

### چکیده

پیش‌بینی واقع‌گرایانه بیشینه شتاب زمین (PGA)، به منظور استفاده در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، به‌خصوص در مناطق لرزه‌خیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با استفاده از تحلیل خطر احتمالاتی زلزله، میزان لرزه‌خیزی یک منطقه هنگام وقوع زلزله مشخص می‌گردد. بنابراین یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل خطر، پیش‌بینی جنبش‌های نیرومند زمین می‌باشد که توسط روابط موسوم به روابط کاهندگی به دست می‌آیند. مرکز مطالعات مهندسی زلزله (Peer) روابطی را تحت عنوان روابط کاهندگی NGA-West1 و NGA-West2 برای کل جهان ارائه نموده است. از آنجا که یک رابطه کاهندگی باید بتواند در برابر آزمون‌های آماری نظیر آزمون تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها که اخیراً توسط آذربخت و همکاران [۱] ارائه گردیده است، نتایج مطلوبی را در بر داشته باشد، بنابراین در این پژوهش سعی می‌شود ضرایب برخی روابط کاهندگی نسل جدید نظیر کمپبل و بزرگ‌نیا [۲]، آبراهامسون و سیلوا [۳] و رابطه بور و اتکینسون [۴] بر اساس مجموعه داده‌های منتشر شده توسط مرکز مطالعات مهندسی زلزله و بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک چند هدفه، برای بیشینه شتاب زمین، بهینه‌سازی شوند. نتایج بیانگر تطبیق خوب روابط به‌دست‌آمده در برابر سایر آزمون‌های آماری می‌باشد. انتظار می‌رود بتوان از نتایج حاصل از این پژوهش در تحلیل خطر احتمالاتی زلزله بهره گرفت.

**واژگان کلیدی:** تحلیل خطر لرزه‌ای، روابط کاهندگی نسل جدید، الگوریتم ژنتیک چند هدفه، تحلیل حساسیت، کاتالوگ لرزه‌ای.

## تعمیم نسل جدید روابط کاهندگی برای پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین با استفاده از روش تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها

علیرضا آذربخت (نویسنده مسئول)

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک،  
 a-azarbakht@araku.ac.ir

حامد زینلی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک

زینت رجبی

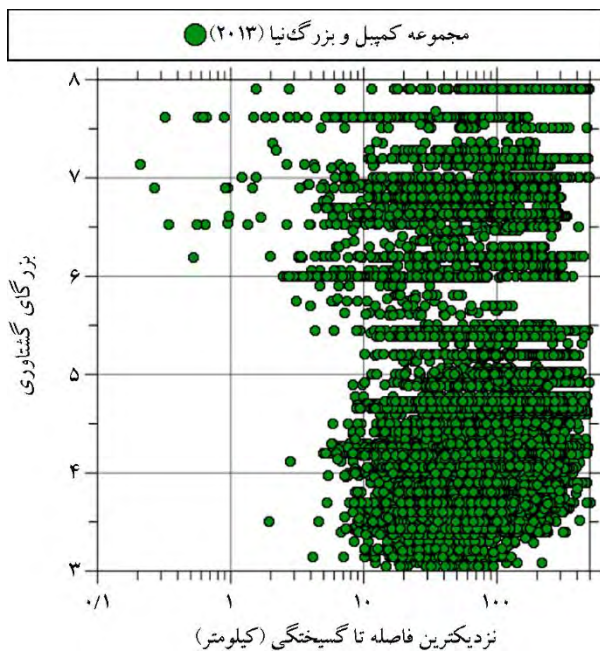
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک

### ۱- مقدمه

می‌باشد [۵]. تاکنون روابط کاهندگی متعددی برای مناطق مختلف جهان و حتی برای کل دنیا پیشنهاد شده است که بررسی عدم حساسیت روابط کاهندگی نسبت به تغییر اندازه مجموعه داده‌ها در اکثر این مدل‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. ایده اصلی در آن نهفته که در واقع صلاحیت استفاده از یک مدل کاهندگی نباید وابسته به اندازه مجموعه داده‌ها باشد؛ به‌بیان‌دیگر، اگر یک رابطه نسبت به یک تغییر کوچک در مجموعه داده‌ها به‌شدت حساسیت نشان دهد، بنابراین مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن غیرقابل اعتماد و عدم قطعیت در این مدل قابل توجه می‌شود [۶]. یکی از شاخص‌های آماری مهم در تعیین پایداری روابط کاهندگی در برابر تغییر اندازه داده‌ها؛ شاخص تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است در کنار شاخص آماری تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها، سایر آزمون‌های آماری به‌صورت هم‌زمان مورد استفاده قرار گیرد.

پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین به‌منظور استفاده در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه، به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های مورد نیاز جهت انجام تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای، پیش‌بینی جنبش‌های نیرومند زمین می‌باشد که توسط روابطی موسوم به روابط کاهندگی به دست می‌آیند؛ رابطه کاهندگی عبارت است از یک معادله ریاضی ولیکن تجربی که پارامترهای حرکت زمین را به‌صورت توابعی از بزرگای زمین، فاصله و سایر پارامترهای لرزه‌ای تخمین می‌زند.

در دهه‌های اخیر رشد کمی و کیفی روابط پیش‌بینی حرکت زمین از لحاظ ثبت رکوردیهای مختلف و بر اساس مجموعه داده‌های متفاوت برای نواحی مختلف جهان توسعه یافته است. علاوه بر این ثابت شده است انتخاب رابطه کاهندگی نسبت به سایر جنبه‌های لرزه‌ای در نتایج تحلیل خطر مؤثرتر



شکل (۱): توزیع بزرگا و فاصله شتاب‌نگاشت‌های به کار رفته در مطالعه [۲].

**گروه ۲:** روابط کاهندگی نسل جدید (NGA-West2)، توسعه یافته در سال ۲۰۱۴.

روابط کاهندگی نسل جدید که در سال ۲۰۰۸ توسعه یافته‌اند، شامل مدل‌های متعددی می‌باشند که عموماً برای نقاط مختلف جهان توسعه یافته و تنها قید استفاده از این روابط، فعالیت منطقه از نظر زمین‌ساختی و وقوع زلزله‌ها در قشر کم‌عمق زمین می‌باشد. در جهت توسعه این مدل‌ها، هر تیم توسعه‌دهنده به اطلاعات جامعی از مجموعه داده‌های مورد استفاده نیازمند بوده است که از جمله می‌توان به اطلاعات پیرامون پارامترهای منبع لرزه‌ای، فاصله منشأ رخداد تا محل، شرایط محلی ایستگاه ثبت شتاب‌نگاشت و موارد دیگر اشاره نمود. نسل اول مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین موسوم به NGA-West1 از ۳۵۵۱ رکورد ثبت شده از ۱۷۳ زلزله حاصل شده‌اند. از سال ۲۰۰۸ به بعد با توجه به ثبت رکوردهای متعدد توسط شتاب‌نگاشت‌های مختلف، مجموعه داده‌های موجود افزایش پیدا کرد. علاوه بر این وجود برخی محدودیت‌ها و کاستی‌ها در روابط نسل اول باعث شد محققین روابط پیشنهادی خود را بهبود بخشند و روابط کاهندگی نسل جدیدتری را منتشر نمایند که بتواند پاسخ‌گوی نیاز سایر نقاط جهان باشد. در ادامه توضیحات مختصری

از این رو در مطالعه حاضر، با انتخاب یک کاتالوگ لرزه‌ای معتبر که توسط مرکز مطالعات مهندسی زلزله پاسیفیک<sup>۱</sup> (PEER) [۷] منتشر شده است و با در نظر گرفتن شاخص تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها و شاخص LLH [۸] سعی می‌شود ضرایب برخی از روابط کاهندگی نسل جدید NGA-West2؛ برای حداکثر شتاب زمین توسط الگوریتم تکاملی ژنتیک به دست آیند. نتایج این مقاله می‌تواند در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- بانک اطلاعاتی زمین لرزه‌ها

تعداد کل داده‌های نسل جدید معادلات پیش‌بینی حرکت زمین، ۲۱۵۴۰ شتاب‌نگاشت می‌باشد. پس از اعمال محدودیت‌ها؛ مجموعه کمپیل و بزرگ‌نیا [۲] با ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت از ۳۱۹ رخداد که بین سال‌های ۱۹۴۱ تا ۲۰۱۱ گردآوری شده‌اند، جهت استخراج روابط کاهندگی مورد استفاده قرار گرفته است. در انتخاب این مجموعه از داده‌ها، شرایط چهارگانه‌ی زیر دخیل بوده است [۲].

- (الف) زلزله‌ها از نواحی پوسته‌ای لرزه‌ای فعال باشند؛
  - (ب) نگاشت‌ها باید در نزدیکی سطح زمین ثبت شده باشند؛
  - (ج) تعداد نگاشت کافی از هر زلزله موجود باشد تا امکان پیش‌بینی قابل اطمینان میانگین امکان‌پذیر باشد؛
  - (د) نگاشت‌ها باید دارای قابلیت اطمینان قابل قبولی باشند.
- لازم به ذکر است اطلاعات رخداد‌های مورد استفاده در این مطالعه به پیوست در پایان‌نامه زینلی [۹] موجود می‌باشد.

شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی توزیع مقادیر فاصله در برابر بزرگای گشتاوری ( $M_w$ ) ثبت شده مجموعه زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه است.

## ۳- مدل‌های کاهندگی زمین لرزه‌ای منتخب

با توجه به این که هدف اصلی در این مطالعه، بهینه‌سازی ضرایب برخی روابط نسل جدید می‌باشد؛ بنابراین بر مبنای این هدف، انتخاب مدل‌های کاهندگی منتخب مورد استفاده در این مطالعه از دو گروه اصلی زیر صورت می‌گیرد:

**گروه ۱:** روابط کاهندگی نسل جدید<sup>۲</sup> (NGA-West1)، توسعه یافته در سال ۲۰۰۸؛

و طیف پاسخ شتاب بر اساس میرایی ۵ درصد برای پروده‌های بین ۱۰-۰/۱ حاصل شده است. این رابطه برای رخدادهای با محدوده‌ی بزرگای ۳-۸/۵، معیار فاصله (R<sub>JB</sub>) کمتر از ۴۰۰ کیلومتر، و سرعت موج برشی بین ۱۵۰۰-۱۵۰ متر بر ثانیه معتبر می‌باشد.

**۶) مدل کمپبل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ (CB14) [۲]:** این رابطه کاهندگی برای تخمین PGA، PGV، و طیف پاسخ شتاب بر اساس میرایی ۵ درصد برای پروده‌های بین ۱۰-۰/۱ ثانیه می‌باشد. این رابطه برای رخدادهای با محدوده‌ی بزرگای ۳/۳-۸/۵ و معیار فاصله (R<sub>JB</sub>) کمتر از ۳۰۰ کیلومتر معتبر می‌باشد.

**۷) مدل چپو و یانگز ۲۰۱۴ (CY14) [۱۳]:** این رابطه کاهندگی به‌منظور پیش‌بینی PGA، PGV، و طیف پاسخ شتاب با میرایی ۵ درصد برای پروده‌های بین ۱۰-۰/۱ ثانیه، بر اساس زیرمجموعه‌ای از داده‌های NGA-WEST2 به دست آمده است. این رابطه برای رخدادهایی با محدوده‌ی بزرگای ۴-۸ و معیار فاصله (R<sub>JB</sub>) کمتر از ۲۰۰ کیلومتر معتبر می‌باشد.

**۸) مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ (AS14) [۱۴]:** مدل کاهندگی آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ از پیچیده‌ترین روابط NGA محسوب می‌شود و به‌منظور پیش‌بینی PGA، PGV، و طیف پاسخ شتاب با میرایی ۵ درصد در پروده‌های بین صفر تا ۱۰ ثانیه به دست آمده است. این رابطه برای رخدادهای با محدوده‌ی بزرگای ۳-۸/۵ و معیار فاصله (R<sub>JB</sub>) کمتر از ۳۰۰ کیلومتر معتبر می‌باشد. در جدول (۱)، اطلاعات روابط کاهندگی مورد استفاده در این مطالعه به همراه محدودیت‌های هر یک از آنها آورده شده است.

جدول (۱): جزئیات مربوط به مدل‌های کاهندگی مورد ارزیابی در مطالعه.

ردیف	رابطه کاهندگی	نام اختصاری	منطقه حاکم	معیار فاصله	بزرگای گشتاوری
۱	کمپبل و بزرگ‌نیا [۱۰]	CB08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۷/۵
۲	بور و اتکینسون [۴]	BA08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸
۳	چپو و یانگز [۱۱]	CY08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۸
۴	آبراهامسون و سیلوا [۳]	AS08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸/۵
۵	کمپبل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲]	CB14	جهانی	۰-۳۰۰	۳/۳-۸/۵
۶	بور و اتکینسون ۲۰۱۴ [۱۲]	BA14	جهانی	۰-۴۰۰	۳-۸/۵
۷	چپو و یانگز [۱۳]	CY14	جهانی	۰-۲۰۰	۴-۸
۸	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ [۱۴]	AS14	جهانی	۰-۳۰۰	۳-۸/۵

از مدل‌های NGA-West1 و NGA-West2 ارائه شده است.

**۱) مدل بور و اتکینسون ۲۰۰۸ (BA08) [۴]:** این رابطه یکی از روابط کاهندگی نسل جدید می‌باشد که با استفاده از زیرمجموعه‌ای از داده‌های NGA، شامل ۱۵۷۴ شتاب‌نگاشت از ۵۸ زمین‌لرزه و با هدف تخمین PGA، PGV، و طیف پاسخ شتاب بر اساس میرایی ۵ درصد برای دوره تناوب صفر تا ۱۰ ثانیه حاصل شده است.

**۲) مدل کمپبل و بزرگ‌نیا ۲۰۰۸ (CB08) [۱۰]:** این رابطه یکی دیگر از روابط کاهندگی نسل جدید می‌باشد که با استفاده از زیرمجموعه‌ای شامل ۱۶۶۱ شتاب‌نگاشت از ۶۴ زمین‌لرزه از داده‌های مرکز مطالعات مهندسی زلزله پاسیفیک [۷] با هدف تخمین PGA، PGV، PGD، و طیف پاسخ شتاب بر اساس میرایی ۵ درصد برای دوره تناوب صفر تا ۱۰ ثانیه حاصل شده است. این رابطه برای رخدادهای با محدوده‌ی بزرگای ۴ الی ۸/۵-۷/۵ (با توجه به نوع گسلش) و معیار فاصله صفر تا ۲۰۰ کیلومتر معتبر می‌باشد.

**۳) مدل چپو و یانگز ۲۰۰۸ (CY08) [۱۱]:** در این رابطه نسل جدید کاهندگی، داده‌ها به شتاب‌نگاشت‌های با طول گسیختگی زلزله برابر ۷۰ کیلومتر محدود شده است تا از خطاهای مربوط به نمونه داده‌های حرکت قوی کاسته شود. نتایج این اعمال محدودیت ۱۹۵۰ شتاب‌نگاشت مرتبط با ۱۲۵ زلزله بود. این مدل شامل بزرگای بهبود یافته و فاصله مقیاس شده و همچنین تأثیرات فرا دیواره می‌باشد. تأثیرات ساختگاه با توابع ساده سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V<sub>S30</sub>) و عمق رسوب بیان شده است. یک تفاوت اصلی در مجموعه داده این رابطه مربوط به پس‌لرزه‌هاست. مجموعه داده‌های این رابطه شامل پس‌لرزه‌ها بوده در نتیجه تعداد بسیار بزرگ‌تری از زلزله‌ها را نسبت به مجموعه داده‌های سایر روابط NGA داراست.

**۴) مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ (AS08) [۳]:** این مدل برای بزرگای ۵ تا ۸/۵، فاصله صفر تا ۲۰۰ و دوره تناوب صفر تا ۱۰ ثانیه کاربردی است و بر اساس زیرمجموعه‌ای از داده‌های NGA شامل ۲۷۵۴ شتاب‌نگاشت از ۱۳۵ زلزله به دست آمده است.

**۵) مدل بور و اتکینسون ۲۰۱۴ (BA14) [۱۲]:** رابطه کاهندگی بور و اتکینسون ۲۰۱۴، با استفاده از زیرمجموعه‌ای از داده‌های بروز شده NGA-west2، با هدف تخمین PGA، PGV،

$$\text{fitness Function}(M) = 0.7 * \quad (1)$$

$$\left[ \text{Median} \left( \sum_{i=1}^{Nd} |1 - PV^M| \right) \right] + [1 - PV^M]$$

$$\text{fitness Function}(R_{jb}) = 0.7 * \quad (2)$$

$$\left[ \text{Median} \left( \sum_{i=1}^{Nd} |1 - PV^{R_{jb}}| \right) \right] + [1 - PV^{R_{jb}}]$$

$$\text{fitness Function}(V_s) = 0.7 * \quad (3)$$

$$\left[ \text{Median} \left( \sum_{i=1}^{Nd} |1 - PV^{V_s}| \right) \right] + [1 - PV^{V_s}]$$

Nd: Number of random selected databases

PVparameter: P-value of residuals versus parameter.

M= Moment Magnitude

R= (Joyner\_Boore) Distance

Vs= Shear- wave velocity

لازم به ذکر است که مدل نهایی ارائه شده باید در برابر سایر شاخص‌های آماری که در بخش‌های آتی به آنها اشاره خواهد شد، عملکرد مناسبی داشته باشد. همچنین با توجه به اینکه شاخص تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها شرط کافی برای بیان یک مدل به‌عنوان مدل قابل اطمینان نیست، شاخص LLH نیز به‌عنوان تابع هدفی دیگر در نظر گرفته شده و مدل اولیه جهت بهینه‌سازی تحت این توابع هدف چندمنظوره در اختیار الگوریتم ژنتیک قرار می‌گیرد. بنابراین در کل چهار تابع هدف مد نظر می‌باشد.

$$\text{fitness Function}(LLH) = LLH \quad (4)$$

نظر به اینکه نتایج به‌دست آمده در الگوریتم ژنتیک چند هدفه تا حدودی به پارامترها و ورودی‌های الگوریتم مورد استفاده بستگی دارد، بنابراین در این پژوهش پس از سعی و خطای بسیار زیاد این نتیجه حاصل شد که پارامترهای موجود در جدول (۲) جهت بهینه‌سازی ضرایب مناسب می‌باشند. همچنین برای انتخاب نرخ جهش<sup>۴</sup> در الگوریتم ژنتیک چند هدفه از یک تابع گوسی<sup>۵</sup> که به‌طور پیش فرض در برنامه متلب تعبیه شده است بهره گرفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر برای مسائلی که نرخ جهش نامشخص است از یک تابع

#### ۴- بهینه‌سازی ضرایب برخی از روابط NGA-West2

با توجه به این موضوع که یک مدل کاهندگی نباید وابسته به تغییر در اندازه مجموعه داده‌ها باشد، بررسی عدم حساسیت روابط کاهندگی نسبت به تغییر در اندازه مجموعه داده‌های یک ساختگاه حائز اهمیت است. به‌عبارت‌دیگر، اگر یک مدل کاهندگی نسبت به تغییر در مجموعه داده‌ها، حتی اگر آن تغییر نسبتاً کوچک باشد، به‌شدت حساسیت نشان دهد، بنابراین مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن مدل غیرقابل اعتماد و عدم قطعیت در این مدل قابل توجه می‌باشد [۶]. توجه به این نکته ضروری است که در تمامی روش‌های آماری و ریاضیاتی ارائه شده تاکنون، حساسیت رابطه کاهندگی نسبت به تغییر در اندازه مجموعه داده‌های ساختگاه مورد توجه قرار نگرفته است. اخیراً آذربخت و همکاران [۱] رویکرد نوین تحلیل حساسیت در برابر بازنمونه‌گیری از داده‌ها<sup>۳</sup> (RSA) را جهت ارزیابی پایداری روابط کاهندگی بر اساس مجموعه داده‌های استفاده شده ارائه نموده‌اند. ایده اصلی این روش، بررسی میزان پایداری روابط کاهندگی با تکیه بر تعیین میزان انحراف بین باقی‌مانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای لرزه‌ای ورودی نظیر بزرگای گشتاوری و... می‌باشد [۱]. در روابط کاهندگی انتظار می‌رود با افزایش اندازه مجموعه داده‌ها، از میزان انحراف بین باقی‌مانده‌ها در روابط کاهش یابد. در واقع بر اساس روش تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها، مدلی مناسب خواهد بود که افزایش در اندازه مجموعه داده‌ها سبب کاهش انحراف باقی‌مانده‌ها شود یا به‌عبارت‌دیگر دارای روند صعودی باشد.

با توجه به مطالب فوق، در روابط کاهندگی NGA-West 1 و NGA-West 2 حساسیت مدل کاهندگی نسبت به تغییر در اندازه مجموعه داده‌های مورد نظر مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در این مطالعه سعی می‌شود با استفاده از رویکرد نوین تحلیل حساسیت در برابر برخی پارامترهای ورودی، به‌عنوان توابع هدف در الگوریتم ژنتیک چند هدفه، ضرایب برخی از مدل‌های نسل جدید NGA-West 2 برای پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین بهینه گردد. در زیر توابع هدف به کار گرفته شده در الگوریتم ژنتیک چند هدفه آورده شده است.

در ادامه ضرایب روابط کاهندگی کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴، آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ و مدل بور و اتکینسون ۲۰۱۴ ارائه می‌گردد.

گوسین با میانگین صفر برای هر والدین مشخص و انحراف معیاری که توسط پارامترهایی نظیر مقیاس<sup>۶</sup> تعیین می‌گردد، استفاده می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای منتخب در الگوریتم ژنتیک.

Number of total data	15493
Training data	12395
Testing Data	3098
Population Size	500
Generation	500
EliteCount	50
Crossover Fraction	0.7

#### ۴-۱- ضرایب بهینه رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴

در جدول (۳)، ضرایب بهینه شده جهت پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین بر اساس توابع هدف مذکور آورده شده است.

#### ۴-۲- ضرایب بهینه رابطه آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴

در جدول (۴)، ضرایب بهینه شده رابطه آبراهامسون سیلوا توسط الگوریتم ژنتیک چند هدفه به‌منظور پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین آورده شده است.

جدول (۳): ضرایب بهینه شده رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴.

CB2014	GA	ضرایب	CB2014	GA	ضرایب
-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۶	c20	-۴/۴۱۶	-۴/۴۲۹	c0
۰	۰	Dc20	۰/۹۸۴	۰/۹۳۲	c1
-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۲	dc20-ji	۰/۵۳۷	۰/۴۶۶	c2
۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	dc20-ch	-۱/۴۹۹	-۱/۳۸۹	c3
۰/۱۶۷	۰/۱۸۴	a2	-۰/۴۲۹	-۰/۵۲۹	c4
۰/۲۴۱	۰/۲۷۴	h1	-۲/۷۷۳	-۲/۷۲۲	c5
۱/۴۷۴	۱/۳۵۴	h2	-۰/۲۴۸	۰/۲۴۴	c6
-۰/۷۱۵	-۰/۷۶۲	h3	۶/۷۶۸	۶/۷۳۷	c7
۱	۱	h4	۰	۰	c8
-۰/۳۳۷	-۰/۳۱۷	h5	-۰/۲۱۲	-۰/۲۱۰	c9
-۰/۲۷	-۰/۲۵۶	h6	۰/۷۲	۰/۷۰۵	c10
۸۶۵	۸۶۵	k1	۱/۰۹	۰/۹۹۱	c11
-۱/۱۸۶	-۱/۳۰۲	k2	۲/۱۸۶	۱/۹۲۶	c12
۱/۸۳۹	۱/۴۱۵	k3	۱/۴۲	۱/۳۲۹	c13
۰/۷۳۴	۰/۷۱۲	f1	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۷	c14
۰/۴۹۲	۰/۵۱۴	f2	-۰/۲۰۲	-۰/۳۰۵	c15
۰/۴۰۹	۰/۴۶۶	t1	۰/۳۹۳	۰/۲۸۲	c16
۰/۳۲۲	۰/۳۵۰	t2	۰/۰۹۷۷	۰/۰۸۸	c17
۰/۳	۰/۳	Fln AF	۰/۰۳۳	۰/۰۴۰	c18
۱	۰/۸۸۶	rlnPGA-LNY	۰/۰۰۷۵۷	۰/۰۰۷	c19

### ۵- بررسی نتایج آزمون‌های آماری

در این بخش آزمون‌های ریاضیاتی و آماری مختلف جهت ارزیابی روابط کاهندگی ارائه شده در کنار روابط NGA-West 2 و NGA-West 1 معرفی می‌گردند و نتایج هریک از این آزمون‌ها بر اساس مجموعه داده‌های مورد مطالعه برای پارامتر بیشینه شتاب زمین در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است تمامی روش‌های آماری مبتنی بر تحلیلی به نام تحلیل باقیمانده‌ها می‌باشند؛ لذا در گام نخست تحلیل باقیمانده‌ها توضیح داده می‌شود.

#### ۵-۱- تحلیل باقیمانده‌ها

یک رابطه کاهندگی زمانی می‌تواند رخدادها را به خوبی پیش‌بینی نماید که اختلاف مقدار پیش‌بینی شده و مقدار مشاهده شده کمترین مقدار ممکن باشد. بنابراین لزوم و اهمیت تحلیلی که تحت عنوان تحلیل باقیمانده‌ها مطرح می‌گردد، بیش‌ازپیش احساس می‌گردد. از آنجا که مدل‌های پیش‌بینی زمین‌لرزه معمولاً برحسب مقادیر لگاریتمی بیان می‌شوند، باقیمانده به صورت تفاضل لگاریتم مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کاهندگی از لگاریتم مقادیر مشاهده شده در طبیعت، مطابق رابطه (۵) تعریف می‌شود [۱۵].

$$r_{ij} = \ln Y_{ij} - \ln \hat{Y}_{ij} = \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

که در آن  $\ln Y_{ij}$  مقدار لگاریتم طبیعی ژامین رکورد از آمین زلزله مشاهده شده،  $\ln \hat{Y}_{ij}$  مقدار لگاریتم طبیعی ژامین رکورد از آمین زلزله پیش‌بینی شده،  $\eta_i$  و  $\varepsilon_{ij}$  به ترتیب مربوط به باقیمانده‌های درون‌رخدادی و باقیمانده‌های فرارخدادی هستند، که  $\eta_i$  و  $\varepsilon_{ij}$  از هم مستقل و دارای توزیع نرمال با انحراف معیار به ترتیب  $\sigma^2$  و  $\sigma^2$  می‌باشند و به صورت روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند [۱۵].

$$r_i^{[inter]} = \eta_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

$$r_{ij}^{[intra]} = \varepsilon_{ij} = r_{ij} - \eta_i \quad (7)$$

در واقع باقیمانده فرارخدادی از تفاضل باقیمانده کل از باقیمانده درون‌رخدادی به دست می‌آید. با معرفی تحلیل باقیمانده‌ها نوبت به بررسی روابط بر اساس آزمون‌های آماری و ریاضیاتی می‌رسد.

جدول (۴): ضرایب بهینه شده رابطه آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴.

ضرایب	GA	ASK2014	ضرایب	GA	ASK2014
vlin	۶۶۰	۶۶۰	a44	۰/۰۵	۰/۰۵
b	-۱/۵۲۰	-۱/۴۷	a45	۰	۰
n	۱/۵	۱/۵	a46	-۰/۰۵	-۰/۰۵
M1	۶/۷۵	۶/۷۵	a25	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۲
c	۲/۴	۲/۴	a28	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳
c4	۴/۵	۴/۵	a29	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۳
a1	۰/۶۳۷	۰/۵۸۷	a31	-۰/۱۰۳	-۰/۱۵۰
a2	-۰/۷۹	-۰/۷۹	a36	۰/۳۰۶	۰/۲۶۵
a3	۰/۲۷۵	۰/۲۷۵	a37	۰/۴۳۹	۰/۳۳۷
a4	-۰/۱	-۰/۱	a38	۰/۲۰۲	۰/۱۸۸
a5	-۰/۴۱	-۰/۴۱	a39	۰	۰
a6	۲/۲۸۸	۲/۱۵۴	a40	۰/۰۹۴	۰/۰۸۸
a7	۰	۰	a41	-۰/۱۸۳	-۰/۱۹۶
a8	-۰/۰۲۳	-۰/۰۱۵	a42	۰/۰۵۱	۰/۰۴۴
a10	۱/۷۲۱	۱/۷۳۵	s1	۰/۶۶۶	۰/۷۵۴
a11	۰	۰	s2	۰/۵۳۹	۰/۵۲
a12	-۰/۱	-۰/۱	s3	۰/۵۰۲	۰/۴۷
a13	۰/۶	۰/۶	s4	۰/۳۷۹	۰/۳۶
a14	-۰/۳	-۰/۳	s1-m	۰/۷۲۸	۰/۷۴۱
a15	۱/۱	۱/۱	s2-m	۰/۵۴۱	۰/۵۰۱
a17	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۷	s5-jp	۰/۵۵۲	۰/۵۴
a43	۰/۱	۰/۱	s6-jp	۰/۶۲۴	۰/۶۳

### ۴-۳- ضرایب بهینه رابطه بور و اتکینسون ۲۰۱۴

در جدول (۵)، ضرایب بهینه شده مدل بور و اتکینسون ۲۰۱۴

برای پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین آورده شده است.

جدول (۵): ضرایب بهینه شده رابطه بور و اتکینسون ۲۰۱۴.

ضرایب	GA	BA2014	ضرایب	GA	BA2014
mh	۵/۵	۵/۵	c	-۰/۵۷۷	-۰/۶
e0	۰/۴۹۷	۰/۴۴۷	vc	۱۵۰۰	۱۵۰۰
e1	۰/۴۴۱	۰/۴۸۶	f4	-۰/۲۴۷	-۰/۱۵
e2	۰/۴۸۲	۰/۲۴۶	f5	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷
e3	۰/۳۱۲	۰/۴۵۴	f6	-۹/۹	-۹/۹
e4	۱/۴۴۶	۱/۴۳۱	f7	-۹/۹	-۹/۹
e5	۰/۰۶۸	۰/۰۵۱	tau1	۰/۵۵۸	۰/۳۹۸
e6	-۰/۱۱۸	-۰/۱۶۶	tau2	۰/۴۷۴	۰/۳۴۸
c1	-۱/۱۰۷	-۰/۱۳۴	phi1	۰/۶۳۵	۰/۶۹۵
c2	۰/۱۹۹	۰/۱۹۲	phi2	۰/۴۹۲	۰/۴۹۵
c3	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۸	dphir	۰/۱۲۹	۰/۱
h	۴/۳۷۶	۴/۵	dphiv	۰/۰۵۸	۰/۰۷
deltac3-g	۰	۰	R1	۱۱۰	۱۱۰
deltac3-c	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	R2	۲۷۰	۲۷۰
deltac3-i	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۳			

## ۵-۲- آزمون‌های معیار سنجش خطا

معیارهای سنجش خطا، شاخص‌هایی هستند که جهت بررسی میزان صحت پیش‌بینی رابطه کاهندگی استفاده می‌شوند و هر چه مقادیر این شاخص‌ها کمتر باشند بیانگر پیش‌بینی دقیق‌تر مدل می‌باشند [۱۶]. در این پژوهش از دو معیار خطای ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا استفاده شده است. مقادیر این خطاها با استفاده از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آیند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum N(X_{obs} - X_{pre})^2}{N}} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum N|X_{obs} - X_{pre}|}{N} \quad (9)$$

که  $X_{pre}$  و  $X_{obs}$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر ثبت شده رخداد طبیعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کاهندگی می‌باشند. همچنین  $N$  بیانگر تعداد نمونه‌هاست. در جدول (۶)، نتایج آزمون‌های RMSE و MAE برای روابط کاهندگی متعدد نشان داده شده است.

جدول (۶): نتایج سنجش معیارهای خطا برای پارامتر PGA برای مجموعه هشت تایی از روابط کاهندگی NGA و روابط بهینه شده با مجموعه ۱۵۴۹۳ تایی از داده‌ها.

MAE			RMSE			رابطه
$r_{ij}^{[intra]}$	$r_{ij}^{[inter]}$	$r_{ij}$	$r_{ij}^{[intra]}$	$r_{ij}^{[inter]}$	$r_{ij}$	
۰/۵۳۶	۰/۳۱۹	۰/۶۲۱	۰/۶۸۴	۰/۳۹۴	۰/۷۸۹	CB-GA
۰/۵۳	۰/۳۵۳	۰/۶۴۰	۰/۶۷۸	۰/۴۴۲	۰/۸۰۹	AS-GA
۰/۵۲۳	۰/۳۶۸	۰/۶۴۶	۰/۶۸۱	۰/۴۵۵	۰/۸۱۹	BAGA
۰/۵۵	۰/۹۳	۱/۰۷	۰/۷۱	۱/۱۲	۱/۳۲	BSSA08
۰/۴۷	۱/۲۷	۱/۳۹	۰/۸۴	۱/۴۸	۱/۷۰	CB08
۰/۵۵	۱/۰۷	۱/۱۸	۰/۷۰	۱/۲۶	۱/۴۴	ASK08
۰/۵۵	۰/۴۰	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۴۹	۰/۸۶	CY08
۰/۵	۰/۳۹	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۴۷	۰/۷۹	BSSA14
۰/۵۴	۰/۳۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۴۱	۰/۸	CB14
۰/۵۵	۰/۳۴	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۴۳	۰/۸۴	ASK14
۰/۵۳	۰/۳۵	۰/۶۴	۰/۶۸	۰/۴۴	۰/۸۲	CY14

با توجه به جدول (۶)، روابط بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک در کنار سایر روابط مورد مقایسه در این مطالعه نتایج قابل

قبولی را در برابر آزمون‌های سنجش معیار خطا از خود نشان می‌دهند و حتی می‌توان بیان نمود روابط ارائه شده نسبت به سایر مدل‌ها نتایج نسبتاً بهتری را دارا می‌باشند.

## ۵-۳- آزمون‌های بررسی کیفیت توزیع باقیمانده‌ها

به‌طور ایده‌آل، توزیع باقیمانده‌ها دارای میانگین صفر و انحراف معیار واحد می‌باشد [۱۷]. به‌منظور بررسی میزان هم‌خوانی توزیع باقیمانده‌های روابط منتخب در این مطالعه نسبت به توزیع ایده‌آل آزمون‌های فرض آماری  $Z$ ، Lilliefors و واریانس<sup>۷</sup> استفاده شده است. در جدول (۷)، نتایج حاصل از سه آزمون آماری (Z-test, Lili-test, and var-test) برای توزیع باقیمانده‌های هشت مجموعه مدل‌های حرکت زمین منتخب به همراه روابط حاصل از GA برای پارامتر PGA نشان داده شده است. در این جدول پارامتر H تعیین‌کننده پذیرش و یا رد فرض تهی می‌باشد؛ به عبارت دیگر در صورتی که H برابر صفر باشد فرض تهی در سطح معنی‌داری ۵ درصد صحیح و در صورتی که H برابر یک باشد فرض تهی در سطح معنی‌داری ۵ درصد غیر صحیح می‌باشد [۱۸].

جدول (۷): نتایج آزمون‌های فرض آماری برای پارامتر PGA برای مجموعه هشت تایی از روابط کاهندگی NGA و روابط بهینه شده با مجموعه ۱۵۴۹۳ تایی از داده‌ها.

Var-test		Lili-test		Z-test		مدل
P	H	P	H	p**	H*	
۰	۱	۰	۱	۱/۰۶۵E-۱۲	۱	CB - GA
۲/۳۹۹E-۲۶۹	۱	۰/۰۰۵۲	۱	۱/۲۵۹E-۹	۱	ASK - GA
۲/۸۳۸E-۲۳۸	۱	۰	۱	۰/۱۲۷	۰	BA - GA
۳/۶۲۲E-۰۹	۱	۰	۱	۰	۱	BSSA08
۰	۱	۰	۱	۰	۱	CB08
۴/۰۲۶E-۰۴	۱	۰	۱	۰	۱	ASK08
۲/۹۶E-۱۶۸	۱	۰	۱	۴/۶۹۹E-۹۱	۱	CY08
۷/۹E-۳۲۳	۱	۰/۴۰	۰	۱/۶۵E-۱۱	۱	BSSA14
۴/۸۹E-۲۸۹	۱	۰	۱	۱/۰۱E-۰۸	۱	CB14
۱/۴۳E-۲۱۵	۱	۰	۱	۴/۴۵E-۵۹	۱	ASK14
۱/۷۰۶E-۲۵۰	۱	۰/۰۰۲۱	۱	۱/۵۱۸E-۰۹	۱	CY14

\* پارامتر H تعیین‌کننده پذیرش و یا رد فرض تهی در سطح معنی‌داری ۵ درصد می‌باشد.  
\*\* پی - مقدار حاصل از این آزمون‌ها نشان‌دهنده‌ی پذیرفتن و یا رد این فرض می‌باشد.

انحراف معیار طیف پاسخ تخمینی توسط مدل کاهندگی می‌باشد.

$$Z_0 = \frac{\log(SA_{obs}) - \log(SA_{pre})}{\sigma_{SA}} \quad (11)$$

شربام و همکاران [۱۸] با استفاده از توزیع LH و ترکیب آن با چند معیار ساده، یک روش برای ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های مختلف حرکت زمین ارائه نموده‌اند. بر این اساس روابط کاهندگی در چهار گروه زیر قرار می‌گیرند.

- مدل‌هایی که مقدار میانه LH حداقل ۰/۲، همچنین مقدار قدر مطلق میانه و متوسط باقی‌مانده‌های نرمال شده کمتر از ۰/۷۵ و انحراف نمونه نرمال شده آن کمتر از ۱/۵ باشد، در پایین‌ترین سطح قابلیت پذیرش، گروه C قرار می‌گیرند.

- مدل‌هایی که مقدار میانه LH حداقل ۰/۳، همچنین مقدار قدر مطلق میانه و متوسط باقی‌مانده‌های نرمال شده کمتر از ۰/۵ و انحراف نمونه نرمال شده آن کمتر از ۱/۲۵ باشد، در سطح قابلیت پذیرش متوسط، گروه B رتبه‌بندی می‌شوند.

- مدل‌هایی که مقدار میانه LH حداقل ۰/۴، همچنین مقدار قدر مطلق میانه و متوسط باقی‌مانده‌های نرمال شده کمتر از ۰/۲۵ و انحراف نمونه نرمال شده آن کمتر از ۱/۱۲۵ باشد، در بالاترین سطح قابلیت پذیرش، گروه A قرار می‌گیرند.

- مدل‌هایی که در هیچ‌یک از این گروه‌ها قرار نگیرند، به عنوان مدل غیر قابل قبول، گروه D تلقی می‌شوند.

در جدول (۸)، نتایج رتبه‌بندی مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش بر اساس روش LH برای بیشینه شتاب زمین آورده شده است.

بر اساس جدول فوق، فرضیه صفر را می‌توان برای اکثر مدل‌های ارائه شده رد کرد. در این جداول، ارتباط کاملی بین نتایج سه آزمون به‌کاربرده شده برای همه مدل‌ها وجود ندارد. به‌عنوان مثال، با توجه به آزمون  $Z_0$  بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی مدل بور و آتکینسون ۲۰۱۴ تفاوت معناداری وجود دارد. درحالی‌که مقدار P-value مناسبی را برای آزمون Lilleifors شامل می‌شود. برعکس، بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی مدل بور و اتکینسون بهینه شده در آزمون Lilleifors تفاوت معناداری وجود دارد، درحالی‌که مقدار P-value نسبتاً بهتری را در مقایسه با سایر روابط شامل می‌شود. این اعداد به‌صورت برجسته در جدول (۷) مشخص شده‌اند.

#### ۴-۵- روش مبتنی بر درست‌نمایی LH

روش LH بر اساس درست‌نمایی، باقیمانده‌های نرمال شده برای یک مجموعه از داده‌های مشاهداتی و تخمینی حرکت زمین را محاسبه می‌کند [۱۸]. برای انتخاب مدل‌های کاهندگی منتخب، از شاخص LH یا همان مقدار میانه LH استفاده می‌گردد که این مقدار بین صفر تا یک می‌باشد. به‌بیان‌دیگر، نمونه‌ای از لحاظ این شاخص مناسب است که دارای توزیع کاملاً یکنواخت با مقدار میانه ۰/۵ باشد. روش LH را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۰) بیان نمود.

$$LH(|Z_0|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{|Z_0|}{\sqrt{2}}}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (10)$$

در این رابطه،  $Z_0$  مجموعه باقیمانده‌های نرمال شده می‌باشد که مقدار آن به‌صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $SA_{obs}$  مقدار مشاهداتی طیف پاسخ شتاب،  $SA_{pre}$  و  $\sigma_{SA}$  به‌ترتیب میانگین و

جدول (۸): نتایج سنجش معیار LH برای پارامتر PGA برای مجموعه هشت تایی از روابط کاهندگی NGA و روابط بهینه شده با مجموعه ۱۵۴۹۳ تایی از داده‌ها.

Model	$\sigma$	STDNR	$\sigma$	MEANNR	$\sigma$	MEDNR	$\sigma$	MEDLH	Rank
CB-GA	۰/۰۱	۱/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۵۰	A
AS-GA	۰/۰۱	۱/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۴۹	A
BA-GA	۰/۰۱	۱/۰۱	۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۵۰	A
BSSA08	۰/۰۱	۱/۸۳	۰/۰۱	-۱/۴۷	۰/۰۲	-۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۱۱	D
CB08	۰/۰۱	۲/۲۰	۰/۰۲	-۲/۳۹	۰/۰۳	-۲/۳۸	۰/۰۰	۰/۱۶	D
ASK08	۰/۰۱	۱/۴۴	۰/۰۱	-۱/۴۱	۰/۰۱	-۱/۴۵	۰/۰۰	۰/۱۳	D
CY08	۰/۰۱	۱/۳۳	۰/۰۱	-۰/۲۵	۰/۰۲	-۰/۲۴	۰/۰۰	۰/۳۷	C
BSSA14	۰/۰۱	۱/۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۴۹	A
CB14	۰/۰۱	۱/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۴۷	A
ASK14	۰/۰۱	۱/۰۳	۰/۰۱	-۰/۰۹	۰/۰۱	-۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۹	A
CY14	۰/۰۱	۱/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	-۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۴۵	B



جدول (۹): نتایج سنجش معیار LLH برای پارامتر PGA برای مجموعه هشت تایی از روابط کاهندگی NGA و روابط بهینه شده با مجموعه ۱۵۴۹۳ تایی از داده‌ها.

رابطه	LLH	رابطه	LLH
CB-GA	۱/۶۸	CY08	۱/۹۸
ASK-GA	۱/۷۳	BSSA14	۱/۷۷
BA-GA	۱/۷۴	CB14	۱/۷۲
BSSA08	۴/۴۹	ASK14	۱/۷۶
CB08	۷/۹۹	CY14	۱/۷۸
ASK08	۳/۶۹		

#### ۵-۶- بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها

میزان انحراف باقیمانده‌های یک مدل کاهندگی برای استفاده در یک ساختگاه باید در برابر پارامترهای لرزه‌ای متفاوت مانند بزرگا، فاصله و یا سرعت موج برشی در حد مطلوبی باشد. جهت معنی دار نمودن و بررسی نتایج حاصل از میزان انحراف باقیمانده‌ها آزمون فرض آماری تعریف می‌شود و از پی-مقدار این آزمون جهت تفسیر نتایج استفاده شده است. فرض تھی در این آزمون، در نظر گرفتن شیب و عرض از مبدأ خط حاصل از رگرسیون‌گیری خطی بر مجموعه داده‌ها (باقیمانده‌ها) برابر صفر تعریف می‌شود. هر اندازه پی-مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل کاهندگی از انحراف کمتری برخوردار بوده و رابطه دقت بالاتری را دارا می‌باشد. پی-مقدارها برای دو پارامتر شیب و عرض از مبدأ محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است پارامتر دیگری که در بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها تعریف می‌گردد، میزان میانگین باقیمانده‌ها می‌باشد. بنابراین میزان انحراف باقیمانده‌ها این امکان را می‌دهد که بتوان مشخص نمود مدل کاهندگی تا چه میزان دست بالا و یا دست پایین پیش‌بینی می‌نماید. هر اندازه میزان میانگین باقیمانده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، رابطه از دقت بیشتری در پیش‌بینی برخوردار خواهد بود. در نهایت با در نظر گرفتن سه مقدار  $P_a$ ،  $P_b$  و میانگین باقیمانده‌ها روابط با کمترین انحراف مشخص خواهند شد.

در شکل‌های (۲) تا (۴) میزان انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ای مختلف برای مدل‌های بهینه‌سازی شده نشان داده شده است. مقادیر پی-مقدار و میانگین باقیمانده‌ها نیز در جدول (۱۰) آورده شده است. در این جدول  $P_b$  نشان‌دهنده پی-مقدار شیب و  $P_a$  نشان‌دهنده پی-مقدار عرض از مبدأ خط برازش شده بر روی باقیمانده‌ها می‌باشند.

با مشاهده نتایج موجود در جدول و رده‌بندی اختصاص داده شده به هر رابطه کاهندگی، می‌توان به این نتیجه رسید که روابط بهینه شده به همراه روابط ۲۰۱۴، از نظر شاخص LH در رتبه خوبی قرار گرفته‌اند.

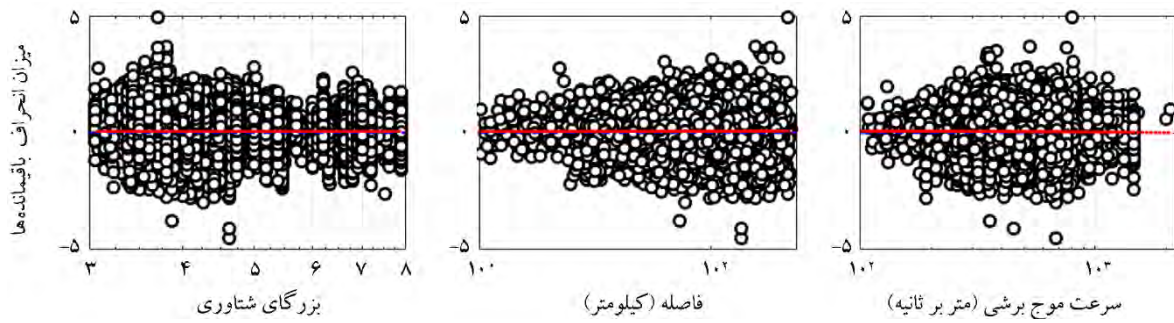
#### ۵-۵- روش نظری- اطلاعاتی LLH

این روش توسط شرابام و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ به عنوان یک روش نظری-اطلاعاتی در انتخاب مدل‌ها بر پایه روش حداکثر درست‌نمایی مطرح شده است. این روش به دنبال یافتن یک مقیاس معنی‌دار فاصله بین مدل‌های احتمالاتی می‌باشد و فاصله بین دو تابع چگالی احتمال پیوسته  $f(x)$  و  $g(x)$  را اندازه می‌گیرد. توزیع نقطه داده برآورد شده توسط  $g(x)$  با فرض لوگ-نرمال با میانه و انحراف معیار استاندارد رابطه کاهندگی در نظر گرفته می‌شود. تابع  $f(x)$  نشان‌دهنده توزیع یک نقطه داده مشاهداتی در مجموعه داده‌های حرکت زمین می‌باشد. توزیع تابع  $f(x)$  مشخص نیست اما به طور تصادفی  $N$  بار نمونه از آن انتخاب می‌شود و فرض بر این است که لوگ-نرمال با همان مشخصات تابع  $g(x)$  می‌باشد. در نهایت معیار LLH، توسط رابطه (۱۲) به عنوان معیار رتبه‌بندی در چارچوب نظری-اطلاعاتی استفاده می‌شود.

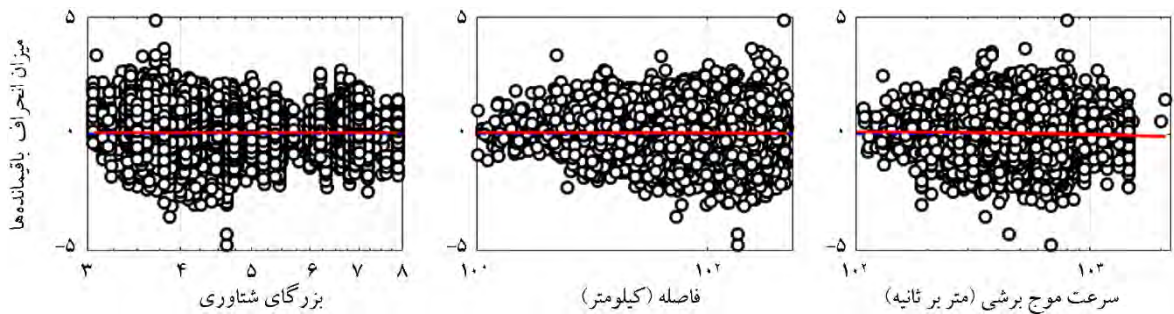
$$LLH: = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2 (g(x_i)) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)،  $x_i$  داده‌های مشاهداتی را برای  $i = 1, 2, \dots, N$  بیان می‌نماید. پارامتر  $N$  نیز تعداد کل داده‌ها می‌باشد. هر اندازه مقدار LLH کمتر باشد، نشان‌دهنده تناسب بیشتر رابطه بر روی مجموعه داده‌های مورد استفاده می‌باشد.

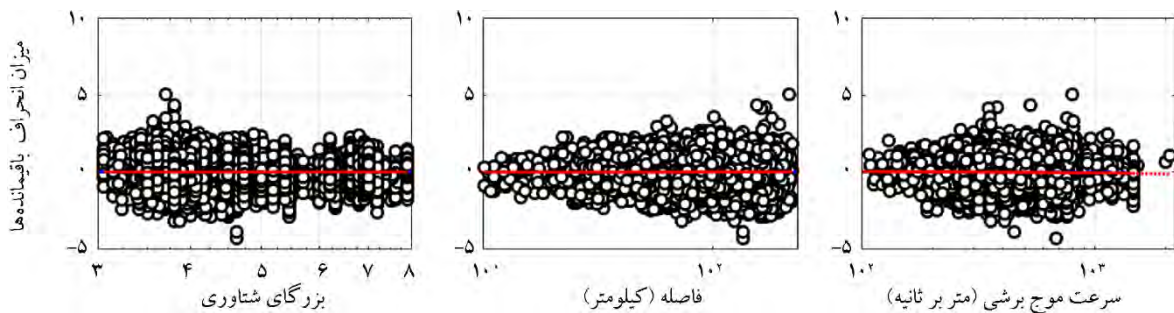
همان‌گونه که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، روابط حاصل از الگوریتم ژنتیک نتایج خوبی را در برابر شاخص LLH از خود نشان می‌دهند. البته در کنار این روابط، روابط ۲۰۱۴ به همراه رابطه چپو و یانگز ۲۰۰۸ [۱۳] نیز نتایج قابل قبولی را در برابر شاخص‌های ذکر شده به نمایش می‌گذارند.



شکل (۲): توزیع باقیمانده‌های مدل CB 2014-GA برای پارامتر PGA (خط کامل، خط برازش داده شده بر روی باقیمانده‌ها در مقابل پارامترهای ورودی مختلف می‌باشد و خط چین، خط  $y=0$ ، خط ایده‌آل برازش داده شده بر روی باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد).



شکل (۳): توزیع باقیمانده‌های مدل ASK 2014-GA برای پارامتر PGA (خط کامل، خط برازش داده شده بر روی باقیمانده‌ها در مقابل پارامترهای ورودی مختلف می‌باشد و خط چین، خط  $y=0$ ، خط ایده‌آل برازش داده شده بر روی باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد).



شکل (۴): توزیع باقیمانده‌های مدل BA 2014-GA برای پارامتر PGA (خط کامل، خط برازش داده شده بر روی باقیمانده‌ها در مقابل پارامترهای ورودی مختلف می‌باشد و خط چین، خط  $y=0$ ، خط ایده‌آل برازش داده شده بر روی باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد).

جدول (۱۰): نتایج بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها برای پیشینه شتاب زمین.

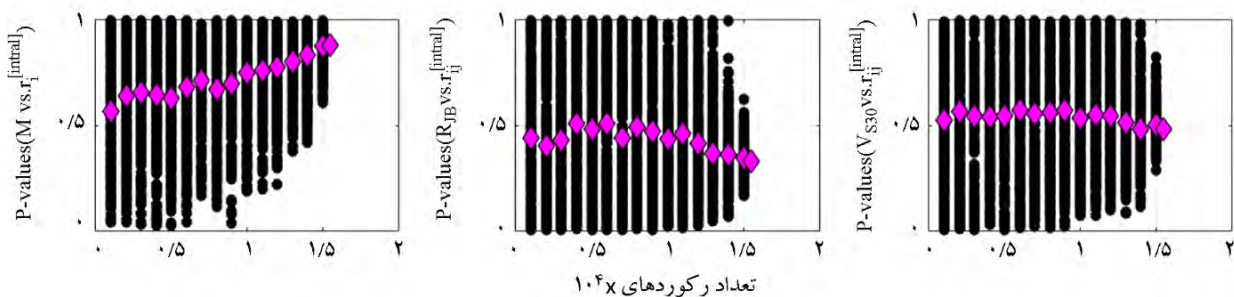
P-values						Mean of Residuals	رابطه
$V_{S30} v.s. \Gamma_{ij}^{[intra]}$		$R v.s. \Gamma_{ij}^{[intra]}$		$M_w v.s. \Gamma_{ij}^{[inter]}$			
$P_a$	$P_b$	$P_a$	$P_b$	$P_a$	$P_b$		
۰/۶۸	۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۸۸	۰/۰۵۷	CB-GA
۰/۶۸	۰/۶۰	۰/۶۸	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۹۹	۰/۰۴۹	ASK-GA
۰/۶۸	۰/۹۸	۰/۶۸	۰/۹۱	۰/۴۶	۰/۸۶	-۰/۰۱۲	BA-GA
۰/۷۱	.	۰/۷۱	.	۰/۵۱	.	-۰/۸۳۱	BSSA08
۰/۸۳	.	۰/۷۵	.	۰/۵۸	.	-۱/۲۵	CB08
۰/۷۰	.	۰/۷۰	.	۰/۴۷	.	-۱/۰۲۲	ASK08
۰/۷۰	۰/۰۰۲	۰/۷۰	.	۰/۴۷	.	-۰/۱۶۳	CY08
۰/۶۸	۰/۰۴	۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۴۷	.	۰/۰۰۴	BSSA14
۰/۶۸۵	۰/۰۰	۰/۶۹	۰/۳۲۷	۰/۴۰۸	۰/۰۰	۰/۰۴۶	CB14
۰/۶۸	.	۰/۶۸	.	۰/۴۴	.	-۰/۰۸۳	ASK14
۰/۶۸	۰/۲۳	۰/۶۸	.	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۰۳۵	CY14

داده‌ها باشد، بررسی عدم حساسیت و پایداری روابط کاهندگی نسبت به تغییر در اندازه مجموعه داده‌های مورد مطالعه به‌عنوان معیاری جدید جهت بررسی و بهبود پایداری روابط کاهندگی، مورد مطالعه واقع شده است و نهایتاً به‌عنوان توابع هدف ذکر شده در بخش ۴ در اختیار الگوریتم ژنتیک چند هدفه قرار داده شده است. با استفاده از این رویکرد جدید می‌توان روابط پایدار برای داده‌های مورد مطالعه جهت پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین را ایجاد نمود. شکل‌های (۵) تا (۱۰) تحلیل حساسیت مدل‌های بهینه شده کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ (CB14)، آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ (AS14) و بور و اتکینسون ۲۰۱۴ (BSSA14) را در کنار روابط اصلی با استفاده از بازنمونه‌گیری یک هزار مجموعه داده که به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب شده‌اند را نشان می‌دهد. این بازنمونه‌گیری بر روی تعداد شتاب‌نگاشت‌های {کل مجموعه داده‌ها، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ...} مشروط بر عدم تکرار شتاب‌نگاشت‌ها صورت گرفته است. باز نمونه‌گیری بر روی میزان انحراف باقیمانده‌های روابط کاهندگی در برابر پارامترهای بزرگ‌نیا گشتاوری، فاصله و سرعت موج

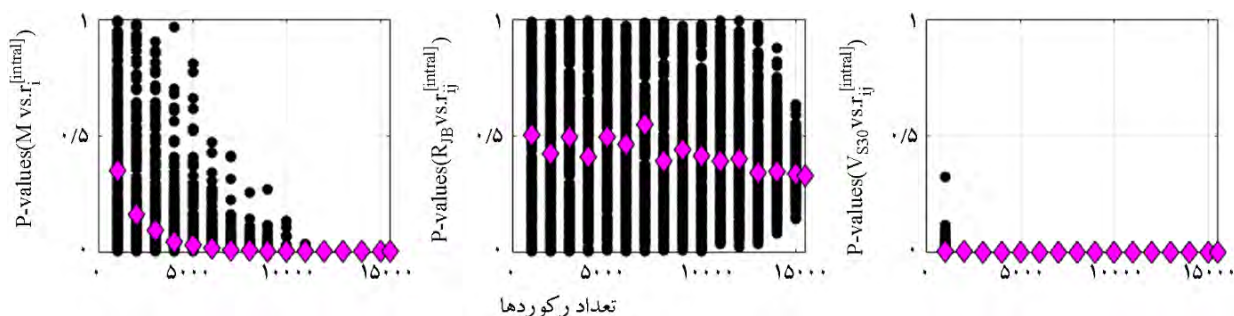
با توجه به این موضوع که مدل کاهندگی مناسب باید در برابر پارامترهای لرزه‌ای مختلف انحراف باقیمانده کمی را دارا باشد، مشاهده می‌گردد روابط بهینه شده نسبت به سایر روابط مورد مقایسه در این مطالعه دارای پی‌مقدار مناسب و نزدیک به ۱ می‌باشند. این در حالی است که P-value سایر روابط در اکثر پارامترها نزدیک به صفر است. همچنین میانگین باقیمانده‌های روابط حاصل از الگوریتم ژنتیک به همراه روابط کاهندگی ۲۰۱۴ به صفر خیلی نزدیک هستند، لذا دقت خوبی در پیش‌بینی حداکثر شتاب زمین دارا می‌باشند. همچنین مدل CY14 با وجود میزان انحراف قابل قبول در برابر معیار بزرگ‌نیا گشتاوری و سرعت موج برشی، در برابر فاصله شدت انحراف نشان می‌دهد از این رو مدل مناسبی با توجه به داده‌های مورد بررسی محسوب نمی‌شود.

#### ۵-۷- پایداری روابط کاهندگی

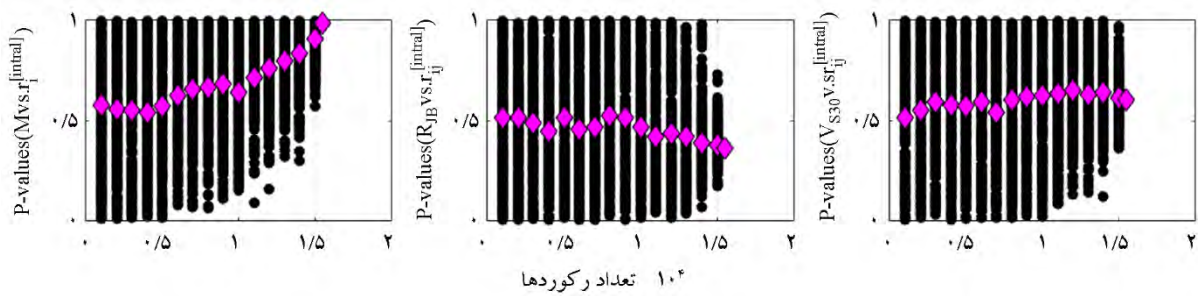
با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۴، از آنجا که صلاحیت استفاده از یک مدل کاهندگی نباید وابسته به اندازه مجموعه



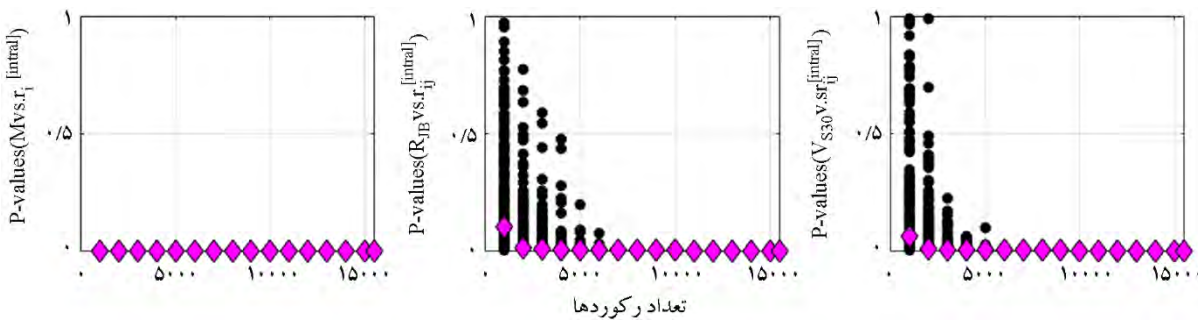
شکل (۵): تحلیل حساسیت مدل کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ بهینه شده بر اساس مجموعه داده‌های NGA شامل ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت.



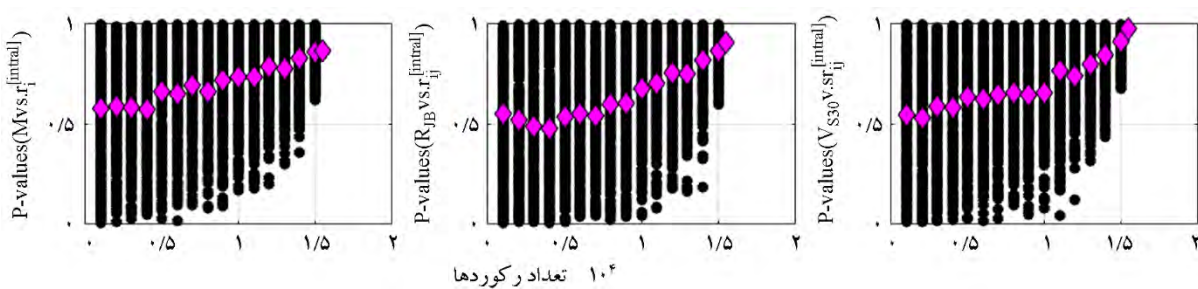
شکل (۶): تحلیل حساسیت مدل کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ بر اساس مجموعه داده‌های NGA شامل ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت.



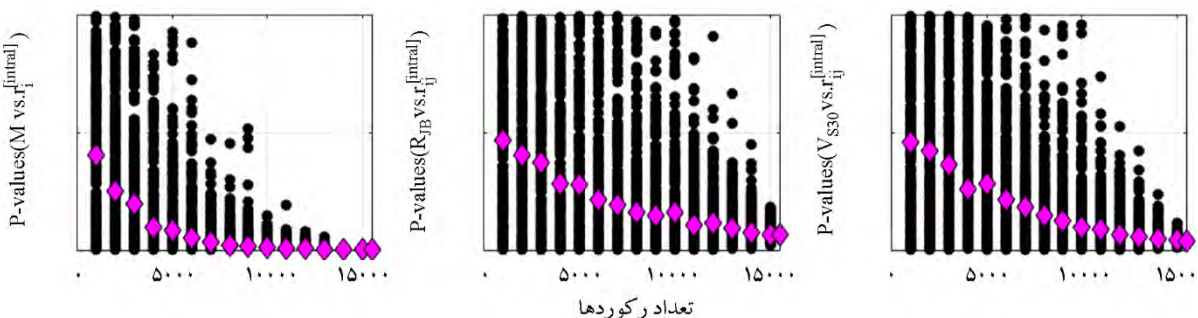
شکل (۷): تحلیل حساسیت مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ بهینه شده بر اساس مجموعه داده‌های NGA شامل ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت.



شکل (۸): تحلیل حساسیت مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ [۱۴] بر اساس مجموعه داده‌های NGA شامل ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت.



شکل (۹): تحلیل حساسیت مدل بور و اتکینسون ۲۰۱۴ بهینه شده بر اساس مجموعه داده‌های NGA شامل ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت.



شکل (۱۰): تحلیل حساسیت مدل بور و اتکینسون ۲۰۱۴ [۱۲] بر اساس مجموعه داده‌های NGA شامل ۱۵۴۹۳ شتاب‌نگاشت.

پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین در برابر مجموعه داده‌های مورد مطالعه حساسیت نشان می‌دهد؛ این در حالی است که مدل بهینه

برشی و صورت گرفته است. با مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که مدل کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲] جهت

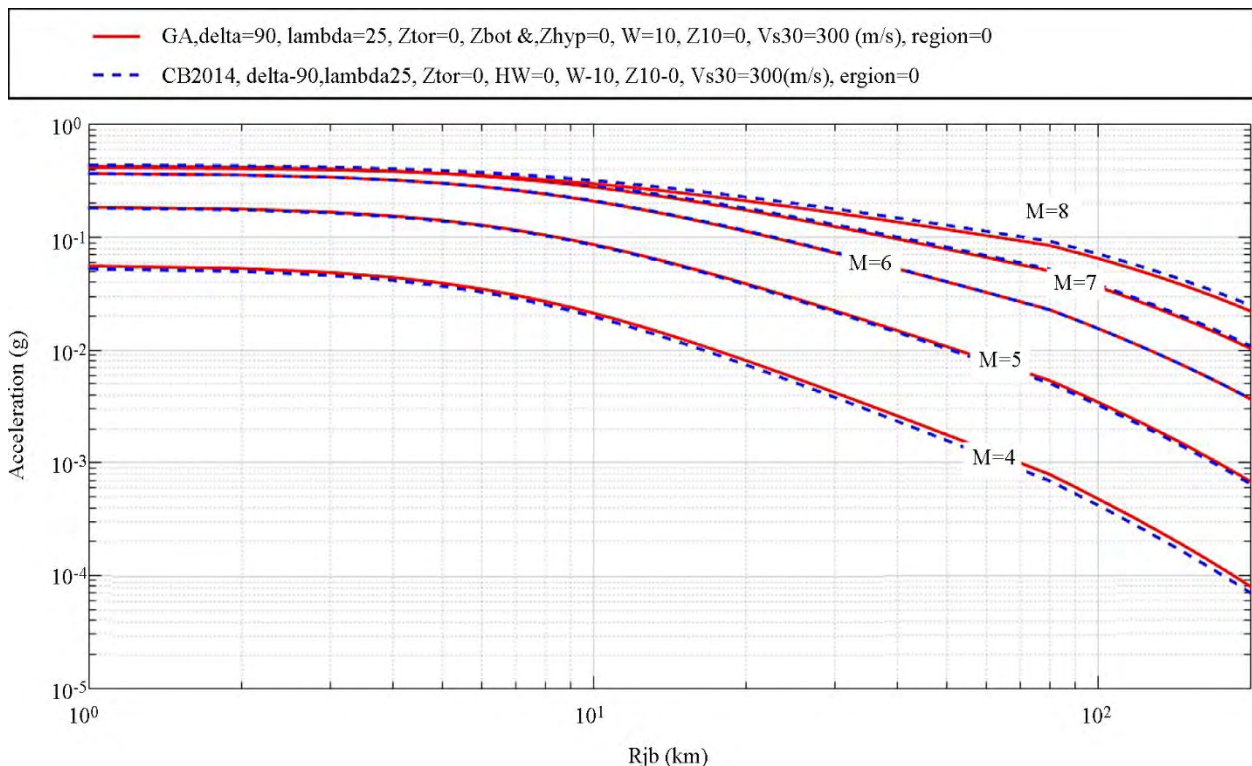
معیار بر این باورند این معیار سنجش می‌بایست در کنار سایر رویکردهای ارائه روابط کاهندگی مورد استفاده قرار گیرد. در این صورت در کنار سایر معیارهای تحلیل باقیمانده‌ها، معیار تحلیل حساسیت جهت دستیابی به مدل مطلوب در یک ساختگاه باید مورد توجه قرار گیرد.

#### ۶- بررسی روابط بهینه شده با روابط اصلی

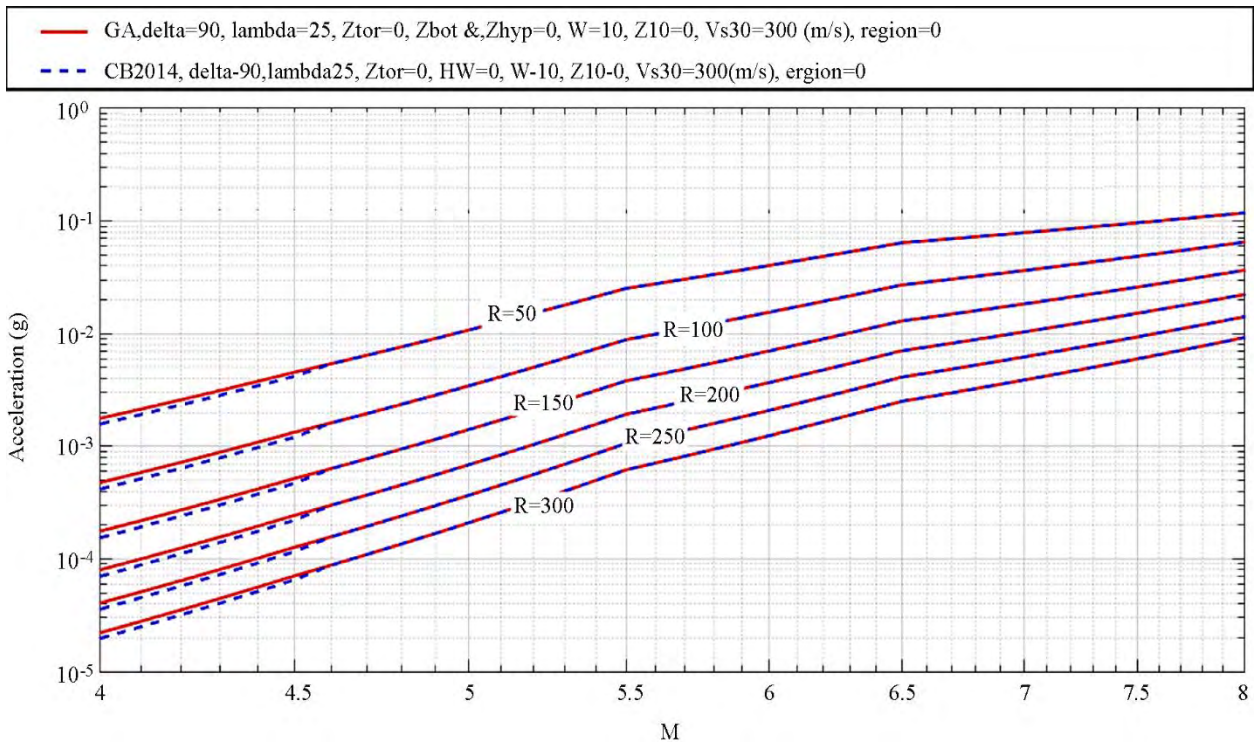
یکی از ضروریات ارائه روابط کاهندگی جهت پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین مقایسه روابط حاصل با روابط اصلی می‌باشد. بدین منظور با ثابت فرض نمودن پارامترهای اساسی بزرگای گشتاوری و فاصله و همچنین در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای سایر پارامترها، میزان تغییرات در پیش‌بینی PGA توسط روابط بهینه شده و روابط اصلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل‌های (۱۱) تا (۱۶)، PGA پیش‌بینی شده توسط روابط کاهندگی حاصل از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهند.

شده کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ با افزایش اندازه مجموعه نمونه‌ها (تعداد شتاب‌نگاشت‌ها)، از میزان انحراف در رابطه کاسته می‌شود.

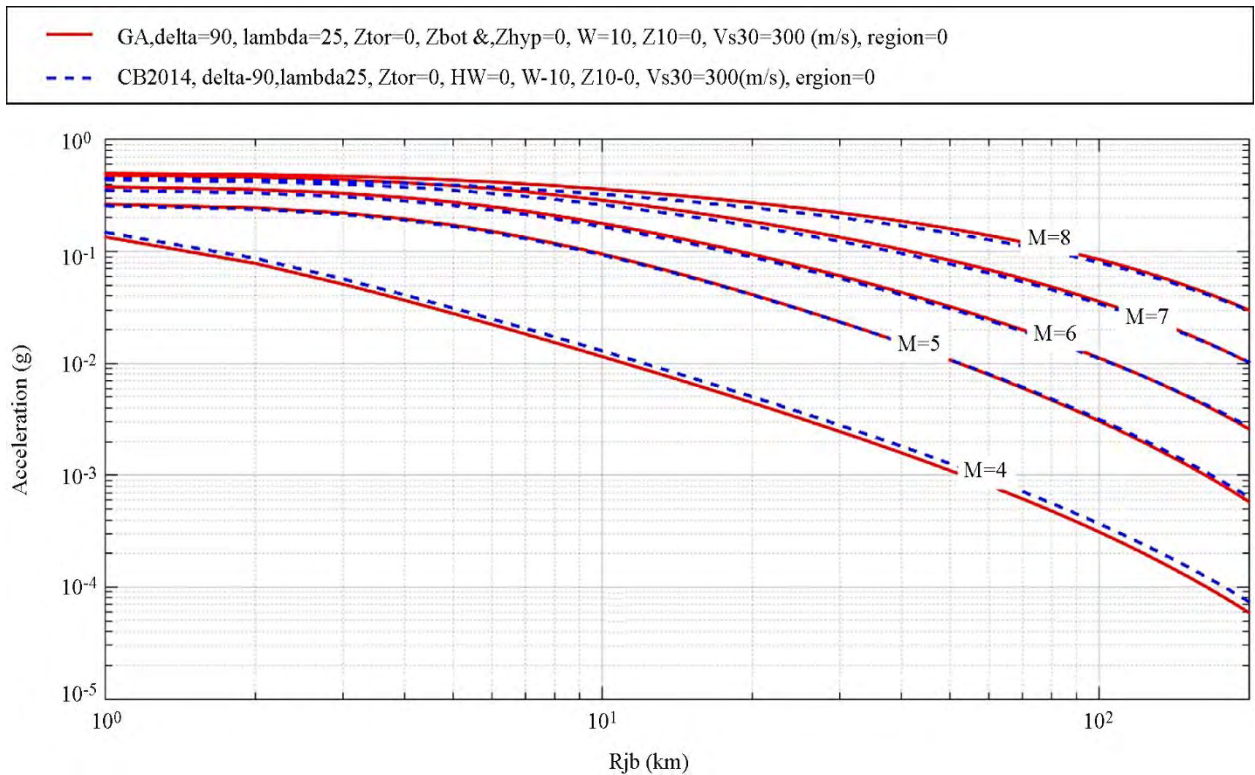
با توجه به دیدگاه RSA، مدلی مناسب خواهد بود که افزایش اندازه داده‌ها سبب کاهش انحراف باقیمانده‌ها در برابر تمامی پارامترهای لرزه‌ای شود؛ یعنی دارای روند صعودی باشد. با دقت در شکل‌های (۵) تا (۱۰)، مشاهده می‌شود تنها روابط بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک در برابر شاخص تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها، برای پارامترهای مختلف لرزه‌ای در مقابل باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی یک روند ثابت رو به جلو را نشان می‌دهند. قابل ذکر است که این نتیجه‌گیری تنها برای پارامتر PGA معتبر است. هرچند روابط به‌دست‌آمده جهت پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین با استفاده از معیار ارائه شده در این مقاله تحت عنوان تحلیل حساسیت همسو با نتایج به‌دست‌آمده از سایر معیارهای تحلیل باقیمانده‌ها می‌باشد، لذا ارائه‌دهندگان این



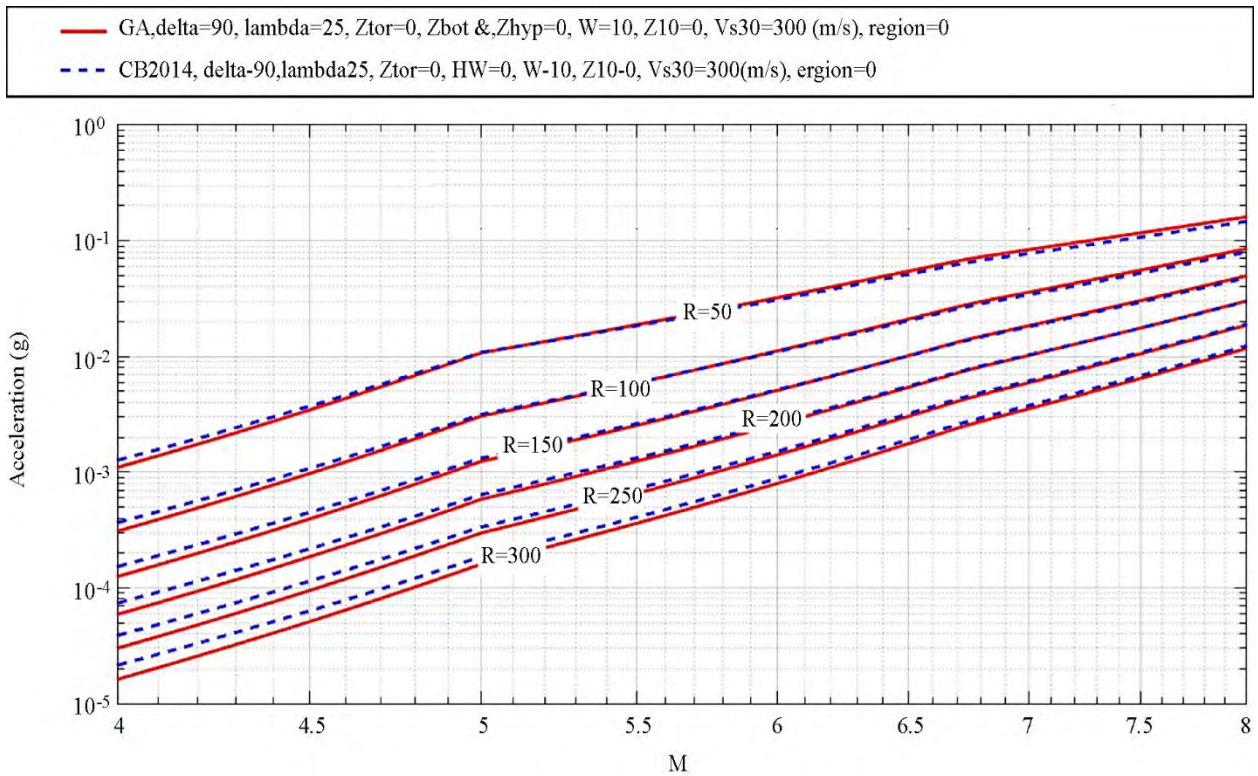
شکل (۱۱): مقایسه PGA رابطه ارائه شده با رابطه CB 2014 در برابر پارامتر بزرگا.  
 (Zbot & Zhyp=0, Fhw=0, W=10, Z10=0, Vs30=300(m/s), region=0, delta=90, lambda=25, Ztor=0)



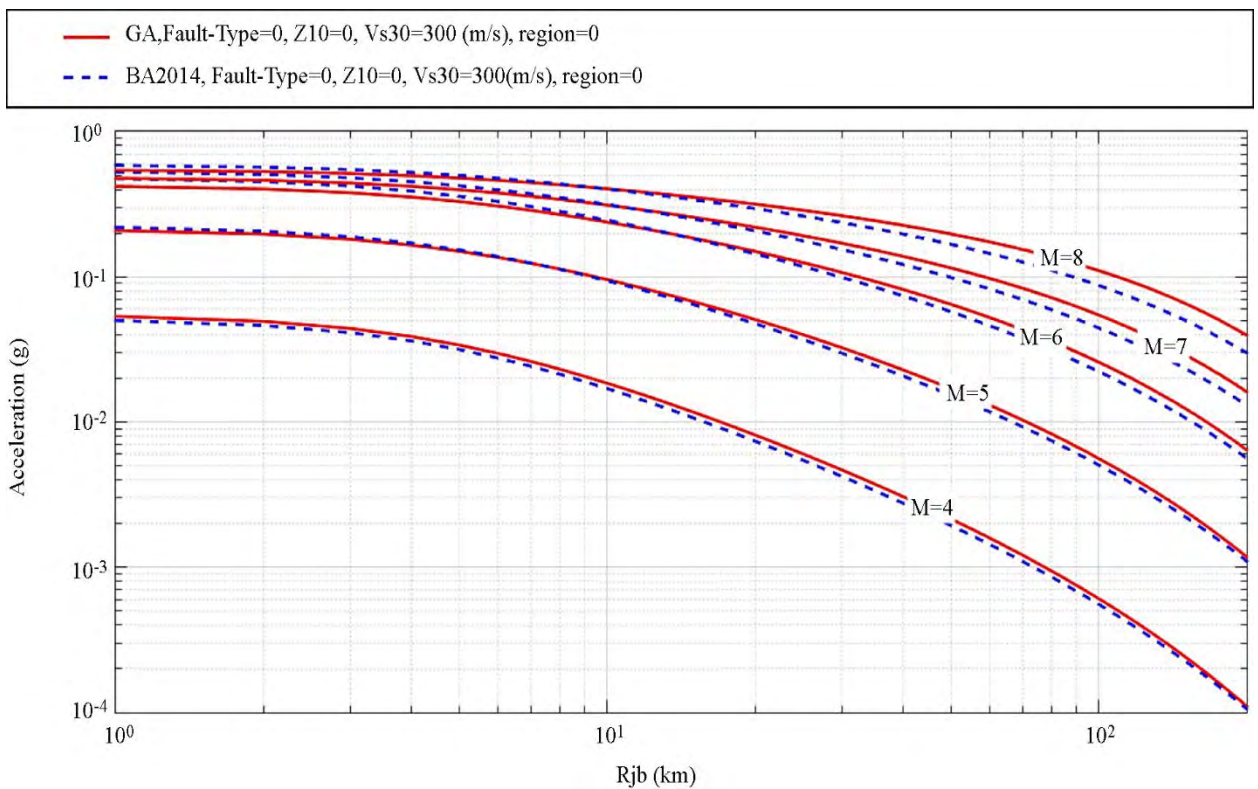
شکل (۱۲): مقایسه PGA رابطه ارائه شده با رابطه CB 2014 در برابر پارامتر فاصله.  
 ( $\Delta=90, \lambda=25, Z_{tor}=0, Z_{bot} \& Z_{hyp}=0, F_{hw}=0, W=10, Z_{10}=0, V_s=300(m/s), region=0$ )



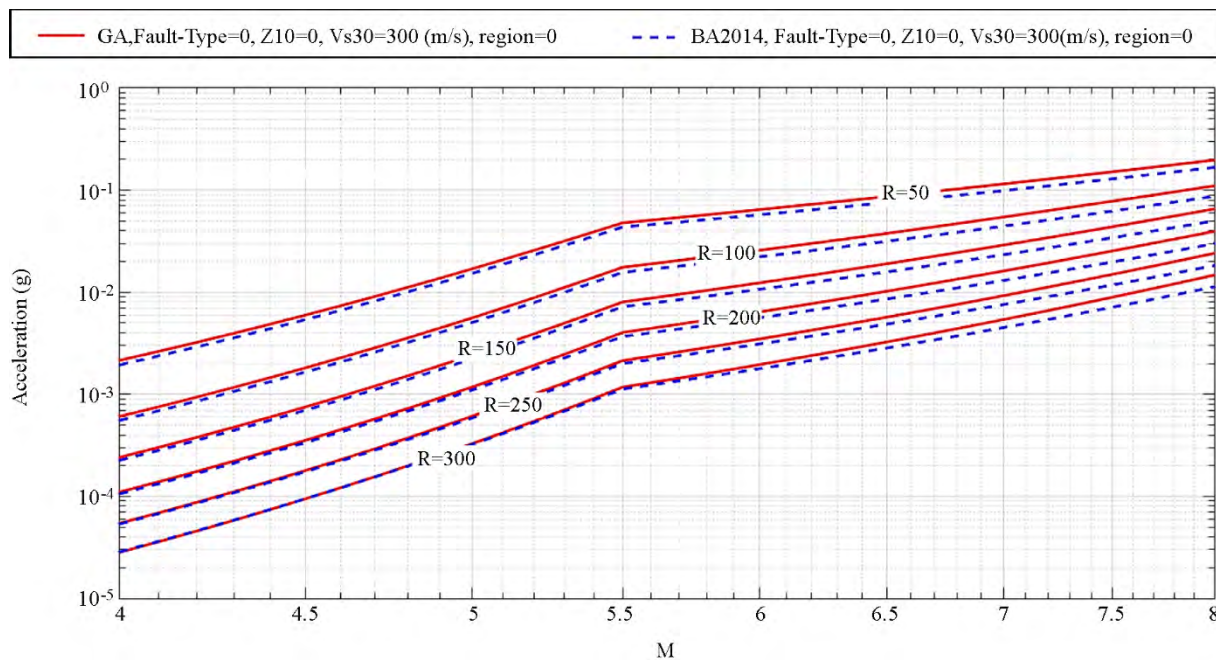
شکل (۱۳): مقایسه PGA رابطه ارائه شده با رابطه ASK 2014 در برابر پارامتر بزرگای.  
 ( $\Delta=90, \lambda=25, Z_{tor}=0, HW=0, W=10, Z_{10}=0, V_s=300(m/s), region=0$ )



شکل (۱۴): مقایسه رابطه ارائه شده با رابطه ASK 2014 در برابر پارامتر فاصله.  
 )delta=90, lambda=25, Ztor=0, HW=0, W=10, Z10=0, Vs30=300(m/s), region=0)



شکل (۱۵) مقایسه رابطه ارائه شده با رابطه BA 2014 در برابر پارامتر بزرگ (Fault-Type=0, Z10=0, Vs30=300(m/s), region=0).



شکل (۱۶): مقایسه رابطه ارنانه شده با رابطه BA 2014 در برابر پارامتر فاصله (Fault-Type=0, Z10=0, Vs30=300(m/s), region=0).

تغییر  $R_{zb}$ ، و ثابت ماندن زاویه دلنا و همچنین  $R_{rup}$  و  $R_x$ ، به نظر می‌رسد با توجه به روابط بین سه نوع فاصله، زلزله دلنا ۹۰ فرض گردیده تا هم‌زمان فواصل بتوانند با هم تغییر کنند. نتایج مربوط به زلزله طبس و زلزله بم به ترتیب در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) آورده شده است.

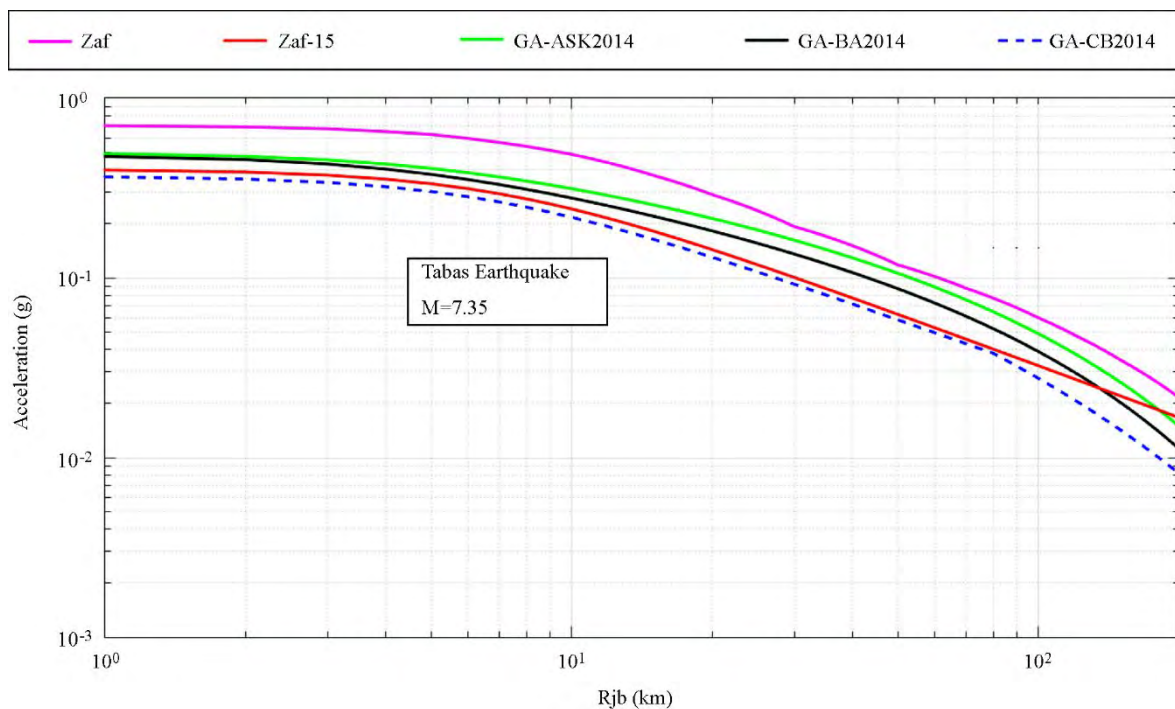
## ۲- مقایسه تأثیر روابط کاهندگی منتخب در منحنی خطر

تحلیل خطر لرزه‌ای در سال ۱۹۶۸ توسط بازورو و کرنل [۲۰] پایه‌گذاری شده است. از اهداف مهم تحلیل خطر لرزه‌ای این است که مهندسین زلزله اطمینان یابند که آیا سازه مورد مطالعه برای یک سطح عملکرد مشخص می‌تواند تحت تحریک پایه پایدار باقی بماند یا خیر؟ اولین سؤالی که در این رابطه مطرح می‌شود، این است که چه سطحی از تحریک پایه می‌بایست به سازه اعمال شود. آنچه مشخص است اینکه هیچ قطعیتی در ارتباط با پارامترهایی چون فاصله و بزرگای برای زلزله‌هایی که ممکن است در آینده اتفاق بیفتد وجود ندارد. لذا تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی این هدف را دنبال می‌کند که پاسخی برای عدم قطعیت‌ها بیابد. در حقیقت به دنبال یک بیان آشکار جهت رخداد تحریک زلزله در یک ساختگاه مشخص است.

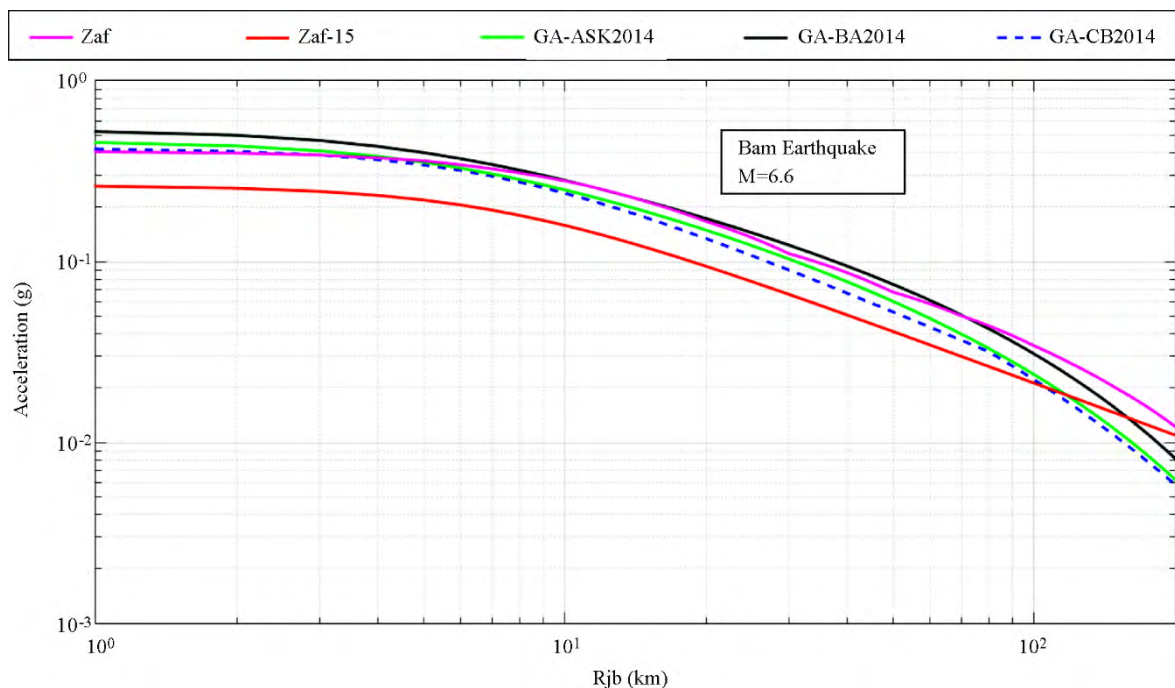
در شکل (۱۱) با افزایش مقدار فاصله، به خصوص در بزرگای زیاد، مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل ارائه شده با مقدار رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲] اندکی اختلاف دارد. در سایر موارد اختلاف این مقدار به نظر می‌رسد کم بوده و قابل چشم‌پوشی است. بنابراین با توجه به توضیحات ارائه شده، روابط حاصل از الگوریتم ژنتیک قابل اطمینان می‌باشند.

برای مقایسه بهتر نتایج حاصله، زلزله بم به‌عنوان یک زلزله داخلی انتخاب شده است. از بین رکوردهای ثبت شده در دیتابیس NGA رکورد آورده شده در سطر ۲۴۶۰ ثبت شده در ایستگاه بم در سال ۲۰۰۳، به‌عنوان یک زلزله داخلی جهت مقایسه روابط بهینه شده نسل جدید با روابط ارائه شده توسط زعفرانی و سقراط [۱۹] انتخاب شده است. مقدار زاویه دلنا (زاویه بین صفحه گسیختگی و افق) نیز برابر ۹۰ فرض شده است تا صرفاً یک نوع فاصله داشته باشیم که بالطبع قیاس صحیح باشد و بتوان برای فاصله بازه در نظر گرفت. علت دیگر آن است که در روابط CB2014 و ASK2014 در صورتی که  $R_{rup}$  تغییر نکند مقدار حداکثر شتاب پیش‌بینی شده توسط روابط نیز تغییر نکرده و نمودار به‌صورت خط مستقیم می‌شود. از طرف دیگر با





شکل (۱۷): مقایسه مقادیر پیش‌بینی روابط کاهندگی بهینه شده و همچنین رابطه زعفرانی و سقراط [۱۹] در مورد مشخصات زلزله طبس.



شکل (۱۸): مقایسه مقادیر پیش‌بینی روابط کاهندگی بهینه شده و همچنین رابطه زعفرانی و سقراط [۱۹] در مورد مشخصات زلزله بم.

رخدادها و رویدادهای ممکن را مورد بررسی قرار می‌دهیم و احتمال وقوع هر یک را به دست آورده و نهایتاً مدل یا سناریوی مناسبی معرفی می‌شود که بتواند سطح شدت مورد نظر را مشخص نماید.

منحنی خطر می‌تواند به عنوان مهم‌ترین نتیجه تحلیل خطر در نظر گرفته شود؛ در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی به دنبال انتخاب یک رخداد به عنوان بدترین حالت ممکن نخواهیم بود، در حقیقت تمام

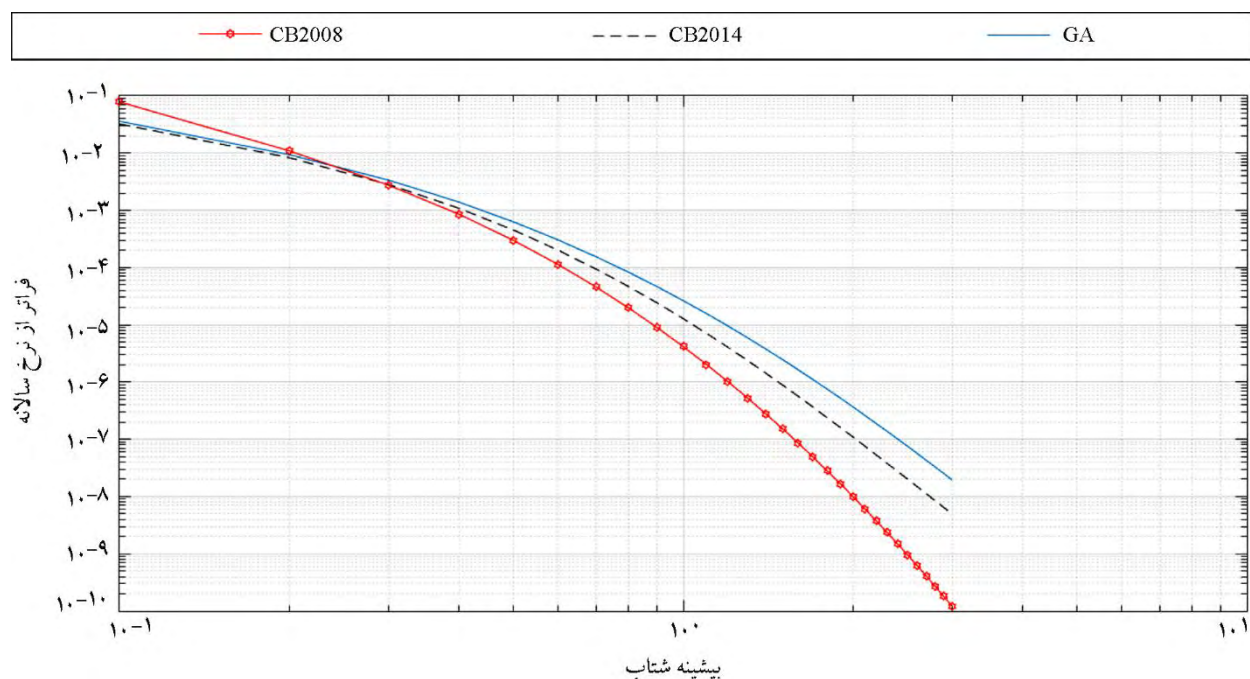
مدل ۲۰۰۸ اختلاف فاحشی با هر دو مدل دارد. با دقت در شکل (۲۰) می‌توان فهمید رابطه بهینه شده آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ تطبیق نسبتاً خوبی با مدل اولیه دارد؛ این در حالی است که سایر شاخص‌های آماری برای رابطه حاصله نیز مبین این امر می‌باشند. برخلاف مدل کمپیل و بزرگ‌نیا، مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ [۳] اختلاف کمتری با مدل‌های ارائه شده ۲۰۱۴ دارد. در مورد رابطه بهینه شده بور و اتکینسون ۲۰۱۴ نیز مشاهده می‌شود مدل ارائه شده نسبت به مدل اصلی اختلاف کمی دارد و کمی محافظه کارانه‌تر می‌باشد (شکل ۲۱). به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در PGAهای کم مدل‌ها تطبیق بیشتری با یکدیگر دارند؛ با افزایش تدریجی مقدار PGA روابط

۸- رسم منحنی خطر روابط تعمیم یافته حاصل از الگوریتم ژنتیک برای رسم منحنی خطر لازم است ابتدا یک سایت فرضی در نظر گرفته شود. بدین منظور از سایت فرضی نشان داده شده در مثال ۱-۴-۳ مقاله بیکر [۲۱] استفاده می‌شود. در این مثال یک منبع نقطه‌ای که در آن بیشترین زلزله محتمل زلزله‌ای با بزرگ‌گای ۸ ریشتر و کمترین زلزله محتمل زلزله‌ای با بزرگ‌گای ۵ ریشتر فرض شده است. همچنین نرخ فراگذشت سالیانه برابر ۰/۰۲ و مقدار  $b$  برابر ۱ می‌باشد. در این مثال فرض شده است که زلزله‌ها در فاصله ۱۰ کیلومتری از سایت اتفاق می‌افتند، در نتیجه احتمال وقوع زلزله در فاصله ۱۰ کیلومتری برابر ۱ می‌باشد. با توجه به آنکه روابط مورد مطالعه در این پژوهش دارای پارامترهای مختلف دیگری می‌باشند، در جدول (۱۱) تمامی پارامترهای پیش فرض جهت رسم منحنی خطر، آورده شده است.

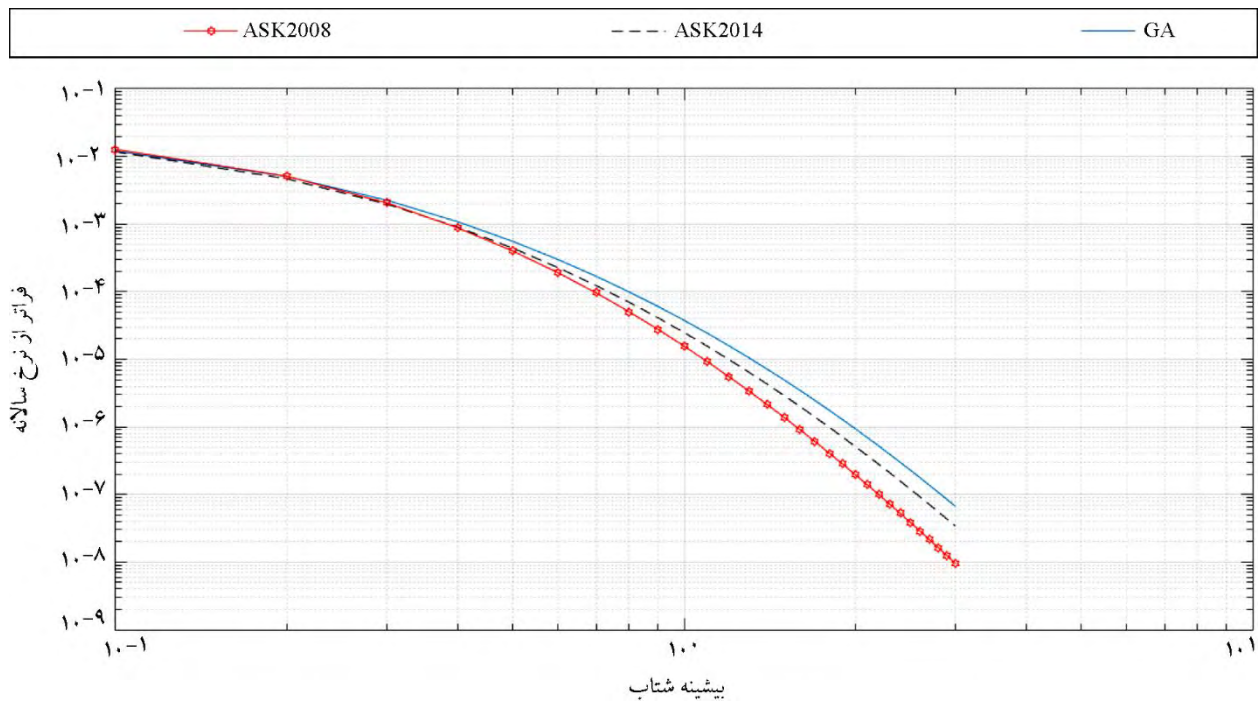
جدول (۱۱): پارامترهای ورودی رسم منحنی خطر.

پارامتر ورودی	مقدار پیش فرض	پارامتر ورودی	مقدار پیش فرض
Region	0	Delta	90
Ztor & Zbot	0	Lambda	25
Z10	0	Zvs	0
Fault Type	1	Zhyp	0
Vs30	300	Ry0	999
HW	0	W	10

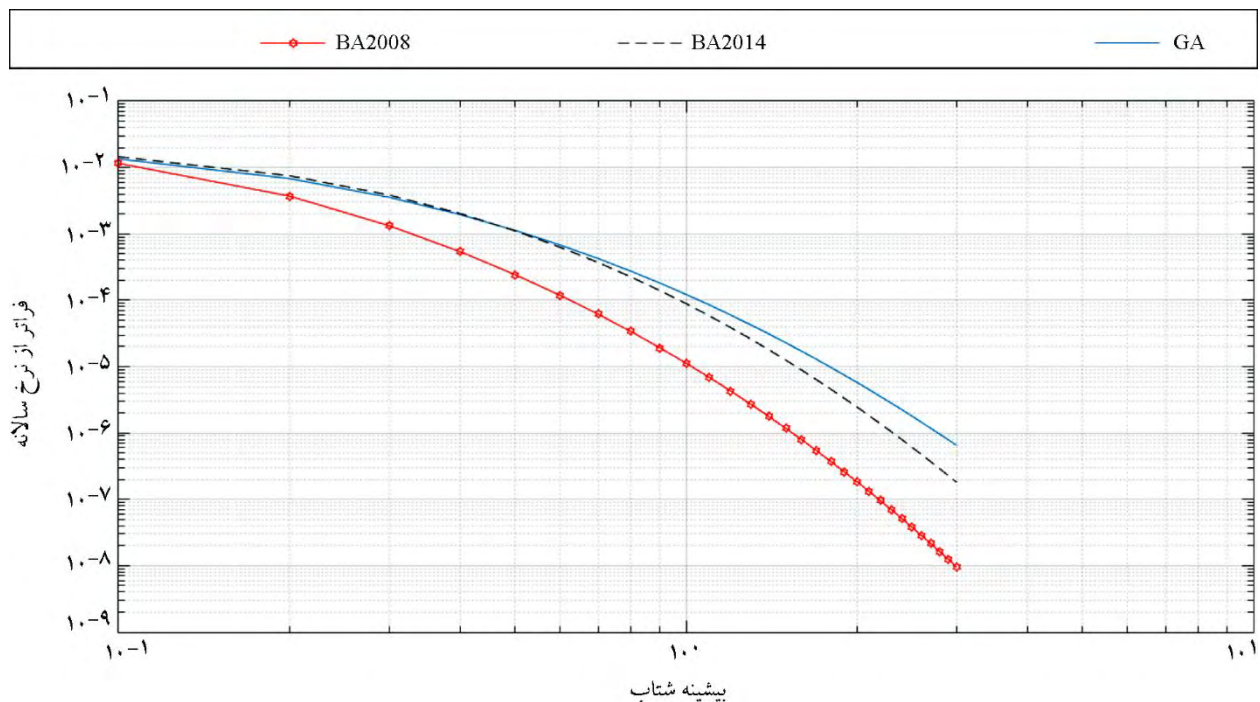
شکل (۱۹) منحنی خطر مربوط به رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ بهینه شده به همراه رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲] و ۲۰۰۸ [۱۰] را نشان می‌دهد. رابطه بهینه شده نسبت به روابط اصلی کمی محافظه کارانه‌تر است؛ در واقع می‌توان بیان نمود که این امر با افزایش PGA بیشتر می‌گردد. این در حالی است که



شکل (۱۹): مقایسه منحنی خطر رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲] و ۲۰۰۸ [۱۰] با رابطه بهینه شده.



شکل (۲۰): مقایسه منحنی خطر رابطه آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴|۱۴ و ۲۰۰۸|۳ با رابطه بهینه شده.



شکل (۲۱): مقایسه منحنی خطر رابطه بور و اتکینسون ۲۰۱۴|۱۲ و ۲۰۰۸|۴ با رابطه بهینه شده.

در نظر گرفتن آن سازه در جهت اطمینان طراحی می‌گردد. در جدول (۱۲) مقدار حداکثر شتاب طیفی متناسب با برخی از نرخ‌های فراگذشت سالیانه مهم، آورده شده است.

بهینه به سمتی کشیده می‌شوند که تحلیل خطر و در نهایت طراحی لرزه‌ای سازه‌ها را محافظه کارانه‌تر می‌نمایند. البته این اختلاف به اندازه‌ای کم است که قابل چشم‌پوشی است و حتی با

جدول (۱۲): نرخ فراگذشت سالیانه برای روابط مختلف.

CB 2008	CB 2014	CB 2014- GA	نرخ فراگذشت سالیانه
0.336	0.341	0.365	$\frac{1}{475}$
0.481	0.519	0.569	$\frac{1}{2475}$
ASK 2008	ASK 2014	ASK 2014- GA	نرخ فراگذشت سالیانه
0.298	0.296	0.316	$\frac{1}{475}$
0.499	0.517	0.559	$\frac{1}{2475}$
BA 2008	BA 2014	BA 2014- GA	نرخ فراگذشت سالیانه
0.266	0.394	0.393	$\frac{1}{475}$
0.446	0.656	0.714	$\frac{1}{2475}$

### ۹- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت روابط کاهندگی در بحث تحلیل خطر لرزه‌ای، اقدام به بهینه‌سازی ضرایب PGA این روابط بر اساس شاخص تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها شده است. بدین منظور از مجموعه داده‌های اختصاصی کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲] که تنها مجموعه‌ای است که با اعمال محدودیت‌ها به‌طور مستقیم توسط مرکز مطالعات مهندسی زلزله منتشر شده است و شامل ۱۵۴۹۳ رکورد از ۳۱۹ رخداد می‌باشد، استفاده شده است. در این پژوهش برخی از روابط کاهندگی ۲۰۱۴ مد نظر قرار گرفته شده است. شایان ذکر است در بهینه‌سازی این مدل‌ها از چهار تابع هدف بهره گرفته شد که سه مورد از آنها مربوط به حساسیت مدل در برابر پارامترهای لرزه‌ای مختلف می‌باشد و تابع هدف چهارم LLH در نظر گرفته شده است. در این فرایند بهینه‌سازی ضرایب روابط کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲]، آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴ [۱۴] و مدل بور و اتکینسون ۲۰۱۴ [۱۲] به همراه داده‌های معرفی شده و توابع هدف مد نظر، جهت پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین در اختیار الگوریتم ژنتیک چند هدفه قرار گرفته شد و ضرایب این سه مدل کاهندگی به دست آمد. با دقت در ضرایب مدل‌های حاصله و مقایسه آنها با ضرایب روابط کاهندگی اصلی مشاهده می‌شود اختلاف آنها در حد و حدود مناسبی قرار دارند. همین امر سبب می‌گردد اختلاف چندانی بین شتاب‌های پیش‌بینی شده توسط دو رابطه اصلی و بهینه‌سازی شده

وجود نداشته باشد. در ادامه سعی شد بر مبنای ۱۵۴۹۳ داده موجود، روابط بهینه شده با روابط توسعه یافته مرکز مطالعات مهندسی زلزله مقایسه شود. از آنجا که آزمون‌های کلاسیک نظیر  $Z$ -test، Lillifors و Var-test معیار ایده‌آلی برای سنجش روابط کاهندگی نمی‌باشند ولی مشاهده می‌شود با وجود آنکه تمامی مدل‌های منتخب دارای توزیع نرمال هستند لیکن تمامی آنها دارای توزیع ایده‌آل با باقیمانده و انحراف معیار به ترتیب برابر صفر و یک نمی‌باشند اما روابط بهینه شده نتایج تقریباً قابل قبول‌تری را نسبت به سایر مدل‌ها در برابر این آزمون‌ها از خود نشان می‌دهند. همچنین در این پژوهش از معیارهای سنجش خطا؛ شامل مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و همچنین ضرایب تعیین (R-square) و کارایی (E) استفاده شده است. در مجموع می‌توان بیان نمود که روابط بهینه شده برای PGA در میان روابط منتخب بهترین عملکرد را دارا هستند. البته این آزمون‌ها به‌تنهایی ابزار مناسبی جهت ارزیابی و رتبه‌بندی روابط کاهندگی محسوب نمی‌گردند. به همین دلیل، علاوه بر این روش‌ها، رویکردهای نوین سنجش و مقایسه بر پایه روش درست‌نمایی LH، LLH مورد استفاده قرار گرفتند. در کنار روابط حاصل از الگوریتم ژنتیک، روابط کاهندگی ۲۰۱۴ ثبات بیشتری را در برابر آزمون‌های ذکر شده دارا می‌باشند. البته نتایج نشان‌دهنده‌ی ثبات نسبتاً بیشتر مدل‌های بهینه شده نسبت به مدل‌های ۲۰۱۴ می‌باشند. در ادامه به بررسی پایداری مدل‌های کاهندگی بهینه شده و روابط نسل جدید بر اساس روش RSA که هدف نهایی این پژوهش بود، پرداخته شد. بر اساس آزمون تحلیل حساسیت، مدل کاهندگی مناسب است که افزایش مجموعه داده‌ها سبب کاهش انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ای شود؛ یعنی دارای روندی صعودی باشد. روابط کاهندگی بهینه شده بهترین عملکرد را در برابر پارامترهای مختلف دارند. برخی از روابط کاهندگی ۲۰۱۴، گاهی عملکرد نسبتاً خوبی را در یکی از پارامترهای مد نظر گرفته شده دارا هستند. به‌عنوان نمونه، رابطه کمپیل و بزرگ‌نیا ۲۰۱۴ [۲] در میان روابط NGA-West1 و NGA-West2 از لحاظ نتیجه RSA

- approximate results. Annual Meeting of the Seismo Seismological Society of America, San Francisco.
6. Rahpeyma, S.A., Azarbakht, A. (2015) Compatibility Assessment Of Ground Motion Attenuation Models With The Iran Plateau Database. *Civil Engineering Sharif*, **31.2**(1.1), 137-146.
  7. PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center, NGA Database, University of California, Berkeley. Available from: <http://peer.berkeley.edu/ngawest/nga>.
  8. Scherbaum, F., Delavaud, E. and Riggelsen, C. (2009) Model selection in seismic hazard analysis: an information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, 3234-3247.
  9. Zeinali, H. (2017) *The Extension of Ground Motion Relationships for Predicting the Peak Ground Acceleration by Employing RSA Methodology*. M.Sc. Dissertation, Faculty of Engineering, ARAK University.
  10. Campbell, K.W., Bozorgnia, Y. (2008) 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), 139-171.
  11. Chiou, B.S.J., Youngs, R.R. (2008) An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, **24**(1), 173-215.
  12. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E., Atkinson G.M. (2013) *NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes*. PEER Report 5.
  13. Chiou, B.S.J., Youngs, R.R. (2014) Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, **30**(3), 1117-1153.
  14. Abrahamson, N.A., Silva, W.J., Kamai, R. (2013) *Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set*. Pacific Engineering Research Center Report 4.
  15. Abrahamson, N.A., Youngs, R.R. (1992) Short Notes: A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**, 505-510.

برای باقیمانده‌ی درون‌رخدادی در مقابل پارامتر بزرگا در لحظه  $T=0s$ ، بهترین عملکرد را دارد. این در حالی است که از لحاظ دو پارامتر فاصله و سرعت موج برشی در برابر باقیمانده‌های فرارخدادی عملکرد خوبی ندارد. همچنین برای بررسی هرچه بیشتر سه رابطه حاصل از الگوریتم ژنتیک، با در نظر گرفتن پارامترهای فرضی و انتخاب یک سایت نقطه‌ای، منحنی خطر مربوط به روابط اصلی و بهینه‌سازی شده در کنار هم رسم گردید. نتایج حاکی از آن است که مدل‌های کاهندگی حاصل از الگوریتم ژنتیک تطبیق خوبی با مدل اصلی ۲۰۱۴ دارند.

به‌عنوان یک نتیجه می‌توان بیان نمود مدل‌های کاهندگی ارائه شده عملکرد بهتری را در برابر شاخص‌های آماری، به‌خصوص شاخص آماری تحلیل حساسیت، از خود به نمایش می‌گذارند. همچنین می‌توان به‌عنوان معیار نوین در ارائه روابط کاهندگی برای سایر دوره‌های تناوب مورد نیاز در تحلیل خطر لرزه‌ای، از تحلیل حساسیت استفاده نمود.

## مراجع

1. Azarbakht, A., Rahpeyma, S., Mousavi, M. (2014) A new methodology for assessment the stability of Ground Motion Prediction Equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**(3), doi:10.1785/0120130212.
2. Campbell, K.W. (2014) NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec. *Earthquake Spectra*.
3. Abrahamson, N.A., Silva, W.J. (2008) Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground motion relations. *Earthquake Spectra*, **24**, 67-97.
4. Boore, D.M., Atkinson, G.M. (2008) Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, **24**(1), 99-138.
5. Toro, G. (2006) The effects of ground-motion uncertainty on seismic hazard results: Examples and

16. Turchin, P., Grinin, L., Korotayev, A., Munck, V.C. de (2007) History and mathematics: Historical Dynamics and Development of Complex Societies.
17. Delavaud, E., Scherbaum, F., Kuehn, N., Riggelsen, C. (2009) Information-Theoretic Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis: An Applicability Study Using Californian Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, 3248-3263.
18. Scherbaum, F., Cotton, F. and Smit, P. (2004) On the use of response spectralreference data for the selection of ground-motion models for seismic hazard analysis: The case of rock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**(6), 341-348.
19. Zafarani, H. and Soghrat, M. (2012) Simulation of ground motion in the Zagros region of Iran using the specific barrier model and the stochastic method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(5), 2045-31.
20. Bazzurro, P. and Cornell, C.A. (1999) Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 501-520.
21. Baker, J.W. (2008) *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*. version 1.3, Available online : <http://www.stanford.edu/~bakerjw.>, p. 72.

#### واژه‌نامه

Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)	۱- مرکز مطالعات مهندسی زلزله پاسیفیک
Next Generation of Ground-Motion Attenuation	۲- روابط کاهشدهنده نسل جدید
Re-Sampling Analysis	۳- بازنمونه‌گیری از داده‌ها
Mutation	۴- نرخ جهش
Gaussian	۵- گوسی
Scale	۶- مقیاس
Variance	۷- واریانس