

# ارائه‌ی روابط کاهندگی برای بیشینه‌ی شتاب افقی و قائم جنبش‌های نیرومند زمین در فلات ایران با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP)

غلامرضا قدرتی امیری\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد شامخی امیری (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (ص. ۸۵-۹۵)  
دربی ۲-۳، شماره ۱/۴، ص. ۸۵-۹۵

هدف از این نوشتار، ارائه‌ی روابط کاهندگی برای بیشینه‌ی شتاب افقی و عمودی جنبش نیرومند زمین، در فلات ایران با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) است. عوامل مؤثر در این پیش‌بینی بزرگای زلزله، فاصله‌ی منبع زلزله‌ساخت‌گاه و نوع زمین<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده‌اند. ابتدا فلات ایران به دو بخش البرز - ایران مرکزی و زاگرس تقسیم و سپس رکوردهای این نواحی با توجه به نوع ساخت‌گاه به ۲ بخش خاک و سنگ تقسیم شدند. نظر به اینکه زلزله‌های رخ داده و گزارش شده در ایران سطحی هستند، بزرگای موج سطحی به‌عنوان بزرگا و فاصله‌ی کانونی به‌عنوان فاصله‌ی منبع زلزله - ساخت‌گاه در نظر گرفته شده است. استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی برای محاسبه‌ی روابط کاهندگی دارای این مزیت است که از مدل رگرسیون ثابتی استفاده نشده است و مدل به‌صورت هوشمند به‌دست می‌آید. نتایج محاسباتی نیز سازگاری میان نتایج پیش‌بینی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهند، که ضریب تناسب بالایی دارد.

واژگان کلیدی: روابط کاهندگی، الگوریتم توسعه‌ی ژنی، بیشینه‌ی شتاب زمین، فلات ایران، سنگ، خاک.

ghodrati@iust.ac.ir  
m.shamekhi@yahoo.com

## ۱. مقدمه

رویداد سن فراندوی کالیفرنیا انجام گرفته است، که در تمامی آن‌ها از داده‌های زمین لرزه‌ی و شتاب‌نگاری باختر آمریکا به ویژه کالیفرنیا و عموماً از بزرگای زمین لرزه و فاصله‌ی کانونی زمین لرزه تا ایستگاه‌های ثبت‌کننده‌ی شتاب به‌عنوان پارامترهای مؤثر استفاده شده است. از سال ۱۹۸۰، تغییرات بنیادینی در مدل‌های کاهندگی صورت گرفته است. پس از این سال، توجه بیشتری به سازوکار زمین لرزه‌ها و زمین‌شناسی ایستگاه‌های شتاب‌نگار شده است، به‌طوری که عملاً به‌عنوان ضریبی در مدل‌های کاهندگی داخل شده‌اند.<sup>[۱]</sup>

از سوی دیگر، با رهیافت به داده‌های بیشتر شتاب‌نگاشتی، مدل‌های کاهندگی با دقت ویژه بر پارامترهای در نظر گرفته‌شده در این مدل‌ها، نظیر: بزرگا، فاصله، شرایط ژئوتکنیکی ایستگاه‌های ثبت‌کننده‌ی شتاب جنبش نیرومند زمین و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت در محاسبات و به کارگیری روش‌های گوناگون ریاضی در پردازش داده‌های جنبش نیرومند زمین، این تغییرات رخ داده است. حاصل این تغییرات ارائه‌ی مدل‌هایی بوده است که در آن، شرایط ژئوتکنیکی ساخت‌گاه نظیر: بسترهای سنگی و خاکی و پارامترهایی به منظور در نظر گرفتن سازوکار زمین لرزه‌ها و برآورد میزان شتاب جنبش نیرومند زمین برای سطوح خطر مختلف مورد توجه قرار گرفته است.<sup>[۱]</sup> برای مثال می‌توان به مدل‌های کاهندگی ارائه‌شده در سال ۱۹۸۱،

اولین رابطه‌ی کاهندگی در سال ۱۹۵۴، بر پایه‌ی زمین لرزه‌های آمریکا برای بیشینه‌ی شتاب جنبش نیرومند زمین و به‌صورت مستقل از بزرگای زمین لرزه ارائه شد.<sup>[۱]</sup> از آن زمان تاکنون روابط کاهندگی متعددی برای نواحی گوناگون و براساس متغیرهای مختلفی ارائه شده است. بسیاری از این روابط، که در ابتدا روابطی ساده میان متغیرهای محدودی بوده‌اند، با مرور زمان و با افزایش تعداد و دقت رکوردهای ثبت‌شده به روز شده‌اند. همچنین با افزایش اطلاعات و آگاهی از تأثیر دیگر پارامترهای مؤثر و استفاده از محاسبات رایانه‌ی، این روابط دقیق‌تر و پیچیده‌تر شده‌اند. در واقع، روابط کاهندگی توابعی ریاضی هستند که جنبش‌های زمین را برحسب پارامترهای مؤثر بیان می‌کنند. متداول‌ترین این جنبش‌ها، بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی زمین (PGA)، بیشینه‌ی سرعت زمین (PGV) و شتاب طیفی با میرایی ۵٪ است. در این پژوهش، معادلات برای بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی زمین (PGAV, PGAH) محاسبه شده‌اند.

پژوهش‌های دیگری در این زمینه در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی و به ویژه پس از

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۱/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۳۱.

برای ساخت‌گاه سنگی و خاکی با ضخامت بیش از ۱۰ متر و یا ارائه‌ی ضرابی برای برآورد ساخت‌گاه‌های سنگی و خاکی اشاره کرد.<sup>[۲۳]</sup> مروری جامع از روابط کاهندگی، که شامل بخش بزرگی از روابط کاهندگی برای مقادیر بیشینه‌ی شتاب و طیف پاسخ بوده است، در سال ۲۰۱۱ منتشر شد.<sup>[۲۴]</sup> این مجموعه، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار پژوهشگران جهت مطالعه و یا به‌دست‌آوردن روابط کاهندگی جدید قرار می‌دهد.

در ایران، در سال‌های دورتر عموماً روابطی بر پایه‌ی مطالعات انجام‌شده در سطوحی گسترده‌تر و شامل این ناحیه مورد استفاده قرار می‌گرفت، که برای اروپا و خاورمیانه ارائه شده بودند.<sup>[۴-۸]</sup>

معدود روابطی که به‌طور خاص برای ایران ارائه شده‌اند، مربوط به سال‌های اخیر و پس از افزایش نیاز کشور به روابط کاهندگی جهت تحلیل خطر پذیری و همچنین تکامل و دقیق‌تر شدن بانک اطلاعاتی رکوردهای ثبت شده‌ی زلزله در ایران است.<sup>[۹-۱۱]</sup>

در نیم قرن اخیر، به کارگیری سیستم‌های هوشمند در بسیاری از رشته‌ها و به‌خصوص در رشته‌های مهندسی که به‌طور ذاتی دچار عدم دقت‌های قابل اغماض هستند، رشد چشم‌گیری داشته است. قابلیت یادگیری جامع و عمومیت بخشیدن به آن، که سبب تولید جواب‌های متعدد قابل قبول می‌شود، از ویژگی‌های این سیستم‌هاست.

تهیه یک برنامه برای ارائه‌ی جواب به مسئله‌ی که تعداد زیادی متغیر به‌عنوان ورودی و یا خروجی در آن وجود دارد، با استفاده از روش‌های برنامه‌نویسی متداول امروزی، کاری دشوار و یا غیر عملی است؛ زیرا در نظر گرفتن تمامی این متغیرها و آثارشان بر یکدیگر غیرممکن است. لیکن با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی چنین مسئله‌ی عملی است. همچنین، ساختار روش‌های برنامه‌نویسی متداول امروزی به گونه‌ی است که در صورت وجود یک اشتباه در اطلاعات ورودی، تمامی محاسبات ممکن است دچار اشکال شوند. اما در روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، به دلیل اینکه براساس تجربه آموزش می‌بینند، حتی در صورت وجود اشتباه در اطلاعات ورودی، شبکه به‌طور قابل ملاحظه‌ی قابلیت تحمل خطا را خواهد داشت.

در این پژوهش از الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) که توسعه‌ی طبیعی از الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) است، استفاده شده است؛ که مزیت اصلی آن، توانایی ارائه‌ی الگویی از مجموعه‌ی متغیرهایی متناسب است، بدون اینکه به‌طور مشخص برای آن برنامه‌ریزی شده باشد. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که روابط پیشنهادی در سطحی بالاتر و قابل اعتمادتر از روابط سنتی ارائه‌شده در ادبیات فنی باشند.

به‌طور کلی می‌توان گفت هدف از این پژوهش، ارائه‌ی روابط کاهندگی برای پیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی جنبش نیرومند زمین در فلات ایران با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند است، به‌طوری که اختلاف میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده کمینه شود. همچنین در سال‌های اخیر مطالعات محدودی در زمینه‌ی پیش‌بینی جنبش‌های نیرومند زمین توسط الگوریتم‌های هوشمند و به‌خصوص الگوریتم‌های ژنی صورت گرفته است.<sup>[۱۲-۱۷]</sup>

است که از بیشترین داده‌های شتاب‌نگاری موجود از ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۱، که از نظر مهندسی قابل استفاده و اتکا باشند، استفاده شود. لذا کاتالوگ زلزله از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، که متولی شبکه‌ی شتاب‌نگاری ایران است، و داده‌های زلزله‌نگاری از مراجع مختلف شامل: پژوهشگاه بین‌المللی زلزله، مرکز ملی اطلاعات زمین لرزه، مؤسسه‌ی ژئوفیزیک دانشگاه تهران، سازمان ملی زمین‌شناسی آمریکا و همچنین نتایج تحقیقات پژوهشگران به‌دست آمده است.

جنبش زمین بر روی خاک در طی زمین لرزه، تأثیرپذیر از عوامل متعددی از قبیل: مکانیک منبع، بزرگی، زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی سطح، فاصله‌ی سایت تا منبع و خواص دینامیکی انتشار ماده است.<sup>[۱۸]</sup> علاوه بر موارد فوق در بعضی موارد، برخی پارامترهای فیزیکی شامل: رفتار غیرخطی خاک، جهت‌داری انتشار گسیختگی، اثرات حوزه و اثر افت تنش بر این جنبش، اثر بیشتری دارند.<sup>[۱۹]</sup>

در این نوشتار، به علت کمبود اطلاعات، بزرگی زلزله، فاصله‌ی منبع زلزله - ساخت‌گاه، نوع خاک و همچنین افقی یا عمودی بودن پیشینه‌ی شتاب به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. برای اطمینان از رکوردهای جمع‌آوری‌شده، اصلاحاتی بر روی این رکوردها انجام شده است. در انتخاب رکوردها، در دسترس بودن اطلاعات زلزله، از قبیل دقت و درستی بزرگی و امکان تعیین نوع زمین در نظر گرفته شده است.

## ۱.۲. بزرگی

از مهم‌ترین پارامترهایی که در روابط کاهندگی مؤثر است، بزرگی زلزله است. انرژی آزادشده‌ی زلزله، دامنه‌ی امواج ایجادشده را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بزرگی زلزله عمدتاً براساس پیشینه‌ی دامنه‌ی این امواج تعیین می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رود، در یک فاصله‌ی مشخص از منبع آزادشدن انرژی، هر چه بزرگی زلزله بیشتر باشد، شتاب‌ها، سرعت‌ها و پیشینه‌ی تغییرمکان‌های زمین نیز بزرگ‌تر خواهد بود.

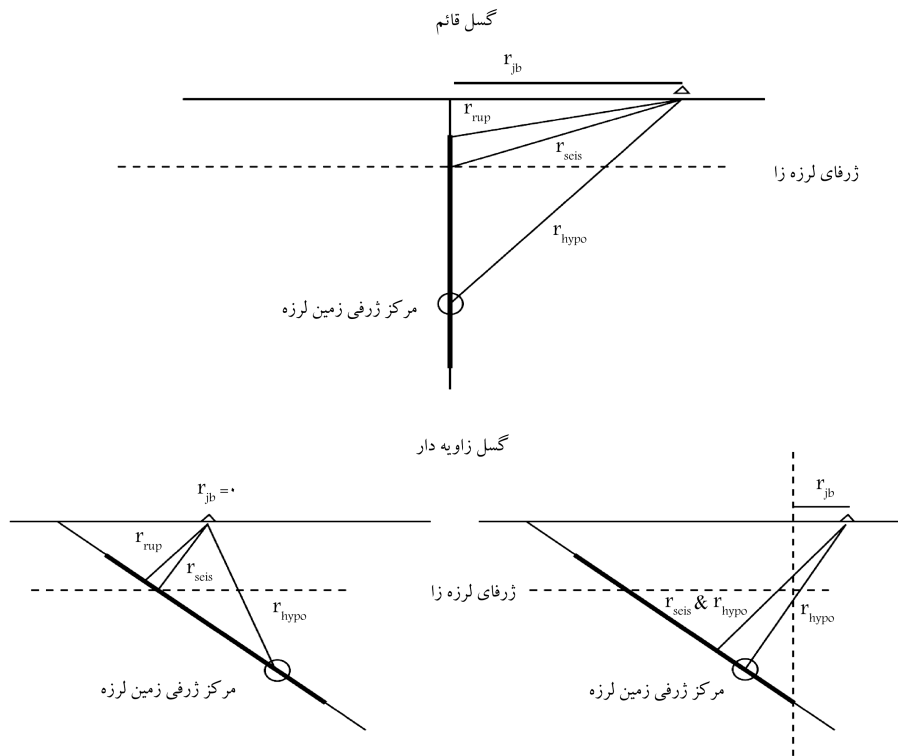
تنوع امواج زلزله و مؤسسات ثبت‌کننده‌ی زلزله سبب شده است که این پارامتر به‌صورت‌های مختلف تعریف شود. زلزله‌های رخ داده در ایران سطحی هستند و بیشتر رکوردهای ثبت‌شده در ایران براساس مقیاس بزرگی موج سطحی ( $M_s$ ) گزارش شده‌اند، که در صورت تبدیل این مقیاس به دیگر مقیاس‌های بزرگی از قبیل: بزرگی موج حجمی ( $M_b$ ) و بزرگی گشتاور ( $M_w$ )، دقت در ارائه‌ی روابط کاهش خواهد یافت. از این رو در این نوشتار، از بزرگی موج سطحی ( $M_s$ ) استفاده شده است. البته باید توجه داشت که در مقیاس بزرگی موج سطحی، مسئله‌ی اشباع‌شدن در بزرگی حدود ۸ مطرح می‌شود. اما با توجه به اینکه تعداد بسیار کمی از رکوردهای با این محدوده موجود هستند، از این اثر صرف‌نظر شده است. برای تبدیل تعداد محدودی از بزرگی‌های بیان‌شده براساس بزرگی موج حجمی ( $M_b$ ) به بزرگی موج سطحی، رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی IRCOLD مورد استفاده قرار گرفته است (رابطه‌ی ۱):<sup>[۲۰]</sup>

$$M_s = 1.2 \ln m_b - 1.29 \quad (1)$$

در انتخاب رکوردهای انتخابی، فقط داده‌هایی با زلزله‌ی مسبب به بزرگی ۴ و یا بیشتر از آن در مقیاس امواج سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. علت این امر دقت بالاتر رکوردهای موجود برای این زلزله‌ها و همچنین اهمیت تطابق مدل برای زلزله‌هایی با بزرگی در این دامنه است. در نهایت، با توجه به موارد ذکرشده، بزرگی زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش از ۴ تا ۷٫۷ در مقیاس موج سطحی هستند.

## ۲. جمع‌آوری کاتالوگ زلزله

اولین گام برای به‌دست‌آوردن رابطه‌ی کاهندگی، جمع‌آوری کاتالوگ رکوردهای ثبت‌شده است، که از نظر تعداد و دقت دارای کفایت لازم باشند. در این پژوهش تلاش شده



شکل ۱. مقایسه‌ی انواع فواصل تعریف‌شده‌ی چشمه‌ی لرزه‌زا نسبت به ساخت‌گاه. [۲۱]

## ۲.۲. فاصله

فاصله، دومین پارامتر مهم در جمع‌آوری کاتالوگ زلزله است. از آنجایی که این پارامتر مشخص‌کننده‌ی طول مسیر پیموده‌شده‌ی امواج از منبع لرزه‌زا تا سایت موردنظر است، لذا پارامتری مهم و تأثیرگذار در روابط کاهندگی است. از سوی پژوهشگران، تعاریف مختلفی برای فاصله میان چشمه‌ی لرزه‌زا نسبت به ساخت‌گاه ارائه شده است، که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نزدیک‌ترین فاصله‌ی 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 (شکل ۱).

با توجه به اینکه مسیر پیموده‌شده‌ی موج از منبع لرزه‌زا تا سایت، در واقع همان فاصله‌ی کانونی، یا به عبارت دیگر وتر مثلث قائم‌الزاویه به اضلاع عمق کانونی و فاصله میان کانون و شتاب‌نگار است؛ در این پژوهش، فاصله‌ی کانونی به عنوان فاصله در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه‌ی فاصله‌ی کانونی، روش S-P، که با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان ثبت امواج S و P فاصله‌ی کانونی را تعیین می‌کند، مورد استفاده قرار گرفت. [۲۲] فاصله‌ی کانونی را می‌توان با استفاده از معادله‌ی ۲ محاسبه کرد: [۲۳]

$$R = \frac{t_s - t_p}{\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V_p}} \quad (2)$$

که در آن،  $V_s$  و  $V_p$  سرعت امواج طولی و عرضی و  $t_p$  و  $t_s$  زمان رسیدن امواج طولی و عرضی به شتاب‌نگار هستند. با توجه به موارد اشاره‌شده و پس از محاسبه‌ی فاصله‌ی کانونی برای رکوردهای انتخابی، این فاصله از ۵ کیلومتر تا اغلب کمتر از ۲۰۰ کیلومتر تعیین شده است.

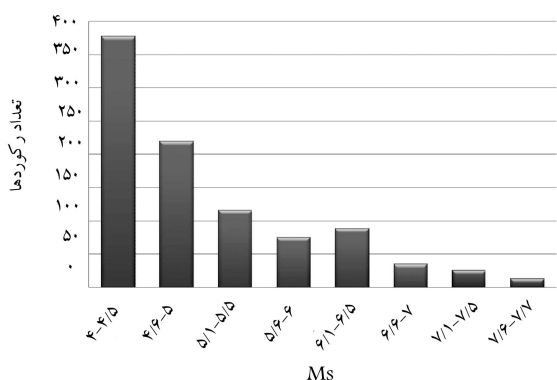
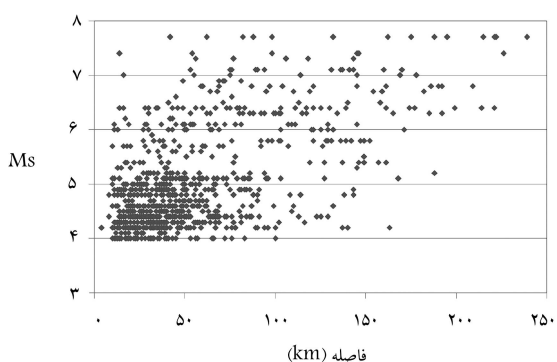
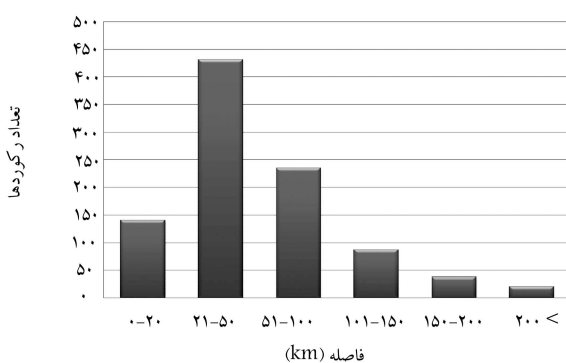
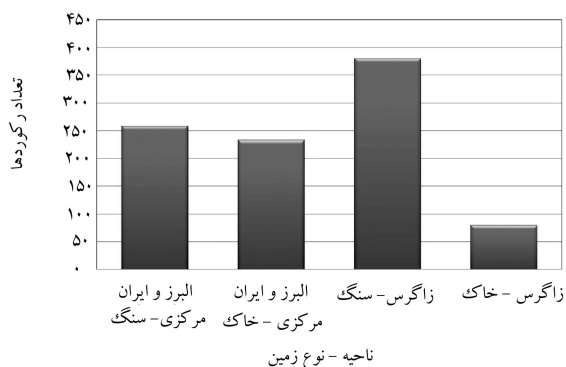
## ۳.۲. نوع زمین

دیگر پارامتر مهم در تعیین روابط کاهندگی، نوع زمین است؛ که مشخص‌کننده‌ی شرایط زمین‌شناختی ساخت‌گاه است و به‌طور کلی دارای دو دسته‌بندی کیفی، نظیر: جنس لایه‌های تشکیل‌دهنده و کثی بر مبنای سرعت امواج برشی لایه‌های سطحی است. برخی از خصوصیات مهم جنبش نیرومند زمین نظیر: دامنه، محتوای بسامدی و مدت زمان، متأثر از شرایط ساخت‌گاه است، که میزان این تأثیر، به هندسه، خواص مصالح لایه‌های زیرسطحی، خصوصیات حرکت ورودی و توپوگرافی ساخت‌گاه بستگی دارد. [۱]

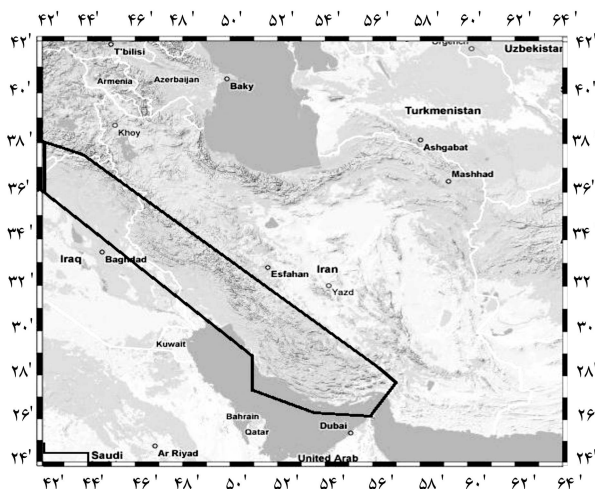
در گذشته مطالعات پراکنده‌یی که بیشتر بر مبنای مشاهدات عینی بوده است، جهت تعیین نوع ساخت‌گاه در ایران صورت گرفته است. برای نمونه می‌توان به مطالعه‌ی صورت‌گرفته توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله اشاره کرد. [۲۴] همچنین مطالعاتی جهت تعیین شرایط ساخت‌گاهی ۱۳۸ ایستگاه ثبت زلزله انجام شده است، که در این پژوهش نتایج آن مورد استفاده قرار گرفته است. [۲۵] دیگر پژوهش انجام‌شده برای تعیین شرایط ساخت‌گاهی ایستگاه‌های ثبت زلزله، ایستگاه‌های ثبت زلزله را به دو گروه کلی خاک و سنگ تقسیم کرده است. [۲۶] در این پژوهش، پس از جمع‌آوری اطلاعات موجود در زمینه‌ی تعیین شرایط ساخت‌گاهی، نتیجه‌گیری نهایی منجر به انتخاب دو نوع شرایط ساخت‌گاهی سنگ و خاک برای رکوردهای ایران شده است. براساس این تقسیم‌بندی و با مقایسه‌ی آن با آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌های ایران (استاندارد ۲۸۰۰)، [۲۷] در مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش، شرایط ساخت‌گاهی سنگ و خاک به ترتیب متناظر سرعت امواج برشی بیشتر یا مساوی ۳۷۵ متر بر ثانیه و کمتر از ۳۷۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین تعدادی از رکوردها به دلیل نامشخص بودن شرایط ساخت‌گاهی حذف شده‌اند.

جدول ۱. مختصات چندضلعی منطقه‌ی زاگرس.

۴۲,۰	۴۳,۸	۵۴,۰	۵۶,۴	۵۷,۰	۵۵,۸	۵۳,۵	۵۱,۰	۵۱,۰	۴۲,۰	E
۳۸,۲	۳۷,۵	۳۰,۲	۲۸,۳	۲۷,۵	۲۶,۲	۲۶,۳	۲۷,۵	۲۹,۰	۳۶,۰	N



شکل ۳. نمودار پراکندگی بزرگا برحسب فاصله و تعداد رکوردها براساس ناحیه - نوع ساخت‌گاه، بزرگا و فاصله.



شکل ۲. محدوده‌ی نواحی زاگرس و البرز و ایران مرکزی (محدوده‌ی داخل منحنی ناحیه‌ی زاگرس است).

#### ۴.۲. شرایط تک‌تونیکی ایران

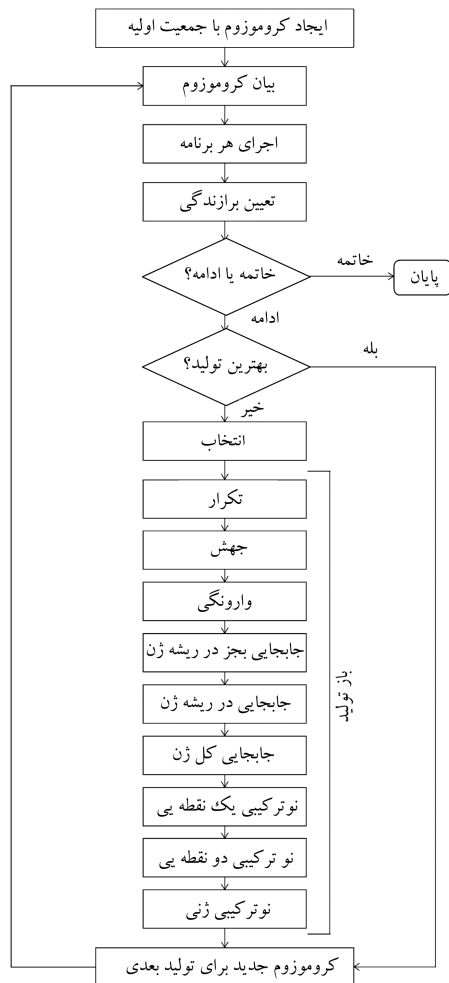
ایران از دیرباز یکی از مناطقی پر تحرک و در عین حال پر زلزله‌ی جهان به شمار می‌رود. تعداد شکستگی‌های آن، زیاد و جهت حرکت آن‌ها نیز بسیار متفاوت است. ایران کشوری است که روی کمر بند لرزه‌خیز آلپ - هیمالیا قرار دارد و در حیطه‌ی جهانی، فلات ایران در محل تلاقی صفحه‌های عربستان، هند، و اوراسیا واقع شده است. تاکنون پژوهشگران مختلفی بر روی ساختار لرزه - زمین‌ساخت ایران مطالعه، و هر یک آن را به ترتیب به ۲۳، ۴، ۴، ۹ و ۲۰ ناحیه تقسیم کرده‌اند. [۲۸-۳۲] در این پژوهش، با توجه به اهداف پژوهش چند ضلعی‌یی با مختصات رئوس که در جدول ۱ ارائه شده است، به‌عنوان ناحیه‌ی زاگرس و سایر نواحی ایران، به‌عنوان البرز - ایران مرکزی، تقسیم‌بندی شدند (شکل ۲).

#### ۵.۲. کاتالوگ نهایی مورد استفاده

پس از جمع‌آوری رکوردهای ثبت‌شده، ابتدا داده‌ها منظم و شرایط ساخت‌گاهی ایستگاه زلزله تعیین و تصحیح می‌شود، در مرحله‌ی بعد به دلیل وجود انواع بزرگا، بزرگاها یکسان و سپس فاصله‌ی مرکزکانونی زلزله تا ایستگاه شتاب‌نگاشت تصحیح می‌شود. کاتالوگ نهایی این پژوهش با توجه به موارد مذکور حاصل شده است. در نهایت و پس از پردازش رکوردها کاتالوگ انتخابی، شامل اطلاعات ۹۵۴ رکورد زلزله جمع‌آوری شده برای کل ایران است، که از این تعداد ۴۹۳ رکورد مربوط به البرز - ایران مرکزی و مابقی مربوط به ناحیه‌ی زاگرس است. در شکل ۳، مشخصات کاتالوگ نهایی ارائه شده است.

#### ۳. الگوریتم توسعه‌ی ژنی

پس از الگوریتم‌های ژنتیکی و برنامه‌نویسی ژنتیکی که به ترتیب در دهه‌ی ۶۰ میلادی



شکل ۴. فلوجارت الگوریتم توسعه‌ی ژنی. [۳۴]

برای در نظر گرفتن اثرات شرایط ساخت‌گاهی و نواحی لرزه‌خیز، روابط کاهندگی برای ۴ بخش از رکوردها مورد محاسبه قرار گرفته است.

ابتدا رکوردهای مربوط به دو ناحیه البرز - ایران مرکزی و زاگرس تفکیک شدند و سپس هر یک به نوبه‌ی خود و با توجه به شرایط ساخت‌گاهی‌شان به دو قسمت تقسیم شدند، که در نهایت ۴ بخش رکورد به دست آمد که شامل: البرز - ایران مرکزی با شرایط ساخت‌گاهی سنگ، البرز - ایران مرکزی با شرایط ساخت‌گاهی خاک، زاگرس با شرایط ساخت‌گاهی سنگ و زاگرس با شرایط ساخت‌گاهی خاک است.

برای هر کدام از ۴ بخش مذکور، ۸۵٪ از رکوردها به عنوان رکوردهای آموزشی و ۱۵٪ بقیه نیز به عنوان رکوردهای آزمایشی در نظر گرفته شدند. به منظور آزمایش، رکوردهای آزمایشی طوری در نظر گرفته شدند که متغیرهای این رکوردها در بازه‌ی متغیرهای رکوردهای آموزشی موجود باشند.

در گام بعدی که تعیین تابع برازندگی است، این تابع براساس ریشه‌ی حداقل مربعات خطا (RMSE) که با معادله‌ی ۳ محاسبه می‌شود، ارزیابی می‌شود:

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (3)$$

در این معادله،  $\hat{Y}_i$  مقادیر پیش‌بینی شده و  $Y_i$  مقادیر هدف برای هر مورد هستند و

و سال ۱۹۸۵ ابداع شده‌اند، در سال ۱۹۹۹ الگوریتم توسعه‌ی ژنی، که توسعه‌ی طبیعی از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیکی است، ارائه شد. [۳۳] تمام این الگوریتم‌ها به عنوان جمعیت، از افراد استفاده می‌کنند، که انتخاب آن‌ها با توجه به برازندگی است و با استفاده از یک یا چند اپراتور ژنتیکی، تنوع ژنتیکی را ایجاد می‌کنند. [۳۳]

تفاوت اساسی میان مشخصه‌های طبیعی این ۳ الگوریتم وجود دارد. در الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌ها به صورت رشته‌هایی با طول ثابت هستند، اما در برنامه‌نویسی ژنتیکی به صورت رشته‌هایی غیرخطی با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف هستند (درخت تجزیه). در الگوریتم توسعه‌ی ژنی کروموزوم‌ها به عنوان رشته‌های نمادین با طول ثابت هستند، که سپس به عنوان نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف (درخت توسعه) بیان شده‌اند. [۳۴]

الگوریتم توسعه‌ی ژنی از همان نوع نمودارهای مورد استفاده‌ی برنامه‌نویسی ژنتیکی استفاده می‌کند، اما نهادهای تولیدشده به وسیله‌ی الگوریتم توسعه‌ی ژنی (درخت توسعه) عبارت از یک ژنوم هستند. ژنوم یا کروموزوم در الگوریتم توسعه‌ی ژنی، شامل رشته‌ی نمادین و خطی با طول ثابت است. هر ژنوم از یک یا چند ژن تشکیل می‌شود و با وجود طول ثابت، کد کروموزوم در الگوریتم توسعه‌ی ژنی مربوط به درختان توسعه با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف است. [۳۳]

در الگوریتم توسعه‌ی ژنی عناصر اصلی علاوه بر کروموزوم‌ها شامل درختان توسعه هستند، که عبارت از اطلاعات ژنتیکی گذشته در کروموزوم‌ها هستند. کد ژنتیکی نیز عبارت از رابطه‌ی یک به یک بین نمادهای کروموزوم و توابع و یا ترمینال‌هاست. این سازمان متشکل از توابع و ترمینال‌ها در درختان توسعه و نوع تعامل میان زیردرخت توسعه‌ها را قوانین بسیار ساده‌ی تعیین می‌کنند. بنابراین، بیش‌بزرگ الگوریتم توسعه‌ی ژنی شامل ابداع کروموزوم‌هایی قادر به نمایندگی از هر درخت توسعه است، که باعث ایجاد یک زبان جدید، به نام کاروا می‌شود. این یک سیستم دو زبانه است که برای خواندن و بیان اطلاعات کروموزوم‌های الگوریتم توسعه‌ی ژنی ارائه شده است. [۳۴] سازمان ساختاری و کارکردی ژن در الگوریتم توسعه‌ی ژنی بدین صورت است که هر ژن دارای یک سر و یک دنباله است و این ساختار همیشه تضمین‌کننده‌ی تولید برنامه‌های معتبر است. [۳۳]

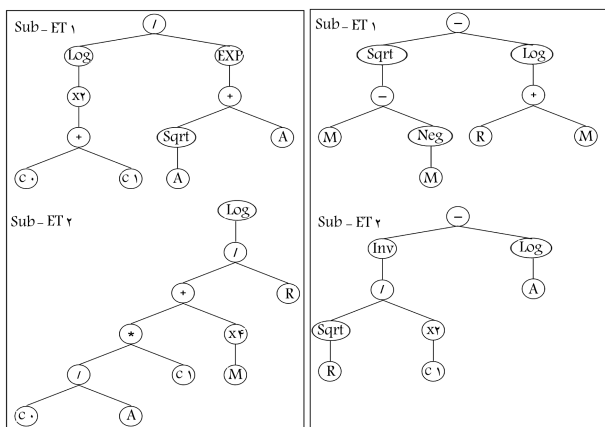
مطابق شکل ۴، اولین گام اساسی در الگوریتم توسعه‌ی ژنی تشکیل تصادفی کروموزوم‌ها توسط تعداد معینی از افراد (جمعیت اولیه) است، که در واقع این گام آغاز فرآیند در این الگوریتم است. در گام بعدی این کروموزوم‌ها بیان و برازندگی هر فرد در برابر مجموعه‌ی از موارد برازندگی ارزیابی می‌شود. سپس این افراد با توجه به برازندگی خود انتخاب می‌شوند تا خود ایجادکننده‌ی فرزندان با صفات جدید باشند. فرزندان نیز به نوبه‌ی خود، در معرض روند توسعه‌ی مشابهی هستند و این روند تا زمانی تکرار می‌شود که یک راه حل خوب پیدا شود. [۳۴]

#### ۴. مراحل انجام پژوهش

در بخش‌های پیشین در مورد متغیرهای تأثیرگذار در روابط کاهندگی به تفصیل بحث شد. بزرگای موج سطحی ( $M_s$ )، فاصله‌ی کانونی ( $R$ ) و پارامتر  $A$  برای مشخص کردن افقی یا قائم بودن بیشینه‌ی شتاب، به عنوان متغیرهای مؤثر در روابط کاهندگی و متغیرهای ورودی برای الگوریتم توسعه‌ی ژنی تعیین شدند.

جدول ۲. تنظیمات در نظر گرفته شده برای استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی.

زاگرس - خاک	زاگرس - سنگ	البرز و ایران مرکزی - خاک	البرز و ایران مرکزی - سنگ	
۸۵	۸۵	۸۵	۸۵	رکوردهای آموزشی (%)
۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	رکوردهای آزمایشی (%)
$M_s, R, A$				متغیرها
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	تعداد کروموزوم
۷	۷	۷	۷	اندازه‌ی هد
۲	۲	۲	۲	تعداد ژن
Addition (+)				تابع اتصال (لینک)
RMSE				تابع برازندگی
۰٫۰۴۴				جهش
۰٫۱				وارونگی
۰٫۱				جابجایی بجز در ریشه ژن
۰٫۱				جابجایی در ریشه ژن
۰٫۳				نوترکیبی یک نقطه‌یی
۰٫۳				نوترکیبی دو نقطه‌یی
۰٫۱				نوترکیبی ژنی
۰٫۱				جابجایی کل ژن
۲				ثابت‌های عددی
Addition(+), Subtraction (-), Multiplication (*), Division (/), Square root (sqrt), Exponential (exp), Natural logarithm (ln), Logarithm of base ۱۰ (log), Inverse (Inv), Cube root (۳RT), Power (pow), Negation (neg), Power of ۲ (x۲), Power of ۳ (x۳)				تابع ریاضی



ب) خاک.

الف) سنگ.

شکل ۵. درخت توسعه‌ی مربوط به رابطه‌ی کاهندگی در ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی با ساخت‌گاه.

توسعه‌ی نشان داده شده در شکل ۵ هستند (معادله‌های ۵ و ۶):

$$\text{Log(PGA)} = \sqrt{2M} - \text{Log}(M + R) + \frac{0.69}{\sqrt{R}} - \text{Log}(A) \quad (5)$$

$$\text{Log(PGA)} = \frac{2.53}{\text{EXP}(A + \sqrt{A})} + \text{Log}\left(\frac{35 + M^T A}{RA}\right) \quad (6)$$

در این معادله‌ها،  $M$  بزرگای موج سطحی،  $R$  فاصله‌ی کانونی و پارامتر  $A$  برای پیشینه‌ی شتاب افقی برابر ۱ و برای پیشینه‌ی شتاب قائم برابر ۲ است. همچنین

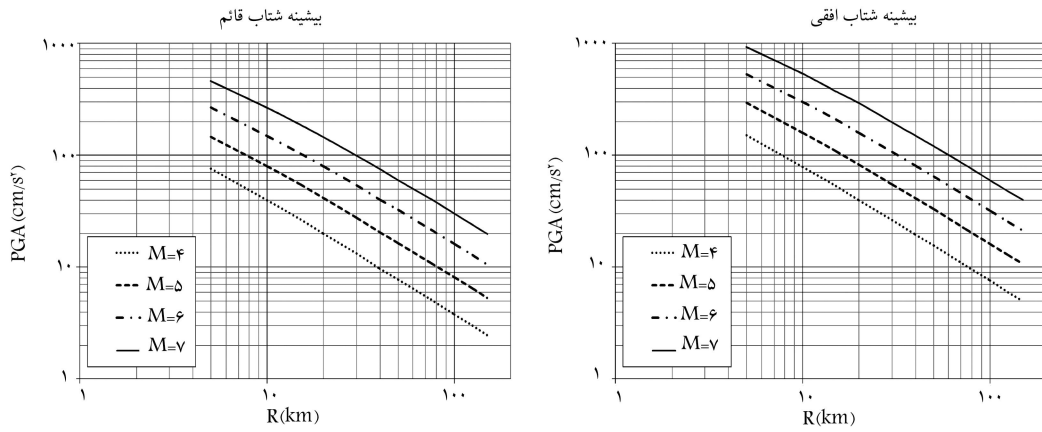
زمانی که این دو مقدار پیش‌بینی شده و هدف برابر شوند ( $\hat{Y}_i = Y_i$ )، مقدار خطا برابر صفر خواهد شد ( $E = 0$ ) و به وضوح می‌توان مشاهده کرد که هرچه مقدار  $E$  کمتر باشد، تابع پیش‌بینی و هدف مطابقت بیشتری خواهند داشت. در نهایت، تابع ارائه شده با معادله‌ی ۴ به عنوان تابع برازندگی استفاده شده است:

$$f = 1000 \times \frac{1}{1 + E} \quad (4)$$

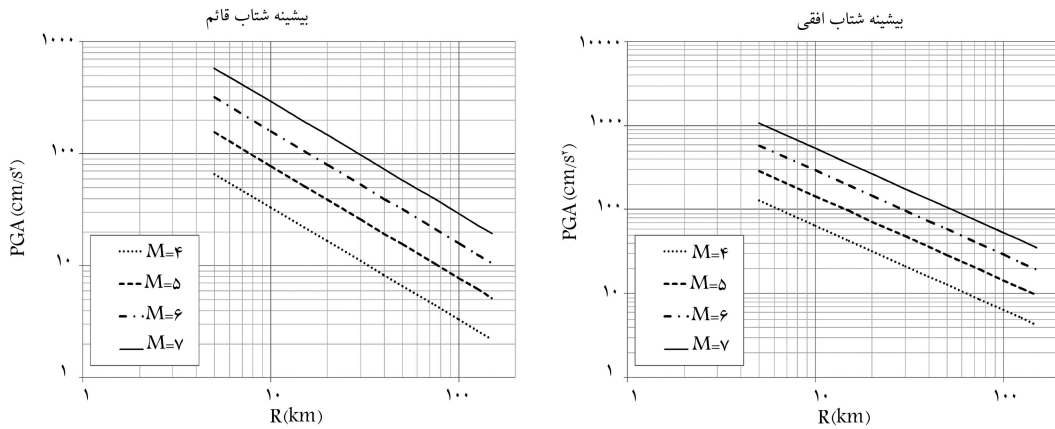
با تعریف ارائه شده برای تابع برازندگی، این تابع دارای دامنه‌ی تغییرات ۰-۱۰۰۰ است؛ که پیشینه‌ی مقدار آن نشانه‌ی تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی و هدف است و واضح است که هرچه مقدار این تابع کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی تطابق کمتری نیز خواهد بود و بالعکس. برای استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی موارد دیگری از قبیل تابع اتصال، اپراتورهای ژنی و دیگر تنظیمات مورد لزوم تعیین شدند، که در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۵. ارائه‌ی روابط و مقایسه‌ی مدل‌ها برای مقادیر مختلف بزرگا و شرایط ساخت‌گاهی خاک و سنگ

با توجه به تقسیم‌بندی صورت گرفته در بخش پیشین، رابطه‌ی پیشینه‌ی شتاب برای هر کدام از ناحیه‌ها و با توجه به نوع زمین ناحیه محاسبه شده است. روابط ارزیابی شده برای ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی با نوع ساخت‌گاه سنگ و خاک، معادل با درختان



شکل ۶. مقادیر بیشینه‌ی شتاب افقی و قائم براساس مقادیر مختلف بزرگا (البرز و ایران مرکزی - نوع زمین سنگ).



شکل ۷. مقادیر بیشینه‌ی شتاب افقی و قائم براساس مقادیر مختلف بزرگا (البرز و ایران مرکزی - نوع زمین خاک).

هستند. همچنین مقدار انحراف معیار در معادله‌های ۷ و ۸، به ترتیب  $0.348$  و  $0.381$  محاسبه شده است.

مقادیر بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی با نوع زمین سنگ و خاک در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند و همان‌طور که مشاهده می‌شود، همانند ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی، این مقادیر با افزایش بزرگا، افزایش ولی با افزایش فاصله کاهش می‌یابند.

### ۱.۵. مقایسه‌ی روابط کاهندگی ارائه شده در این پژوهش با برخی دیگر از مدل‌های ارائه شده

در این بخش، روابط ارائه شده با دیگر روابطی که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند، مقایسه شده‌اند.

روابط ارائه شده [۳۵، ۱۰۱]، براساس رکوردهای ثبت شده‌ی ایران بوده است و برای مقایسه کاملاً مناسب‌اند. همچنین روابط ارائه شده [۳۸-۳۶، ۸]، مربوط به ناحیه‌ی اروپا و خاورمیانه و همچنین ایران هستند. در نهایت، نتایج این پژوهش با رابطه‌ی ارائه شده [۳۹] مقایسه شده است، که برای سراسر دنیا ارائه شده است. روابط ارائه شده [۳۶، ۸] به ترتیب برای بیشینه‌ی شتاب افقی و عمودی جنبش نیرومند زمین براساس بزرگای موج سطحی و فاصله‌ی صفر الی  $260$  کیلومتر ارائه شده‌اند. در این روابط از مؤلفه‌های مربوط به  $157$  زلزله با بزرگای ۴ الی  $7.9$  استفاده شده است. رابطه‌ی ارائه شده [۱۰] برای بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی جنبش نیرومند زمین براساس

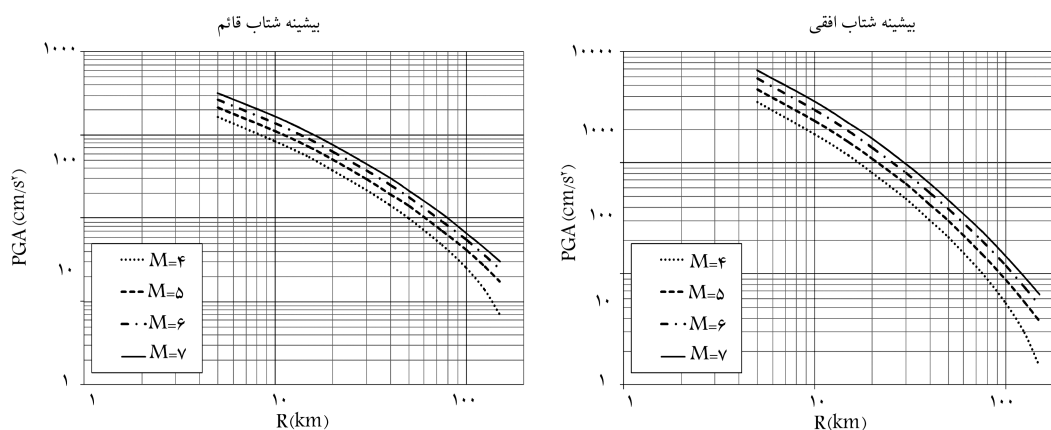
مقدار انحراف معیار در معادله‌های ۵ و ۶ به ترتیب  $0.332$  و  $0.341$  محاسبه شده‌اند.

در شکل‌های ۶ و ۷، مقادیر بیشینه‌ی شتاب افقی و قائم برای ناحیه‌ی البرز - ایران مرکزی به ترتیب با نوع ساخت‌گاه‌های سنگ و خاک براساس فاصله در مقیاس لگاریتمی و برای مقادیر مختلف بزرگا نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش بزرگا، مقادیر بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و قائم افزایش می‌یابد، همچنین به روشنی می‌توان دید که این مقادیر با افزایش فاصله کاهش می‌یابند. در ادامه، روابط بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و قائم برای ناحیه‌ی زاگرس و نوع زمین سنگ و خاک ارائه شده‌اند (معادله‌های ۷ و ۸):

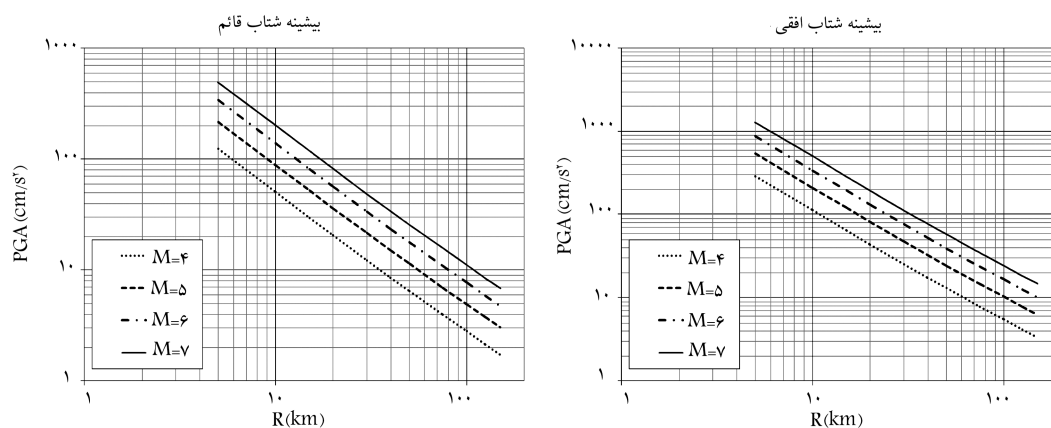
$$\text{Log (PGA)} = \text{Ln} \left[ \text{Log} (M^{\tau} + 10^{\tau} - 2R) \right] + 3.711 - R^{\tau/25} - (\text{Ln}(A))^{\tau} \quad (7)$$

$$\text{Log (PGA)} = \text{Ln} \left[ \frac{(5.74 - A)^{\tau}}{1.7^{\tau} 5 + R} + 5.74 \right] + 0.5 \text{Ln} \left[ \frac{M^{\tau} A - 3.55}{A^{\tau} R} \right] \quad (8)$$

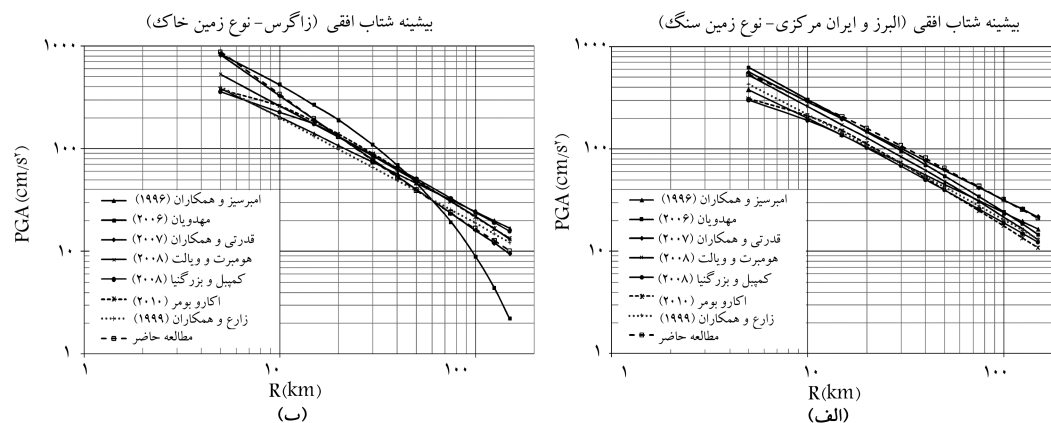
که در آنها، مقادیر  $M$ ،  $R$  و  $A$  به ترتیب بزرگای موج سطحی، فاصله‌ی کانونی و پارامتر مشخص‌کننده‌ی افقی ( $A = 1$ ) یا عمودی بودن ( $A = 2$ ) بیشینه‌ی شتاب



شکل ۸. مقادیر پیشینه‌ی شتاب افقی و قائم براساس مقادیر مختلف بزرگا (زاگرس - نوع زمین سنگ).



شکل ۹. مقادیر پیشینه‌ی شتاب افقی و قائم براساس مقادیر مختلف بزرگا (زاگرس - نوع زمین خاک).

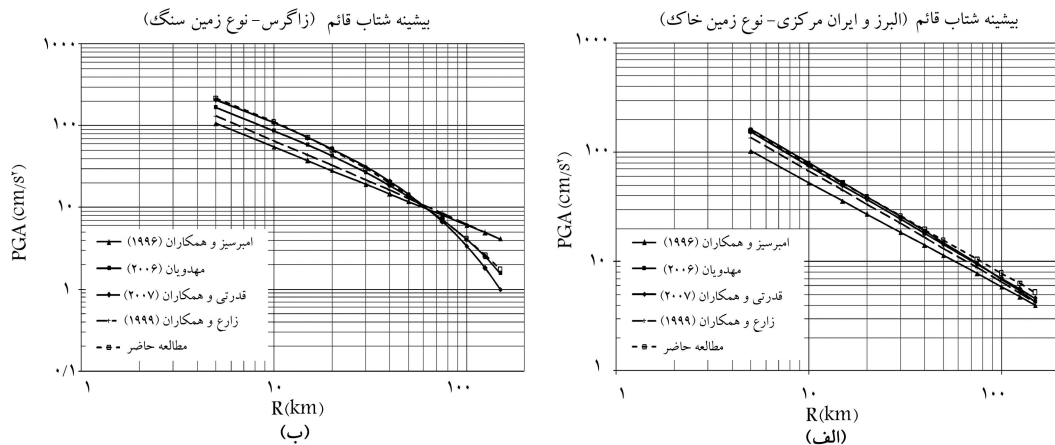


شکل ۱۰. مقایسه‌ی مدل‌های پیشنهادی برای پیشینه‌ی شتاب افقی در این پژوهش با سایر مدل‌های ارائه‌شده در دیگر مطالعات ( $M = 6$ ).

شتاب‌های افقی و عمودی جنبش نیرومند زمین براساس بزرگای موج سطحی و فاصله‌ی ۵ الی ۲۰۰ کیلومتر ارائه شده است. در این رابطه از ۲۰۰ مؤلفه‌ی افقی و ۲۰۰ مؤلفه‌ی عمودی از ۵۰ زلزله با بزرگای ۴٫۵ الی ۷٫۳ استفاده شده است. رابطه‌ی ارائه‌شده [۳۷]، برای پیشینه‌ی شتاب افقی جنبش نیرومند زمین براساس بزرگای موج سطحی ارائه شده است. در این رابطه از ۹۶۰ مؤلفه‌ی افقی از ۱۳۸ زلزله با بزرگای ۴ الی ۷٫۴ استفاده شده است.

بزرگای گشتاور و فاصله‌ی ۴ الی ۲۲۴ کیلومتر ارائه شده است. در این رابطه، از ۴۶۸ مؤلفه‌ی افقی و ۴۶۸ مؤلفه‌ی عمودی مربوط به ۴۷ زلزله با بزرگای ۲٫۷ الی ۷٫۴ استفاده شده است. رابطه‌ی ارائه‌شده [۳۵]، برای پیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی جنبش نیرومند زمین براساس بزرگای گشتاور و فاصله‌ی صفر الی ۱۱۸٫۲ کیلومتر ارائه شده است. در این رابطه از ۱۵۰ مؤلفه‌ی افقی و ۱۵۰ مؤلفه‌ی عمودی زلزله‌های با بزرگای ۴٫۱ الی ۷٫۳ استفاده شده است. رابطه‌ی ارائه‌شده [۱] نیز برای پیشینه‌ی





شکل ۱۱. مقایسه‌ی مدل‌های پیشنهادی برای بیشینه‌ی شتاب قائم در این پژوهش با سایر مدل‌های ارائه‌شده در دیگر مطالعات ( $M = 5$ ).

مشخص کردن افقی بودن ( $A = 1$ ) یا عمودی بودن ( $A = 2$ ) بیشینه‌ی شتاب، برای دو ناحیه‌ی لرزه‌ی البرز - ایران مرکزی و زاگرس و با توجه به نوع زمین ناحیه (خاک و سنگ) ارائه شده‌اند.

در این پژوهش، ۹۵۴ زوج رکورد، حاصل از ۴۹۰ رویداد زلزله مورد استفاده قرار گرفته است، که از این تعداد ۴۹۳ رکورد مربوط به البرز و ایران مرکزی و بقیه مربوط به ناحیه‌ی زاگرس است. این رکوردها فقط شامل زلزله‌های با بزرگای موج سطحی بیشتر و مساوی ۴ ریشتر و با فاصله‌ی کانونی بیشتر از ۵ کیلومتر تا اغلب کمتر از ۲۰۰ کیلومتر هستند.

بدین منظور ابتدا رکوردها برای نواحی البرز - ایران مرکزی با شرایط ساخت‌گاهی سنگ، البرز - ایران مرکزی با شرایط ساخت‌گاهی خاک، زاگرس با شرایط ساخت‌گاهی سنگ و زاگرس با شرایط ساخت‌گاهی خاک به ۴ بخش تقسیم شدند. همچنین فقدان اطلاعات کافی، متغیرهای مورد استفاده در روابط کاهندگی را محدود به بزرگای زلزله، فاصله‌ی کانونی و همچنین نوع زمین کرد.

بدین ترتیب و با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی، این امکان فراهم شد که روابط کاهندگی بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و قائم به صورت توابعی پیوسته و با دقت مناسب ارائه شوند، به طوری که نتایج و قیاس آن‌ها با روابط گذشته، صحت و دقت این روابط را نشان می‌دهند.

همچنین رابطه‌ی ارائه‌شده<sup>[۲۸]</sup>، برای بیشینه‌ی شتاب افقی جنبش نیرومند زمین براساس بزرگای گشتاور و فاصله‌ی  $0.7$  الی  $199.27$  کیلومتر ارائه شده است. در این رابطه از  $1561$  مؤلفه‌ی افقی مربوط به  $64$  زلزله با بزرگای  $4.27$  الی  $7.9$  استفاده شده است. و نیز رابطه‌ی ارائه‌شده<sup>[۲۸]</sup>، برای بیشینه‌ی شتاب افقی جنبش نیرومند زمین براساس بزرگای گشتاور و فاصله‌ی صفر الی  $99$  کیلومتر ارائه شده است، که در این رابطه از  $532$  مؤلفه‌ی افقی مربوط به  $131$  زلزله با بزرگای  $5$  الی  $7.6$  استفاده شده است. در شکل‌های  $10$  و  $11$ ، مقایسه‌ی میان روابط کاهندگی ارائه‌شده در این پژوهش و دیگر روابط ذکر شده به ترتیب برای بزرگای  $M = 6$  و  $M = 5$  نشان داده شده است. آشکار است که تعداد رکوردها و فواصل برای مقایسه مناسب هستند و برای درستی‌سنجی مقایسه، بزرگای گشتاور به مقیاس بزرگای موج سطحی تبدیل شده‌اند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، روابط کاهندگی برای بیشینه‌ی شتاب‌های افقی و عمودی، به صورت توابعی پیوسته از بزرگای موج سطحی ( $M$ )، فاصله‌ی کانونی ( $R$ ) و پارامتر  $A$  برای

## پانویس

1. ground type

## منابع (References)

- Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A. and Manouchehri Dana, F. "Attenuation relationships for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **11**(4), pp. 469-492 (2007).

- Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M., Mirza Hessabi, M. and Razavian Amrei, S.A. "Ground-motion prediction equations of spectral ordinates and Arias intensity for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **14**, pp. 1-29 (2010).
- Campbell, K.W. "Near-source attenuation of peak horizontal acceleration", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**(6), pp. 2039-2070 (1981).
- Joyner, W.B. and Boore, D.M. "Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**(6), pp. 2011-2038 (1981).

5. Douglas, J. "Ground-motion prediction equations 1964-2010", Report BRGM/RP-59356-FR, BGRM, Orléans, France (2011).
6. Chiaruttini, C. and Siro, L. "The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance and seismic intensity for friuli and ancona and the alpine belt", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**(6), pp. 1993-2009 (1981).
7. Ambraseys, N.N. and Bommer, J.J. "On the attenuation of ground accelerations in Europe", *Proceedings of Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, **2**, pp. 675-678 (1992).
8. Ambraseys, N.N., Simpson, K.A. and Bommer, J.J. "Prediction of horizontal response spectra in Europe", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(4), pp. 371-400 (1996).
9. Ramazi, H.R. "Attenuation laws of Iranian earthquakes", *Proceedings of the 3rd international Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran, pp. 337-344 (1999).
10. Zare, M., Ghafory-Ashtiany, M. and Bard, P.Y. "Attenuation law for the strong motions in Iran", *Proceedings of the 3rd international Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran, pp. 345-354 (1999b).
11. Khademi, M.H. "Attenuation of peak and spectral acceleration in the Persian plateau", *Proceedings of 10th European Conference on Earthquake Engineering*, pp. 330 (2002).
12. Sobhaninejad, Gh., Noorzad, A. and Ansari, A. "Combination of generalized approximation method (anfis) and global optimization techniques (genetic algorithm) in estimation strong ground motion attenuation law", *5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran (13-16 May 2007).
13. Cabalar, A.F. and Cevik, A. "Genetic programming-based attenuation relationship: An application of recent earthquakes in Turkey", *Computers and Geosciences*, **35**(9), pp. 1884-1896 (2009).
14. Kermani, E., Jafarian, Y. and Baziar, M.H. "A new attenuation model for peak ground acceleration in soil sites using genetic programming", *2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Near East University, Nicosia, North Cyprus, pp. 306-313 (28-30 May 2009).
15. Jafarian, Y., Kermani, E. and Baziar, M.H. "Empirical predictive model for the  $v_{max}/a_{max}$  ratio of strong ground motions using genetic programming", *Computers & Geosciences Computers & Geosciences*, **36**(12), pp. 1523-1531 (2010).
16. Gandomi, A.H., Alavi, A.H., Mousavi, M. and Tabatabaei, S.M. "A hybrid computational approach to derive new ground-motion prediction equations", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **24**(4), pp. 717-732 (2011).
17. Alavi, A.H., Gandomi, A.H., Modaresnezhad, M. and Mousavi, M. "New ground-motion prediction equations using multi expression programming", *Journal of Earthquake Engineering*, **15**, pp. 511-536 (2011).
18. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, p. 653 (1996).
19. Somerville, P.G. and Graves, R.W. "Characterization of earthquake strong ground motion", *Pure Applied Geophysics*, **160**(10-11), pp. 1811-1828 (2003).
20. IRCOLD, Iranian Committee of Large Dams, "Relationship between  $M_s$  and  $m_b$ ", Internal Report (1994) (in Persian).
21. Abrahamson, N.A. and Shedlock, K.M. "Overview", *Seismol. Res. Lett.*, **68**(1), pp. 9-23 (1997).
22. "Earthquake information bulletin", *Geological Survey, United States*, **2**(5) (September-October 1970).
23. Mirzaei, H. and Farzanegan, E., *Specifications of the Iranian Accelerograph Network Stations*, BHRC Publication, no. 280, Tehran, Iran (1998) (In Persian)
24. Mirzaei, H., *Geological Site Investigation on Some Accelerograph Stations in Iran through Geophysical Method*, BHRC Publication, no. 324, Tehran, Iran (2000) (in Persian).
25. Zare, M., Bard, P.Y. and Ghafory-Ashtiany, M. "Site characterization for the Iranian strong motion network", *Soil Dynamics and Engineering*, **18**(18), pp. 101-123 (1999a).
26. Mahdavian, A. "Design response spectra for large dam in Iran", *Proceedings of International Commission of Large Dams (ICOLD)*, Beijing, China (2000).
27. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, Third Revision, Building & Housing Research Center, Iran (2005) (in Persian).
28. Stocklin, J. "Structural history and tectonics of Iran, a review", *Bulletin of the American Association Petroleum Geology*, **52**(7), pp. 1229-1258 (1968).
29. Takin, M. "Iranian geology and continental drift in the Middle East", *Nature*, **235**, pp. 147-150 (1972).
30. Berberian, M. "Contribution to the seismotectonic of Iran, part II", Report No. 39 (1976) (in Persian).
31. Nowroozi, A. "Seismotectonic provinces of Iran", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**(4), pp. 1249-1276 (1976).
32. Tavakoli, B. "Major seismotectonic provinces of Iran", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Internal Document (1996) (in Persian).
33. Ferreira, C. "Gene expression programming in problem solving", In: *Proceedings of the Sixth Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications*, pp. 10-24 (2001a).
34. Ferreira, C. "Gene expression programming: Mathematical modeling by an artificial intelligence", Springer-Verlag (2006).
35. Mahdavian, A. "Empirical evaluation of attenuation relations of peak ground acceleration in the Zagros and central Iran", In: *Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC)*, Paper number 558 (2006).
36. Ambraseys, N.N. and Simpson, K.A. "Prediction of vertical response spectra in Europe", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(4), pp. 401-412 (1996).

37. Humbert, N. and Viallet, E. "An evaluation of epistemic and random uncertainties included in attenuation relationship parameters", In: *Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Paper no. 07-0117 (2008).
38. Akkar, S. and Bommer, J.J. "Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East", *Seismological Research Letters*, **81**(2), pp. 195-206 (2010).
39. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 139-171 (2008b).