

ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی حرکت زمین با استفاده از روش‌های LLH و EDR برای ناحیه ایران

زینت رجبی

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

علیرضا آذربخت

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

سحر راهیما

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

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

چکیده

یکی از عنصرهای کلیدی در تحلیل خطر لرزه‌ای، انتخاب مناسب‌ترین مدل‌های کاهندگی است. این مسئله برای مناطق با سطح بالای خطر لرزه‌ای به عنوان مثال فلات ایران از اهمیت بیشتری برخوردار است. هدف اصلی در این پژوهش، ارزیابی مدل‌های کاهندگی مختلف برای ناحیه ایران می‌باشد. مجموعه داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ۴۸۵ شتاب نگاشت از ۸۴ رخداد ثبت شده بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۳ می‌باشند. به منظور ارزیابی و رتبه بندی مدل‌های کاهندگی از مدل‌های محلی که براساس مجموعه داده‌های ایران توسعه یافته‌اند، مدل‌های منطقه‌ای مربوط به اروپا و آسیای میانه و دو گروه روابط NGA که در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ تحت عنوان مدل‌های NGA-WEST1 و NGA-WEST2 برای نواحی با فعالیت لرزه‌ای پوخته‌ای توسعه یافتند، استفاده شده است. برای ارزیابی این مدل‌ها از دو دیدگاه آماری متفاوت، بنام روش مبنی بر حداکثر درست نمایی LLH از شربام و همکاران ۲۰۰۹ و روش مبنی بر فاصله اقلیدسی EDR¹ از کال و آکار ۲۰۱۳ استفاده شده است. براساس نتایج حاصل در این مطالعه، مدل‌های کاهندگی محلی تحت مجموعه داده‌های ایران نسبت به سایر مدل‌ها سازگاری بهتری دارند.

مقدمه

با توجه به گسترش مجموعه داده‌ها و توسعه پایگاه داده‌ها در کشورهای مختلف در سال‌های اخیر، معادلات متعددی در زمینه پیش‌بینی حرکت زمین به صورت محلی یا ناحیه‌ای و جهانی ایجاد شده است. انتخاب مدل‌های کاهندگی مناسب و کارآمد در طراحی درخت منطقی برای ارزیابی خطر لرزه‌ای یک مسئله جدی می‌باشد. به همین منظور در سال‌های اخیر، ارزیابی عملکرد معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (GMPEs) برای نواحی مختلف جهان با استفاده از روش‌های آماری و ریاضیاتی کلاسیک و نوین، به عنوان فعالیتی محبوب مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

از جمله این فعالیت‌ها می‌توان به مطالعه شربام و همکارانش در سال ۲۰۰۴ اشاره نمود که طرحی به عنوان احتمال درست نمایی LH برای رتبه بندی روابط کاهندگی پیشنهاد دادند. آنها با استفاده از این روش جدید و یکسری از روش‌های آماری دیگر همچون روش مربع خی،

¹ Euclidean-Distance Based Ranking (EDR)

روش کلوموگروف، ضریب همبستگی پیرسون و روش کاهش واریانس به ارزیابی روابط کاهندگی برای داده‌هایی از ناحیه فرانسه، آلمان و سوئیس تحت یک مجموعه داده‌ی کوچک پرداختند (Scherbaum et al., 2004).

پس از آن هینترسبرگر و همکارانش در سال ۲۰۰۷ مجموعه داده‌های همان منطقه را توسعه دادند و روش LH را برای همان روابط کاهندگی بکار بردند (Hintersberger et al., 2007). این دو مطالعه نتایج رتبه بندی مشابهی برای همان روابط کاهندگی بدست آوردند، که قدرتمندی شاخص LH را در انتخاب بهترین روابط کاهندگی نشان می‌داد. استافورد و همکاران در سال ۲۰۰۸ کاربرد نسل جدید روابط کاهندگی NGA 2008 را در ناحیه اروپا و مدیترانه با استفاده از روش LH ارزیابی کردند (Stafford et al., 2008). همچنین کاکلامانوس و بایاس روش LH را به عنوان مکمل نتایج روش ناش-ساتکلیف برای ارزیابی روابط کاهندگی NGA با استفاده از مجموعه زلزله‌های اخیر کالیفرنیا بکار بردند (Kaklamanos and Baise (2011). اگرچه روش LH یک ابزار قوی در رتبه بندی روابط کاهندگی محسوب می‌شود، اما وابستگی به تعداد مجموعه داده‌ها و همچنین فرضیات (به عنوان مثال تعیین آستانه پذیرش) از ضعف‌های این روش محسوب می‌شود (Scherbaum et al., 2009). به همین منظور رویکرد نظری-اطلاعاتی LLH به عنوان جایگزین روش LH در انتخاب و رتبه بندی روابط کاهندگی، در مطالعات گوناگون (به عنوان مثال، دلاوود ۲۰۰۹، ۲۰۱۲، موسوی ۲۰۱۲ و بیوال ۲۰۱۲) مورد استفاده قرار گرفت (Delavaud et al 2009, 2012a,b, Mousavi et al 2012, Beauval et al 2012a,b). در مقاله دلاوود در سال ۲۰۱۲ از LLH به عنوان ابزاری کمکی در تعیین وزن درخت منطقی، در ارزیابی خطر در اروپا و جنوب مدیترانه در چارچوب پروژه‌ی SHARE (Seismic Hazard HARMonization in Europe) استفاده شد (Delavaud et al 2012b).

کال و آکار در سال ۲۰۱۳ با بررسی روش‌های مبتنی بر درست‌نمایی LH و LLH و الهام گرفتن از سایر روش‌های تحلیل باقیمانده‌های کلاسیک، روشی مبتنی بر فاصله اقلیدسی را برای رتبه بندی روابط کاهندگی با توجه به عدم قطعیت مربوط به جنبش‌های زمین و میزان انحراف مدل کاهندگی، مستقل از اندازه مجموعه داده‌ها ارائه کردند (Kale and Akkar, 2013). این دو ویژگی از جنبه‌های اصلی در تعیین مجموعه مناسبی از روابط کاهندگی برای استفاده در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی PSHA برای اهداف مختلفی همچون بررسی یک ناحیه ویژه یا یک منطقه می‌باشد.

در این مطالعه، ابتدا جزئیات و ویژگی‌های اساسی روش‌های انتخاب و رتبه‌بندی ارائه می‌شود. سپس برای یک مجموعه از روابط کاهندگی محلی و جهانی نتایج رتبه‌بندی با استفاده از این روش‌ها تحت یک پایگاه داده حرکت زمین متشکل از ۴۸۵ شتاب‌نگاشت از ۸۴ رخداد ثبت شده در ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پایانی نتایج آزمون‌ها برای انتخاب مجموعه‌ای از روابط کاهندگی مناسب در برنامه درخت منطقی برای ناحیه ایران استفاده می‌شوند.

روش‌های رتبه‌بندی و انتخاب مدل‌های کاهندگی

روش نظری-اطلاعاتی LLH

روش LLH توسط شریام و همکاران در سال ۲۰۰۹ به عنوان یک روش نظری-اطلاعاتی در انتخاب مدل‌ها توسعه یافته است (Scherbaum et al., 2009). این روش براساس دیدگاه حداکثر احتمال درست‌نمایی، فاصله بین دو تابع چگالی پیوسته $f(x)$ و $g(x)$ را اندازه می‌گیرد. تابع $f(x)$ نشان دهنده توزیع یک نقطه داده مشاهداتی در مجموعه داده‌های حرکت زمین می‌باشد. توزیع نقطه داده برآورد شده توسط $g(x)$ با فرض لوگ-نرمال با میانه و انحراف معیار استاندارد رابطه کاهندگی در نظر گرفته می‌شود. توزیع تابع $f(x)$ مشخص نمی‌باشد و فرض بر این است که لوگ-نرمال با همان مشخصات تابع $g(x)$ باشد. معیار انتخاب مدل LLH، با استفاده از تعریف میانگین لگاریتم درست‌نمایی مدل پیش‌بینی مورد نظر و مقدار مشاهداتی متناظر توسط معادله (۱) محاسبه می‌شود. مثالی از احتمال در نظر گرفته شده روش LLH در شکل (۱-الف) نشان داده شده است.

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

در معادله (۱)، x_i داده‌های مشاهداتی را برای $i=1, 2, \dots, N$ بیان می‌نماید. پارامتر N تعداد کل داده‌ها می‌باشد. مقدار کم شاخص رتبه‌بندی LLH، نشان‌دهنده تناسب بیشتر رابطه بر روی داده‌های مشاهداتی و برآورد شده مورد نظر می‌باشد.

روش EDR

روش EDR توسط کال و آکار در سال ۲۰۱۳ به عنوان یک روش رتبه‌بندی و انتخاب مدل‌های کاهندگی جایگزین پیشنهاد شده است (Kale and Akkar, 2013). این روش بر مبنای فاصله اقلیدسی DE در معادله (۲) تفاوت بین N زوج داده (q_i, p_i) را محاسبه می‌نماید.



پارامترهای p_i و q_i بترتیب داده‌های مشاهداتی و تخمینی حاصل از رابطه کاهندگی می‌باشند. در این روش با توجه به برخی از قوانین احتمالاتی، فاصله اقلیدسی با اصلاحاتی همراه بوده است.

$$DE^2 = \sum_{i=1}^N (p_i - q_i)^2 \quad (2)$$

روابط کاهندگی با یک محدوده مقدار سیگما، که بیانگر عدم قطعیت در تخمین حرکت زمین می‌باشد، در تحلیل خطر لرزه‌ای استفاده می‌شوند. در روش EDR فرض می‌شود؛ شدت تخمینی حرکت زمین برای یک تک داده (شامل بزرگا، فاصله، نوع گسلش و نوع سایت مشخص) یک محدوده مقدار، تعیین شده توسط انحراف معیار رابطه کاهندگی، اختصاص داده می‌شود. به بیان دیگر، رابطه کاهندگی منتخب برای یک تک داده‌ی مشاهداتی، یک طیف وسیعی از مقادیر را با توجه به عدم قطعیت‌ها در برآورد حرکت زمین در نظر می‌گیرد. تفاوت بین نقطه داده مشاهداتی و محدوده مقدار تخمینی، یک توزیع احتمالاتی را نتیجه می‌دهد. روش EDR این توزیع احتمالاتی را به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد روابط کاهندگی تحت مجموعه داده‌ها در نظر می‌گیرد. D در معادله (3) اختلاف بین لگاریتم طبیعی نقطه داده مشاهداتی (a) و محدوده مقدار تخمینی (Y) را بیان می‌کند. در اینجا a یک کمیت اسکالر و Y یک متغیر تصادفی گاوسی با متوسط μ_Y و σ_Y^2 می‌باشد. باتوجه به اصول اولیه مجموع متغیرهای تصادفی، D دارای توزیع نرمال با پارامترهای زیر می‌باشد.

$$D = a - Y, \quad \mu_D = a - \mu_Y, \quad \sigma_D^2 = \sigma_Y^2 \quad (3)$$

برای هر نقطه داده، مربع D همواره مثبت، جایگزین DE می‌شود. برای ایجاد مقایسه بین D و DE، توزیع احتمال مقادیر مطلق D در نظر گرفته شده است. برای مقادیر گسسته D، که با d_j نشان داده می‌شود؛ احتمال رخداد d_j (یعنی $\Pr(d_j)$) با یک پهنای باند بی نهایت کوچک dd در اطراف d_j تعریف می‌شود. همچنین در روش EDR احتمال رخداد d_j از طریق مقایسه DE و D نیز مورد توجه قرار گرفته و با اصلاحاتی به معادله (4) تبدیل شده است. توزیع D در شکل (1-ب،ج) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} \Pr\left(-\frac{dd}{2} < |D| - |d_j| < \frac{dd}{2}\right) &= \Pr\left(\left|d_j - \frac{dd}{2}\right| < |D| < \left|d_j + \frac{dd}{2}\right|\right) \\ &= \Pr\left(|D| < \left|d_j + \frac{dd}{2}\right|\right) - \Pr\left(|D| < \left|d_j - \frac{dd}{2}\right|\right) \end{aligned} \quad (4)$$

احتمال رخداد مبتنی بر متوسط برای یک مجموعه مقدار $|d_j|$ به عنوان فاصله اقلیدسی اصلاح شده در روش EDR معرفی می‌شود. معادله (5) فاصله اقلیدسی تصحیح شده (MDE) را وقتی $|D|$ مجموعه‌ای از نقاط گسسته می‌باشد، توصیف می‌نماید. در این معادله n تعداد نقاط گسسته می‌باشد. MDE را می‌توان به عنوان یک مقدار متوسط مبتنی بر احتمال به عنوان یک شاخص در محاسبه اثر سیگما در ارزیابی عملکرد روابط کاهندگی، تحت مجموعه داده‌های حرکت زمین در نظر گرفت.

$$MDE = \sum_{j=1}^n |d_j| \Pr\left(|D| < |d_j|\right) \quad (5)$$

روند معناداری بین داده‌های مشاهداتی و متوسط‌های تخمینی متناظر، می‌تواند بیانگر انحراف بین داده‌های حرکت زمین برای مدل‌های کاهندگی منتخب باشند. در این روش K سطح انحراف بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی را اندازه می‌گیرد. باید توجه داشت که، برخلاف MDE پارامتر K برای همه‌ی پایگاه داده حرکت زمین محاسبه می‌شود. مربعات فاصله اقلیدسی در معادله (6) معادل مجموع مربعات باقیمانده‌ها می‌باشد.

$$\kappa = \frac{DE_{original}}{DE_{corrected}}$$

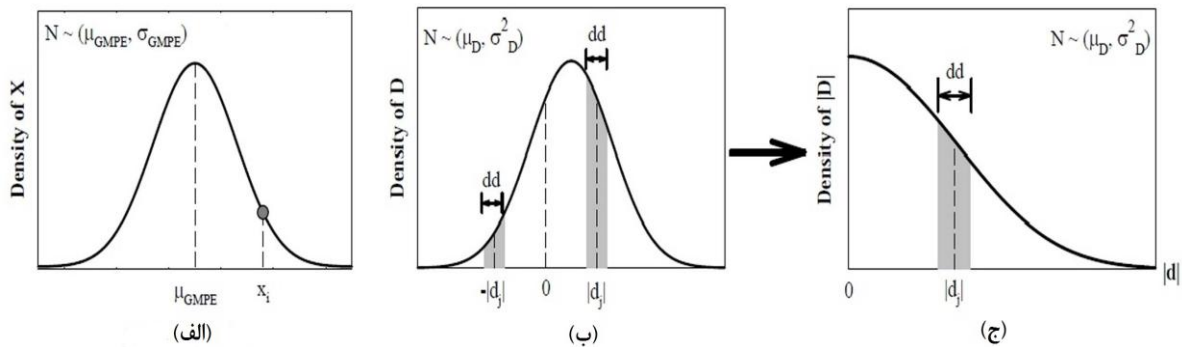
$$DE_{original}^2 = \sum_{i=1}^N (a_i - Y_i)^2 \quad (6)$$

$$DE_{corrected}^2 = \sum_{i=1}^N (a_i - Y_{c,i})^2$$

در معادله بالا a_i و Y_i به ترتیب لگاریتم طبیعی i امین داده مشاهداتی و تخمینی و N تعداد داده‌های جمع آوری شده در پایگاه داده می‌باشد. پارامتر $Y_{c,i}$ مقدار تخمینی تصحیح شده i امین داده بعد از اصلاح Y_i نسبت به خط رسم شده بر روی لگاریتم داده‌های مشاهداتی و تخمینی را بیان می‌کند. همچنین مقدار بهینه برای شاخص K یک می‌باشد و هنگامی که مقادیر تخمینی بسیار نزدیک مقادیر مشاهداتی است رخ می‌دهد.

محاسبات صورت گرفته برای یک نقطه داده در MDE باید برای تمام داده‌های حرکت زمین تکرار شود. در واقع شاخص EDR احتمال کلی تفاوت بین همه داده‌های تخمینی و مشاهداتی را بیان می‌کند. سپس این احتمال توسط K اصلاح شده تا روابط کاهندگی را براساس انحراف بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی ارزیابی کند. همچنین برای از بین بردن وابستگی نتایج به اندازه داده‌ها، اثر ترکیبی MDE و K با تعداد کل داده‌ها نرمال می‌شود. شاخص EDR مجذور رابطه (7) می‌باشد.

$$EDR^2 = \kappa \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N MDE_i^2 \quad (7)$$



شکل ۱: (الف) توضیح محاسبه احتمال روش LLH براساس احتمال رخداد x_i با استفاده از میانگین و انحراف معیار رابطه. (ب) و (ج) بیان تعاریف احتمال داده شده در روش EDR. (ب) تابع چگالی احتمال D (ج) تابع چگالی احتمال $|D|$ (Kale and Akkar, 2013).

بررسی روابط کاهندگی با استفاده از روش‌های EDR و LLH

روابط کاهندگی منتخب

قبل از انتخاب روابط کاهندگی ابتدا معیارهای انتخاب روابط کاهندگی ارائه شده در مطالعه کاتن و همکاران بیان شده است (Cotton et al., 2008). این مطالعه بیان می‌کند که: (۱) مدل‌هایی که برای محیط‌های زمین ساختی نامناسب یا متفاوت با ناحیه مورد نظر طراحی شده اند. (۲) مدل‌هایی که در یکی از مقالات پبیر یا در سایر مقالات معتبر منتشر نشده باشند. (۳) مدل‌هایی که مجموعه داده‌های استفاده شده در استخراج رابطه ارائه نشده باشد. (۴) مدل‌هایی که توسط یک انتشار جدیدتر جایگزین شده‌اند. (۵) مدل‌هایی که مولفه طیف پاسخ شتاب را برای محدوده‌ای کوچکتر از ۰-۲ ثانیه محاسبه می‌نمایند. (۶) مدل‌هایی که از تعاریف متغیرهای نامناسب مانند ML در آن‌ها استفاده و یا اثر سایت در آن لحاظ نشده است. (۷) حداکثر مقدار پارامترهای مختلف مدل در انطباق با محدوده‌ی مجموعه داده‌ها خیلی کوچکتر باشد، باید حذف شوند. همچنین براساس 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 رخدادهای شباهت زیادی با رخدادهای ناحیه ترکیه و کالیفرنیا دارند (Chen and Atkinson (2002). براساس این گزارشات و معیارهای بیان شده ۱۳ رابطه پیش‌بینی حرکت زمین از سه گروه: (۱) مدل‌های زمین‌لرزه‌ای که ویژه منطقه ایران طراحی شده‌اند. (۲) مدل‌های زمین‌لرزه‌ای که ویژه منطقه اروپا و آسیای مرکزی طراحی شده‌اند. (۳) مدل‌های کاهندگی نسل جدید در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ توسعه یافته‌اند (NGA-West1, NGA-West2)، انتخاب شده‌اند که جدول (۱) 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 ۱: 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 کانان ۲۰۱۰	AC10	ترکیه	۰ - ۲۰۰	۳/۵ - ۷/۶
۷	قاسمی و همکاران ۲۰۰۹	Getal09	ایران	۵ - ۵۰۰	۵ - ۷/۴
۸	زعفرانی و همکاران ۲۰۱۲	Zetal12	ایران	۱ - ۲۰۰	۴/۴ - ۷/۵
۹	شارما و همکاران ۲۰۰۹	Sharma	ایران و هند	۰ - ۲۰۰	۵ - ۷
۱۰	بور و اتکینسون ۲۰۱۴	BSSA14	کالیفرنیا	۰ - ۴۰۰	۳ - ۸/۵
۱۱	کمپل و بزرگنیا ۲۰۱۴	CB14	کالیفرنیا	۰ - ۳۰۰	۳/۳ - ۸
۱۲	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۱۴	ASK14	کالیفرنیا	۰ - ۳۰۰	۳ - ۸/۵
۱۳	چیو و یانگز ۲۰۱۴	CY14	کالیفرنیا	۰ - ۳۰۰	۳/۵ - ۸

بانک اطلاعاتی زمین لرزه‌ها

مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده برای این مطالعه شامل ۴۸۵ شتاب‌نگاشت از ۸۴ رخداد ثبت شده بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۳ میلادی می‌باشد. این شتاب‌نگاشت‌های توسط شبکه شتاب‌نگاری ایران (ISMN)، که از سال ۱۹۷۳ شروع به کار نموده و توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (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.

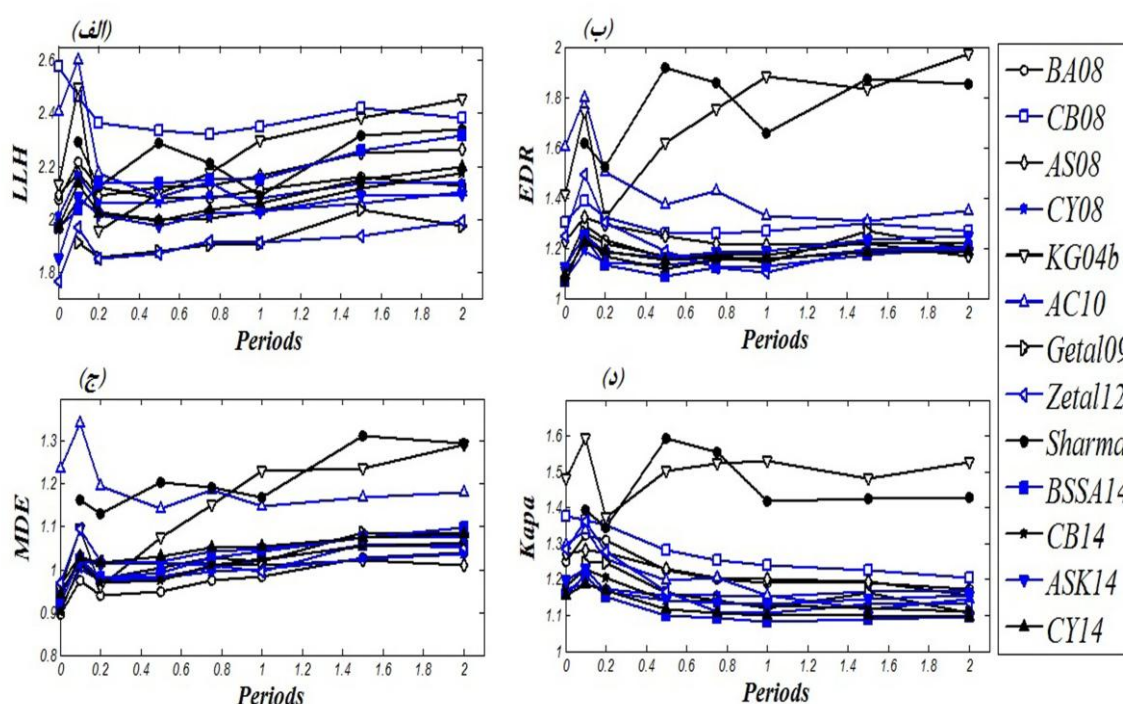
بزرگای گشتاوری زلزله‌های انتخابی بین ۷/۴-۵، فاصله‌ی ثبت شده‌ی بین صفر تا ۱۰۰ کیلومتر، سرعت موج برشی بین ۱۸۰-۱۳۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. مکانیزم گسلش این رخدادها امتدادلغز، معکوس یا نرمال می‌باشد.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به زلزله‌های انتخابی در این مطالعه

بزرگای گشتاوری	تاریخ رخداد	ردیف	بزرگای گشتاوری	تاریخ رخداد	ردیف	بزرگای گشتاوری	تاریخ رخداد	ردیف	بزرگای گشتاوری	تاریخ رخداد	ردیف
۵	۲۰۱۲/۰۲/۲۷	۶۴	۵/۸	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۴۳	۵/۷	۱۹۹۹/۰۵/۱۶	۲۲	۷/۳۵	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	۱
۵/۲	۲۰۱۲/۰۷/۱	۶۵	۶	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۴۴	۵/۲	۱۹۹۹/۰۹/۲۴	۲۳	۷/۱۰	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۲
۶/۱	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۶۶	۶	۲۰۰۳/۰۸/۲۱	۴۵	۵/۲	۱۹۹۹/۱۰/۳۱	۲۴	۷/۲۰	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	۳
۶/۲	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۶۷	۵	۲۰۰۳/۱۱/۲۸	۴۶	۵/۴	۱۹۹۹/۱۱/۱۹	۲۵	۷/۳۷	۱۹۹۰/۰۶/۲۰	۴
۵/۱	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۶۸	۶/۹	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۴۷	۵/۳	۱۹۹۹/۱۱/۲۶	۲۶	۵/۹۰	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	۵
۵/۵	۲۰۱۲/۰۸/۱۴	۶۹	۶/۴	۲۰۰۴/۰۵/۲۸	۴۸	۵/۳	۲۰۰۰/۰۲/۲	۲۷	۵	۱۹۹۵/۱۰/۱۵	۶
۵/۳	۲۰۱۲/۰۸/۱۵	۷۰	۶/۲	۲۰۰۴/۱۰/۷	۴۹	۵/۴	۲۰۰۰/۰۳/۵	۲۸	۵/۳	۱۹۹۶/۱۰/۱۸	۷
۵/۳	۲۰۱۲/۱۱/۷	۷۱	۵/۳	۲۰۰۵/۰۱/۱۰	۵۰	۵/۴	۲۰۰۰/۰۳/۲۱	۲۹	۵/۲	۱۹۹۶/۱۱/۱۸	۸
۵/۱	۲۰۱۲/۱۲/۲۳	۷۲	۶/۵	۲۰۰۵/۰۲/۲۲	۵۱	۵/۲	۲۰۰۰/۰۵/۳	۳۰	۶	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	۹
۵/۶	۲۰۱۳/۰۱/۲۱	۷۳	۵/۷	۲۰۰۵/۱۱/۲۷	۵۲	۵	۲۰۰۰/۰۶/۲۳	۳۱	۵/۳	۱۹۹۷/۰۲/۲	۱۰
۶	۲۰۱۳/۰۴/۹	۷۴	۵/۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۰	۵۳	۵	۲۰۰۰/۰۸/۱۶	۳۲	۵/۵	۱۹۹۷/۰۴/۱۹	۱۱
۵/۱	۲۰۱۳/۰۴/۹	۷۵	۶/۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۵۴	۵/۳	۲۰۰۱/۰۳/۲۸	۳۳	۵/۳	۱۹۹۷/۰۵/۵	۱۲
۵/۵	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	۷۶	۵/۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۵۵	۵/۳	۲۰۰۲/۰۲/۱۷	۳۴	۷/۲	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۱۳
۵/۷	۲۰۱۳/۰۴/۱۰	۷۷	۵/۷	۲۰۰۶/۰۶/۲۸	۵۶	۵/۲	۲۰۰۲/۰۴/۱۷	۳۵	۵/۷	۱۹۹۷/۰۶/۲۵	۱۴
۵	۲۰۱۳/۰۵/۱	۷۸	۵/۲	۲۰۰۸/۰۵/۵	۵۷	۵/۲	۲۰۰۲/۰۴/۱۹	۳۶	۶/۶	۱۹۹۸/۰۳/۱۴	۱۵
۵	۲۰۱۳/۰۵/۶	۷۹	۶	۲۰۰۸/۰۹/۱۰	۵۸	۵/۳	۲۰۰۲/۰۴/۲۴	۳۷	۵/۷	۱۹۹۸/۰۴/۱۰	۱۶
۵/۶	۲۰۱۳/۱۱/۲۲	۸۰	۵/۱	۲۰۰۸/۰۹/۱۱	۵۹	۶/۴	۲۰۰۲/۰۶/۲۲	۳۸	۵/۹	۱۹۹۸/۰۷/۹	۱۷
۵/۷	۲۰۱۳/۱۱/۲۲	۸۱	۵/۲	۲۰۰۸/۰۹/۱۷	۶۰	۵/۲	۲۰۰۲/۰۹/۲	۳۹	۵	۱۹۹۸/۰۸/۲۱	۱۸
۵/۱	۲۰۱۳/۱۱/۲۳	۸۲	۵/۴	۲۰۰۸/۱۲/۷	۶۱	۵/۲	۲۰۰۲/۱۲/۲۴	۴۰	۵/۴	۱۹۹۸/۱۱/۱۳	۱۹
۵/۵	۲۰۱۳/۱۱/۲۴	۸۳	۵/۱	۲۰۰۸/۱۲/۸	۶۲	۵/۲	۲۰۰۳/۰۱/۱۱	۴۱	۶/۶	۱۹۹۹/۰۲/۴	۲۰
۵/۷	۲۰۱۳/۱۱/۲۸	۸۴	۵/۲	۲۰۱۲/۰۱/۱۹	۶۳	۵/۸	۲۰۰۳/۰۲/۱۴	۴۲	۶/۳	۱۹۹۹/۰۵/۶	۲۱

مقدار شاخص LLH، EDR و دو مولفه‌ی تشکیل دهنده EDR (یعنی MDE و K) برای پاسخ شتاب طیفی در هفت دوره زمانی ($T=0.1$ و $s=0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2$) و حداکثر شتاب زمین PGA در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، برخی از مدل‌ها سازگاری بیشتری با داده‌های مورد استفاده در تمام دوره‌های زمانی از خود نشان می‌دهند. همچنین قابل ذکر است که دو مدل Sharma و Getal09 تنها برای مقادیر پاسخ شتاب طیفی توسعه یافته‌اند؛ بنابراین این دو مدل در روند رتبه بندی برای شاخص PGA در نظر گرفته نمی‌شوند. همچنین به منظور اینکه رتبه بندی و وزندهی به مدل‌های کاهندگی براساس روش LLH و EDR مستقل از دوره‌های زمانی مختلف باشد. متوسط LLH و EDR در این هشت دوره‌ی زمانی مورد استفاده قرار گرفت که در جداول (۳) آورده شده است. این نتایج تفاوت معنی داری را بین رتبه بندی براساس این دو روش نشان می‌دهند. روابط کاهندگی Zetal12 و Getal09 عملکرد بهتری براساس شاخص LLH دارند. در حالی که مدل‌های BSSA14 و CY08 براساس شاخص EDR دارای بهترین عملکرد هستند. همچنین به نظر می‌رسد مدل‌های AC10، KG04، CB08 و Sharma براساس هر دو روش برای ناحیه ایران نسبت به سایرین دارای ضعیف‌ترین عملکرد و ثبات می‌باشند.

همان گونه که در شکل (۲-ب، ج، د) قابل مشاهده است، عملکرد روابط کاهندگی برای مجموعه داده‌ها براساس سه مولفه؛ K ، MDE و EDR متفاوت می‌باشد. برای مثال در پارامتر $S_a(T=1s)$ ، مدل‌های BA08، Zetal12، CY08 و AS08 با توجه به مولفه MDE با مقادیر ۰/۹۸، ۱، ۱، ۱/۰۱ دارای بهترین عملکرد هستند و از نظر مولفه‌ی K ، میزان انحراف روابط کاهندگی، مدل‌های BSSA14، CY14، Zetal12 و Getal09 به ترتیب با مقادیر (۱/۰۸، ۱/۱، ۱/۱۱ و ۱/۱۲) دارای بهترین عملکرد می‌باشند. همچنین وقتی اثر این دو مولفه با هم در قالب شاخص EDR بررسی می‌شود، مدل‌های Zetal12، BSSA14 و Getal09 با مقادیر (۱/۱، ۱/۱۳، ۱/۱۴، ۱/۱۱) دارای بهترین عملکرد هستند. این مشاهدات می‌تواند از نظر مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای براساس اهداف مختلف مورد توجه قرار گیرد. کال و آکار براین باورند که این دو ویژگی از جنبه‌های اصلی در تعیین مجموعه مناسبی از روابط کاهندگی برای استفاده در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی PSHA برای اهداف مختلفی همچون بررسی یک ناحیه ویژه یا یک منطقه می‌باشد (Kale and Akkar, 2013). در واقع مولفه‌ی MDE، عدم قطعیت مربوط به جنبش‌های زمین، می‌تواند اطلاعات با ارزشی را در مطالعات خطر لرزه‌ای یک ناحیه ویژه و با اهمیت بالا با دوره بازگشت بلند مدت (مثلاً $T > 2500$ سال) فراهم نماید. همچنین شاخص EDR می‌تواند در تشخیص مناسب‌ترین مجموعه روابط کاهندگی در مطالعه‌ی تحلیل خطر یک منطقه به طور منصفانه و واقع گرایانه با دوره بازگشت کوتاه مدت ($T < 2500$ سال) مناسب عمل نماید.



شکل ۲: (الف) شاخص LLH (ب) EDR (ج) MDE (د) K ، در مقابل دوره‌های زمانی ثابت برای همه‌ی روابط کاهندگی منتخب

جدول ۳: رتبه بندی روابط کاهندگی براساس متوسط شاخص LLH و EDR در ۸ دوره زمانی

LLH	Model	EDR	Model
۱/۹	Zetal12	۱/۱۴	BSSA14
۱/۹۳	Getal09	۱/۱۶	CY08
۲/۰۲	ASK14	۱/۱۶	CB14
۲/۰۵	CB14	۱/۱۷	CY14
۲/۰۷	CY14	۱/۲	ASK14
۲/۰۹	CY08	۱/۲	BA08
۲/۱۲	BA08	۱/۲۱	Getal09
۲/۱۴	BSSA14	۱/۲۳	Zetal12
۲/۱۶	AS08	۱/۲۴	AS08
۲/۲	AC10	۱/۳	CB08
۲/۲۵	KG04b	۱/۴۶	AC10
۲/۲۷	Sharma	۱/۶۹	KG04b
۲/۴	CB08	۱/۷۵	Sharma

نگاهی دقیق تر در شکل (۱-الف) نشان می‌دهد که مدل‌های قاسمی و زعفرانی نسبت به سایر مدل‌ها در تمام هشت دوره‌ی زمانی مقدار LLH کمتری دارند و در واقع مدل‌های مناسب‌تری هستند. این در حالی است که براساس شکل (۲-ب)، رتبه بندی نتایج EDR در این هشت دوره زمانی متفاوت می‌باشد. بطور مثال مدل زعفرانی در رتبه بندی براساس EDR در دوره زمانی های کوتاه ($T=0,0.1,0.2$) در جایگاه پایین قرار دارد در حالی که در دوره زمانی های بلند ($T=0.75,1,1.5,2$) در جایگاه اول تا پنجم قرار گرفته است. همچنین اکثر مدل‌ها دارای مقدار EDR کم و مشابه ای هستند. بطوری که اکثر این مدل‌ها روی هم افتاده‌اند و در واقع می‌توان براساس روش EDR اکثر مدل‌ها را برای مجموعه داده‌های مورد مطالعه مناسب دانست. به همین منظور رتبه بندی نهایی براساس روش LLH در نظر گرفته می‌شود. که براین اساس دو مدل Zetal12 و Getal09 که در گروه روابط ویژه ایران قرار دارند به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها برای ناحیه ایران تعیین می‌شوند.

همچنین با توجه به جدول (۳) پنج مدل Zetal12, Getal09, ASK14, CB14 و CY14 براساس روش LLH و مدل‌های BSSA14, CY08, CB14, CY14 و ASK14 براساس روش EDR بهترین عملکرد را دارند که در هر دو روش مدل‌های ASK14, CY14 و CB14 در جایگاه ۳ تا ۵ قرار گرفته‌اند و می‌توان این سه مدل را که در گروه روابط NGA-West2 قرار دارند؛ براساس هر دو مدل مناسب دانست.

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت انتخاب رابطه کاهندگی مناسب در نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای، در این مقاله از دو دیدگاه متفاوت اول، روش نظری-اطلاعاتی بر مبنای احتمال درست نمایی LLH و دوم، روش رتبه بندی بر مبنای فاصله اقلیدسی EDR به منظور بررسی مدل کاهندگی منتخب برای ناحیه ایران استفاده شد. رتبه بندی براساس این دو دیدگاه تفاوت زیادی را نشان می‌دهد. که با توجه به اینکه اکثر مدل‌ها دارای مقدار شاخص EDR کم و مشابهی می‌باشند، (یعنی اکثر مدل‌ها دارای عملکرد یکسان و مناسبی هستند). به همین منظور در این مطالعه رتبه بندی براساس معیار LLH مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس مدل‌های Zetal12 و Getal09 از گروه مدل‌های محلی و همچنین مدل‌های ASK14, CB14 و CY14 از گروه مدل‌های NGA-West2 دارای مناسب‌ترین عملکرد هستند و می‌توانند در برنامه درخت منطقی روابط کاهندگی برای ناحیه ایران استفاده شوند.

همچنین نتایج این دو آزمون بهبود عملکرد روابط NGA-West2 را نسبت به روابط NGA-West1 تایید می‌کند و براساس این دو دیدگاه می‌توان مدل‌های KG04, AC10, CB08 و Sharma را برای استفاده در ناحیه ایران نامناسب دانست.



- Beauval C, Tasan H, Laurendeau A, Delavaud E, Cotton F, Guéguen Ph and Kühn N (2012a) On the testing of ground-motion prediction equations against small magnitude data, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102, no. 5, 1994-2007
- Beauval C, Cotton F, Abrahamson N, Theodoulidis N, Delavaud E, Rodriguez L, Scherbaum F and Haendel F (2012b) Regional differences in subduction ground motions, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28*
- Berberian M (1976) Contribution to the seismotectonics of Iran (Part 2), Geological Survey of Iran, Report 39
- 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
- Delavaud E, Scherbaum F, Kuehn N and Riggelsen C (2009) Information-Theoretic Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis: An Applicability Study Using Californian Data, *Bull. Seismol. Soc. Am, Vol.99*, pp.3248-3263
- Delavaud E, Scherbaum F, Kuehn N and Allen T (2012a) Testing the Global Applicability of Ground-Motion Prediction Equations for Active Shallow Crustal Regions, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102, no. 2, 707-721
- Delavaud E, Cotton F, Akkar F, Scherbaum F, Danciu L, Beauval C, Drouet S, Douglas J, Basili R, Sandikkaya MA, Segou M, Faccioli E and Theodoulidis N (2012b) Toward a Ground-Motion Logic Tree for Probabilistic Seismic Hazard Assessment in Europe, *Journal of Seismology* 16, 451-473
- Hintersberger E, Scherbaum F and Hainzl F (2007) Update of likelihood-based groundmotion model selection for seismic hazard analysis in western central Europe, *Bulletin of Earthquake Engineering*. 5, 1-16.2007
- 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
- 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
- Stafford PJ, Strasser FO and Bommer JJ (2008) An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region, *Bull. Earthquake Eng.* 6, 149-177