

# ارزیابی روابط کاهندگی در تطبیق با مجموعه‌ی داده‌های فلات ایران

سحرالسادات راه‌پما (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا آذربخت\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۴ (درداشت‌ش)  
دردی ۲ - ۳۱، شماره ۱/۱، ص. ۱۳۷-۱۴۶، (یادداشت‌ش)

امروزه یکی از مهم‌ترین اهداف پژوهشگران در تحلیل خطر لرزه‌ی یک ساخت‌گاه، انتخاب مناسب‌ترین رابطه‌ی کاهندگی، به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزاء تحلیل خطر لرزه‌ی است. به علت قرارگرفتن ایران بر روی کمربند لرزه‌خیز آلپ - هیمالیا و احتمال وقوع زلزله‌های مخرب در این منطقه، انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب اهمیت بالایی دارد. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی میزان قابل اعتماد بودن روابط کاهندگی با استفاده از تحلیل باقیمانده‌ها توسط روش‌های ریاضیاتی و آماری کلاسیک و مدرن و همچنین بررسی میزان پایداری روابط توسط رویکرد نوین تحلیل حساسیت با استفاده از کاتالوگ لرزه‌ی مربوط به کشور ایران است. نتایج آزمون‌های صورت‌گرفته نشان‌گر آن است که مدل زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ به عنوان یک مدل محلی، نسبت به سایر مدل‌های منتخب سازگاری بهتری با داده‌های ثبت شده نشان داده است. انتظار می‌رود از نتایج حاصل از این پژوهش بتوان در انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب در طرح‌های تحلیل خطر لرزه‌ی داخلی استفاده کرد.

واژگان کلیدی: تحلیل خطر لرزه‌ی، روابط کاهندگی، کاتالوگ لرزه‌ی، تحلیل باقیمانده‌ها، تحلیل حساسیت، ایران.

sahar.rahpeyma@gmail.com  
a-azarbacht@araku.ac.ir

## ۱. مقدمه

از روابط کاهندگی مختلف را با در نظر گرفتن قضاوت مهندسی بلامانع می‌دانند؛ این در حالی است که گروهی دیگر از متخصصان استفاده از روابطی را که تحت شرایط ساخت‌گاهی متفاوت و با استفاده از کاتالوگ‌های لرزه‌ی غیرداخلی حاصل شده‌اند، را رد و بر استفاده از روابط کاهندگی حاصل از شرایط زمین‌ساختی ناحیه‌ی مورد بررسی تأکید می‌کنند. نتایج گزارش‌های ثبت‌شده‌ی تقریباً متناقضی که برای ساخت‌گاه‌های نزدیک به هم توسط گروه‌های مختلف تهیه شده‌اند، گواهی بر این موضوع است.<sup>[۱]</sup>

امروزه تحلیل باقیمانده‌ها، با استفاده از روش‌های ریاضیاتی و آماری کلاسیک و نوین، به عنوان مهم‌ترین روش سنجش مدل‌های کاهندگی شناخته می‌شود. تاکنون آزمون‌های آماری متنوع و بی‌شماری جهت بررسی میزان تطابق مقادیر ثبت شده از رخداد طبیعی زلزله و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های کاهندگی ارائه شده‌اند، که در این نوشتار به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است. همچنین با توجه به اهمیت پایداری نتایج، یک رابطه‌ی کاهندگی در برابر تغییر مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده‌ی رویکرد جدید تحلیل حساسیت در ارزیابی روابط کاهندگی منتخب توسط نویسندگان این نوشتار ارائه شده است. و ایشان بر این باورند که روش پیشنهادی ارائه شده در برابر بازنمونه‌گیری از مجموعه‌ی داده‌ها می‌تواند به طور مؤثر در انتخاب مدل کاهندگی مناسب یک ساخت‌گاه در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ی به‌کارگرفته شود. با این حال ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های کاهندگی مشروط بر استفاده‌ی هم‌زمان

برآورد مناسب پارامترهای جنبش زمین در یک ساخت‌گاه به منظور استفاده در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه، به ویژه در مناطق لرزه‌خیز همچون کشور ایران، اهمیت بسزایی دارد. خسارات مالی و جانی ناشی از این رخداد طبیعی با استفاده از ارزیابی خطر لرزه‌ی قابل کنترل و کاهش است. یکی از مهم‌ترین بخش‌های موردنیاز جهت انجام تحلیل خطر لرزه‌ی، پیش‌بینی جنبش‌های نیرومند زمین است، که از طریق روابطی موسوم به روابط کاهندگی به دست می‌آیند.

انتخاب مدل‌های پیش‌بینی زمین‌لرزه، مؤلفه‌ی اساسی در هر تحلیل خطر لرزه‌ی به حساب می‌آید. در بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داده شده است که عدم قطعیت مربوط به انتخاب مدل کاهندگی در مقایسه با عدم قطعیت‌های مدل‌های لرزه‌ی بیشتر از هر عامل دیگری بر نتایج تحلیل خطر تأثیرگذار است.<sup>[۱]</sup> با توجه به اهمیت این مسئله، انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مورد استفاده در تحلیل خطر لرزه‌ی یک ساخت‌گاه، اهمیت ویژه‌ی دارد. تاکنون روابط کاهندگی متعددی توسط پژوهشگران برای نواحی مختلف لرزه‌خیز ارائه شده است، که هر کدام از آن‌ها دارای نقاط ضعف و قوت هستند. در زمینه‌ی انتخاب روابط کاهندگی، برخی از صاحب‌نظران استفاده

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۳، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۱۱، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۱۹.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به رخدادهای ایران (که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند).

ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	عمق کانونی	گسل*	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها
۱	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	۷٫۴	۱۰	۱	۴
۲	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۷٫۱	۱۰	۱	۷
۳	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	۷٫۳	۱۲	۱	۲
۴	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	۵٫۸	۹	۲	۷
۵	۱۹۹۷/۰۲/۰۴	۶٫۵	۸	۱	۱
۶	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	۶	۹	۱	۳
۷	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۷٫۲	۱۳	۱	۷
۸	۱۹۹۸/۰۳/۱۴	۶٫۶	۵	۱	۲
۹	۱۹۹۹/۰۸/۲۱	۵	۲۵	۲	۳
۱۰	۱۹۹۹/۰۵/۰۶	۶٫۲	۷	۲	۵
۱۱	۱۹۹۹/۰۵/۰۶	۵٫۷	۱۰	۲	۳
۱۲	۱۹۹۹/۱۰/۳۱	۵٫۲	۱۵	۲	۴
۱۳	۲۰۰۲/۰۴/۲۴	۵٫۴	۲۵	۲	۶
۱۴	۲۰۰۲/۰۶/۲۲	۶٫۴	۱۰	۱	۱۲
۱۵	۲۰۰۲/۱۲/۲۴	۵٫۲	۲۰	۲	۶
۱۶	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۵٫۸	۱۰	۲	۴
۱۷	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۵٫۷	۱۵	۲	۴
۱۸	۲۰۰۳/۰۸/۲۱	۵٫۹	۲۰	۱	۳
۱۹	۰۰۳/۱۱/۲۸	۵	۲۵	۲	۳
۲۰	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۶٫۵	۳	۱	۶
۲۱	۲۰۰۴/۰۵/۲۸	۶٫۳	۲۷	۱	۵
۲۲	۲۰۰۴/۱۰/۰۷	۵٫۶	۳۰	۱	۹
۲۳	۲۰۰۵/۰۱/۱۰	۵٫۳	۳۲	۱	۸
۲۴	۲۰۰۵/۰۲/۲۲	۶٫۳	۱۰	۱	۶
۲۵	۲۰۰۵/۱۱/۲۷	۵٫۹	۱۲	۲	۶
۲۶	۲۰۰۶/۰۳/۳۰	۵٫۱	۲۰	۲	۸
۲۷	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۶٫۱	۱۲	۲	۹
۲۸	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۵٫۱	۲۶	۲	۶
۲۹	۲۰۰۶/۰۶/۲۸	۵٫۸	۱۲	۲	۴
۳۰	۲۰۰۸/۰۵/۰۵	۵٫۲	۱۲	۲	۳
۳۱	۲۰۰۸/۰۹/۱۰	۶٫۱	۱۲	۲	۵
۳۲	۲۰۰۸/۰۹/۱۱	۵٫۲	۷	۲	۳
۳۳	۲۰۰۸/۰۹/۱۷	۵٫۲	۱۲	۲	۳
۳۴	۲۰۰۸/۱۲/۰۷	۵٫۴	۱۲	۲	۴
۳۵	۲۰۰۸/۱۲/۰۸	۵٫۱	۱۲	۲	۴
۳۶	۲۰۰۸/۱۲/۰۹	۵	۱۴	۲	۳

\*: ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به گسل‌های ایران مرکزی و زاگرس است.

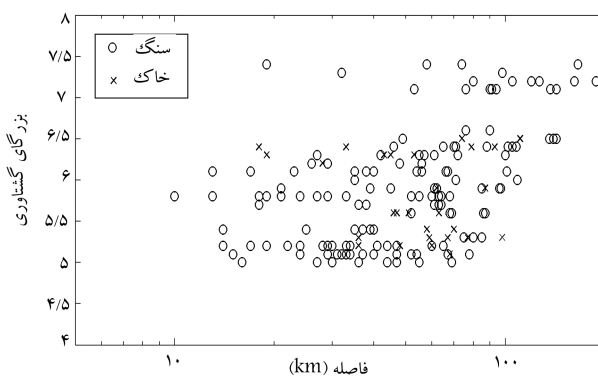
از آزمون‌های آماری متفاوت است. از این رو در این مطالعه با اختیار یک کاتالوگ لرزه‌ی داخلی مربوط به کشور ایران، نتایج پاسخ‌های مختلف روابط کاشتگی منتخب در برابر آزمون‌های آماری کلاسیک و پیشرفته مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این نوشتار می‌تواند در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ی منطقه‌ی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. بانک اطلاعاتی زمین‌لرزه‌ها

پهنه‌ی ایران زمین در بخش میانی کمربند کوه‌زا و لرزه‌خیز آلپ - هیمالیا، یکی از لرزه‌خیزترین مناطق جهان به شمار می‌رود. تاکنون پژوهشگران مطالعات جامعی پیرامون ویژگی‌های زمین‌شناختی و همچنین ماهیت لرزه‌ی این منطقه انجام داده‌اند. به علت کمبود دستگاه‌های ثبت شتاب‌نگاشت در مناطق با لرزه‌خیزی کم، پژوهشگران غالباً این نواحی را با نواحی لرزه‌خیزی بالا ترکیب کرده‌اند، که در این حالت ایران را به دو ناحیه‌ی لرزه‌خیزی اصلی زاگرس و ایران مرکزی تقسیم‌بندی می‌کنند.<sup>[۱]</sup> بیشترین فعالیت‌های لرزه‌ی ایران در گسل‌های زاگرس متمرکز شده‌اند و رخدادهای گسل‌های مرکزی ایران و سایر نقاط به نسبت کمتر است، اما با وجود اینکه رخدادهای سالیانه در زاگرس به مراتب بیشتر از نواحی دیگر است، از نظر بزرگای زلزله، رخدادهای گسل زاگرس اغلب مقدار کمتری نسبت به سایر نواحی دارند.<sup>[۵]</sup>

مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل ۱۷۹ شتاب‌نگاشت از ۳۶ رخداد ثبت شده بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۸ میلادی است. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده توسط شبکه‌ی شتاب‌نگاری ایران ثبت شده‌اند. در جدول ۱، فهرست رخدادهای منتخب و اطلاعات مربوط به هر یک از آن‌ها نمایش داده شده است. بزرگای گشتاوری زلزله‌های انتخابی بین ۵-۷٫۴ و فاصله‌ی ثبت شده‌ی شتاب‌نگاشت‌ها بین ۰ تا ۲۰۰ کیلومتر است. مکانیزم گسلش اغلب رخدادهای از نوع امتداد لغز یا معکوس و یا ترکیبی از این دو حالت است.

شکل ۱، نشان‌دهنده‌ی توزیع مقادیر فاصله در برابر بزرگای گشتاوری<sup>۱</sup> (Mw) ثبت شده‌ی مجموعه‌ی زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در این مطالعه است. مطابق شکل ۱، ایستگاه‌های متعدد به دو گروه متفاوت بسته به نوع خاک تقسیم شده‌اند. معیار طبقه‌بندی خاک محل در این مطالعه طبقه‌بندی ذکر شده در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران است.<sup>[۶]</sup> در این راستا ساخت‌گاه‌های موجود در طبقه‌ی I و II ( $V_{S30} \geq 375 \text{ m/s}$ ) با عنوان ساخت‌گاه‌های سنگی و ساخت‌گاه‌های موجود در



شکل ۱. توزیع بزرگای و فاصله‌ی شتاب‌نگاشت‌های به‌کاررفته در این مطالعه.

طبقه‌ی III و IV ( $V_{S30} < 375 \text{ m/s}$ ) با عنوان ساخت‌گاه‌های خاکی شناخته می‌شوند.

### ۳. مدل‌های کاهندگی زمین لرزه‌ی منتخب

براساس مطالعات متعدد صورت‌گرفته بر روی ویژگی‌های لرزه‌شناختی فلات ایران نشان داده شده است که تمامی زمین لرزه‌های این منطقه، رخداد‌های سطحی و درون صفحه‌ی هستند.<sup>[۷]</sup> همچنین این رخدادها با رخداد‌های درون صفحه‌ی سطحی از نقاط مختلف دیگر از جمله ترکیه و کالیفرنیا شباهت‌هایی دارند.<sup>[۸]</sup> بر مبنای این گزارش‌ها، انتخاب مدل‌های کاهندگی منتخب مورد استفاده در این مطالعه از ۳ گروه اصلی صورت می‌گیرد:

۱. مدل‌های زمین لرزه‌ی که ویژه منطقه‌ی ایران طراحی شده‌اند.

۲. مدل‌های زمین لرزه‌ی که ویژه منطقه‌ی اروپا و مدیترانه طراحی شده‌اند.

۳. مدل‌های کاهندگی نسل جدید (NGA)<sup>۲</sup>.

پروژه‌ی تولید نسل جدید مدل‌های کاهندگی در سال ۲۰۰۸، مجموعه‌ی از روابط کاهندگی منتخب را برای استفاده در شرایط جغرافیایی گوناگون توسعه بخشیده است و تنها قید استفاده از این روابط، فعالیت منطقه از نظر زمین‌ساختی و وقوع زلزله‌ها در قشر عمق زمین است. در حین پیشبرد طرح NGA، هر تیم توسعه‌دهنده به اطلاعات جامعی از مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده نیازمند بوده است، که از جمله می‌توان به اطلاعات پیرامون پارامترهای منبع لرزه‌ی، فاصله‌ی منشاء رخداد تا محل، شرایط محلی ایستگاه ثبت شتاب‌نگاشت و موارد دیگر اشاره کرد. از دیگر ویژگی‌های روابط حاصل‌شده از طریق این طرح، جامعه‌ی آماری بالای مجموعه‌ی داده‌هاست (۳۵۵۱ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۷۳ زلزله). در ادامه، توضیحات مختصری از مدل‌های منتخب ارائه شده است.

۱. مدل صفاری و همکاران ۲۰۱۲ (Setal ۱۲):<sup>[۹]</sup> این رابطه با هدف به دست آوردن یک مدل میان‌بایی برپایه‌ی مجموعه‌ی داده‌های ایران با لحاظ کردن اثرات طبقه‌بندی خاک محل، نوع گسلش و محل قرارگیری گسل، به منظور تخمین بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA)، بیشینه‌ی سرعت زمین (PGV) و طیف پاسخ شتاب براساس میرایی ۵٪ حاصل شده است.

۲. مدل زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ (Zetal ۱۲):<sup>[۱۰]</sup> مقدار بیشینه‌ی بزرگای شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در منطقه‌ی زاگرس برابر ۶٫۲ است. بنابراین با توجه به کمبود داده‌های رخداد‌های بزرگ، کاربرد مدل‌های تجربی پیش‌بینی زمین لرزه به رخداد‌های کوچک و متوسط محدود می‌شود. زعفرانی و همکاران با استفاده از مدل حائل ویژه (SBM)<sup>۳</sup> این رابطه را به منظور استفاده در منطقه‌ی زاگرس ایران پیشنهاد داده‌اند.

۳. مدل قدرتی و همکاران ۲۰۰۷ (Getal ۰۷):<sup>[۱۱]</sup> این رابطه با هدف به دست آوردن یک مدل میان‌بایی جهت تخمین PGA، PGV و بیشینه‌ی شتاب مؤثر (EPA)<sup>۴</sup>، برای نواحی لرزه‌خیز زاگرس، البرز و ایران مرکزی حاصل شده است. مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده در این رابطه شامل ۳۰۷ شتاب‌نگاشت از ۸۹ رخداد ثبت شده‌ی ایران است.

۴. مدل بور و اتکینسون ۲۰۰۸ (BA ۰۸):<sup>[۱۲]</sup> این رابطه یکی از روابط کاهندگی نسل جدید است، که با استفاده از زیرمجموعه‌ی از داده‌های NGA، شامل ۱۵۷۴ شتاب‌نگاشت از ۵۸ زمین لرزه و با هدف تخمین PGA، PGV و طیف

پاسخ شتاب براساس میرایی ۵٪ برای دوره‌ی تناوب ۰ تا ۱۰ ثانیه حاصل شده است.

۵. مدل کمپل و بزرگنیا ۲۰۰۸ (CB ۰۸):<sup>[۱۳]</sup> این رابطه یکی دیگر از روابط کاهندگی نسل جدید است، که با استفاده از زیرمجموعه‌ی شامل ۱۶۶۱ شتاب‌نگاشت از ۶۴ زمین لرزه از داده‌های مرکز مطالعات مهندسی زلزله‌ی پاسفیک<sup>۵</sup>،<sup>[۱۴]</sup> با هدف تخمین PGA، PGV، PGD و طیف پاسخ شتاب براساس میرایی ۵٪ برای دوره‌ی تناوب ۰ 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 فاصله‌ی ۰ تا ۲۰۰ کیلومتر معتبر است.

۶. مدل چیو و یانگز ۲۰۰۸ (CY ۰۸):<sup>[۱۵]</sup> در این رابطه‌ی نسل جدید کاهندگی، داده‌ها به شتاب‌نگاشت‌های با طول گسیختگی زلزله برابر ۷۰ کیلومتر محدود شده است، تا از خطاهای مربوط به نمونه‌ی داده‌های حرکت قوی کاسته شود. نتایج این اعمال محدودیت ۱۹۵۰ شتاب‌نگاشت مرتبط با ۱۲۵ زلزله بود. این مدل شامل بزرگای بهبودیافته و فاصله‌ی مقیاس شده و همچنین تأثیرات فرا دیواره است. تأثیرات ساخت‌گاه با توابع ساده‌ی سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی ( $V_{S30}$ ) و عمق رسوب بیان شده است. یک تفاوت اصلی در مجموعه‌ی داده‌ی این رابطه مربوط به پس لرزه‌هاست. مجموعه‌ی داده‌های این رابطه شامل پس لرزه‌ها بوده است، در نتیجه تعداد بسیار بزرگ‌تری از زلزله‌ها را نسبت به مجموعه‌ی داده‌های سایر روابط NGA دارد.

۷. مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ (AS ۰۸):<sup>[۱۶]</sup> این مدل برای بزرگای ۵ تا ۸٫۵، فاصله‌ی ۰ تا ۲۰۰ و دوره‌ی تناوب ۰ تا ۱۰ ثانیه کاربردی است و براساس زیرمجموعه‌ی از داده‌های NGA شامل ۲۷۵۴ شتاب‌نگاشت از ۱۳۵ زلزله به دست آمده است.

۸. مدل آکار و بومر ۲۰۱۰ (AB ۱۰):<sup>[۱۷]</sup> این رابطه جهت پیش‌بینی PGA، PGV و طیف پاسخ شتاب با میرایی ۵٪ در نواحی اروپا، مدیترانه و خاورمیانه حاصل شده است. مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده برای حصول این رابطه شامل ۵۳۲ شتاب‌نگاشت از ۱۳۱ رخداد با بیشینه‌ی فاصله‌ی ۱۰۰ کیلومتر و بزرگای گشتاوری بین ۵ الی ۷٫۶ است.

۹. مدل کالکان و گولکان ۲۰۰۴ (KG ۰۴):<sup>[۱۸]</sup> این رابطه‌ی کاهندگی جهت پیش‌بینی PGA و طیف پاسخ شتاب براساس میرایی ۵٪ برای دوره‌ی تناوب ۰٫۱ تا ۲ ثانیه حاصل شده است. مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده در این رابطه، زیرمجموعه‌ی شامل ۱۱۲ شتاب‌نگاشت از ۵۷ زمین لرزه‌ی ثبت شده در ترکیه بین سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۳ میلادی است.

۱۰. مدل بیندی و همکاران ۲۰۱۰ (Bindi ۱۰):<sup>[۱۹]</sup> این رابطه‌ی کاهندگی با استفاده از مجموعه‌ی داده‌های کشور ایتالیا شامل ۵۶۱ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۰۷ رخداد بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۰۷، جهت محاسبه‌ی PGA، PGV و طیف پاسخ شتاب برای میرایی ۵٪ برای استفاده در ۲۱ دوره‌ی تناوب از ۰٫۳ تا ۲ ثانیه حاصل شده است. محدوده‌ی معیار فاصله در این رابطه تا ۱۰۰ کیلومتر است.

خلاصه‌ی از اطلاعات و محدودیت‌های مربوط مدل‌های مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در این مطالعه به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها و فرضیات مربوط به پارامترهای متنوع لرزه‌ی در مدل‌های پیش‌بینی زمین لرزه به ویژه روابط کاهندگی نسل جدید از نتایج گزارش فنی پژوهشی در سال ۲۰۱۱ استفاده شده است.<sup>[۲۰]</sup>

جدول ۲. جزئیات مربوط به مدل‌های کاهندگی مورد ارزیابی در مطالعه.

ردیف	رابطه‌ی کاهندگی	نام اختصاری	منطقه‌ی حاکم	معیار فاصله	بزرگای گشتاوری
۱	صفاری و همکاران (۲۰۱۲)	Seta1۱۲	ایران	۱۵-۱۳۵	۵-۷٫۳
۲	زعفرانی و همکاران (۲۰۱۲)	Zeta1۱۲	ایران	۱-۲۰۰	۴٫۴-۷٫۵
۳	قدرتی و همکاران (۲۰۰۷)	Getal۰۷	ایران	۵-۱۵۰	۴٫۵-۷٫۵
۴	کمپل و بزرگنیا (۲۰۰۸)	CB۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۷٫۵
۵	بور و اتکینسون (۲۰۰۸)	BA۰۸	کالیفرنیا	۵-۲۰۰	۵-۸
۶	چیو و یانگزی (۲۰۰۸)	CY۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۸
۷	آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۸)	AS۰۸	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸٫۵
۸	آکار و بومر (۲۰۱۰)	AB۱۰	اروپا و مدیترانه	۰-۱۰۰	۵-۷٫۵
۹	کالکان و گولکان (۲۰۰۴)	KG۰۴	ترکیه	۱-۲۵۰	۴-۷٫۵
۱۰	بیندی و همکاران (۲۰۱۰)	Bindi۱۰	ایتالیا	۰-۱۰۰	۴-۶٫۹

#### ۴. تحلیل باقیمانده‌ها

تحلیل آماری باقیمانده‌ها، روشی مهم جهت دستیابی به راه حلی مناسب به منظور انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مطلوب است. 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 رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$r_{ij} = \ln Y_{ij} - \ln \hat{Y}_{ij} = \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

که در آن، مقادیر  $\eta_i$  و  $\varepsilon_{ij}$  به ترتیب مربوط به باقیمانده‌های درون‌رخدادی و باقیمانده‌های فرارخدادی هستند، که مطابق رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند:

$$\eta_i^{[inter]} = \eta_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij} \quad (2)$$

$$r_{ij}^{[int ra]} = \varepsilon_{ij} = r_{ij} - \eta_i \quad (3)$$

تاکنون به منظور ارزیابی روابط کاهندگی با استفاده از تحلیل باقیمانده‌ها، آزمون‌ها و روش‌های متعدد آماری و ریاضیاتی توسط پژوهشگران ارائه شده‌اند. این تذکر لازم است که اغلب شیوه‌های مرسوم جهت بررسی رفتار مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی پارامترهای جنبش زمین، همچنان به‌عنوان تحلیل کلاسیک باقیمانده‌ها شناخته می‌شوند. این روش‌های آماری به بررسی نحوه‌ی توزیع باقیمانده‌ها، میزان دقت و صحت در پیش‌بینی روابط، میزان انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای مختلف لرزه‌ی چون بزرگای گشتاوری، معیار فاصله و سرعت موج برشی می‌پردازند. برخی مطالعات صورت‌گرفته در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹، از تحلیل باقیمانده‌ها جهت ارزیابی مدل‌های کاهندگی تحت مجموعه‌ی داده‌های مختلف استفاده کرده‌اند. [۲۱، ۲۲] علاوه بر روش‌های کلاسیک، رویکردهای نوین سنجش و رتبه‌بندی بر پایه‌ی روش درست‌نمایی (LH) در سال ۲۰۰۴، [۲۳] و روش لگاریتم درست‌نمایی (LLH) در سال ۲۰۰۹، [۲۴] ارائه شده‌اند. مطالعات صورت‌گرفته در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲، [۲۵، ۲۶] نیز جهت ارزیابی مدل‌های کاهندگی با استفاده از روش‌های فوق صورت گرفته است.

#### ۱.۴. آزمون‌های بررسی کیفیت توزیع باقیمانده‌ها

به‌طور ایده‌آل، توزیع باقیمانده‌ها دارای میانگین صفر و انحراف معیار ۱ است. میزان تناسب باقیمانده‌ی به‌دست‌آمده از این نوع توزیع، نشان‌دهنده‌ی میزان هم‌خوانی مدل زمین‌لرزه‌ی به‌کار برده شده با اطلاعات ثبت شده است. روش‌های آماری متنوعی برای بررسی میزان مطلوب بودن این تناسب وجود دارد. آزمون‌های  $Z$  و Lilliefors آزمون‌های فرض تهی بر روی باقیمانده‌ها برای بررسی این تناسب هستند.

در آزمون  $Z$  فرض تهی، صفر بودن میانگین باقیمانده‌هاست. در این آزمون آماری فرض می‌شود باقیمانده‌ها از یک توزیع نرمال با واریانس مشخص (برابر واحد) پیروی می‌کنند. [۲۶] برای آزمون شکل توزیع باقیمانده‌ها می‌توان آزمون Lilliefors را استفاده کرد. در این آزمون فرض می‌شود باقیمانده‌ها از توزیع نرمال حاصل می‌شوند زمانی که مقادیر میانگین و انحراف معیار مجموعه‌ی داده‌ها مجهول است. [۲۶]

در آزمون‌های فرض پی - مقدار (P-value) حاصل نشان‌دهنده‌ی پذیرفتن و یا رد فرض تهی در این آزمون‌هاست. پی - مقدارهای کوچک نشان می‌دهند اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی کاهندگی حائز اهمیت و غیر قابل چشم‌پوشی است، از این رو دستیابی به نتایج قابل اعتماد از طریق مدل کاهندگی امکان‌پذیر نیست و از طرف دیگر پی - مقدارهای بزرگ نشان‌دهنده‌ی قابل اعتماد بودن مدل کاهندگی خواهند بود. [۲۳]

در جدول ۳، نتایج حاصل از دو آزمون آماری فوق نشان داده شده است. در این جدول پارامتر  $H$  تعیین‌کننده‌ی تأیید و یا رد شدن فرض تهی است. به عبارت دیگر، در صورتی که  $H$  برابر صفر باشد، فرض تهی در سطح معنی‌داری ۰٫۵٪ صحیح و در صورتی که  $H$  برابر ۱ باشد، فرض تهی در سطح معنی‌داری ۰٫۵٪ غیر صحیح است. نتایج آزمون‌های آماری فوق حاکی از این است که مدل‌های معرفی شده دارای توزیع نرمال هستند، هر چند که برخی از آنان دارای میانگین صفر نیستند. باید تأکید کرد که بیشتر آزمون‌های کلاسیک فقط یک فرضیه مانند توزیع نرمال، میانگین صفر و یا انحراف معیار واحد را می‌سنجند. در نتیجه، ابزارهای کاملی برای سنجش و رتبه‌بندی مدل‌های زمین‌لرزه‌ی منتخب نیستند.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های فرض آماری.

رابطه‌ی کاهندگی	آزمون Z		آزمون Lilliefors	
	P-value	H	P-value	H
Setal۱۲	۰٫۹۹۶۱	۰	۰٫۵۷۷۴	۰
Zetal۱۲	۰٫۰۴۴۷	۱	۰٫۶۹۷۷	۰
Getal۰۷	۰٫۰۵۴۷	۰	۰٫۸۲۶۹	۰
CB۰۸	۰٫۳۸۶۲	۰	۰٫۹۵۵۳	۰
BA۰۸	۲٫۹۴E - ۴	۱	۰٫۹۱۵۳	۰
CY۰۸	۳٫۲۷E - ۵	۱	۰٫۲۶۱۹	۰
AS۰۸	۰٫۰۳۲۳	۱	۰٫۸۰۱۰	۰
AB۱۰	۸٫۴۷E - ۷	۱	۰٫۳۵۷۵	۰
KG۰۴	۰٫۸۴۷۱	۰	۰٫۲۵۷۴	۰
Bindi۱۰	۷٫۶۲E - ۵	۱	۰٫۷۱۷۱	۰

بررسی اختلافات معنی‌دار بین مدل‌های احتمالاتی است، که در یک چارچوب نظری - اطلاعاتی چنین معیاری اختلاف کولبک - لیبلر<sup>۸</sup> معرفی شده است.<sup>[۲۳]</sup> این اختلاف بین دو مدل احتمالاتی  $f$  و  $g$  به شکل معادله‌ی ۷ بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}
 D(f, g_2) - D(f, g_1) &= E_f[\log_2(f)] - E_f[\log_2(g_2)] \\
 &\quad - (E_f[\log_2(f)] - E_f[\log_2(g_1)]) \\
 &= E_f[\log_2(f)] - E_f[\log_2(g_2)] \\
 &\approx (\log_2(L(g_1|x)) - \log_2(L(g_2|x)))
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

در معادله‌ی فوق،  $E_f$  امید ریاضی تابع  $f$  است. این فاصله بخشی از اطلاعاتی را که در صورت جانشینی مدل  $g$  به جای  $f$  از دست می‌رود، به صورت جزئی ارائه می‌دهد. در این روابط امید ریاضی تابع مجهول  $f$  به صورت مقداری ثابت از معادله حذف خواهد شد و در نتیجه با استفاده از تعریف میانگین لگاریتم درست‌نمایی معیار LLH به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف خواهد شد و در ارزیابی روابط مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار کمتر این معیار نشان‌دهنده‌ی تناسب بیشتر مدل کاهندگی بر روی مجموعه‌ی داده‌هاست. جدول ۴، نتایج معیارهای معرفی شده را نشان می‌دهد.

$$LLH = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i))
 \tag{8}$$

همان‌طور که از نتایج جدول ۴ مشخص است، روابط  $AB_{10}$  و  $Bindi_{10}$  مربوط به نواحی اروپا و مدیترانه با داشتن بیشترین میزان خطا و کمترین ضریب تعیین، جزء نامناسب‌ترین روابط بر روی مجموعه داده‌های ایران محسوب می‌شوند؛ که با وجود تفاوت‌های آشکار در ساختار زمین‌شناختی مناطق مذکور، عدم تناسب این روابط در برابر مجموعه‌ی داده‌های فلات ایران امری منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که روابط کاهندگی NGA شامل  $BA_{08}$ ،  $CB_{08}$ ،  $CY_{08}$  و  $AS_{08}$  دارای مقادیر LLH بالاست و تناسب بالایی بر روی کاتالوگ لرزه‌ی ایران ندارند. در بین تمامی روابط منتخب رابطه‌ی کاهندگی،  $Zetal_{12}$  بیشترین مقدار ضریب تعیین، کمترین مقدار LLH، کمترین مقادیر خطا در برابر باقیمانده‌ها (رابطه‌ی ۱) و همچنین کمترین مقادیر خطا در برابر باقیمانده‌های درون‌رخدادی (رابطه‌ی ۲) را دارد. این امر حاکی از آن است که روابط کاهندگی به‌دست‌آمده براساس مجموعه‌ی داده‌های یک ساخت‌گاه مشخص از تناسب بیشتری در تطبیق با کاتالوگ لرزه‌ی ساخت‌گاه موردنظر برخوردار هستند، هر چند وجود اختلاف در بین روابط مربوط به فلات ایران (روابط  $Setal_{12}$  و  $Getal_{07}$ ) نیز کاملاً مشهود است و همین امر نیاز به بررسی و انتخاب رابطه‌ی مناسب را با استفاده از روش‌های دقیق‌تر امری ضروری می‌سازد. از این رو در ادامه‌ی مطالعه به بررسی‌های بیشتر بر روی تحلیل باقیمانده‌ها پرداخته شده است.

#### ۵.۴. بررسی انحراف باقیمانده‌ها

از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های یک مدل کاهندگی مطلوب برای استفاده در یک ساخت‌گاه، عدم انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ی متفاوت مانند بزرگای، فاصله و یا سرعت موج برشی است. به منظور معنی‌دار کردن و همچنین ایجاد امکان تفسیر میزان انحراف باقیمانده‌ها، آزمون فرض آماری تعریف می‌شود و از پی - مقدار

#### ۲.۴. بررسی میزان خطا

معیارهای خطای پیش‌بینی، شاخص‌هایی هستند که برای ارزیابی صحت پیش‌بینی مدل موردنظر استفاده می‌شوند. این معیارها هر چه کمتر باشند، نمایانگر پیش‌بینی دقیق‌تر روابط هستند.<sup>[۲۷]</sup> در این مطالعه از دو معیار ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۶</sup> و میانگین مطلق خطا (MAE)<sup>۷</sup> استفاده شده است. این مقادیر خطا با استفاده از روابط ۴ و ۵ به‌دست می‌آیند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{pre})^2}{N}}
 \tag{4}$$

$$MAE = \frac{\sum |X_{obs} - X_{pre}|}{N}
 \tag{5}$$

که در آن‌ها،  $X_{obs}$  و  $X_{pre}$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر ثبت‌شده‌ی رخداد طبیعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل کاهندگی هستند. همچنین  $N$  مبین تعداد نمونه‌هاست.

#### ۳.۴. بررسی معیار ضریب تعیین

یک رابطه‌ی کاهندگی، زمانی به‌عنوان یک مدل مناسب در نظر گرفته می‌شود که قدرت توضیح‌دهندگی آن، که توسط ضریب تعیین اندازه‌گیری می‌شود، حتی‌الامکان بالا باشد. ضریب تعیین شاخصی است که نشان می‌دهد تا چه اندازه معادله‌ی میان‌بایی نمونه‌ها، داده‌ها را به‌نکویی برازش می‌کند. این معیار توسط رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

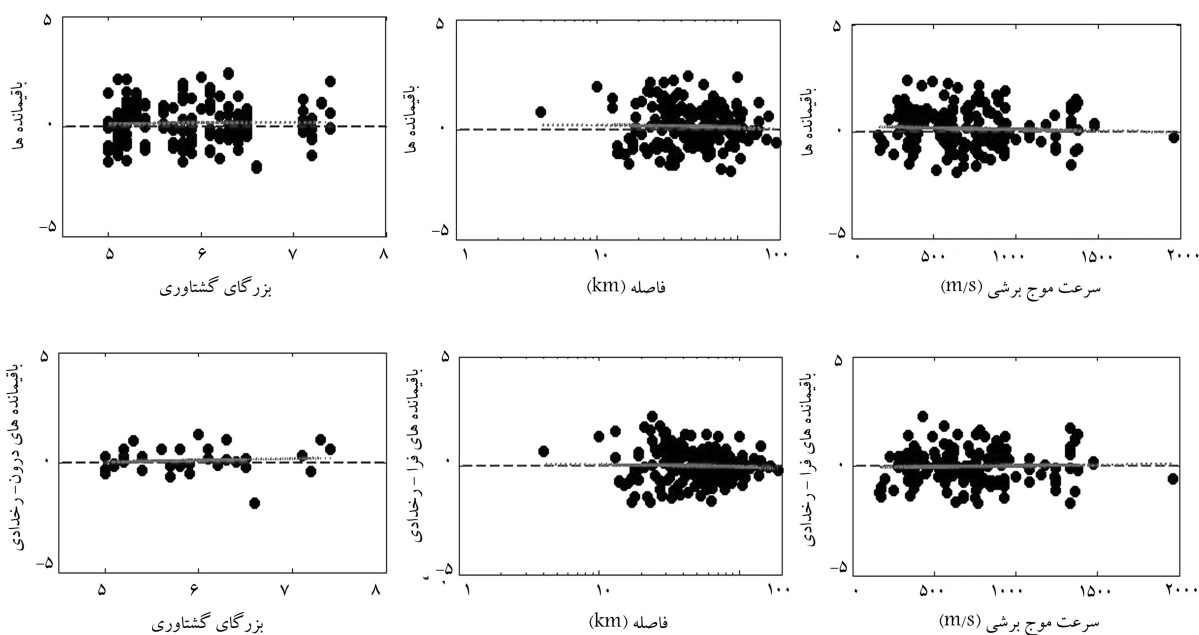
$$R^2 = \frac{\sum X_{obs}^2 - \frac{(\sum (X_{obs} - X_{pre}))^2}{N}}{\sum X_{obs}^2}
 \tag{6}$$

#### ۴.۴. روش نظری - اطلاعاتی: ابزاری قدرتمند برای ارزیابی مدل‌ها

رویکرد مدرن نظری - اطلاعاتی با هدف سنجش کیفی مدل‌ها، بر پایه‌ی روش پیشینه‌ی درست‌نمایی مطرح شده است.<sup>[۲۴]</sup> تصمیم‌گیری در انتخاب مدل‌ها نیازمند

جدول ۴. نتایج سنجش معیارهای خطا (RMSE, MAE)، معیار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و روش نظری - اطلاعاتی (معیار LLH).

رابطه‌ی کاهندگی	LLH	$(R^2)$	RMSE			MAE		
			$r_{ij}^{[inter]}$	$r_{ij}^{[int ra]}$	$r_{ij}$	$r_{ij}^{[inter]}$	$r_{ij}^{[int ra]}$	$r_{ij}$
Setal۱۲	۲,۲۹۱۳	۰,۹۳۹۹	۰,۹۵۹۸	۰,۶۳۸۳	۰,۷۷۰۴	۰,۴۸۹۱	۰,۷۷۸۷	۰,۶۰۸۵
Zetal۱۲	۱,۹۷۱۲	۰,۹۴۶۰	۰,۹۲۱۲	۰,۵۷۵۰	۰,۷۶۵۱	۰,۴۱۳۵	۰,۷۳۸۵	۰,۶۰۴۹
Getal۰۷	۲,۹۹۴۷	۰,۹۳۹۳	۰,۹۷۴۲	۰,۶۷۷۴	۰,۷۷۷۱	۰,۵۴۲۴	۰,۷۸۵۵	۰,۶۳۱۰
CB۰۸	۲,۷۴۵۲	۰,۹۴۳۳	۰,۹۴۳۳	۰,۶۲۱۱	۰,۷۷۱۰	۰,۴۶۰۷	۰,۷۵۸۸	۰,۶۱۷۶
BA۰۸	۲,۶۴۹۶	۰,۹۳۹۶	۰,۹۷۳۷	۰,۷۴۴۳	۰,۶۹۵۳	۰,۵۶۴۹	۰,۷۶۶۰	۰,۵۳۸۲
CY۰۸	۲,۵۳۲۲	۰,۹۳۷۸	۰,۹۸۸۹	۰,۶۴۰۳	۰,۷۸۱۶	۰,۴۵۶۸	۰,۸۱۶۴	۰,۶۱۸۳
AS۰۸	۲,۲۶۰۵	۰,۹۴۲۵	۰,۹۵۰۱	۰,۶۱۲۰	۰,۷۷۷۱	۰,۴۳۰۱	۰,۷۷۰۸	۰,۶۱۹۹
AB۱۰	۲,۵۴۶۶	۰,۹۳۴۱	۱,۰۳۲۰	۰,۶۹۲۰	۰,۷۹۴۹	۰,۵۱۳۳	۰,۸۵۲۴	۰,۶۳۸۸
KG۰۴	۲,۲۹۸۱	۰,۹۴۴۴	۰,۹۳۴۲	۰,۶۱۷۹	۰,۷۷۱۶	۰,۴۷۶۰	۰,۷۵۶۸	۰,۶۱۲۷
Bindi۱۰	۲,۲۲۸۸	۰,۹۳۱۰	۱,۰۵۲۲	۰,۶۸۱۵	۰,۸۶۷۵	۰,۴۸۸۶	۰,۸۵۹۳	۰,۶۷۸۷



شکل ۲. توزیع باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ی بزرگای گشتاوری، معیار فاصله و سرعت موج برشی مدل زعفرانی و همکاران (۲۰۱۲). (Zetal۱۲). [۱۰]

پی - مقدار شیب و  $P_a$  نشان‌دهنده‌ی پی - مقدار عرض از مبدأ خط برازش شده بر روی باقیمانده‌ها هستند. نکته‌ی دیگر در بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها، مشخص کردن نحوه‌ی تخمین روابط است. در این مطالعه، تعیین روابط با پیش‌بینی دست بالا و یا پیش‌بینی دست پایین با محاسبه‌ی میانگین باقیمانده‌ها صورت گرفته است. هر اندازه میزان میانگین باقیمانده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، رابطه دقت بیشتری در پیش‌بینی خواهد داشت. درنهایت، با در نظر گرفتن ۳ مقدار  $P_a$ ,  $P_b$ , و میانگین باقیمانده‌ها، روابط با کمترین انحراف مشخص خواهند شد. همان‌طور که از نتایج جدول ۵ مشخص است، روابط  $AB_{10}$  و  $Bindi_{10}$  مربوط به

این آزمون جهت تفسیر نتایج استفاده شده است. این آزمون با فرض تهی، شیب و عرض از مبدأ خط حاصل از رگرسیون‌گیری خطی بر مجموعه‌ی داده‌ها (باقیمانده‌ها) برابر صفر تعریف می‌شود. هر اندازه پی - مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل کاهندگی انحراف کمتری دارد و رابطه، توانایی بیشتری در پیش‌بینی جنبش‌های زمین دارد. پی - مقدارها برای دو پارامتر شیب و عرض از مبدأ محاسبه شده‌اند. در شکل ۲، میزان انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ی برای مدل Zetal۱۲ نشان داده شده است. نتایج این بررسی بر روی سایر روابط منتخب در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول‌ها،  $P_b$  نشان‌دهنده‌ی

جدول ۵. نتایج بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها.

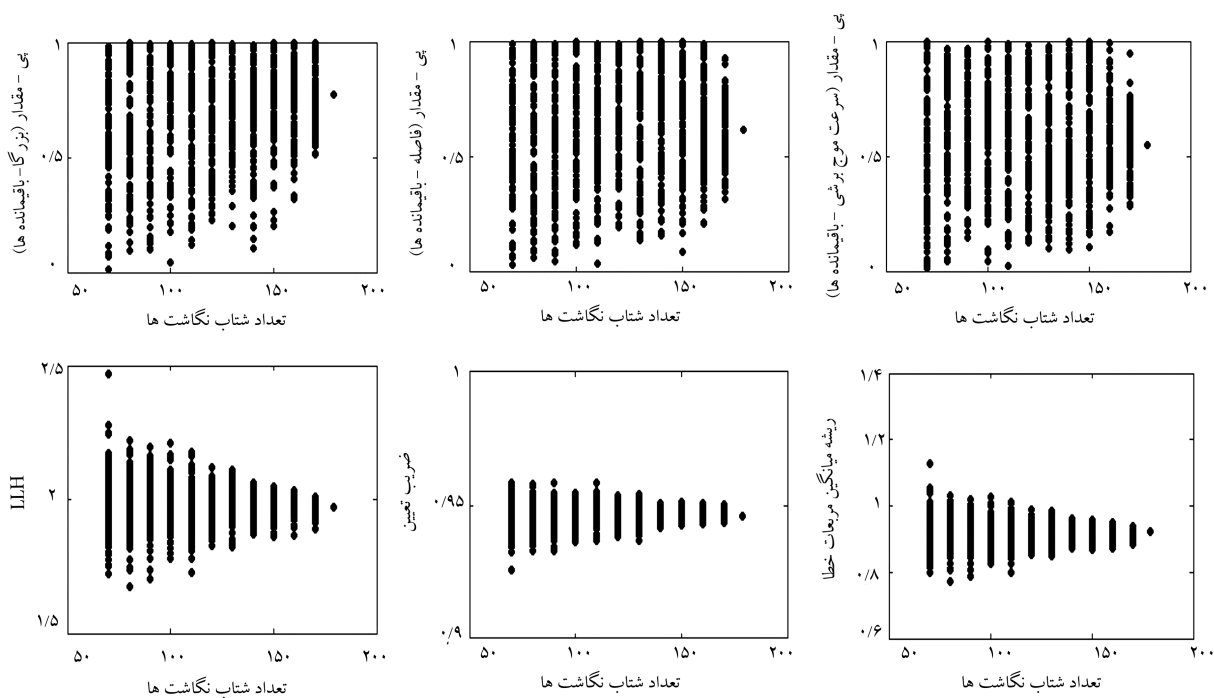
رابطه‌ی کاهندگی	میانگین باقیمانده‌ها	پی - مقدار			
		انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگای گشتاوری		انحراف باقیمانده‌ها در برابر معیار فاصله	
		$P_b$	$P_a$	$P_b$	$P_a$
Setal۱۲	۰٫۰۰۰۳۸	۰٫۰۰۶۲	۰٫۰۰۳۶	۰٫۰۰۱۳	۰٫۸۴۷۷
Zetal۱۲	۰٫۱۵۰۰۰	۰٫۷۷۴۴	۰٫۱۲۳۶	۰٫۶۱۴۳	۰٫۱۴۰۸
Getal۰۷	-۰٫۱۴۵۲	۰٫۰۰۷۰	۰٫۰۳۰۴	۰٫۱۶۲۲	۰٫۲۲۶۳
CB۰۸	۰٫۰۶۴۸	۰٫۰۲۵۱	۰٫۹۸۲۹	۰٫۶۰۹۰	۰٫۹۵۶۹
BA۰۸	۰٫۲۸۷۱	۰٫۳۷۹۹	۰٫۰۷۱۸	۰٫۸۹۳۲	۰٫۱۹۵۲
CY۰۸	۰٫۳۱۱۴	۰٫۰۹۴۱	۰٫۵۲۷۰	۰٫۰۵۹۴	۰٫۱۲۲۳
AS۰۸	۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۶۴۷	۰٫۵۲۱۳	۰٫۵۵۶۶	۰٫۹۷۲۰
AB۱۰	۰٫۳۸۸۱	۰٫۴۳۱۶	۰٫۳۳۸۸	۰٫۱۷۴۴	۰٫۰۰۱۵
KG۰۴	۰٫۰۱۱۴	۰٫۰۰۹۴	۰٫۷۳۶۵	۰٫۷۸۷۲	۰٫۸۷۶۹
Bindi۱۰	۰٫۳۱۲۸	۰٫۲۹۵۰	۰٫۱۳۴۰	۰٫۸۶۶۰	۰٫۱۱۸۴

رابطه‌ی کاهندگی	میانگین باقیمانده‌ها	پی - مقدار			
		انحراف باقیمانده‌های درون‌رخدادی در برابر بزرگای گشتاوری		انحراف باقیمانده‌های فرارخدادی در برابر معیار فاصله	
		$P_b$	$P_a$	$P_b$	$P_a$
Setal۱۲	۰٫۰۰۰۳۸	۰٫۰۲۶۷	۰٫۲۸۱۵	۰٫۲۳۲۴	۰٫۳۵۰۷
Zetal۱۲	۰٫۱۵۰۰۰	۰٫۶۸۶۶	۰٫۵۹۶۸	۰٫۵۳۹۷	۰٫۶۷۹۴
Getal۰۷	-۰٫۱۴۵۲	۰٫۰۱۹۸	۰٫۶۸۰۴	۰٫۶۳۹۶	۰٫۳۴۵۱
CB۰۸	۰٫۰۶۴۸	۰٫۰۵۳۵	۰٫۵۴۷۹	۰٫۴۸۶۲	۰٫۲۲۴۷
BA۰۸	۰٫۲۸۷۱	۰٫۴۷۷۰	۰٫۷۲۹۱	۰٫۶۸۹۵	۰٫۴۹۰۳
CY۰۸	۰٫۳۱۱۴	۰٫۲۲۸۰	۰٫۵۰۶۳	۰٫۴۴۰۷	۰٫۱۷۸۸
AS۰۸	۰٫۰۰۱۶	۰٫۱۷۱۱	۰٫۸۵۲۲	۰٫۸۲۹۰	۰٫۰۷۵۸
AB۱۰	۰٫۳۸۸۱	۰٫۴۸۹۵	۰٫۷۰۷۵	۰٫۶۷۸۳	۰٫۹۸۷۵
KG۰۴	۰٫۰۱۱۴	۰٫۰۳۸۹	۰٫۲۱۲۷	۰٫۱۴۸۸	۰٫۲۵۵۵
Bindi۱۰	۰٫۳۱۲۸	۰٫۴۴۸۵	۰٫۷۲۷۹	۰٫۷۰۰۸	۰٫۳۴۰۶

### ۵. پایداری روابط کاهندگی

از آنجا که صلاحیت استفاده از یک مدل کاهندگی نباید وابسته به اندازه‌ی مجموعه‌ی داده‌ها باشد (یافتن یک مجموعه داده‌ی بزرگ و قابل اعتماد در بسیاری از مواقع غیرممکن به نظر می‌رسد)، بررسی عدم حساسیت روابط کاهندگی نسبت به تغییر اندازه‌ی مجموعه داده‌های یک ساخت‌گاه در این مطالعه به‌عنوان معیاری نوین جهت بررسی پایداری روابط کاهندگی مورد مطالعه واقع شده است و در این زمینه رویکرد نوینی توسط نویسندگان ارائه شده است. با استفاده از این رویکرد جدید می‌توان روابط پایدار برای یک ساخت‌گاه ویژه را تعیین کرد. شکل ۳، به‌عنوان نمونه تحلیل حساسیت مدل زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ (Zetal۱۲) با استفاده از باز نمونه‌گیری<sup>۹</sup> ۱۰۰ مجموعه داده که به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب شده‌اند، را نشان می‌دهد. این باز نمونه‌گیری بر روی تعداد شتاب‌نگاشت‌های «کل مجموعه داده‌ها، ...، ۸۰، ۷۰» مشروط بر عدم تکرار شتاب‌نگاشت‌ها صورت گرفته است. باز نمونه‌گیری بر روی میزان انحراف باقیمانده‌های روابط کاهندگی در برابر پارامترهای

نواحی اروپا و مدیترانه و همچنین روابط BA۰۸ و CY۰۸ از مجموعه‌ی مدل‌های کاهندگی NGA دارای پیش‌بینی دست‌پایین هستند، از این رو می‌توان در ادامه‌ی مقایسه‌ی نتایج روابط منتخب کاهندگی از این روابط چشم‌پوشی کرد. همان‌طور که ذکر شده است، عدم انحراف مدل کاهندگی در برابر پارامترهای لرزه‌ی متفاوت چون بزرگای گشتاوری، معیار فاصله و سرعت موج برشی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های یک مدل کاهندگی مطلوب به‌شمار می‌رود، با توجه به این نکته و با بررسی نتایج انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای مختلف لرزه‌ی، رابطه‌ی کاهندگی Zetal۱۲ دارای کمترین مقادیر انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای مختلف لرزه‌ی است. در طرف مقابل، مدل‌های Setal۱۲ و Getal۰۷ با وجود پیش‌بینی تقریباً مناسب، دارای انحراف چشم‌گیری در برابر پارامترهای مختلف لرزه‌ی هستند. همچنین مدل CB۰۸ با وجود میزان انحراف قابل قبول در برابر معیار فاصله و سرعت موج برشی، در برابر بزرگای گشتاوری به شدت انحراف نشان می‌دهد، از این رو مدل مناسبی برای ساخت‌گاه مورد بررسی محسوب نمی‌شود.



شکل ۳. تحلیل حساسیت رابطه‌ی زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ (Zetal۱۲). [۱۰]

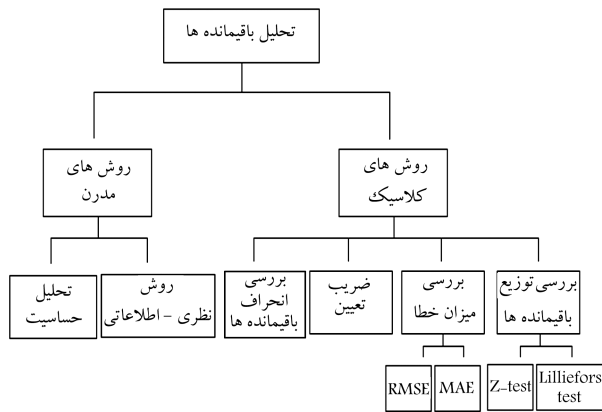
حساسیت همسو با نتایج به دست آمده از سایر معیارهای تحلیل باقیمانده‌هاست، لذا ارائه دهندگان این معیار بر این باورند این معیار سنجش باید در کنار سایر رویکردهای سنجش روابط کاهندگی مورد استفاده قرار گیرد. از این رو در شکل ۵، نموداری شامل کلیه‌ی مراحل مورد استفاده جهت دستیابی به مدل مطلوب در یک ساخت‌گاه نشان داده شده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب در نتایج تحلیل خطر لرزه‌یی، در این نوشتار علاوه بر استفاده از معیارهای کلاسیک و نوین ریاضیاتی جهت ارزیابی روابط، رویکرد جدید تحلیل حساسیت به منظور تعیین رابطه‌ی کاهندگی پایدار و مناسب برای منطقه‌ی فلات ایران توسط نویسندگان ارائه شده است. در مطالعه‌ی صورت گرفته با استفاده از مجموعه‌ی شامل ۱۷۹ شتاب‌نگاشت ناشی از ۳۶ رخداد زمین لرزه، مدل‌های کاهندگی منتخب با استفاده از معیارهای بررسی کیفیت توزیع باقیمانده‌ها، مقادیر خطا، ضریب تعیین، روش نظری - اطلاعات و بررسی میزان انحراف باقیمانده‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از بررسی نحوه‌ی توزیع باقیمانده‌ها براساس آزمون‌های Z و Lilliefors نشان می‌دهد با وجود آنکه تمامی مدل‌های منتخب دارای توزیع نرمال هستند، لیکن تمامی آن‌ها، دارای توزیع ایده‌آل با باقیمانده و انحراف معیار به ترتیب برابر ۰ و ۱ نیستند. از دیگر آزمون‌های کلاسیک تحلیل باقیمانده‌ها در مطالعه‌ی صورت گرفته، بررسی میزان خطا و ضریب تعیین روابط کاهندگی منتخب است. با توجه به نتایج حاصل از سنجش دقت پیش‌بینی روابط با استفاده از دو معیار خطای RMSE و MAE و همچنین ضریب  $R^2$  مدل کاهندگی Zetal۱۲ دارای کمترین مقادیر خطا و بیشترین مقدار ضریب تعیین است. از دیگر ویژگی‌های مهم یک رابطه‌ی کاهندگی قابل استفاده در یک ساخت‌گاه خاص، عدم انحراف (Bias) رابطه در برابر پارامترهای لرزه‌یی متفاوت است؛ که

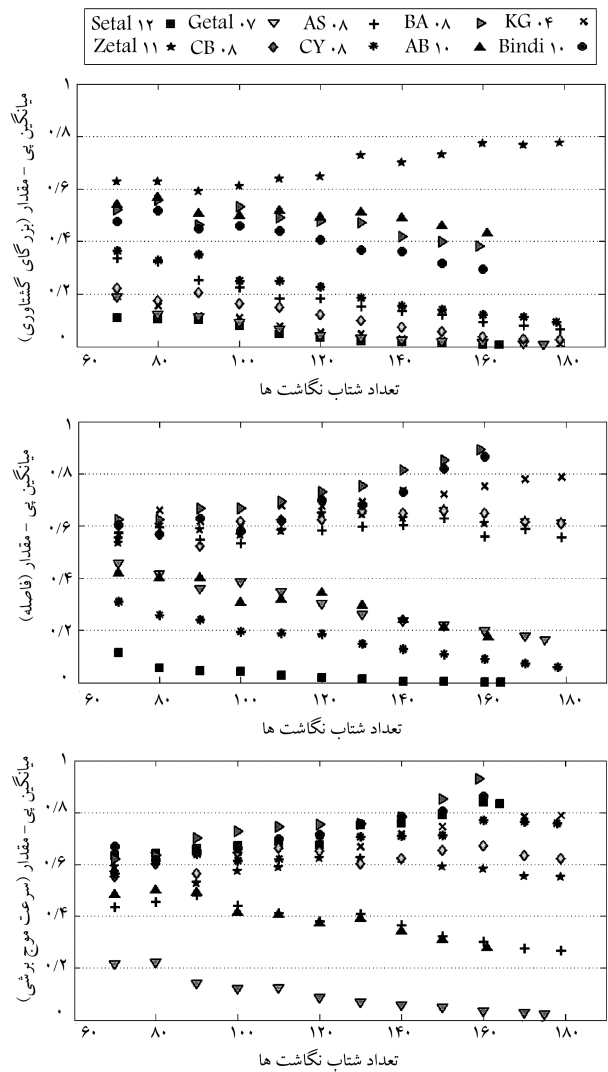
بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی و همچنین معیار نظری - اطلاعات، ضریب تعیین و معیار خطای ریشه‌ی میانگین مربعات خطا صورت گرفته است. در شکل ۳، حساسیت روابط کاهندگی در برابر تغییر مجموعه‌ی داده‌ها کاملاً مشهود است، با وجود این، در روابط کاهندگی انتظار می‌رود با افزایش اندازه‌ی مجموعه‌ی نمونه‌ها (تعداد شتاب نگاشت‌ها)، از میزان انحراف در روابط کاسته شود؛ این در حالی است که در برخی روابط در برابر پارامترهایی چون بزرگای، فاصله‌ی منشاء لرزه‌یی تا محل و سرعت موج برشی، شاهد افزایش انحراف هستیم. به منظور مقایسه‌ی بهتر نتایج تحلیل حساسیت روابط، مقادیر میانگین پی - مقدارها در هر مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که ذکر شد، از یک رابطه‌ی کاهندگی انتظار می‌رود با افزایش تعداد شتاب‌نگاشت‌های موجود در مجموعه‌ی داده‌ها از میزان انحراف‌ها کاسته شده است و پایداری رابطه افزایش باید، که این افزایش پایداری در قالب روند صعودی در پی - مقدارها مشاهده می‌شود. این روند صعودی و پایدار روابط کاهندگی منتخب باید در برابر تمامی پارامترهای لرزه‌یی قابل مشاهده باشد، و در غیر این صورت، نشان‌دهنده‌ی نقص رابطه و انحراف باقیمانده‌ها در برابر پارامتر لرزه‌یی است. با در نظر گرفتن این نکته در شکل ۴، برخی روابط در برابر پارامترهای لرزه‌یی متفاوت با افزایش مجموعه‌ی داده‌ها، افزایش انحراف در برابر پارامترهای لرزه‌یی را نشان می‌دهند. برای روشن‌ساختن این مسئله، روند روابط  $CB \ 0.8$  از مجموعه‌ی روابط  $NGA$  و  $KG \ 0.4$  از روابط مربوط به کشور ترکیه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت در شکل ۴، میانگین پی - مقدارها و در نتیجه میزان انحراف باقیمانده‌ها در برابر معیارهای فاصله و سرعت موج برشی در هر دو رابطه به ترتیب افزایش و کاهش یافته است و پایداری روابط، روند صعودی دارد. از بین روابط منتخب، مدل زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ (Zetal۱۲) [۱۰] بیشترین پایداری را در برابر هر ۳ پارامتر لرزه‌یی بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی دارد. هر چند نتایج به دست آمده از معیار ارائه شده در این نوشتار با عنوان تحلیل





شکل ۵. آزمون‌های آماری مورد استفاده جهت سنجش روابط کاهندگی منتخب.

براساس نتایج باقیمانده‌ها، باقیمانده‌های درون‌رخدادی و باقیمانده‌های فرارخدادی در برابر بزرگای گشتاوری، معیار فاصله و سرعت موج برشی، مدل Zetal۱۲ دارای کمترین مقادیر انحراف در برابر پارامترهای مختلف لرزه‌یابی است. در کنار روش‌های کلاسیک تحلیل باقیمانده‌ها معیار جدید LLH که از نظر کیفی روابط کاهندگی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (انحراف معیار) مورد بررسی قرار گرفته است، که براساس این معیار نیز مدل Zetal۱۲ دارای بیشترین مقدار LLH است. در ادامه، تحلیل حساسیت برای تعیین پایدارترین روابط از بین سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و براساس این معیار نوین ارائه‌شده توسط نویسندگان، مجدداً مدل Zetal۱۲ به‌عنوان پایدارترین رابطه شناخته شده است. سازگاری تقریباً مناسب میان پاسخ‌های روش‌های مورد استفاده، مؤید اعتبار و ارزیابی نهایی مدل‌هاست. یکی از آشکارترین و مهم‌ترین نتایج این پژوهش، برتری مدل کاهندگی زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ (Zeatal۱۲) به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ی فیزیکی منطقه‌ی نسبت به مدل‌های طراحی‌شده با استفاده از داده‌های NGA و یا سایر روابط کاهندگی منتخب است. از نتایج این پژوهش می‌توان به‌عنوان مکمل نظرات کارشناسان خبره در انتخاب رابطه‌ی کاهندگی موردنیاز در تحلیل خطر لرزه‌ی استفاده کرد.



شکل ۴. میانگین پی - مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌ها در برابر بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت.

### پانویس‌ها

1. moment magnitude
2. next generation attenuation models
3. specific barrier model
4. effective peak acceleration
5. Pacific earthquake engineering research center
6. root mean squared error
7. mean absolute error

8. Kullback-Leibler
9. re-sampling

### منابع (References)

1. Toro, G. "The effects of ground-motion uncertainty on seismic hazard results: Examples and approximate re-

- sults" Proc. of the Annual Meeting of the Seismological Society of America (2006).
2. Shoja-Taheri, J., Naserieh, S. and Hadi, G. "A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau", *Earthquake Engineering*, **14**(2), pp. 278-292 (2010).
  3. Mousavi, M., Ansari, A., Zafarani, H. and Azarbakht, A. "Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analyzes in Zagros region, Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **16**(8), pp. 1184-1207 (2012).
  4. Berberian, M. and Mohajer Ashjai, A. "Seismic risk map of Iran, a proposal", *Geol. Surv., Iran*, **40**, pp. 121-148 (1977).
  5. Shoja-Taheri, J. and Niazi, M. "Seismicity of the Iranian plateau and bordering regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**, pp. 477-489 (1981).
  6. BHRC, Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings-Standard No. 2800. 2nd ed, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran (1999).
  7. Berberian, M. "Contribution to the seismotectonics of Iran (Part 2)", Geological Survey of Iran, Report 39 (1976).
  8. Chen, S.Z. and Atkinson, G.M. "Global comparisons of earthquake source spectra", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**(3), pp. 885-895 (2002).
  9. Saffari, H. and et al. "Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran", *Earthquake Spectra*, **28**(1), pp. 257-276 (2012).
  10. Zafarani, H. and Soghrat, M. "Simulation of ground motion in the Zagros region, Iran using the specific barrier model and stochastic method", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **102**(5), pp. 2031-2045 (2012).
  11. Ghodrati Amiri, G., Mahdavian, A. and Manouchehri Dana, F. "Attenuation relationships for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **11**(4), pp. 469-492 (2007).
  12. Boore, D.M. and Atkinson, G.M. "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), pp. 99-138 (2008).
  13. 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 (2008).
  14. PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center, NGA Database, University of California, Berkeley. Available from: <http://peer.berkeley.edu/ngawest/nga>.
  15. Chiou, B.S.J. and Youngs, R.R. "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 173-215 (2008).
  16. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. "Summary of the abrahamson & silva NGA ground motion relations", *Earthquake Spectra*, **24**, pp. 67-97 (2008).
  17. 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).
  18. Kalkan, E. and Gülkan, P. "Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey", *Earthquake Spectra*, **20**(4), pp. 1111-1138 (2004).
  19. Bindi, D. and et al. "Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA)", *Bull. Earthquake Eng.*, **8**(5), pp. 1209-1230 (2010).
  20. Kaklamanos, J., Baise, L.G. and Boore, D.M. "Technical note: Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice", *Earthquake Spectra*, **27**(4), pp. 1219-1235 (2011).
  21. Bindi, D., Luzi, F., Pacor, G.F. and Castro, R.R. "Ground-motion predictions from empirical attenuation relationships versus recorded data: The case of the 1997-1998 umbria-marche, central Italy, strong-motion data set", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**(3), pp. 984-1002 (2006).
  22. Scasserra, G., Stewart, J.P., Bazzurro, P., Lanzo, G. and Mollaioli, F. "A comparison of NGA ground-motion prediction equations to Italian data", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(5), pp. 2961-2978 (2009).
  23. Scherbaum, F., Cotton, F. and Smit, P. "On the use of response spectralreference data for the selection of ground-motion models for seismic hazard analysis: The case of rock motion", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **94**(6), pp. 341-348 (2004).
  24. Scherbaum, F., Delavaud, E. and Riggelsen, C. "Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(6), pp. 3234-3247 (2009).
  25. Delavaud, E., Scherbaum, F., Kuehn, N. and Riggelsen, C. "Information-theoretic selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis: An applicability study using Californian data", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(6), pp. 3248-3263 (2009).
  26. Montgomery, C.D. and Runger, C.G., *Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons (2003).
  27. Turchin, P., Grinin, L., de Munck, V.C. and Korotayev, A., *History and Mathematics: Historical Dynamics and Development of Complex Societies*, Moscow, KomKniga, 216 p. (2007).