

ارزیابی پایداری روابط کاهندگی نسبت به پایگاه داده‌های ایران

علیرضا آذربخت

دانشیار، دانشگاه اراک، اراک، ایران
a-azarbakht@araku.ac.ir

زینت رجبی

دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، اراک، ایران
matinrajabi@yahoo.com

سحر راهیما

دانشجو دکتری، مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه ایسلند، ایسلند
sahar@hi.is

کلید واژه‌ها: مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین، تحلیل حساسیت، نسل جدید روابط کاهندگی، تحلیل خطر لرزه‌ای

چکیده

یکی از عنصرهای کلیدی در تحلیل خطر لرزه‌ای، انتخاب مناسب‌ترین مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین (GMPE) است. امروزه گسترش و تنوع مدل‌های کاهندگی قابل دسترس، این انتخاب را به یک چالش علمی تبدیل کرده است. به این منظور، در این مطالعه ارزیابی پایداری مجموعه‌ای از مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین (GMPE) با استفاده از روش جدید تحلیل حساسیت در برابر بازنمونه‌گیری از داده‌ها (RSA) براساس مجموعه داده‌هایی از ایران مورد بررسی قرار گرفت. چهار دسته رابطه کاهندگی مورد بررسی در این مقاله شامل: (۱) مدل‌های کاهندگی محلی که براساس داده‌های ایران توسعه یافته‌اند. (۲) مدل‌های کاهندگی منطقه‌ای ویژه اروپا و آسیای میانه. (۳) نسل جدید روابط کاهندگی NGA-west1 که در سال ۲۰۰۸ ارائه شده‌اند و (۴) نسل جدید روابط کاهندگی که براساس پایگاه داده‌های بروز شده در سال ۲۰۱۴ تحت عنوان NGA-west2 توسعه یافته‌اند، می‌باشند. براساس دیدگاه RSA، مدلی مناسب خواهد بود که افزایش اندازه داده‌ها سبب کاهش انحراف باقیمانده‌ها در برابر تمامی پارامترهای لرزه‌ای شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برخی از مدل‌های در نظر گرفته شده در این مقاله نسبت به مجموعه داده‌های ایران کاملاً حساس هستند. براساس روش RSA مدل‌های راهیما و همکارانش GP14 و زعفرانی و همکارانش Zetal12 نسبت به سایر مدل‌ها براساس داده‌های ایران با ثبات‌ترین می‌باشند.

مقدمه

پیش‌بینی معقول و منطقی از پارامترهای حرکت زمین مورد انتظار، همچون حداکثر شتاب زمین PGA، حداکثر سرعت زمین PGV و شتاب طیفی SA نقش اساسی را در ارزیابی قابلیت اعتماد در تحلیل خطر لرزه‌ای ایفا می‌کند. در واقع معادلات پیش‌بینی حرکت زمین GMPEs از مهم‌ترین مولفه‌های موثر در نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی PSHA می‌باشند. زیاد شدن تعداد و کیفیت شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از حرکت زمین در پایگاه‌های مختلف در سراسر جهان، در دهه‌های اخیر تعداد زیادی روابط کاهندگی منطقه‌ای و سراسری را نتیجه داده است Douglas (2011). با این حال، مدل‌های مختلف جهانی در شرایط زمین ساختی مختلف خروجی‌های کاملاً متفاوتی را نتیجه می‌دهند (Shoja-Taheri et al., 2010; Kaklamanos and Baise, 2011; Mousavi et al., 2012). منشاء این تفاوت‌ها می‌تواند در پایگاه داده‌های در نظر گرفته شده، شکل ریاضیاتی مدل‌های کاهندگی، روش در نظر گرفته شده برای توسعه مدل و انتخاب متغیرهای ورودی باشد. روش‌های آماری و ریاضیاتی زیادی همچون (مربع خی، آزمون کلموگروف، آزمون‌های نسبت خطا (همانند مجذور مربعات خطا RMSE و متوسط قدر مطلق خطاها MAE)، ضریب تعیین و ضریب کارایی (ناش-ساتکلیف) برای ارزیابی سازگاری بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده حرکت زمین وجود دارند. همچنین دو روش مختلف LH (Scherbaum et al., 2004) و LLH (Scherbaum et al., 2009) براساس حداکثر درست‌نمایی، برای ارزیابی روابط کاهندگی ارائه

شده‌اند. روش LH یک ابزار قدرتمند در رتبه‌بندی روابط کاهندگی محسوب می‌شود (Scherbaum et al., 2004). اما وابستگی به تعداد مجموعه داده‌ها و همچنین یکسری از فرضیات اولیه (به عنوان مثال تعیین آستانه پذیرش) از ضعف‌های این روش می‌باشد. بنابراین رویکرد نظری-اطلاعاتی LLH برای غلبه بر این ضعف‌ها پدید آمده است (Scherbaum et al., 2009).

علاوه بر این دو روش مبتنی بر درست‌نمایی LH و LLH و با الهام گرفتن از سایر روش‌های تحلیل باقیمانده‌ها، محققان روشی مبتنی بر فاصله اقلیدسی را برای رتبه‌بندی با توجه به عدم قطعیت حرکت‌های زمین و اندازه‌گیری انحراف بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی معرفی کرده‌اند (Kale and Akkar, 2013). همچنین در سال‌های اخیر محققان مقالات جامعی در زمینه‌ی انتخاب و رتبه‌بندی روابط کاهندگی بر روی یک مجموعه داده مشخص براساس روابط کاهندگی محلی و جهانی منتخب با بکارگیری روش‌های کلاسیک و مدرن ارائه کرده‌اند (Scassera et al., 2012; Mousavi et al., 2011; Kakkamanos and Baise, 2010; Shoja-Taheri et al., 2009) که در همه‌ی آنها مجموعه داده‌های استفاده شده در طول این مطالعات ثابت فرض شده‌اند. با این حال، بررسی حساسیت روابط کاهندگی نسبت به مجموعه شتاب‌نگاشت‌های داده‌شده هنوز به تحقیقات بیش‌تری نیاز دارد. به همین منظور آذربخت و همکارانش یک رویکرد نوین تحت عنوان تحلیل حساسیت در برابر بازنمونه‌گیری از داده‌ها را تحت عنوان روش RSA برای ارزیابی روابط کاهندگی ارائه داده‌اند (Azarbakht et al. 2014). آنها در این مقاله به منظور نشان دادن کاربرد روش RSA پایداری چهار رابطه‌ی NGA2008 را براساس پایگاه داده‌های خودشان مورد ارزیابی قرار دادند. که نتایج عدم پایداری و ثبات این مدل‌ها را نسبت به پایگاه داده‌های خودشان نشان می‌دهد و بنظر می‌رسد که در استخراج نسل جدید روابط کاهندگی به این ویژگی توجهی نشده است (Azarbakht et al. 2014). نویسندگان مقاله بر این باورند که، این روش یک ابزار قدرتمند در ارزیابی حساسیت مدل‌های کاهندگی محسوب می‌شود و می‌تواند به عنوان یک ویژگی محوری در انتخاب روابط کاهندگی در تحلیل خطر لرزه‌ای استفاده شود. از اینرو در این مطالعه پایداری روابط کاهندگی منتخب براساس روش RSA و با استفاده از یک کاتالوگ لرزه‌ای مربوط به ناحیه ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مقاله می‌تواند در مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای ناحیه ایران مورد استفاده قرار گیرد.

بانک اطلاعاتی زمین لرزه‌ها

مجموعه داده‌های جمع آوری شده برای این مطالعه شامل ۶۹۱ شتاب‌نگاشت از ۸۵ رخداد ثبت شده بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۳ میلادی می‌باشد. این شتاب‌نگاشت‌های توسط شبکه شتاب‌نگاری ایران ۱ (ISMN)، که از سال ۱۹۷۳ شروع به کار نموده و توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ۲ (BHRC) اداره می‌شود، ثبت شده‌اند (BHRC, 2013). شتاب‌نگاشت‌های انتخابی دارای دو مولفه افقی و یک مولفه قائم می‌باشند، که مقدار میانگین هندسی دو مولفه افقی به عنوان مقدار مشاهداتی داده‌ها در نظر گرفته شد. همچنین برای کاستن از عدم قطعیت‌های حاصل از تبدیل مقیاس‌های مختلف پارامترهای لرزه‌ای، صرفاً رخدادهایی که بزرگای گشتاوری آنها ثبت شده است، و پارامتر VS30، سرعت موج برشی خاک در آنها مشخص بود، انتخاب شده‌اند.

بزرگای گشتاوری زلزله‌های انتخابی بین ۷/۴-۵، فاصله‌ی ثبت شده‌ی بین صفر تا ۲۰۰ کیلومتر، سرعت موج برشی بین ۱۸۰-۱۳۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. مکانیزم گسلش این رخدادها امتدادلغز، معکوس یا نرمال می‌باشد. در جدول (۱) لیست رخداد‌های منتخب و اطلاعات مربوط به هر یک نمایش داده شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به زلزله‌های انتخابی در این مطالعه

ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها	ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها	ردیف	تاریخ رخداد	بزرگای گشتاوری	تعداد شتاب‌نگاشت‌ها
۱	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	۷/۳۵	۶	۳۰	۲۰۰۰/۰۳/۲۱	۵/۴	۳	۵۸	۲۰۰۸/۰۵/۰۵	۵/۲	۲
۲	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۷/۱۰	۸	۳۱	۲۰۰۰/۰۵/۲۳	۵/۲	۳	۵۹	۲۰۰۸/۰۹/۱۰	۶	۱۰
۳	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	۷/۲۰	۷	۳۲	۲۰۰۰/۰۶/۲۳	۵	۶	۶۰	۲۰۰۸/۰۹/۱۱	۵/۱	۲
۴	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	۷/۳۷	۵	۳۳	۲۰۰۰/۰۸/۱۶	۵	۶	۶۱	۲۰۰۸/۰۹/۱۷	۵/۲	۳
۵	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	۵/۹۰	۱۰	۳۴	۲۰۰۱/۰۳/۲۸	۵/۳	۵	۶۲	۲۰۰۸/۱۲/۷	۵/۴	۵
۶	۱۹۹۵/۱۰/۱۵	۵	۲	۳۵	۲۰۰۲/۰۲/۱۷	۵/۳	۳	۶۳	۲۰۰۸/۱۲/۸	۵/۱	۵
۷	۱۹۹۶/۱۰/۱۸	۵/۳	۲	۳۶	۲۰۰۲/۰۴/۱۷	۵/۲	۳	۶۴	۲۰۱۲/۰۱/۱۹	۵/۲	۳
۸	۱۹۹۶/۱۱/۱۸	۵/۲	۲	۳۷	۲۰۰۲/۰۴/۱۹	۵/۲	۱۰	۶۵	۲۰۱۲/۰۲/۲۷	۵	۳
۹	۱۹۹۷/۰۲/۲۴	۶/۴	۶	۳۸	۲۰۰۲/۰۴/۲۴	۵/۳	۶	۶۶	۲۰۱۲/۰۷/۱	۵/۲	۶
۱۰	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	۶	۱۴	۳۹	۲۰۰۲/۰۶/۲۲	۶/۴	۴۰	۶۷	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۶/۱	۳۲

¹ Iran Strong Motion Network

² Building and Housing Research Center



۴۳	۶/۲	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۶۸	۵	۵/۲	۲۰۰۲/۰۹/۲	۴۰	۳	۵/۳	۱۹۹۷/۰۳/۲	۱۱
۳	۵/۱	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۶۹	۵	۵/۲	۲۰۰۲/۱۲/۲۴	۴۱	۲	۵/۵	۱۹۹۷/۰۴/۱۹	۱۲
۵	۵/۵	۲۰۱۲/۰۸/۱۴	۷۰	۳	۵/۲	۲۰۰۳/۰۱/۱۱	۴۲	۳	۵/۳	۱۹۹۷/۰۵/۵	۱۳
۳	۵/۳	۲۰۱۲/۰۸/۱۵	۷۱	۳	۵/۸	۲۰۰۳/۰۲/۱۴	۴۳	۱۸	۷/۲	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۱۴
۵	۵/۳	۲۰۱۲/۱۱/۷	۷۲	۵	۵/۸	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۴۴	۱۰	۵/۷	۱۹۹۷/۰۶/۲۵	۱۵
۹	۵/۱	۲۰۱۲/۱۲/۲۳	۷۳	۴	۶	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۴۵	۶	۶/۶	۱۹۹۸/۰۳/۱۴	۱۶
۶	۵/۶	۲۰۱۳/۰۱/۲۱	۷۴	۶	۶	۲۰۰۳/۰۸/۲۱	۴۶	۴	۵/۷	۱۹۹۸/۰۴/۱۰	۱۷
۱۵	۶	۲۰۱۳/۰۴/۹	۷۵	۲	۵	۲۰۰۳/۱۱/۲۸	۴۷	۱۳	۵/۹	۱۹۹۸/۰۷/۹	۱۸
۴	۵/۱	۲۰۱۳/۰۴/۹	۷۶	۱۸	۶/۹	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۴۸	۱۱	۵	۱۹۹۸/۰۸/۲۱	۱۹
۵	۵/۵	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	۷۷	۳۹	۶/۴	۲۰۰۴/۰۵/۲۸	۴۹	۴	۵/۴	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	۲۰
۵	۵/۷	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	۷۸	۱۹	۶/۲	۲۰۰۴/۱۰/۷	۵۰	۹	۶/۶	۱۹۹۹/۰۳/۴	۲۱
۳	۵	۲۰۱۳/۰۵/۱	۷۹	۱۴	۵/۳	۲۰۰۵/۰۱/۱۰	۵۱	۱۶	۶/۳	۱۹۹۹/۰۵/۶	۲۲
۴	۵	۲۰۱۳/۰۵/۶	۸۰	۲۲	۶/۵	۲۰۰۵/۰۲/۲۲	۵۲	۲	۵/۷	۱۹۹۹/۰۵/۶	۲۳
۶	۵/۶	۲۰۱۳/۱۱/۲۲	۸۱	۱۰	۵/۷	۲۰۰۵/۱۱/۲۷	۵۳	۷	۵/۲	۱۹۹۹/۰۹/۲۴	۲۴
۵	۵/۷	۲۰۱۳/۱۱/۲۲	۸۲	۸	۵/۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۰	۵۴	۴	۵/۲	۱۹۹۹/۱۰/۳۱	۲۵
۳	۵/۱	۲۰۱۳/۱۱/۲۳	۸۳	۲۱	۶/۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۵۵	۱۴	۵/۴	۱۹۹۹/۱۱/۱۹	۲۶
۶	۵/۵	۲۰۱۳/۱۱/۲۴	۸۴	۶	۵/۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۵۶	۵	۵/۳	۱۹۹۹/۱۱/۲۶	۲۷
۱۳	۵/۷	۲۰۱۳/۱۱/۲۸	۸۵	۴	۵/۷	۲۰۰۶/۰۶/۲۸	۵۷	۳	۵/۳	۲۰۰۰/۰۲/۲	۲۸
								۳	۵/۴	۲۰۰۰/۰۳/۵	۲۹

مدل‌های کاهندگی منتخب

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در ماهیت لرزه‌ای فلات ایران، می‌توان همه زلزله‌های این منطقه را، رخدادهایی کم عمق و درون صفحه‌ای دانست (Berberian (1976). علاوه بر آن، محققین نشان داده‌اند که این رخدادها شباهت زیادی با رخدادهای ناحیه ترکیه و کالیفرنیا دارند (Chen and Atkinson (2002). براساس این گزارشات، معادلات پیش‌بینی حرکت زمین از چهار گروه زیر انتخاب شده‌اند.

- گروه ۱: مدل‌های زمین‌لرزه‌ای که ویژه منطقه ایران طراحی شده‌اند.
- گروه ۲: مدل‌های زمین‌لرزه‌ای که ویژه منطقه اروپا و آسیای مرکزی طراحی شده‌اند.
- گروه ۳: مدل‌های کاهندگی نسل جدید (NGA)^۳. در سال ۲۰۰۸
- گروه ۴: مدل‌های کاهندگی نسل جدید (NGA-West2). توسعه یافته در سال ۲۰۱۴

نسل جدید روابط کاهندگی در سال ۲۰۰۸، برای استفاده در شرایط جغرافیایی گوناگون تنها برای زلزله‌های سطحی و کم‌عمق توسعه یافته‌اند. از ویژگی‌های این مدل‌ها می‌توان به استفاده از پارامترهای لرزه‌ای گوناگون و جدید، پیچیدگی فرم تابع و همچنین جامعه آماری بالای پایگاه داده‌ها (۳۵۵۱ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۷۳ رخداد) اشاره نمود. همچنین از سال ۲۰۰۸ تا امروز پایگاه داده‌های NGA با استفاده از زلزله-هایی با بزرگای کوچک تا بزرگ از رخدادهای سراسر جهان بروز شده است (۲۱۵۳۹ شتاب‌نگاشت ثبت شده از ۱۲۶۵ رخداد) و پنج رابطه کاهندگی NGA2008 با استفاده از این پایگاه داده توسعه و بهبود یافته‌اند. مدل‌های بروز شده این روابط در سال ۲۰۱۴ منتشر شده که ما در این مطالعه از هر دو گروه استفاده کرده‌ایم. برخی از مطالعات اخیر معیارهایی جهت انتخاب روابط کاهندگی منتخب ارائه داده‌اند (Bommer et al., 2010; Cotton et al., 2008). چند نکته از این معیارها که در این مطالعه بکار رفته به شرح زیر است:

۱. مدلهایی که برای محیط‌های زمین‌ساختی نامناسب یا متفاوت با ناحیه مورد نظر (به عنوان مثال فرورانشی یا مناطق آتشفشانی) طراحی شده‌اند، حذف شوند.
۲. مدلهایی که در یکی از مقالات پبیر یا در سایر مقالات معتبر منتشر نشده باشند.
۳. مدلهایی که توسط یک انتشار جدیدتر جایگزین شده‌اند از مطالعه حذف شوند.
۴. مدلهایی که مجموعه داده‌های استفاده شده در استخراج رابطه ارائه نشده باشد.
۵. مدلهایی که در آن پارامترهای بزرگای غیر خطی وابسته یا بزرگای وابسته به فاصله وجود ندارد، حذف شدند (Bommer et al., 2010; Cotton et al., 2008). این مسئله تنها باید در مدل‌های تجربی بررسی شود و نه در مدل‌های فیزیکی.
۶. مدلهایی که ضرایب برای تعیین مولفه‌های درون رخدادی و فرا رخدادی مشخص نشده، حذف شدند.

³ Next Generation Attenuation models

۷. مدل‌هایی که از تعاریف متغیرهای نامناسب مانند M_L در آن‌ها استفاده و یا اثر سایت در آن لحاظ نشده، حذف شدند.
۸. حداکثر مقدار پارامترهای مختلف مدل در انطباق با محدوده‌ی مجموعه داده‌ها خیلی کوچکتر باشد، مدل حذف می‌شود.

با اعمال این محدودیت‌ها ۱۲ رابطه انتخاب شد که جدول (۲) جزئیات مربوط به مدل‌های منتخب را نشان می‌دهد. همچنین این نکته قابل ذکر است که در این مطالعه به منظور کاهش عدم قطعیت‌ها و فرضیات مربوط به پارامترهای متنوع لرزه‌ای در روابط کاهندگی منتخب از نتایج گزارش کاکلامنوس و همکاران در سال ۲۰۱۱ (Kaklamanos et al., 2011) استفاده شده است.

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

ردیف	رابطه کاهندگی	مخفف	منطقه حاکم	فاصله (کیلومتر)	بزرگای گشتاوری
۱	بور و اتکینسون ۲۰۰۸	BA08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸
۲	کمپل و بزرگنیا ۲۰۰۸	CB08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۷/۵
۳	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸	AS08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۵-۸/۵
۴	چیو و یانگز ۲۰۰۸	CY08	کالیفرنیا	۰-۲۰۰	۴-۸
۵	کالکان و گولکان ۲۰۰۴	KG04	ترکیه	۱-۲۵۰	۴-۷/۵
۶	آکار و کاکنان ۲۰۱۰	AC10	ترکیه	۰-۲۰۰	۳/۵-۷/۶
۷	زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲	Zetal12	ایران	۱-۲۰۰	۴/۴-۷/۵
۸	راهیما و همکاران ۲۰۱۴	GP14	ایران	۰-۲۰۰	۵-۷
۹	بور و اتکینسون ۲۰۱۴	BSSA14	کالیفرنیا	۰-۴۰۰	۳-۸/۵
۱۰	کمپل و بزرگنیا ۲۰۱۴	CB14	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳/۳-۸
۱۱	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴	ASK14	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳-۸/۵
۱۲	چیو و یانگز ۲۰۱۴	CY14	کالیفرنیا	۰-۳۰۰	۳/۵-۸

روش تحلیل باز نمونه‌گیری از داده‌ها

هر رابطه کاهندگی براساس یک مجموعه داده از حرکت‌های زمین بدست آمده است و با رخدادهای بیشتر می‌توان پایگاه داده‌ها را به روز رسانی کرد؛ با این حال یک تغییر کوچک در پایگاه داده‌های حرکت زمین نباید تاثیر قابل توجهی بر روی خروجی مدل کاهندگی داشته باشد. به بیان دیگر، اگر یک رابطه نسبت به یک تغییر کوچک در مجموعه داده‌ها به شدت حساسیت نشان دهد، بنابراین مقادیر پیش بینی شده توسط آن غیرقابل اعتماد و عدم قطعیت در این مدل قابل توجه می‌شود. ایده اصلی این روش، بررسی میزان پایداری روابط کاهندگی با تکیه بر تعیین میزان انحراف بین باقیمانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای لرزه‌ای ورودی می‌باشد. آزمون فرض صفر بعنوان عدم وجود انحراف در خط برازش داده شده براساس درونیابی خطی برای مجموعه داده‌ها با سطح معناداری ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. مراحل اصلی این روش بصورت زیر خلاصه می‌شود.

- انتخاب رابطه کاهندگی
 - برای هر رابطه کاهندگی، تعداد رکورد کاهشی N ، براساس انتخاب تعداد تصادفی یکنواخت با توجه به توزیع باقیمانده‌ها و فاصله اندازه گیری شده، انتخاب می‌شود (N باید کوچکتر از حداکثر مقدار شتابنگاشت‌ها باشد).
 - P -value مربوط به مولفه‌های باقیمانده (به عنوان مثال، باقیمانده‌های درون رخدادی و فرارخدادی) در برابر انواع مختلف پارامترهای ورودی (به عنوان مثال، بزرگا، انواع فاصله‌ها و سرعت موج برشی) و همچنین مقادیر مختلف شاخص‌های آماری (به عنوان مثال، LLH ، R -square و...) براساس مجموعه داده‌های کاهش یافته؛ که در مرحله ۲ توضیح داده شد، محاسبه شود.
 - بمنظور افزایش دقت در انتخاب تصادفی، مراحل ۱، ۲ و ۳، K بار تکرار شود.
 - مراحل ۲، ۳ و ۴ برای یک تعداد مجموعه داده‌های اولیه فرض شده (N) تا بیشترین تعداد از کل داده‌ها، با یک روند افزایشی ثابت تکرار می‌شود.
 - شاخص‌های بدست آمده در مرحله ۳ در مقابل تعداد داده‌ها N رسم می‌شود. همچنین میانه هر شاخص مرحله ۳ برای نمونه N تایی به عنوان شاخص نهایی محاسبه می‌شود.
- قبل از محاسبه‌ی مقادیر RSA ابتدا به منظور افزایش قابلیت اطمینان از نتایج RSA ، فاکتور K که در گام سوم روش RSA بیان شده، به صورت مناسب تعیین می‌شود. روند انتخاب این فاکتور بصورت زیر تعیین می‌شود.



۱. P-value مربوط به باقیمانده‌ها در مقابل انواع مختلف پارامترهای ورودی، براساس زیر مجموعه‌های انتخاب شده (N ثابت) محاسبه شود (در این رساله باقیمانده‌ی فرارخدادی در مقابل پارامتر فاصله محاسبه شده اند).
 ۲. میانه مقدارهای P-value محاسبه و ذخیره می‌شود.
 ۳. بمنظور افزایش دقت در روند انتخاب تصادفی، مراحل ۱، ۲ و ۳ را T بار تکرار می‌کنیم (در این مطالعه T=50 فرض می‌شود).
 ۴. اختلاف بین حداکثر و حداقل میانه‌های P-value محاسبه می‌شود.
 ۵. مراحل ۱ تا ۵ هر بار با افزایش تدریجی K (در مطالعه ۵۰ تا ۵۰۰) تا زمانی که اختلاف در مرحله ۵ به کمتر از ۰/۰۵ برسد، تکرار می‌شود.
- سپس اختلاف‌های محاسبه شده در مرحله ۵ در مقابل K رسم می‌شود.
- به منظور اطمینان بیشتر، در بدست آوردن K، میانگین P-value برای مدل‌های AS08، Zetal12 و BSSA14، براساس باقیمانده‌های فرارخدادی در مقابل R برای زیرمجموعه‌ای با ۵۰۰ داده و ۵۰ بار تکرار بدست آمده است. با توجه به محاسبات انجام شده، K بهینه برابر با ۴۰۰ بدست آمده‌است. بنابراین تمام محاسبات RSA در این مقاله براساس K=400 انجام گرفته است.

ارزیابی پایداری روابط کاهندگی منتخب با استفاده از روش تحلیل باز نمونه گیری از داده‌ها

به منظور بررسی پایداری روابط کاهندگی، پارامتر PGA مجموعه‌ی ۱۲ تایی روابط کاهندگی منتخب با مجموعه داده‌های ۶۹۱ شتاب نگاشتی، براساس روش RSA مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، انواع مختلف باقیمانده‌ها برای این ۱۲ رابطه کاهندگی با در نظر گرفتن اثرات تصادفی کلی و با استفاده از معادله (۱) تعریف شده است.

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

که در آن η_i باقیمانده‌ی درون‌رخدادی i امین رخداد و $\ln \hat{Y}_{ij}$ ، $\ln Y_{ij}$ و ε_{ij} بترتیب، مقدار متوسط پیش‌بینی شده، مقدار مشاهداتی و باقیمانده‌های فرارخدادی زامین رکورد از i امین رخداد می‌باشد. فرض می‌شود که η_i و ε_{ij} از هم مستقل و دارای توزیع نرمال با انحراف معیار بترتیب τ^2 و σ^2 می‌باشند. در این نمونه باقیمانده کلی مدل برابر با مجموع باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی می‌باشد و به صورت روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

$$\eta_i = \frac{\tau^2 \sum_{j=1}^{N_i} r_{ij}}{\tau^2 N_i + \sigma^2} \quad (2)$$

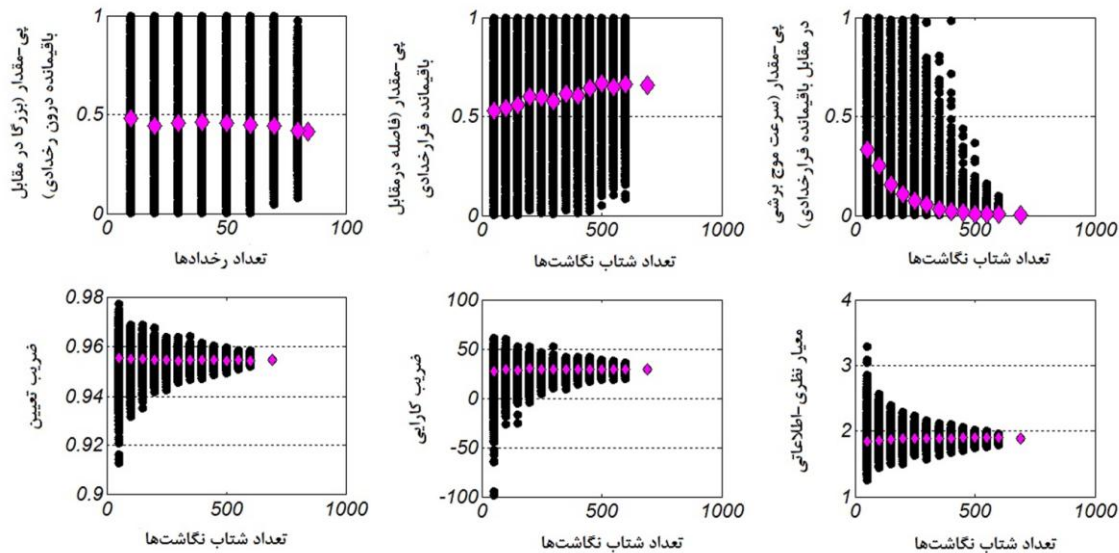
$$\varepsilon_{ij} = r_{ij} - \eta_i \quad (3)$$

با توجه به این نکات، شکل (۱) نتایج RSA را در دوره زمانی ثابت (T=0 s یعنی پارامتر PGA)، برای رابطه کاهندگی آبراهامسون و سیلوا AS08، ۲۰۰۸، با چهارصد مجموعه داده که بصورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انتخاب شده‌اند، (K=400) را نشان می‌دهد. در شکل (۱) پایداری روابط کاهندگی برای پارامترهای لرزه‌ای ورودی بزرگای گشتاوری، فاصله و سرعت موج برشی در مقابل باقیمانده‌های درون‌رخدادی و فرارخدادی (معادلات ۲ و ۳) و بعلاوه ضرایب تعیین (R-square) و کارایی (ضریب E) ناش و ساتکلیف^۴ و معیار نظری-اطلاعاتی LLH در برابر باقیمانده‌ی کل نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱) می‌بینید، مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ ثبات کافی برای زیرمجموعه‌هایی از مجموعه داده‌های کلی مورد مطالعه، حتی زمانی که تعداد داده‌های این زیرمجموعه‌ها به مقدار کلی داده‌ها نزدیک می‌شود؛ نشان نمی‌دهد. براساس دیدگاه RSA، مدل مناسب و پایدار در حالی که اندازه زیرمجموعه داده‌ها افزایش می‌یابد، عملکرد صعودی از خود نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، با افزایش تعداد داده‌ها در این زیرمجموعه‌ها انحراف کمتری در مدل مشاهده شود (Azarbakht et al. 2014). مقدار میانه (نقاط لوزی شکل) در هر نمونه RSA در شکل (۱) در واقع روند RSA را در مقابل تعداد مختلف داده‌ها بیان می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱) می‌بینید نتایج RSA روند پایداری را برای باقیمانده‌های درون‌رخدادی در مقابل بزرگا و همچنین باقیمانده‌های فرارخدادی در مقابل فاصله، از خود نشان می‌دهد. در حالی که این روند در مورد باقیمانده‌های فرارخدادی در مقابل سرعت موج برشی نزولی می‌باشد که نشان دهنده‌ی نقص رابطه و انحراف باقیمانده فرارخدادی در برابر

⁴ Nash – Sutcliffe Model

سرعت موج برشی براساس پایگاه داده‌های ایران می‌باشد. همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، نتایج ضریب تعیین، ضریب کارایی و معیار نظری-اطلاعاتی همگرایی خوبی با افزایش تعداد داده‌ها و رسیدن به تعداد کلی داده‌ها دارند.

به منظور مقایسه میزان پایداری روابط منتخب در کنار یکدیگر، میانه پی-مقدارهای چهار صد مجموعه داده برای انواع باقیمانده‌ها در مقابل پارامترهای لرزه‌ای ورودی در کنار یکدیگر در شکل‌های ۲ تا ۴ رسم شده‌اند. قسمت سمت چپ شکل‌ها مربوط به مدل‌های NGA-west1 و قسمت راست شکل مربوط به مدل‌های NGA-west2 می‌باشد. قسمت وسط نیز دو گروه روابط ویژه ایران و ویژه منطقه اروپا و خاورمیانه را نشان می‌دهد. برای مقایسه راحت‌تر دو گروه روابط NGA با هم، این روابط در دو طرف و به یک شکل می‌باشند.



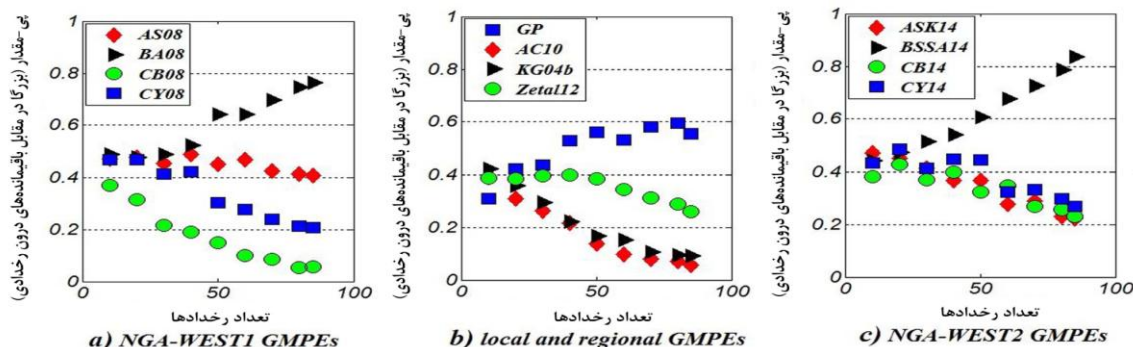
شکل ۱: تحلیل حساسیت رابطه آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ (AS08)

مقایسه تصویری نتایج RSA برای روابط کاهندگی منتخب

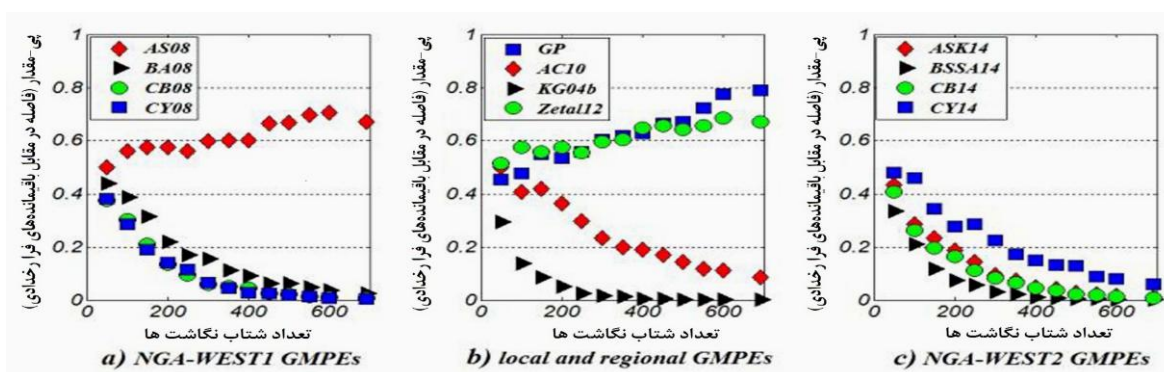
میانه پی-مقدارها برای روابط کاهندگی منتخب محاسبه شده است و نتایج براساس باقیمانده‌های درون رخدادی و فرا رخدادی در مقابل پارامترهای لرزه‌ای در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. اما بدلیل محدودیت تعداد صفحات مقاله نتایج آزمون‌های آماری معرفی شده در مطالعه آورده نشده است. اما به عنوان یک نکته جالب نتایج ضریب تعیین، ضریب کارایی و معیار نظری-اطلاعاتی برای سایر مدل‌ها نیز همچون مدل آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸، روند ثابتی با افزایش تعداد داده‌ها و رسیدن به تعداد کلی داده‌ها دارند. این واقعیت از آنجا منشاء می‌گیرد، که همه این روش‌ها به نوعی میانگین‌گیری بر روی داده‌ها را در روند محاسبات خود لحاظ نموده‌اند.

از سوی دیگر نتایج RSA روابط کاهندگی، برای پارامترهای مختلف لرزه‌ای در مقابل باقیمانده‌های درون رخدادی و فرا رخدادی یک روند ثابت رو به جلو را نشان نمی‌دهد. بررسی جزئیات بیشتر در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان می‌دهد که در میان مدل‌های NGA-west1 و NGA-west2 اگرچه مدل‌های بور و آتکینسون ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ روند صعودی در مقابل پارامتر بزرگا دارند اما در مقابل پارامترهای سرعت موج برشی و فاصله کاملا ناپایداری می‌باشند. همچنین مدل‌های آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ و کمپل و بزرگنیا ۲۰۱۴ پایداری خوبی با داده‌های ایران تنها برای پارامتر فاصله و سرعت موج برشی را به ترتیب نشان می‌دهند.

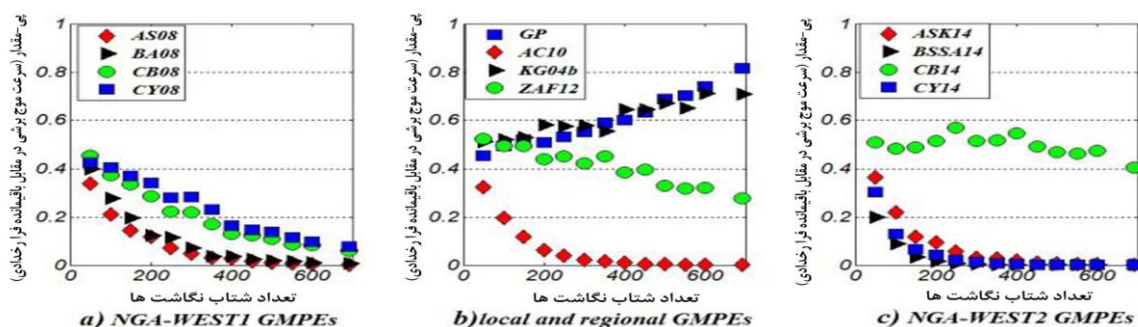
از سوی دیگر، در میان مدل‌های کاهندگی محلی و منطقه‌ای، مدل کالکان و گلکان ۲۰۰۴ در مقابل پارامترهای بزرگا و فاصله روند به شدت نزولی را از خود نشان می‌دهد. همچنین مدل آکار و کالکان عملکرد ضعیف و ناپایداری در مقابل تمام پارامترهای لرزه‌ای دارد. با توجه به موارد فوق، همان طور که در شکل‌های شماره ۲ تا ۴ دیده می‌شود مدل‌های کاهندگی راهیما و همکاران ۲۰۱۴ که براساس برنامه نویسی الگوریتم ژنتیک و زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲، تطابق و ثبات خوبی در مقابل تمام پارامترهای لرزه‌ای نشان می‌دهند. همچنین براساس نتایج RSA هر دو گروه از روابط NGA-west1 و NGA-west2 عملکرد ضعیفی را براساس داده‌های ناحیه ایران نشان می‌دهند. باید توجه داشت که این نتیجه-گیری تنها برای پارامتر PGA ($T=0s$) معتبر می‌باشد و نمی‌توان آن را برای سایر دوره‌های زمانی در نظر گرفت.



شکل ۲: میانه پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌های درون رخدادی در برابر بزرگی گشتاوری در تحلیل حساسیت روابط منتخب



شکل ۳: میانه پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌های فرا رخدادی در برابر فاصله در تحلیل حساسیت روابط منتخب



شکل ۴: میانه پی-مقدارهای حاصل از انحراف باقیمانده‌های فرا رخدادی در برابر سرعت موج برشی در تحلیل حساسیت روابط منتخب

نتیجه‌گیری

روش RSA براساس باز نمونه‌گیری از داده‌ها به صورت انتخاب تصادفی و یکنواخت مجموعه داده‌هایی از پایگاه کلی داده‌ها، به منظور تعیین انحراف مدل کاهندگی تعریف شده است. این روش به عنوان یک ابزار مفید، بصورت بصری با توجه به روند انحراف مدل می‌تواند در بهبود و انتخاب مناسب‌ترین روابط کاهندگی استفاده شود. این روش می‌تواند برای انواع مختلف پارامترهای لرزه‌ای و همچنین برای آزمون‌های آماری و ریاضیاتی مختلف بکار برده شود. در این مطالعه، از این روش به منظور ارزیابی پایداری روابط کاهندگی منتخب نسبت به پایگاه داده‌های ایران برای پارامتر PGA استفاده شده است.

در برخی از موارد، نتایج حاصل از مطالعه حساسیت و بی‌ثباتی قابل توجهی را برای مولفه‌های مختلف باقیمانده‌ها در برابر پارامترهای لرزه‌ای (بزرگ، فاصله و سرعت موج برشی) نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آزمون‌های آماری این مدل‌ها (ضریب کارایی، ضریب تعیین و معیار نظری-اطلاعاتی) با نتایج RSA ضرورت بررسی پایداری مدل‌های کاهندگی را با استفاده از روش RSA در انتخاب و رتبه‌بندی روابط کاهندگی نشان می‌دهد. به عنوان یک نتیجه، مدل‌های راهیما و همکاران ۲۰۱۴ و زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲ عملکرد باثبات‌تری را نسبت به پایگاه داده‌های ایران نسبت به سایر مدل‌های منتخب نشان می‌دهند. این نتیجه‌گیری می‌تواند توسط سایر آزمون‌های آماری بیان شده از جمله معیار نظری-اطلاعاتی تایید شود. همچنین نتایج RSA، نشان می‌دهند که روش‌های آماری بکار رفته در این مطالعه (ضریب کارایی، ضریب تعیین و معیار

نظری-اطلاعاتی) مستقل از اندازه نمونه‌ها می‌باشند. همان گونه که قبلا بیان شد، نتایج بدست آمده تنها برای پارامتر PGA معتبر می‌باشد و نمی‌توان این نتایج را برای مدل در همه‌ی دوره‌های زمانی تعمیم داد. به این منظور می‌توان در مطالعات آتی پایداری روابط کاهندگی منتخب در دوره‌های زمانی مختلف را با استفاده از روش RSA مورد بررسی قرار داد.

فهرست مراجع

- AzARBakht A, Rahpeyma S and Mousavi M (2014) A New Methodology for Assessment of the Stability of Ground-Motion Prediction Equations, *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3), doi:10.1785/0120130212
- Berberian M (1976) Contribution to the seismotectonics of Iran (Part 2), Geological Survey of Iran, Report 39
- Bommer JJ, Douglas J, Scherbaum F, Cotton F, Bungum H, and Fäh D (2010) On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis, *Seismological Research Letter* 81, 783 – 793
- Building and Housing Research Center (BHRC) Available from <http://www.bhrc.ac.ir/portal/>. (May 2013)
- Chen SZ and Atkinson GM (2002) Global comparisons of earthquake source spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, p: 885–95
- Cotton F, Pousse G, Bonilla F and Scherbaum F (2008) On the discrepancy of recent European ground-motion observations and predictions from empirical models: analysis of KiK-net accelerometric data and point-sources stochastic simulations, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 98, 2244 – 2261
- Douglas J (2011) Ground Motion Estimation Equations 1964–2010, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
- Kaklamanos J and Baise LG (2011) Model validations and comparisons of the Next Generation Attenuation of ground motions (NGA–West) project, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 101, 160–175.
- Kaklamanos J, Baise LG and Boore DM (2011) Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGA Ground-Motion Prediction Equations in Engineering Practice. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1219–1235
- Kale Ö and Akkar S (2013) A new procedure for selecting and ranking ground motion prediction equations (GMPEs): The Euclidean distance-based ranking (EDR) method, *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 1069-1084
- Mousavi M, Ansari A, Zafarani H and Azarbakht A (2012) Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analysis in the Zagros region, Iran, *Journal of Earthquake Engineering* 16, 1184–1207.
- Scasserra G, Stewart JP, Bazzurro P, Lanzo G and Mollaioli F (2009) A comparison of NGA ground-motion prediction equations to Italian data, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 99, 2961–2978
- Scherbaum F, Cotton F and Smit F (2004) on the use of response spectral reference 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, 341–348
- Scherbaum F, Delavaud E and Riggelsen C (2009) Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Journal of Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3234-3247
- Shoja–Taheri J, Naserieh S and Hadi G (2010) a test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau, *Journal of Earthquake Engineering*. 14, 278–292

