

## Ranking of Attenuation Relations for Seismic Hazard Analysis in the Alborz-Azerbaijan Seismotectonic Province

Amirhossein Rostami<sup>1</sup>, Hamid Saffari<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. in Earthquake Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Structure and Earthquake, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Seismic hazard analysis is crucial for designing earthquake-resistant structures. Inaccuracies in its estimation can have significant consequences: underestimating the hazard may lead to structural failures, while overestimating it can result in unnecessary costs. A key step in seismic hazard analysis is the selection of attenuation relations. These relations describe the attenuation of seismic waves' energy as it propagates from the source to the site, and provide estimates of ground-motion at the site. The selection process must be based on scientific criteria and regional compatibility to ensure realistic results. In this study, 10 attenuation relations, categorized as global, regional, and local, were evaluated using two statistical approaches: residuals distribution and the log-likelihood (LLH). The evaluation utilized strong ground-motion data from the Alborz-Azerbaijan seismotectonic province. The dataset included 405 records with moment magnitudes  $\geq 4.5$ , source-to-site distances up to 200 km, and known shear-wave velocities, compiled as of 5 December 2024. The results showed that the relations proposed by Farajpour et al. (2019), Kale et al. (2015), and Sadeghati and Pezeshk (2017) provided the best agreement with the regional ground-motion data. Overall, local relations outperformed global ones in northern and northwestern Iran. These findings support the use of local attenuation relations for improved seismic hazard analysis, thereby aiding engineers in achieving safer and more cost-effective structural designs.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 06 February 2025

Revise Date: 08 June 2025

Accept Date: 09 June 2025

### Keywords:

Seismic Hazard Analysis;  
Attenuation Relation;  
PGA;  
Alborz-Azerbaijan  
Seismotectonic Province;  
Residual Distribution;  
LLH.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.501766.3636

\*Corresponding author: Hamid Saffari  
Email address: h\_saffari@sbu.ac.ir

## رتبه‌بندی روابط میرایی برای تحلیل خطر زلزله در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان

امیرحسین رستمی<sup>۱</sup>، حمید صفاری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران-زلزله، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه سازه و زلزله، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

به منظور طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، باید تحلیل خطر لرزه‌ای انجام شود که هدف آن، ارزیابی خطرپذیری در برابر زلزله در ساختگاه است. عدم دقت در این تحلیل می‌تواند پیامدهای جدی به دنبال داشته باشد. دست کم گرفتن خطر لرزه‌ای ممکن است به خسارات جبران‌ناپذیر منجر شود. در حالی که دست بالا گرفتن آن می‌تواند هزینه‌های اقتصادی غیرضروری به پروژه تحمیل کند. یکی از گام‌های اساسی در این تحلیل، انتخاب روابط میرایی است که با برآورد کاهش انرژی امواج زلزله از چشمه لرزه‌زا تا ساختگاه، حرکت زمین در منطقه هدف را تخمین می‌زنند. انتخاب این روابط باید بر اساس معیارهای علمی و سازگاری با منطقه انجام شود تا نتایج به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در این مطالعه، با استفاده از رویکردهای آماری توزیع مانده‌ها و آزمون لگاریتم درست‌نمایی (LLH)، ۱۰ رابطه در سه دسته جهانی، منطقه‌ای و محلی بر اساس داده‌های حرکت قوی ثبت‌شده در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده‌های مورد استفاده شامل ۴۰۵ رکورد با بزرگای گشتاوری ۴/۵ و بیشتر، فاصله حداکثر تا ۲۰۰ کیلومتر و دارای سرعت موج برشی معلوم تا تاریخ ۵ دسامبر ۲۰۲۴ است. نتایج توزیع مانده‌ها و آزمون LLH به طور مشترک نشان داد که روابط فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹)، کاله و همکاران (۲۰۱۵) و صداقتی و پزشکی (۲۰۱۷)، به ترتیب با مقادیر LLH برابر با ۰/۲۶۳، ۰/۴۵۲ و ۰/۴۷۸، در مقایسه با سایر روابط، بیشترین سازگاری را با داده‌های ثبت‌شده در این منطقه دارند. به طور کلی، روابط محلی و منطقه‌ای نسبت به روابط جهانی، دقت بیشتری در برآورد داده‌های حرکت قوی ثبت‌شده در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان نشان دادند. یافته‌های این مطالعه می‌تواند در انتخاب مناسب‌ترین روابط میرایی برای تحلیل دقیق‌تر خطر لرزه‌ای در این منطقه یاری رساند.

کلمات کلیدی: تحلیل خطر زلزله، رابطه میرایی، بیشینه شتاب زمین، ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان، آزمون توزیع مانده‌ها، آزمون لگاریتم درست‌نمایی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.501766.3636	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.501766.3636	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۴/۰۳/۱۹	۱۴۰۴/۰۳/۱۹	۱۴۰۴/۰۳/۱۸	۱۴۰۳/۱۱/۱۸
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				حمید صفاری		
				h_saffari@sbu.ac.ir		

## ۱- مقدمه

ایران به دلیل قرارگیری در کمربند کوهزایی آلپ-همالیا، یکی از لرزه‌خیزترین مناطق جهان به شمار می‌رود. زمین‌لرزه‌های فاجعه‌آمیز در طول تاریخ این کشور، تلفات جانی و خسارات مالی فراوانی به بار آورده‌اند. از جمله این زمین‌لرزه‌ها می‌توان به زلزلهٔ بوئین‌زهر (۱۹۶۲)، زلزلهٔ طبس (۱۹۷۸)، زلزلهٔ رودبار و منجیل (۱۹۹۰) و زلزلهٔ بم (۲۰۰۳) اشاره نمود که هر یک موجب ویرانی‌های گسترده و کشته شدن هزاران نفر شده‌اند. قرارگیری شهرهای پرجمعیت و زیرساخت‌های مهم در مجاورت گسل‌های فعال، اهمیت مطالعات خطر لرزه‌ای در ایران را برجسته ساخته‌اند.

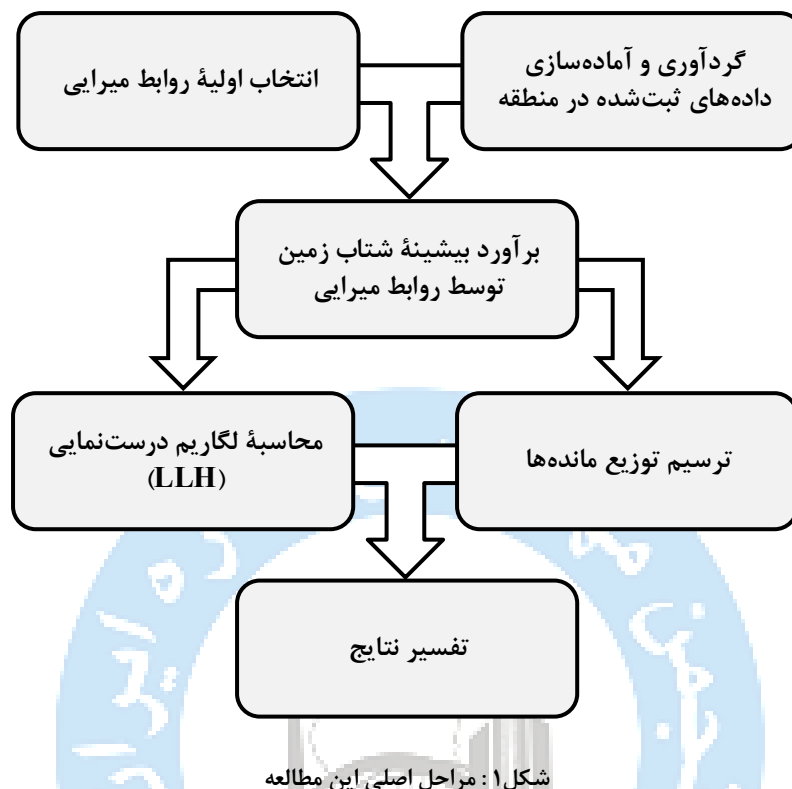
در این راستا تحلیل خطر لرزه‌ای (SHA) می‌تواند کمک شایانی به طراحی لرزه‌ای، بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها کند و آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات زمین‌لرزه را کاهش دهد. در هر دو رویکرد تعیینی (DSHA) و احتمالاتی (PSHA) تحلیل خطر، برآورد حرکت زمین توسط روابط میرایی، مبنای ارزیابی خطرپذیری در برابر زلزله است. در واقع، انتخاب روابط میرایی مناسب یکی از مراحل اصلی و مهم در این تحلیل است، چرا که نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای از پاسخ رابطهٔ میرایی به طور قابل توجهی تأثیر می‌پذیرد [۱]. بدیهی است هرچه تخمین رابطه به واقعیت نزدیک‌تر باشد، نتایج تحلیل خطر قابل اطمینان‌تر خواهد بود. از این رو محققین همواره تلاش می‌کنند روابط میرایی را بهبود دهند و حرکت زمین را بهتر تخمین بزنند.

گسترش شبکهٔ شتابنگاری و افزایش داده‌های ثبت‌شده زمینه‌ساز توسعهٔ روابط میرایی جدید و باعث افزایش روزافزون آن‌ها شده است [۲]. با این وجود هنوز هیچ رابطهٔ میرایی ایده‌آلی وجود ندارد. این روابط بر اساس مجموعه‌داده‌های قبلی محاسبه می‌شوند و به صورت تجربی به دست می‌آیند، از این رو هر کدامشان دقت عملی محدود به داده‌های خود دارند. به کار گرفتن روابط میرایی بدون در نظر گرفتن سازگاری آن‌ها با داده‌های منطقهٔ هدف ممکن است خطاهای قابل توجهی ایجاد کند و به نتایج گمراه‌کننده‌ای منجر شود. در این میان افزایش تعداد روابط موجود، انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها را به امری چالش‌برانگیز بدل کرده و موجب سردرگمی تحلیلگران در استفاده از آن‌ها شده است [۳ و ۴]. از این رو، رتبه‌بندی و وزن‌دهی روابط میرایی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

با استفاده از رویکردهای آماری می‌توان مقادیر پیش‌بینی را بر پایهٔ مقادیر مشاهده‌شده سنجید و عملکرد روابط میرایی را ارزیابی کرد. روش کلاسیک توزیع مانده‌ها، یکی از جامع‌ترین رویکردهای ارزیابی انحراف مقادیر تخمین‌زده‌شده نسبت به مقادیر تجربه‌شده است. این روش به خوبی می‌تواند سوگیری‌های سیستماتیک در عملکرد رابطه را آشکار سازد [۵]. علاوه بر آن، محققین تلاش کردند رویکردهای مناسب‌تری برای رتبه‌بندی روابط میرایی معرفی کنند. از جمله آن‌ها می‌توان به شریام و همکاران اشاره نمود که در سال ۲۰۰۹ آزمون لگاریتم درست‌نمایی (LLH) را ارائه کردند [۶]. این آزمون که بر مبنای تئوری اطلاعات کار می‌کند، میزان اطلاعات از دست‌رفته در تطابق کلی مجموعه‌مقادیر پیش‌بینی با مجموعه‌مقادیر مشاهده‌شده را به صورت کمی بیان می‌کند و از این طریق عملکرد رابطه را می‌سنجد [۷].

تحقیقات متعددی روابط میرایی را با روش LLH رتبه‌بندی کرده‌اند. از جمله مطالعات جهانی اخیر می‌توان به کارهای مبروک (۲۰۲۴) برای ترکیه [۸]، لی و همکاران (۲۰۲۴) برای کرهٔ جنوبی [۹] و فرهادی و همکاران (۲۰۱۸) برای مرکز و شرق آمریکای شمالی [۱۰] اشاره نمود. در ایران نیز چند مطالعهٔ موردی برای ارزیابی قابلیت روابط در برآورد چند زلزلهٔ خاص انجام شده، اما مطالعاتی که با استفاده از سابقهٔ زمین‌لرزه‌ها عملکرد روابط را برای یک منطقه سنجیده باشند، محدودند. به عنوان مثال، شیخی و صفاری (۲۰۲۴) [۱۱] و صیادپور و همکاران (۲۰۲۰) [۱۲] روابط میرایی را بر اساس مجموعه‌داده‌های ایالت لرزه‌زمین‌ساخت زاگرس رتبه‌بندی کرده‌اند یا فرج‌پور و همکاران (۲۰۲۱) [۱۳] با مجموعه‌داده‌های منتخب از سراسر ایران، روابط را ارزیابی کرده‌اند. فرج‌پور و همکاران کار ارزشمندی انجام داده‌اند، اما به عقیدهٔ نگارندگان، صرف نظر از مجموعه‌داده‌های محدود، تمایز قائل نشدن میان ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساخت ایران و نادیده گرفتن ویژگی‌های کاملاً متفاوت هر منطقه (به خصوص زاگرس) نمی‌تواند ارزیابی دقیقی از عملکرد واقعی روابط ارائه دهد. علاوه بر این، به رغم اهمیت ویژهٔ مطالعات خطر لرزه‌ای در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان به دلیل وجود گسل‌های فعال متعدد و تمرکز جمعیتی و اقتصادی، هیچ مطالعه‌ای به طور اختصاصی به رتبه‌بندی و وزن‌دهی روابط میرایی در این منطقه نپرداخته است. مطالعهٔ حاضر با بهره‌گیری از پایگاه داده‌های به‌روز و رویکردی ساختارمند در پی آن است که این خلأ پژوهشی را برطرف سازد. این پژوهش با شناسایی مناسب‌ترین

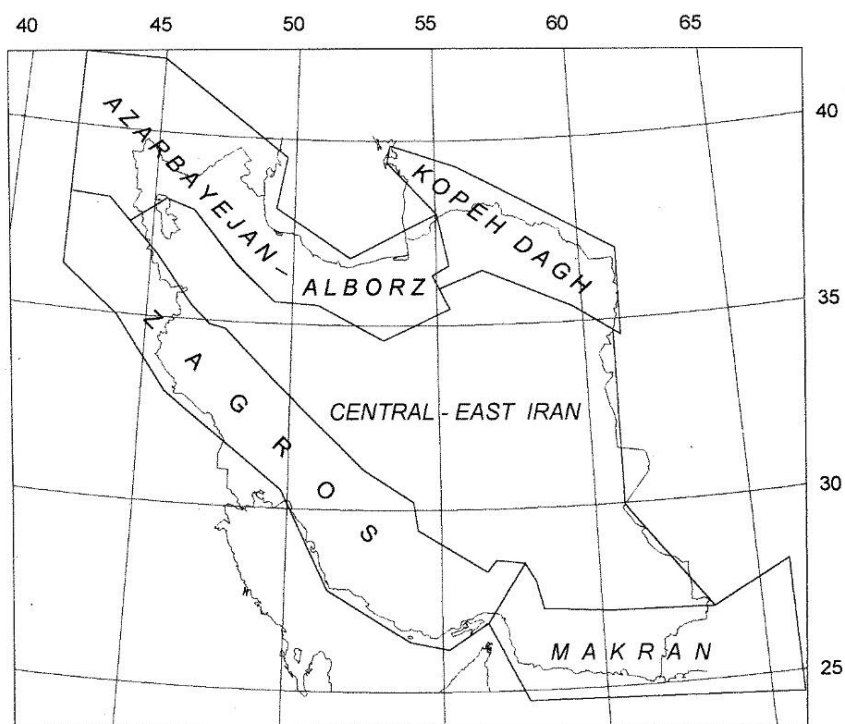
روابط میرایی در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان، از طریق ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی این روابط با استفاده از توزیع مانده‌ها و آزمون LLH، به افزایش دقت برآورد حرکت قوی زمین و تحلیل خطر لرزه‌ای کمک شایانی می‌نماید. مراحل اصلی این مطالعه به صورت خلاصه در شکل ۱ ارائه شده است.



## ۲- منطقه هدف

فلات ایران، واقع در میان صفحات عربستان و اوراسیا و در امتداد کمربند کوه‌زایی آلپ-همیالیا، یکی از فعال‌ترین مناطق لرزه‌ای جهان به شمار می‌رود. این موقعیت، ایران را به طور مداوم در معرض زمین‌لرزه‌های قوی و فعالیت‌های لرزه‌ای قابل توجه قرار داده است. به منظور تحلیل دقیق‌تر مخاطرات زلزله، مناطق بر اساس فعالیت‌های لرزه‌ای و ویژگی‌های زمین‌ساختی تقسیم‌بندی می‌شوند. مطالعات متعدد در این زمینه، تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای ایران ارائه کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به نوروزی (۱۹۷۶) با تعریف ۲۳ زون [۱۴]، توکلی (۱۹۹۶) با ۲۰ زون [۱۵] و میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) با ۵ ایالت [۱۶] اشاره نمود. میرزایی و همکاران، ایران را بر اساس فعالیت‌های لرزه‌ای عمده و ویژگی‌های زمین‌ساختی مناطق مختلف آن به ۵ ایالت لرزه‌زمین‌ساخت اصلی، مطابق شکل ۲، تقسیم‌بندی کرده‌اند. ایالت‌های عنوان شده عبارت‌اند از:

- زاگرس
- البرز-آذربایجان
- ایران مرکزی و شرقی
- کپه‌داغ
- مکران

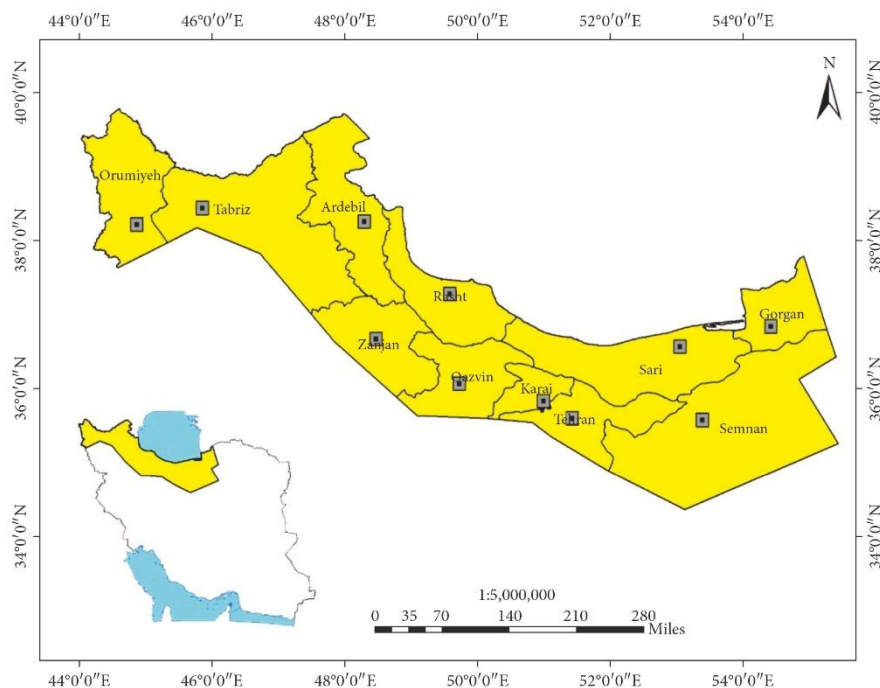


شکل ۲: ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساخت اصلی ایران بر اساس تقسیم‌بندی میرزایی و همکاران [۱۶]

برخی محققین تقسیم‌بندی جزئی‌تر و برخی دیگر تقسیم‌بندی کلی‌تری تعریف کرده‌اند. هدف این مطالعه، بهره‌گیری از یک تقسیم‌بندی کلی‌تر است تا حجم بیشتری از داده‌های ثبت‌شده مورد استفاده قرار گیرند و نتایج برای پهنه بزرگ‌تری قابلیت تعمیم و کاربرد داشته باشد. از این رو، تقسیم‌بندی میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) مبنای این مطالعه قرار گرفته است.

منطقه البرز-آذربایجان یکی از فعال‌ترین ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساخت ایران است. این منطقه، مطابق شکل ۳، استان‌های تهران، البرز، مازندران، گیلان، اردبیل، قزوین و بخش‌هایی از آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، زنجان، گلستان و سمنان را شامل می‌شود و کلان‌شهرهایی مانند تهران، کرج و تبریز را در بر می‌گیرد. تمرکز جمعیتی و اقتصادی این منطقه در مجاورت گسل‌های فعال متعدد اهمیت مطالعات خطر لرزه‌ای در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان را برجسته ساخته است. قربانی (۲۰۲۱) [۱۷] گسل‌های مهمی که در تکامل ریخت‌زمین‌ساخت و فعالیت لرزه‌ای این منطقه نقش کلیدی دارند را به طور کامل معرفی کرده است که از جمله آن‌ها می‌توان به گسل‌های خزر، شمال البرز، آستارا، تبریز، شمال تهران و مشا اشاره نمود. گسل خزر با طولی بین ۵۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر، دارای سازوکار معکوس با مؤلفه چپ‌گرد است. این گسل مرز دامنه شمالی البرز و جلگه‌های جنوب خزر را مشخص می‌کند. گسل خزر به دلیل فعالیت بالای خود، نقش مهمی در ریخت‌زمین‌ساخت البرز دارد. گسل شمال البرز با طول تقریبی ۴۰۰ کیلومتر و سازوکار معکوس، به موازات گسل خزر قرار دارد. این گسل در منطقه چالوس با گسل خزر تلاقی می‌کند. گسل معکوس آستارا در ایران تا مرز جمهوری آذربایجان حدود ۲۰۰ کیلومتر طول دارد و در ادامه تا ۴۰۰ کیلومتر امتداد می‌یابد. این گسل نیز نقش مهمی در ریخت‌زمین‌ساخت منطقه ایفا کرده و استعداد بالایی برای ایجاد زمین‌لرزه‌های شدید دارد. زلزله‌های تاریخی رشت و قفقاز به این گسل نسبت داده می‌شوند. گسل تبریز با طول حدودی ۱۵۰ کیلومتر، شیب قائم و سازوکار امتدادلغز با مؤلفه راست‌گرد، در قرن گذشته فعالیت قابل توجهی نداشته است. با این حال، محققین معتقدند این گسل در آینده نزدیک زلزله‌ای مخرب ایجاد می‌کند که شهر تبریز را به طور جدی تهدید خواهد کرد. گسل شمال تهران، واقع در دامنه جنوبی البرز، با طول ۱۱۰ کیلومتر، در بخش‌های غربی غیرفعال به نظر می‌رسد اما در بخش‌های شرقی سازوکار امتدادلغز با مؤلفه چپ‌گرد دارد و به گسل مشا متصل می‌شود. گسل مشا نیز با طول ۱۸۰ کیلومتر، عمق ۱۰ کیلومتر و سازوکار امتدادلغز با مؤلفه چپ‌گرد،

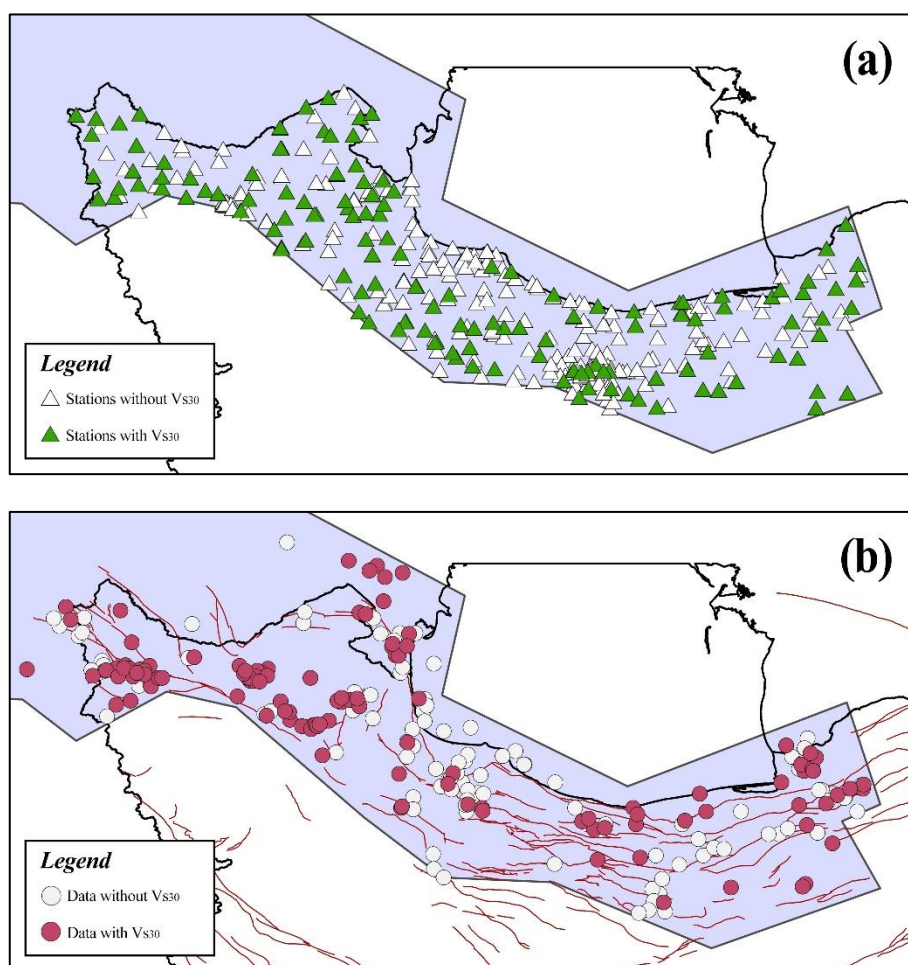
یکی از فعال ترین گسل های ایران است. گسل های شمال تهران و مشا از اهمیت ویژه ای برخوردارند، چرا که می توانند خطر بالایی برای پایتخت ایجاد کنند. علاوه بر گسل های ذکر شده، گسل های دیگری مانند سمنان-گرمسار، ایوانکی، طالقان، رودبار و لاهیجان نیز از جمله گسل های فعال این منطقه هستند که در فعالیت های لرزه ای آن نقش قابل توجهی دارند. با توجه به اهمیت بهبود تحلیل خطر لرزه ای در ایالت لرزه زمین ساخت البرز-آذربایجان، این منطقه به عنوان منطقه هدف در این مطالعه انتخاب شده است.



شکل ۳: ایالت لرزه زمین ساخت البرز-آذربایجان [۱۸]

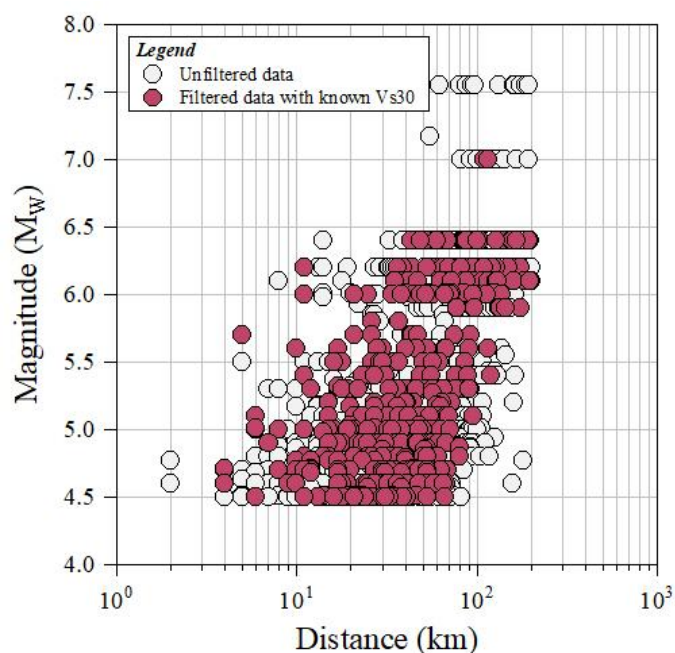
### ۳- گردآوری و آماده سازی داده ها

در این مطالعه، از اطلاعات شبکه شتابنگاری ایران (ISMN) استفاده شده است [۱۹]. شایان ذکر است که در این تحقیق تنها آن دسته از داده ها به کار گرفته شده اند که دارای سرعت موج برشی معلوم باشند. استفاده از داده های دارای سرعت موج برشی معلوم، امکان مدل سازی دقیق تر حرکت زمین، کاهش عدم قطعیت در تحلیل خطر لرزه ای و بهبود برآورد پاسخ ساختگاه را فراهم می سازد [۱۱]. در مقابل، استفاده از داده های فاقد سرعت موج برشی معلوم، امکان بهره گیری صحیح از روابط میرایی به روز را محدود می کند و می تواند به خطاهای قابل توجهی منجر شود. بازنمایی مکانی ایستگاه های شتابنگاری و رویدادهای زلزله در ایالت لرزه زمین ساخت البرز-آذربایجان در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۴-ا پراکندگی ایستگاه های شتابنگاری را نمایش می دهد؛ در این شکل، ایستگاه های دارای سرعت موج برشی معلوم با رنگ سبز و ایستگاه های فاقد آن با رنگ سفید مشخص شده اند. همچنین، شکل ۴-ب پراکندگی رویدادهای زلزله در این منطقه را نشان می دهد؛ در این شکل، رویدادهای دارای رکورد توسط ایستگاه های دارای سرعت موج برشی معلوم با رنگ بنفش و سایر رویدادها به رنگ سفید نشان داده شده اند.



شکل ۴: پراکندگی (a) ایستگاه‌های شتابنگاری و (b) داده‌های ثبت‌شده در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان

به منظور گردآوری داده‌ها، ابتدا ۴۶۴ ایستگاه شتابنگاری در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان شناسایی شدند. سپس ۱۶۵ ایستگاه که متوسط سرعت موج برشی آن‌ها در ۳۰ متر اول خاک تعیین شده بود، تفکیک شدند. از این ایستگاه‌ها، ۷۵۷ داده ثبت‌شده تا ۵ دسامبر ۲۰۲۴ جمع‌آوری شد. داده‌هایی با اطلاعات نادرست یا ناقص حذف شدند و تمام مقیاس‌های بزرگا (اعم از  $M_b$ ,  $M_S$ ,  $M_N$ ,  $M_L$ ) با استفاده از روابط تبدیل بزرگای ارائه‌شده توسط شاهوار و همکاران (۲۰۱۳) [۲۰] به بزرگای گشتاوری ( $M_W$ ) تبدیل شدند. در نهایت، با توجه به تمرکز این مطالعه بر زمین‌لرزه‌های مستعد ایجاد خرابی، ۴۰۵ داده با بزرگای گشتاوری ۴/۵ و بیشتر و فاصله رومرکزی تا ۲۰۰ کیلومتر انتخاب شدند، زیرا رکوردهای لرزه‌ای با بزرگای کمتر از ۴/۵ تأثیر قابل توجهی بر سازه‌ها ندارند و به دلیل نویز کیفیت پایگاه داده‌ها را کاهش می‌دهند. همچنین، امواج لرزه‌ای در فاصله‌های بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر عملاً میرا و بی‌اثر می‌شوند؛ بنابراین، داده‌هایی با فاصله بیشتر کنار گذاشته شدند. شکل ۵ توزیع داده‌ها بر اساس بزرگا در برابر فاصله را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار توزیع داده‌ها بر اساس بزرگا در برابر فاصله

جهت بررسی سوگیری احتمالی ناشی از انتخاب داده‌های دارای سرعت موج برشی معلوم، شاخص‌های آماری مجموعه کل داده‌ها و مجموعه منتخب مقایسه شدند. شاخص‌های آماری شامل میانگین، میانه، انحراف معیار و چولگی در جدول ۱ تغییرات اندکی را نشان می‌دهند که در محدوده قابل قبول قرار دارند.

جدول ۱: شاخص‌های آماری مجموعه کل داده‌ها و مجموعه منتخب

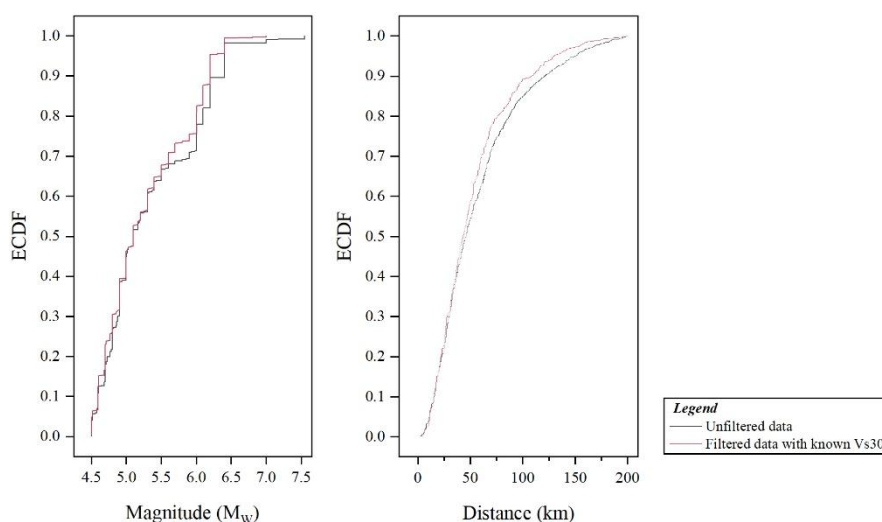
شاخص‌های آماری	بزرگای گشتاوری (Mw)		فاصله رومرکزی (km)	
	کل	منتخب	کل	منتخب
میانگین	۵/۳۵	۵/۲۸	۵۷/۴۱	۵۲/۵۸
میانه	۵/۱	۵/۱	۴۶	۴۳
انحراف معیار	۰/۶۷	۰/۶۱	۴۲/۱	۳۷/۳
چولگی	۰/۷۱	۰/۵۲	۱/۲۱	۱/۳۵

به منظور بررسی معناداری تفاوت آماری بین مجموعه کل داده‌ها و مجموعه منتخب، آزمون K-S انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. این آزمون نشان داد که توزیع بزرگا و فاصله در دو مجموعه از نظر آماری تفاوت معناداری ندارد ( $P > 0.05$ ).

جدول ۲: نتایج آزمون K-S

مقدار P	بزرگای گشتاوری (Mw)		فاصله رومرکزی (km)	
	کل	منتخب	کل	منتخب
	۰/۲۴۷	۰/۲۴۷	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹
آماره	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۷۱	۰/۰۷۱

در شکل ۶ نمودار توزیع تجمعی تجربی در برابر بزرگا و فاصله به ازای کل داده‌ها و داده‌های منتخب ارائه شده است و تأیید می‌کند که توزیع‌ها مشابه و قابل قبول هستند. این نتایج نشان می‌دهند که فیلتر کردن داده‌ها بر اساس سرعت موج برشی سوگیری سیستماتیک ایجاد نکرده و زیرمجموعه انتخاب شده نماینده مناسبی از کل داده‌ها است.



شکل ۶: نمودار توزیع تجمعی تجربی در برابر بزرگا و فاصله برای مجموعه کل داده‌ها و مجموعه داده‌های دارای سرعت موج برشی معلوم

#### ۴- روابط میرایی جهانی، منطقه‌ای و محلی

روابط میرایی با استفاده از پارامترهایی مانند بزرگا، فاصله و اثر خاک قادر به تخمین بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV) و شتاب طیفی (SA) هستند. با این حال، هنوز هیچ رابطه میرایی نمی‌تواند ایده‌آل عمل کند. این روابط بر اساس مجموعه داده‌های تجربی قبلی محاسبه می‌شوند و به همین دلیل، دقت آن‌ها به داده‌های مورد استفاده‌شان محدود است. علاوه بر این، محدودیت‌هایی نظیر کمبود داده‌های معتبر و اطلاعات ناکافی درباره گسل‌ها و خاک‌ها دقت این روابط را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند به خطا در تخمین‌ها منجر شود [۲۱]. از سوی دیگر، افزایش تعداد روابط میرایی در سال‌های اخیر، انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها برای تحلیل دقیق خطر لرزه‌ای در یک منطقه خاص را به چالشی پیچیده تبدیل کرده است و گاهی به سردرگمی در استفاده از آن‌ها انجامیده است.

برای انتخاب اولیه روابط میرایی در این مطالعه، معیارهای مندرج در راهنمای کاربردی تحلیل خطر زلزله (نشریه ۶۲۶) [۲۲] مد

نظر قرار گرفتند:

- سازگاری با ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی منطقه
- برخورداری از اعتبار علمی
- استفاده از معیار بزرگای واحد (ترجیحاً بزرگای گشتاوری)
- قابلیت برآورد بیشینه شتاب زمین و شتاب طیفی در پیوندهای مختلف
- توجه به نوع تعریف فاصله از چشمه لرزه‌زا

علاوه بر نکات فوق، به منظور نزدیک‌تر شدن برآوردها به واقعیت، در این مطالعه فقط روابطی استفاده شدند که اثر ساختگاه را بر اساس متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول خاک لحاظ کنند. این رویکرد امکان مدل‌سازی دقیق‌تر حرکت زمین، کاهش عدم قطعیت

در تحلیل خطر لرزه‌ای و بهبود برآورد پاسخ ساختگاه را فراهم می‌سازد. بر این اساس، ۱۰ رابطه میرایی در سه دسته انتخاب شدند که مشخصه‌های کلی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. روابط میرایی و سه دسته عنوان شده عبارت‌اند از:

- **روابط جهانی:** روابط ارائه شده توسط آبراهامسون و همکاران [۲۳]، بور و همکاران [۲۴]، کمپل و بزرگنیا [۲۵]، چو و یانگ [۲۶] و ادیس [۲۷] که همگی در سال ۲۰۱۴ منتشر شده‌اند، به عنوان آخرین نسل از روابط NGA شناخته می‌شوند. این روابط بر پایه پایگاه داده‌های پروژه NGA-West2 با حجم بالایی از داده‌های جمع‌آوری شده از سراسر جهان شکل گرفته‌اند و در مقایسه با سایر روابط جهانی تطابق بهتری با داده‌های ایران دارند [۵]. این روابط بین تأثیر گسل‌های نرمال، معکوس و امتدادلغز تمایز قائل می‌شوند. همچنین، روابط آبراهامسون و همکاران، کمپل و بزرگنیا، و چو و یانگ می‌توانند اطلاعات هندسه گسل را در نظر بگیرند و رابطه چو و یانگ قادر است اثر جهت‌پذیری زلزله را نیز لحاظ کند. با این حال، این روابط ممکن است شرایط محلی خاص را به طور کامل پوشش ندهند. لازم به ذکر است که رابطه ادیس به دلیل محدودیت در نظر گرفتن خاک‌هایی با متوسط سرعت موج برشی بیشتر از ۴۵۰ متر بر ثانیه، که منجر به حذف تعداد زیادی از داده‌های ورودی می‌شود، در این مطالعه کنار گذاشته شد.

- **روابط منطقه‌ای:** رابطه آکار و همکاران (۲۰۱۴) [۲۸] که بر پایه داده‌های ترکیه، یونان و ایتالیا توسعه یافته، برای مناطق جنوب اروپا و خاورمیانه نیز کاربرد دارد. رابطه کاله و همکاران (۲۰۱۵) [۲۹] نیز با استفاده از داده‌های ایران و ترکیه شکل گرفته و برای بهبود دقت تخمین در ایران یک اختلاف مقدار ویژه در نظر گرفته است. هر دو رابطه، تمایز بین تأثیر گسل‌های نرمال، معکوس و امتدادلغز را لحاظ می‌کنند. روابط منطقه‌ای در مناطقی با ویژگی‌های لرزه‌ای مشابه دقیق‌تر عمل می‌کنند. از این رو انتظار می‌رود رابطه کاله و همکاران، که برای ایران و ترکیه توسعه یافته، به دلیل انطباق با ویژگی‌های لرزه‌ای منطقه البرز-آذربایجان، عملکرد بهتری نسبت به رابطه آکار و همکاران داشته باشد.

- **روابط محلی:** روابط ارائه شده توسط صفاری و همکاران (۲۰۱۲) [۳۰]، صداقتی و پزشکی (۲۰۱۷) [۳۱]، فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹) [۳۲] و زعفرانی و سقراط (۲۰۲۴) [۳۳] همگی بر پایه داده‌های ایران توسعه یافته‌اند. در این میان، تنها روابط صفاری و همکاران و صداقتی و پزشکی اثر زاگرس را از سایر ایالت‌های لرزه‌ای جدا کرده و ضرایب ویژه‌ای برای آن در نظر گرفته‌اند. همچنین، به جز رابطه صداقتی و پزشکی، سایر روابط می‌توانند تأثیر گسل‌های معکوس و امتدادلغز را از یکدیگر متمایز کنند. روابط جدیدتر، مانند روابط فرج‌پور و همکاران و زعفرانی و سقراط، از پایگاه داده‌های به‌روزتر بهره برده‌اند که نتایج رگرسیون قوی‌تری را به دنبال داشته و انتظار می‌رود عملکرد بهتری داشته باشند. علاوه بر این، زعفرانی و سقراط برای رفع محدودیت داده‌های حوزه نزدیک در ایران، از رکوردهای منتخب پایگاه داده‌های پروژه NGA-West2 استفاده کرده‌اند. شایان ذکر است که رابطه صفاری و همکاران در سال ۲۰۱۲ با لحاظ اثر نوع خاک ارائه شد و در سال ۲۰۱۸ با افزودن ضریب ویژه‌ای برای اثر سرعت موج برشی ساختگاه بهبود یافت [۳۴]. در این مطالعه، از رابطه سال ۲۰۱۲ صفاری و همکاران همراه با ضریب اصلاحی سال ۲۰۱۸ آن‌ها استفاده شده است.

جدول ۳: مشخصه‌های روابط میرایی انتخاب شده.

ردیف	رابطه میرایی	سال	منطقه	نوع بزرگا	محدوده بزرگا	نوع فاصله	محدوده فاصله (Km)	لحاظ اثر ساختگاه با $V_{S30}$
۱	آبراهامسون و همکاران	۲۰۱۴	جهان	$M_w$	۳ - ۷/۹	Rupture	تا ۳۰۰	✓
۲	بور و همکاران	۲۰۱۴	جهان	$M_w$	۳ - ۷/۹	Joyner-Boore	تا ۴۰۰	✓
۳	کمپل و بزرگنیا	۲۰۱۴	جهان	$M_w$	۳ - ۷/۹	Rupture	تا ۳۰۰	✓
۴	چو و یانگ	۲۰۱۴	جهان	$M_w$	۳/۵ - ۷/۹	Rupture	تا ۳۰۰	✓
۵	آکار و همکاران	۲۰۱۴	اروپا و خاورمیانه	$M_w$	۴ - ۷/۶	Joyner-Boore	تا ۲۰۰	✓
۶	کاله و همکاران	۲۰۱۵	ایران و ترکیه	$M_w$	۴ - ۸	Joyner-Boore	تا ۲۰۰	✓
۷	صفاری و همکاران	۲۰۱۲	ایران	$M_w$	۵ - ۷/۳	Rupture	تا ۱۳۵	✓
۸	صداقتی و پزشکی	۲۰۱۷	ایران	$M_w$	۴/۷ - ۷/۴	Joyner-Boore	تا ۲۵۰	✓
۹	فرج‌پور و همکاران	۲۰۱۹	ایران	$M_w$	۴/۸ - ۷/۵	Rupture	تا ۴۰۰	✓
۱۰	زعفرانی و سقراط	۲۰۲۴	ایران	$M_w$	۴ - ۷/۹	Joyner-Boore	تا ۱۸۰	✓

## ۵- رویکردهای آماری

در مطالعات متعددی که برای ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی روابط میرایی انجام شده، رویکردهای آماری متنوعی به کار گرفته شده است که همگی بر سنجش انطباق مقادیر تخمینی با مقادیر تجربی استوارند. از جمله آن‌ها می‌توان به توزیع مانده‌ها، LH، LLH، EDR و DIC اشاره نمود. روش کلاسیک توزیع مانده‌ها، یکی از جامع‌ترین روش‌های آماری ارزیابی انحراف مقادیر تخمینی نسبت به مقادیر تجربی است. شریام و همکاران در سال ۲۰۰۴ روش LH را برای رتبه‌بندی روابط میرایی معرفی کردند [۳۵]، اما این روش با نقص‌ها و محدودیت‌هایی مواجه بود. از جمله نقاط ضعف اصلی آن، وابستگی به تعداد داده‌ها بود که در مناطقی با داده‌های ثبت‌شده محدود، خطای قابل توجهی ایجاد می‌کرد [۷]. علاوه بر آن، این روش نتایج را به صورت کیفی در چهار رتبه (درجات A تا D) ارائه می‌داد. از این روش شریام و همکاران در سال ۲۰۰۹ با رفع مشکلات روش قبلی، روش LLH را معرفی کردند [۶] که در حال حاضر یکی از روش‌های معتبر رتبه‌بندی روابط میرایی به شمار می‌رود. این روش با ارائه کمی نتایج، مقایسه روابط را هموارتر کرد. از دیگر روش‌ها، روش EDR است که توسط کاله و آکار در سال ۲۰۱۳ بر پایه فاصله اقلیدسی معرفی شد [۳۶]. همچنین، روش DIC نیز توسط کوثری و همکاران در سال ۲۰۱۹ معرفی شد [۲۱]. هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند اما این مطالعه از توزیع مانده‌ها و آزمون LLH به عنوان روش‌های رایج و معتبر ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی روابط میرایی استفاده کرده است.

## ۵-۱- توزیع مانده‌ها

توزیع مانده‌ها یکی از روش‌های پرکاربرد در تحلیل آماری است که برای ارزیابی انطباق مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده به کار می‌رود و دقت برآوردهای انجام‌شده را نشان می‌دهد. مانده، در واقع اختلاف بین دو مقدار تخمین‌زده‌شده و تجربه‌شده را بیان می‌کند. هرچه مانده به صفر نزدیک‌تر باشد، مقدار تخمینی به مقدار تجربی نزدیک‌تر بوده و دقت برآورد بالاتر است.

برای ترسیم توزیع مانده‌ها، ابتدا مانده یا لگاریتم نسبت اختلاف مقدار گزارش‌شده توسط ایستگاه‌های شتابنگاری به مقدار تخمین‌زده‌شده توسط روابط میرایی برای هر رکورد محاسبه می‌شود. حاصل نشان‌دهنده خطای هر رابطه میرایی در برآورد حرکت زمین برای آن رکورد است. رابطه ۱ روش محاسبه مانده را بیان می‌کند:

$$\text{Residual} = \log(\text{Observed}) - \log(\text{Predicted}) \quad (1)$$

مقدار مانده صفر به این معنی است که رابطه میرایی برای آن رکورد بدون خطا عمل کرده و مقدار مشاهده‌شده را به درستی پیش‌بینی کرده است. مقدار مثبت مانده بیانگر برآورد کمتر از مقدار واقعی و مقدار منفی آن نشان‌دهنده برآورد بیشتر از مقدار واقعی است. در نهایت، مانده‌های تمام رکوردها برای هر رابطه میرایی در نمودار توزیع در برابر فاصله ترسیم می‌شود. برای ارزیابی روند عملکرد هر رابطه، یک خط برازش بر توزیع مانده‌های آن محاسبه می‌شود. هرچه انحراف خط برازش نسبت به محور مانده‌های صفر کمتر باشد، رابطه میرایی از دقت بالاتر و خطای کمتری برخوردار است.

به منظور بررسی قابلیت اطمینان روند عملکرد رابطه میرایی نسبت به فاصله، حدود اطمینان ۹۵ درصد برای خط برازش توزیع مانده‌های آن رابطه محاسبه می‌شود. این حدود مشخص‌کننده بازه‌ای است که با احتمال ۹۵ درصد، خط برازش واقعی جامعه آماری در صورت نمونه‌گیری‌های مکرر در آن قرار می‌گیرد. حدود اطمینان باریک بیانگر توصیف دقیق روند است، در حالی که حدود اطمینان پهن نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر و پراکندگی است. برای تکمیل این ارزیابی، برای هر رابطه میرایی توزیع چگالی احتمال مانده‌ها نیز ترسیم شد تا شاخص‌های آماری را توصیف کند. شکل این نمودار با انحراف معیار ارتباط مستقیمی دارد؛ منحنی باریک، بلند و متقارن بیانگر انحراف معیار کوچک‌تر و تمرکز داده‌ها حول مانده‌های صفر است، در حالی که منحنی پهن، کوتاه و نامتقارن نشان‌دهنده انحراف معیار بزرگ‌تر و پراکندگی است.

## ۵-۲- لگاریتم درست‌نمایی (LLH)

آزمون LLH یکی از روش‌های دقیق رتبه‌بندی روابط میرایی است که توسط شریام و همکاران در سال ۲۰۰۹ معرفی شد. این روش بر مبنای تئوری اطلاعات استوار است و از معیار فاصله کولب-لیبلر استفاده می‌کند. در واقع، LLH با اندازه‌گیری واگرایی بین توزیع احتمال داده‌های تجربه‌شده و داده‌های تخمین‌زده‌شده، مقدار اطلاعات ازدست‌رفته را محاسبه می‌کند. اطلاعات ازدست‌رفته به اختلاف بین داده‌های اصلی و داده‌های بازتولیدشده اشاره دارد. هرچه این مقدار کمتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر رابطه در برآورد داده‌های واقعی است. این روش با ارائه یک مقدار ثابت به ازای جامعه آماری، امکان رتبه‌بندی قطعی روابط میرایی را فراهم می‌کند.

روش LLH نقص‌ها و محدودیت‌های تلاش قبلی شریام و همکاران در سال ۲۰۰۴ را رفع کرد. این بهبود باعث شد LLH به طور کامل جایگزین LH شود. یکی از مزایای مهم LLH نسبت به LH عدم وابستگی آن به تعداد داده‌ها است که باعث می‌شود این رویکرد بتواند حتی در مناطقی که داده‌های ثبت‌شده زیادی وجود ندارد، دقت بالایی داشته باشد. همچنین مزیت دیگر LLH، بیان کمی نتایج است که نسبت به بیان کیفی نتایج در LH، مقایسه روابط میرایی با یکدیگر را هموارتر می‌کند. رابطه ۲ روش محاسبه LLH را بیان می‌کند که در آن  $N$  تعداد داده‌ها و  $g(x)$  تابع چگالی احتمال مانده‌ها است:

$$\text{LLH} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(g(x_i)) \quad (2)$$

هرچه حاصل LLH کمتر باشد، به این معنی است که اختلاف برآورد رابطه میرایی با داده‌های واقعی کمتر بوده و در نتیجه، آن رابطه عملکرد بهتری داشته است.

رابطه ۳ روشی است که شریام و همکاران در سال ۲۰۰۹ به منظور محاسبه وزن روابط میرایی برای استفاده در درخت تصمیم ارائه کردند [۶]. در این رابطه،  $K$  تعداد کل روابط میرایی است که در مطالعه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

$$W_i = \frac{2^{-LLH_i}}{\sum_{i=1}^K 2^{-LLH_i}} \quad (3)$$

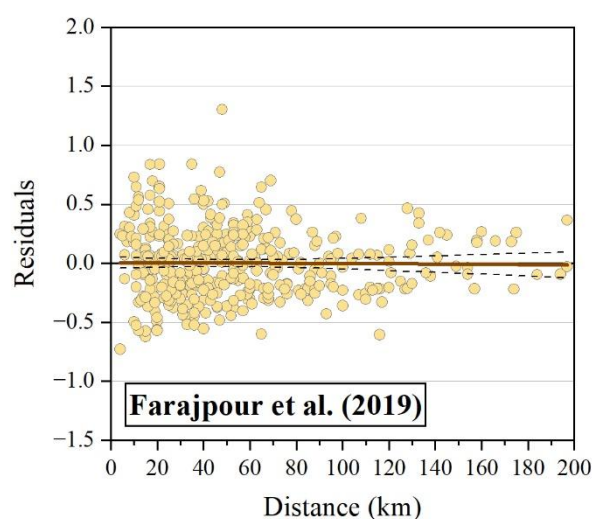
این روش وزن‌دهی، به یک رابطه میرایی با LLH کمتر وزن بیشتری اختصاص می‌دهد. وزن بیشتر نشان می‌دهد که آن رابطه قابلیت پیش‌بینی بهتری برای مقادیر مشاهده شده دارد.

برای پشتیبانی آماری از رتبه‌بندی LLH، از آزمون K-S استفاده شد. از آنجایی که مقادیر LLH بر اساس چگالی احتمال مانده‌ها محاسبه می‌شوند، این آزمون با مقایسه توزیع تجمعی تجربی چگالی احتمال مانده‌ها، آماره‌ای را حساب می‌کند که نشان‌دهنده حداکثر فاصله توزیع‌ها است. در این مطالعه، آزمون K-S برای بررسی معناداری اختلاف بین مقادیر LLH در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. از سوی دیگر، برای ارزیابی تأثیر تغییرات داده‌های ورودی بر نتایج LLH، تحلیل حساسیت صورت گرفت. این تحلیل نقش مهمی در ارزیابی قابلیت اطمینان در برابر عدم قطعیت‌ها دارد. در این مطالعه، با هدف بررسی اثر ورودی‌هایی مانند سرعت موج برشی، فاصله و بزرگا بر نتایج LLH و همچنین ارزیابی پایداری روابط میرایی برتر، تحلیل حساسیت انجام شد.

## ۶- تحلیل نتایج و رتبه‌بندی

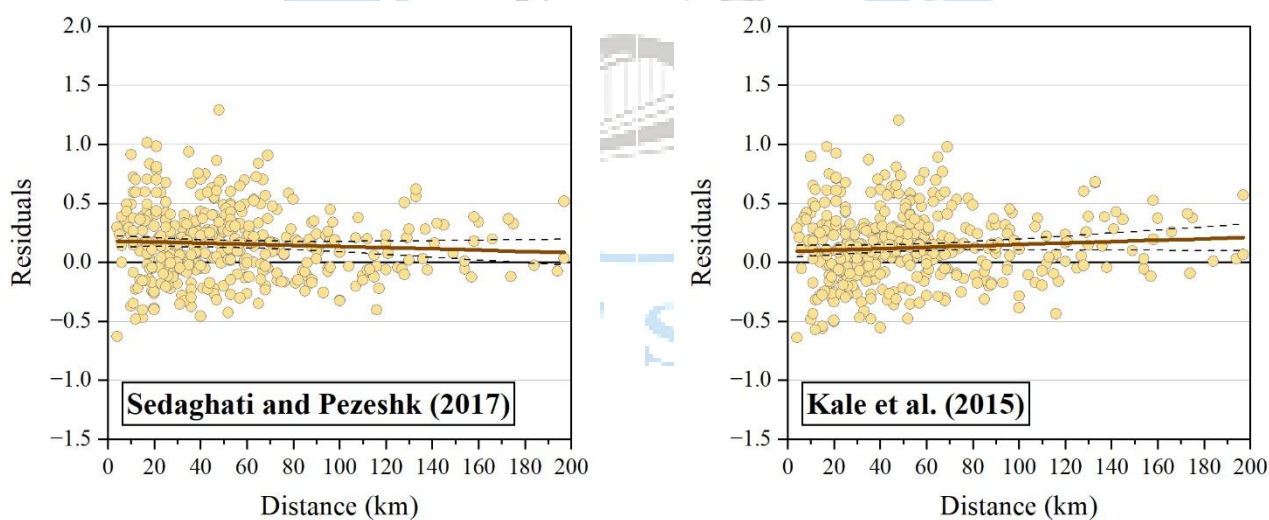
در این مطالعه، عملکرد روابط میرایی با استفاده از توزیع مانده‌ها و آزمون LLH ارزیابی شد و آن‌ها بر اساس قابلیت برآورد حرکت قوی زمین در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان رتبه‌بندی و وزن‌دهی شدند.

توزیع مانده‌ها ابزاری مؤثر برای ارزیابی خطای مقادیر پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر مشاهده شده است. انحراف کمتر خط برازش توزیع مانده‌ها نسبت به محور افقی، بیانگر عملکرد موفق‌تر در تخمین مقادیر واقعی و کاهش خطای برآورد است. اگر خط برازش بالاتر از محور افقی قرار گیرد نشان‌دهنده کم‌برآوردی مقادیر مشاهده شده و اگر پایین‌تر قرار گیرد نشان‌دهنده بیش‌برآوردی آن‌ها است. نمودارهای توزیع مانده‌ها در برابر فاصله برای تمام روابط میرایی در شکل‌های ۷ تا ۱۱ ارائه شده‌اند. در این نمودارها، مانده‌ها با دایره‌های نارنجی، خط برازش که روند عملکرد را نسبت به فاصله نشان می‌دهد با خط قهوه‌ای و حدود اطمینان ۹۵ درصد با خط چین اطراف خط برازش نمایش داده شده‌اند.

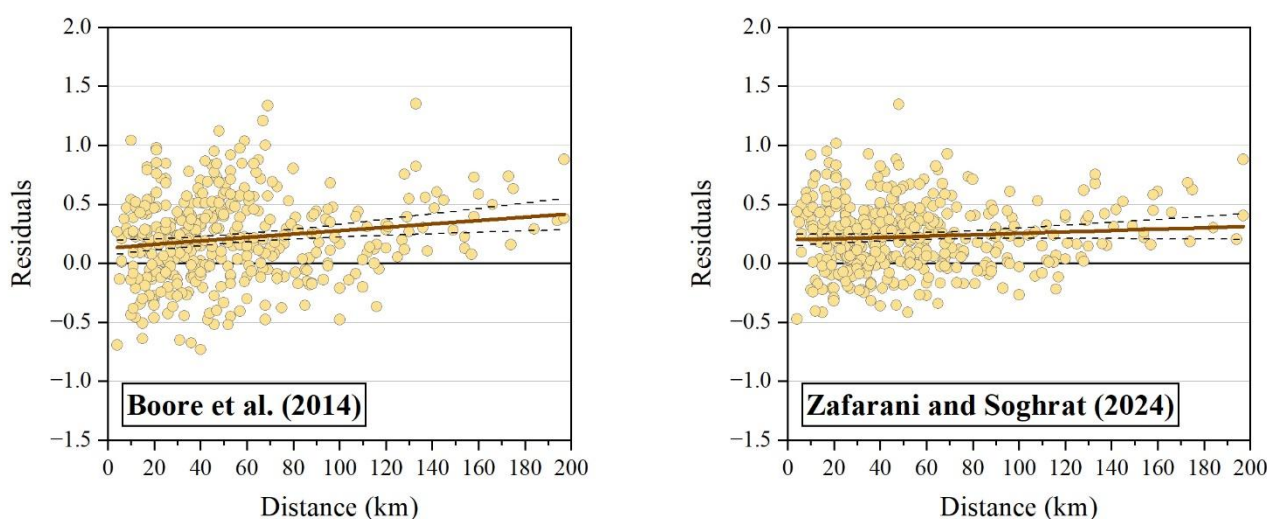


شکل ۷: نمودار توزیع مانده‌ها در برابر فاصله برای رابطه فرج‌پور و همکاران

همان‌طور که در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود، خط برازش بر توزیع مانده‌های رابطه فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹) کمترین انحراف را داشته و در تمام فواصل اعم از نزدیک، میانه یا دور بر محور مانده‌های صفر منطبق است. از این رو، بر اساس توزیع مانده‌ها این رابطه در برآورد داده‌های ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان بهترین عملکرد را نشان می‌دهد.

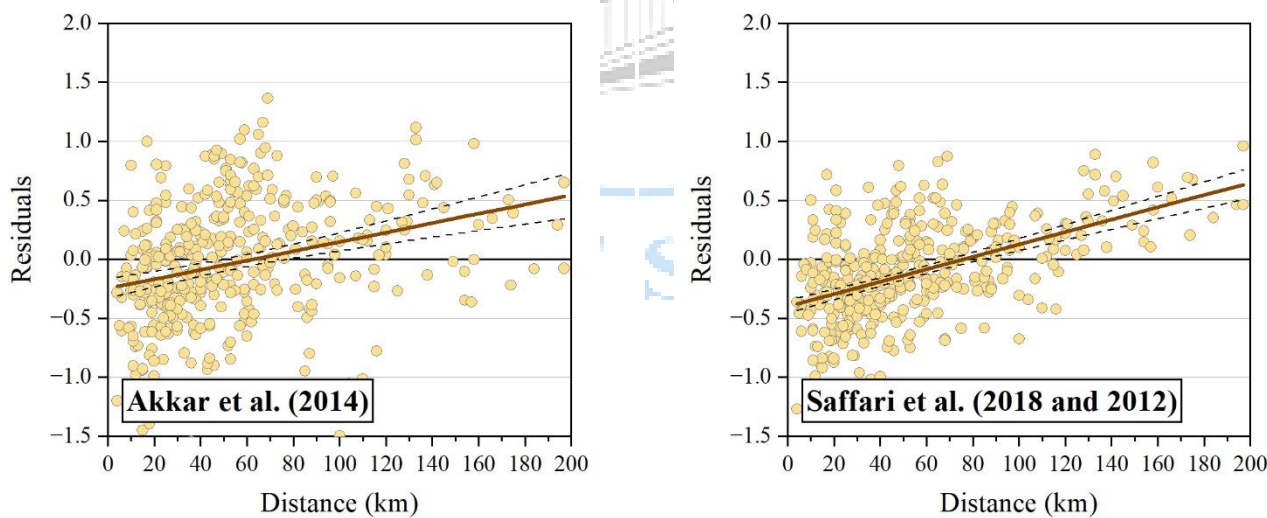


شکل ۸: نمودارهای توزیع مانده‌ها در برابر فاصله برای روابط کاله و همکاران و صدقاتی و پزشکی

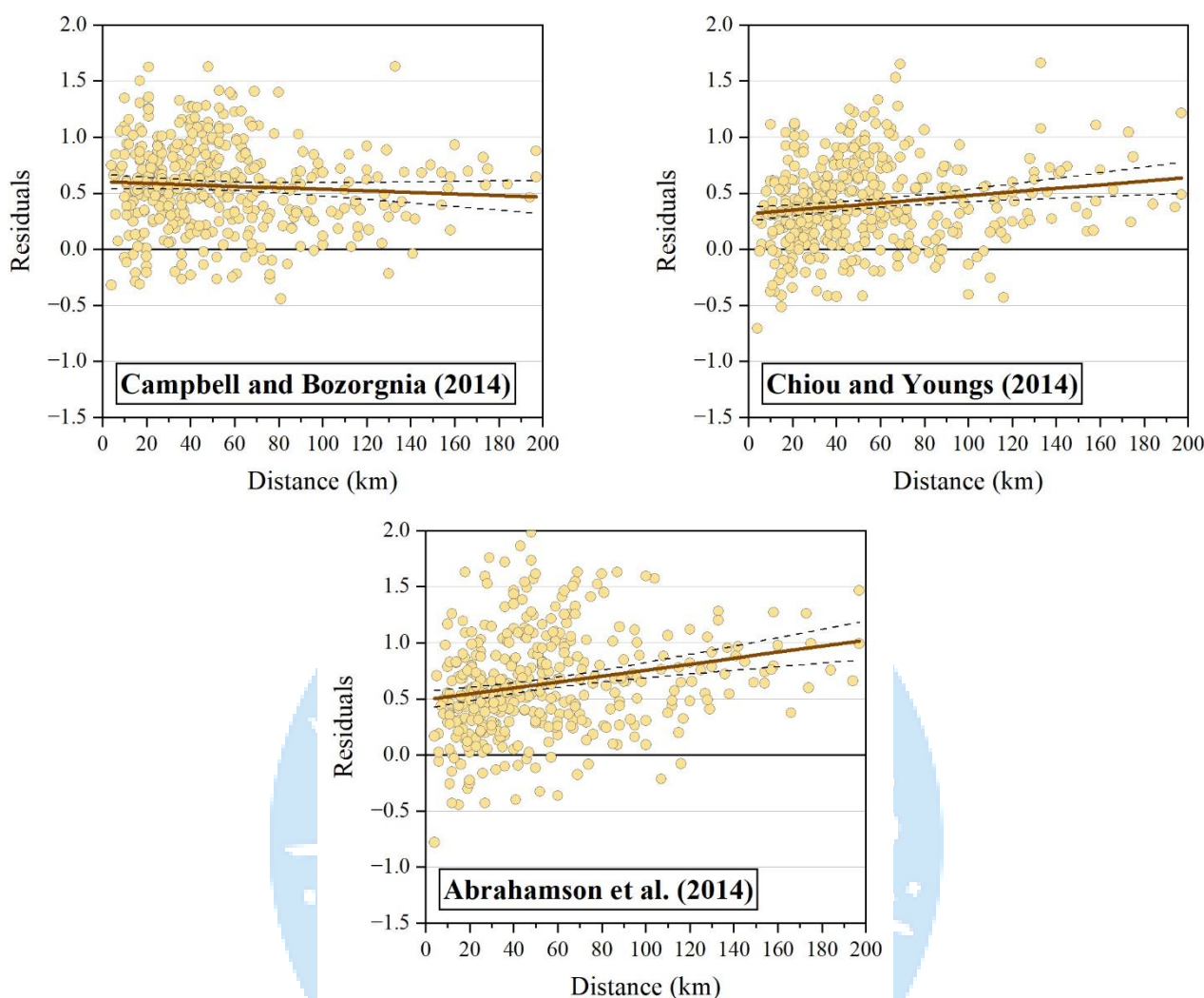


شکل ۹: نمودارهای توزیع مانده‌ها در برابر فاصله برای روابط زعفرانی و سقراط و بور و همکاران

در شکل‌های ۸ و ۹، نمودارهای مربوط به روابط کاله و همکاران (۲۰۱۵)، صداقتی و پزیشک (۲۰۱۷) و زعفرانی و سقراط (۲۰۲۴) نشان می‌دهند که این روابط در تمام فواصل، با وجود نزدیکی به محور افقی، اندکی کم‌برآوردی دارند. با این حال، رابطه کاله و همکاران در فواصل نزدیک‌تر و رابطه صداقتی و پزیشک در فواصل دورتر برآوردهای دقیق‌تری ارائه می‌دهند. رابطه بور و همکاران (۲۰۱۴) نیز نسبت به داده‌های واقعی کم‌برآوردی دارد و با افزایش فاصله، مقادیر کمتری برآورد می‌کند.



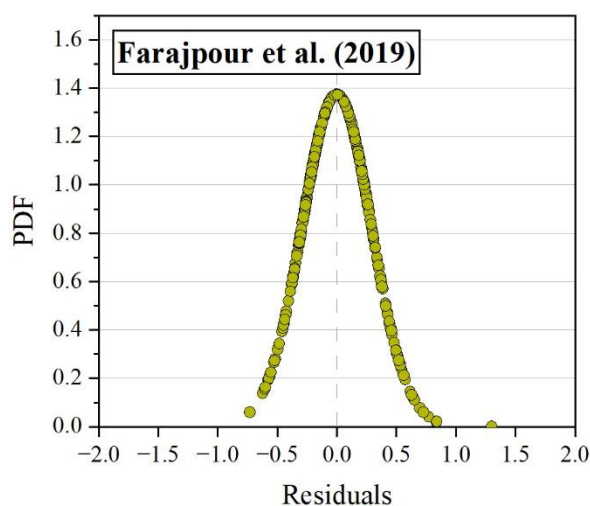
شکل ۱۰: نمودارهای توزیع مانده‌ها در برابر فاصله برای روابط صفاری و همکاران و آکار و همکاران



شکل ۱۱: نمودارهای توزیع مانده‌ها در برابر فاصله برای روابط چو و یانگ، کمپل و بزرگنیا و آبراهامسون و همکاران

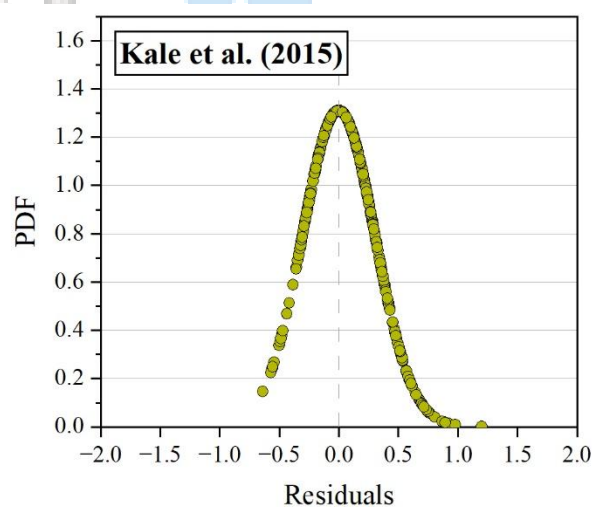
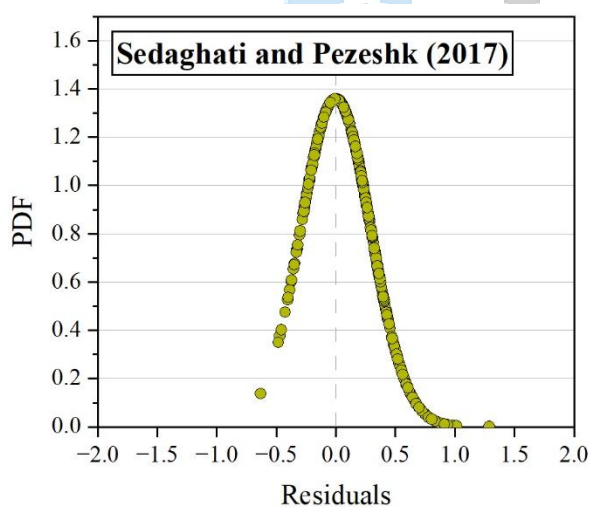
نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که رابطه صفاری و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۸) در فاصله حدوداً ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتری و رابطه آکار و همکاران (۲۰۱۴) در فاصله حدوداً ۳۰ تا ۹۰ کیلومتری برآوردهای نسبتاً دقیقی ارائه می‌دهند. با این حال، هر دو رابطه با کاهش فاصله، شتاب زمین را بیش‌برآورد کرده و با افزایش فاصله، کم‌برآورد می‌کنند. روابط آبراهامسون و همکاران (۲۰۱۴) و چو و یانگ (۲۰۱۴) در تمام فواصل برآورد دست‌کم‌گیرانه‌ای دارند و با افزایش فاصله، مقادیر کمتری به دست می‌دهند. رابطه کمپل و بزرگنیا (۲۰۱۴) نیز در تمام فواصل کم‌برآوردی دارد و انحراف حداقلی آن  $10^{-5}$  (بیش از سه برابر) است.

تابع چگالی احتمال مانده‌ها و انحراف معیار از پارامترهای کلیدی در محاسبه LLH و رتبه‌بندی روابط میرایی هستند. توزیع چگالی احتمال مانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کند و پراکندگی داده‌ها حول میانگین آن‌ها را نشان می‌دهد. شکل منحنی زنگوله‌ای این توزیع با انحراف معیار ارتباط مستقیمی دارد. هرچه این منحنی باریک‌تر، بلندتر و متقارن باشد، داده‌ها حول مانده‌های صفر متمرکزتر و انحراف معیار کوچک‌تر است. در مقابل، هرچه منحنی پهن‌تر، کوتاه‌تر و نامتقارن باشد، داده‌ها پراکنده‌تر و انحراف معیار بزرگ‌تر است. نمودارهای چگالی احتمال مانده‌ها برای تمام روابط میرایی در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ ارائه شده‌اند.

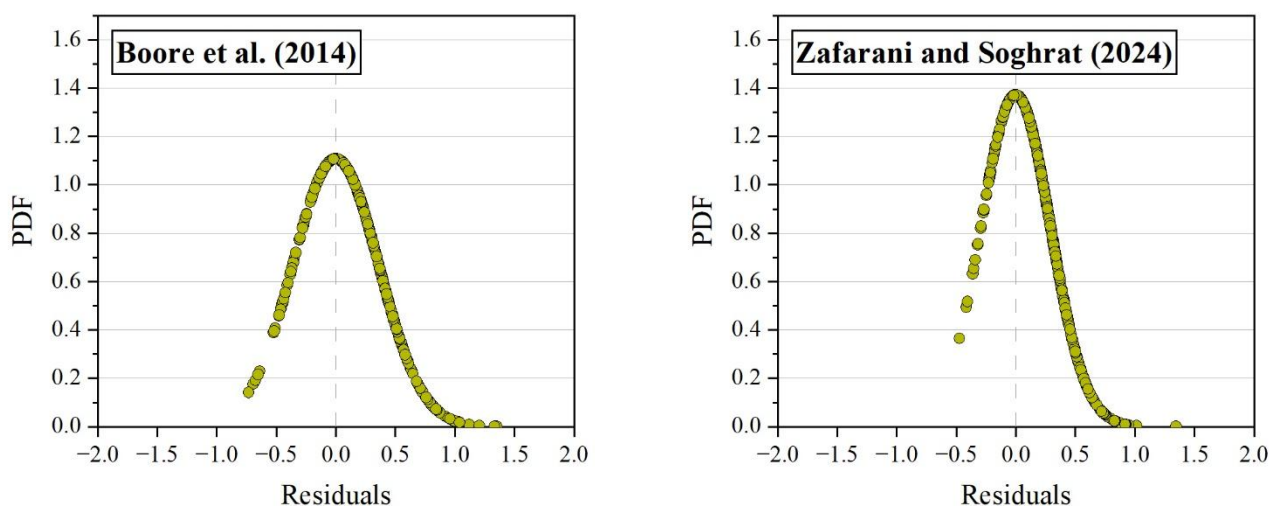


شکل ۱۲: نمودار توزیع چگالی احتمال مانده‌ها برای رابطه فرج‌پور و همکاران

در میان نمودارهای چگالی احتمال مانده‌ها برای روابط میرایی، نمودار مربوط به رابطه فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹) در شکل ۱۰، به عنوان بهترین نمودار، منحنی زنگوله‌ای باریک و بلندی (با ارتفاع  $1/4$ ) به صورت کامل و متقارن نشان می‌دهد. این ویژگی بیانگر انحراف معیار کوچک به ازای داده‌های منطقه است و انتظار می‌رود این رابطه در آزمون‌های آماری عملکرد مطلوبی ثبت کند.

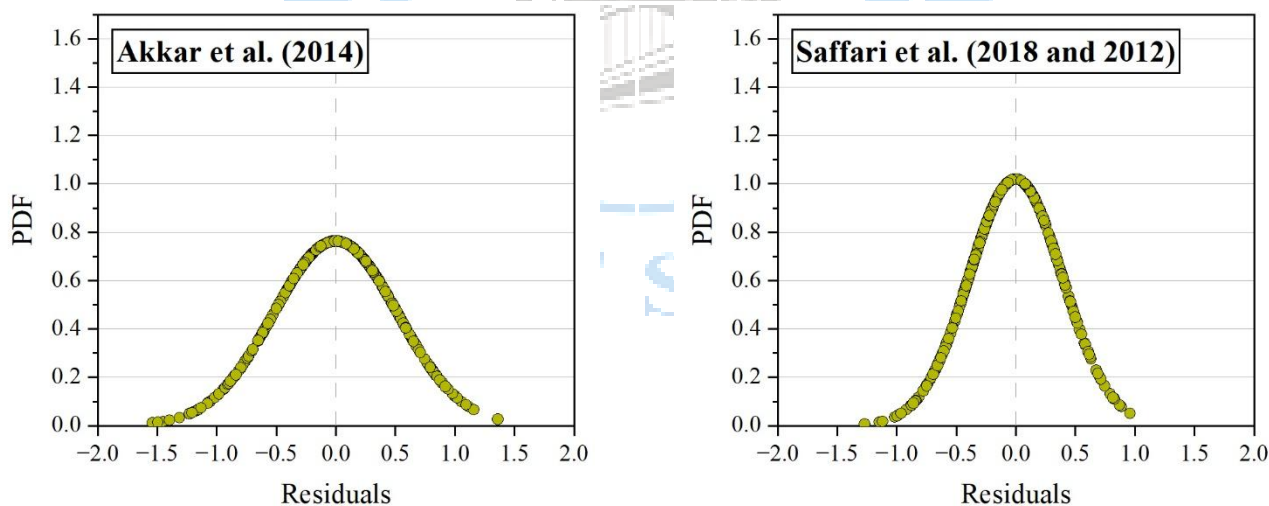


شکل ۱۳: نمودارهای توزیع چگالی احتمال مانده‌ها برای روابط کاله و همکاران و صدقاتی و پزیشک

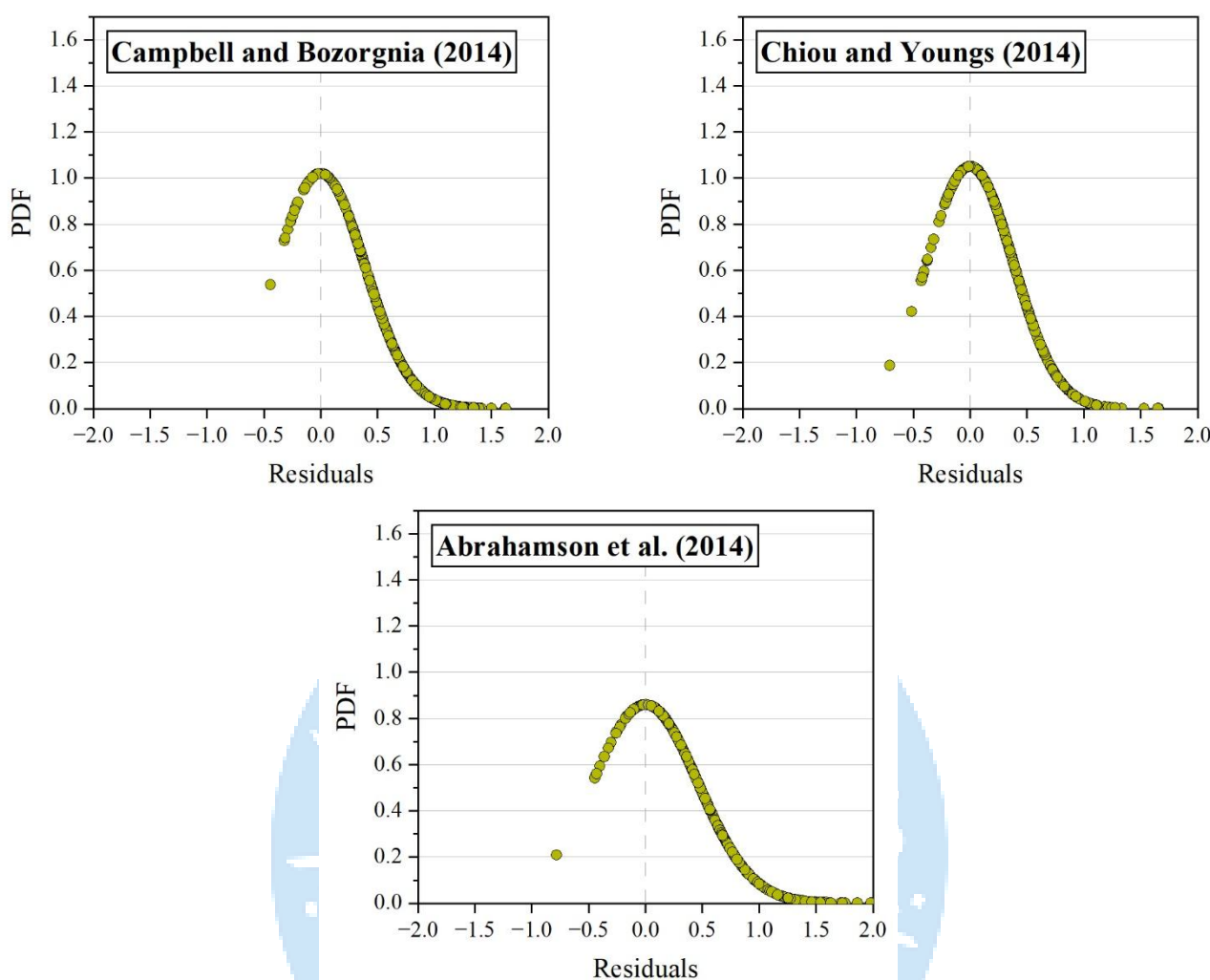


شکل ۱۴: نمودارهای توزیع چگالی احتمال مانده‌ها برای زعفرانی و سقراط و بور و همکاران

منحنی زنگوله‌ای کاله و همکاران (۲۰۱۵) باریک، بلند (با ارتفاع  $1/35$ ) و دارای تقارن نسبتاً مطلوبی است. صداقتی و پزشک (۲۰۱۷) و زعفرانی و سقراط (۲۰۲۴) نیز منحنی‌های باریک و بلند (با ارتفاع  $1/4$ ) اما با تقارن کمتری دارند. منحنی بور و همکاران اگرچه نسبتاً پهن‌تر و کوتاه‌تر (با ارتفاع  $1/15$ ) است، اما از تقارن قابل قبولی برخوردار است. این روابط در رتبه‌بندی عملکرد می‌توانند پس از رابطه فرج‌پور و همکاران قرار گیرند.



شکل ۱۵: نمودارهای توزیع چگالی احتمال مانده‌ها برای روابط صفاری و همکاران و آکار و همکاران



شکل ۱۶: نمودارهای توزیع چگالی احتمال مانده‌ها چو و یانگ، کمپل و بزرگنیا و آبراهامسون و همکاران

منحنی زنگوله‌ای صفاری و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۸) تقارن مطلوبی دارد اما نسبتاً کوتاه‌تر (با ارتفاع ۱/۰۵) است. منحنی آکار و همکاران (۲۰۱۴) نیز با وجودی که تقارن مطلوبی را حفظ کرده، پهن و کوتاه (با ارتفاع ۰/۸) است. منحنی چو و یانگ (۲۰۱۴) با ارتفاعی مشابه صفاری و همکاران، تقارن کمتری دارد. منحنی‌های آبراهامسون و همکاران (۲۰۱۴) و کمپل و بزرگنیا (۲۰۱۴) بلندی و تقارن قابل قبولی ندارند که بیانگر انحراف معیار بزرگ است و انتظار نمی‌رود این روابط عملکرد مطلوبی ثبت کنند. مقایسه ارتفاع و تقارن منحنی زنگوله‌ای نمودارهای توزیع چگالی احتمال داده‌ها با خط برازش نمودارهای توزیع مانده‌ها نشان می‌دهد که هر دو در ارزیابی روابط میرایی به نتایج هم‌راستا و منسجمی منجر شده‌اند.

برای ارزیابی آماری، شاخص‌های آماری مانده‌ها شامل میانگین، میانه، انحراف معیار و واریانس در جدول ۴ ارائه شده‌اند. میانگین و میانه به عنوان معیارهایی برای تعیین مرکز توزیع مانده‌ها استفاده می‌شوند؛ مقادیر نزدیک به صفر این شاخص‌ها نشان‌دهنده بایاس کمتر در پیش‌بینی‌های رابطه است. انحراف معیار، میزان پراکندگی مانده‌ها نسبت به میانگین را نشان می‌دهد و مقادیر کوچکتر آن بیانگر نزدیکی بیشتر داده‌ها به میانگین است. واریانس، که از مربع انحراف معیار محاسبه می‌شود، معیاری برای پراکندگی کلی داده‌هاست و مقادیر کمتر آن نشان‌دهنده دقت بالاتر رابطه در پیش‌بینی‌هاست. تمامی این شاخص‌ها به نوعی با یکدیگر مرتبط‌اند و در کنار هم، تصویری جامع از عملکرد رابطه ارائه می‌دهند.

جدول ۴: شاخص‌های آماری مانده‌های هر رابطه میرایی

رابطه میرایی	میانگین	میانه	انحراف معیار	واریانس
فرج پور و همکاران (۲۰۱۹)	۰/۲۲۸	۰/۲۲۰	۰/۲۹۱	۰/۰۸۵
کاله و همکاران (۲۰۱۵)	۰/۱۲۵	۰/۱۱۱	۰/۳۰۴	۰/۰۹۳
صداقتی و پزشکی (۲۰۱۷)	۰/۱۵۴	۰/۱۴۲	۰/۲۹۴	۰/۰۸۶
زعفرانی و سقراط (۲۰۲۴)	۰/۲۲۸	۰/۲۲۰	۰/۲۹۱	۰/۰۸۵
صفاری و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۸)	-۰/۱۱۶	-۰/۱۴۳	۰/۳۹۲	۰/۱۵۳
بور و همکاران (۲۰۱۴)	۰/۲۱۰	۰/۲۰۴	۰/۳۶۰	۰/۱۳۰
آکار و همکاران (۲۰۱۴)	-۰/۰۳۳	-۰/۰۰۷	۰/۵۲۳	۰/۲۷۳
چو و یانگ (۲۰۱۴)	۰/۴۰۴	۰/۳۸۴	۰/۳۸۰	۰/۱۴۴
کمپل و بزرگنیا (۲۰۱۴)	۰/۵۶۶	۰/۵۷۲	۰/۳۹۱	۰/۱۵۳
آبراهامسون و همکاران (۲۰۱۴)	۰/۶۳۴	۰/۵۸۵	۰/۴۶۴	۰/۲۱۶

آزمون LLH انطباق کلی مجموعه مقادیر پیش‌بینی شده با مجموعه مقادیر مشاهده شده را ارزیابی می‌کند. هرچه مقدار LLH کوچک‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد موفق‌تر رابطه میرایی است. در جدول ۵، مقادیر LLH و وزن‌های تخصیص یافته به هر رابطه ارائه شده‌اند. مقایسه نتایج آزمون LLH با نتایج توزیع مانده‌ها، سازگاری کاملی را نشان می‌دهد. روابطی که در آزمون LLH مقادیر کوچک‌تری دارند، در توزیع مانده‌ها نیز انحراف کمتری از محور مانده‌های صفر نشان می‌دهند، که تأییدکننده عملکرد بهتر آنها در تخمین مقادیر واقعی است.

جدول ۵: رتبه‌بندی و وزن‌دهی روابط میرایی با آزمون LLH

رتبه	رابطه میرایی	LLH	وزن
۱	فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹)	۰/۲۶۳	۰/۱۵۷
۲	کاله و همکاران (۲۰۱۵)	۰/۴۵۲	۰/۱۳۸
۳	صداقتی و پزشکی (۲۰۱۷)	۰/۴۷۸	۰/۱۳۶
۴	زعفرانی و سقراط (۲۰۲۴)	۰/۷۰۸	۰/۱۱۶
۵	صفاری و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۸)	۰/۷۵۸	۰/۱۱۲
۶	پور و همکاران (۲۰۱۴)	۰/۸۱۹	۰/۱۰۷
۷	آکار و همکاران (۲۰۱۴)	۱/۱۱۴	۰/۰۸۷
۸	چو و یانگ (۲۰۱۴)	۱/۴۶۶	۰/۰۶۸
۹	کمپل و بزرگنیا (۲۰۱۴)	۲/۲۰۵	۰/۰۴۱
۱۰	آبراهامسون و همکاران (۲۰۱۴)	۲/۲۸۵	۰/۰۳۹

به منظور ارزیابی معناداری اختلاف مقادیر LLH و پشتیبانی آماری از رتبه‌بندی، آزمون K-S انجام شد که نشان داد این مقادیر نسبت به یکدیگر تفاوت معناداری دارند و اختلاف آن‌ها به دلیل نوسانات تصادفی نمی‌باشد ( $P < 0.05$ ). علاوه بر این، هم‌خوانی نتایج حاصل از رویکردهای مختلف، قابلیت اعتماد بالای رتبه‌بندی روابط میرایی بر اساس عملکرد آن‌ها در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان را تأیید می‌کند.

برای انجام تحلیل حساسیت، هر یک از ورودی‌های سرعت موج برشی، فاصله و بزرگا به صورت جداگانه (در حالی که سایر ورودی‌ها ثابت نگه داشته شدند) تغییر داده شدند. سرعت موج برشی در سه سطح به میزان  $\pm 10\%$ ،  $\pm 20\%$  و  $\pm 30\%$  درصد، فاصله به میزان  $\pm 10\%$  درصد و بزرگا به میزان  $\pm 0.1$  تغییر یافت. سپس، تأثیر این تغییرات بر مقدار LLH برای سه رابطه میرایی برتر حساب شد. نتایج نشان داد که مقدار LLH برای رابطه فرج‌پور و همکاران به ازای تغییرات موج برشی به طور متوسط  $0.63\%$  درصد، به ازای فاصله  $4.75\%$  درصد و به ازای بزرگا  $3.99\%$  درصد تغییر یافت. این تغییرات برای رابطه کاله و همکاران به ترتیب  $11.32\%$ ،  $18.70\%$  و  $17.59\%$  درصد و برای صداقتی و پزشکی  $5.82\%$ ،  $20.61\%$  و  $22.28\%$  درصد بود. این نتایج نشان‌دهنده پایداری بیشتر رابطه فرج‌پور و همکاران نسبت به سایر روابط است. فاصله و بزرگا با میانگین حساسیت  $14.7\%$  و  $14.6\%$  درصد به ترتیب بیشترین تأثیر را بر مقدار LLH دارند. سرعت موج برشی نیز میانگین حساسیت  $5.9\%$  درصدی نشان می‌دهد.

## ۷- نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی روابط میرایی برای کمک به برآورد دقیق حرکت قوی زمین در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان انجام شد. برای این منظور، از داده‌های شبکه شتابنگاری شامل ۴۰۵ رکورد با بزرگای گشتاوری ۴/۵ و بیشتر، فاصله رومرکزی تا ۲۰۰ کیلومتر و سرعت موج برشی معلوم استفاده شد و ۱۰ رابطه میرایی جهانی، منطقه‌ای و محلی با دو روش آماری توزیع مانده‌ها و آزمون LLH بررسی شدند.

بررسی توزیع مانده‌ها حاکی از آن است که روابط عمدتاً بیشینه شتاب زمین در این منطقه را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند. این کم‌برآوردی می‌تواند به دست کم گرفتن شدت زلزله منجر شود و در نتیجه، سازه‌هایی با مقاومت کمتر از حد مورد نیاز طراحی شوند. چنین امری تاب‌آوری سازه‌ها در برابر زلزله‌های واقعی را کاهش داده و ممکن است به خسارات جدی بیانجامد. در میان روابط مورد مطالعه، رابطه فرج‌پور و همکاران (۲۰۱۹) با کمترین انحراف خط برازش در توزیع مانده‌ها و پایین‌ترین مقدار LLH، بهترین عملکرد را در برآورد بیشینه شتاب زمین در این منطقه نشان داد. روابط کاله و همکاران (۲۰۱۵)، صداقتی و پزیشک (۲۰۱۷) و زعفرانی و سقراط (۲۰۲۴) نیز به ترتیب عملکرد مناسبی داشتند و در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. برتری این روابط محلی و منطقه‌ای به تطابق بهتر آن‌ها با داده‌های ثبت‌شده و ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی منطقه بازمی‌گردد، زیرا این روابط بر اساس این داده‌ها توسعه یافته‌اند و ویژگی‌های منطقه در مدل‌سازی آن‌ها لحاظ شده است. در مقابل، برخی روابط جهانی مانند روابط کمپل و بزرگ‌نیا (۲۰۱۴) و آبراهامسون و همکاران (۲۰۱۴) به دلیل کم‌برآوردی سیستماتیک، کارایی کمتری از خود نشان دادند. برای ارزیابی پایداری روابط میرایی برتر و بررسی قابلیت اطمینان آن‌ها در برابر عدم قطعیت‌ها، تحلیل حساسیت انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد که مقدار LLH رابطه فرج‌پور و همکاران نسبت به تغییرات ورودی‌ها، شامل سرعت موج برشی، فاصله و بزرگا، حساسیت کمی دارد. این رابطه حتی در شرایط وجود عدم قطعیت در داده‌های ورودی، برآوردهای قابل اعتمادی ارائه می‌دهد. در مقابل، مقادیر LLH سایر روابط نسبت به تغییرات ورودی‌ها حساسیت بیشتری از خود نشان دادند.

یافته‌های این مطالعه پیامدهای عملی مهمی برای مهندسان و طراحان سازه ارائه می‌دهد که می‌تواند استانداردهای مهندسی را ارتقا داده و مخاطرات زلزله را به طور مؤثری کاهش دهد:

۱. ارزیابی عملکرد روابط میرایی به منظور انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها برای تحلیل خطر لرزه‌ای، دقت تحلیل‌ها را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و به طراحی سازه‌هایی با ایمنی بالاتر و هزینه‌های اقتصادی‌تر کمک می‌کند. در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت البرز-آذربایجان، استفاده از روابط برتر این مطالعه می‌تواند برآوردهای واقعی‌تری از بارهای لرزه‌ای وارد بر سازه‌ها ارائه دهد.

۲. توصیه می‌شود مهندسان هنگام انتخاب روابط میرایی، سازگاری این روابط با ویژگی‌های ساختگاهی را مد نظر قرار دهند. برای مثال، در یک ساختمان نزدیک به گسل، به رابطه کاله و همکاران که در این فاصله از دقتی بالاتر برخوردار است، وزن بیشتری اختصاص دهند. بنابراین، انتخاب و وزن‌دهی به روابط میرایی باید متناسب با شرایط هر پروژه انجام شود.

از منظر سیاست‌گذاری، این مطالعه بر ضرورت تقویت زیرساخت‌های داده‌ای و بهبود دستورالعمل‌های تحلیل خطر لرزه‌ای تأکید دارد:

۱. بسیاری از ایستگاه‌های شتابنگاری فاقد سرعت موج برشی محل هستند. این کمبود امکان بهره‌گیری کامل از داده‌های ثبت‌شده را محدود کرده و بخش قابل توجهی از داده‌ها را بلااستفاده می‌سازد. بنابراین پیشنهاد می‌شود نهادهای مسئول، مانند مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، برنامه‌ای منسجم برای اندازه‌گیری و ثبت سرعت موج برشی در تمامی ایستگاه‌های شتابنگاری تدوین و اجرا کنند. این اقدام می‌تواند به کاهش عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی حرکت زمین منجر شود.

۲. یافته‌های این مطالعه چارچوبی مناسب برای به‌روزرسانی راهنمای کاربردی تحلیل خطر زلزله (نشریه ۶۲۶) فراهم می‌کند. گنجاندن ارزیابی عملکرد و رتبه‌بندی روابط در دستورالعمل‌های رسمی می‌تواند دقت طراحی‌های لرزه‌ای را افزایش دهد.

برای مطالعات آتی، بررسی روابط میرایی در حوزه نزدیک با توجه به ویژگی‌های جهت‌پذیری و پالس‌گونگی، استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده برای جبران کمبود داده‌های فاقد سرعت موج برشی و رتبه‌بندی روابط میرایی بر اساس ارزیابی طیفی عملکرد می‌تواند نتایج ارزشمندی ارائه دهد. نتایج مطالعه حاضر نه تنها به مهندسان در طراحی سازه‌هایی با ایمنی بالاتر و هزینه‌های اقتصادی‌تر کمک می‌کند، بلکه راهبردی برای سیاست‌گذاران و پژوهشگران در راستای کاهش مخاطرات زلزله فراهم می‌آورد.

## مراجع

- [1] Motaghd, S., A. Yazdani, A. Nicknam, and M. Khanzadi (2018). Sobol sensitivity generalization for engineering and science applications. *J. Modeling in Eng.* 16(54), 217-226.
- [2] Douglas, J. (2024). GMPE compendium. [online] Available at: <http://www.gmpe.org.uk/> [Accessed 23 Jun. 2024].
- [3] Akkar, S., Ö. Kale, A. Yakut, and U. Ceken (2018). Ground-motion characterization for the probabilistic seismic hazard assessment in Turkey. *Bull. Earthq. Eng.* 16(8), 3439-3463.
- [4] Lanzano, G., M. D'Amico, C. Felicetta, R. Puglia, L. Luzi, F. Pacor, and D. Bindi (2016). Ground-motion prediction equations for region specific probabilistic seismic-hazard analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 106(1), 73-92.
- [5] 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.* 14(2), 278-292.
- [6] Scherbaum, F., E. Delavaud, and C. Riggelsen (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99(6), 3234-3247.
- [7] 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.* 99(6), 3248-3263.
- [8] Mabrouk, A. H. A. S. H. (2024). *Performance of Alternative Ground Motion Models with Strong Motion Data from Moderate to Large Events in Different Seismotectonic Regions in Türkiye*. Master's thesis, Middle East Technical University (Turkey).
- [9] Lee, H., B. Kim, and D. Kwak (2024). Evaluation of the applicability of ground motion models (GMMs) for South Korea. *Bull. Earthq. Eng.* 22(9), 4303-4333.
- [10] Farhadi, A., S. Pezeshk, and N. Khoshnevis (2018). Assessing the applicability of ground-motion models for induced seismicity application in central and eastern North America, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 108(4), 2265-2277.
- [11] Sheikhi-Mehrabadi, F., and H. Saffari (2024). Statistical Ranking of Peak Ground Acceleration Attenuation Relationships in the Zagros Seismotectonic Province. In: *9th Inter. Conf. on Seismol. and Earthq. Eng. (SEE9)*.

- [12] Sayyadpour, H., N. Eftekhari, and M. Kowsari (2020). Comparing different data-driven ranking methods and selecting appropriate GMPEs for performing PSHA in Zagros zone, *Asas* 58(22), 35–46.
- [13] Farajpour, Z., M. Kowsari, S. Pezeshk, and B. Halldorsson (2021). Ranking of Ground-Motion Models (GMMs) for Use in Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Iran Based on an Independent Data Set, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 111(1), 242–257.
- [14] Nowroozi, A. (1976). Seismotectonic Provinces of Iran, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 66(4), 1249–1276.
- [15] Tavakoli, B. (1996). Major Seismotectonic Provinces of Iran, Unpublished Map, IIEES, international document.
- [16] Mirzaei, N., G. Mengtan, and C. Yuntai (1998). Seismic Source Regionalization for Seismic Zoning of Iran: Major Seismotectonic Provinces, *J. Earthq. Prediction Research* 7, 465–495.
- [17] Ghorbani, M. (2021). *The Geology of Iran: Tectonic, Magmatism and Metamorphism*. Ch. 3: Faults and Tectonic Phases of Iran. Springer Cham. 81-149. DOI:10.1007/978-3-030-71109-2\_3
- [18] Maleki, M. and Z. Riazi Rad (2022). Seismic Hazard Evaluation of the North and Northwest Iranian Plate Considering the Bayesian Perspective, *Shock and Vibration* 3, 1-9.
- [19] Iran Strong Motion Network. (2024). Data bank. [online] Available at: <http://ismn.bhrc.ac.ir/> [Accessed 5 Dec. 2024].
- [20] Shahvar, M. P., M. Zare, and S. Castellaro (2013). A Unified Seismic Catalog for the Iranian Plateau (1900–2011), *Seismol. Research Letters* 84(2), 233–249.
- [21] Kowsari, M., B. Halldorsson, B. Hrafinkelsson and S. Jónsson (2019). Selection of earthquake ground motion models using the deviance information criterion. *Soil Dynamics and Earthq. Eng.* 117, 288–299.
- [22] Management and Planning Organization of Iran (2014). *Practical Guide to Conducting Seismic Hazard Analysis* (Publication No. 626). Tehran: Nezamfanni, 17-36.
- [23] Abrahamson, N. A., W. J. Silva, and R. Kamai (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthq. Spectra* 30(3), 1025–1055.
- [24] Boore, D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan, and G. M. Atkinson (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthq. Spectra* 30(3), 1057–1085.
- [25] Campbell, K. W., and Y. Bozorgnia (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthq. Spectra* 30(3), 1087–1115.

- [26] Chiou, B. S.-J., and R. R. Youngs (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthq. Spectra* 30(3), 1117–1153.
- [27] Idriss, I. M. (2014). An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthq. Spectra* 30(3), 1155–1177.
- [28] Akkar, S., M. A. Sandikkaya, and J. J. Bommer (2014). Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle-East. *Bull. Earthq. Eng.* 12, 359–387.
- [29] Kale, Ö., S. Akkar, A. Ansari, and H. Hamzehloo (2015). A groundmotion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 105(2A), 963–980.
- [30] Saffari, H., Y. Kuwata, S. Takada, and A. Mahdavian (2012). Updated PGA, PGV, and Spectral Acceleration Attenuation Relations for Iran. *Earthq. Spectra* 28(1), 257–276.
- [31] Sedaghati, F., and S. Pezeshk (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. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 107(2), 934–948.
- [32] Farajpour, Z., S. Pezeshk, and M. Zare (2019). A new empirical ground-motion model for Iran. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 109(2), 732–744.
- [33] Zafarani, H., and M. R. Soghrat (2024). An Empirical Spectral Ground-Motion Model for Iran Using Truncated Iranian Strong-Motion Database Enriched by Near-Field Records, *J. Earthq. Eng.* 28(4), 922–945.
- [34] Saffari, H., Y. Kuwata, and A. Mahdavian (2018). Site Amplification of Iran's Major Seismic Zones Using Attenuation Relationship. *J. Earthq. Eng.* 22(10), 1918–1935.
- [35] Scherbaum, F., F. Cotton, and P. Smit (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.* 94(6), 2164–2185.
- [36] Kale, Ö., and S. Akkar (2013). A new procedure for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): The Euclidean distance-based ranking (EDR) method. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 103(2A), 1069–1084.