

## Selection and Ranking the Ground Motion Prediction Equations for Tehran Region

S. Motaghd<sup>1,\*</sup>, N. Eftekhari<sup>2</sup>, M. Khazae<sup>3</sup>, E. Yousefi Dadras<sup>4</sup>

1- Assistant Prof., Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

2- Assistant Prof., Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran.

3- M.Sc., Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

4- Postdoc student, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

### ABSTRACT

Earthquake wave transmission from the source to the site is modeled by the ground motion prediction equations (GMPEs or attenuation equations). Considering the high contribution of these equations in the variability of the ground motion in the site, the selection of the appropriate relations for the region is of particular importance. The number of prediction equations is large, but there is no specific relationship for many areas, so it is necessary to use criteria to determine the best equations for probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). In this paper, 62 relationships used by analysts in Iran and Tehran region are introduced to the three criteria of Rennie divergence, Euclidean distance and likelihood method, are ranked based on similarity with actual occurrence data, and the most suitable relationships for Tehran are introduced. The results show that the relationship of Zare and Sabze Ali (2006) in all three methods has a very good match with the Tehran region earthquakes. Also, some global relations have a better match than the regional relations obtained in Tehran. The results of the sensitivity analysis show a decrease in the effectiveness of the regional PSHA using the ranking. It also shows that relying on the opinion of experts brings more than 90% confidence in the selection of GMPEs, which seems sufficient in some cases. If this level of accuracy is not sufficient, it is necessary to use the appropriate weighted equations in the analysis based on the physics-based ranking results. Otherwise, the results of the probabilistic seismic hazard analysis will fluctuate and may not have the sufficient reliability.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 16 April 2023

**Revise Date:** 02 June 2023

**Accept Date:** 05 June 2023

### Keywords:

probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)  
attenuation relationship  
Rennie divergence  
Euclidean distance  
maximum likelihood

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393094.3088>

\*Corresponding author: Sasan Motaghd.

Email address: motaghd@bkatu.ac.ir

## انتخاب و رتبه بندی روابط کاهندگی برای منطقه تهران

ساسان معتقد<sup>\*</sup>، سید نصراله افتخاری<sup>۱</sup>، مژگان خزاعی<sup>۲</sup>، احسان یوسفی دادرسی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده صنعت و معدن، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، بهبهان، ایران

۴- دانشجوی پسا دکتری زلزله، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

### چکیده

در تحلیل خطر احتمالی زمین لرزه، محاسبات انتقال موج زلزله از منبع تا ساختگاه توسط روابط کاهندگی صورت می‌گیرد. با توجه به سهم بالای این روابط در تغییرپذیری حرکت زمین، انتخاب روابط مناسب منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به صورت کلی، تعداد روابط کاهندگی توسعه داده شده بسیار زیاد است، اما برای بسیاری از مناطق رابطه خاصی وجود ندارد و لازم است معیاری برای تعیین رابطه داده شود. در این مقاله ۶۲ رابطه مورد استفاده توسط تحلیل‌گران در ایران و منطقه تهران به سه معیار واگرایی رنی، فاصله اقلیدسی و روش درستنمایی و بر اساس مشابهت با داده های واقعی رخداد، رتبه بندی شده و مناسب‌ترین روابط برای تحلیل خطر تهران معرفی شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که رابطه زارع و سبزعلی (۲۰۰۶) در هر سه روش همخوانی بسیار خوبی با زلزله های رخ داده در منطقه تهران دارد. همچنین برخی از روابط جهانی همخوانی بهتری نسبت به روابط منطقه‌ای به دست آمده در تهران دارند. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با استفاده از رتبه‌بندی میزان تاثیرپذیری روابط کاهندگی بر نتایج تحلیل خطر منطقه از حدود ۸۵٪ به حدود زیر ۷۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد که تکیه بر نظر خبرگان تا حد بیش از ۹۰٪ اطمینان در انتخاب روابط کاهندگی را به همراه دارد. این میزان دقت، در برخی موارد کافی به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: تحلیل خطر احتمالی زلزله، روابط کاهندگی، واگرایی رنی، فاصله اقلیدسی، ماکزیمم درستنمایی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393094.3088">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393094.3088</a>	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	۱۴۰۲/۰۳/۱۵	۱۴۰۲/۰۳/۱۵	۱۴۰۲/۰۳/۱۲	۱۴۰۲/۰۱/۲۷
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.393094.3088">10.22065/jsce.2023.393094.3088</a>	ساسان معتقد motaghed@bkatu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

برای برنامه ریزی به منظور پیش‌گیری و مدیریت بحران نیاز به بررسی میزان آسیب‌پذیری ساختمانها، معابر و خطوط حیاتی [۱]، سنجش تاب آوری ریسک تلفات انسانی و زیان مالی است [۲]. لازمه هر گونه تحلیل ریسک داشتن تخمین دقیق از خطر زلزله در منطقه است. تخمین دقیق خطر نیاز به اطلاعات دقیق از لرزه خیزی منطقه [۳]، وضعیت خاک محلی [۴] و روابط کاهندگی دارد. روابط کاهندگی مهم‌ترین ابزار تخمین حرکت زمین در تحلیل خطر زمین لرزه هستند [۵]. اخیراً افزایش بانک داده های زمین باعث افزایش چشمگیر روابط کاهندگی محلی و جهانی شده است [۶]. این روند باعث سردرگمی تحلیل گران در انتخاب و استفاده از این روابط شده است [۷ و ۸]. اهمیت این روابط در پاسخ خطر بسیار زیاد بوده و بر اساس نتایج آنالیز حساسیت و قابلیت اعتماد انجام شده این روابط می‌تواند نتایج تحلیل خطر را حدود ۶۰٪ یا بیشتر تغییر دهد [۹-۱۰-۱۱]. به این ترتیب پیشرفت علم و افزایش داده ها روابط را دقیق تر کرده اما به دلیل بالا بردن پیچیدگی انتخاب معادله مناسب، این روند ممکن است الزاما به دقیق تر شدن نتایج تحلیل خطر نینجامد [۱۲]. به بیان دیگر افزایش دانش معادلات ممکن است باعث کاهش عدم اطمینان شناختی نگردد. این مساله لزوم ارائه روش‌هایی جهت رتبه بندی روابط کاهندگی را به وجود می‌آورد. به عبارت دیگر به موازات توسعه روابط و وارد نمودن آخرین داده‌ها، روش‌های انتخاب نیز باید به روز شوند. یکی از مهمترین اهداف این روش‌ها کاهش عدم اطمینان مدل ناشی از تغییر پذیری روابط کاهندگی است. بر این اساس، حداقل ۴۵۰ رابطه کاهندگی برای پیش بینی حداکثر شتاب زمین در منطقه ارائه شده است [۶].

در مباحث آماری روش‌های متعددی برای سنجش همخوانی بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی وجود دارد (مانند آزمون خی دو<sup>۱</sup>، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۲</sup>، کاهش واریانس<sup>۳</sup>، ضریب همبستگی پیرسون<sup>۴</sup> و ضریب تاثیر نش-ساتکلیف<sup>۵</sup>). اخیراً روش‌هایی برای ارزیابی پایداری مدل‌های کاهندگی با مفروضات مشخص ارائه شده است [۱۳-۱۴]. در این میان مهم‌ترین روش ارزیابی همخوانی مدل با داده‌ها، همچنان روش کلاسیک تحلیل باقیمانده‌هاست [۱۵-۱۷]. با استفاده از این روش آماری میزان اریبی و شیب خط برازش شده به مولفه‌های باقیمانده (مثلا بین رخدادها، درون رخدادها یا باقیمانده‌ها) به صورت تابعی از پارامترهای تخمین‌گر مانند بزرگا و یا فاصله منبع از سایت قابل تعیین است [۱۸ و ۱۹].

شجاع طاهری و همکاران [۱۴] با استفاده از تحلیل باقی مانده‌ها، روابط کاهندگی بدست آمده از بانک‌های اطلاعاتی مختلف را رتبه بندی کرده‌اند [۱۸]. روش‌های رتبه بندی مبتنی بر درست‌نمایی (ارائه شده توسط شریوم و همکاران [۱۴ و ۲۰]) مانند روش‌های درست‌نمایی (LH) و لگاریتم درست‌نمایی (LLH) به دلیل سادگی و کارایی در تحلیل‌های لرزه شناسی مهندسی بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کاله و آکار از روش فاصله اقلیدسی برای رتبه بندی استفاده کردند و نتایج را با روش‌های قبلی مقایسه کردند [۲۱]. در ایران قاسمی و همکاران [۲۲]، زعفرانی و همکاران [۲۳] و موسوی و همکاران [۲۴] رتبه بندی روابط کاهندگی را انجام داده‌اند. فرج پور و همکاران [۲۵] رتبه بندی داده ها بر اساس داده های مسقل را ارائه داده است. زعفرانی و همکاران [۲۶] با تمرکز بر خوشه های زلزله بدنبال رتبه بندی روابط کاهندگی می باشند. یغمایی و سعیدآباد [۲۷] رتبه بندی روابط کاهندگی را بر اساس مولفه های فرکانس رتبه بندی کرده است. نتایج آنها روابط بدست آمده از منطقه را در وضعیت بهتری نسبت به سایر روابط قرار داده است. تعداد روابط کاهندگی مورد مطالعه در هر یک از این کارها بالا نیست.

در این مقاله به روش‌های ماکزیمم درست‌نمایی، فاصله اقلیدسی و واگرایی رنی سعی در انتخاب بهترین روابط کاهندگی برای تحلیل خطر احتمالی منطقه تهران برای ارائه حداکثر شتاب زمین شده است. روابط کاهندگی مختلف مورد استفاده یا بدست آمده در تهران و ایران در حالت کلی وارد فرآیند رتبه بندی شده و بر اساس سه معیار معرفی شده روابط بهتر معرفی شده است.

1 Chi-square test

2 Kolmogorov-Smirnov test

3 Variance reduction

4 Pearson's correlation test

5 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient

## ۲- تحلیل خطر احتمالی زلزله

رهیافت کلاسیک که به عنوان رهیافت گرنل- مک گیر برای PSHA شناخته می شود شامل چهار گام اصلی است. گام اول شامل تعیین و پارامتریزه کردن منابع زلزله (نواحی منبع، منابع زلزله یا نواحی لرزه خیز) موثر بر ساختگاه مورد نظر است. منابع بصورت ناحیه‌ای، منبع خطی (گسل) یا نقطه‌ای مدل می‌شوند. گام دوم شامل تعیین مشخصه‌های توزیع زمانی و بزرگایی لرزه خیزی برای هر منبع است. رهیافت کلاسیک گرنل- مک گیر وقوع زمین لرزه در زمان را تصادفی و بر اساس فرآیند پواسون فرض می‌کند. گام سوم تعیین روابط کاهندگی و عدم اطمینان آنها است. روابط کاهندگی برای پیش بینی حرکت زمین در ساختگاه به کار می‌روند. پارامترهای مورد توجه در این رابطه معمولاً حداکثر شتاب زمین، حداکثر سرعت، حداکثر جابجایی، شتاب طیفی شدت، مدت حرکت زمین و ... هستند. اغلب روابط کاهندگی موجود، تجربی بوده و براساس بزرگای زمین لرزه، فاصله ساختگاه تا منبع، نوع گسلش و شرایط محلی ساختگاه می‌باشند. انتخاب رابطه کاهندگی مناسب بسیار اهمیت دارد زیرا در اغلب موارد مهمترین بخش از عدم اطمینان PSHA را تشکیل می‌دهد. گام چهارم جمع‌بندی عدم اطمینان‌ها و محاسبه منحنی خطر لرزه ای است که بیان کننده احتمال سالانه تجاوز از پارامتر حرکت زمین است. اگر خطر زلزله را با پارامتر  $Y$  نشان دهیم؛ احتمال تجاوز از مقدار مشخص  $y$ ،  $P(Y \geq y)$  برای یک زلزله با بزرگای خاص از یک منبع خاص محاسبه شده و سپس در احتمال اینکه آن زلزله رخ دهد ضرب خواهد شد. احتمال بدست آمده  $P(Y \geq y)$  با استفاده از تئوری احتمال کل بدست می‌آید:

$$P[Y \geq y] = \sum P[Y \geq y | E_i] \cdot P[E_i] \quad (1)$$

که

$$P[Y \geq y | E_i] = \int \dots \int P[Y \geq y | x_1, x_2, x_3, \dots] \cdot f_i(x_1) \cdot f_i(x_2 | x_1) \cdot f_i(x_3 | x_1, x_2) \dots dx_3 dx_2 dx_1 \quad (2)$$

$P(Y \geq y | E_i)$  احتمال تجاوز پارامتر حرکت زمین  $Y \geq y$  را در ساختگاه مورد نظر به شرط رخداد زلزله در منبع لرزه ای  $i$  نشان می‌دهد. متغیرهای  $x_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) پارامترهای عدم اطمینان موثر بر  $Y$  هستند. در رهیافت کلاسیک برای اعمال عدم اطمینان حرکت زمین پارامترهای حرکت زمین، بزرگا  $M$  و فاصله  $R$  هستند. تابع  $f(0)$  تابع چگالی احتمال (PDF) پارامتر  $x_i$  است. با فرض آنکه  $M_1=M$  و  $x_2=R$  باشد احتمال تجاوز (۳) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P[Y \geq y | E] = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} P[Y \geq y | m, r] \cdot f_M(m) \cdot f_{R/M}(r|m) dr dm \quad (3)$$

که  $P(Y \geq y/m, r)$  احتمال مشروط تجاوز از تراز حرکت زمین  $y$  را برای  $M$  و  $R$  مشخص نشان می‌دهد.  $f_M(m)$  تابع چگالی احتمال (PDF) بزرگای زلزله و  $f_{R/M}(r/m)$  تابع چگالی احتمالی مشروط فاصله برای  $M$  معلوم است. تابع چگالی احتمال مشروط فاصله  $f_{R/M}(r/m)$  در مثال‌های خاص مثلاً هنگامی که منبع زلزله به صورت گسل مدل شده باشد، استفاده می‌شود. با توجه به آنکه بزرگای زلزله به طول گسیختگی گسل مرتبط است، فاصله تا محل گسیختگی و بزرگای حاصل از آن مرتبط هستند.

چنانچه در همسایگی ساختگاه بتوان  $n_s$  منبع زلزله تشخیص داد که هرکدام نرخ تجاوز سالانه بزرگای  $\lambda_i$  داشته باشند، آنگاه نرخ سالانه متوسط کل رخدادها با تراز حرکت زمین  $Y$  یا بیشتر به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\lambda(y) = \sum_{i=1}^{n_s} \lambda \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_{R/M} P[Y \geq y | m, r] \cdot f_M(m) \cdot f_{R/M}(r|m) dr dm. \quad (4)$$

در معادله (۴) زیرنویس نشان دهنده شماره منبع به منظور ساده سازی حذف شده است.  $P(Y \geq y/m, r)$  احتمال مشروط تجاوز از حرکت زمین انتخاب شده  $y$  برای  $m$  و  $r$  معلوم را نشان می‌دهد. انتخاب استاندارد تابع چگالی احتمال تجمعی براساس این فرض است که پارامتر حرکت زمین  $y$  متغیر تصادفی لگ نرمال باشد.

$$\ln(y) = g(m, r) + \varepsilon$$

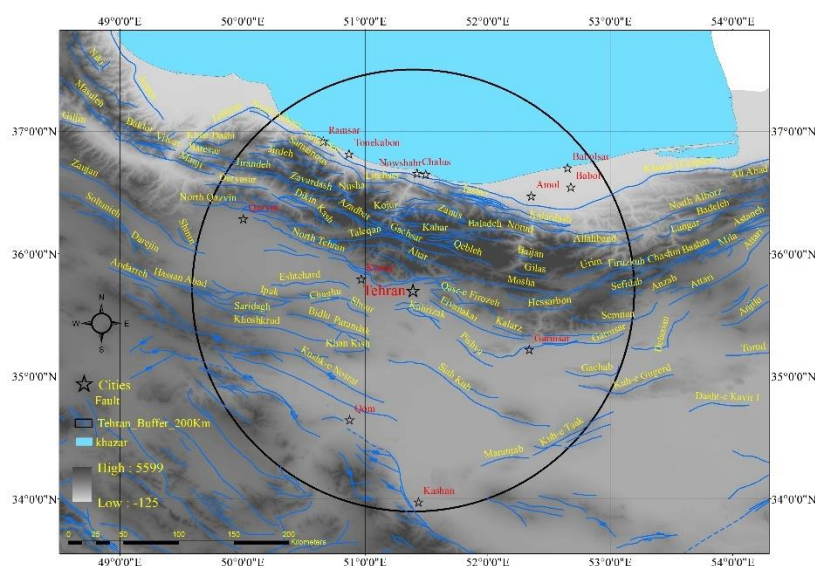
که  $\varepsilon$  خطای استاندارد است. تابع  $f_M(m)$  نشان دهنده PDF بزرگای زمین لرزه است. بر اساس رابطه گوتنبرگ-ریشتر  $f_M(m)$  دارای توزیع نمایی منفی است که از صفر به  $M_{\min}$  (حداقل بزرگا) و در بالا با  $M_{\max}$  (حداکثر بزرگا) برش خورده است.

$$f_M(m) = \frac{\beta \exp[-(m - m_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_{\min})]} \quad (5)$$

در این معادله  $\beta = b \ln(10)$  و  $b$  پارامتر رابطه گوتنبرگ-ریشتر است. پر کاربردترین استفاده از نتایج تحلیل خطر زمین لرزه در ارزیابی لرزه ای و تحلیل ریسک سازه ای می باشد. پژوهشگران تلاش برای اصلاح تحلیل خطر داشته اند [۲۸-۳۰]. برخی تلاش‌ها بهبود استفاده از نتایج در تحلیل های بعدی انواع سازه ها متمرکز بوده است. به عنوان مثال، مرادیان و همکاران [۳۱] به بررسی منحنی شکنندگی بادبندهای فلزی تحت اثر زلزله های رخ داده پرداخته اند. پاچیده و همکاران [۳۲] به بررسی شاخص خسارت دیوارهای برشی فولادی پرداخته و نتایج را مورد مقایسه قرار داده است. قلهکی و همکاران [۳۳] به بررسی اثرات وجود یا عدم وجود دیوار برشی در سازه های بتنی با دهانه ها و طبقات گوناگون پرداخته است. تمامی ارزیابی های لرزه ای سازه ها برای برآورد دقیق زمین لرزه های منطقه نیازمند انجام تحلیل خطر و برآورد شدت زمین لرزه می باشند.

### ۳- مدل سازی و تحلیل مشخصات داده‌های رخداد

منطقه مورد توجه در این مطالعه ناحیه ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر حول مرکز کلانشهر تهران (E 51.41, N 35.70) است. جنوب این محدوده، شمال فلات مرکزی ایران، مرکز آن رشته کوه البرز و شمال آن به جنوب دریای خزر می‌رسد. بر اساس شکل ۱ تهران، شهرهای بزرگی مانند قزوین، کرج، قم، ساوه، رامسر، تنکابن، چالوس، نوشهر، آمل، نوشهر، بابل، بابلسر، ساری، قائم شهر، فیروزکوه و گرمسار و شهرهایی مانند هشتگرد، سلفچگان، دماوند، تفرش، ورامین، نور، پل سفید، بالاده، و ... در این محدوده قرار می‌گیرند.



شکل ۱: محدوده منطقه مورد مطالعه

پایتخت، تهران، مرکز منطقه مورد مطالعه، رشد سریع و غیر قانونمندی را از ۱۹۶۰ داشته است و در این سالها تهران تبدیل به بزرگترین شهر ایران با جمعیت رسمی حدود ۱۰ میلیون شده است. همانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه، ریسک زلزله در ایران و خصوصا در تهران از زمان وقوع آخرین زلزله خسارت بار در این منطقه (سال ۱۸۳۰ و  $M_s=7.1$ ) افزایش بسیار یافته است. تا قبل از اوایل دهه ۱۹۰۰ سرمایه گذاری در شهرهای بزرگ بسیار کم بود. اما در همین دوره در ۶۰ سال ابتدایی قرن ۲۰، زلزله باعث مرگ بیش از ۲۴۷۵۰ نفر در ایران شده است [۳۴]. در ۵۰ سال اخیر سرمایه گذاری بسیار عظیمی در این شهرها صورت گرفته و به همین جهت زلزله بعدی در این مناطق فاجعه بار خواهد بود. جمعیت ایران از سال ۱۹۵۶، بیش از ۳.۵ برابر و از ۱۹۷۶ بیش از دو برابر شده است. تمرکز این افزایش جمعیت در تهران و کلان شهرها بوده است. داده های رخدادهای منطقه تهران از USGS انتخاب شده است [۳۵]. داده های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به زمین لرزه های ثبت شده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری اطراف تهران است. بازه زمانی ثبت داده ها از سال ۱۹۷۶ تا سال ۲۰۱۵ است. حداقل بزرگای زلزله ها برابر ۴.۲ و حداکثر آن ۷.۶ است. همچنین، فاصله کانونی زلزله های مورد استفاده در این مطالعه در بازه ۱۱ تا ۲۳۶ کیلومتر متغیر است.

#### ۴- مشخصه های روابط کاهندگی

با توجه به جستجوی وسیع انجام شده، تقریبا تمام روابط محتمل مورد استفاده و روابط استفاده شده را در رتبه بندی وارد نموده ایم. این روابط شامل روابطی است که از داده های ایران استفاده کرده اند، مخصوص ایران بدست آمده اند و یا در تحلیل خطر تهران توسط سایر محققان مورد استفاده قرار گرفته اند. استفاده از روابط هر چند غیر مرتبط با منطقه مشکلی ایجاد نمی کند زیرا در انتهای رتبه بندی قرار خواهند گرفت. واحد، نوع بیان و محدودیت های روابط کاهندگی مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است [۶].

جدول ۱: روابط کاهندگی مورد استفاده، واحد، نوع بیان و محدودیت ها

شماره	رابطه کاهندگی	سال	واحد	توضیحات	شماره	رابطه کاهندگی	سال	واحد	توضیحات
1	Esteva & Villaverde	1973	$cm/s^2$	$ln$	32	Campbell & Bozorgnia	2000	$g$	$Ln$
2	Donovan	1973	$cm/s^2$	-	33	Khademi	2002	$g$	-
3	McGuire	1977	$cm/s^2$	-	34	Ambraseys & Douglas	2003	$m/s^2$	$log_{10}$
4	Ambraseys	1978	$cm/s^2$	-	35	Sigbjörnsson & Ambraseys	2003	$g$	$Log_{10}$
5	Joyner & Boore	1981	$g$	$log_{10}$	36	Ambraseys et al.	2005	$m/s^2$	$log_{10}$

Ln	cm/s <sup>2</sup>	2005	Nowroozi	37	log10	g/100	1981	Chiaruttini & Siro	6
log10	cm/s <sup>2</sup>	2006	Mahdavian	38	ln	g	1981	Campbell	7
log10	g	2006	Zare & Sabzali	39	ln	g	1982	PML	8
Ln	cm/s <sup>2</sup>	2007	Ghodrati Amiri et al.	40	ln	g	1985	PML	9
Log10	g	2007	Massa et al.	41	Ln	g	1986	Sadigh et al.	10
Log10	cm/s <sup>2</sup>	2007	Bommer et al.	42	Ln	g	1990	Campbell	11
Log10	m/s <sup>2</sup>	2007	Sobhaninejad et al.	43	Ln	m/s <sup>2</sup>	1990	Dahle et al.	12
Log10	cm/s <sup>2</sup>	2007	Akkar & Bommer	44	Log10	g	1990	Ambraseys	13
log10	g	2008	Massa et al.	45	log10	g	1991	Ambraseys & Bommer	14
Log10	cm/s <sup>2</sup>	2008	Humbert & Viallet	46	Ln	cm/s <sup>2</sup>	1991	Crouse	15
log10	cm/s <sup>2</sup>	2010	Akkar & Bommer	47	log10	g	1992	Ambraseys et al.	16
Log10	cm/s <sup>2</sup>	2010	Douglas & Halldórsson	48	Ln	g	1993	Campbell	17
log10	cm/s <sup>2</sup>	2011	Bagheri et al.	50	Ln	g	1994	Campbell & Bozorgnia	18
log10	cm/s <sup>2</sup>	2012	Saffari et al.	51	معمولی	cm/s <sup>2</sup>	1994	Ramazi & Schenk	19
log10	g	2012	Mehrabani et al.	52	log10	g	1995	Ambraseys	20
log10	cm/s <sup>2</sup>	2012	Zafarani and Soghrat	53	log10	g	1996	Ambraseys & Simpson	21
log10	cm/s <sup>2</sup>	2012	Soghrat et al.	54	log10	g	1996	Ambraseys et al.	22
Ln	cm/s <sup>2</sup>	2013	Yazdani & Kowsari	55	Ln	g	1996	Crouse & McGuire	23
log10	cm/s <sup>2</sup>	2007	Tavakoli & Pezeshk	56	log10	g	1996	Sarma & Srbulov	24
ln	cm/s <sup>2</sup>	2006	Zhao et al.	57	Ln	g	1997	Abrahamson & Silva	25
ln	g	2008	Aghabarati_Tehranizadeh	58	Ln	g	1997	Sadigh et al.	26
Ln	g	2007	Graizer_Kalkan	59	Ln	g	1997	Campbell	27
Ln	g	2008	Idriss	60	log10	g	1997	Boore et al.	28
log10	m/s <sup>2</sup>	2008	Cauzzi_Faccioli	61	-	cm/s <sup>2</sup>	1999	Ramazi	29
Ln	g	۱۹۹۱	Niazi_Bozorgnia	62	log10	m/s <sup>2</sup>	1999	Zare et al.	30
					log10	cm/s <sup>2</sup>	1999	Chapman	31

## ۵- تحلیل و رتبه بندی

به طور کلی موضوع تعیین فاصله بین دو توزیع به مبحثی از تئوری اطلاعات<sup>۶</sup> به نام واگرایی<sup>۷</sup> مرتبط می شود. تعریف واگرایی به معنی معیاری است که فاصله و اختلاف بین دو توزیع را اندازه گیری می کند. در این روش نیازمند تعریف دو توزیع برای داده های ثبت شده و پیش بینی شده می باشیم. قدیمی ترین روش محاسبه واگرایی روش واگرایی (فاصله) کولبک-لیبلر<sup>۸</sup> است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$D(f_1, f_2) = \int_{R^d} f_1(u) \log \left[ \frac{f_1(u)}{f_2(u)} \right] du. \quad (۶)$$

که در آن  $f_1$  و  $f_2$  توزیع دو متغیر ثبت شده و پیش بینی شده است. هر چه این کمیت کمتر باشد، نشان دهنده شباهت بیشتر دو توزیع به یکدیگر و در نتیجه اختلاف کم آن ها با یکدیگر است. بعد از روش لولبک-لیبلر، روش های دیگری برای تعیین همگرایی بین دو توزیع ارائه شده است از جمله واگرایی رنی<sup>۹</sup> با رابطه زیر:

$$D_{R,a}(f_1, f_2) = \frac{1}{a-1} \log \int_{R^d} f_1^a(u) f_2^{1-a}(u) du. \quad a \in R \setminus \{1\} \quad (۷)$$

<sup>6</sup> Information theory

<sup>7</sup> Divergence

<sup>8</sup> Kullback-Leibler divergence (distance)

<sup>9</sup> Renye Divergence

روش LH باقیمانده نرمال شده مجموعه مشاهدات و داده‌های تخمینی را محاسبه می‌کند. فرض این روش این است که باقیمانده‌های مدل پیش بینی، توزیع لگ-نرمال دارند و با این فرض احتمال تجاوز باقیمانده‌ها را به عنوان مقادیر LH محاسبه می‌کند. رتبه‌بندی روابط کاهندگی بر اساس میانه مقادیر LH برای هر رابطه انجام می‌شود. به این مقدار اندیس LH گفته می‌شود و مقدار آن بین ۰ و ۱ است. در حالت بهینه مقادیر LH توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ دارند و میانه LH برابر با ۰.۵ می‌شود.

$$LH(|z_0|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{z_0}{\sqrt{2}}}^{\infty} \exp(-t^2) dt, z_0 = \frac{a - \mu_Y}{\sigma_Y} \quad (8)$$

که نشان دهنده مقدار مشاهده شده، و  $\mu_Y$  و  $\sigma_Y$  به ترتیب نشان دهنده میانگین و انحراف معیار پیش بینی می‌باشند. روش LH ابتدا در محدوده وسیعی شامل فرانسه، آلمان و سوئیس با داده‌های اندک مورد استفاده واقع شد [۱۴]. سپس هینترزبرگر و همکاران مجموعه داده‌ها را برای نواحی مشابه توسعه داده و رتبه بندی پیشین را اصلاح کردند [۳۶]. این دو مطالعه نتایج رتبه بندی مشابهی را با داده‌های مشابه بدست آوردند و پایداری روش LH را نشان دادند. استافورد و همکاران قابلیت استفاده از روابط  $NGA^{10}$  را در منطقه اروپا-مدیترانه با استفاده از روش LH مورد ارزیابی قرار دادند [۳۷]. همچنین این روش توسط کاکلمانس و همکاران [۱۵] برای صحت سنجی نتایج روش نش-ساتکلیف [۳۸] مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج روش LH به صورت کیفی در چهار رتبه (A تا D) بر اساس جدول (۲) بیان می‌شود.

روش LLH رهیافت انتخاب مدل مبتنی بر تئوری اطلاعات بوده و بر اساس روش لگاریتم درستنمایی فاصله بین دو تابع چگالی احتمال پیوسته  $f(x)$  و  $g(x)$  را محاسبه می‌کند. تابع چگالی احتمال  $f(x)$  که فرض می‌شود برای هر نقطه از داده‌ها موجود است در مجموعه داده‌ها بصورت توزیع پیشین مشخص نیست.

جدول ۲: محدوده رتبه بندی به روش درستنمایی (LH)

رتبه	محدوده میانگین درستنمایی
A	$1.0 > \text{med}(LH) > 0.4$
B	$0.4 > \text{med}(LH) > 0.3$
C	$0.3 > \text{med}(LH) > 0.2$
D	$0.2 > D$

این روش میانگین لگاریتم درستنمایی مدل پیش بینی را که توزیع پیشین آن با تابع  $g(x)$  مشخص است، محاسبه می‌کند. این روش همچنین احتمال وقوع نقطه داده مشاهده شده را با فرض توزیع پیشین مفروض کاهندگی ارائه می‌دهد. به این ترتیب مقادیر LLH بصورت ضریب انتخاب مدل محاسبه می‌شود.

$$LLH(|z_0|) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(f(x_i)|g(x)) \quad (9)$$

که  $N$  داده‌های مشاهده شده است.

رهیافت مبتنی بر تئوری اطلاعات LLH که جانشین روش LH شد، در مقالات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۹-۴۰]. در بین این مقالات، مقاله دلاوود و همکاران روش LLH را برای تعیین وزن درخت منطقی مورد استفاده قرار داده است [۴۱].

<sup>10</sup> Next generation attenuation



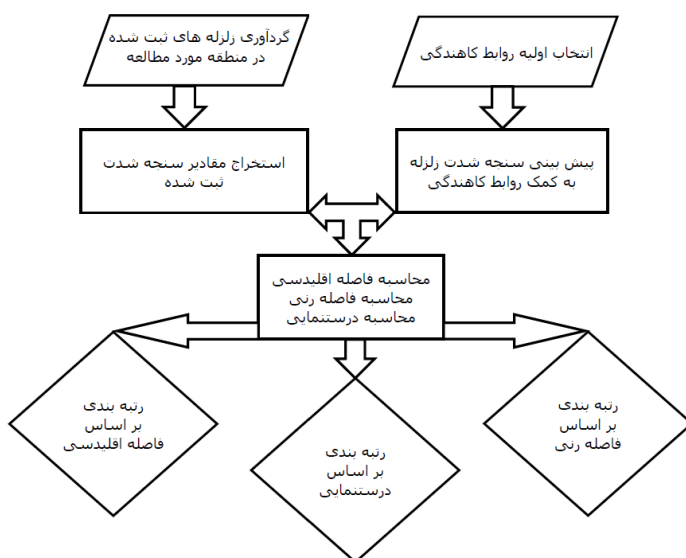
کالا و اکار روش فاصله درست‌نمایی برای رتبه‌بندی روابط کاهندگی ارائه کرده‌اند [۷]. اساس روش رتبه‌بندی آنها محاسبه فاصله اقلیدسی<sup>۱۱</sup> است. روش آنها اریبی روش‌های قبلی را برطرف کرده و تغییر پذیری کتره‌ای را در محاسبات وارد نموده‌است. فاصله اقلیدسی به معنای قدر مطلق تفاوت بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش بینی شده (مانند مفهوم تحلیل باقیمانده‌ها) است. این روش، اریبی مدل بین داده‌ها را می‌سنجد. این روش رابطه (۱۰) را برای تخمین میانگین فاصله اقلیدسی ( $MDEc$ ) مورد استفاده قرار می‌دهد:

$$MDEc = \int_0^{d_{\max}} d \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_D} \times \exp\left(-\frac{(d - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right) dd \quad (10)$$

$$+ \int_0^{d_{\max}} d \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_D} \times \exp\left(-\frac{(-d - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right) dd$$

که در این رابطه  $D=a-Y$  که  $a$  رخداد مشاهده شده و  $Y$  مقدار پیش‌بینی شده است.  $|d|_{\max} = \max(|\mu_D \pm x \times \sigma_D|)$ ؛  $\sigma_D^2$  که  $\mu_D$  به ترتیب واریانس و میانگین  $D$  می‌باشند. در نهایت رتبه‌بندی براساس  $MDEc$  انجام می‌شود. کمتر بودن  $MDEc$  به معنای همخوانی بیشتر رابطه کاهندگی با رخداد‌های منطقه است.

شکل شماره ۲ روند مراحل انجام تحلیل رتبه بندی را نشان می‌دهد. همچنین، جدول (۳) نتایج رتبه بندی بر اساس سه معیار واگرایی رنی، فاصله اقلیدسی و روش درست‌نمایی را نشان می‌دهد. روش‌ها در برخی حالات نتایج مشابه و در برخی دیگر نتایج متفاوت داشته‌اند. با توجه به عدم رجحان روابط بر هم، می‌توان از روش‌های بهینه پارتو مناسب ترین روابط را انتخاب نمود.



شکل ۲: فلوچارت مراحل انجام تحلیل رتبه بندی

به منظور بررسی اثرات روابط کاهندگی بر نتایج تحلیل خطر زلزله، تحلیل حساسیت نتایج تحلیل خطر به انتخاب روابط کاهندگی انجام گرفت. برای این منظور، روابطی که در رتبه بندی بهترین عملکرد را از خود نشان دادند، در انجام تحلیل خطر یک سایت به خصوص در مرکز تهران مورد استفاده قرار گرفتند. به پارامترهای ورودی تحلیل خطر عدم قطعیت متناظر با آن‌ها نسبت داده شد. سپس سهم هر یک از پارامترها روی تغییرپذیری نتایج تحلیل خطر مشخص گردید. شکل ۳ نتایج تحلیل حساسیت برای رابطه کاهندگی را نشان می‌دهد. محور افقی نشان دهنده تعداد روابطی است که در انجام تحلیل خطر استفاده شده است. به عنوان مثال، عدد ۲ روی محور افقی

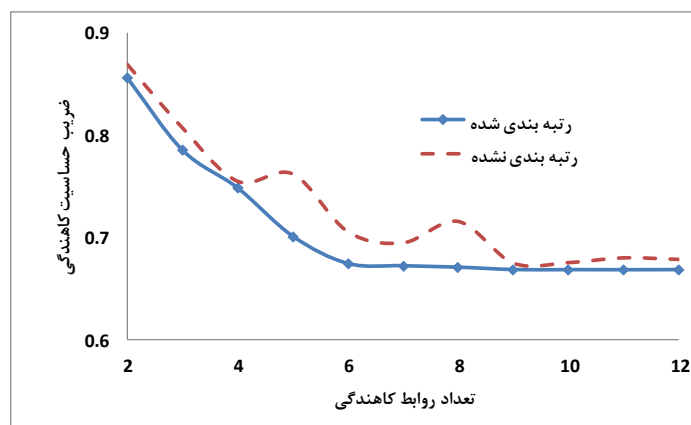
<sup>11</sup> Euclidean distance

این نمودار به این معنی است که از ۲ رابطه کاهندگی اول که بهترین عملکرد را در فرآیند رتبه بندی از خود نشان داده اند استفاده شده است. همچنین محور قائم نشان دهنده سهم عدم قطعیت در روابط کاهندگی بر تغییرپذیری نتایج تحلیل خطر است. به عنوان مثال، عدد ۰/۸۵ (متناظر با تعداد ۲ رابطه کاهندگی) نشان می دهد که در صورت استفاده از ۲ رابطه کاهندگی، ۸۵ درصد تغییرپذیری نتایج تحلیل خطر ناشی از روابط کاهندگی است. نتایج آنالیز حساسیت نشان می دهد که رتبه بندی می تواند حدود ۵-۸ درصد تاثیر رابطه کاهندگی را کاهش دهد. بنابراین در صورت پیروی دقیق از نظر متخصصین حدود ۹۰ درصد دقت در انتخاب روابط کاهندگی در منطقه تهران بدست آمده است. البته لازم به ذکر است که نظر متخصصین در این مورد بیش از حدود ۱۰۰ مقاله بوده است که برای ایران یا بطور خاص تر برای تهران توسط محققین مختلف بکار گرفته شده است. در غیر اینصورت بدیهی است اثر رتبه بندی بسیار افزایش خواهد یافت. مشاهده می شود که در تعداد حدود ۶ رابطه به بالا نتایج پایداری مناسب از خود نشان داده و می توان این تعداد را مبنای محاسبات بعدی قرار داد [۴۲]. البته در تعداد حدود ۹ رابطه پایداری نسبتاً کاملی ایجاد می شود. در حالت عدم رتبه بندی نوسان نتایج رخ می دهد. البته در این حالت نیز در ۹ رابطه پایداری مناسبی مشاهده می شود.

جدول ۳: نتایج رتبه بندی بر اساس سه معیار واگرایی رنی، فاصله اقلیدسی و روش درستنمایی

ردیف اولیه	رابطه کاهندگی	سال	فاصله (واگرایی) رنی	فاصله اقلیدسی	درستنمایی
41	Zare & Sabzali	2006	1	1	A
45	Sobhaninejad et al.	2007	2	3	B
33	Khademi	2002	3	2	B
55	Zafarani and Soghlat	2012	4	4	B
28	Boore et al.	1997	5	11	C
57	Yazdani & Kowsari	2013	6	7	B
52	Bagheri et al.	2011	7	6	B
24	Sarma & Srbulov	1996	8	5	C
16	Ambraseys et al.	1992	9	8	C
53	Saffari et al.	2012	10	15	C
13	Ambraseys	1990	11	10	C
40	Mahdavian	2006	12	16	C
56	Soghlat et al.	2012	13	20	B
22	Ambraseys et al.	1996	14	18	C
14	Ambraseys & Bommer	1991	15	13	C
20	Ambraseys	1995	16	9	D
5	Joyner & Boore	1981	17	17	C
58	Tavakoli & Pezeshk	2007	18	19	C
35	Sigbjörnsson & Ambraseys	2003	19	14	C
30	Zare et al.	1999	20	12	C
37	Ambraseys et al.	2005	21	44	D
21	Ambraseys & Simpson	1996	22	22	C
48	Humbert & Viallet	2008	23	23	C
44	Bommer et al.	2007	24	21	A
54	Mehrabi et al.	2012	25	25	B
18	Campbell & Bozorgnia	1994	26	28	B
63	Cauzzi Faccioli	2008	27	24	C
47	Massa et al.	2008	28	51	D

60	Aghabari_Tehranizadeh	2008	29	33	C
8	PML	1982	30	30	B
31	Chapman	1999	31	27	D
59	Zhao et al.	2006	32	42	B
38	Nowrozi	2005	33	36	C
34	Ambraseys & Douglas	2003	34	57	D
46	Akkar & Bommer	2007	35	43	D
39	Nowrozi	2005	36	38	B
42	Ghodrati Amiri et al.	2007	37	40	C
12	Dahle et al.	1990	38	37	B
61	Graizer_Kalkan	2007	39	39	C
50	Akkar & Bommer	2010	40	43	D
15	Crouse	1991	41	49	C
62	Idriss	2008	42	41	C
9	PML	1985	43	29	D
32	Campbell & Bozorgnia	2000	44	32	D
10	Sadigh et al.	1986	45	45	D
23	Crouse & McGuire	1996	46	53	D
7	Campbell	1981	47	48	D
64	Niazi & Bozorgnia	1991	48	46	D
26	Sadigh et al.	1997	49	47	D
27	Campbell	1997	50	50	D
6	Chiaruttini & Siro	1981	51	26	D
17	Campbell	1993	52	52	D
11	Campbell	1990	53	55	D
43	Massa et al.	2007	54	56	D
19	Ramazi & Schenk	1994	55	59	A
25	Abrahamson & Silva	1997	56	58	D
51	Douglas & Halldórsson	2010	57	54	D
2	Donovan	1973	58	62	D
3	McGuire	1977	59	61	D
29	Ramazi	1999	60	60	D
4	Ambraseys	1978	61	63	D
36	Zare	2004	62	64	D
1	Esteva & Villaverde	1973	--	31	B



شکل ۳: تغییرات نمودار ضریب حساسیت بر حسب تعداد برای روابط کاهندگی در منطقه تهران

به طور کلی نتایج تحلیل رتبه بندی نشان داد که رابطه زارع و سبزعلی (۲۰۰۶)، سبحانی نژاد و همکاران (۲۰۰۷)، خادمی (۲۰۰۲)، سبحانی نژاد و همکاران (۲۰۰۷) و زعفرانی و سقراط (۲۰۱۲) همخوانی بسیار خوبی با زلزله های رخ داده در منطقه تهران دارد. لازم به توجه است که برخی از روابط ذکر شده در بالا بر اساس داده های منطقه ای، برخی بر اساس داده های سراسر ایران و برخی بر اساس داده های جهانی بدست آمده اند و همخوانی مناسبی با لرزه خیزی منطقه تهران از خود نشان داده اند. همچنین مشاهده می شود که نتایج فاصله رنی و فاصله اقلیدسی همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند.

## ۶- نتیجه گیری

یکی از مشکلات اصلی تحلیل خطر زلزله آنست که به دلیل وجود داده های اندک و ذات تکرارپذیری کم یا عدم تکرارپذیری، انتخاب مدل ها و ارزیابی نتایج همواره با عدم اطمینان بسیار مواجه بوده است. یکی از مهم ترین عوامل تاثیرگذار در نوسان نتایج تحلیل خطر زلزله، رابطه پیش بینی حرکت زمین است. به منظور کاهش میزان تاثیرپذیری نتایج از انتخاب رابطه، لازم است روشی برای انتخاب بهترین روابط مدنظر قرارگیرد. در این مقاله به سه روش ریاضی پذیرفته شده، سعی در انتخاب بهترین مدل کاهندگی در منطقه تهران شده است. روش فاصله رنی یکی از پرکاربردترین روش ها جهت رتبه بندی می باشد. بر اساس فاصله رنی روابط کاهندگی مناسب منطقه تهران به ترتیب زارع و سبزعلی (۲۰۰۶)، سبحانی نژاد و همکاران (۲۰۰۷)، خادمی (۲۰۰۲)، زعفرانی و سقراط (۲۰۱۲) و بور و همکاران (۱۹۹۷) تعیین شده است. روش اقلیدسی جزو روش های نوین در رتبه بندی می باشد و بر اساس فاصله اقلیدسی روابط کاهندگی مناسب تهران به ترتیب زارع و سبزعلی (۲۰۰۶)، خادمی (۲۰۰۲)، سبحانی نژاد و همکاران (۲۰۰۷)، زعفرانی و سقراط (۲۰۱۲) سارما و اسپرلوف (۱۹۹۶) است. روش ماکزیمم درستنمایی یک روش سنتی در رتبه بندی می باشد و بر اساس روش ماکزیمم درستنمایی روابط کاهندگی زارع و سبزعلی (۲۰۰۶)، بومر و همکاران (۲۰۰۷) و رامزی و شنک (۱۹۹۴) مناسبترین تشخیص و امتیاز بالاتری دارا می باشند.

در ادامه به منظور سنجش تاثیر روابط کاهندگی بر نتایج تحلیل خطر و تعیین حداقل تعداد رابطه برای انجام تحلیل خطر پایدار آنالیز حساسیت انجام شده است. نتایج آنالیز حساسیت تحلیل خطر تهران نشان می دهد که

- ۱- با استفاده از روابط کاهندگی مناسب می توان تاثیرپذیری نتایج را از تغییرات روابط کاست.
- ۲- استفاده از رویکردهای مختلف رتبه بندی می تواند به افزایش آگاهی نسبت به مساله انتخاب روابط کاهندگی منجر شود.
- ۲- به این منظور استفاده از حداقل ۶ رابطه رتبه بندی شده می تواند میزان تاثیرپذیری نتایج تحلیل خطر از رابطه کاهندگی را حدود ۲۰ درصد کاهش دهد و منجر به پایداری نسبی نتایج شود. به این ترتیب ارزیابی نتایج مبنای دقیق تری خواهد یافت.
- ۳- در صورت عدم رتبه بندی استفاده از حداقل ۹ رابطه توصیه می شود.

## ۷- منابع و مراجع

- [1] Mirza Goltabar Roshan, A., & Mahdavi Omran, S. (2015). The Dynamic Behavior of a Network of Pipelines and Liquefaction of Soil Caused by the Earthquake Acceleration. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2(2), 67-76.
- [2] Jafari, R., & Alidoost Abadikhah, F. (2019). Seismic Risk Assessment of Mashhad. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(4), 128-150.  
doi: 10.22065/jsce.2017.81346.1132
- [3] Ghadimi Hamzehkolaei, A., Vafaeinezhad, A., & Ghodrati Amiri, G. (2021). Zoning of suitable places for temporary accommodation after an earthquake in Karaj city using fuzzy logic theory. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), 44-55.  
doi: 10.22065/jsce.2019.156425.1709 /jsce.2019.156425.1709
- [4] Motaghed, S., Nakhlian, A., Emadali, L., Eftekhari, N., & Mahmudian, H. (2023). Determining the natural frequency of Behbahan city soil using microtremor data analysis. *Journal of Geography and Environmental Hazards*.(in press)  
doi: 10.22067/geoeh.2023.80563.1326
- [5] Akhiani, M., & Pezeshk, S. (2022). Using metaheuristic algorithms to optimize a mixed model-based ground-motion prediction model and associated variance components. *Journal of Seismology*, 26(3), 483-498.  
doi.org/10.1007/s10950-022-10091-y
- [6] Douglas, J. GMPE compendium. (2022, January 4 – last update). [Online]. Available: <http://www.gmpe.org.uk/> [2019, February 3]
- [7] Akkar, S., Kale, Ö., Yakut, A., & Ceken, U. (2018). Ground-motion characterization for the probabilistic seismic hazard assessment in Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(8), 3439-3463.  
doi.org/10.1007/s10518-017-0101-2
- [8] Lanzano, G., D'Amico, M., Felicetta, C., Puglia, R., Luzi, L., Pacor, F., & Bindi, D. (2016). Ground-motion prediction equations for region specific probabilistic seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(1), 73-92.  
doi.org/10.1785/0120150096
- [9] 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.
- [10] Kowsari, M., Halldorsson, B., Hrafinkelsson, B., & Jónsson, S. (2019). Selection of earthquake ground motion models using the deviance information criterion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 288-299.  
doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.11.014
- [11] Zafarani, H., & Soghrat, M. R. (2017). A selected dataset of the Iranian strong motion records. *Natural Hazards*, 86(3), 1307-1332.  
doi.org/10.1007/s11069-017-2745-2
- [12] Kayhan, A. H., Demir, A., & Palanci, M. (2022). Multi-functional solution model for spectrum compatible ground motion record selection using stochastic harmony search algorithm. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(12), 6407-6440.  
doi.org/10.1007/s10518-022-01450-8
- [13] Mardi, Z., Ansari, A. (2014). Ranking of Attenuation Relationships Using Earthquake 11 August 2012 in Ahar-Varzaghan, *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, Volume:16 Issue: 3 , 11-20
- [14] Scherbaum, F., F. Cotton, and P. Smith (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, *Bull. Seismol. Soc. Am.* no. 6, 2164–2185.

doi:10.1785/0120030147

[15] Kaklamanos, J., and L. G. Baise (2011). Model validations and comparisons of the next generation attenuation of ground motions (NGA–West (project, Bull. Seismol. Soc. Am. no. 1, 160–175.

doi.org/10.1785/0120100038

[16] Kaklamanos, J., L. G. Baise, and D. M. Boore (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice, *Earthq. Spectra* 1219–1235

doi.org/10.1193/1.3650372

[17] Bindi, D., Luzi, L., Pacor, F., Franceschina, G., & Castro, R. R. (2006). Ground-motion predictions from empirical attenuation relationships versus recorded data: the case of the 1997–1998 Umbria-Marche, central Italy, strong-motion data set. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 984–1002.

doi.org/10.1785/0120050102

[18] Shoja-Taheri, J., S. Naserieh, and G. Hadi (2010). A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau, *J. Earthq. Eng.* 278–292.

doi:10.1080/13632460903086051

[19] Scasserra, G., J. P. Stewart, P. Bazzurro, G. Lanzo, and F. Mollaioli (2009). A comparison of NGA ground-motion [prediction equations to Italian data, *Bull. Seismol. Soc. Am.* no. 5, 2961–2978.

doi.org/10.1785/0120080133

[20] Scherbaum, F., E. Delavaud, and C. Riggelsen (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information–theoretic perspective, *Bull. Seismol. Soc. Am.* no. 6, 3234–3247.

doi.org/10.1785/0120080347

[21] 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.

doi.org/10.1785/0120120134

[22] Ghasemi, H., Zare, M., & Fukushima, Y. (2008). Ranking of several ground-motion models for seismic hazard analysis in Iran. *Journal of Geophysics and Engineering*, 5(3), 301.

doi.org/10.1088/1742-2132/5/3/006

[23] Zafarani, H., & Mousavi, M. (2014). Applicability of different ground-motion prediction models for northern Iran. *Natural Hazards*, 1–30.

doi.org/10.1007/s11069-014-1151-2

[24] Mousavi, M., A. Ansari, H. Zafarani, and A. Azarbakht (2012). Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analysis in the Zagros region, Iran, *J. Earthq. Eng.* 1184–1207.

doi.org/10.1080/13632469.2012.685568

[25] Farajpour, Zoya, et al. "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 (2021): 242–257.

doi.org/10.1785/0120200052

[26] Zafarani, H., et al. "Selection and Modification of Ground Motion Prediction Equations in Different Tectonic Regions of Iran considering Declustered and Non-declustered Earthquake Catalogs." *Journal of Earthquake Engineering* 27.4 (2023): 981–1011.

doi.org/10.1080/13632469.2022.2033361

[27] Yaghmaei-Sabegh, S., Jodat-Saeidabad, A. Ground Motion Records Selection Based on Scalar Frequency-Content Parameters. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* 47, 1041–1057 (2023)

doi.org/10.1007/s40996-022-00969-9

[28] Motaghed, S., Khazaei, M., Eftekhari, N., & Mohammadi, M. (2023). A non-extensive approach to probabilistic seismic hazard analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1117–1124.

doi.org/10.5194/nhess-23-1117-2023

[29] Khanzadi, M., Nicknam, A., Yazdani, A., & Motaghed, S. (2014). A Bayesian approach for seismic recurrence parameters estimation. *Journal of Vibroengineering*, 16(2), 977–986.

[30] Yazdani, A., Yazdani, A., Nicknam, A., Khanzadi, M., & Motaghed, S. (2015). An Artificial Statistical Method to Estimate Seismicity Parameter from Incomplete Earthquake Catalogs, a Case Study in Metropolitan Tehran, Iran. *Scientia Iranica*, 22(2), 400–409.

[31] Moradiyan, Mohammadhosein, Ghasem Pachideh, and Amin Moshtagh. "Study of seismic behavior and development of fragility curves of divergent braced frames under successive earthquakes." *Journal of Structural and Construction Engineering* 8.Special Issue 4 (2022): 156–175.

doi.org/10.22065/jsce.2021.263292.2315

[32] Pachideh, Ghasem, Majid Gholhaki, and Amir Saedi Daryan. "Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis." Structures. Vol. 20. Elsevier, 2019.

doi.org/10.1016/j.istruc.2019.05.005

[33] Gholhaki, Majid, and Ghasem Pachideh. "Investigating of damage indexes results due to presence of shear wall in building with various stories and spans." Int J Rev Life Sci 5.1 (2015): 992-997.

[34] Berberian, M. (2005). The 2003 Bam urban earthquake: a predictable seismotectonic pattern along the western margin of the rigid Lut block, southeast Iran. Earthquake Spectra, 21(1\_suppl), 35-99.

doi.org/10.1193/1.2127909

[35] USGS (The United States Geological Survey): "Search Earthquake Catalog", 2020.

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>,

[36] Hintersberger, E., F. Scherbaum, and S. Hainzl (2007). Update of likelihood based ground-motion model selection for seismic hazard analysis in western central Europe, Bull. Earthq. Eng. 1-16.

doi.org/10.1007/s10518-006-9018-x

[37] Stafford, P. J., Strasser, F. O., & Bommer, J. J. (2008). An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region. Bulletin of earthquake Engineering, 6(2), 149-177.

doi.org/10.1007/s10518-007-9053-2

[38] Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I—A discussion of principles, J. Hydrol. ۲۹۰-۲۸۲ .

doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

[39] Delavaud, E., F. Scherbaum, N. Kuehn, and C. Riggelsen (2009). Information-theoretic selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis: An applicability study using Californian data, Bull. Seismol. Soc. Am. no. 6, 3248-3263.

doi.org/10.1785/0120090055

[40] Delavaud, E., F. Scherbaum, N. Kuehn, and T. Allen (2012). Testing the global applicability of ground-motion prediction equations for active shallow crustal regions, Bull. Seismol. Soc. Am. no. 2, 707-721.

doi.org/10.1785/0120110113

[41] Delavaud, E., F. Cotton, S. Akkar, F. Scherbaum, L. Danciu, C. Beauval, S. Drouet, J. Douglas, R. Basili, M. A. Sandikkaya, M. Segou, E. Faccioli, and N. Theodoulidis (2012b). Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe, J. Seismol. 451-473.

doi.org/10.1007/s10950-012-9281-z

[42] Bayari, M. A., Shabakhty, N., & Izadi Zaman Abadi, E. (2021). Assessing the Effects of Record Selection and Ground-Motion's Spectral Shape on the Collapse Capacity of the Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 3), 420-442. doi: 10.22065/jsce.2021.247703.2234

doi.org/10.22065/jsce.2021.247703.2234