

بررسی و واکاوی شتاب طیفی زمین لرزه در پهنه تهران

مهسا عبداللهی؛ دانشجوی دکتری زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید مرتضی موسوی*؛ دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

محمد مهدی خطیب؛ استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

محمود رضا هیهات؛ دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

زینب تسلیمی؛ کارشناس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

چکیده

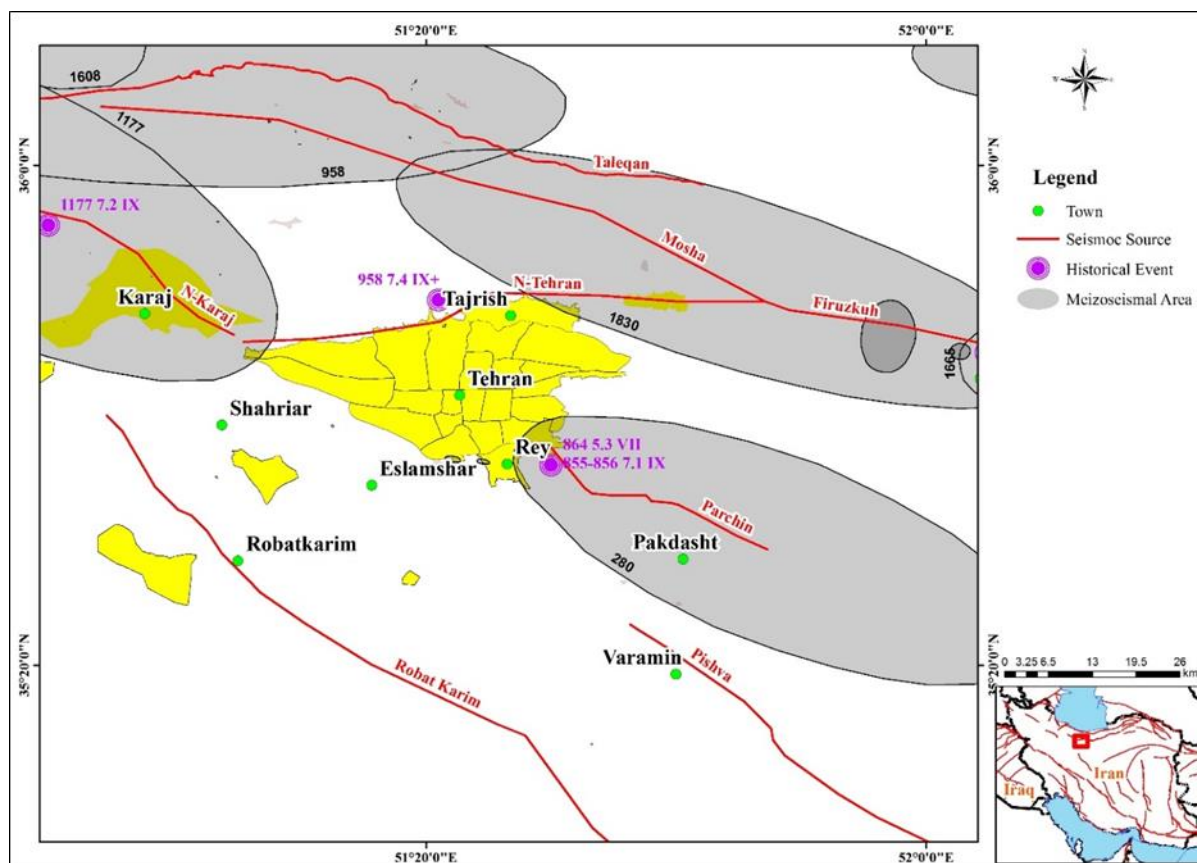
ایران یکی از مناطق زلزله‌خیز جهان است و شهر تهران، به‌عنوان پایتخت آن، سابقه وقوع زمین‌لرزه‌های شدید تاریخی و ماقبل تاریخ را دارد. بررسی شتاب زمین‌لرزه در این پهنه، نقش مهمی در افزایش ایمنی و تاب‌آوری سکونت‌گاه‌ها دارد. در دو دهه اخیر، مطالعات دیرینه‌لرزه‌شناسی بر روی گسل‌های اطراف تهران اطلاعات ارزشمندی درباره رخداد‌های لرزه‌ای باستانی و نرخ فعالیت بلندمدت گسل‌ها فراهم کرده است، اما این داده‌ها تاکنون به‌طور جامع در مدل‌سازی خطر لرزه‌ای استفاده نشده‌اند. هدف پژوهش حاضر، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی بر اساس تازه‌ترین مدل‌های زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی است. با بازنگری در ساختارهای گسلی موجود و حذف نواحی غیرگسلی (از جمله پرتگاه‌های شمال ری، جنوب ری، کهریزک و اشتهارد) که پیش‌تر به‌اشتباه به‌عنوان منابع لرزه‌زا معرفی شده بودند، مدلی دقیق‌تر برای خطر لرزه‌ای ارائه شد. ارزیابی با روش درخت منطقی، داده‌های کیفی و کمی لرزه‌خیزی و مدل‌های NGA-West2 انجام گرفت و نقشه‌های شتاب طیفی با وضوح بالا برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال تولید شد. نتایج نشان داد جنوب‌شرق تهران شتاب لرزه‌ای کمتر از برآوردهای پیشین دارد و بازنگری در طراحی لرزه‌ای را ضروری می‌کند. این پژوهش با تفسیر نوین از ساختارهای کواترنری جنوب تهران، مدلی جامع برای اصلاح آیین‌نامه‌ها، مقاوم‌سازی و مدیریت بحران ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر زمین‌لرزه، شتاب زمین‌لرزه، گسل‌های فعال تهران، دیرینه‌لرزه‌شناسی، پرتگاه جنوب ری.

مقدمه

هدف اصلی این مطالعه، بازنگری در مدل‌های خطر لرزه‌ای شهر تهران از طریق حذف ساختارهای غیر زمین‌ساختی و استفاده از داده‌های دیرینه لرزه‌ای معتبر است. رویکردی که می‌تواند به تخمین دقیق‌تر شتاب زمین لرزه در مناطق مختلف شهر بینجامد. به‌ویژه، بررسی تفاوت میان برآوردهای واقعی این تحقیق با مقادیر ارائه‌شده در مدل‌های پیشین مانند آیین‌نامه ۲۸۰۰، پروژه‌های EMME و GSHAP، یکی از محورهای کلیدی این مطالعه به‌شمار می‌رود.

ارزیابی خطر زمین لرزه، یکی از پایه‌های اساسی در مطالعات مهندسی لرزه‌ای محسوب می‌شود. در این میان، پهنه‌بندی شتاب طیفی به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تحلیل پاسخ دینامیکی سازه‌ها در برابر ارتعاشات ناشی از زلزله شناخته می‌شود. این نقشه‌ها نه‌تنها در طراحی مقاوم سازه‌ها بر اساس آیین‌نامه‌های ساختمانی به کار گرفته می‌شوند، بلکه نقش مهمی نیز در سیاست‌گذاری کلان برای کاهش مخاطرات زلزله در مناطق با خطر بالا ایفا می‌کنند. چنین تحلیل‌هایی در مناطق شهری توسعه‌یافته بر روی گسل‌های فعال زمین‌ساختی، اهمیتی مضاعف پیدا می‌کنند. استفاده همزمان از اطلاعات زمین‌ساختی، لرزه‌زمین‌ساختی و ژئوتکنیکی در قالب تحلیل‌های خطر احتمالاتی، می‌تواند چشم‌اندازی واقعی‌تر و دقیق‌تر از سناریوهای بالقوه لرزه‌ای ارائه دهد؛ موضوعی که برای طراحی زیرساخت‌های ایمن در شهرهای بزرگ، از جمله تهران، اهمیت حیاتی دارد. شهر تهران، به‌عنوان پایتخت ایران، در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز مرکزی قرار دارد و در میان فعال‌ترین مناطق لرزه‌خیز خاورمیانه جای می‌گیرد. این منطقه تحت اثر فشار ناشی از برخورد صفحه تکتونیک عربی با اوراسیا قرار دارد و در آن گسل‌هایی مانند شمال تهران و مشاء از ساختارهای عمده فعال به‌شمار می‌روند (شکل ۱). با این حال، پژوهش‌های اخیر در زمینه زمین‌ساخت کواترنری و مورفوتکتونیک، تفسیر پیشین از برخی گسل‌های شناخته‌شده مانند شمال ری، جنوب ری، کهریزک و اشتهارد را مورد تردید قرار داده‌اند. بر پایه شواهد حاصل از مطالعات ژئومورفولوژیکی، رسوب‌شناسی و ژئوفیزیکی، ساختارهای مذکور به‌جای آن که منبع زمین لرزه در نظر گرفته شوند، به‌عنوان ساحل‌های باقیمانده از دریاچه باستانی ری (Paleo Mega Lake of Rey: PAMELA) تفسیر شده‌اند (نظری، ۲۰۱۰؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ بربریان و بیتز، ۲۰۱۶؛ جراحی، ۲۰۲۱؛ ناوورنوری، ۲۰۲۱؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۳؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲). این تفسیر، بازنگری عمده‌ای در درک ما از زمین‌ساخت ناحیه جنوبی تهران ایجاد کرده است. منطقه مطالعاتی، ترکیبی از ارتفاعات سخت شمالی و دشت‌های آبرفتی نرم جنوبی را شامل می‌شود که شرایط ژئوتکنیکی و ضخامت رسوبات در آن تفاوت قابل توجهی دارد؛ عاملی که در تحلیل پاسخ زمین به زمین لرزه‌ها نقش کلیدی ایفا می‌کند.



شکل ۱: نمایش موقعیت چشمه‌های لرزه‌زای گستره تهران. در این شکل محدوده‌های شهری به رنگ زرد هستند و بیضی‌ها، پهنه مهلرزهای زمین‌لرزه‌های مهیب را نمایش می‌دهند (بربریان، ۲۰۱۴). اطلاعات گسل‌ها برگرفته از (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۲۰۱۴) (Sheikholeslami et al., 2014) می‌باشد.

بررسی خطر لرزه‌ای در منطقه کلان‌شهری تهران، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. چرا که این منطقه نه تنها پایتخت سیاسی و اقتصادی ایران است، بلکه در مجاورت چندین گسل فعال از جمله گسل شمال تهران، گسل ری و گسل مشاء قرار دارد. مطالعات انجام‌شده در این زمینه، با رویکردهای متفاوتی از جمله تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی (PSHA)، تحلیل‌های زمانی و پهنه‌بندی‌های ژئوتکنیکی، تلاش کرده‌اند تصویری جامع از سطح خطر ارائه دهند. در یکی از جامع‌ترین مطالعات اخیر، علیخانزاده و زعفرانی (علیخانزاده و زعفرانی، ۲۰۲۳) برای نخستین بار از چارچوبی مبتنی بر فیزیک جهت تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه (PBPSHA) در حوضه تهران استفاده کردند. در این مطالعه، گام‌هایی همچون مدل‌سازی گسل‌ها، شبیه‌سازی منبع زمین‌لرزه و برآورد پاسخ زمین به‌صورت جامع درون فرآیند ارزیابی لحاظ شده‌است. نتایج این تحلیل نشان داد که ترکیب داده‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و شبیه‌سازی‌های فیزیکی منجر به دقت بالاتری در تخمین خطر لرزه‌ای می‌شود. از سوی دیگر، بوستان و همکاران (بوستان و همکاران، ۲۰۱۵) با استفاده از ترکیب روش‌های احتمالاتی و فازی، ارزیابی خطر لرزه‌ای در منطقه تهران را انجام دادند. این رویکرد امکان مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ناشی از منابع مختلف (نظیر پارامترهای جنبش زمین) را فراهم ساخت و برتری‌هایی نسبت به روش‌های

صرفاً احتمالاتی از خود نشان داد. به منظور بهره‌گیری از رویکردهای مکانی-زمانی، هاشمی و همکاران (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۳) مدلی مبتنی بر سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) را توسعه دادند که بتواند تحلیل خطر را در قالب زون‌بندی لرزه‌ای برای شهر تهران انجام دهد. این مدل امکان تلفیق داده‌های تاریخی، گسل‌ها، و پاسخ سایت‌ها را فراهم می‌سازد. تحلیل خطر وابسته به زمان (Time-dependent PSHA) نیز در پژوهش جلال‌الحسینی و همکاران (جلال‌الحسینی و همکاران، ۲۰۱۸) مطرح شد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از توزیع‌های زمانی بازگشت زمین‌لرزه‌ها، به ویژه مدل‌های یادآور مارکوفی، می‌تواند منجر به دقت بالاتری در برآورد احتمال وقوع زلزله در بازه‌های زمانی مشخص شود. در راستای ارزیابی جامع ریسک لرزه‌ای، کامرانزاد و همکاران (کامرانزاد و همکاران، ۲۰۲۰) روشی تلفیقی شامل تحلیل خطر و آسیب‌پذیری اجتماعی را ارائه کردند. آن‌ها شاخص‌هایی مانند تراکم جمعیت، کیفیت سازه‌ها و سطح دسترسی به خدمات اضطراری را در ترکیب با سناریوهای زمین‌لرزه‌ای لحاظ نمودند تا نقشه نهایی ریسک را برای تهران تهیه کنند. از جنبه ساختار کلی خطر، وانگ و تهرانی (وانگ و طاهری، ۲۰۱۴) با بهره‌گیری از مدل‌های Gutenberg-Richter و Gumbel، به برآورد پارامترهای شدت و نرخ وقوع زمین‌لرزه در تهران پرداختند. این مطالعه با استفاده از داده‌های تاریخی، نقشه‌های خطر لرزه‌ای با سطوح اطمینان متفاوت ارائه نمود. در نهایت، یزدانی و کوثری (یزدانی و کوثری، ۲۰۱۷) به توسعه نقشه‌های سناریو-محور خطر لرزه‌ای در تهران پرداختند که با در نظرگیری سناریوهای مختلف زلزله، میزان خسارات محتمل را برای زیرساخت‌های شهری مدل‌سازی می‌کند. این پژوهش درک بهتری از تنوع فضایی خطر لرزه‌ای فراهم آورد.

یکی از نخستین گام‌های مؤثر در جهت تهیه پهنه‌بندی لرزه‌ای دقیق برای تهران، پژوهش حمزه‌لو و همکاران (حمزه‌لو و همکاران، ۲۰۰۷) بود که با بهره‌گیری از مدل‌سازی سه‌بعدی جنبش زمین، شرایط زیرسطحی منطقه تهران را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه با ترکیب داده‌های لرزه‌نگاری، زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، به سمت تهیه یک خردپهنه‌بندی لرزه‌ای قابل اتکا برای شهر تهران گام برداشت. نتایج آن‌ها حاکی از تأثیر قابل توجه شرایط زمین‌شناسی محلی بر شدت لرزه‌ای ثبت‌شده در مناطق مختلف بود. در ادامه، پروژه‌ای کلان با هدف تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی برای منطقه کلان‌شهری تهران به‌وسیله قلی‌پور و همکاران (قلی‌پور و همکاران، ۲۰۰۸) در دانشگاه تهران اجرا شد. در این پروژه، داده‌های تاریخی و دستگاهی زلزله، ویژگی‌های گسل‌ها، روابط کاهندگی مناسب با شرایط ایران و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه به‌عنوان فاز اول ارزیابی خطر، نقش پایه‌ای در شناخت توزیع خطر در سطح کلان‌شهر تهران ایفا کرد. از سوی دیگر، به منظور تدوین ضوابط طراحی مقاوم لرزه‌ای، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نسخه چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ را در سال ۲۰۱۴ منتشر کرد که در آن، یافته‌های حاصل از مطالعات خطر لرزه‌ای، از جمله پژوهش‌های فوق، مبنای تعیین مقادیر طراحی برای شتاب زمین در مناطق مختلف ایران، از جمله تهران، قرار گرفت. این آیین‌نامه، خود نشانگر ارتباط مستقیم بین پژوهش‌های لرزه‌ای و سیاست‌گذاری‌های ایمنی ساخت‌وساز در کشور است. در سطحی پیشرفته‌تر، جلال‌الحسینی و همکاران (جلال‌الحسینی و همکاران، ۲۰۱۸) با بهره‌گیری از مدل‌های زمان‌مند، تحلیلی نوین از خطر لرزه‌ای در تهران ارائه کردند. این مطالعه با در نظر گرفتن نرخ لغزش گسل‌ها، زمان سپری‌شده از آخرین رویداد بزرگ و دوره بازگشت احتمالی، تلاش نمود احتمال وقوع زلزله در بازه‌های زمانی مشخص را برآورد کند. رویکرد آن‌ها، نشان‌دهنده تمرکز جدید پژوهشگران بر نقش زمان در تحلیل خطر، به‌ویژه برای مناطقی چون تهران است که زلزله‌های ویرانگر در گذشته‌ای نه‌چندان دور را تجربه کرده‌اند. در مجموع، پژوهش‌های مذکور، طیفی از رویکردهای کلاسیک تا نوین در تحلیل خطر لرزه‌ای را پوشش می‌دهند و بنیان نظری و کاربردی محکمی برای مطالعات بعدی فراهم آورده‌اند. با اتکا بر این مطالعات، پژوهش حاضر تلاش دارد تا با رویکردی تحلیلی، به بررسی الگوهای خطر لرزه‌ای در بخشی خاص

از منطقه تهران بپردازد. با وجود مطالعات متعدد در زمینه تحلیل خطر زمین‌لرزه در منطقه تهران، اغلب پژوهش‌ها تمرکز خود را بر محدوده‌ی مرکزی یا شمالی شهر گذاشته‌اند، جایی که چگالی ساخت‌وساز و جمعیت بالاست. این در حالی است که در دهه‌های اخیر، توسعه شهری به سرعت به نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی تهران گسترش یافته و مناطقی چون اسلامشهر، ری و جنوب بهشت زهرا، به مراکز جدید جمعیتی، صنعتی و زیرساختی بدل شده‌اند. با این وجود، این نواحی هنوز در نقشه‌های خطر لرزه‌ای با دقت بالا پوشش کافی نیافته‌اند. افزون بر این، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین، گسل‌ها را بدون ارزیابی انتقادی از فعالیت واقعی یا شواهد ژئومورفولوژیک آن‌ها وارد مدل‌های (PSHA) کرده‌اند. پژوهش حاضر، با حذف گسل‌هایی نظیر گسل ری که شواهد زمین‌ساختی فعالی برای آن‌ها در مقیاس‌های منطقه‌ای وجود ندارد، سعی در کاهش عدم قطعیت‌ها و دستیابی به نقشه‌ای واقع‌گرایانه‌تر از خطر لرزه‌ای دارد. این رویکرد، به‌ویژه در تدوین سناریوهای مدیریت بحران و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها، می‌تواند تصمیم‌گیرندگان را از گرفتار شدن در هزینه‌های بی‌مورد یا غفلت‌های خطرناک نجات دهد. در نهایت، فقدان تحلیل‌های ناحیه‌ای با قدرت تفکیک بالا در جنوب تهران و همچنین نیاز به بازنگری در مفروضات سنتی تحلیل خطر در این منطقه، ضرورت انجام این پژوهش را برجسته می‌سازد. این مطالعه تلاش می‌کند خلأ موجود میان داده‌های تاریخی، ساختار زمین‌شناسی، شواهد سطحی، و رویکردهای مدل‌سازی مدرن را پر کند، تا ابزار تحلیلی کارآمدتری برای ارزیابی واقعی ریسک لرزه‌ای در اختیار جامعه مهندسی و مدیریت شهری قرار گیرد.

در این مقاله، یک تحلیل احتمالاتی جدید از خطر زمین‌لرزه (PSHA) برای بخش جنوبی تهران با تمرکز ویژه بر حوضه ری و نواحی مجاور مانند اسلام‌شهر و کهریزک ارائه شده است. این پژوهش در بخش نوآوری، با بهره‌گیری از داده‌های به‌روز زمین‌شناسی و مورفولوژیکی و تفسیرهای جدید از تکنونیک منطقه، عناصر غیر گسلی یا به‌اشتباه تفسیرشده، از جمله گسل‌های موسوم به شمال ری، جنوب ری، کهریزک و اشتهارد را حذف کرده و آن‌ها را به‌عنوان کرانه‌های ساحل قدیمی ابر دریاچه باستانی ری بازشناسی می‌کند (نظری، ۲۰۱۰؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ بربریان و بیتز، ۲۰۱۶؛ جراحی، ۲۰۲۱؛ ناوورنویری، ۲۰۲۱؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۳؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲). مدل گسل‌های مؤثر در خطر زمین‌لرزه با تکیه بر تنها گسل‌های فعال و معتبر لرزه‌ای بازبینی شده و ارزیابی خطر با استفاده از روش درخت منطقی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های معرفت‌شناختی در روابط پیش‌بینی حرکت زمین (GMPEs)، بیشینه بزرگای محتمل و پارامترهای بازگشت صورت گرفته است. نتایج به‌صورت نقشه‌های خطر با وضوح بالا در قالب بیشینه شتاب زمین (PGA) و شتاب طیفی (SA) ارائه شده که ارزیابی دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری از خطر لرزه‌ای در حاشیه جنوبی و به‌شدت در حال توسعه تهران به دست می‌دهد. این رویکرد بازبینی مهمی بر تخمین‌های پیشین محسوب شده و مبنای علمی مناسبی برای طراحی‌های مهندسی و برنامه‌ریزی شهری در این پهنه آسیب‌پذیر فراهم می‌سازد. به‌علاوه قرار است تا مقایسه‌ای نیز برای وضعیتی که خواهیم بحث پرتگاه‌های جنوب تهران را به عنوان گسل بپذیریم و آن‌ها را در تحلیل‌های شتاب زمین لرزه وارد کنیم، صورت بگیرد. به همین سبب، بخشی از این مطالعه به مقایسه مذکور اختصاص یافته است.

پژوهش حاضر در چندین جنبه کلیدی با مطالعات پیشین متفاوت و برتر است. نخست، برخلاف اغلب مطالعات ارزیابی خطر زمین‌لرزه در منطقه تهران که بر پایه مفروضات کلیشه‌ای از وجود گسل‌هایی همچون شمال ری، جنوب ری، کهریزک و اشتهارد استوار بودند، این تحقیق با تکیه بر تحلیل‌های زمین‌ریخت‌شناسی، داده‌های میدانی و شواهد چندرشته‌ای آرکتوسایزمولوژی، ژئوآرکتولوژی و پالئوژئوگرافی (Archaeoseismology, Geoarchaeology, Paleogeography)، نشان

می‌دهد که این ساختارها نه گسل فعال، بلکه نشانه‌هایی از سواحل قدیمی ابر دریاچه‌ای هستند که در کواترنری شکل گرفته‌اند (نظری، ۲۰۱۰؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ بربریان و بیتز، ۲۰۱۶؛ جراحی، ۲۰۲۱؛ ناوورنویری، ۲۰۲۱؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۳؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲). دوم، مدل گسل‌های مؤثر در این پژوهش، با حذف گسل‌های نادرست و تمرکز بر گسل‌های فعال واقعی مانند گسل مشاء، شمال تهران، طالقان و ...، پایه‌ریزی شده است؛ موضوعی که باعث کاهش خطای مدل‌سازی و بهبود اعتبار نتایج نهایی می‌گردد. در نهایت، تولید نقشه‌های خطر با وضوح بالا برای گستره تهران خصوصاً مناطق جنوبی شهر و ارائه‌ی بازنگری در سناریوهای طراحی لرزه‌ای، زمینه‌ساز تدوین استانداردهای ایمن‌تر در ساخت‌وساز و برنامه‌ریزی شهری خواهد بود.

روش تحقیق

در این پژوهش، برای بازاریابی خطر زمین‌لرزه در منطقه کلان‌شهر تهران، از چارچوب تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای (PSHA) استفاده شد. این ارزیابی بر پایه‌ی بازنگری در ساختارهای گسلی فعال و حذف گسل‌هایی انجام شد که شواهد ژئومورفولوژیک و رسوب‌شناسی، ماهیت غیرتکتونیکی آن‌ها را نشان می‌دادند. مراحل اصلی روش‌شناسی شامل چهار بخش زیر است: (۱) تعریف منابع لرزه‌زا؛ (۲) انتخاب مدل‌های پیش‌بینی جنبش زمین (GMPEs)؛ (۳) توسعه ساختار درخت منطقی جهت لحاظ کردن عدم قطعیت و (۴) انجام محاسبات خطر.

در گام نخست، چارچوب زمین‌ساختی منطقه با استفاده از ترکیب داده‌های ماقبل تاریخ (دیرینه لرزه‌شناسی)، تاریخی و دستگاهی زمین‌لرزه‌ها از منابع مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی (IIIES) و بولتن ISC تهیه شد. برای حذف خوشه‌های پس‌لرزه‌ای، از روش گاردنر و نوپف (گاردنر و نوپف، ۱۹۷۴) استفاده گردید و سپس تحلیل کامل بودن داده‌ها بر اساس پنجره‌های زمانی-بزرگی انجام شد. نقشه‌های گسل‌ها از منابع زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ برداشت شد و به‌وسیله تصاویر ماهواره‌ای با دقت بالا بازبینی و اصلاح گردید. در این مطالعه، گسل‌هایی مانند اشتها، شمال ری، جنوب ری و کهریزک به دلیل شواهد ژئومورفولوژیک و رسوب‌شناسی حاصل از مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی، دال بر ماهیت ساحل پارینه و نه تکتونیکی، از مدل منبع حذف شده‌اند. تمرکز بر گسل‌های فعالی نظیر شمال تهران، شمال کرج، مشاء، طالقان، فیروزکوه و پیشوا قرار گرفت. برای مدل‌سازی جنبش زمین، از مدل‌های پیشرفته‌ای که برای زلزله‌های کم‌عمق در مناطق فعال تکتونیکی طراحی شده‌اند، بهره گرفته شد. مدل‌های NGA-West2 با اعمال تنظیمات منطقه‌ای بر اساس داده‌های تجربی محلی انتخاب گردید. این مدل‌ها با وزن‌دهی مناسب در درخت منطقی لحاظ شدند تا عدم قطعیت‌های مربوط به پیش‌بینی جنبش زمین کنترل شود. درخت منطقی چندشاخه‌ای به‌منظور لحاظ کردن تغییرپذیری در پارامترهای منبع (مانند بزرگای بیشینه، نرخ تکرار، و هندسه گسل‌ها) طراحی شد. وزن شاخه‌ها با استفاده از داوری تخصصی و مطالعات حساسیت پیشین تعیین گردید (زعفرانی و همکاران، ۲۰۱۲). حذف گسل‌های غیرفعال به‌عنوان یک محدودیت قطعی در مدل لحاظ شد که بر مبنای تفسیرهای نوین زمین‌شناسی پشتیبانی می‌شود. محاسبه شتاب طیفی زمین‌لرزه در اوج شتاب زمین (PGA) و شتاب طیفی (SA) در دوره طیفی ۱/۰ ثانیه با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته Ez-Frisk انجام شده است. این نقشه‌ها برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال تهیه گردیدند. طبقه‌بندی خاک بر اساس دسته‌بندی سرعت موج برشی در ۳۰ متر ابتدایی خاک (Vs30) در ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ (BHRC, 2014) صورت گرفت.

یافته ها

- زمین ساخت

گسل‌های پوسته ممکن است، زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی کافی ($M_w > 7.0$) ایجاد کنند. بنابراین، گنجاندن منابع گسلی شناسایی شده به منظور گسترش سابقه زمین‌لرزه‌های تاریخی به هزاران سال پیش، یک عمل منظم است (پیترسن، ۲۰۱۴). بیشتر گسل‌های پوسته‌ای در منطقه البرز مرکزی از نظر مکان، وسعت، سرعت لغزش و زمان گسیختگی‌ها شناسایی و مشخص نشده‌اند. برخی از گسل‌های پوسته‌ای شناخته شده نظیر گسل شمال تهران، زمین‌لرزه‌هایی تا حداکثر بزرگی $M_w=7.4$ ایجاد کرده‌اند. نرخ لغزش زمین‌شناسی تعدادی از این گسل‌ها با استفاده از مطالعات ترانشه دیرینه‌لرزه‌شناسی مشخص شده است. بنابراین نرخ لغزش به عنوان یک پارامتر مهم برای تعیین فعالیت گسل‌ها در نظر گرفته می‌شود. گسل‌های مشخص شده مطالعه حاضر در شکل ۱ نشان داده شده و پارامترهای مدل‌سازی آنها در جدول ۱ ذکر شده است. گسل شمال تهران به‌عنوان سناریوی اصلی لرزه‌ای در پایتخت ایران شناخته می‌شود. این گسل با سازوکار معکوس از شرق تهران به گسل مشاء محدود می‌شود. ادامه غربی این گسل در نزدیکی کرج تغییر روند داده و گسل شمال کرج را می‌سازد. بر اساس مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های این گسل نامنظم است (ریتز و همکاران، ۲۰۱۲). گسل مشاء، فیروزکوه و طالقان به ترتیب با طول‌های ۱۵۰، ۷۰ و ۸۰ کیلومتر، رشته گسلی جنوب البرز مرکزی را تشکیل داده‌اند. گسل پیشوا، با امتداد شمال غرب-جنوب شرق، در جنوب شرق تهران است. تمامی این گسل‌ها بر مبنای مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی، دارای مستنداتی از سوابق لرزه‌خیزی هستند. باید توجه داشت که در گذشته گسل‌های دیگری در منطقه تهران شناخته می‌شدند که بعدها در مطالعات جدیدتر، تردیدهای جدی در مورد ماهیت آنها مطرح گردید و نهایتاً از فهرست گسل‌های منطقه حذف گردیده و به‌عنوان پرتگاه ساحلی دریاچه قدیمی معرفی شدند (نظری، ۲۰۱۰؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ بربریان و بیتز، ۲۰۱۶؛ جراحی، ۲۰۲۱؛ ناوورنویری، ۲۰۲۱؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۳؛ نجفیان و همکاران، ۲۰۲۲).

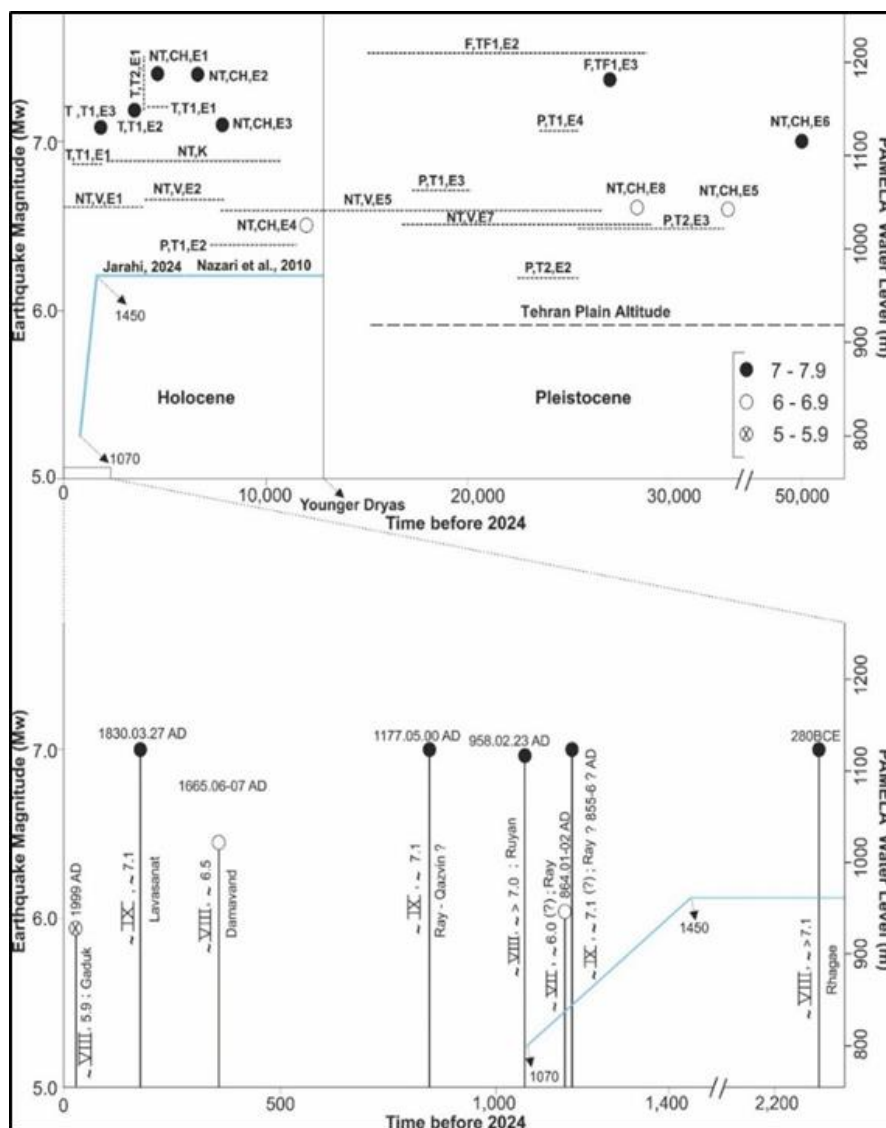
جدول ۱: پارامترهای لرزه‌ای چشمه‌های پوسته‌ای

Fault source	Rupture length (km)	Characteristic or maximum magnitude (Mw)	Slip rate (mm/yr)	References
North Karaj	70	7.2	0.3 ± 0.05	(Ritz et al., 2012)
North Tehran	70	7.4	0.3 ± 0.05	(Ritz et al., 2012)
Taleqan	50	7.2	0.6-1.6	(Nazari et al., 2009)
Mosha	80	7.1	2.0	(Allen et al., 2003; Bachmanov et al., 2004; Ritz et al., 2003; Ritz et al., 2006)
Firuzkuh	80	7.4	1.1-2.2	(Ritz et al., 2009; Ritz et al., 2006)
Pishva	50	7.2	0.12 – 0.14	(Majidi Niri et al., 2011)

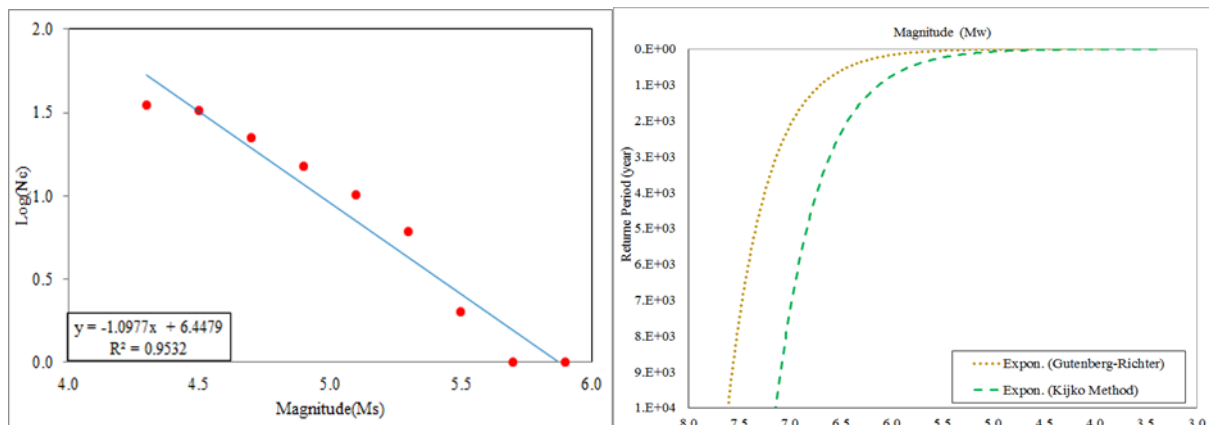
- لرزه‌خیزی

زمین لرزه‌های ماقبل تاریخ از مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی اتخاذ گردید (بلورچی، ۱۹۹۸؛ سلیمانی‌آزاد و همکاران، ۲۰۰۳؛ نظری، ۲۰۰۷؛ مجیدی‌نیری و همکاران، ۲۰۱۰؛ کاوه‌فیروز و همکاران، ۲۰۱۲؛ نظری، ۲۰۱۵؛ ناوورنویری و همکاران، ۲۰۲۱؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۵). ابتدا داده‌های تاریخی از منابع موجود استخراج شد (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲، بربریان، ۱۹۸۲)، سپس زمین لرزه‌های دستگاهی از منابع معتبر ملی و بین‌المللی گردآوری شد و پس از حذف رویدادهای وابسته، در نهایت فهرست نهایی شامل ۲۴ زمین لرزه ماقبل تاریخ، ۶ زمین لرزه تاریخی و ۳۸ زلزله دستگاهی مستقل بزرگتر از $M_w = 4$ است (شکل ۲). فهرست زمین لرزه‌های خوشه‌بندی شده برای دوره ۸۱۲ تا ۲۰۲۵ میلادی کامل نیست. نرخ لرزه‌ای پیش‌بینی شده با استفاده از رویدادهای زلزله این فهرست ممکن است وقوع زمین لرزه‌های آینده در این مناطق را دست کم بگیرد. میانگین نرخ لرزه‌ای قابل اعتماد را می‌توان با شناسایی دوره‌ای که طی آن فهرست برای یک محدوده بزرگی کامل شده است، پیش‌بینی کرد. بنابراین، دوره‌های کامل بودن برای دامنه‌های بزرگی مختلف با استفاده از روش استپ تعیین می‌شوند (استپ، ۱۹۷۲). فهرست زلزله این مطالعه برای بزرگ‌های $M_w \geq 4.5$, $M_w \geq 5.0$, $M_w \geq 5.5$, $M_w \geq 6.0$ ، $M_w \geq 6.5$, $M_w \geq 7.0$ به ترتیب در بازه‌های زمانی ≥ 1976 , ≥ 1926 , ≥ 1926 , ≥ 1911 , ≥ 1911 , ≥ 1831 ، کامل است.

پارامترهای خطر لرزه‌ای شامل a : فعالیت لرزه‌ای و b : است که فراوانی نسبی زمین لرزه‌های بزرگ تا کوچکتر را توصیف می‌کنند. برای منطقه مورد مطالعه، مجموعه داده‌های لرزه‌خیزی برای توسعه رابطه گوتنبرگ-ریشتر استفاده شده است (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۵۶). شکل ۳، تاریخچه زمانی داده‌ها را با نمودار توزیع فراوانی بزرگی مربوطه نشان می‌دهد. این رقم بر اساس لگاریتم بزرگا (تعداد تجمعی رویدادها در سال) مساحت پلات برای $M > 5.5$ برنامه‌ریزی شد (کرنیتزسکی، ۱۹۹۵). بر اساس این معادله، پارامتر خطر لرزه‌ای با پارامترهای a و b به ترتیب برابر با $6/44$ و $1/09$ ضریب همبستگی $0/95$ است (شکل ۳). دست کم برای بازه ۲۰۰۰ سال اخیر زمین لرزه بزرگی ($M > 6.0$) در گستره تهران و مناطق همجوار به وقوع نپیوسته است. گسل فیروزکوه از حدود ۱۵ هزار سال قبل تا کنون زمین لرزه بزرگی (به جز رویداد ۱۹۹۰ میلادی با بزرگای $5/9$ گدوک در بخش شرقی) را ایجاد نکرده است. از طرفی گسل شمال تهران تقریباً هر دو هزار سال یکبار، یک رویداد لرزه‌ای بزرگ را سبب شده است. در شکل ۵ از هر دو روش کیکو (کیکو و همکاران، ۲۰۲۳) و گوتنبرگ-ریشتر برای محاسبه دوره بازگشت بزرگا استفاده شد. بر اساس گفته‌های فوق، نتایج روش کیکو معتبرتر و همخوانی بهتری با منطقه دارد.



شکل ۲: نمودار تغییرات تراز آب دریاچه باستانی ری (PAMELA) در مقایسه با زمین لرزه‌های حاصل از مطالعات دیرینه لرزه-شناسی (بخش بالایی) و دستگاهی (بخش پایینی) گسل‌های اطراف تهران در طی زمان نسبت به امروز. زمین لرزه‌هایی که تاریخ رویداد آن‌ها محدود شده است، با خطچین افقی نمایش داده شده‌اند. خطچین عمودی بازه بزرگ را نمایش می‌دهد. دایره‌ها زمین لرزه‌های فاقد حد بالا و پایین زمانی را نشان می‌دهند. تراز آب دریاچه نسبت به سطح دریای آزاد است. NT: گسل شمال تهران، V: ترانشه وردآورد، CH: ترانشه چیتگر، K: کند، T: گسل طالقان، F: گسل فیروزکوه، P: گسل پیشوا است. T1, T2, NT, TF1 شماره ترانشه‌ها و E1 تا E8 رویداد لرزه‌ای هر ترانشه است (عبداللهی و همکاران، ۲۰۲۵).



شکل ۳: سمت راست: بزرگای زمین لرزه‌های دستگاهی در مقابل لگاریتم فراوانی تجمعی و سمت چپ: مقایسه دوره بازگشت بزرگای زمین لرزه به دو روش گوتنبرگ-ریشتر و کیکو

- انتخاب روابط کاهندگی (GMPEs^۱)

حرکت زمین لرزه‌ای در یک مکان معمولاً به‌عنوان تابعی از بزرگا و فاصله از منبع با استفاده از معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (GMPEs) اندازه‌گیری می‌شود. معادلات پیش‌بینی حرکت زمین به‌طور تجربی از بسیاری از داده‌های حرکت زمین با استفاده از تحلیل رگرسیون آماری مشتق شده‌اند. در مطالعه حاضر، معادلات پیش‌بینی حرکت زمین NGAWest-2 برای منابع زمین لرزه پوسته کم عمق (لرزه‌خیزی پس‌زمینه کم عمق و گسل‌های پوسته‌ای) برای تخمین اوج شتاب زمین (PGA) و شتاب طیفی (SA) برای یک سایت استفاده می‌شود (آبراهامسون، ۲۰۱۴؛ بور و همکاران، ۲۰۱۴؛ کمپبل و بزرگنیا، ۲۰۱۴؛ چیو و یانگ، ۲۰۱۴). مطالعات شجاع‌طاهری و همکاران (شجاع‌طاهری و همکاران، ۲۰۱۰) نشان‌دهنده همخوانی این روابط با پوسته ایران است. وزن درخت منطقی معادلات پیش‌بینی حرکت زمین در شکل ۴ نشان داده شده است. وزن‌ها مشابه وزن‌هایی است که برای نقشه خطر لرزه‌ای ایالات متحده در سال ۲۰۱۴ استفاده شد (پیترسن، ۲۰۱۴).

- درخت منطقی

ریتز و همکاران (ریتز و همکاران، ۲۰۱۲) یک مدل گسیختگی تقسیم‌بندی شده برای گسل شمال تهران بر اساس مطالعه دیرینه‌زلزله‌شناسی پیشنهاد کردند. گسیختگی‌هایی که مجاز به شکستن مرزهای قطعه ۲ هستند به‌عنوان گسیختگی‌های شناور نامیده می‌شوند که ممکن است در هر نقطه از گسل رخ دهند (پیترسن، ۲۰۱۴). بربریان و بیتز (بربریان و بیتز، ۲۰۱۶) همچنین پیشنهاد کردند که تکتونیک پیچیده و تنش تکتونیک به دلیل کوتاه شدن سریع گسل شمال تهران در البرز مرکزی، ممکن است در هر زمانی باعث زلزله $Mw > 7.2$ شود. بنابراین، وزن درخت منطقی برای گسیختگی کامل، گسیختگی قطعات گسلی و چشمه شناور به ترتیب ۰/۴، ۰/۴ و ۰/۲ اختصاص داده شد (شکل ۴). گسل شمال تهران یک گسل معکوس یا راندگی با امتداد شرق به غرب است (ریتز و همکاران، ۲۰۱۲). هندسه گسل دارای عدم قطعیت شیب

¹ Ground motion prediction equations

² break through the segment boundaries

است. بنابراین وزن مساوی (۰/۵) برای گسل معکوس و راندگی در نظر گرفته شد. هر دو مدل تعیینی^۱ و گوتنبرگ-ریشتر برای مشخص کردن هر منبع گسل با وزن درخت منطقی ۰/۵ استفاده می‌شوند. بزرگی مشخصه (Mc^2) منبع گسیختگی کامل و حداکثر بزرگی (M_{max}) قطعه گسل منفرد، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود که برای همه انواع گسل (نرمال، معکوس و امتدادلغز) پیشنهاد شده است (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴):

$$M_w = 5.08 + 1.16 \log(SRL) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، SRL طول گسیختگی سطحی (با واحد کیلومتر) است. به عنوان مثال، در مورد گسل شمال تهران، طول منبع گسیختگی کامل (SRL) با استفاده از بزرگی مشاهده شده ($M_w 7.2$) در مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی (ریتز و همکاران، ۲۰۱۲) تعیین می‌شود. برای محاسبه عدم قطعیت بزرگی، مشخصه یا حداکثر بزرگی با یک کران بالا و پایین به صورت (Mc , $M_{max}+0.2$, $M_{max}-0.2$) می‌باشد. برای این مقادیر بزرگی، وزن درخت منطقی به صورت ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۲ اختصاص داده می‌شود. در گستره البرز زمین‌لرزه‌های با بزرگی کمتر از $M_w 6.0$ ، معمولاً گسیختگی سطحی ایجاد نمی‌کنند و رویدادهایی با بزرگی کوچک، بیشتر از متوسط تا بزرگ رخ می‌دهند. گسل‌های پوسته فعال در تهران هنوز به طور کامل شناسایی و مشخص نشده‌اند. بنابراین، خطر لرزه‌ای از زمین‌لرزه‌های $M_w 4.5$ تا $M_w 7.4$ با استفاده از منابع لرزه‌ای پوسته‌ای کم‌عمق منطقه‌ای برآورد می‌شود تا خطر مناطق با لرزه‌خیزی ثبت‌شده، خطر مناطق بدون لرزه‌خیزی ثبت‌شده و گسل‌های ناشناس محاسبه شود. برای تکمیل خطر منابع لرزه‌ای پوسته کم‌عمق، گسل‌های پوسته‌ای شناسایی شده با استفاده از پارامترهای گسل مشخص شده‌اند. برای مدل‌سازی منبع گسل پوسته‌ای، حداقل بزرگی زمین‌لرزه‌ها $M_w 6.0$ در نظر گرفته می‌شود. زمین‌لرزه‌های با بزرگی از $M_w 6.0$ تا $M_w 7.4$ در مدل لرزه‌خیزی منبع گسل پوسته گنجانده شده است. مقدار λ (نرخ فعالیت) در بخش قبل با استفاده از کاتالوگ لرزه‌ای از روش کیکو (کیکو، ۲۰۲۳) تعیین شد. مقدار پارامتر b منطقه‌ای در روش کیکو ۱/۳۴ و در روش گوتنبرگ-ریشتر ۱/۰۹ برآورد شد. با توجه به برتری روش اول و همخوانی با منطقه، مقدار ۱/۳۴ انتخاب گردید.

به منظور مدل‌سازی دقیق خطر لرزه‌ای، در این مطالعه از دو سطح ساختار درخت منطقی استفاده شده است. درخت منطقی اول شامل تمامی اجزای کلاسیک مورد نیاز برای تحلیل خطر لرزه‌ای است که شامل گسل‌های فعال، مکانیسم لغزش (Slip Type)، زاویه شیب (Dip Angle)، عدم قطعیت در بزرگای بیشینه (M_{max})، و مدل‌های حرکت زمین (GMPEs) می‌باشد. این ساختار پایه، بر اساس استانداردهای موجود از جمله پروژه NGA-West2 و روش ارائه‌شده توسط پیترسن و همکاران (پیترسن و همکاران، ۲۰۰۸) شکل گرفته و برای تمامی منابع لرزه‌زا به کار رفته است. با این حال، در مطالعات اخیر لرزه‌شناسی مانند پروژه UCERF3، نشان داده شده که صرف‌نظر کردن از سناریوهای گسیختگی قطعه‌ای (Segmented Ruptures) می‌تواند منجر به برآورد بیشینه‌ی خطر به صورت محافظه‌کارانه یا نادقیق شود.

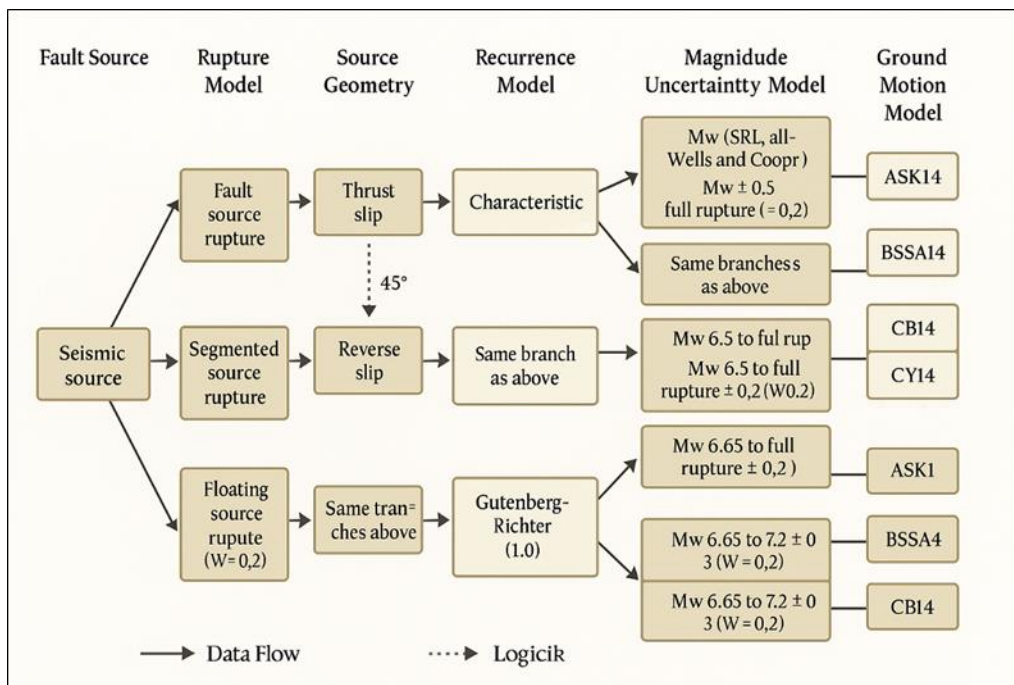
با توجه به اهمیت گسل‌های اصلی منطقه مانند شمال تهران، مشاء و فیروزکوه، و همچنین براساس توصیه‌های روش‌شناختی در پروژه UCERF3، ساختار دومی از درخت منطقی نیز طراحی شد که به‌طور اختصاصی به مدل‌سازی سناریوهای گسیختگی قطعه‌ای (Segmented Rupture) برای این گسل‌ها می‌پردازد (شکل ۵). در این ساختار، هر گسل

¹ characteristic

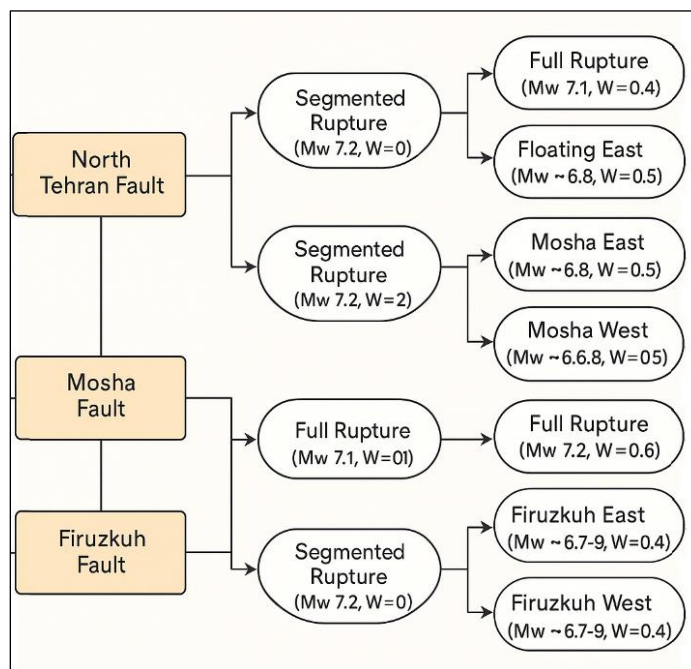
² characteristic magnitude

به قطعات مجزایی تقسیم شده که مبنای تقسیمات شامل تغییرات هندسی، خمش‌های ساختاری، تقاطع با گسل‌های فرعی و داده‌های ژئوفیزیکی بوده‌اند. این تقسیم‌بندی‌ها در جدول ۲ ارائه شده و براساس مطالعات پیشین و تحلیل‌های مکانی با استفاده از داده‌های GIS و شواهد زمین‌شناسی تنظیم شده‌اند (مؤمنی و مادارایگا، ۲۰۲۲؛ شیخ الاسلامی و همکاران، ۲۰۱۴).

ادغام این دو ساختار درخت منطقی در قالب یک مدل ترکیبی، امکان لحاظ کردن سناریوهای متنوع، از جمله گسیختگی‌های کامل و قطعه‌ای را فراهم کرده و موجب ارتقاء دقت در ارزیابی شاخص‌های خطر لرزه‌ای در نواحی پرریسک می‌گردد.



شکل ۴: مدل‌های منبع درخت منطقی گسل پوسته‌ای این مطالعه. وزن شاخه‌ها در پرانتز نشان داده شده است.



شکل ۵: ساختار درخت منطقی پیشنهادی برای مدل‌سازی سناریوهای گسیختگی کامل و قطعه‌ای در گسل‌های شمال تهران، مشاء و فیروزکوه. برای هر گسل، سناریوهای گسیختگی کامل (Full Rupture) و قطعه‌ای (Segmented Rupture) لحاظ شده است. وزن‌های احتمالاتی به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت معرفت‌شناختی مطابق رویکرد پیترسن و همکاران (پیترسن و همکاران، ۲۰۱۴) و UCERF3 تنظیم شده‌اند.

جدول ۲: تقسیم‌بندی قطعه‌ای گسل‌های فعال شمال تهران، مشاء و فیروزکوه بر اساس معیارهای هندسی، ساختاری و زمین‌شناسی. این تقسیم‌بندی‌ها به عنوان پایه تعریف سناریوهای گسیختگی قطعه‌ای در ساختار درخت منطقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

نام گسل	نام قطعه	طول (کیلومتر)	مبنای تقسیم
شمال تهران	قطعه شمال	۲۲	محل خمش گسل
شمال تهران	قطعه مرکزی	۱۸	تغییر در جهت
شمال تهران	قطعه جنوب	۲۵	امتداد یکنواخت
مشاء	قطعه شرق	۳۰	تلاقی با گسل فرعی
مشاء	قطعه مرکزی	۲۰	تغییر در شیب
مشاء	قطعه غرب	۲۸	امتداد پیوسته
فیروزکوه	قطعه شمال	۱۹	محل خمش
فیروزکوه	قطعه جنوب	۱۷	پیوستگی ساختاری
فیروزکوه	قطعه مرکزی	۲۱	داده‌های ژئوفیزیکی

تحلیل احتمالاتی شتاب زمین لرزه

برای PSHA، پایگاه داده منبع لرزه‌ای از مدل‌های منبع لرزه‌ای این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار EZ-FRISK تهیه شده است و معادلات مناسب پیش‌بینی حرکت زمین (GMPEs) با پارامترهای لازم تعریف شده است. برای تعریف یک تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای، ورودی‌ها به صورت زیر سازماندهی می‌شوند:

الف. تعیین پارامترهای تحلیل: نوع شدت، واحد دامنه، تقویت خاک^۱، موقعیت مکانی (تحلیل چند مکان)، تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای، دامنه حرکت زمین، طیف خطر یکنواخت و مقادیر طیفی برای تجزیه و تحلیل

ب. انتخاب منابع لرزه‌ای و معادلات پیش‌بینی حرکت زمین (معادلات میرایی)

ج. وزن‌دهی منابع لرزه‌ای و معادلات میرایی با استفاده از رویکرد درخت منطقی

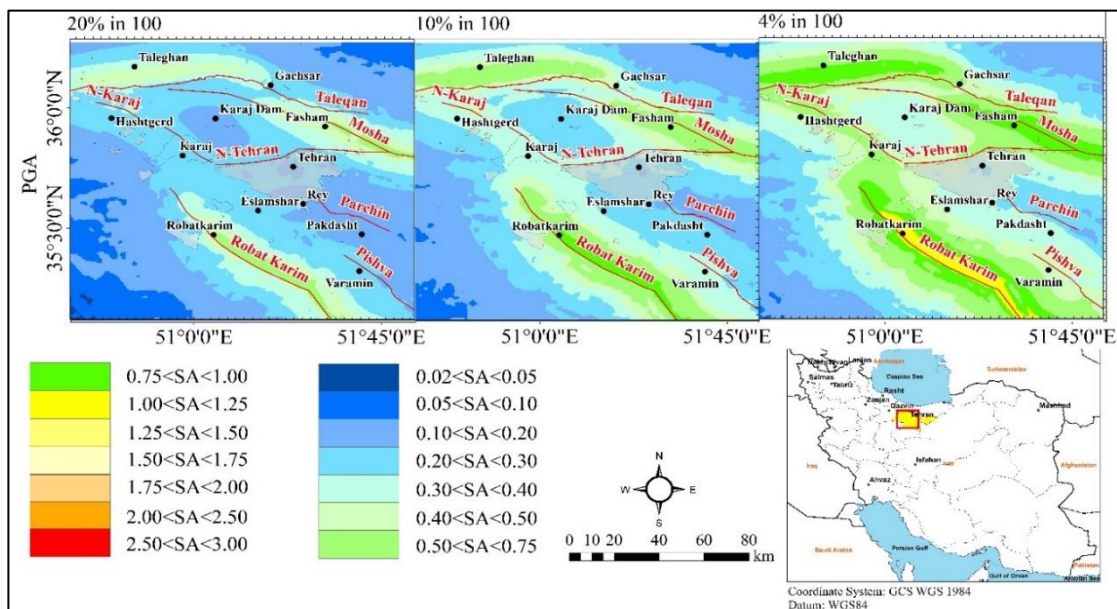
د. تعیین پارامترهای سایت، معادلات تضعیف و استفاده از نقشه سرعت موج برشی

ه. تعیین پارامترهای محاسباتی

پس از تعریف تمامی پارامترهای ورودی، تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای اجرا و نتایج خطر لرزه‌ای با تکمیل تحلیل مشاهده می‌شود. تحلیل احتمالی خطر لرزه‌ای در شبکه‌ای با ۲۰۰۰۰ نقطه (با فواصل ۱۰۰ متر) در گستره تهران برای تخمین اوج شتاب زمین (PGA) و شتاب طیفی (SA) در دوره طیفی ۱ ثانیه انجام شده است (شکل ۶ و ۷). همچنین برای شتاب PGA در دوره بازگشت ۴۷۵ سال با لحاظ نمودن چشمه‌های دارای شبه در شکل ۸ نمایش داده شده است. درصد نسبت میرایی برای ۲۰٪ (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)، ۱۰٪ (دوره بازگشت ۹۷۵ سال) و ۴٪ (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال) احتمال رویداد در ۱۰۰ سال می‌باشد.

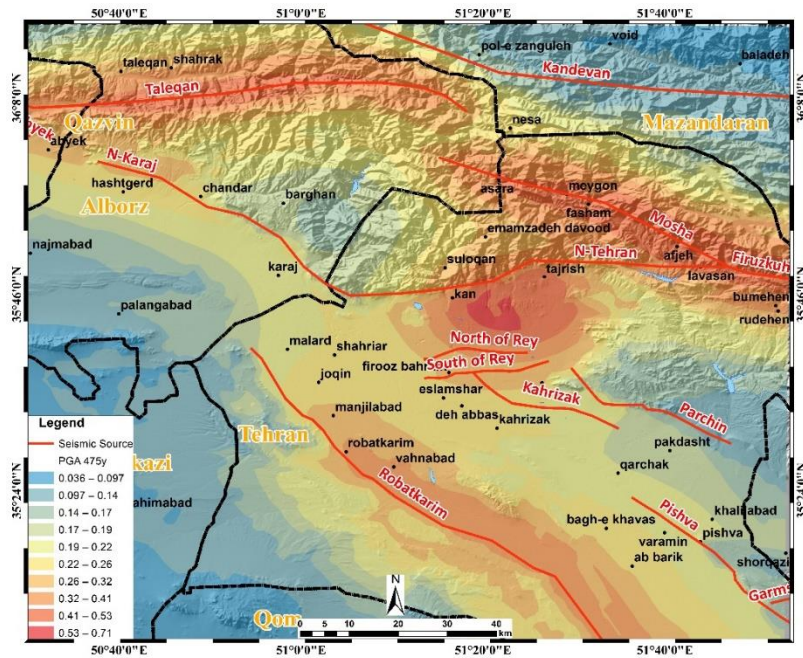
همانطور که دیده می‌شود، خطوط هم‌شتاب، کاملاً از مقادیر عددی سرعت موج برشی پیروی نموده‌اند. در نقشه‌های هم‌شتابی که مقدار سرعت موج برشی برای کل منطقه ثابت است (مثلاً ۷۶۰ متر بر ثانیه)، کنتورهای هم‌شتاب با دور شدن از چشمه لرزه‌زا، روند کاهشی را به صورت منظم دنبال می‌کنند. اما در اینجا، اینطور نیست. در مناطقی که سرعت موج برشی پایین است (مانند دشت تهران و محدوده ری) مقدار شتاب تشدید می‌شود. برعکس در مناطقی با سرعت موج برشی بالا مقدار شتاب کاهش می‌یابد. به وضوح می‌توان رابطه معکوس این دو پارامتر (سرعت موج برشی-شتاب زمین لرزه) را مشاهده نمود.

¹ soil amplification

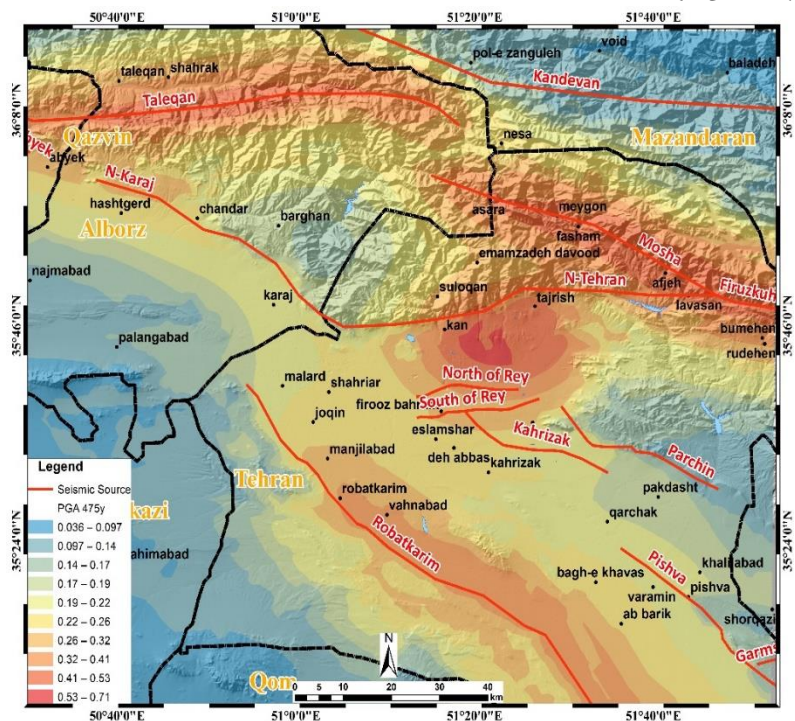


شکل ۶: پهنه‌بندی شتاب طیفی گستره تهران در سه دوره بازگشت ۲۴۷۵ (۴٪ در ۱۰۰ سال)، ۹۷۵ (۱۰٪ در ۱۰۰ سال)، ۴۷۵ (۲۰٪ در ۱۰۰ سال) برای پریود زمانی PGA. طیف رنگی از قرمز تا سبز به ترتیب شتاب بالا تا پایین را نشان می‌دهد. چشمه‌های لرزه‌زا با خطوط قرمز دیده می‌شوند.

با توجه به استفاده از نرم‌افزار EZ-FRISK در حالت Multisite، خروجی تحلیل خطر لرزه‌ای به صورت نقشه‌های میانگین (Mean Logic Tree Branch) ارائه شده است. در این حالت، به دلیل محدودیت ساختاری نرم‌افزار، امکان استخراج مستقیم مقادیر کمینه، بیشینه یا درصدی (e.g., 5th, 95th percentiles) برای هر سلول پهنه وجود ندارد. با این حال، تحلیل حساسیت مدل درخت منطقی (شکل ۴) و مقایسه شاخه‌های مختلف نشان می‌دهد که مقدار PGA در برخی نقاط می‌تواند دارای پراکندگی در حدود ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ g حول مقدار میانگین باشد. این موضوع در تفسیر نهایی نتایج مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۷: پهنه بندی شتاب طیفی گستره تهران در سه دوره بازگشت ۲۴۷۵ (۴٪ در ۱۰۰ سال)، ۹۷۵ (۱۰٪ در ۱۰۰ سال)، ۴۷۵ (۲۰٪ در ۱۰۰ سال)، برای پریود زمانی ۱ ثانیه. طیف رنگی از قرمز تا سبز به ترتیب شتاب بالا تا پایین را نشان می دهد. چشمه های لرزه را با خطوط قرمز دیده می شوند.



شکل ۸: پهنه بندی شتاب PGA زمین لرزه در دوره بازگشت ۴۷۵ ساله با در نظر گرفتن سناریوی گسل های شمال ری، جنوب ری و کهریزک

بحث

گستره تهران همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، همواره مورد توجه زلزله‌شناسان و زمین‌شناسان بوده است. به همین سبب با توجه به موقعیت سیاسی و جمعیتی این شهر، بررسی‌های متعددی در سطح ملی و بین‌المللی برای تهیه نقشه‌های هم‌شتاب زمین‌لرزه در این گستره صورت پذیرفته است. در اینجا لازم است تا مقایسه‌ای میان نتایج تحقیق حاضر و یافته‌های پیشین صورت گیرد. مطالعاتی نظیر آیین‌نامه طراحی ساختمان در برابر زمین‌لرزه یا به اختصار آیین‌نامه ۲۸۰۰ (BHRC, 1988) که در حال حاضر به عنوان ملاک اصلی در طراحی‌های لرزه‌ای در ایران استفاده می‌شود یکی از این هاست. کد لرزه‌ای ۲۸۰۰ علیرغم به روزرسانی در مفاد و بندهای موجود در آن، در خصوص نقشه پهنه‌بندی خطر، تغییرات چندانی را شاهد نبوده است. بر مبنای این استاندارد، شهر تهران در محدوده شتاب $0/35g$ و دشت تهران در محدوده $0/3g$ برای پریود PGA در دوره بازگشت ۴۷۵ ساله قرار می‌گیرد. این در حالی است که یافته‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد حداکثر شتاب زمین‌لرزه در بخش‌های یاد شده در محدوده‌ای بین $0/1$ تا $0/3g$ قرار دارد.

پروژه تحلیل خطر جهانی (GSHAP^۱) (با هدف تهیه نقشه‌های جامع زلزله‌شناسی در سطح جهانی در سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۲ (گارڈینی، ۱۹۹۹) آغاز به کار کرد و بعدها نسخه‌های به روز تر آن نیز منتشر شد (گارڈینی و همکاران، ۲۰۱۳). در اینجا مقادیر شتاب زمین‌لرزه در گستره شهر و دشت تهران از $0/2g$ در بخش‌های جنوبی تا $0/5g$ در بخش‌های شمالی متغیر است. پروژه تحلیل خطر خاور میانه (EMME^۲) (دانسیو و همکاران، ۲۰۱۸) که با هدف ارائه جدیدترین یافته‌های زلزله‌شناسی منطقه خاورمیانه آغاز به کار نمود، می‌توانست به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین داده‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه در منطقه به کار گرفته شود (زارع و همکاران، ۲۰۱۴). اما داده چشمه‌های لرزه‌زا، توسط محققین غیربومی کشور گردآوری شد و همین امر سبب گردید تا یافته‌های بربریان (بربریان و بیتز، ۲۰۱۶) مبنی بر حذف گسل‌های سه‌گانه جنوب تهران در این پروژه لحاظ نگردد. در نهایت نتایج به دست آمده نشان‌دهنده شتاب زمین‌لرزه $0/4$ تا $0/75g$ برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله در بخش‌های شهر و دشت تهران هستند.

به‌طور مشابه با بازنگری‌های انجام‌شده در مدل‌های خطر لرزه‌ای برای کلان‌شهرهایی مانند لس‌آنجلس، که در پروژه UCERF3 با هدف به‌روزرسانی گسل‌های مؤثر در تحلیل خطر انجام شد (فیلد و همکاران، ۲۰۱۴)، این پژوهش نیز به حذف ساختارهای زمین‌ساختی غیرفعال در منطقه تهران می‌پردازد. همچنین، استفاده از مدل‌های حرکت نیرومند زمین بر پایه پایگاه داده NGA-West2، مشابه با رویکرد توسعه‌یافته در مدل یانگ و همکاران (یانگ و همکاران، ۲۰۰۳)، موجب افزایش دقت برآورد شتاب در شرایط زمین‌شناختی متنوع تهران شده است (یانگ و همکاران، ۱۹۹۷). این هم‌راستایی با پروژه‌های جهانی، نشان‌دهنده ظرفیت الگوبرداری از این مطالعه برای مناطق مشابه در سطح بین‌المللی است.

یکی از معتبرترین و جدیدترین مطالعاتی که تاکنون با حضور محققین بین‌المللی نظیر پروفیسور یوسف بزرگنیا در کشور به‌منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه صورت گرفته، می‌توان به مطالعات قلی‌پور و همکاران (قلی‌پور و همکاران، ۲۰۰۸) اشاره نمود. شایان ذکر است بودجه یک میلیون دلاری برای این پروژه صرف شده است. فاز اول پروژه مذکور شامل گستره تهران و مناطق همجوار بود. فاز دو و سه نیز به‌ترتیب گستره خراسان و آذربایجان را شامل می‌شد. قرار بود تا سه فاز بعدی نیز در نیمه جنوبی کشور صورت پذیرد و در نهایت به یک بانک داده لرزه‌خیزی ملی دست یافته شود. با این حال پس از

¹ Global Seismic Hazard Assessment Program

² Earthquake Model of the Middle East

اتمام فاز اول، در تلاش برای اجرای سیاست بومی سازی، تیم محققین تغییر یافت و نرم افزار مربوطه نیز از Ez-Frisk به OpenQuake مبدل گردید. حتی در این شرایط نیز نتایج دو فاز بعدی تاکنون به طور رسمی منتشر نگردیده است. به هر جهت در اینجا نتایج فاز اول برای سه دوره بازگشت ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای گستره مورد مطالعه با نتایج تحقیق حاضر قیاس گردید. نکته مهم قبل از مقایسه عددی نتایج، مبحث سرعت موج برشی است. علیرغم آنکه در گزارش دو جلدی مربوط به این پروژه، به طور مفصل از نقشه سرعت موج برشی سخن به میان آمده است، با این حال در نقشه های خروجی مربوطه اثری از وجود چنین نقشه ای به چشم نمی خورد و شتاب زمین لرزه برای شرایط ساختگاه سنگی (سرعت موج برشی ۷۶۰ متر بر ثانیه) ارائه شده است. مطالعه قلی پور و همکاران (قلی پور و همکاران، ۲۰۰۸) برای منطقه شهری و دشت جنوب تهران به ترتیب مقادیر شتاب زمین لرزه را برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ g، برای دوره بازگشت ۹۷۵ سال بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ g و در نهایت برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال بین ۰/۴ تا ۰/۷ g ارائه می دهد. نتایج تحقیق حاضر برای دوره بازگشت های متناظر به ترتیب بین ۰/۱ تا ۰/۳ g، ۰/۱ تا ۰/۴ g و ۰/۲ تا ۰/۵ g متغیر است. بیشتر اختلاف عددی موجود مربوط به مدل نمودن گسل های شمال ری و کهریزک (جنوب ری مدل نشده است!!) می باشد که در تحقیق حاضر به عنوان عوارض مورفولوژیکی لحاظ و در محاسبات شتاب زمین لرزه وارد نشده اند. در صورتی که همین مقایسه بر روی گسل هایی نظیر مشاء یا رباط کریم انجام گردیده و همخوانی نزدیک به ۹۰٪ از خود نشان می دهد. همانطور که اشاره شد، یکی دیگر از تفاوت های نتایج این دو بررسی، مربوط به سرعت موج برشی است. از دیگر مطالعاتی که در گستره مورد مطالعه انجام شده، می توان به کار های حبیبی و همکاران (حبیبی و همکاران، ۲۰۲۳) اشاره نمود. در این مطالعه نیز نظیر مطالعه حاضر از نقشه سرعت موج برشی اصلاح شده برای تحلیل خطر زمین لرزه بهره گرفته شده است. نتایج این مطالعه برای پریود PGA و فاصله نقاط ۷۰۰ متر ارائه گردیده است. به طور کلی نتایج این تحقیق با مطالعات یاد شده، مطابقت قابل توجهی داشته و اختلاف عددی چندانی در شتاب دیده نمی شود. با این حال با توجه به لحاظ نمودن زمین لرزه های ماقبل تاریخ در پژوهش حاضر، در محور چشمه های لرزه زا، می توان اختلاف تا ۱۵٪ در مقدار شتاب (بیشتر) را مشاهده نمود.

نتایج مدل سازی نشان داد که در برخی نواحی جنوب شرقی تهران، مقدار شتاب طراحی (PGA) با استفاده از ساختار بهینه شده درخت منطقی، به میزان حدود ۰/۰۵ g کمتر از مدل های مرجع ملی برآورد شده است. بر اساس برآوردهای تجربی مهندسی سازه، این میزان کاهش در PGA منجر به حدود ۸ تا ۱۰ درصد کاهش در بارگذاری لرزه ای طراحی سازه ها خواهد شد (فما، ۲۰۱۲). در پروژه های متعارف مقاوم سازی، این تغییر می تواند به کاهش میانگین ۱۵۰ تا ۲۰۰ هزار تومان در هر مترمربع زیربنا منجر شود (ASCE, 2003). به عنوان نمونه، در یک سازه با زیربنای ۲۰۰۰ مترمربع، این مقدار معادل کاهش هزینه ای در حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلیون تومان خواهد بود. بنابراین، استفاده از مدل دقیق سازی شده خطر لرزه ای، می تواند نه تنها به طراحی ایمن تر، بلکه به بهینه سازی اقتصادی پروژه های ساخت و مقاوم سازی نیز منجر گردد.

هر چند که تحقیقات متنوعی با رویکرد بررسی و واکاوی گسل های تهران صورت گرفته و در این مطالعات پرتگاه های جنوب تهران با منشاء ژئومورفولوژیکی شناخته شده است (نظری و همکاران، ۲۰۱۰؛ بربریان، ۲۰۱۴؛ بربریان و بیتز، ۲۰۱۶؛ جراحی، ۲۰۲۱؛ ناوورنویری و همکاران، ۲۰۲۱؛ نظری و همکاران، ۲۰۲۱؛ جراحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ حبیبی و همکاران، ۲۰۲۳؛ جراحی، ۲۰۲۵؛ نامدار و همکاران، ۲۰۲۵)، با این حال در صورت مدل نمودن پرتگاه های ژئومورفولوژیکی شمال ری، جنوب ری و کهریزک به عنوان چشمه های لرزه زا (نظیر آنچه در گذشته صورت می گرفت) نتایج تحلیل ها مطابقت

کامل با داده‌های پیشین دارد. تنها اختلاف بیشتر مربوط به وارد نمودن داده‌های دیرینه لرزه‌شناسی در بخش زمین‌لرزه‌های ماقبل تاریخ می‌باشد.

نتیجه‌گیری

مدل پیشنهادی در این تحقیق، نه تنها به بهبود برآورد خطر لرزه‌ای در شهر تهران منجر شده، بلکه می‌تواند به عنوان الگویی برای بازنگری در مدل‌های لرزه‌ای کلان‌شهرهای مشابه با موقعیت ژئومورفولوژیک تهران مورد توجه قرار گیرد. شهرهایی همچون لاهور (پاکستان)، کابل (افغانستان) و سانتیاگو (شیلی) که در حاشیه کوهستان و در معرض گسل‌های فعال و غیرمستند قرار دارند، با چالش‌های مشابهی در مدل‌سازی خطر مواجه‌اند. پیاده‌سازی رویکردی مبتنی بر شناسایی ساختارهای فعال واقعی و حذف منابع نادرست، می‌تواند نقشی مهم در بهینه‌سازی کدهای طراحی لرزه‌ای و مدیریت ریسک در این مناطق ایفا کند. به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بازنگری در مفروضات زمین‌ساختی گذشته و حذف ساختارهای غیرفعال نظیر گسل‌های جنوب تهران (شمال ری، جنوب ری، کهریزک و اشتهارد) از مدل‌های خطر لرزه‌ای، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش عدم قطعیت‌های محاسباتی و افزایش دقت نقشه‌های شتاب دارد. تمرکز بر گسل‌های فعال با پشتوانه شواهد دیرینه‌لرزه‌شناسی، تحلیل‌های مورفوتکتونیک و شواهد باستان‌شناختی، منجر به ارائه مدل دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر برای تحلیل خطر در نواحی جنوبی تهران شده است. تأکید اصلی مطالعه حاضر بر نبود ماهیت گسلی برای پرتگاه‌های شمال ری، جنوب ری، کهریزک و اشتهارد است. با این حال ممکن است در آینده، طی مطالعات ژئوفیزیک، ژئورادار، دیرینه لرزه‌شناسی و ... گسل‌هایی در منطقه یافت شوند. چنین موضوعی تا زمان اثبات، قابل تأیید یا رد نیست. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نقشه‌های موجود از جمله آیین‌نامه ۲۸۰۰، پروژه GSHAP، مطالعات EMME و پروژه قلی‌پور و همکاران، ۲۰۰۸، نشان می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن شرایط ژئوتکنیکی واقعی و حذف گسل‌های غیرفعال، شتاب طراحی در برخی نواحی می‌تواند کاهش یا حتی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به مقادیر سنتی داشته باشد. از این رو، نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان مرجع مؤثر برای بازنگری در استانداردهای طراحی لرزه‌ای، برنامه‌ریزی‌های شهری و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی در نواحی پرریسک کلان‌شهر تهران به‌ویژه در بخش جنوبی آن مورد استفاده قرار گیرد. با وجود نتایج دقیق و به‌روز این پژوهش، همچنان محدودیت‌هایی مانند ناهمگونی کیفیت داده‌های ژئوتکنیکی و محدودیت‌های ذاتی تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی (PSHA) وجود دارد. همچنین، برخی پارامترهای کلیدی مانند نرخ لغزش و هندسه دقیق گسل‌ها با عدم قطعیت همراه هستند. در این میان، گسل‌های مشکوکی نظیر رباط‌کریم و بخش غربی گسل پیشوا، که درباره ماهیت زمین‌ساختی آن‌ها بین پژوهشگران اختلاف نظر جدی وجود دارد، نیازمند مطالعات دقیق دیرینه‌لرزه‌شناسی مشابه آنچه در جنوب و شرق تهران انجام شده است، می‌باشند. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با بهره‌گیری از داده‌های لرزه‌نگاری با وضوح بالاتر، مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی شرایط سایت، و سناریوهای وابسته به زمان، ارزیابی خطر لرزه‌ای در مناطق جنوبی تهران، حوضه ری و گسل‌های یادشده با دقت و اطمینان بیشتری انجام گیرد.

References

- Abdollahi, M., Mousavi, S.M., Khatib, M., Heihat, M.R. and Taslimi, M., 2025, Integrating the results of paleoseismological studies in the Tehran area, Pure and Applied Geophysics, Under review.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J. and Kamai, R., 2014, Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1025-1055.
- Alikhanzadeh, R. and Zafarani, H., 2023, Physics-based probabilistic seismic hazard analysis: the case of Tehran Basin in Iran. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(14): 6171-6214.
- Allen, M.B., Vincent, S.J., Alsop, G.I., Ismail-zadeh, I. and Flecker, R., 2003, Late Cenozoic deformation in the South Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics* 366: 223-239.
- Ambraseys, N.N. and Melville, C.P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge University Press, Cambridge, 1, 219 pp.
- ASCE, 2003, *Seismic evaluation of existing buildings*. American Society of Civil Engineers.
- Bachmanov, D., Trifonov, V.G., Hessami, K., Kozhurin, A., Ivanova, T.P., Rogozhin, E., Hademi, M.C. and Jamali, F., 2004, Active faults in the Zagros and Central Iran. *Tectonophysics*, 380: 221-241.
- Berberian, M., 1994, Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran, 1. *International Institute of Earthquake Engineers and Seismology*, 603 pp.
- Berberian, M., 2014, *Earthquake and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau; a Historical, Social, and Physical Approach*. Elsevier, 770 pp.
- Berberian, M. and Yeats, R.S., 2016, Tehran: An Earthquake Time Bomb; In *Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian's Forty-Five Years of Research Contributions*. The Geological Society of America, 1(Special Paper 525): 84.
- Berberian, M. and Yeats, R.S., 2016, Tehran: An Earthquake Time Bomb; In *Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia: In Honor of Manuel Berberian's Forty-Five Years of Research Contributions*. The Geological Society of America(Special Paper 525): 84.
- BHRC, B.a.H.R.C., 1988, *Iranian Seismic Resistant Design of Buildings*, National Standard No. 2800, Tehran, pp. 82.
- BHRC, B.a.H.R.C., 2014, *2800 Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*, Fourth Revision, Road, Housing and Urban Research Center, Tehran.
- Bolourchi, M.J., 1998, *Paleoseismology of South Eshtehard Fault*, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran, 133 pp.
- Boore, D., Stewart, J., Seyhan, E. and Atkinson, G., 2014, NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes*, 30: 1057-1085.
- Boostan, E., Tahernia, N. and Shafiee, A., 2015, Fuzzy probabilistic seismic hazard assessment, case study: Tehran region, Iran. *Natural Hazards*, 77(2): 525-541.
- Campbell, K.W. and 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.
- Chiou, B.S.-J. and 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.
- Danciu, L., Sesetyan, K., Demircioglu, M., Gulen, L., Zare, M., Basili, R., Elias, A., Adamia, S., Tsereteli, N., Yalçin, H., Utkucu, M., Khan, A., Sayab, M., Hessami, K., Rovida, A., Stucchi, M., Burg, J.-P., Karakhanian, A., Babayan, H. and Giardini, D., 2018, The 2014 Earthquake Model of the Middle East: seismogenic sources. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16.
- FEMA, 2012, *Seismic performance assessment of buildings*. Federal Emergency Management Agency, California, 313 pp.

- Field, E.H., Arrowsmith, R.J., Biasi, G.P., Bird, P., Dawson, T.E., Felzer, K.R., Jackson, D.D., Johnson, K.M., Jordan, T.H., Madden, C., Michael, A.J., Milner, K.R., Page, M.T., Parsons, T., Powers, P.M., Shaw, B.E., Thatcher, W.R., Weldon, R.J., II and Zeng, Y., 2014, Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 (UCERF3) The Time-Independent Model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3): 1122-1180.
- Gardener, J.K. and Knopoff, L., 1974, Is the Sequence of Earthquakes in Southern California with Aftershocks Removed, Poissonian. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64: 1363-1367.
- Gholipur, Y., Bozorgnia, Y., Rahnema, M., Berberian, M., Qureshi, M., Talebian, M., Nazari, H., ShojaTaheri, J. and Shafei, A., 2008, Probabilistic Seismic Hazard Analysis-Phase I, Greater Tehran Range, Optimization Research Group Engineering, Tehran University.
- Giardini, D., 1999, The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) - 1992/1999. *Annali de Geofisica*, 42: 957-974.
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Pinho, R., Valensise, G., Akkar, S., Arvidsson, R., Basili, R., Cameelbeeck, T., Campos-Costa, A., Douglas, J., Demircioglu, M.B., Erdik, M., Fonseca, J., Glavatovic, B., Lindholm, C., Makropoulos, K., Meletti, C., Musson, R., Pitalakis, K., Sesetyan, K., Stromeyer, D., Stucchi, M. and Rovida, A., 2013, Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource. SHARE.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1956, Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 46: 105-145.
- Habibi, R., Pourkermani, M., Ghorashi, M., Almasian, M. and Jarahi, H., 2023, The Effects of Quaternary Sediments on Earthquake Acceleration. *Himalayan Geology*, 44: 71-80.
- Hamzehloo, H., Vaccari, F. and Panza, G., 2007. Towards a reliable seismic microzonation in Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 93(1-2): 1-16.
- Hashemi, M., Alesheikh, A.A. and Zolfaghari, M.R., 2013, A spatio-temporal model for probabilistic seismic hazard zonation of Tehran. *Computers & geosciences*, 58: 8-18.
- Jalalalhosseini, S.M., Zafarani, H. and Zare, M., 2018, Time-dependent seismic hazard analysis for the Greater Tehran and surrounding areas. *Journal of Seismology*, 22(1): 187-215.
- Jarahi, H., 2021, Paleo Mega Lake of Rey Identification and Reconstruction of Quaternary Lake in Central Iran. *Open Quaternary*, 7(1): 1-15.
- Jarahi, H., 2021, Paleo Mega Lake of Rey Identification and Reconstruction of Quaternary Lake in Central Iran. *Open Quaternary*, 7(1): 1-15.
- Jarahi, H., 2023, The effect of climate change on people's lives, problems and solutions, A case study of Dosari city, Jiroft.
- Jarahi, H., 2025, Historical Background of Paleo Mega Lake of Rey. *History of Geology and Space Science*, 15(2): 12-24.
- Jarahi, H., Abdollahi, M., Aboutalebi, H. and Khosronezhad, A., 2025, Investigating the effects of active tectonics on rockfall susceptibility along the mountain sector of Chalus Highway. *Pure and Applied Geophysics*: 10.
- Jarahi, H., Khalesi, M., Afshari Pour, Y. and Khalesi, A., 2023, The effect of climate change on people's lives, problems, and solutions, A case study of Dosari city, Jiroft, The first crisis management event of strong Iran, Tehran.
- Jarahi, H., Moghimi, S., Tan, O., Saygılı, O. and Karagöz, O., 2022, Paleo Mega Lake of Rey Sediments and Its Effect on Earthquake Acceleration Case Study Tehran City,, SSA Annual Meeting 2022, Washington D.C., USA.
- Jarahi, H., Moghimi, S., Tan, O., Saygılı, O. and Karagöz, O., 2022, Revision of Iranian Seismic Design Code for Tehran Region Based on "Paleo Mega Lake of Rey" Theory, SSA Annual Meeting 2022, Washington D.C., USA.

- Jarahi, H. and Namdar, D., 2025, Urban-Scale Geographic Deaggregation of Seismic Hazard in Tehran Using Probabilistic Modeling. *Bulletin of Earthquake Engineering: PREPRINT (Version 1)* available at Research Square.
- Jarahi, H., Pourkermani, M., Akbarzadeh, R. and Farajpour, Z., 2022, The re-interpretation of Quaternary faults near Tehran, Based on Paleo Mega Lake of Rey Theory, SSA Annual Meeting 2022, Washington D.C., USA, pp. 7.
- Kamranzad, F., Memarian, H. and Zare, M., 2020, Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7): 430.
- Kaveh Firouz, A., Nazari, H., Arian, M., Shafei, A., Majidi, T. and Shokri, M., 2012, Paleoseismologic Activity and Subsidence Rate on Tehran Alluvium Deposits in Chitgar Section; using Paleoseismological Data. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 21(84): 169-178.
- Kijko, A., 2023, MATLAB code HA3 (Rev 3.7) Assessment of seismic hazard parameters.
- Krinitzsky, E.L., 1995. Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures. *Engineering geology*, 40(1-2): 1-7.
- Majidi Niri, T., Nazari, H., Qarashi, M. and Talebian, M., 2010, Paleoseimology study on Pishva fault (South Tehran), Iran, pp. 1511.
- Majidi Niri, T., Nazari, H., Qarashi, M. and Talebian, M., 2011, Paleoseimology study on Pishva fault (South Tehran), Iran, pp. 1511.
- Mohhamadi Vizheh, M. and Iranshahi, H., 2021, Total Magnetic Intensity Map of Eshtehard, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Momeni, S. and Madariaga, R., 2022, Long-term triggered seismicity on the Mosha fault by Damavand volcano, Iran: Implications on the seismic hazard of Tehran metropolis. *Frontiers in Earth Science*, 10: 945297.
- Najafian, A., Jarahi, H. and Bayraktutan, M.S., 2022, Challenges Facing Discovery of Largest Lake in World History Geotechnical Investigation, SSA Annual Meeting 2022, Washington D.C., USA.
- Namdar, D., Jarahi, H. and Maghami Moghim, G., 2025, Paleo Mega Lake of Rey, An Introduction to Water Level-Volume Changes Over Time from a Morphological Perspective, 7th International Conference of Biology and Earth Science, Hamadan, pp. 1-9.
- Namdar, D., Jarahi, H. and Maghami Moghim, G., 2025, Paleo Mega Lake of Rey, North Yazd Paleoshoreline Sedimentology, 9th Symposium of Sedimentological Society of Iran, Tabas, pp. 1-10.
- Navar Noveiri, M., 2021, South Eshtehard Scarp: a fault system or a morphologic scarp, *Institute of Earth Sciences, Tehran, Iran*, 178 pp.
- Navar Noveiri, M., Nazari, H., Shokri, M., Mohammadi Vjeh, M., Salamati, R. and Sheikh, M., 2021, South Eshtehard Scarp: a fault system or a morphologic scarp. *irquajrn*, 7(2): 798-820 (In Persian).
- Navvar Noveiri, M., Nazari, H., Shokri, M., Mohammadi Vjeh, M., Salamati, R. and Sheikh, M., 2021, South Eshtehard Scarp: a fault system or a morphologic scarp. *irquajrn*, 7(2): 798-820.
- Nazari, H., 2015, Analysis and Timing Synthesize of the Probable Earthquake in the Tehran Region: A Review to Paleoseismological Studies. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(1393): 263-273.
- Nazari, H., Battista, G., Najar, E., Ritz, J.F., Shokri, M., fathian, a., Rezaei, f., Rahim, A., nashli, H.F., Baharfirouzi, K., vahdatinasab, h., shahidi, a., borzooii, m. and Aghaali, E., 2021, The Iranian Plateau at the end of the Quaternary: new synthesis of geological, archaeological and historical data. *Iranian Journal of Geology*, 60(15): 101-116.
- Nazari, H., Jean-François, R., Rizza, M., Rizza, S., Mahan, S., Shokri, M.A., Michelot, J.-L., Massault, M., Foroutan, M. and Zarei, S., 2024, The Qumis Earthquake of 856 CE: A Review of Paleoseismological Studies of the Astaneh Fault System, Central Alborz. *Journal of Archaeological Studies*, 16(1): 299-328.

- Nazari, H., Ritz, J.-F., Salamati, R., Shafei, A., Ghassemi, A., Michelot, J., Massault, M. and Ghorashi, M., 2009, Morphological and palaeoseismological analysis along the Taleghan fault (Central Alborz, Iran). *Geophysical Journal International - GEOPHYS J INT*, 178(2): 1028-1041.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Salamati, R., Shahidi, A., Habibi, H., Ghorashi, M. and Karimi Bavanpur, A., 2010, Distinguishing between fault scarps and shorelines: the question of the nature of the Kahrizak, North Rey and South Rey features in the Tehran plain (Iran). *Terra Nova*, 22(3): 227-237.
- Nazari, H., Ritz, J., Salamati, R., Solaymani, S., Balescu, S., Michelot, J., Ghassemi, A., Talebian, M., Lamothe, M. and Massault, M., 2007, Paleoseismological analysis in central Alborz, Iran, 50th Anniversary earthquake conference commemorating the.
- Petersen, M., Moschetti, M., Powers, P., Mueller, C., Haller, K., Frankel, A., Zeng, Y., Rezaeian, S., Harmsen, S., Boyd, O., Field, N., Chen, R., Rukstales, K., Luco, N., Wheeler, R., Williams, R. and Olsen, A., 2014, Documentation for the 2014 Update of the United States National Seismic Hazard Maps, Reston, VA.
- Petersen, M.D., Frankel, A.D., Harmsen, S.C., Mueller, C.S., Haller, K.M., Wheeler, R.L., Wesson, R.L., Zeng, Y., Boyd, O.S., Perkins, D.M., Luco, N., Field, E.H., Wills, C.J. and Rukstales, K.S., 2008, Documentation for the 2008 update of the United States National Seismic Hazard Maps. 2008-1128, Reston, VA.
- Ritz, J. F., Balescu, S., Soleymani, S., Abbassi, M., Nazari, H., Feghhi, K., Shabaniyan, E., Tabassi, H., Farbod, Y., Lamothe, M., Michelot, J.L., Massault, M., Chery, J. and Vernant, P., 2003, Determining the Long-term Slip Rate along the Mosha Fault, Central Alborz, Iran, Implications in Terms of Seismic Activity, Fourth International Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M. and Saidi, A., 2012, Paleoeearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran). *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 117(B6305).
- Ritz, J. F., Walker, R., Alimohammadian, H., Salamati, R., Shahidi, A., Patnaik, R. and Talebian, M., 2009, Chronology of last earthquake on Firouzkuh Fault using by C14. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 19(76): 95-98.
- Ritz, J.F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A. and Solaymani, S., 2006, Active transtension inside Central Alborz: A new insight in to the northern Iran – Southern Caspian geodynamics. *Geology*, 34 (6): 477-480.
- Sheikholeslami, M.R., Javadi, H.R., Assadi Sarshar, M., Agha Hoseini, A., Kouhpeyma, M. and Vahdati Daneshmend, B., 2014, Iran Faults Encyclopedia, 1. Research Institue of Earth Science, Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran, 600 pp.
- Shoja-Taheri, J., Nnaserieh, S. and Hadi, G., 2010. A Test of the Applicability of NGA Models to the Strong Ground-Motion Data in the Iranian Plateau. *Journal of Earthquake Engineering*, 14: 278-292.
- Solaymani Azad, S., Feghhi, K., Shabaniyan, E., Abbassi, M. and Ritz, J. F., 2003, Preliminary results of paleoseismological investigations along the Mosha fault in the Mosha Valley. *BSEE*: 89.
- Stepp, J., 1972, Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard, Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonazion, Seattle, pp. 897-910.
- Wang, J. and Taheri, H., 2014, Seismic hazard assessment of the Tehran region. *Natural Hazards Review*, 15(2): 121-127.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.
- Yazdani, A. and Kowsari, M., 2017, A probabilistic procedure for scenario-based seismic hazard maps of Greater Tehran. *Engineering Geology*, 218: 162-172.

- Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Silva, W.J. and Humphrey, J.R., 1997, Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1): 58-73.
- Zafarani, H., Hassani, B. and Ansari, A., 2012, Estimation of earthquake parameters in the Alborz seismic zone, Iran using generalized inversion method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42: 197-218.
- Zare, M., Amini, H., Yazdi, P., Sesetyan, K., Demircioglu, M.B., Kalafat, D., Erdik, M., Giardini, D., Asif Khan, M. and Tsereteli, N., 2014, Recent developments of the Middle East catalog. *Journal of Seismology*, 18(4): 749-772.