رتبه‌بندی روابط پیش‌بینی حرکت زمین برای استفاده در تحلیل خطر لرزه‌ای شهر اهواز به روش تحلیل پوششی داده‌ها

نصراله افتخاری*[۱]، ساسان معتقد[۲]، لطف اله عمادعلی[۲]، هادی صیادپور[۳]

۱. استادیار، دانشکدهٔ صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران.
۲. استادیار، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.
۳. استادیار، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

چکیده

روابط پیش‌بینی حرکت زمین سهم مهمی در تغییرپذیری نتایج تحلیل خطر دارند. انتخاب روابط پیش‌بینی مناسب برای منطقه می‌تواند به پایداری و دقت نتایج تحلیل خطر زلزله منجر شود. دراین مطالعه، روابط پیش‌بینی مختلف با امکان استفاده برای تحلیل خطر لرزه‌ای شهر اهواز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. این روابط بر اساس معیارهای لگاریتم درستنمایی، فاصله اقلیدسی و معیار اطلاع انحراف در دوره تناوب‌های مختلف رتبه‌بندی شدند. سپس با توجه به اختلاف نتایج حاصله، از روش تحلیل پوششی داده‌ها برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد کارآمدترین روابط استفاده شده است. نتایج حاصله از میان ۶۷ رابطه ممکن، ۵ رابطه را به عنوان روابط مناسب جهت انجام تحلیل خطر لرزه‌ای در محدوده شهر اهواز شناسایی نمود. سپس از معیار ویژه کارآیی برای تعیین وزن این روابط استفاده گردید. نتایج این مطالعه می تواند تا حدود زیادی به کاهش عدم‌قطعیت در فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه کمک کند.

کلید واژه‌ها: تحلیل خطر احتمالی زلزله، روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه، عدم‌قطعیت، رتبه‌بندی.

مقدمه

تحلیل خطر احتمالاتی زمین‌لرزه به عنوان متداول‌ترین روش تخمین پارامترهای مهندسیِ جنبشِ نیرومند زمین شناخته می شود (Motaghed et al., 2023a). هدف اصلی چنین تحلیلی، تخمین احتمال تجاوز از یک معیار شدت زمین‌لرزه در پنجره‌های زمانی مختلف در آینده است (Cornell, 1968). یکی از مهم‌ترین ورودی‌های مورد نیاز در تحلیل خطر احتمالاتی، روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه هستند. این روابط که تحت عنوان "روابط کاهندگی" نیز شناخته می‌شوند، به تخمین یک معیار شدت زمین‌لرزه به صورت تابعی از بزرگا، فاصله و نوع خاک می‌پردازند. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که حتی برای مناطقی که به خوبی مورد مطالعه و بررسی لرزه‌ای قرار گرفته‌اند، عدم‌قطعیت شناختی مرتبط با روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه می‌تواند نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار دهد (Yazdani et al., 2016, Motaghed at al., 2018). بنابراین، تمرکز بیشتر بر این منبع مهم تغییرپذیری می‌تواند به کاهش عدم‌قطعیت در تخمین مشخصات

* نویسنده مسئول: sn.eftekhari@yu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1019351

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

زمین‌لرزه محتمل آینده کمک شایانی نماید. در تحلیل خطر احتمالاتی زمین‌لرزه، عدم‌قطعیت شناختی روابط کاهندگی به کمک یک چارچوب درخت منطقی در نظر گرفته می‌شوند (Motaghed et al., 2023b).

در سال‌های اخیر، رویکردهای آماری مختلفی برای انتخاب رابطه پیش‌بینی زمین‌لرزه مناسب و سازگار با یک مجموعه رکورد زلزله توسعه داده شده است. از جمله این رویکردها می‌توان به روش‌های کاهش واریانس، آزمون خی‌دو، روش ضریب همبستگی پیرسون و همچنین آزمون کولموگروف–اسمیرنف نام برد (Motaghed et al., 2024). با این حال، نتایج تحلیل‌ها نشان داده‌اند که این روش‌ها به منظور انتخاب رابطه کاهندگی قابل اعتماد نیستند (Scherbaum et al., 2009). جهت غلبه بر این مشکل، شربام و همکاران (Scherbaum et al., 2004) یک معیار نیکویی برازش بر مبنای درست‌نمایی (معیار LH) برای قضاوت در مورد کارآیی روابط مختلف پیش‌بینی زمین‌لرزه ارائه نمود. در مطالعه‌ای دیگر، شربام و همکاران (Scherbaum et al., 2009) معیار لگاریتم درست‌نمایی (LLH) بر مبنای تئوری اطلاعات را جهت پوشش ضعف‌های روش LH پیشنهاد دادند. این معیارها توسط محققین مختلف برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی در کارهای عملی مورد استفاده قرار گرفتند (Zafarani & Mousavi, 2014; Ogweno and Cramer, 2014; Yazdani et al., 2021). به طور کلی، مطالعات قبل نشان داده اند که روش LLH، یک چارچوب آماری قوی برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی ارائه می‌کند، اما در برخی موارد این روش ممکن است مدل‌هایی را در فرآیند رتبه‌بندی انتخاب نماید که مقادیر انحراف معیار استاندارد بالاتری را دارا هستند (Sotiriadis & Margaris, 2023). این امر منجر به برآورد بیش از حد بالقوه خطر لرزه‌ای می‌شود. همچنین، روش LH اگرچه یک شاخص واضح برای ارزیابی روابط کاهندگی ارائه می‌کند، اما ممکن است به دلیل مدیریت ناسازگار مقادیر انحراف معیار استاندارد، سوگیری‌هایی را ایجاد کند (Farajpour et al., 2021). هر دو روش مزایا و محدودیت‌های خود را دارند، که نیازمند تحلیل جامع برای رتبه‌بندی دقیق و قابل اعتماد روابط کاهندگی در تحلیل خطر لرزه‌ای هستند.

همچنین کاله و آکار (Kale and Akkar, 2013) معیار رتبه‌بندی بر مبنای فاصله اقلیدسی (EDR) را جهت محاسبه اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده پیشنهاد دادند. این روش نیز توسط محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفت (Fallah Tafti et al., 2017). روش EDR برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی، با در نظر گرفتن تغییرپذیری حرکت زمین، یک رویکرد منحصر به فرد ارائه می‌دهد. با این حال، این روش بر معیارها و مفروضات خاصی متکی است که می‌تواند بر انتخاب مناسب‌ترین رابطه کاهندگی برای یک منطقه خاص تأثیر بگذارد (Farajpour et al., 2021). معیارهای LLH و EDR در حال حاضر به عنوان مرسوم‌ترین معیارها برای سنجش کارآیی و رتبه‌بندی روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه به حساب می‌آیند. با این حال، عملکرد این روش‌ها در حالاتی ممکن است با ضعف هایی همراه باشد. بر این اساس، کوثری و همکاران (Kowsari et al., 2019) یک رویکرد جایگزین برای رتبه‌بندی و انتخاب رابطه پیش‌بینی زمین‌لرزه بر اساس نظریه معیار اطلاع انحراف (DIC) ارائه کردند. یکی از مزایای این رویکرد استفاده از توزیع پسین عدم‌قطعیت σ به عنوان یک کمیت کلیدی در رتبه‌بندی روابط کاهندگی است. این نکته قابل ذکر است که رویکردهای اشاره شده، بعضاً نتایج متفاوتی در تحلیل رتبه‌بندی ارائه می‌دهند. همچنین، مشاهده شده است که یک روش رتبه‌بندی می‌تواند نتایج متفاوتی را در دوره تناوب‌های مختلف طیفی ارائه دهد. این موارد می‌تواند تصمیم‌گیری در مورد نتایج حاصل از تحلیل رتبه‌بندی را با چالش روبرو نماید.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

برای غلبه بر این مشکل، افتخاری و همکاران (Eftekhari et al., 2020) استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها[۱] را پیشنهاد دادند که باعث تسهیل تصمیم‌گیری در انتخاب روابط می شود. استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها چندین مزیت را برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی ارائه می‌دهد. این فرآیند شامل یک روش برنامه‌ریزی ریاضی است که برای ارزیابی کارایی نسبی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیری، با مقایسه عملکرد آنها بر اساس معیارهای ورودی و خروجی متعدد استفاده می‌شود. این روش، یک روش ناپارامتریک است، به این معنی که به هیچ فرضی در مورد شکل عملکردی رابطه بین ورودی ها و خروجی ها نیاز ندارد. این امر آن را به روشی قوی و انعطاف‌پذیر برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی تبدیل می‌کند. همچنین، تحلیل پوششی داده‌ها یک معیار برای هر رابطه کاهندگی ارائه می‌کند که امکان شناسایی مدل‌های با بهترین عملکرد و همچنین پتانسیل بهبود در مدل‌های کمتر کارآمد را فراهم می‌کند.

در این مقاله کلیه روابط کاهندگی معتبر با امکان استفاده در تحلیل خطر لرزه‌ای شهر اهواز ارائه شده است. با بررسی اولیه تعدادی از این روابط که نواقصی در آنها مشاهده شده است حذف شده اند. سپس رتبه‌بندی روابط به سه روش لگاریتم درست‌نمایی، فاصله اقلیدسی و معیار اطلاع انحراف انجام شده است و از روش تحلیل پوششی داده ها برای انتخاب بهترین روابط و وزن دهی آنها استفاده شده است.

منطقه مورد مطالعه

وجود گسل‌های بنیادی فعال و کواترنر باعث شده است که پهنه زاگرس به عنوان لرزه‌خیزترین گستره ایران پتانسیل لرزه‌زایی بالایی داشته باشد. پیشینه لرزه‌خیزی این منطقه حکایت از وقوع زمین‌لرزه‌های مخربی در مجاورت شهرهای پرجمعیت این بخش از کشور مانند کرمانشاه، شیراز، اهواز، یاسوج و کازرون دارد (Berberian et al., 2014). با توجه به اهمیت ناحیه زاگرس از منظر لرزه‌خیزی، مطالعه دقیق‌تر خصوصیات تحریک زمین‌لرزه در این گستره از اهمیت بسزایی برخوردار است.

شهر اهواز به عنوان مرکز استان خوزستان به دلیل وجود جاذبه‌های اقتصادی و طبیعی، همواره مورد توجه بوده است. سوابق زلزله‌های ثبت شده نشان می‌دهد که این منطقه تاکنون بارها توسط زلزله‌های متعدد دچار آسیب گردیده است. به عنوان مثال، بر اساس مطالعات تاریخی در سال ۸۴۰ میلادی (۲۲۵ هجری قمری) زمین‌لرزه ویران‌گری در زاگرس روی داد که در اهواز خانه‌های بسیار و نیز مسجد جامع ویران شد و مردم شهر را ترک کردند. تپه مشرف به اهواز شکاف برداشت و پس‌لرزه‌های متعددی ادامه داشت. به طور کلی، شهر اهواز از سال‌های دور رشد سریعی داشته است و همین امر باعث وجود سازه‌هایی با بافت‌های گوناگون شده است که در برابر زلزله‌های آینده در معرض خطر هستند. وجود شریان‌های حیاتی مهم در این منطقه، که دارای جنبه‌های منطقه‌ای و ملی می‌باشند اهمیت این شهر را از منظر مباحث مدیریت بحران دو چندان می‌نماید.

شهر اهواز در مجاورت گسل مهم اهواز واقع شده است. موقعیت قرارگیری این گسل نسبت به شهر اهواز در شکل ۱ نشان داده شده است. این گسل از نوع معکوس و در برخی مناطق از نوع رورانده است و با طولی حدود ۱۱۱ کیلومتر، با روند شمال شرقی- جنوب غربی از شمال شهر سوسنگرد آغاز و ضمن عبور از شهر حمیدیه و مرکز شهر اهواز، تا جنوب شرق اهواز کشیده

[۱] Data Envelopement Analysis

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

شده است. نقش آشکار این گسل در زمین‌ریخت‌شناسی و هیدرودینامیک رودخانه کارون، امکان فعالیت آن را قوت می‌بخشد. این گسل از مرکز شهر اهواز عبور می کند و از دید ژرفای سنگ بستر و شرایط زمین‌شناسی، شهر را به دو بخش شمال شرقی (فرادیواره) و جنوب غربی (فرودیواره) تقسیم کرده است. این گسل که احتمالا مسبب رویداد زمین لرزه تاریخی و ویرانگر ۲۱۸ هجری شمسی اهواز بوده است، به صورت بالقوه توانایی ایجاد زمین‌لرزه‌ی مشابهی را دارد.

روش شناسی

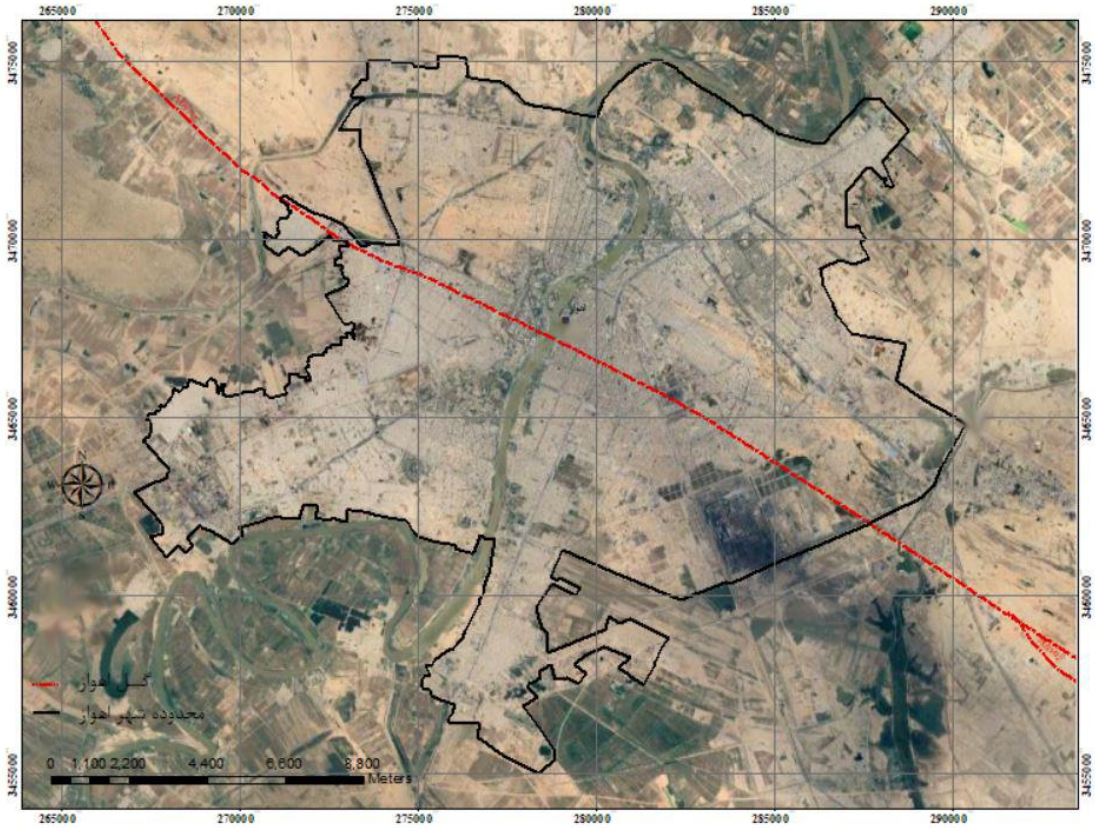
روش استفاده شده در این مقاله شامل چهار گام انتخاب اولیه روابط، پالایش روابط و حذف روابط نامناسب، رتبه‌بندی با استفاده از معیارهای آماری- ریاضی و تصمیم‌گیری نهایی انتخاب مناسب‌ترین روابط است. در ادامه این مراحل به تفصیل شرح داده شده است.

انتخاب اولیه روابط: در دهه‌های گذشته، تعداد بسیار زیادی رابطه کاهندگی برای پیش‌بینی مشخصات طیفی زمین‌لرزه‌ها توسعه داده شده است (Douglas, 2018). این روابط در مناطق مختلف با کیفیت ها و اصول متفاوت ارائه شده اند. بنابراین لازم است ابتدا همه روابط قابل استفاده در تحلیل خطر احتمالاتی منطقه از مراجع استخراج گردد. به این ترتیب مجموعه‌ای کامل از روابط تهیه می‌شود.

پالایش داده ها: پس از تهیه مجموعه کامل روابط لازم است با توجه به محدودیت‌هایی که برخی از این روابط دارند و همچنین با توجه به معیارهای مهم ارائه شده توسط محققین، برخی از این روابط از فرآیند تحلیل رتبه‌بندی حذف می‌گردند. کوتون و همکاران (Cotton et al., 2006) برخی معیارهای اولیه مورد نیاز برای پیش‌انتخاب روابط کاهندگی را پیشنهاد دادند. این معیارها وابسته به بازه فرکانسی قابل پیش‌بینی توسط رابطه، شکل تابع، روش برازش، داده‌های مورد استفاده در برازش و رژیم تکتونیکی رابطه هستند. در مطالعه حاضر، برای انتخاب اولیه روابط کاهندگی، این معیارها مد نظر قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس پیشنهاد بومر و همکاران (Bommer et al., 2010)، مدل‌هایی که در یک مجله معتبر بین‌المللی انتشار نیافته‌اند و همچنین مدل‌هایی که در مطالعات اخیر بروز رسانی و جایگزین شده‌اند، از فرآیند تحلیل کنار گذاشته می‌شوند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی قرارگیری گسل اهواز نسبت به شهر

Fig. 1. The geographical position of Ahvaz Fault in relation to the city

رتبه‌بندی: در دو مرحله قبل، روابط ممکن و قابل استفاده در منطقه شناسایی می گردند. اما برای ارزیابی خطر لرزه‌ای، می‌بایست مناسب‌ترین روابطی که دارای کارآیی لازم در پیش‌بینی خصوصیات زمین‌لرزه هستند، انتخاب گردند. برای این منظور، معیارهای نیکویی برازش می‌توانند در ارزیابی دقت پیش‌بینی روابط و رتبه‌بندی آن‌ها تحت یک مجموعه رکورد ثبت شده مفید واقع شوند. از میان این معیارها، در حال حاضر معیارهای LLH و EDR بیشترین استفاده را جهت رتبه‌بندی روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه دارند. در این رویکردها، سازگاری یک رابطه پیش‌بینی زمین‌لرزه به کمک تحلیل باقیمانده‌های تفاوت بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل، مورد سنجش قرار می‌گیرد.

معیار LLH اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل، که به صورت تابع چگالی احتمال است، را اندازه‌گیری می‌کند. به طور کلی، یک رابطه پیش‌بینی زمین‌لرزه دارای فرم کلی به صورت زیر است:

$$x = \ln S_a(T) = f(rup, T) + \sigma\varepsilon(T) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، $f(rup,T)$ بیان‌گر مقدار میانگین لگاریتم شتاب طیفی در دوره تناوب T است. این عبارت تعینی تابعی از پارامترهای سناریوی گسیختگی مانند بزرگا، فاصله و اثرات محلی سایت می‌باشد. همچنین σ بیان‌گر انحراف معیار استاندارد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

داده‌ها حول خط برازش شده و ε نشان‌دهنده خطای گوسین با میانگین صفر و انحراف معیار استاندارد یک واحد است. بنابراین، هر یک از مقادیر پیش‌بینی شده $lnS_a(T)$ را می‌توان به صورت یک توزیع احتمال نرمال بریده شده در نظر گرفت:

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-f)^2}{2\sigma^2}} \quad ; \quad (x \le x_0) \qquad (۲)$$

که در آن x_0 حد بالای مقدار پیش‌بینی شده x است. حال یک مجموعه داده‌های زمین‌لرزه ثبت شده $x_i = x_1, x_2, \dots, x_N$ را در نظر بگیرید. بر این اساس، مقدار میانه معیار LLH به صورت زیر تعریف می شود (Scherbaum et al., 2009):

$$LLH = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \log_2(g(x_i)) \qquad (۳)$$

مقدار کمتر LLH به معنی تطابق بیشتر میان داده‌های پش‌بینی شده و داده‌های مشاهده شده است. یکی از مهم‌ترین مزایای روش LLH، حساسیت پایین آن به اندازه نمونه‌ها است. این ویژگی باعث می‌شود تا در مناطقی که از تعداد کافی رکورد ثبت شده زمین‌لرزه برخوردار نیستیم، فرآیند انتخاب مدل پیش‌بینی زمین‌لرزه با خطای کمتری مواجه شود.

کاله و آکار (Kale and Akkar, 2013) معیار رتبه‌بندی بر مبنای فاصله اقلیدسی، EDR، را جهت انتخاب روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه مناسب در تحلیل خطر لرزه‌ای پیشنهاد دادند. معیار EDR به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$EDR = \sqrt{\kappa \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} MDE^2} \qquad (۴)$$

که در آن، κ نشان‌دهنده نسبت فاصله اقلیدسی مجموعه داده‌های پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی است. همچنین، MDE فاصله اقلیدسی اصلاح شده است و با جمع‌گیری از مجموع اختلافات بین داده‌های مشاهده شده و بازه تخمین زده شده توسط رابطه پیش‌بینی زمین‌لرزه محاسبه می‌گردد. یکی از مزایای روش EDR این است که با دقت بیشتری اثر عدم‌قطعیت ذاتی را روی عملکرد رابطه کاهندگی مورد بررسی قرار می‌دهد.

کوثری و همکاران (Kowsari et al., 2019) یک روش رتبه‌بندی بر اساس معیار اطلاع انحراف، DIC، پیشنهاد کردند. بر اساس این روش، مقدار معیار اطلاع انحراف برای یک مدل‌پیش‌بینی زمین‌لرزه دارای توزیع احتمالاتی نرمال به صورت زیر تعریف می گردد:

$$DIC = \frac{2}{L}\sum_{l=1}^{L}\{Nlog(2\pi) + Nlog(\hat{\sigma}^2) + \sigma^{-2}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \mu(\beta)_i{}^2\} - \{Nlog(2\pi) + Nlog(\bar{\sigma}^2) + \bar{\sigma}^2\sum_{i=1}^{N}(y_i - \mu(\beta)_i{}^2\} \qquad (۵)$$

در رابطه فوق L بیان‌گر تعداد نمونه‌ها، N تعداد مشاهدات، y بردار لگاریتم زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده، μ مقدار میانگین رابطه کاهندگی و σ انحراف معیار استاندارد رابطه کاهندگی است. همچنین، $\bar{\sigma}$ نشان‌دهنده مقدار پسین انحراف معیار استاندارد و $\hat{\sigma}$ مقدار به‌روز شده انحراف معیار استاندارد به کمک الگوریتم‌های زنجیره مارکوف مونت کارلو است. مهم‌ترین مزیت روش DIC تعریف انحراف معیار پسین به عنوان یک کمیت کلیدی جهت رتبه‌بندی روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه است. این پارامتر سپس در یک چارچوب آماری بیزی بر اساس زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده، تعیین شده و به طور همزمان اختلاف بین داده‌های ثبت شده و داده‌های تخمینی توسط رابطه کاهندگی محاسبه می‌شود. این رویکرد یکی از نقاط ضعف دیگر روش‌های رتبه‌بندی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

را که در برخی موارد انحراف قابل توجه بین داده‌های ثبت شده و پیش‌بینی شده را در نظر نمی‌گیرند، پوشش می‌دهد. به عبارت دیگر، تلاش این روش بر انتخاب مدل‌هایی است که اولا دارای کمترین اختلاف با داده‌های ثبت شده باشند و دوما مقادیر انحراف معیار استاندارد آن‌ها با انحراف معیار استاندارد واقعی داده‌ها دارای بیشترین تطابق و نزدیکی باشد.

رتبه‌بندی به سه روش LLH، EDR و DIC نتایج مختلفی خواهد داشت. به همین جهت لازم است با توجه به نتایج به دست آمده، تصمیم‌گیری نهایی در زمینه انتخاب مناسب‌ترین روابط، بر اساس روش‌های کمی اتخاذ خواهد شد.

تصمیم‌گیری: انتخاب روابط نهایی (مناسب‌ترین روابط) نیازمند تصمیم‌گیری چند معیاره بر اساس نتایج معیارهای دقت است. تحلیل پوششی داده (DEA)یک روش برنامه‌ریزی ریاضی برای ارزیابی عملکرد یک مجموعه از واحدهای تصمیم‌گیری (DMU[۲]) است. عبارت DMU را می توان برای اشاره به هر عملیاتی استفاده کرد که باید از نظر توانایی‌های آن براساس ورودی‌ها و خروجی‌ها ارزیابی شود .به طور رسمی، DEA یک روش هدایت به سمت مرز به جای گرایش‌های مرکزی در رگرسیون آماری است (Cooper et al., 2007). بنابراین، DEA به طور خاص متخصص را در کشف روابطی کمک می‌دهد که از روش‌های دیگر قادر به شناسایی آن ها نبوده اند.

فرض کنید مجموعه ای n تایی از DMU ها داریم و قرار است که مورد ارزیابی قرار گیرند. واحدهای مختلف از m ورودی برای تولید s خروجی استفاده می‌کنند. در این مورد، DMU_j مقدار x_{ij} ورودی i را نشان می‌دهد. میزان کارایی یک DMU به صورت نسبت خروجی وزن دار کل به ورودی وزن دار کل تعریف می‌شود:

$$max\ h_o\ (u,v) = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io}} \qquad (۶)$$

subject to

$$\frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io}} \leq 1 for\ j = 1,\dots,n \qquad u_r, v_i \geq 0\ \ for all\ i\ \ and\ r$$

در رابطه فوق، مقادیر u_r و v_i غیرمنفی هستند و به ترتیب بیان کننده بردار وزن ورودی و خروجی هستند. کارآیی، θ^* ، می تواند به صورت یک کمیت اسکالر با مقادیر بین صفر (بدترین) و یک (بهترین) از طریق قضیه دوگانه مدل LP محاسبه شود (Cooper et al., 2007):

$$\theta^* = min\,\theta \qquad (۷)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j \leq \theta_{x_{io}} \qquad i = 1,2,\dots,m\ ,\ \sum_{j=1}^{n} y_{rj}\lambda_j \geq y_{ro}$$

در رابطه فوق، $r = 1,2,\dots,s$ ، $\lambda_j \geq 0$ و $j = 1,2,\dots,n$ است. اگر کارایی یک واحد تصمیم‌گیری امتیازی کم‌تر از یک دریافت کند، آن واحد ناکارآمد در نظر گرفته می‌شود. در حالی که معادله فوق منجر به ارائه مقادیر یکسانی برای همه واحدهای تصمیم‌گیری کارا می شود، معیار ویژه کارآیی[۳] می تواند منجر به امتیازات متمایز برای واحدهای کارا شود و در

[۲] Decision Making Units

[۳] super-efficiency scores

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

نتیجه می توان معیارهای کارا را به کمک این شاخص رتبه‌بندی نمود. این معیار به واحدهای تصمیم‌گیری کارا امتیازی بیشتر از یک اختصاص می‌دهد. بر این اساس،

$$\theta_S^* = \min \theta - \varepsilon e s^+$$

subject to (۸)

$$\theta_{x_o} = \sum_{j=1,\neq 0}^{n} \lambda_j x_{ij} + s^- , y_0 = \sum_{j=1,\neq 0}^{n} \lambda_j y_{rj} - s^+$$

که در آن همه مولفه های s^- و s^+ دارای مقادیر غیر منفی هستند. همچنین، ε تابعی غیر ارشمیدسی و مثبت است. ترم e یک بردار واحد سطری است. جملات s^- و s^+ متغیرهایی هستند که برای تبدیل نامعادله (۷) به روابط معادل به کار می روند.

مزیت اصلی روش DEA این است که می‌تواند کارایی یا ناکارآمدی هر DMU را تعیین کند. همچنین با استفاده از چنین رویکردی تمام DMU ها می‌توانند به طور کامل رتبه‌بندی شوند (Cooper et al., 2011). افتخاری و همکاران (Eftekhari et al., 2020) استفاده از این روش را برای رتبه‌بندی و وزن دهی روابط کاهندگی پیشنهاد دادند. یکی از مزایای این روش این است که می تواند معیارهای مختلف رتبه‌بندی را در فرآیند تحلیل مد نظر قرار داده و بر اساس آن معیارها، کارآمد ترین روابط را مشخص نماید. همچنین، مزیت دیگر استفاده از این روش، امکان وزن دهی روابط کاهندگی بر اساس یک معیار کمی است. روش DEA کارایی نسبی روابط کاهندگی را با مقایسه عملکرد آنها در چندین عامل ورودی و خروجی ارزیابی می کند. در این مطالعه، ما از قابلیت‌های برنامه‌نویسی MATLAB برای پیاده‌سازی مدل‌های DEA و ارزیابی کارایی روابط کاهندگی استفاده کردیم. یافته‌ها نشان می‌دهد که DEA می‌تواند یک رویکرد موثر برای رتبه‌بندی و انتخاب روابط کاهندگی در تحلیل خطر لرزه‌ای باشد.

انتخاب روابط کاهندگی جهت استفاده در تحلیل رتبه‌بندی

به منظور استفاده در تحلیل رتبه‌بندی، با جستجو در مجموعه روابط توسعه داده شده، تعداد ۶۷ رابطه برای پیش‌بینی حرکت زمین در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. تعداد ۳۲ رابطه انتخاب شده بر اساس داده های "جهانی" توسعه داده شده اند. همچنین، ۱۹ رابطه بر اساس دیتاهای ثبت شده در "اروپا و خاور میانه"، ۲ رابطه بر اساس داده های غرب اورآسیا و ایران، ۱ رابطه برای "هیمالیا و زاگرس"، ۱ رابطه برای "مالزی، ژاپن و ایران"، ۱ رابطه برای ترکیه و ایران، و ۱۱ رابطه مختص استفاده در "ایران" توسعه داده شده اند. لازم به ذکر است که این انتخاب، یک انتخاب اولیه بوده و گستره وسیعی از روابط را در بر می گیرد. با این حال، با اعمال معیارهای پذیرش اولیه، تعدادی از این مدل ها از دایره تحلیل خارج می شوند.

در مرحله بعد، روابط انتخاب شده مورد بررسی دقیق قرار گرفته و مدل هایی که به دلیل دارا نبودن معیارهای پذیرش اولیه امکان استفاده در فرآیند تحلیل خطر منطقه مورد مطالعه را ندارند، از فرآیند تحلیل کنار گذشته می شوند. علت حذف و نام این روابطه به شرح زیر است:

- تعداد ۵ رابطه به دلیل اینکه تنها قادر به پیش‌بینی مولفه قائم زمین‌لرزه هستند (یعنی روابط Ambraseys et al., 1996، Bozorgnia & Campbell, 2016، Cagnan et al., 2017 و Stewart et al., 2016).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

- تعداد ۲ رابطه به دلیل اینکه صرفا برای پیش‌بینی طیف پاسخ جابجایی توسعه داده شده اند (یعنی Bommer et al., 1998 و Cauzzi et al., 2008).
- رابطه Bozorgnia et al. (2010) به دلیل اینکه صرفا برای مقادیر غیرخطی شتاب طیفی توسعه داده شده است و قادر به پیش‌بینی طیف خطی شتاب نیست.
- رابطه Aghabarati & Tehranizadeh (2009) چون برای فواصل بیشتر از ۶۰ کیلومتر و رابطه shoushtari et al. (2016) چون برای فواصل کم‌تر از ۱۲۰ کیلومتر قابل استفاده نیستند.
- روابط Ambraseys and Simpson (1996)، Ambraseys & Douglas (2003)، Arroyo & Ordaz (2011)، Buratti et al. (2011)، Faccioli et al. (2010)، Hassani et al. (2017)، Moss (2011) و Sadeghi et al. (2010) چون قادر به پیش‌بینی مقادیر شتاب طیفی در دوره تناوب‌های پائین (۰/۰۵ ثانیه و کمتر) نیستند.
- رابطه Bommer et al. (2007) چون تنها دوره تناوب‌های کمتر از ۰,۵ ثانیه را پوشش می‌دهد و تخمینی از مقادیر شتاب طیفی در دوره تناوب‌های بالا ارائه نمی‌دهد.
- روابط Arroyo & Ordaz (2011) و Staord (2014) چون بازه قابل قبول فاصله برای آن ها مشخص نیست.
- رابطه Chen and Yu (2008) چون تنها برای بستر سنگی توسعه داده شده است و قادر به لحاظ نموده سرعت موج برشی در تحلیل نیست.
- روابط Bindi et al. (2017) و Fukushima et al. (2003) ، چون مقادیر عددی مورد نیاز برای کدنویسی این روابط در دسترس نیست.
- روابط Akkar & Bommer (2007)، Campbell & Bozorgnia (2006)، Bozorgnia and Campbell (2004)، Abrahamson and Silva (2008)، Boore and Atkinson (2008)، Campbell & Bozorgnia (2008)، Chiou & Youngs (2008) و Idriss (2008) به دلیل این‌که در مطالعات اخیر بروز رسانی شده‌اند.

در نهایت و بر اساس معیارهای لحاظ شده در مرحله پیش‌انتخاب، تعداد ۳۰ رابطه کاهندگی (۲۱ رابطه کاهندگی محلی و منطقه‌ای، و ۹ رابطه کاهندگی جهانی) به منظور استفاده در تحلیل رتبه‌بندی انتخاب شدند. جدول ۱ لیست روابط انتخاب شده به همراه مشخصات کلی آن‌ها را ارائه می‌کند.

از میان روابط انتخاب شده، رابطه Getal09 دارای ساده‌ترین فرم است. در این مدل، نوع خاک با یک متغیر صفر و یکی در نظر گرفته شده و نوع گسیختگی گسل لحاظ نمی‌شود. اگرچه بر اساس معیارهای پیش‌انتخاب، این رابطه می‌بایست از لیست روابط اولیه حذف می‌شد، ولی با توجه به عملکرد مناسب آن در مطالعات گذشته (Zafarani et al., 2018)، ترجیح داده شد تا این رابطه نیز در تحلیل رتبه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. روابط Setal12، SP17، Detal19، HM12، K02، SY17 و Zetal18 بر اساس داده‌های زمین‌لرزه‌ایران توسعه داده شده است و در برخی از این روابط، تفاوت رژیم لرزه‌خیزی زاگرس با دیگر نواحی ایران در نظر گرفته شده است. رابطه Ketal15 یکی از روابط دارای فرم تابعی پیچیده است و در این رابطه اثرات رفتار غیر خطی خاک در نظر گرفته شده است. این در حالی‌است که این ویژگی بندرت در روابط پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ی توسعه داده شده برای ایران در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، همچنین روابط جهانی NGA-West2 در فرآیند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

رتبه‌بندی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به طور کلی، پروژه NGA-West2 یک پروژه بزرگ تحقیقاتی است که در آن متخصصین رشته‌های مختلف با هدف توسعه مدل‌های نوین پیش‌بینی زمین‌لرزه برای مناطق فعال لرزه‌ای، فعالیت می‌کنند. در نظر گرفتن اثرات میرایی امواج، لحاظ نمودن اثرات جهت‌داری زمین‌لرزه نزدیک گسل، تحلیل عدم‌قطعیت شناختی و توسعه اثرات پاسخ سایت در مدل‌های پیش‌بینی زمین‌لرزه از مهم‌ترین اهداف این پروژه است. در این مطالعه ۵ مدل پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ی توسعه داده شده در این پروژه، یعنی مدل‌های Aetal14a، CB14، CY14، I14 و Betal14b در فرآیند رتبه‌بندی روابط کاهندگی بر اساس داده‌های زمین‌لرزه‌ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مهم‌ترین چالش در استفاه از مدل‌های NGA-West2، نداشتن اطلاعات کافی در مورد برخی از پارامترهای ورودی است. پارامترهایی مانند عمق بالاترین نقطه گسیختگی (ZTOR)، متغیرهای Z1.0 و Z2.5 که بیان‌گر عمقی از زمین هستند که در آن‌ها سرعت موج برشی به‌ترتیب برابر ۱ و ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه است، و همچنین پارامتر R_X که انعکاس دهنده اثرات فرادیواره است، پارامترهای بسیار مهمی هستند که بایستی به طور معقولی تخمین زده شوند. این در حالیست که به دلیل کمبود داده‌های قابل اطمینانِ در دسترس، تخمین چنین پارامترهایی برای مناطق لرزه‌خیزِ ایران با چالش‌هایی همراه است. برای رفع این مشکل، محققین رویکردهایی را برای مواجهه با حالاتی که پارامترهای ورودی مدل‌های NGA-West2 در دسترس نباشند پیشنهاد داده‌اند. در این مطالعه از روابط تجربی توسعه داده شده توسط کاکلامانوس و همکاران (Kaklamanos et al., 2011) برای تخمین پارامترهای ورودی نامشخص مدل‌های NGA-West2 استفاده می‌شود.

جدول ۱. روابط کاهندگی مورد استفاده در تحلیل رتبه‌بندی

Table 1. Ground motion models used in the ranking analysis

Ground Motion Model	Abbreviation	Region	Magnitude Ranges
Ambraseys et al., 2005	Aetal05	Global	5.0-7.6
Abrahamson et al., 2014	Aetal14a	Global	3.0-7.9
Akkar & Bommer, 2010	AB10	Europe & Middle East	5.0-7.6
Akkar et al., 2014	Aetal14b	Europe & Middle East	4.0-7.6
Ameri et al., 2017	Aetal17	Europe & Middle East	3.0-7.6
Ameur et al., 2018	Aetal18	Global	3.2-7.9
Berge-Thierry et al., 2003	Betal03a	Europe & Middle East	4.0-7.9
Bindi et al., 2014	Betal14a	Europe & Middle East	4.0-7.6
Bommer et al., 2003	Betal03b	Europe & Middle East	4.0-7.9
Boore et al., 2014	Betal14b	Global	3.0-7.9
Campbell, 1997	C97	Global	4.7-8.1
Campbell & Bozorgnia, 2014	CB14	Global	3.0-7.9
Cauzzi et al., 2015	Cetal15	Global	4.5-7.9
Chiou & Youngs, 2014	CY14	Global	3.1-7.9
Darzi et al., 2019	Detal19	Iran	4.5-7.4
Ghasemi et al., 2009	Getal09	Iran	5.0-7.4
Hamzehloo &_Mabood, 2012	HM12	Iran	4.9-7.4
Idriss, 2014	I14	Global	4.5-79
Kale et al., 2015	Ketal15	Iran & Turkey	4.0-7.6
Khademi., 2002	K02	Iran	3.4-7.4
Kotha et al., 2016	Ketal16	Europe & Middle East	4.0-7.6
Kuehn & Scherbaum., 2015	KS15	Europe & Middle East	4.0-7.6
Saffari et al., 2012	Setal12	Iran	5.0-7.4
Sedaghati & Pezeshk, 2017	SP17	Iran	4.7-7.4
Segou & Voulgaris, 2013	SV13	Europe & Middle East	4.1-7.4
Shahidzadeh & Yazdani, 2017	SY17	Iran	5.0-7.4
Sharma et al., 2009	Setal09	Himalaya & Zagros	5.5-6.8

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Sigbjornsson & Elnashai, 2006	SE06	Europe & Middle East	4.0-7.9
Takahashi et al., 2004	Tetal04	Japan, United States & Iran	4.9-8.3
Zafarani et al., 2018	Zetal18	Iran	4.0-7.3

تحلیل، نتایج و بحث

هدف از این بخش، ارائه نتایج تحلیل رتبه‌بندی روابط کاهندگی برای منطقه اهواز به منظور استفاده در فرآیند تحلیل خطر احتمالاتی زمین‌لرزه است. برای این منظور، مقادیر شتاب طیفی در دوره تناوب‌های T=[0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1.0; 2] ثانیه به عنوان معیار شدت زمین‌لرزه در نظر گرفته می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که برخی از روابط (مانند رابطه GZFK09) قادر به تخمین مقدار بیشینه شتاب زمین (PGA[۴]) نبوده و در نتیجه حد پایین دوره تناوب برابر ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شد.

جهت دستیابی به نتایج قابل اعتماد در تحلیل رتبه‌بندی، دسترسی به یک مجموعه داده ثبت شده در منطقه ضروری است. در این مطالعه، از مجموعه داده های زلزله گردآوری شده توسط فرج‌پور و همکاران (Farajpour et al., 2018) استفاده شده است. این مجموعه داده شامل ۲۶ رخداد زلزله در ناحیه ای به شعاع سیصد کیلومتر حول شهر اهواز است. زلزله‌های مورد استفاده دارای بازه بزرگای ۵ تا ۶/۴ ریشتر هستند. همچنین فواصل رومرکزی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در بازه ۱۱ تا۱۲۰ کیلومتر قرار می‌گیرند. در این مجموعه داده، مقادیر شتاب طیفی برای میرایی ۵ درصد در بازه دوره تناوب ۰/۰۱ تا ۱۰ ثانیه ارائه گردیده است.

در مرحله‌ی بعد به کمک داده‌های ثبت‌شده‌ی منطقه، مقادیر LLH، EDR و DIC برای هر رابطه‌ی کاهندگی در دوره تناوب‌های مختلف با استفاده از روابط ۳ تا ۵ محاسبه می‌شود. مقادیر محاسبه شده برای هر یک از این کمیت ها برای روابط کاهندگی مختلف و به ازای مقادیر شتاب طیفی در دوره تناوب‌های مختلف در جداول پیوست ارائه گردیده است. در این جداول، چنانچه هر یک از کمیت های LLH، EDR و DIC دارای مقادیر پایین تری باشند، نشان دهنده عملکرد بهتر آن رابطه کاهندگی در پیش‌بینی مشخصات زمین‌لرزه است. به این معنی که بر اساس هر معیار، رتبه ۱ به رابطه ای اختصاص داده می شود که کمترین مقدار محاسبه شده هر معیار را داشته باشد. بر این اساس، نتایج رتبه‌بندی بر اساس سه معیار مورد نظر و به ازای مقادیر شتاب طیفی در دوره تناوب‌های مختلف در جدول ۲ خلاصه شده است. اعداد ارائه شده در این جدول، رتبه هر یک از روابط مورد تحلیل به ازای سنجه شدت‌های مختلف و بر اساس معیارهای مختلف رتبه‌بندی است. بدیهی است که با توجه به اینکه تعداد ۳۰ رابطه کاهندگی در تحلیل رتبه‌بندی مورد بررسی قرار گرفته اند، اعداد رتبه اختصاص داده شده از ۱ تا ۳۰ متغیر هستند. همان‌گونه که از نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود، روابط مختلف در دوره تناوب‌های متفاوت دارای عملکرد متفاوتی هستند. همچنین روش‌های مختلف رتبه‌بندی، نتایجِ مختلفی را برای عملکرد روابط کاهندگی ارائه می‌کنند. این مسئله تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روابط مناسب جهت انجام تحلیل خطر لرزه‌ای را با دشواری روبرو می‌کند. بنابراین استفاده از نتایج هر روش رتبه‌بندی بدون در نظر گرفتن نقاط قوت و ضعف آن می‌تواند منجر به تحمیل عدم‌قطعیت به نتایج نهایی تحلیل خطر احتمالاتی زمین‌لرزه شود.

[۴] Peak Ground Acceleration

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

با نگاهی کلی به نتایج رتبه‌بندی، مشاهده می‌شود که به عنوان مثال مدل پیش‌بینی Zetal18 در روش‌های رتبه‌بندی LLH و DIC دارای عملکرد مناسبی تشخیص داده می‌شود. با این‌حال، روش EDR این مدل را در مقابل دیگر مدل‌های پیش‌بینی در اولویت های بعد قرار می‌دهد. مدل Zetal18 دارای انحراف زیادی نسبت به داده‌های مبنا نیست و مقادیر انحراف این رابطه از داده‌های واقعی در دوره تناوب‌های مختلف در بازه صفر تا ۰/۱- قرار می‌گیرد. همچنین مقدار انحراف معیار استاندارد این رابطه نسبت به دیگر روابط از مقدار بالایی برخوردار است. بنابراین با توجه به این نقطه ضعف روش EDR که در موارد انحرافِ کمِ مدل از داده‌ها، اولویت را به مدل‌های دارای انحراف معیار استاندارد کمتر می‌دهد، رابطه Zetal18 در رتبه‌بندی به روش EDR در اولویت های بعد قرار گرفته است. این در حالی است که دیگر روش‌های رتبه‌بندی عملکرد مناسبی را برای این مدل ارزیابی کرده‌اند.

جدول ۲. رتبه روابط کاهندگی به ازای مقادیر شتاب طیفی در دوره تناوب‌های مختلف به سه روش DIC، EDR و LLH

Table 2. The rank of ground motion models for spectral acceleration values in different periods using DIC, EDR and LLH methods

GMPE	T=0.05 sec			T=0.1 sec			T=0.2 sec			T=0.3 sec			T=0.5 sec			T=1.0 sec			T=2.0 sec		
	LLH	EDR	DIC	LLH	EDR	DIC	LLH	EDR	DIC	LLH	EDR	DIC	LLH	EDR	DIC	LLH	EDR	DIC	LLH	EDR	DIC
HM12	1	13	1	30	30	30	18	24	20	15	18	16	16	19	16	15	20	15	21	19	21
ZETAL18	2	14	2	1	8	1	1	17	1	1	15	1	1	14	1	2	13	2	3	7	3
Ketal15	3	17	4	2	14	3	6	19	4	16	20	13	19	22	18	19	19	17	16	16	15
Getal09	4	19	3	3	18	2	2	18	2	2	14	2	2	13	2	3	10	3	2	10	2
Aetal05	5	8	6	5	6	6	4	13	6	7	17	8	15	18	15	16	15	16	22	21	22
Betal03b	6	21	5	4	19	4	3	20	3	3	19	3	3	21	3	10	23	10	24	26	24
KS15	7	7	7	8	7	8	11	14	12	6	7	6	10	16	10	11	17	11	13	17	13
Betal14b	8	9	8	9	13	9	8	7	8	8	6	7	7	4	7	8	9	8	6	8	6
SP17	9	6	9	6	5	5	7	6	7	5	4	5	4	3	4	1	11	1	1	9	1
Detal19	10	4	10	7	1	7	14	4	14	18	10	18	18	11	19	14	5	14	7	1	7
I14	11	16	12	10	16	10	13	16	13	12	16	12	6	12	6	4	12	4	4	13	4
Aetal14a	12	5	11	13	10	14	16	10	16	13	9	14	14	6	14	7	3	7	8	12	8
Aetal14b	13	18	15	16	17	18	17	9	18	14	5	15	12	1	12	6	1	6	9	2	9
Aetal18	14	10	13	11	11	11	15	11	15	19	13	21	21	15	21	20	14	20	15	14	16
Ketal16	15	3	14	12	4	12	9	2	9	9	1	9	5	2	5	5	6	5	5	6	5
CY14	16	12	16	14	12	17	12	8	11	11	8	10	13	5	8	9	2	9	10	3	10
Betal14a	17	15	17	17	15	15	24	12	24	24	12	23	23	10	22	17	4	18	14	4	14
CB14	18	11	18	15	9	13	20	5	19	21	11	20	17	7	17	12	7	12	11	5	11
AB10	19	2	19	18	3	16	10	3	10	10	3	11	11	8	11	13	8	13	12	11	12
C97	20	1	20	23	2	23	19	1	17	20	2	19	20	9	20	25	16	24	26	22	26
Setal12	21	20	21	20	20	20	23	21	23	26	22	26	25	23	25	22	18	22	17	15	17
SE06	22	22	22	22	21	22	27	22	27	4	23	4	22	24	23	23	22	23	23	23	23

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Betal03a	23	23	23	21	22	21	25	23	25	25	25	25	24	25	24	21	24	21	20	24	20
Tetal04	24	25	24	26	26	26	22	25	22	17	21	17	9	20	9	28	29	28	30	30	30
Aetal17	25	24	25	27	24	27	29	27	29	30	26	30	30	28	30	29	28	29	27	27	27
Setal09	26	26	26	25	25	25	26	26	26	27	29	27	27	27	27	18	25	19	19	25	19
K02	27	28	27	19	28	19	21	28	21	22	30	22	26	30	26	27	27	27	25	20	25
SY17	28	27	28	28	27	28	28	29	28	29	28	29	28	26	28	24	21	25	18	18	18
Cetal15	29	29	29	24	23	24	5	15	5	23	24	24	29	29	29	30	30	30	29	29	29
SV13	30	30	30	29	29	29	30	30	30	28	27	28	8	17	13	26	26	26	28	28	28

به طور کلی در برخی حالات خاص، ممکن است روش‌های رتبه‌بندی دارای نقاط ضعفی باشند. به عنوان مثال، زمانی که مدل‌ها دارای انحراف زیاد از داده‌های مبنا باشند، استفاده از روش LLH می‌تواند منجر به رتبه‌بندی غیر صحیح روابط شود. در این حالت، این روش همواره مدلی را انتخاب می‌کند که دارای عدم‌قطعیت بیشتری باشد. همچنین در حالتی که مدل‌ها دارای میانگین یکسان باشند، روش EDR همواره مدلی را انتخاب می‌کند که دارای انحراف معیار استاندارد کمتری باشد. بنابراین در برخی حالات ممکن است که روش EDR منجر به ارائه نتایج غیر واقعی گردد. این امر و اختلاف بین نتایج رتبه‌بندی به روش‌های مختلف، می تواند تصمیم‌گیری نهایی در مورد روابط کاهندگی مناسب را با چالش هایی روبرو کند. برای حل این مشکل، در این مطالعه از روش تحلیل پوششی داده‌ها برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد مناسب‌ترین روابط استفاده شده است. استفاده از این روش می تواند ضمن لحاظ نمودن نقاط قوت هر معیار، منجر به حذف نقاط ضعف آن معیار گردیده و در نهایت مناسب‌ترین روابط کاهندگی که دارای بهترین کارآیی در تخمین مشخصات زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه را داند را انتخاب نماید.

در این مطالعه، مقادیر کمی معیارهای مختلف رتبه‌بندی به عنوان ورودی در روش تحلیل پوششی داده‌ها در نظر گرفته شدند. به عبارت دیگر مقادیر LLH، EDR و DIC به دست آمده در گام قبل، به عنوان ورودی روش تحلیل پوششی داده‌ها در نظر گرفته شدند. سپس مقدار شاخص کارآیی بر اساس رابطه ۷ محاسبه گردید. جدول ۳ مقادیر شاخص کارآیی محاسبه شده برای روابط کاهندگی مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول، مقادیر θ^* برابر با یک نشان دهنده کارآیی و مناسب بودن آن رابطه کاهندگی جهت استفاده در تحلیل خطر لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه است. مقادیر کمتر از یک به معنی عدم کارآیی واحد تصمیم‌گیری است. همانگونه که مشاهده می شود، ۵ رابطه Aetal14b، Getal09، HM12، SP17 و Zetal18 دارای شاخص کارآیی برابر با یک شناسایی شدند. لازم به ذکر است که فلاح تفتی و همکاران (Fallah Tafti et al., 2017) و همچنین موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2012) با تحلیل رتبه بندی، استفاده از رابطه Getal09 را در تحلیل خطر لرزه ای زاگرس پیشنهاد دادند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

جدول ۳. مقادیر شاخص کارآیی برای روابط کاهندگی مختلف بر اساس سه معیار DIC، EDR و LLH
Table 3. Results of hydrochemical analysis

No.	DMU	θ^*	No.	DMU	θ^*
1	AB10	0.9537	16	Getal09	1.0000
2	Aetal05	0.9421	17	HM12	1.0000
3	Aetal14a	0.9685	18	I14	0.9743
4	Aetal14b	1.0000	19	K02	0.8085
5	Aetal17	0.6659	20	Ketal15	0.9718
6	Aetal18	0.9300	21	Ketal16	0.9981
7	Betal03a	0.8076	22	KS15	0.9772
8	Betal03b	0.9928	23	SE06	0.9208
9	Betal14a	0.9167	24	Setal09	0.8025
10	Betal14b	0.9779	25	Setal12	0.8304
11	C97	0.9374	26	SP17	1.0000
12	CB14	0.9295	27	SV13	0.8912
13	Cetal15	0.9368	28	SY17	0.7576
14	CY14	0.9706	29	Tetal04	0.8945
15	Detal19	0.9906	30	Zetal18	1.0000

یکی از مزایای روش تحلیل پوششی داده‌ها این است که می توان به کمک آن وزن هر معیار را نیز به صورت کمی تعیین نمود. برای این منظور، این روش به واحدهای کارآی شناسایی شده، یک ضریب ویژه کارآیی (θ_S^*) اختصاص می‌دهد که با نرمال کردن مجموع این ضرایب به یک، می توان وزن هر واحد تصمیم‌گیری را محاسبه نمود. مقادیر معیار ویژه کارآیی برای ۵ رابطه کاهندگی مناسب شناسایی شده در گام قبل در جدول ۴ ارائه شده اند. برای محاسبه این مقادیر، از رابطه شماره ۸ استفاده شده است. در این جدول همچنین وزن هر رابطه جهت استفاده در فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای پیشنهاد گردیده است.

جدول ۴. مقادیر معیار ویژه کارآیی و وزن روابط کاهندگی مختلف به دست آمده به کمک روش تحلیل پوششی داده ها
Table 4. Results of hydrochemical analysis

GMPE	θ_S^*	weight
Aetal14b	0.0279	0.066923
Getal09	0.0422	0.101223
HM12	0.0435	0.104342
SP17	0.1327	0.318302
Zetal18	0.1706	0.409211

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

بر اساس نتایج به دست آمده، استفاده از پنج رابطه کاهندگی Aetal14b، Getal09، HM12، SP17 و Zetal18 به ترتیب با وزن های ۰/۰۷، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۳۲ و ۰/۴۱ در درخت منطقی برای تحلیل خطر مناطق مرکزی زاگرس و به خصوص شهر اهواز پیشنهاد می شود. با توجه به اینکه در فرآیند انتخاب این روابط، روش‌های مختلف رتبه‌بندی و همچنین سنجه شدت‌های مختلف زمین‌لرزه در نظر گرفته شده اند، انتظار می رود که استفاده از این روابط منجر به کاهش قابل توجه عدم‌قطعیت ناشی از مدل پیش‌بینی زمین‌لرزه گردد.

نتیجه گیری

انتخاب روابط کاهندگی مناسب برای انجام تحلیل خطر لرزه‌ای، یکی از گام‌های اساسی در فرآیند انجام این تحلیل است. به طور کلی این روابط می‌توانند تأثیر به سزایی بر نتایج نهایی تحلیل خطر داشته باشند. از این رو، به منظور کاهش عدم‌قطعیت در فرآیند تخمین خطر لرزه‌ای، بایستی مناسب‌ترین روابطی که قادر به تخمین مشخصات خطر زمین‌لرزه در منطقه باشند را انتخاب نمود.

در سال های اخیر روش‌های مختلفی برای رتبه‌بندی این روابط بر اساس داده‌های ثبت شده ارائه شده است. یکی از مشکلاتی که در به کار گیری این روش‌ها با آن مواجه هستیم، این است که این روش‌ها منجر به خروجی یکسانی نمی شوند. به عبارت دیگر، روش‌های مختلف می‌توانند نتایج متفاوتی برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی ارائه دهند. علاوه بر این، یک روش رتبه‌بندی به خصوص نیز می تواند به ازای سنجه شدت‌های متفاوت زلزله، نتایج متفاوتی برای رتبه‌بندی ارائه دهد. از این رو، استفاده از یک روش کمی تصمیم‌گیری، می تواند منجر به انتخاب مناسب‌ترین روابط بر اساس معیارهای مختلف گردد.

در این مطالعه، سه روش رتبه‌بندی LLH، EDR و DIC برای داده های ثبت شده در منطقه اهواز و اطراف آن برای روابط کاهندگی مختلف مورد سنجش قرار گرفتند. نتایج حاصله تفاوت های قابل ملاحظه ای را بین رتبه های کمی به دست آمده حاصل از هر روش نشان داد. بر این اساس، از رویکرد DEA برای تصمیم‌گیری نهایی در خصوص انتخاب روابط کاهندگی مناسب استفاده گردید. بر اساس نتایج حاصله، ۵ رابطه Aetal14b، Getal09، HM12، SP17 و Zetal18 مناسب‌ترین روابط جهت انجام تحلیل خطر لرزه‌ای در محدوده شهر اهواز هستند. نتایج این مطالعه می تواند تا حدود زیادی به کاهش عدم‌قطعیت در فرآیند تحلیل خطر لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه کمک کند. با این حال، توجه به این نکته مهم است که DEA دارای محدودیت‌هایی است که در تحلیل بایستی مورد توجه قرار گیرند. از جمله این موارد می‌توان به نیاز این روش به تعداد کافی رابطه کاهندگی برای اطمینان از اعتبار آماری و تأثیر بالقوه مقادیر پرت بر نتایج رتبه‌بندی اشاره نمود.

منابع

Abrahamson, N. A., Silva, W. J., Kamai, R., 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthquake Spectra, 30(3), 1025-1055.

Abrahamson, N., Silva, W., 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. Earthquake spectra, 24(1), 67-97.

Aghabarati, H., Tehranizadeh, M., 2009. Near-source ground motion attenuation relationship for PGA and PSA of the vertical and horizontal components. Bulletin of Earthquake Engineering, 7(3), 609-635.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Akkar, S., Bommer, J. J., 2007. Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(10), 1275-1301.

Akkar, S., Bommer, J. J., 2010. 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), 195-206.

Akkar, S., Sandıkkaya, M. A., Bommer, J. J., 2014. Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bulletin of earthquake engineering, 12(1), 359-387.

Ambraseys, N. N., Douglas, J., 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions. Soil dynamics and earthquake engineering, 23(1), 1-18.

Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., Smit, P. M., 2005. Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. Bulletin of earthquake engineering, 3(1), 1-53.

Ambraseys, N. N., Simpson, K. U., Bommer, J. J., 1996. Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25(4), 371-400.

Ambraseys, N. U., Simpson, K. A., 1996. Prediction of vertical response spectra in Europe. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25(4), 401-412.

Ameri, G., Drouet, S., Traversa, P., Bindi, D., Cotton, F., 2017. Toward an empirical ground motion prediction equation for France: Accounting for regional differences in the source stres parameter. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(11), 4681-4717.

Ameur, M., Derras, B., Zenda Gui, D., 2018. Ground motion prediction model using adaptive neuro-fuzzy inference systems: an example based on the NGA-West 2 data. Pure and Applied Geophysics, 175(3), 1019-1034.

Arroyo, D., Ordaz, M., 2011. On the forecasting of ground-motion parameters for probabilistic seismic hazard analysis. Earthquake Spectra, 27(1), 1-21.

Berberian, M., Petrie, C. A., Potts, D. T., Chaverdi, A. A., Dusting, A., Zarchi, A. S. Noruzi, R., 2014. Archaeoseismicity of the mounds and monuments along the Kazerun fault (Western Zagros, SW Iranian plateau) since the Chalcolithic period. Iranica Antiqua, 49, 1-81.

Berge-Thierry, C., Cotton, F., Scotti, O., Griot-Pommera, D. A., Fukushima, Y., 2003. New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes. Journal of Earthquake Engineering, 7(02), 193-222.

Bindi, D., Cotton, F., Kotha, S. R., Bosse, C., Stromeyer, D., Grünthal, G., 2017. Application-driven ground motion prediction equation for seismic hazard assessments in non-cratonic moderate-seismicity areas. Journal of Seismology, 21(5), 1201-1218.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., Augliera, P., 2014. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(1), 391-430.

Bommer, J. J., Douglas, J., Strasser, F. O., 2003. Style-of-faulting in ground-motion prediction equations. Bulletin of Earthquake Engineering, 1(2), 171-203.

Bommer, J. J., Douglas, J., Scherbaum, F., Cotton, F., Bungum, H., Fäh, D., 2010. On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. Seismological Research Letters, 81(5), 783-793.

Bommer, J. J., Elnashai, A. S., Chlimintzas, G. O., Lee, D., 1998. Review and development of response spectra for displacement-based seismic design. ESEE Report, 98-3.

Bommer, J. J., Stafford, P. J., Alarcón, J. E., Akkar, S., 2007. The influence of magnitude range on empirical ground-motion prediction. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(6), 2152-2170.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

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.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Emel, S., Atkinson, G. M., 2013. NGA-West2 equations for predicting response spectral accelerations for shallow crustal earthquakes, PEER report 2013/05, pacific earthquake engineering research center. University of California, Berkeley.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., Atkinson, G. M., 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra, 30(3), 1057-1085.

Bozorgnia, Y., Campbell, K. W., 2004. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. Journal of Earthquake Engineering, 8(02), 175-207.

Bozorgnia, Y., Campbell, K. W., 2016. Vertical ground motion model for PGA, PGV, and linear response spectra using the NGA-West2 database. Earthquake Spectra, 32(2), 979-1004.

Bozorgnia, Y., Hachem, M. M., Campbell, K. W., 2010. Ground motion prediction equation ("attenuation relationship") for inelastic response spectra. Earthquake Spectra, 26(1), 1-23.

Buratti, N., Stafford, P. J., Bommer, J. J., 2011. Earthquake accelerogram selection and scaling procedures for estimating the distribution of drift response. Journal of Structural Engineering, 137(3), 345-357.

Çağnan, Z., Akkar, S., Kale, Ö., Sandıkkaya, A., 2017. A model for predicting vertical component peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), and 5% damped pseudospectral acceleration (PSA) for Europe and the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering, 15, 2617-2643.

Campbell, K. W., 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. Seismological research letters, 68(1), 154-179.

Campbell, K. W., 2006. Campbell-Bozorgnia NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of PGA, PGV, PGD and SA at selected spectral periods ranging from 0.01–10.0 seconds (version 1.1. NGA special volume of earthquake spectra.

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.

Campbell, K. W., Bozorgnia, Y., 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. Earthquake Spectra, 30(3), 1087-1115.

Cauzzi, C., Faccioli, E., 2008. Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. Journal of Seismology, 12(4), 453-475.

Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., Bianchini, A., 2015. Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. Bulletin of Earthquake Engineering, 13(6), 1587-1612.

Chen, Y., Yu, Y. X., 2008. The development of attenuation relations in the rock sites for periods (T= 0. 04～ 10 s, ξ= 0. 05) based on NGA database. In Proceedings of fourteenth world conference on earthquake engineering.

Chiou, B. 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.

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.

Cooper, W. W., Seiford, L. M., Zhu, J., Eds., 2007. Handbook on data envelopment analysis.

Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the seismological society of America, 58(5), 1583-1606

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Cotton, F., Scherbaum, F., Bommer, J. J., Bungum, H., 2006. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to central Europe and rock sites. Journal of Seismology, 10(2), 137-156.

Darzi, A., Zolfaghari, M. R., Cauzzi, C., Fäh, D., 2019. An empirical ground-motion model for horizontal PGV, PGA, and 5% damped elastic response spectra (0.01–10 s) in Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 109(3), 1041-1057.

Douglas J., "Ground motion prediction equations 1964–2018. Review." University of Strathclyde, Glasgow, 2018.

Eftekhari, N., Yazdani, A., Razmyan, S., Shamohammadi, A., 2020. Data envelopment analysis-based procedure for selection and ranking of ground motion prediction equations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 137, 106303.

Faccioli, E., Bianchini, A., Villani, M., 2010. New ground motion prediction equations for t> 1 s and their influence on seismic hazard assessment. In The University of Tokyo Symposium on Long-Period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation (pp. 23-29.

Farajpour, Z., Kowsari, M., Pezeshk, S., Halldorsson, B., 2021. Ranking of ground-motion models (GMMs) for use in probabilistic seismic hazard analysis for Iran based on an independent data set. Bulletin of the Seismological Society of America, 111(1), 242-257.

Farajpour, Z., Zare, M., Pezeshk, S., Ansari, A., Farzanegan, E., 2018. Near-source strong motion database catalog for Iran. Arabian Journal of Geosciences, 11, 1-16.

Fallah Tafti, M., Amini Hosseini, K., Firouzi, E., Mansouri, B., Ansari, A., 2017. Ranking of GMPEs for seismic hazard analysis in Iran using LH, LLH and EDR approaches. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 19(2), 139-161.

Fukushima, Y., Berge-Thierry, C., Volant, P., Griot-Pommera, D. A., Cotton, F., 2003. Attenuation relation for West Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan and Turkey. Journal of Earthquake Engineering, 7(04), 573-598.

Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., Koketsu, K., 2009. An empirical spectral ground-motion model for Iran. Journal of seismology, 13(4), 499-515.

Hamzehloo, H., Mahood, M., 2012. Ground-motion attenuation relationship for east central Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 102(6), 2677-2684.

Hassani, N., Ghodrati Amiri, G., Bararnia, M., Sinaeian, F., 2017. Ground motion prediction equation for inelastic spectral displacement in Iran. Scientia Iranica, 24(1), 164-182.

Idriss, I. M., 2008. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. Earthquake spectra, 24(1), 217-242.

Idriss, I. M., 2014. An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra, 30(3), 1155-1177.

Kaklamanos, J., Baise, L. G., Boore, D. M., 2011. Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. Earthquake Spectra, 27(4), 1219-1235.

Kale, Ö., Akkar, S., 2013. A new procedure for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): The Euclidean distance-based ranking (EDR) method. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2A), 1069-1084.

Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A., Hamzehloo, H., 2015. A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2A), 963-980.

Khademi, M. H., 2002, September. Attenuation of peak and spectral accelerations in the Persian plateau. In Proceedings of the Twelfth European Conference on Earthquake Engineering.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Kotha, S. R., Bindi, D., Cotton, F., 2016. Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East. Bulletin of Earthquake Engineering, 14(4), 1245-1263.

Kowsari, M., Halldorsson, B., Hrafnkelsson, B., Jonsson, S., 2019. Selection of earthquake ground motion models using the deviance information criterion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 117, 288-299.

Kuehn, N. M., Scherbaum, F., 2015. Ground-motion prediction model building: a multilevel approach. Bulletin of Earthquake Engineering, 13(9), 2481-2491.

Moss, R. E. S., 2011. Reduced sigma of ground-motion prediction equations through uncertainty propagation. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(1), 250-257.

Motaghed, S., Eftekhari, N., Khazaee, M., Yousefi Dadras, E., 2024. Selection and Ranking the Ground Motion Prediction Equations for Tehran Region. Journal of Structural and Construction Engineering, 10(11), -. doi: 10.22065/jsce.2023.393094.3088

Motaghed, S., Khazaee, M., Eftekhari, N., Mohammadi, M., 2023 a. A non-extensive approach to probabilistic seismic hazard analysis. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(3), 1117-1124.

Motaghed, S., Eftekhari, N., Mohammadi, M., Khazaee, M., 2023 b. Logic tree branches' weights in the probabilistic seismic hazard analysis: the need to combine inter-subjective and propensity probability interpretations. Journal of Seismology, 27(6), 1035-1046.

Motaghed, S., Yazdani, A., Nicknam, A., Khanzadi, M., 2018. Sobol sensitivity generalization for engineering and science applications. Journal of modeling in engineering, 16(54), 217-226.

Mousavi, M., Ansari, A., Zafarani, H., Azarbakht, A., 2012. Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analysis in the Zagros region, Iran. Journal of Earthquake Engineering, 16(8), 1184-1207.

Ogweno, L. P., Cramer, C. H., 2014. Comparing the CENA GMPEs using NGA-East ground-motion database. Seismological Research Letters, 85(6), 1377-1393.

Sadeghi, H., Shooshtari, A., Jaladat, M., 2010, July. Prediction of horizontal response spectra of strong ground motions in Iran and its regions. In Proceedings of the Ninth US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders.

Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S., Mahdavian, A., 2012. Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran. Earthquake spectra, 28(1), 257-276.

Scherbaum, F., Cotton, F., Smit, P., 2004. On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion. Bulletin of the seismological society of America, 94(6), 2164-2185.

Scherbaum, F., Delavaud, E., Riggelsen, C., 2009. Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6), 3234-3247.

Sedaghati, F., Pezeshk, S., 2017. Partially nonergodic empirical ground-motion models for predicting horizontal and vertical PGV, PGA, and 5% damped linear acceleration response spectra using data from the Iranian plateau. Bulletin of the Seismological Society of America, 107(2), 934-948.

Segou, M., Voulgaris, N., 2013. The use of stochastic optimization in ground motion prediction. Earthquake spectra, 29(1), 283-308.

Shahidzadeh, M. S., Yazdani, A., 2017. A Bayesian updating applied to earthquake ground-motion prediction equations for Iran. Journal of Earthquake Engineering, 21(2), 290-324.

Sharma, M. L., Douglas, J., Bungum, H., Kotadia, J., 2009. Ground-motion prediction equations based on data from the Himalayan and Zagros regions. Journal of Earthquake Engineering, 13(8), 1191-1210.

Shoushtari, A. V., Adnan, A. B., Zare, M., 2016. On the selection of ground–motion attenuation relations for seismic hazard assessment of the Peninsular Malaysia region due to distant Sumatran subduction intraslab earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 82, 123-137.

Sigbjornsson, R., Elnashai, A. S., 2006. Hazard assessment of Dubai, United Arab Emirates, for close and distant earthquakes. Journal of earthquake engineering, 10(05), 749-773.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Sotiriadis, D., Margaris, B., 2023. Evaluation of the predictive performance of regional and global ground motion predictive equations against Greek strong motion data. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 165, 107656.

Stafford, P. J., 2014. Source-scaling relationships for the simulation of rupture geometry within probabilistic seismic-hazard analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(4), 1620-1635.

Stewart, J. P., Boore, D. M., Seyhan, E., Atkinson, G. M., 2016. NGA-West2 equations for predicting vertical-component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra, 32(2), 1005-1031.

Takahashi, T., Asano, A., Saiki, T., Okada, H., Irikura, K., Zhao, J. X., Fukushima, Y., 2004, August. Attenuation models for response spectra derived from Japanese strong-motion records accounting for tectonic source types. In Proc. 13th World Conf. on Earthq. Eng. p. Paper (No. 1271).

Yazdani, A., Nicknam, A., Eftekhari, S. N., Dadras, E. Y., 2016. Sensitivity of near-fault PSHA results to input variables based on information theory. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(4), 1858-1866.

Yazdani, A., Shahidzadeh, M. S., Takada, T., 2021. Merging data and experts' knowledge-based weights for ranking GMPEs. Earthquake Spectra, 37(2), 857-875.

Zafarani, H., Luzi, L., Lanzano, G., Soghrat, M. R., 2018. Empirical equations for the prediction of PGA and pseudo spectral accelerations using Iranian strong-motion data. Journal of Seismology, 22(1), 263-285.

Zafarani, H., Mousavi, M., 2014. Applicability of different ground-motion prediction models for northern Iran. Natural hazards, 73, 1199-1228.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

پیوست: مقادیر LLH، EDR و DIC محاسبه شده برای مدل های مختلف به ازای سنجه شدت‌های مختلف

جدول پ۱. مقادیر LLH محاسبه شده برای مقادیر شتاب طیفی در پریودهای مختلف

Table P1. Calculated LLH values for spectral acceleration values in different periods

GMPE	T=0.05 sec	T=0.1 sec	T=0.2 sec	T=0.3 sec	T=0.5 sec	T=1.0 sec	T=2.0 sec
AB10	2.7491	2.69001	2.43549	2.24468	2.15701	2.13476	2.11979
Aetal05	2.4119	2.36822	2.30851	2.16495	2.20436	2.24554	3.01243
Aetal14a	2.55723	2.64856	2.55829	2.30594	2.19814	2.03156	2.01918
Aetal14b	2.58685	2.66412	2.61146	2.33031	2.16861	2.00244	2.02187
Aetal17	3.49577	4.03583	5.03034	5.06086	6.47944	9.20103	7.64571
Aetal18	2.60374	2.57466	2.50731	2.46039	2.48941	2.34652	2.30478
Betal03a	3.45733	2.80313	3.02769	2.88175	2.64614	2.43562	2.78779
Betal03b	2.42871	2.34244	2.17468	1.96999	1.93546	2.07389	3.18989
Betal14a	2.70505	2.67699	2.95865	2.83513	2.62653	2.28733	2.24076
Betal14b	2.53246	2.54861	2.39684	2.16948	2.09987	2.03768	1.97708
C97	2.81353	2.9564	2.65097	2.48683	2.43974	2.63674	3.84927
CB14	2.73149	2.6573	2.65479	2.50392	2.32466	2.10466	2.11925
Cetal15	8.4254	3.48065	2.32246	2.77887	4.83097	10.5234	22.8489
CY14	2.63923	2.65708	2.47172	2.25542	2.18581	2.06902	2.11017
Detal19	2.54522	2.48387	2.4973	2.40503	2.36035	2.17421	1.99355
Getal09	2.29823	2.24674	2.17427	1.96517	1.88795	1.88622	1.8585
HM12	2.21831	108.275	2.62078	2.34858	2.2616	2.20734	2.83756
I14	2.55137	2.55376	2.47219	2.26578	2.08754	1.95224	1.91109
K02	3.64959	2.72782	2.84717	2.76348	2.73252	4.72219	3.55707
Ketal15	2.28685	2.2438	2.32793	2.35999	2.42053	2.31812	2.33242
Ketal16	2.61934	2.58041	2.42424	2.17872	2.07973	1.97044	1.95717
KS15	2.50092	2.52991	2.46657	2.14463	2.14599	2.08472	2.18315
SE06	3.45522	2.86521	3.05114	2.12408	2.61268	2.4759	3.06454
Setal09	3.54198	3.61131	3.02958	3.55642	2.94692	2.30689	2.55671
Setal12	2.94212	2.78697	2.90036	2.96041	2.68464	2.47338	2.42542
SP17	2.53715	2.43302	2.35688	2.13627	1.97849	1.85127	1.84645
SV13	38.697	21.0403	9.46834	4.33018	2.14071	3.16388	9.68414
SY17	5.24811	5.32043	4.83875	4.64582	3.42503	2.61629	2.50834
Tetal04	3.46418	3.81997	2.85537	2.40386	2.14539	7.25489	24.4448
Zetal18	2.26815	2.20541	2.08796	1.95577	1.88687	1.86337	1.87227

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

جدول پ۲. مقادیر EDR محاسبه شده برای مقادیر شتاب طیفی در پریودهای مختلف

Table P2. Calculated EDR values for spectral acceleration values in different periods

GMPE	T=0.05 sec	T=0.1 sec	T=0.2 sec	T=0.3 sec	T=0.5 sec	T=1.0 sec	T=2.0 sec
AB10	1.34598	1.36024	1.30601	1.20713	1.19582	1.15954	1.18406
Aetal05	1.37756	1.38849	1.38212	1.32848	1.34003	1.28006	1.66203
Aetal14a	1.35553	1.42264	1.3643	1.23772	1.19381	1.14513	1.18435
Aetal14b	1.45401	1.46474	1.36235	1.22221	1.15293	1.08346	1.11825
Aetal17	2.03798	2.29987	2.59568	2.46193	3.02178	3.87269	3.60343
Aetal18	1.39184	1.42354	1.36836	1.30041	1.26156	1.22071	1.26745
Betal03a	1.82452	1.60874	1.73926	1.8	1.79167	1.69567	2.10493
Betal03b	1.58131	1.51993	1.53717	1.41588	1.41035	1.6102	2.89356
Betal14a	1.43099	1.44787	1.37604	1.27184	1.22224	1.14681	1.13287
Betal14b	1.38722	1.43785	1.34658	1.2243	1.18838	1.16067	1.1603
C97	1.3441	1.3559	1.2516	1.20407	1.19686	1.2833	1.7701
CB14	1.40415	1.41822	1.33095	1.25056	1.19547	1.15401	1.13397
Cetal15	4.83279	2.26962	1.41343	1.70874	3.0987	6.33126	11.5661
CY14	1.41006	1.42823	1.34987	1.2323	1.19318	1.12174	1.1199
Detal19	1.35236	1.35091	1.31906	1.24816	1.22583	1.14802	1.09357
Getal09	1.47733	1.49967	1.45781	1.30418	1.24282	1.19539	1.16845
HM12	1.42092	14.4635	1.78608	1.39173	1.35477	1.44908	1.50557
I14	1.43873	1.45566	1.42095	1.32558	1.24231	1.21428	1.22528
K02	3.27596	3.71316	3.10684	3.63954	3.7174	2.48953	1.56127
Ketal15	1.44672	1.43989	1.52533	1.46549	1.44997	1.38735	1.38241
Ketal16	1.34844	1.36395	1.30126	1.19495	1.17626	1.15152	1.15159
KS15	1.36808	1.40155	1.39693	1.22567	1.27391	1.3007	1.47175
SE06	1.7586	1.5578	1.62626	1.66055	1.61088	1.55194	2.07277
Setal09	2.57594	2.65308	2.33638	2.97891	2.59097	1.93607	2.19952
Setal12	1.53681	1.5531	1.59465	1.58178	1.488	1.35568	1.3751
SP17	1.3654	1.37695	1.34424	1.21934	1.18811	1.19819	1.16601
SV13	12.6755	8.52919	4.53828	2.47045	1.32444	2.10262	5.17502
SY17	3.00405	3.34692	3.29544	2.76736	2.10876	1.52435	1.50079
Tetal04	2.23878	2.66078	1.90878	1.54897	1.3654	4.41905	11.6354
ZETAL18	1.42439	1.40632	1.42396	1.31886	1.25678	1.21926	1.15619

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

جدول پ۳. مقادیر LLH محاسبه شده برای مقادیر شتاب طیفی در پریودهای مختلف

Table P3. Calculated DIC values for spectral acceleration values in different periods

GMPE	T=0.05 sec	T=0.1 sec	T=0.2 sec	T=0.3 sec	T=0.5 sec	T=1.0 sec	T=2.0 sec
AB10	590.714	578.017	523.327	482.327	463.488	458.708	455.491
Aetal05	534.882	526.958	499.956	467.797	472.551	482.511	647.298
Aetal14a	549.486	569.112	549.714	495.491	472.326	436.534	433.873
Aetal14b	564.169	580.567	559.291	499.351	463.865	430.571	434.081
Aetal17	751.155	867.202	1080.9	1087.46	1392.27	1977.08	1642.88
Aetal18	559.479	553.231	538.759	528.677	534.913	504.209	495.242
Betal03a	742.896	602.324	650.577	619.218	568.591	523.355	599.028
Betal03b	521.871	503.333	467.286	423.303	415.884	445.629	685.43
Betal14a	576.632	573.128	624.019	595.502	556.11	490.322	481.036
Betal14b	544.165	547.633	515.023	466.168	451.212	437.847	424.826
C97	591.509	619.091	558.696	521.617	512.234	552.649	814.279
CB14	585.412	568.524	562.191	525.358	493.916	451.322	455.322
Cetal15	1810.41	747.907	499.041	597.112	1038.06	2261.21	4909.68
CY14	573.716	579.404	528.138	476.759	460.053	440.972	450.889
Detal19	546.905	533.723	536.609	516.783	507.182	467.185	428.365
Getal09	493.834	482.77	467.197	422.267	405.674	405.303	399.347
HM12	476.661	23265.6	563.142	504.652	485.962	474.304	609.721
I14	551.383	551.414	530.463	485.827	447.303	419.863	411.352
K02	784.196	586.122	611.615	593.091	585.254	1013.59	764.286
Ketal15	501.508	494.625	490.12	492.719	494.147	482.902	490.501
Ketal16	562.833	554.468	520.91	468.153	446.883	423.399	420.548
KS15	537.387	543.617	530.005	460.829	461.122	447.956	469.105
SE06	742.442	615.663	655.615	456.413	561.401	532.011	658.495
Setal09	761.085	775.982	650.982	764.187	633.222	495.694	549.376
Setal12	632.19	598.851	623.216	636.12	576.864	531.47	521.163
SP17	545.173	522.797	506.436	459.032	425.13	397.792	396.758
SV13	8273.84	4469.06	2048.1	948.5	469.12	615.65	1965.38
SY17	1127.69	1143.23	1039.73	998.273	735.956	562.178	538.981
Tetal04	744.367	820.818	613.549	516.53	460.993	1558.9	5252.59
Zetal18	487.371	473.89	448.651	420.247	405.443	400.394	402.305

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Ranking of ground motion prediction equation for use in the seismic hazard analysis of Ahvaz city using data envelopment analysis

Nasrollah Eftekhari*[1], Sasan Motaghed[2], Lotfolla Emadali[2], Hadi Sayyadpour[3]

1. Assistant professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran
2. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.
3. Assistant professor, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Received: 10 Aug 2022 Accepted: 19 Sep 2022

Abstract

In the variability of earthquake hazard analysis results, ground motion prediction equations play an important role. Selection of appropriate prediction relationships for the region can lead to stability and accuracy of earthquake hazard analysis results. In this study, different prediction relationships were investigated and analyzed for earthquake hazard analysis in Ahvaz city. These relationships were ranked based on the criteria of logarithmic probability, Euclidean distance and deviation information in different periods. Then the most efficient relationships were selected by data envelopment analysis (DEA) method on the basis of differences in the obtained results. Out of 67 possible relationships, 5 were identified as suitable relationships for earthquake hazard analysis in the Ahvaz urban area. Then, a special efficiency criterion was used to determine the weight of these relationships. The results of this study can help to reduce to a large extent the uncertainties involved in analyzing the seismic hazard of the area studied.

Keywords: Probabilistic seismic hazard analysis, Ground motion prediction equations, Uncertainty, Ranking.

Introduction

Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) is known as the most common method for estimating the engineering parameters of strong ground motions. The main goal of such an analysis is to estimate the probability of exceeding an earthquake intensity measure in the future time windows (Cornell, 1968). One of the most important inputs required in PSHA is ground motion prediction equations (GMPEs). These relationships, also known as "attenuation relationships", estimate an intensity measure of the earthquake as a function of magnitude, distance, and other parameters. Previous research has shown that even for well-studied seismic regions, the epistemic uncertainty associated with GMPEs can significantly affect the results of PSHA.

In recent years, various statistical approaches have been developed to select appropriate and consistent GMPEs with an earthquake record data set. It has been observed that ranking methods can provide different results in different spectral periods. In this condition, decision-making about the results of the ranking analysis is problematic. To overcome this problem, Eftekhari et al. (Eftekhari et al., 2020) suggested the use of the data envelopment analysis method, which facilitates decision-

*Corresponding author: sn.eftekhari@yu.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2022.16.2.1019351

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

making in the selection of GMPEs. This article presents all the valid GMPEs that can be used in the PSHA of the city of Ahvaz. In the initial review, some of these relationships that were found to have deficiencies were removed. Then, the ranking of the relationships was done by three methods: log-likelihood (LLH), Euclidean distance-based ranking (EDR), and deviation information criterion (DIC), and the data envelopment analysis (DEA) method was used to select the best relationships and weight them.

Study area

The Zagros region is the most seismogenic region in Iran due to the presence of active and Quaternary faults. The city of Ahvaz, the capital of Khuzestan Province, has always been of interest due to its economic and natural attractions. Historical studies show that a devastating earthquake occurred in the Zagros in 840 AD (225 AH), which destroyed many houses and the Grand Mosque in Ahvaz and caused people to leave the city. The city of Ahvaz lies on the Ahvaz fault. This fault is of reverse type (in some areas it is trust) and it is about 111 kilometers long, with a northeast-southwest trend.

Methodology

The methodology used in this article consists of four steps: (1) initial selection of GMPEs; (2) refinement of GMPEs and removal of inappropriate relationships; (3) ranking using statistical-mathematical criteria; and (4) final decision and selection of the most appropriate GMPEs based on data envelopment analysis.

Results and discussion

The analysis considers the spectral acceleration values in periods T = [0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1.0; 2] seconds as the earthquake intensity measure. Analyses require a recorded data set in the region. In this study, the earthquake dataset collected by Farajpour et al. (Farajpour et al., 2018) was used. This dataset contains 26 earthquakes in an area with a radius of 300 km around the city of Ahvaz. The earthquakes used have a magnitude range from 5 to 4.6 ML. The epicentres of the recorded earthquakes range from 11 to 120 km. In this data set, spectral acceleration values for 5% attenuation are presented in the interval 0.01 to 10 seconds.

In the next step, the values of LLH, EDR and DIC are calculated for each GMPE at different intervals. The GMPE of Zafarani et al. (2018) was found to have a good performance in the LLH and DIC ranking methods. However, this model is not ranked well in the EDR method. Therefore, a decision has to be made.Based on the obtained results, the use of five GMPEs Akkar et al. (2014), Ghasemi et al. (2009), Hamzehloo and_Mabood (2012), Sedaghati and Pezeshk (2017) and Zafarani et al. (2018) with weights of 0.07, 0.1, 0.1, 0.32 and 0.41 respectively in the logical tree for analysis the hazard of the central areas of Zagros and especially the city of Ahvaz is suggested. Considering that in the process of choosing these relations, different ranking methods and also measuring different earthquake intensity measures have been considered, it is expected that the use of these relations will lead to a significant reduction of the uncertainty caused by the GMPEs.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]

Conclusions

In this study, three ranking methods LLH, EDR, and DIC were evaluated for the data collected in the Ahvaz region and its surroundings for different GMPEs. The results showed significant differences between the quantitative ranks obtained from different methods. Based on these results, the Data Envelopment Analysis approach was used to make the final decision regarding the selection of appropriate GMPEs. The results of this study can greatly help to reduce the uncertainty in the seismic hazard analysis process of the study area.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2022.16.2.1019351]