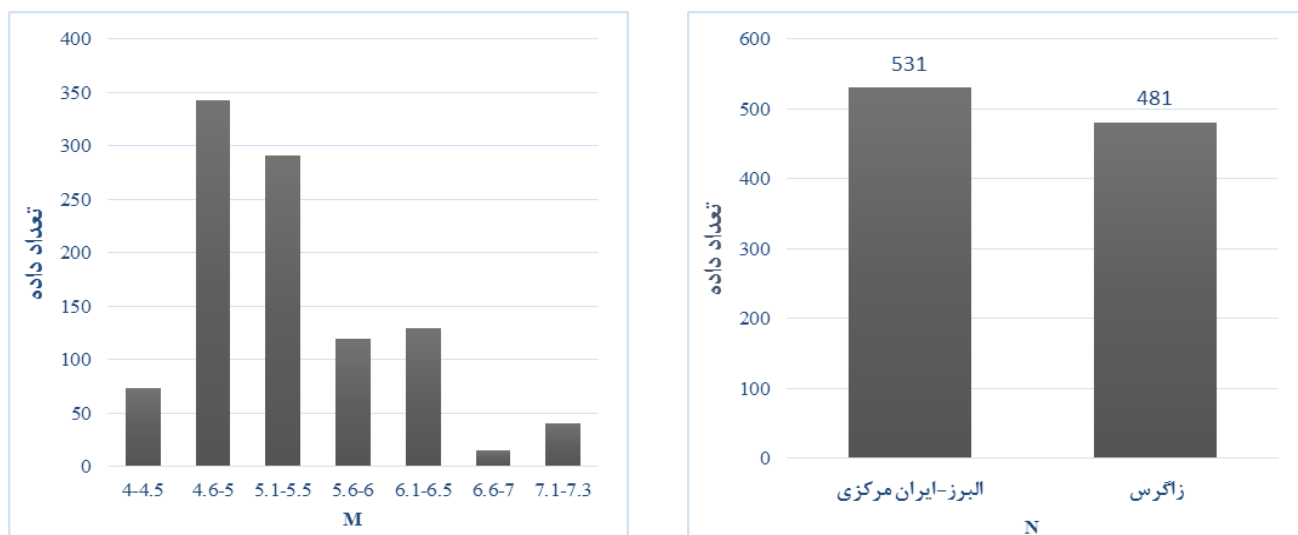
E	42.0	51.0	51.0	53.5	55.8	57.0	56.4	54.0	43.8	42.0
N	36.0	29.0	27.5	26.3	26.2	27.5	28.3	30.2	32.5	38.2

۴-۵- کاتالوگ نهایی داده‌های مورد استفاده

برای تهیه کاتالوگ نهایی، داده‌های مورد استفاده در این پژوهش بر اساس بزرگا و سپس فاصله مرتب گردیدند. سپس تصحیحات لازم و فیلتر بر روی شتاب‌نگاشت‌های خام صورت گرفت. کاتالوگ نهایی این پژوهش که در آن نمودار پراکندگی بزرگا بر حسب فاصله و سرعت موج برشی و همچنین تعداد رکوردها بر اساس بزرگا و موقعیت جغرافیایی مورد استفاده وجود دارد، با توجه به موارد ذکر شده بصورت شکل‌های ۳ و ۴ حاصل گردید.



شکل ۳: نمودار پراکنندگی بزرگا بر حسب فاصله (چپ) و سرعت موج برشی (راست)



شکل ۴: نمودار تعداد رکوردها بر حسب بزرگا (چپ) و موقعیت جغرافیای منطقه (راست)

۵- الگوریتم توسعه ژنی (GEP)

از گذشته تا به امروز بیشتر پژوهش‌ها و تحقیقات صورت گرفته برای محاسبه روابط کاهندگی بر اساس رگرسیون‌گیری بوده است، ولی در این پژوهش، سعی شد از روش‌های هوشمند که دارای مزایایی می‌باشند، برای این امر استفاده شود. یکی از جدیدترین این روش‌ها، روش الگوریتم توسعه ژنی (GEP) است. الگوریتم ژنتیکی توسط هولند در دهه ۶۰ میلادی ارائه شد. بعد از آن در سال ۱۹۸۵ برنامه‌نویسی ژنتیکی توسط کرامر ابداع و توسط کوزا گسترش یافت. فریرا در سال ۱۹۹۹ الگوریتم توسعه ژنی که توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیکی است را ارائه داد. در روش الگوریتم توسعه ژنی نهادهای تولید شده یک عبارت ژنوم است. در این روش کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه، در برنامه‌نویسی ژنتیک ترکیب می‌شوند. فلوچارت یک الگوریتم توسعه ژنی (GEP) در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود این فرایند با تولید تصادفی از کروموزوم‌های جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس کروموزوم‌ها بیان

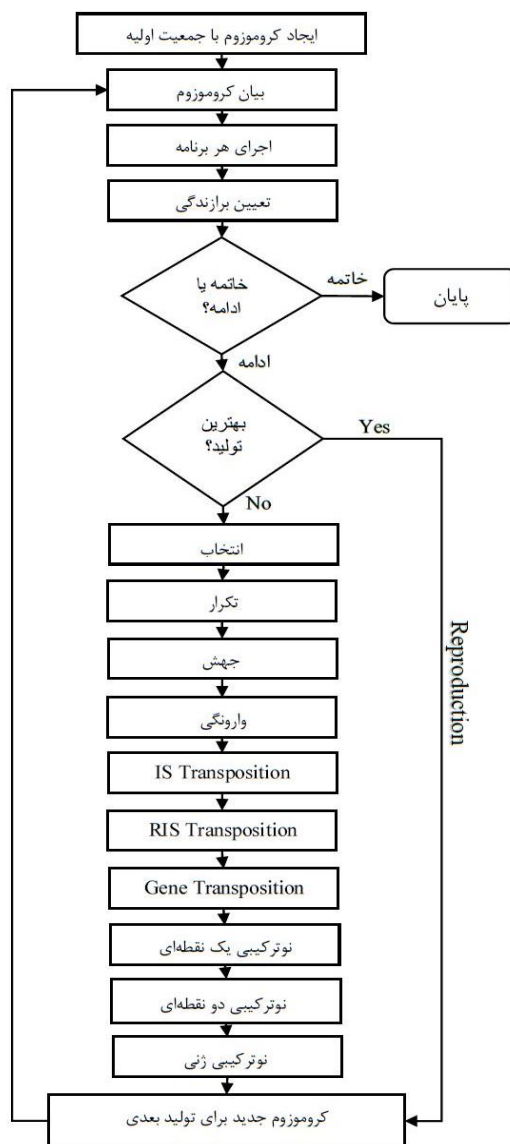
می‌شوند و برازندگی هر فرد ارزیابی می‌شود. بعد از آن، افراد با توجه به برازندگی به منظور تولید دوباره با اصلاحات انجام شده، انتخاب می‌شوند و فرزندان با صفات جدید به وجود می‌آورند. افراد این نسل جدید به نوبه خود تحت فرایند تکاملی مشابه قرار می‌گیرند:

۱- بیان ژنوم‌ها؛

۲- مقابله با محیط انتخابی؛

۳- تولید دوباره با اصلاحات انجام شده.

این روند برای تعداد مشخصی از نسل‌ها تکرار می‌شود یا آنقدر تکرار می‌شود تا زمانی که یک راه حل مناسب حاصل شود.



شکل ۵: فلوچارت الگوریتم توسعه ژنی [۲۱]

در الگوریتم توسعه ژنی عناصر اصلی علاوه بر کروموزوم‌ها شامل درختان توسعه هستند، که عبارت از اطلاعات ژنتیکی کد شده در کروموزوم هستند. کد ژنتیکی نیز عبارت است از رابطه یک به یک بین نمادهای کروموزوم و توابع و یا ترمینال‌ها است. اولین مرحله در الگوریتم مدل، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌هاست. این امر می‌تواند به وسیله فرایند تصادفی و یا در نظر گرفتن اطلاعات ورودی درباره مسأله انجام شود. سپس کروموزوم‌ها بصورت بیان درختی اظهار شده و توسط تابع برازش ارزیابی می‌گردند. در صورت دستیابی به راه حل

مطلوب و یا رسیدن نسل‌ها به تعداد معین، تکامل متوقف شده و بهترین راه حل ارائه می‌شود. این فرایند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، کیفیت جمعیت نیز به طور نسبی بهبود می‌یابد [۲۴-۲۱].

بطور خلاصه می‌توان گفت به منظور طراحی الگوریتم توسعه ژنی پنج گام زیر باید انجام گیرد [۲۳]:

- ۱- تعریف تابع برازندگی؛
- ۲- تعریف ترمینال‌ها و توابع؛
- ۳- تعیین ساختار کروموزوم‌ها (تعداد در نسل، طول ژن‌ها و تعداد آن‌ها)؛
- ۴- تعیین تابع اتصال ژن‌ها؛
- ۵- تعیین مشخصات عملگرها و در انتها اجرای الگوریتم.

۶- مراحل انجام پروژه

در بخش‌های قبل در مورد متغیرهایی که برای ارائه رابطه کاهندگی در این پژوهش در نظر گرفته شد، به تفصیل بحث شد. بزرگای گشتاوری (Mw)، فاصله کانونی (R)، سرعت موج برشی (Vs) و موقعیت جغرافیایی منطقه از نظر قرارگیری در ناحیه البرز-ایران مرکزی یا زاگرس (N) بعنوان متغیرهای مؤثر بر رابطه کاهندگی و متغیرهای ورودی برای الگوریتم توسعه ژنی تعیین شدند.

با در نظر گرفتن این متغیرها اقدام به انتخاب و تهیه داده‌ها از شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، صورت گرفت. بعد از جمع‌آوری ۱۰۱۲ داده شتاب‌نگاری مرحله بعدی کار اصلاح و فیلتر نمودن این داده‌ها به منظور اطمینان بیشتر و افزایش دقت در نتیجه کار است. هر یک از این داده‌ها شامل ۳ مؤلفه است که یک شتاب‌نگاشت مربوط به مؤلفه قائم و دو شتاب‌نگاشت دیگر مربوط به مؤلفه افقی است. در این پژوهش مؤلفه‌های افقی ملاک محاسبات قرار داشتند. گام بعد، استخراج پارامترهایی همچون بزرگای گشتاوری (Mw)، فاصله کانونی (R)، سرعت موج برشی (Vs) و موقعیت جغرافیایی منطقه (N) برای انجام پژوهش آغاز گردید.

بعد از تعیین پارامترهای ذکر شده، تابع شدت اریاس با توجه به رابطه ۸ برای هر کدام از داده‌های موجود محاسبه شده است. در نتیجه برای هر داده دو تابع شدت اریاس برای دو مؤلفه افقی محاسبه شد. تابع شدت اریاس بزرگتر بعنوان تابع شدت اریاس آن داده، انتخاب و همچنین بعنوان تابع هدف در الگوریتم توسعه ژنی در نظر گرفته شد.

برای استفاده از این الگوریتم ۸۵٪ داده‌ها بعنوان داده‌های آموزشی و ۱۵٪ دیگر بعنوان داده‌های آزمایشی در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های آزمایشی بصورتی انتخاب شده‌اند که متغیرهای این داده‌ها در بازه متغیرهای داده‌های آموزشی هستند. این کار به صحیح‌تر شدن آموزش و آزمایش کمک می‌کند.

گام بعدی تعیین تابع برازندگی است، این تابع براساس ریشه حداقل مربعات خطا (RMSE) تعریف شده است که بوسیله رابطه ۱۳ مورد محاسبه و ارزیابی قرار می‌گیرد:

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (11)$$

در رابطه فوق \hat{Y}_i مقادیر پیش‌بینی شده شدت اریاس توسط رابطه پیشنهادی و Y_i مقادیر هدف برای هر مورد می‌باشند و زمانی که این دو مقدار پیش‌بینی شده و هدف برابر گردند، مقدار خطا برابر صفر خواهد شد ($E=0$) و به وضوح می‌توان مشاهده کرد که هرچه مقدار E کمتر باشد، تابع پیش‌بینی و هدف مطابقت بیشتری خواهند داشت. در نهایت تابع ارائه شده توسط رابطه ۱۴ بعنوان تابع برازندگی انتخاب شد:

$$f = \frac{1000}{1+E} \quad (12)$$

جدول ۴: تنظیمات در نظر گرفته شده برای استفاده از الگوریتم توسعه ژنی

٪۸۵	رکوردهای آموزشی	
٪۱۵	رکوردهای آزمایشی	
Mw,R,Vs,N	متغیرها	
۳۰	تعداد کروموزوم	تنظیمات تکاملی
۷	اندازه هد	
۳	تعداد ژن	
Addition (+)	تابع اتصال	
RMSE	تابع برازندگی	
۰,۰۴۴	جهش	اپراتورهای ژنی
۰,۱	وارونگی	
۰,۱	IS Transposition	
۰,۱	RIS Transposition	
۰,۳	نو ترکیبی یک نقطه‌ای	
۰,۳	نو ترکیبی دو نقطه‌ای	
۰,۱	نو ترکیبی ژنی	
۰,۱	Gene Transposition	
۲	ثابت‌های عددی	
Addition(+), Subtraction(-), Multiplication(*), Division(/), Power(pow), Square root(sqrt), Exponential(exp), 10^x (pow10), Natural logarithm(ln), Logarithm of base 10(log), Inverse(Inv), Negation(neg), Cube root(3RT), Power of 2(x2), Power of 3(x3)		تابع ریاضی

با تعریف ارائه شده برای تابع برازندگی، این تابع دارای دامنه تغییرات ۱۰۰۰-۰ بوده که حداکثر مقدار آن نشانه تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی و هدف می‌باشد و هرچه مقدار این تابع کمتر باشد، نشان‌دهنده تطابق کمتری خواهد بود.

برای این الگوریتم ۳ ژن در نظر گرفته شد و از عملگر جمع (+) بعنوان تابع اتصال استفاده گردید. دیگر تنظیمات مورد استفاده در الگوریتم توسعه ژنی در جدول ۴ ارائه شده است.

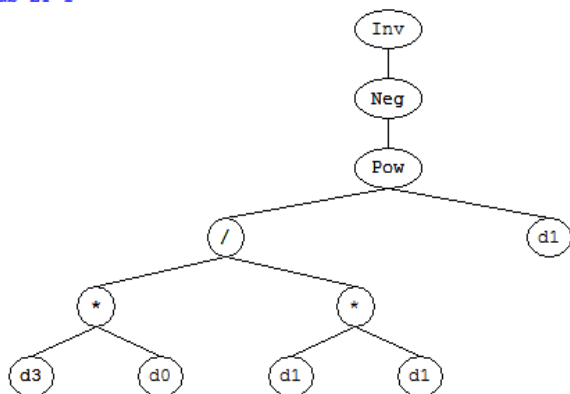
۷- ارائه نتایج

۷-۱- ارائه رابطه و مقایسه مدل ارائه شده برای مقادیر مختلف بزرگا

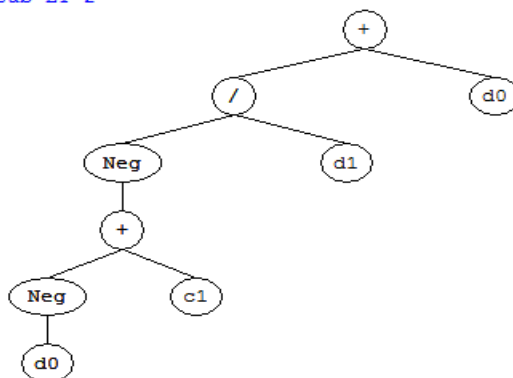
با توجه به توضیحاتی که در بخش قبل ارائه شد، رابطه کاهندگی برای تابع شدت اریاس برای ایران معادل با درختان توسعه نشان داده شده در شکل ۶ است. با جمع کردن این درختان توسعه باهم و با جایگذاری پارامترهای $d_0=M$ ، $d_1=\text{Log}R$ ، $d_2=Vs$ ، $d_3=N$ ، منجر به رابطه $C_1=3.255$ ، $C_0=7.461$ می‌شوند:

$$\text{Log}I_a = 0.001 \left(- \left(\frac{\text{Log}R^2}{N \cdot M} \right)^{\text{Log}R} + \frac{M-3.255}{\text{Log}R} + \frac{55.67}{V_s^N} \right) \quad (13)$$

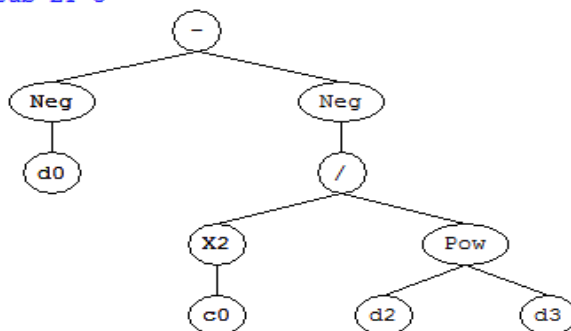
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



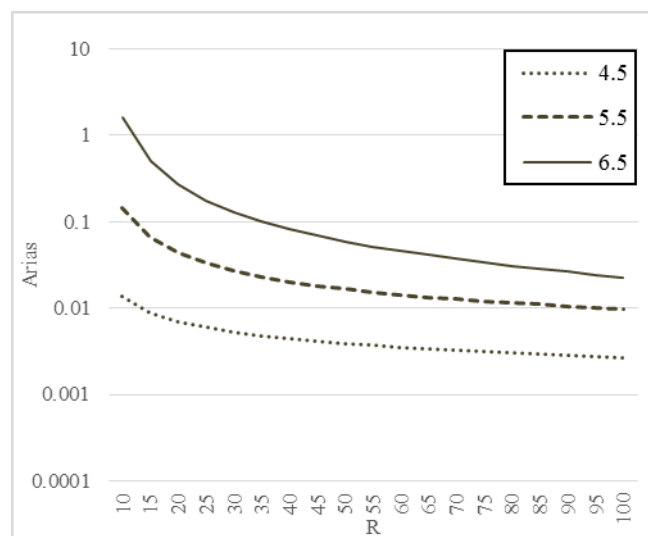
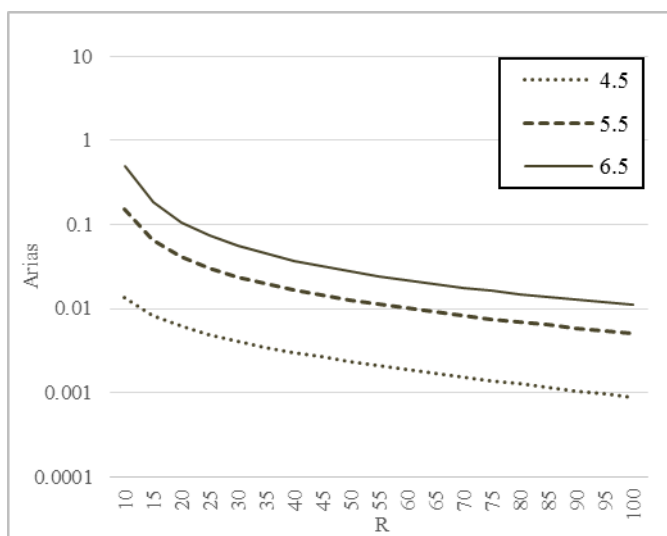
شکل ۶: درخت توسعه مربوط رابطه کاهندگی برای تابع شدت اریاس

در این رابطه، I_a تابع شدت اریاس بر اساس متر بر ثانیه، M برابر با بزرگای گشتاوری، R فاصله کانونی که واحد آن کیلومتر است، V_s برابر سرعت موج برشی خاک منطقه بر اساس متر بر ثانیه و N موقعیت جغرافیایی منطقه که برای مناطقی که در ناحیه البرز-ایران مرکزی قرار دارند برابر ۱ و برای مناطقی که در ناحیه زاگرس قرار دارند برابر ۲ در نظر گرفته شد.

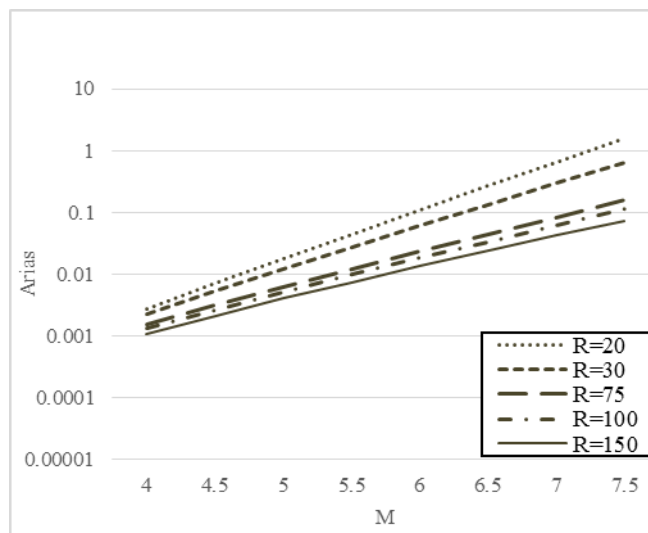
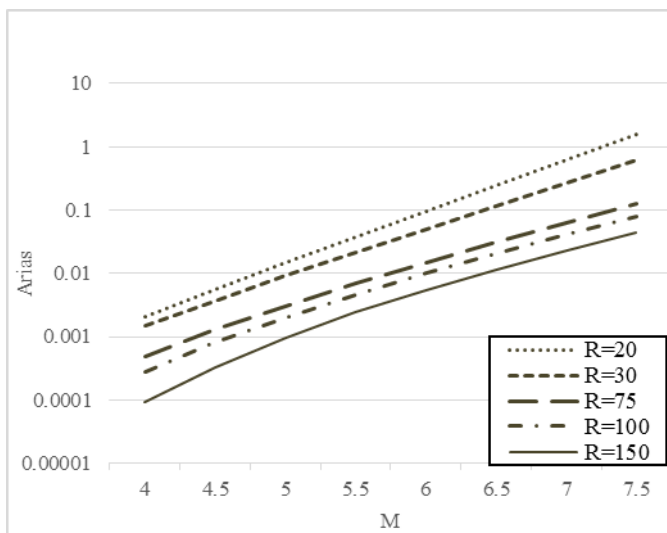
برای دید بهتر نسبت به تغییرات ارائه شده در این پژوهش، در ادامه نمودارهایی ارائه شده است.

شکل ۷ منحنی تغییرات رابطه ارائه شده با فاصله کانونی از ۱۰۰-۱۰ کیلومتر را نشان می‌دهد. در اینجا سرعت موج برشی m/s ۵۰۰ در نظر گرفته شد. همچنین این نمودار برای زلزله‌هایی با بزرگای ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ محاسبه و رسم شد. همانطور که ملاحظه می‌شود، با دور شدن از محل وقوع زلزله، شدت اریاس بصورت غیرخطی کاهش می‌یابد.

شکل ۸ تغییرات رابطه پیشنهادی نسبت به بزرگای گشتاوری در بازه ۴-۷/۵ با سرعت موج برشی m/s ۸۰۰ را نشان می‌دهد. همچنین این تغییرات برای فواصل ۲۰، ۳۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. در این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که با افزایش بزرگا، مقادیر شدت اریاس افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله، شدت اریاس کاهش می‌یابد. بعلاوه هوشمند بودن و عدم استفاده از یک تابع مشخص برای رگرسیون‌گیری، مقادیر اختلاف نمودارها در شرایط مختلف، متفاوت است. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات تابع شدت اریاس نسبت به بزرگا خطی یا نزدیک به خطی است.



شکل ۷: مقادیر تابع شدت اریاس براساس مقادیر مختلف فاصله کانونی (۱۰-۱۰۰) در بزرگهای ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ و با سرعت موج برشی ۵۰۰m/s

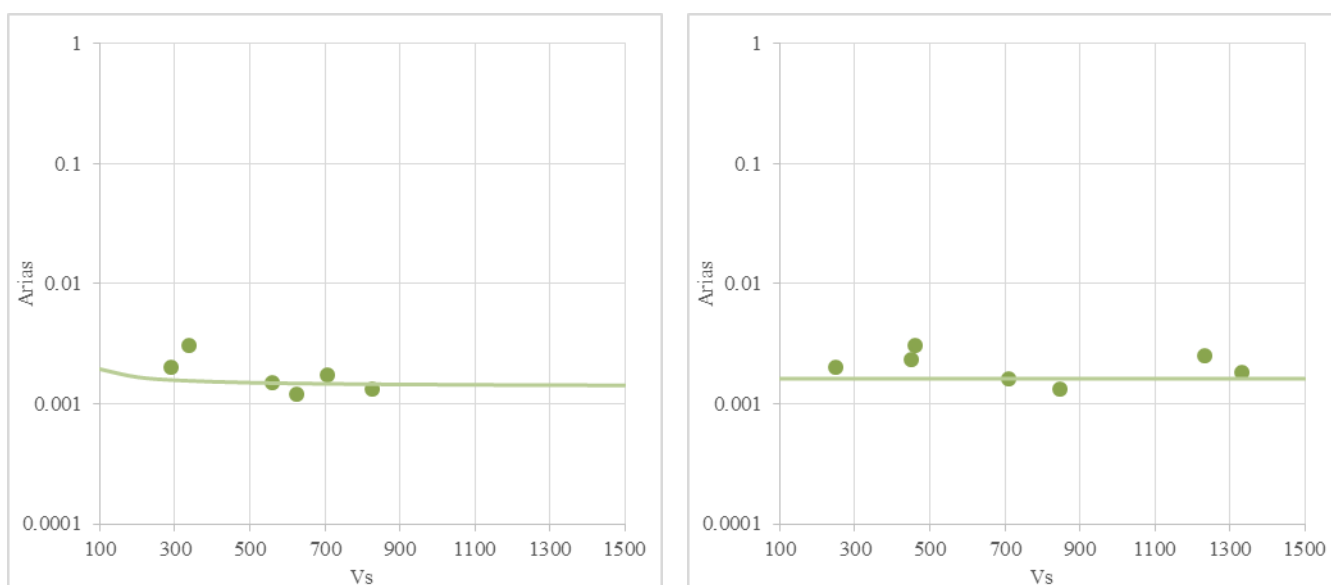


شکل ۸: مقادیر تابع شدت اریاس براساس مقادیر مختلف بزرگا در فواصل کانونی ۲۰-۳۰-۷۵-۱۰۰-۱۵۰ کیلومتر و با سرعت موج برشی ۸۰۰m/s

لازم به ذکر است برای شکل‌های ۷ و ۸، نمودارهای سمت چپ برای مناطقی که در ناحیه البرز-ایران مرکزی قرار دارند و نمودارهای سمت راست برای مناطقی که در ناحیه زاگرس قرار دارند رسم شده است.

۷-۲- صحت‌سنجی نتایج با تطابق رابطه و داده‌های اولیه

در این بخش، رابطه ارائه شده در این پژوهش با داده‌های مورد استفاده مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۹ نمودار پراکندگی تابع شدت اریاس بر اساس سرعت موج برشی و منحنی تابع شدت اریاس با فرض فاصله کانونی ۷۰ کیلومتر و بزرگای گشتاوری ۶/۵ رسم شده است.



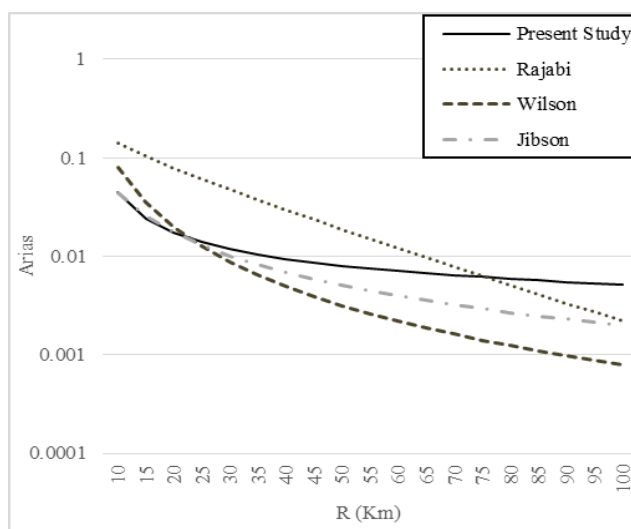
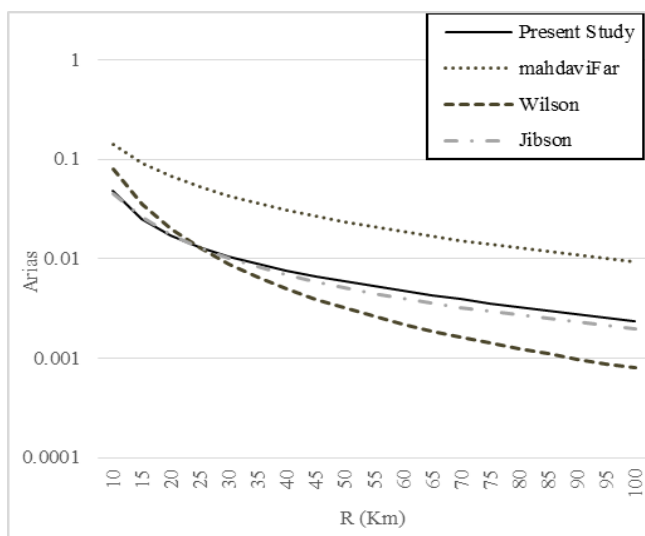
شکل ۹: نمودار پراکندگی تابع شدت اریاس بر اساس سرعت موج برشی (۱۵۰۰-۱۰۰) و منحنی تابع شدت اریاس با فرض فاصله کانونی ۷۰ کیلومتر و بزرگا ۶/۵ (شکل سمت چپ برای البرز-ایران مرکزی، شکل سمت راست برای ناحیه زاگرس)

۷-۳- مقایسه رابطه کاهندگی ارائه شده برای تابع شدت اریاس در این پژوهش با برخی دیگر از روابط ارائه شده

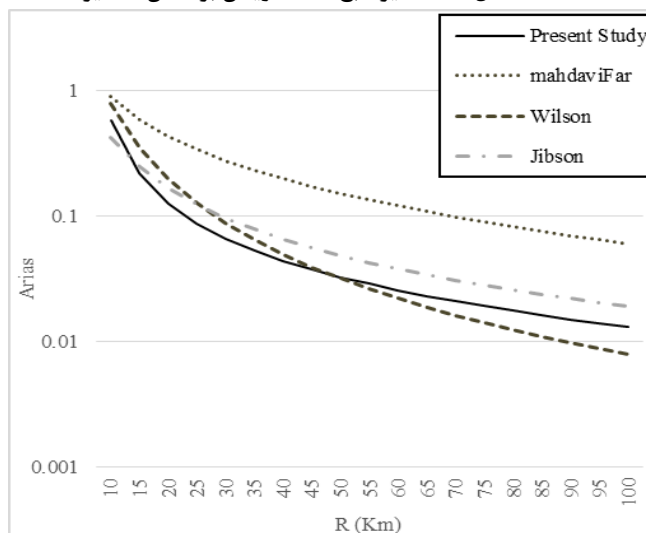
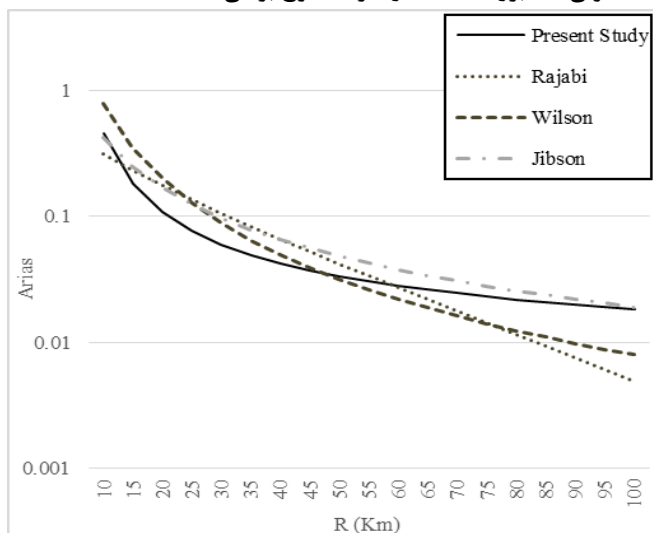
در این بخش، رابطه ارائه شده در این تحقیق با دیگر روابطی که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند، مقایسه شده است. همانطور که گفته شد برخی روابط بر اساس مطالعات منطقه‌ای و برخی بر اساس مجموعه داده‌های جهانی می‌باشند. روابط ارائه شده توسط رجبی و همکاران [۱۴] برای منطقه زاگرس، مهدویفر و همکاران [۱۳] برای منطقه البرز، براساس رکوردهای ثبت شده ایران بوده و برای مقایسه کاملاً مناسب هستند. در ادامه رابطه بدست آمده در این پژوهش با رابطه ویلسون و کایفر [۸] و در انتها نیز با رابطه جیلسون [۹] که ارائه شده برای داده‌های جهانی می‌باشند، مقایسه شد. روابط ذکر شده در بالا، با رابطه‌ای که در این پژوهش بدست آمده است، در شرایط مختلف با هم مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج این مقایسه بصورت نمودار در ادامه ارائه شده است.

در شکل ۱۰ رابطه برای زلزله‌ای با بزرگای ۵ و ساختگاه با سرعت موج برشی ۴۰۰ m/s براساس فاصله کانونی از ۱۰۰-۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. همانگونه که ملاحظه می‌شود نتایج این تحقیق مطابقت مناسبی با سایر تحقیقات گذشته دارد. همچنین در شکل ۱۱ این رابطه برای بزرگای ۶ و ساختگاه با سرعت موج برشی ۳۰۰ m/s براساس فاصله کانونی از ۱۰۰-۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. در این شکل هم مشاهده می‌گردد که رابطه بدست آمده در تحقیق حاضر با سایر روابط گذشته مطابقت خوبی داشته و از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که تغییرات بر حسب فاصله در رابطه ارائه شده بیشترین تطابق را با رابطه جیلسون نشان می‌دهد. تغییرات زلزله بر حسب بزرگا با بازه بزرگاهای ۴-۷/۵ در شکل ۱۲ ترسیم شده است. ساختگاه با سرعت موج برشی ۴۰۰ m/s و فاصله کانونی ۵۰ کیلومتر بوده و همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد تغییرات رابطه ارائه شده در بازه‌ی سایر مقادیر مقایسه‌ای است. در شکل ۱۳ تغییرات زلزله بر حسب بزرگا با بازه بزرگاهای ۴-۷/۵ و ساختگاه با سرعت موج برشی ۳۰۰ m/s و فاصله کانونی ۸۰ کیلومتر ترسیم شده است. در این شکل همانند شکل ۱۲ می‌توان ملاحظه نمود بازه تغییرات رابطه ارائه شده مشابه با سایر مقادیر مقایسه‌ای است.

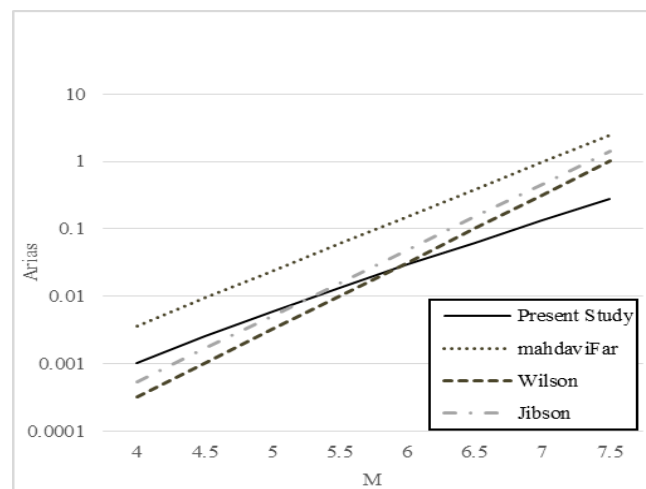
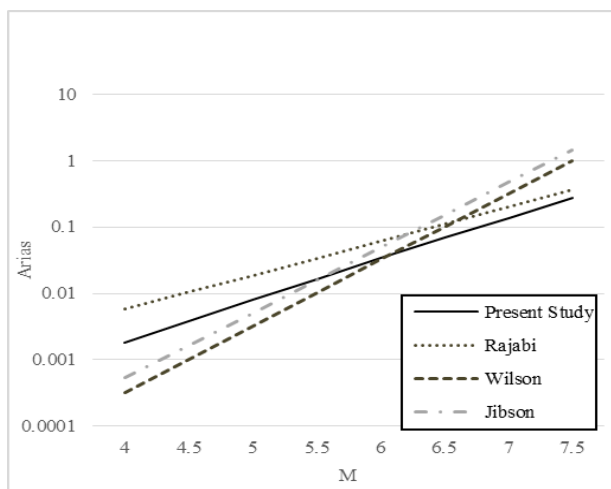
برای کلیه شکل‌های ۱۰-۱۳ نمودارهای سمت چپ برای ناحیه البرز-ایران مرکزی و نمودارهای سمت راست برای ناحیه زاگرس رسم شده‌اند.



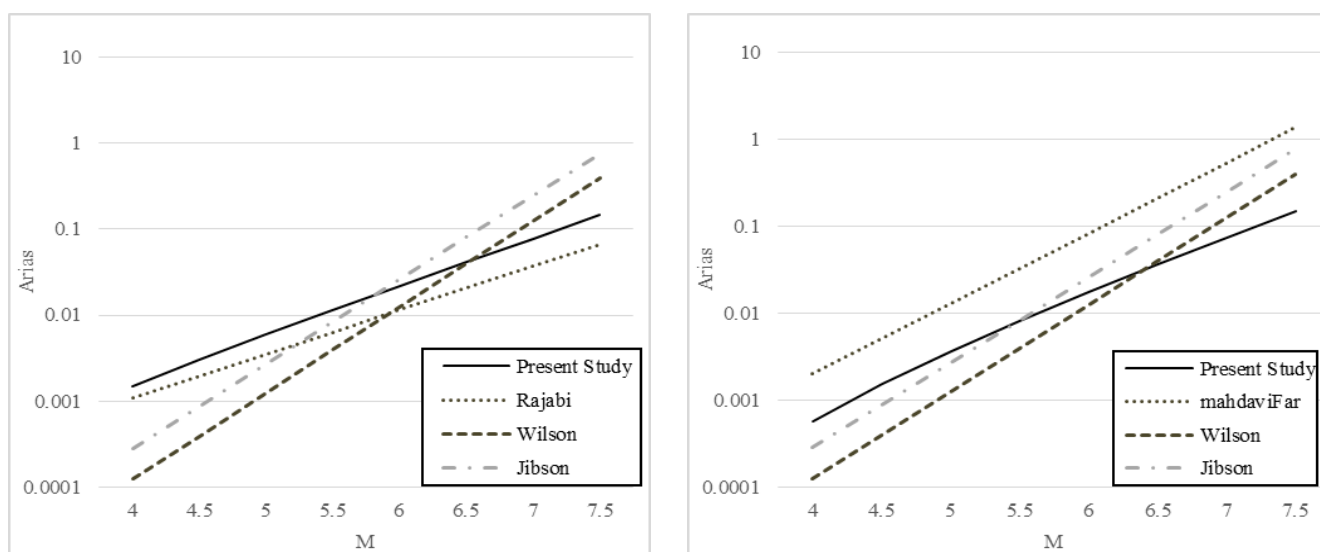
شکل ۱۰: مقادیر تابع شدت اریاس بر اساس مقادیر مختلف فاصله کانونی (R)، بزرگای ۵ Mw و سرعت موج برشی ۴۰۰ m/s



شکل ۱۱: مقادیر تابع شدت اریاس بر اساس مقادیر مختلف فاصله کانونی (R)، بزرگای ۶ Mw و سرعت موج برشی ۳۰۰ m/s



شکل ۱۲: مقادیر تابع شدت اریاس بر اساس مقادیر مختلف بزرگای، فاصله ۵۰ کیلومتر، سرعت موج برشی ۴۰۰ m/s



شکل ۱۳: مقادیر تابع شدت اریاس بر اساس مقادیر مختلف بزرگا، فاصله ۸۰ کیلومتر، سرعت موج برشی ۳۰۰ m/s

۸- نتیجه گیری

رابطه کاهندگی از جمله روابطی است که پژوهش بر روی آن هیچگاه قدیمی نمی‌شود و همیشه می‌توان بر روی آن مطالعه کرد، زیرا از طرفی این روابط بر پایه زلزله‌های رخ داده است و از آنجایی که زلزله هر روز در حال وقوع است و شبکه شتاب‌نگاری در حال گسترش و تعداد شتاب‌نگاشت‌ها در حال افزایش است، این روابط هم می‌توانند بروزرسانی شوند و بر اساس داده‌های جدید یک رابطه جدید نیز ارائه شود. از طرفی دیگر، روش‌های مختلفی برای رگرسیون‌گیری و محاسبه تابع هدف وجود دارد. یکی از جدیدترین روش‌های ارائه شده که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، بر پایه الگوریتم توسعه‌زنی که نوعی هوش مصنوعی است، می‌باشد. همین امر می‌تواند موجب افزایش دقت در روابط کاهندگی شود. روابط کاهندگی در آغاز کار خود روابطی ساده و مبتنی بر پارامترهای بزرگا و فاصله بود ولی با گذشت زمان، روابطی پیچیده‌تر و دقیق‌تر که مبتنی بر پارامترهای مؤثرتر هستند، ارائه گردیده است و این هدف در آینده هم ادامه خواهد داشت.

در این پژوهش ۱۰۱۲ رکورد زلزله مورد استفاده قرار گرفت که ۵۳۱ رکورد تحت پوشش البرز-ایران مرکزی و ۴۸۱ رکورد دیگر تحت پوشش زاگرس بوده است. این رکوردها شامل زلزله‌های با $M_w \geq 4$ و با فاصله کانونی تا ۲۵۰ کیلومتر می‌باشد. در این مقاله، رابطه کاهندگی برای تابع شدت اریاس، بصورت توابعی پیوسته از بزرگای گشتاوری (M)، فاصله کانونی (R)، سرعت موج برشی (V_s) و پارامتر N برای مشخص نمودن منطقه تحت پوشش البرز-ایران مرکزی ($N=1$) و زاگرس ($N=2$)، برای ایران ارائه شد.

یکی از پارامترهای مورد استفاده در این رابطه سرعت موج برشی خاک است. این پارامتر کمک زیادی کرد تا یک رابطه واحد برای ناحیه ایران علی‌رغم متفاوت بودن شرایط زمین‌شناسی دو ناحیه البرز-ایران مرکزی و زاگرس، بدست آید.

با استفاده از الگوریتم توسعه‌زنی، رابطه‌ای تحت عنوان رابطه کاهندگی برای تابع شدت اریاس بصورت توابعی پیوسته و با دقت مناسب ارائه شد، بطوریکه نتایج و مقایسه آن با روابط رجبی، مهدویفر، ویلسون و جیبسون (شکل‌های ۱۳-۱۰) نشان‌دهنده دقت و مطابقت مناسب رابطه ارائه شده در این پژوهش است. همچنین با توجه به اینکه رابطه پیشنهادی برخلاف بسیاری از روابط ارائه شده دیگر دارای پیش‌فرضی برای شکل رابطه نبوده است، موارد زیر شایان ذکر است:

(۱) می‌توان دید که این رابطه همیشه دارای ارتباط خطی با بزرگا نیست، در صورتیکه در تمام روابط مقایسه شده و اکثر روابط ارائه شده فرض بر خطی بودن این ارتباط بوده است.

- (۲) ارتباط میان رابطه کاهندگی و فاصله هم صرفاً بصورت ضریبی از $\log R$ نیست.
- (۳) در نهایت رابطه محاسبه شده دارای برازندگی برابر ۸۶۷ برای رکوردهای آموزشی و ۸۴۶ برای رکوردهای آزمایشی بوده است که برای این تعداد از داده‌های طبیعی و بدست آمده از زلزله‌های رخ داده و در مقایسه با سایر مطالعات مقادیر بالاتری است.
- (۴) با توجه به دقت این رابطه و مقادیر داده‌های مناسب این رابطه برای ارزیابی‌های لغزش‌های ناشی از زلزله در مقیاس منطقه‌ای، از طریق تخمین جنبش‌های احتمالی زمین، جابه‌جایی نیومارک و سایر تحلیل‌های پویا در رابطه با کاهش خطر و طرح‌های شهری، بسیار مفید خواهد بود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از سازمان محترم مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی بخصوص دکتر محمد شکرچی‌زاده ریاست محترم این مرکز به‌جهت در اختیار قرار دادن داده‌های شتاب‌نگاری کمال تشکر را دارند. همچنین از دقت نظر داوران محترم که باعث بهبود مقاله شدند سپاسگزارم.

مراجع

- [1] Satake, K. and Atwater, B.F. (2007). Long-Term Perspectives on Giant Earthquakes and Tsunamis at Subduction Zones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 35, pp. 349–374.
- [2] Hadian, A. and Zafarani, H. and Farjoodi, J. (2015). Investigation of Source Parameters of Roudbar-Manjil Earthquake Using Hybrid Simulation Method. *Journal of Structural and Construction Eng.*, Vol. 2, No. 1. (in Persian)
- [3] Zare, M. and Kamranzad, F. (2015), Seismic Distribution in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, Vol. 1, No. 4, pp.39-58. (in Persian)
- [4] Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, p. 653.
- [5] Somerville, P.G. and Graves, R.W. (2003). Characterization of earthquake strong ground motion. *Pure Applied Geophysics*, Vol. 160, pp.1811-1828.
- [6] Bozorgnia, Y. and Bertero, V. (2004). *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [7] Khademi, M.H. (2002). Attenuation of peak and spectral accelerations in the Persian plateau. In *Proceedings of Twelfth European Conference on Earthquake Engineering*, pp.330.
- [8] Wilson, R.C. and Keefer, D.K. (1985). Predicting the areal limits of earthquake-induced landsliding. In: Ziony JJ, editor. *Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region an earth science perspective*. US Geological Survey, Professional Paper1360, pp. 45–316.
- [9] Jibson, R.W. (1987). Summary of research on the effects of topographic amplification of earthquakes shaking on slope stability, US Geological Survey, Menlo Park, California, Open File Report 87-268.
- [10] Sabetta, F. and Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 2, pp.337–352.
- [11] Hwang, H. and Lin, C.K. and Yeh, Y.T. and Cheng, S.N. and Chen, K.C. (2004). Attenuation relations of Arias intensity based on the Chi-Chi Taiwan earthquake data. *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, Vol. 24, pp. 17–509.
- [12] Travararou, T. and Bray, J.D. and Abrahamson, N.A. (2003). Empirical attenuation relationship for Arias Intensity. *Earthquake Eng. Structure Dynamics*, Vol. 32, pp. 55–1133.

- [13] MahdaviFar, M. and Jafari, M.K. and Zolfaghari, M.R. (2007). The attenuation of Arias Intensity in Alborz and Central Iran. In Proceedings of the fifth international conference on seismology and earthquake engineering, Tehran, Iran.
- [14] Rajabi, A.M. and Khamsehchiyan, M. and MahdaviFar, M. and DelGaudio, V. (2010). Attenuation relation of Arias intensity for Zagros Mountains region (Iran). Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol. 30, pp.110-118.
- [15] Ghodrati Amiri, G. and zahedi, M. and Mahdavian, A. and Gholami, S. (2004). Appropriate frequency band for correcting for Iranian Accelerograms in diffrenet site conditions. Journal of Faculty of Eng., University of Tehran, Vol. 38, No. 2, pp. 231–249. (in Persian)
- [16] Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, (2014). Guideline for Seismic Hazard Analysis, Code No.626. (in Persian)
- [17] Ministry of Energy, (2000). History of Attenuation models and criteria for selecting appropriate models, Code No.134. (in Persian)
- [18] Mirzaei, H. (2000). Geological Site Investigation on Some Accelerograph Stations in Iran through Geophysical Method. BHRC publication No. 324, Tehran, Iran. (in Persian)
- [19] Road, Housing and Urban Development Research Center, (2014). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition. (in Persian)
- [20] Ghodrati Amiri, G. and Shamekhi Amiri, M. Namiarnian, P. and Emadzadeh, A. (2013). Attenuation relationship for inelastic earthquake spectra in Iran. Proceedings of the Institution of Civil Engineers.
- [21] Ferreira, C. (2001). Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems. Vol. 13(2), pp. 87–129.
- [22] Ferreira, C. (2006). “Gene expression programming: Mathematical modeling by an artificial intelligence. Springer-Verlag.
- [23] Ghodrati Amiri, G. and Shamekhi Amiri, M. (2015). Attenuation relationships for peak ground acceleration in the Iranian plateau using Gene Expression Programming (GEP). Civil Engineering Sharif, Vol. 38, No. 2. (in Persian)
- [24] Ghodrati Amiri, G. and Mahdavian, A. and Manouchehri Dana, F. (2007). Attenuation relationships for Iran. Journal of Earthquake Eng., Vol. 11, No. 4, pp. 469-492.