

شبیه‌سازی سناریوهای محتمل رخداد زمین‌لرزه در تهران

مقداد سمائی^{۱*}، امیر برزگری^۲، محمدرضا قویمی‌پناه^۲، فرهاد جعفری^۳ و ابوالفضل سامی^۴

^۱پژوهشگر پسا دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه گیفو، گیفو، ژاپن

^۲دکترا، دانشکده علوم پایه، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳دانشجوی دکترا، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

^۴کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱

چکیده

شهر تهران با ترکیبی از جمعیت زیاد، گسل‌های فعال، شواهد زمین‌لرزه‌های تاریخی و آسیب پذیری سازه‌های ساخته شده در آن، ریسک بالایی در برابر زمین‌لرزه دارد. در مطالعه حاضر، با توجه به گزارش‌ها و مقالات زمین‌شناسی منتشر شده در دهه‌ی گذشته، ۳ سناریوی زمین‌لرزه برای گسیختگی گسل‌های مشا، نیاوران و پارچین در نظر گرفته و شتاب‌نگاشت‌هایی در شهر تهران شبیه‌سازی شده است. از روش تصادفی چشمه نقطه‌ای با اصلاح متغیر فاصله برای در نظر گرفتن اثرات هندسه گسیختگی استفاده و همچنین نتایج مطالعات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در سال‌های اخیر در مورد بزرگنمایی ساختگاه در تهران برای در نظر گرفتن اثرات ساختگاهی به کار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده شتاب بیشینه قابل توجه در شمال تهران برای گسل نیاوران و گسل پارچین در جنوب تهران است؛ همچنین متوسط شدت زمین‌لرزه مرکالی برای این دو سناریو به ترتیب در سه منطقه و یک منطقه شهری تهران برابر با ۹ است که نشان از خرابی و خسارت زیاد در آن مناطق دارد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، یک برآورد اولیه از تلفات ناشی از سناریوهای مفروض گسیختگی صورت گرفته است. تعداد تلفات جانی (مرگ‌ومیر) ناشی از سناریوهای گسیختگی گسل‌های مشا، نیاوران و پارچین بنا بر این برآورد به ترتیب برابر با حدود ۵۰۰۰، ۱۱۷۰۰۰ و ۸۵۰۰۰ نفر خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، آسیب‌پذیری لرزه‌ای، برآورد تلفات، لرزه‌خیزی تهران.

E-mail: meghdad.samaei@gmail.com

*نویسنده مسئول: مقداد سمائی

۱- پیش‌نوشتار

شهر تهران از پرجمعیت‌ترین شهرهای در معرض خطر زمین‌لرزه است. این شهر در کوهپایه رشته‌کوه البرز قرار گرفته و بخش کوچکی از منطقه‌ی وسیعی است که به عنوان کمربند لرزه‌خیز آلپ- هیمالایا شناخته می‌شود. این شهر پس از زمین‌لرزه ۱۱۷۷ میلادی (با بزرگی گشتاوری حدود ۷/۲) ساخته شده است که شهر تاریخی ری (ریگا) را به کلی ویران کرد. زمین‌لرزه ۱۱۷۷ میلادی یکی از چندین زمین‌لرزه‌های سترگی است که سبب ویرانی در این منطقه شده است؛ از جمله این زمین‌لرزه‌ها می‌توان به زمین‌لرزه‌های ۲۸۰-۳۱۲ پیش از میلاد با بزرگی ۷/۶، ۸۵۵ میلادی با بزرگی ۷/۱، ۹۵۸ میلادی با بزرگی ۷/۷ و ۱۸۳۰ میلادی با بزرگی ۷/۱ اشاره کرد (Berberian, 1994; Ritz et al., 2012). در نتیجه رخداد زمین‌لرزه در آینده‌ای نه چندان دور بر پایه فعالیت گسل‌های پیرامون تهران دور از ذهن نیست و داشتن برآوردی از سطوح لرزش و نیز تلفات ناشی از آن ضروری به نظر می‌رسد.

در مطالعه حاضر، به وسیله شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین ناشی از زمین‌لرزه احتمالی به سبب گسیختگی گسل‌های مشا، نیاوران و پارچین تحلیل خطر تعیینی زمین‌لرزه انجام شده است. با توجه به مباحثی که در ادامه خواهد آمد، سه گسل یاد شده خطرناک‌ترین گسل‌ها تشخیص داده شده‌اند و گسیختگی آنها، سه سناریوی زمین‌لرزه را در مطالعه حاضر تشکیل می‌دهد. در مورد گسل شمال تهران، بر عکس آنچه پیش‌تر تصور می‌شد، این گسل (با دست کم بیشتر آن) در مرز کوه و دشت در گروه گسل‌های جنبنا قرار نمی‌گیرد (نظری، ۱۳۹۳). به نظر می‌آید فعالیت این گسل کهن و غیر فعال به شاخه‌های جنوبی‌تری همانند گسل میلاد انتقال یافته باشد (شکل ۱). افزون بر موارد یاد شده، مطالعات GPS نیز نتوانسته‌اند نرخ کوتاه‌شدگی مطمئنی را روی گسل شمال تهران در نواحی خاوری آن (با فرض سازوکار وارون) پیدا کنند (جمور و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به این شواهد، در مطالعه حاضر، سناریویی به گسیختگی «گسل شمال تهران» اختصاص نیافته است. ولی به هر حال باید توجه داشت که گسل شمال تهران سال‌ها به عنوان مهم‌ترین گسل لرزه‌زا در محدوده شهر تهران معرفی شده (بربریان و همکاران ۱۳۷۱) و بر آن اساس تحلیل‌های مختلف

خطر لرزه‌ای ارائه شده است (Gholipour et al., 2008). نظری (۱۳۹۳) بحث می‌کند که اگر چه گسل یاد شده به‌طور کلاسیک در گروه گسل‌های جنبنا قرار نمی‌گیرد و گسیختگی سطحی در زمین‌لرزه احتمالی آینده روی شاخه‌های پیشرونده جنوبی آن یا روی گسل‌های نیاوران و محمودیه خواهد بود؛ اما گسیختگی پایانی روی گسل شمال تهران رخ خواهد داد. در مطالعه ای (Zafarani et al. (2013) به شبیه‌سازی زمین‌لرزه بر پایه گسیختگی این گسل پرداخته‌اند؛ که نتایج آن مطالعه، قابل مقایسه با نتایج حاصل از سناریوی گسیختگی گسل نیاوران در مطالعه حاضر است. همچنین بنا بر مطالعات اخیر مانند نظری و همکاران (۱۳۸۸) و (Nazari et al. (2010) به نظر می‌رسد گسل‌های کهریزک و شمال و جنوب ری بیش از آنکه گسل‌های لرزه‌خیز باشند، خطواره‌ای به جای مانده از دریایی دیرینه هستند که منطقه دشت کویر را می‌پوشانده است. در مطالعات مورد اشاره دلالی که برای این مطلب گفته می‌شود به قرار زیر است:

- متناسب بودن این خطواره‌ها با خطوط تراز دریای کهن به سوی خاور.
- مسطح بودن بالادست و پایین‌دست.
- تغییر شکل نیافتن جویبارها در دو سوی خطواره.
- افقی و بدون تغییر شکل بودن نهشته‌ها.

افزون بر آن، در ترانشه‌های حفر شده نیز هیچ اثری از گسل‌هایی که نهشته‌های هولوسن را قطع کنند یافت نشده است.

در مورد اهمیت گسل نیاوران، (Abbassi and Farbod (2009) توانستند با ترکیب ریخت‌شناسی گسل با نقشه‌های کوآترنری و ویژگی‌های زیر را برای گسل بیان کنند:

- گسل نیاوران شیب لغز، با زاویه زیاد و شیب آن به سوی شمال است و در پلان به حالت پلکانی دیده می‌شود. در گذشته این گسل حرکتی عمودی (وارون) داشته اما در حال حاضر سازوکار گسلی آن امتدادلغز چپ‌گرد چیره است.
- این گسل با طولی در حدود ۴۵ کیلومتر، طولانی‌تر از آنست که توسط مطالعات پیش بیان شده بود. به وسیله نقشه‌برداری دقیق این گسل در خاور تا گسل مشا امتداد می‌یابد.

این گسل نهشته‌های هولوسن را قطع می‌کند که این دلیلی محکم بر فعالیت آن در عهد حاضر است.

با توجه به موارد یاد شده، سه سناریوی زمین‌لرزه در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر، ناشی از گسیختگی گسل‌های مشا، نیاوران و پارچین خواهد بود. بدیهی است سناریوهای دیگر زمین‌لرزه، با شدت لرزش و در نتیجه تلفات کمتر می‌تواند ناشی از گسیختگی گسل‌های میلاد، محمودیه، شاخه باختری گسل شمال تهران و غیره باشند. در مقاله پیش رو پس از تعیین ژرفای لرزه‌زا، با استفاده از هندسه گسل‌ها و روابط تجربی میان متغیرهای گسیختگی و بزرگی زمین‌لرزه، برای هر سناریوی گسیختگی، بزرگای گشتاوری مربوطه برآورد می‌شود. سپس با ترکیب اطلاعاتی مانند بزرگای گشتاوری برای هر سناریو، هندسه گسل، مطالعات انجام شده در زمینه بزرگمایی ساختگاه در تهران، مطالعات کاهیدگی و طیف چشمه زمین‌لرزه‌های منطقه و استفاده از ابزاری به نام شبیه‌سازی تصادفی جنبش نیرومند زمین (Boore, 1983; 2003; 2009)، مجموعه شتابنگاشت‌هایی در سطح شهر تهران شبیه‌سازی شده است. از متغیرهای پیشینه این شتابنگاشت‌ها استفاده شده است تا با توجه به اطلاعات جمعیتی و سازه‌های موجود در شهر، برآوردی اولیه از تلفات ناشی از سناریوهای مفروض به دست بیاید. مطالعه حاضر تلاشی است در راستای به‌روزرسانی گزارشی مانند (JICA, 2000) در زمینه برآورد تلفات ناشی از زمین‌لرزه‌های آینده در تهران، با توجه افزایش دانش از روندهای فعال در پیرامون تهران و نیز تغییرات سازه‌های موجود در شهر.

۲- ژرفای لرزه‌زا در منطقه

ژرفای لرزه‌زا در منطقه برای تعیین هندسه گسل به کار می‌رود. وجود ژرفای لرزه‌زا از این حقیقت سرچشمه می‌گیرد که زمین‌لرزه‌های رخ داده در هر منطقه خاص در ژرفاهای مشخصی در زمین رخ می‌دهند. در زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای زمین (مانند ایران) این ژرفا معمولاً محدود به ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر است؛ در حالی که در زمین‌لرزه‌های مناطق فرورانش این ژرفا می‌تواند به حدود ۷۰۰ کیلومتر هم برسد (Shearer, 2009). به منظور تعیین ژرفای لرزه‌زا، از پایگاه اینترنتی مرکز لرزه‌نگاری کشوری همه زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه از سال ۲۰۰۶ تاکنون گردآوری شده است. در کاتالوگ گردآوری شده به دلیل وجود این نگرانی که رویدادهای خیلی کوچک مربوط به انفجار باشند، رویدادهای کوچک‌تر از ۲ در نظر گرفته نشده‌اند تا احتمال وجود انفجار در این رویدادها کمتر باشد. کاتالوگ حاصل متشکل از ۹۹۹ رویداد با بزرگی‌های ۲ تا ۴/۷ است که در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نمودار ستونی توزیع ژرفای این زمین‌لرزه‌ها در شکل ۳، دیده می‌شود که ۹۰ درصد داده‌ها (درصد تجمعی ۵ تا ۹۵) در ژرفای ۲ تا ۲۴ کیلومتری قرار می‌گیرند. در نتیجه این بازه به عنوان ژرفای لرزه‌زا در منطقه در نظر گرفته می‌شود.

باید توجه کرد که در تعیین ژرفای زمین‌لرزه‌ها مقداری عدم قطعیت وجود دارد. این عدم قطعیت می‌تواند هنگامی که برای تعیین ژرفای زمین‌لرزه از ایستگاه‌های دور از رومرکز استفاده می‌شود، تا ده‌ها کیلومتر باشد (Jackson, 2001). ولی با توجه به وجود تعداد قابل توجهی از ایستگاه‌های شبکه لرزه‌شناسی کشوری در پیرامون تهران این نگرانی کمتر است. در ضمن استفاده از زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۲ سبب می‌شود که زمین‌لرزه‌ها در تعداد ایستگاه‌های بیشتری ثبت و بدین ترتیب عدم قطعیت در مورد ژرفا کمتر شود. نمودار ستونی شکل ۳ و نیز توزیع رویدادها (شکل ۲) کاملاً مطابق با نتایج مطالعات دقیق تری است که هدف آنها بررسی لرزه‌خیزی در منطقه بوده است (یمینی‌فرد و همکاران (۱۳۸۸)؛ تاتار و همکاران (۱۳۹۳)؛ Ashtari et al., 2005; Tatar et al., 2012). به منظور برآورد دقیق ژرفای زمین‌لرزه‌ها روی گسل مشا، Tatar et al. (2012) از شبکه‌ای فشرده استفاده کردند و معیار عدم قطعیت را ۳ کیلومتر در نظر گرفتند.

۳- سناریوهای مفروض

با توجه به آنچه که در پیش نوشتار گفته شد و در نظر گرفتن شکل ۱، که بر هم نهی

مطالعات بسیاری است که تا به حال در مورد بود یا نبود و جنبایی یا عدم جنبایی گسل‌ها در پیرامون تهران انجام شده، سه سناریو برای گسیختگی این گسل‌ها در نظر گرفته شده است. گسل نیاوران طولانی‌ترین گسلی است که بخشی از آن به درون شهر امتداد می‌یابد؛ در ضمن با توجه به اینکه همه طول آن در یک راستاست، می‌تواند مهم‌ترین سناریو زمین‌لرزه برای تهران باشد. در جنوب شهر با توجه به اینکه افزای‌های شمال و جنوب ری و کهریزک پرتگاه‌های گسلی نیستند، گسل پارچین می‌تواند مهم‌ترین خطر لرزه‌ای برای جنوب شهر تشخیص داده شود. گفتنی است که در گزارش آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (JICA, 2000)، بیشترین تلفات برآورد شده (در حدود ۴۰۰ هزار نفر) مربوط به سناریوی گسیختگی «گسل» ری است. در آخر، گسل مشا گرچه با فاصله‌ای نسبی از شهر قرار گرفته، اما با توجه به طول زیاد آن و شواهد محکمی که برای جنبایی آن هم از دید زمین‌ساختی (Landgraf et al., 2009; Ritz et al., 2003; Solaymani Azad et al., 2011) و هم از دید لرزه‌خیزی (Tatar et al., 2012) موجود است، گسیختگی این چشمه لرزه‌ای نیز به عنوان یکی از سناریوهای مهم در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱. گسل مشا

گسیختگی بخش میانی گسل مشا که فعال‌ترین بخش این گسل است (Tatar et al., 2012) به عنوان یک سناریوی گسیختگی در نظر گرفته شده است. موقعیت این گسل کاملاً شناخته شده و در همه نقشه‌های زمین‌شناسی و مقالات مربوط به زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی البرز دیده می‌شود. طول این بخش از گسل در حدود ۷۸ کیلومتر است. شیب گسل با توجه به مطالعات (Tatar et al., 2012)، ۷۰ درجه در نظر گرفته شده است. با منظور کردن این شیب و ژرفای لرزه‌زا که در بخش دوم این مقاله برآورد شده است، عرض گسل برابر با ۲۳ کیلومتر به دست می‌آید. با داشتن مساحت گسیختگی و استفاده از روابط تجربی (Wells and Coppersmith, 1994) بزرگی گشتاوری حاصل از این سناریوی گسیختگی برابر با ۷/۳ خواهد بود.

۳-۲. گسل نیاوران

گسیختگی همه طول گسل نیاوران با طول حدود ۴۵ کیلومتر بنا به گزارش (Abbassi and Farbod, 2009) سناریوی این گسل را تشکیل می‌دهد. موقعیت این گسل و همچنین شیب آن نیز از مطالعه یاد شده برگرفته شده است. با منظور کردن این شیب و ژرفای لرزه‌زا و استفاده از روابط تجربی (Wells and Coppersmith, 1994) بزرگی گشتاوری حاصل از این سناریوی گسیختگی برابر با ۷/۰ به دست خواهد آمد.

۳-۳. گسل پارچین

با توجه به اینکه گسل پارچین در منطقه دشت جای گرفته و دارای پوشش است، مطالعات انجام شده روی این گسل بسیار محدود است. گسیختگی همه طول گسل پارچین با طول حدود ۲۷ کیلومتر، سناریوی این گسل را تشکیل می‌دهد. موقعیت این گسل و همچنین شیب آن از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی کشوری و برش‌های مربوط، برگرفته شده است. با منظور کردن این شیب و ژرفای لرزه‌زا و استفاده از روابط تجربی (Wells and Coppersmith, 1994) بزرگی گشتاوری حاصل از این سناریوی گسیختگی برابر با ۶/۹ خواهد بود. متغیرهای مربوط به هر یک از گسل‌ها در جدول ۱ به نمایش در آمده است.

۴- شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی

در مطالعه حاضر، از شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی (کاتوره‌ای) استفاده شده تا شتابنگاشت‌هایی در شهر تهران ایجاد شود. این روش، راهکاری ساده اما قدرتمند است که توسط دیوید بور طی چند دهه گذشته ارائه شده و گسترش یافته است (Boore, 1983; 2003; 2009). برای استفاده از روش تصادفی می‌توان دو راهکار را مد نظر قرار داد یکی راهکار چشمه نقطه‌ای و دیگری راهکار گسل محدود. این دو راهکار به ترتیب در دو مقاله سمائی و همکاران (۱۳۹۳ الف و ب) با در نظر گرفتن به‌روزرسانی‌های مربوطه به‌طور اجمالی مرور شده است؛ همچنین زعفرانی و نورزاد (۱۳۹۳) در

راهکار برای هر «یک» شبیه‌سازی به دو علت خواهد بود: (۱) نقاط شروع گسیختگی؛ (۲) توزیع ناهمگون لغزش روی گسل یا به عبارتی وجود اسپریتی‌ها (Asperities)؛ برای نمونه در شبیه‌سازی‌های Samaei et al. (2012) صرف تغییر در نقاط شروع گسیختگی سبب تغییر شتاب بیشینه تا حدود ۲۰ درصد شده است. متأسفانه این دو مورد بسیار مهم یعنی نقاط شروع گسیختگی و محل اسپریتی‌ها در زمین‌لرزه‌های آینده مجهولند؛ در نتیجه راهکار گسل محدود برتری خود را به راهکار چشمه نقطه‌ای از دست می‌دهد و سادگی راهکار چشمه نقطه‌ای به نقطه قوت آن تبدیل می‌شود. در نتیجه در مطالعه حاضر از راهکار چشمه نقطه‌ای استفاده شده است.

۵- متغیرهای ورودی

متغیرهای کلی شبیه‌سازی که برای تولید شتابنگاشت برای هر سه سناریو مشابه است، به شرح زیر هستند:

مدل چشمه استفاده شده مدل ω^2 با یک بسامد گوشه یا همان مدل برون است (Brune, 1970; Brune, 1971). این مدل همخوانی بسیار خوبی برای زمین‌لرزه‌ها در مناطق مختلف جهان (Chen and Atkinson, 2002) و ایران داشته است (Motazedian, 2006; Hassani et al., 2011; Zafarani et al., 2012;) (Samaei et al., 2013; Samaei and Miyajima, 2016). متغیر استفاده شده در این مدل، افت تنش ($\Delta\sigma$) است. در مطالعه حاضر از میانگین مقادیر پیشنهادی افت تنش برای زمین‌لرزه‌های منطقه البرز بر پایه Motazedian (2006) و Zafarani et al. (2012) یعنی ($\Delta\sigma=130$ bar) استفاده می‌شود.

مسیر دارای دو متغیر $Z(R)$ و $Q(f)$ است که به شکل‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند (Motazedian, 2006):

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{1}{R} & R \leq 70 \text{ km} \\ R^{0.2} & 70 < R < 150 \\ \left(\frac{1}{R}\right)^{0.1} & R > 150 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q(f) = 1 & f \leq 1 \\ Q(f) = 87f^{1.47} & f > 1 \end{cases} \quad (6)$$

در مورد بزرگنمایی ساختگاه در تهران در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده که خلاصه آن مطالعات را به نوعی می‌توان در مقاله Shafiee and Azadi (2007) یا به طور مشابه گزارش تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ای تهران بزرگ (Gholipour et al., 2008) یافت (Yaghmaei-Sabegh and Lam, 2010). در مطالعه Shafiee and Azadi (2007) از اندازه‌گیری سرعت موج برشی در ۳۰ متر ابتدایی لایه‌های خاک در ۱۸۸ گمانه در سطح شهر تهران استفاده و ویژگی‌های خاک در این شهر به چهار نوع دسته بندی شده است. برای این تقسیم بندی از انواع ساختگاه معرفی شده توسط آیین‌نامه NEHRP استفاده شده است. این آیین‌نامه بر پایه میانگین سرعت برشی در ۳۰ متر ابتدایی (V_{s30})، ساختگاه‌ها را به ۵ نوع دسته بندی می‌کند. گفتنی است که این نوع تقسیم بندی بسیار مشابه با تقسیم بندی آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زمین لرزه (استاندارد ۲۸۰۰) است (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳؛ جدول ۲). بر پایه نتایج منتشر شده توسط Shafiee and Azadi (2007)، مناطق کوهستانی در تهران و پیرامون آن در دسته‌های A و B و منطقه دشت تهران در دسته‌های C و D بنا به تقسیم بندی NEHRP قرار می‌گیرند (شکل ۵). به منظور استفاده از نتایج این مطالعات برای شبیه‌سازی زمین لرزه در تهران از منحنی‌های ارائه شده توسط (Atkinson and Joyner, 1997) استفاده شده است. ایشان با استفاده از روش $quarer-wavelength$ بزرگنمایی ساختگاه (بدون در نظر گرفتن میرایی) را برای انواع مختلف خاک در کالیفرنیا به دست آوردند. این منحنی‌ها مناسب برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی هستند، یعنی همان $A(f)$ در معادله ۴. با ترکیب این منحنی‌ها با تابع تضعیف که شامل متغیر κ_0 است، می‌توان منحنی اثر ساختگاه را به

کتابی جامع به تشریح روش تصادفی و نیز دیگر روش‌های شبیه‌سازی زمین لرزه پرداخته‌اند.

اساس روش بر این است که با داشتن طیف فوریه جنبش نیرومند زمین در یک نقطه، دست‌یابی به نگاشت زمین لرزه در آن نقطه با ترکیب طیف دامنه فوریه مورد نظر با فازهای تصادفی امکان پذیر است. این طیف فوریه دارای یک مدل لرزه‌شناسی به ترتیب زیر است:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \times P(R, f) \times G(f) \quad (1)$$

که در آن، Y طیف فوریه شتاب، E اثر چشمه، P اثر مسیر، G اثر ساختگاه، M_0 گشتاور لرزه‌ای، R فاصله چشمه تا ساختگاه و f بسامد است. اثر چشمه برابر است با:

$$E(M_0, f) = CM_0(2\pi f)^2 / [1 + (f_0/f)^2] \quad (2)$$

که در آن، C ضریب ثابت و f_0 بسامد گوشه (مرتبط با متغیر تنش $\Delta\sigma$) است.

اثر مسیر برابر است با:

$$P(R, f) = Z(R) \exp(-\pi f R / Q(f) \beta) \quad (3)$$

که در آن، $Z(R)$ توزیع هندسی، $Q(f)$ فاکتور کیفیت سیر امواج و β سرعت امواج برشی در پوسته است.

و در پایان اثر ساختگاه برابر است با:

$$G(f) = A(f) \exp(-\pi \kappa_0 f) \quad (4)$$

که $A(f)$ بزرگنمایی ساختگاه و κ_0 متغیر تضعیف در بسامدهای بالاست.

در شکل ۴، روند شبیه‌سازی به روش تصادفی به صورت نمادین نمایش داده شده است.

در این مقاله از راهکار چشمه نقطه‌ای برای شبیه‌سازی زمین لرزه احتمالی آینده در شهر تهران استفاده شده است. در این راهکار چشمه زمین لرزه به صورت یک نقطه فرض می‌شود و از این نظر برای زمین لرزه‌های بزرگ با سطوح گسیختگی گسترده تنها در فواصل دور قابل کاربرد است. ولی با اصلاحاتی در تعریف فاصله، از این روش می‌توان در نزدیکی صفحات گسیختگی زمین لرزه‌های بزرگ نیز استفاده کرد (Atkinson and Silva, 2000; Boore, 2009; Boore and Thompson, 2015;) (Yenier and Atkinson, 2014). به عبارت دیگر، به جای استفاده از فاصله کانونی (Rhypos) یا فاصله تا صفحه گسیختگی (Rrup) یا انواع دیگری از تعاریف فاصله، با توجه به هندسه گسل و موقعیت آن نسبت به ساختگاه یک فاصله مؤثر (Reff) به دست آمده است؛ به ترتیبی که نتایج شبیه‌سازی به روش چشمه نقطه‌ای مشابه با نتایج شبیه‌سازی به روش گسل محدود باشد. برای آگاهی از جزئیات محاسبه (Reff) به (Boore, 2009) مراجعه شود. در مطالعه حاضر از درایور $tms_ff_td_drv$ از مجموعه کدهای SMSIM (Boore, 2005) استفاده می‌شود که در این درایور، با استفاده از هندسه گسل، فاصله مؤثر (Reff) به دست می‌آید و با استفاده از این فاصله شتابنگاشت مصنوعی تولید می‌شود.

ممکن است این سوال پیش بیاید که چرا در این مطالعه از راهکار گسل محدود به جای راهکار چشمه نقطه‌ای استفاده نشده است؟ در ابتدا باید گفت که راهکار گسل محدود بر این پایه مبتنی است که سطح گسل به سطوح کوچکی تقسیم شده و به هر قطعه یک رویداد (زمین لرزه) کوچک اختصاص داده می‌شود. تجمع رویدادهای کوچک در محل ساختگاه نماینده رویداد بزرگ یا پایانی خواهد بود. برای اولین بار (Beresnev and Atkinson, 1997 and 1998) ایده استفاده از روش تصادفی برای تولید رویدادهای کوچک را ارائه دادند. سپس اصلاحاتی در این روش ابتدا به وسیله (Motazedian and Atkinson, 2005) و سپس (Boore, 2009) انجام شد. این راهکار هنوز نیز در حال به‌روزرسانی است (Atkinson and Assatourians, 2015;) (Crane and Motazedian, 2014) و کاربردهای بسیاری از جمله گسترش روابط پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین دارد (Atkinson and Boore, 2006;) (Hamzehloo and Mahood, 2012; Yazdani and Kowsari, 2013). تعریف فاصله مؤثر (Reff) در راهکار چشمه نقطه‌ای، نتایج حاصل با میانگینی از مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها در راهکار گسل محدود برابر خواهد بود. تفاوت نتایج دو

و ترکیه است (Kale et al., 2015) که معادلات مربوط به ایران آن در نظر گرفته شده‌اند. به منظور این مقایسه، شبیه‌سازی برای گسل نیاوران در ۸ جهت مختلف و در فواصل ۰ تا ۴۰۰ کیلومتر از تصویر خط بالایی گسل بر سطح زمین انجام شده؛ همچنین ساختگاه با V_{30} برابر با ۶۲۰ متر بر ثانیه فرض شده است. در شکل ۱۳ مقدار طیف پاسخ شبه شتاب نتایج شبیه‌سازی در زمان تناوب ۰/۲ و ۱ ثانیه با مقدار طیف شبه شتاب روابط تجربی یاد شده مقایسه شده است. معیار فاصله در این شکل‌ها فاصله Joyner and Boore (1981) است. در این دو شکل همخوانی قابل قبولی میان نتایج شبیه‌سازی با روابط تجربی دیده می‌شود هر چند که در فواصل دور تفاوت‌هایی به ویژه در دوره‌های کوتاه‌تر دیده می‌شود؛ این مسئله به متغیرهای مسیر مورد استفاده برای (Motazedian, 2006) برمی‌گردد. برای مقایسه جامع متغیرهای مسیر توسعه یافته برای ایران به (Samaei et al., 2016a) مراجعه شود.

همچنین در شکل ۱۴ یک شتابنگاشت شبیه‌سازی شده به همراه طیف پاسخ شبه شتاب آن دیده می‌شود. صرف نظر از وجود تغییرات در طیف پاسخ شتابنگاشت شبیه‌سازی شده (با توجه به وجود تنها یک شبیه‌سازی)، این طیف نیز در همه زمان‌های تناوب طبیعی تطابق خوبی با طیف پیش‌بینی شده از روابط تجربی دارد. همان‌گونه که در پیش‌نشار اشاره شد، (Zafarani et al., 2013) به شبیه‌سازی زمین‌لرزه بر پایه گسیختگی شمال تهران، به روش ترکیبی (Hybrid) پرداخته‌اند. با توجه به همخوانی مکانی سناریوی گسیختگی گسل شمال تهران در مطالعه یاد شده با سناریوی گسیختگی گسل نیاوران در مطالعه حاضر می‌توان مقایسه‌ای میان نتایج این دو مطالعه انجام داد (گرچه این مقایسه با توجه به تفاوت‌های موجود نمی‌تواند خیلی دقیق باشد). در مطالعه Zafarani et al. (2013) بزرگی زمین‌لرزه برابر با ۷/۲ فرض شده است (که قابل مقایسه با بزرگی ۷/۰ برای گسل نیاوران است)؛ همچنین اثرات ساختگاه در نظر گرفته نشده و برای همه نقاط ساختگاه سنگی فرض شده است. فرض اخیر دست کم برای شمال شهر با توجه به شکل ۴ نزدیک به واقعیت بوده و در مشابهت با مطالعه حاضر است. در شکل ۱۵ دو نمونه از شبیه‌سازی‌های مطالعه یاد شده که در آنها شیب گسل، مشابه با شیب گسل نیاوران است، نشان داده شده است؛ همان‌گونه که دیده می‌شود، بیشینه شتاب در شمال شهر در حدود ۶۵۰ متر بر مجذور ثانیه است که می‌توان آن را با مقدار ۵۰۰ متر بر مجذور ثانیه برای گسیختگی گسل نیاوران مقایسه کرد. اختلاف موجود را می‌توان به تفاوت در بزرگی زمین‌لرزه در دو سناریو نسبت داد.

۷- برآورد تلفات

سناریوهای زمین‌لرزه ارائه شده در بخش‌های پیش، زمینه‌ای را برای برآورد تلفات ناشی از این زمین‌لرزه‌ها ایجاد می‌کند. برآورد میزان و گستره تلفات جانی به‌طور مؤثری در برنامه‌ریزی‌های مراحل آمادگی و تنظیم عملیات مقابله در شرایط بحران مورد استفاده قرار می‌گیرد (منصوری و همکاران، ۱۳۹۰).

توابع شکنندگی در تهران به سفارش سازمان مدیریت بحران شهر تهران توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله گسترش داده شده‌اند (قایم‌قوامیان و همکاران ۱۳۸۹)؛ ولی متأسفانه نتایج این گزارش در دسترس عموم قرار ندارد. در نتیجه در اینجا از توابع شکنندگی ارائه شده توسط (JICA (2000) استفاده می‌شود. در گزارش یاد شده از راهکار ارائه شده توسط (Coburn et al., 1992) استفاده شده است.

در جریان یک زمین‌لرزه، تلفات تحت‌سازو کارهای مختلفی مانند فروپختگی ساختمان، تصادف ماشین، حملات قلبی و دیگر سازوکارها رخ می‌دهد. (Coburn et al., 1992) نشان دادند که در بیشتر زمین‌لرزه‌ها، فوت‌شدگان و مجروحین می‌توانند به خسارات ساختمان‌ها ارتباط داده شوند. بیش از ۷۵ درصد کشته‌شدگان بر اثر فروریزش ساختمان‌هاست؛ اگر رویدادهای ثانویه متعاقب زمین‌لرزه استثنای شود، این مقدار تقریباً به ۹۰ درصد می‌رسد.

معادله عمومی تلفات برای تعداد کل کشته‌شدگان ناشی از یک زمین‌لرزه به‌صورت زیر است (Coburn et al., 1992):

دست آورد. این منحنی‌ها در ترکیب با مقدار K_0 مناسب که برای زمین‌لرزه‌های شمال ایران حدود ۰/۰۵ برآورد می‌شود (Motazedian, 2006; Zafarani et al., 2012)، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. در مورد برآورد متغیر تضعیف (K_0) تاکنون همه پژوهشگران در ایران از یک برازش خطی ساده استفاده کرده‌اند، ولی مطالعه‌ای روی زمین‌لرزه‌های دوگانه هر-ورزقان نشان می‌دهد که ممکن است استفاده از یک مدل پیچیده‌تر برای بررسی دقیق رفتار K در فاصله ضروری باشد (Samaei et al., 2016b). افزون بر طیف هدف، مدت زمان جنبش نیرومند زمین نیز یکی دیگر از متغیرهای ورودی برای تولید شتابنگاشت است. متأسفانه در این زمینه برای ایران مطالعات کافی انجام نشده است و در معدود موارد انجام شده مانند (Yaghmaei-Sabegh et al., 2014) تعاریف صورت گرفته برای مدت زمان به راحتی قابل کاربرد در شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین نیستند. از این رو، از رابطه ساده‌ای به شکل زیر استفاده شده است:

$$t = T_0 + 0.1R \quad (7)$$

که در آن T_0 زمان فرآیند (rise time) و وارون بسامد گوشه است. متغیرهای ورودی شبیه‌سازی که در همه سناریوها مشترک هستند، به‌طور خلاصه در جدول ۳ گردآوری شده‌اند.

۶- نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از متغیرهای توضیح داده شده در بخش‌های پیش، شبیه‌سازی تصادفی زمین‌لرزه در حدود ۲۰۰۰ نقطه در سطح شهر تهران انجام شده است. برای هر یک از سناریوهای گسیختگی نقشه‌های هم‌لرزه برای دو کمیت جنبش نیرومند زمین (GMIM; ground motion intensity measures) یعنی شتاب بیشینه (PGA) و سرعت بیشینه (PGV) رسم شده است. این نقشه‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۲ نمایش داده شده‌اند. بدیهی است که با توجه به شبیه‌سازی تاریخچه زمانی موج زمین‌لرزه در این نقاط، هر متغیر دیگر جنبش نیرومند زمین همچون طیف پاسخ شبه شتاب (PSA) در زمان تناوب‌های مختلف را می‌توان بازیابی کرد؛ ولی در اینجا نقشه هم‌لرزه برای شتاب بیشینه که به‌طور کلاسیک نشان‌دهنده اهمیت شتابنگاشت است و نیز سرعت بیشینه که همبستگی بالایی با خرابی به وجود آمده توسط زمین‌لرزه دارد (Wald et al., 1999a; Wald et al., 1999b)، ارائه شده‌اند. به منظور ایجاد این نقشه‌های پهنه‌بندی، از نرم‌افزار ArcGIS و از روش کریجینگ معمولی کروی (ordinary method, spherical) استفاده شد؛ با توجه به فاصله بسیار کم نقاط شبیه‌سازی شده از یکدیگر، نگرانی از خطاهای بزرگ در درون‌یابی وجود ندارد.

دیده می‌شود که با اینکه گسل مشا بالاترین بزرگی گشتاوری را دارد (۷/۳)، ولی با توجه به فاصله آن با شهر تهران مقدار شتاب‌ها و سرعت‌های مربوط به این سناریو چندان بزرگ نیست (شتاب بیشینه ۱۵۰ متر بر مجذور ثانیه).

گسل نیاوران بزرگ‌ترین گسلی است که در شهر قرار دارد؛ این گسل با بزرگای ۷/۰ توانایی ایجاد شتاب‌های بیشینه‌ای تا ۵۰۰ متر بر مجذور ثانیه را در بخش‌های شمالی شهر دارد. این مقدار در نگاه اول برای زمین‌لرزه‌ای به این بزرگی کمتر از حد انتظار است. ولی دلیل این مطلب وجود ساختگاه سخت در شمال شهر (خاک‌های نوع A و B) است که موجب تقویت نشدن امواج زمین‌لرزه می‌شود.

گسل پارچین در نزدیکی جنوب خاوری شهر جای گرفته ولی درون شهر گسترده نشده است. این گسل با بزرگی گشتاوری ۶/۹ شتاب‌هایی تا حدود ۶۵۰ متر بر مجذور ثانیه در نقاطی در جنوب خاوری تهران تولید می‌کند. این مقادیر با توجه به فاصله نسبی گسل از شهر قابل توجه است. علت این شتاب‌های به نسبت بزرگ، وجود خاک‌های نرم در جنوب تهران است. ترکیب این مسئله با وجود سازه‌های غیر مهندسی در جنوب تهران نگران‌کننده است.

امکان مقایسه نتایج شبیه‌سازی با رکورد‌های جنبش نیرومند زمین با بزرگی‌های مورد نظر وجود ندارد؛ به همین دلیل مقایسه‌ای میان نتایج شبیه‌سازی و دو رابطه پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین (کاهندگی) انجام شده است. رابطه‌ی اول بر پایه پایگاه داده بزرگ جهانی به دست آمده (Boore et al., 2014) و رابطه دوم مختص ایران

در ایران بسیار رایج است و عملکرد متوسطی در برابر زمین‌لرزه دارد؛ به این دسته، سازه‌های نیمه‌مهندسی نیز گفته می‌شود. در شهر تهران سازه‌های دیگری وجود دارد که در هیچ کدام از این ۳ دسته قرار نمی‌گیرند و عملکرد بسیار ضعیفی در برابر زمین‌لرزه دارند (شامل سازه‌های با بلوک سیمانی، چوبی و خشتی). خوشبختانه این سازه‌ها نسبت کمی از سازه‌های شهر تهران را تشکیل می‌دهند؛ به همین دلیل همه آنها در یک گروه قرار داده شده‌اند.

در مطالعه JICA (2000) ضرایب M_2 ، M_3 ، M_4 و M_5 به گونه‌ای کالیبره شده‌اند که در روابط تلفات جانی ناشی از زمین‌لرزه‌های گذشته ایران صدق کنند. این ضرایب از مطالعات یاد شده برگرفته شده‌اند و همچنین فرض شده است که زمین‌لرزه‌ها در شب رخ داده‌اند و همه ساکنان ساختمان درون آن حضور دارند ($M_1=1$). با استفاده از موارد یاد شده، منحنی‌های تلفات جانی مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۴ و شکل ۲۰ ارائه شده است. گفتنی است که فرض موجود در این منحنی‌ها نبود امداد و نجات پس از زمین‌لرزه است. بدیهی است که با فرض وجود امداد و نجات دامنه این منحنی‌ها و به تناسب آن تلفات جانی کاهش می‌یابد.

با استفاده از منحنی‌های شکل ۲۰، نقشه‌های موجود برای شدت زمین‌لرزه در سناریوهای مفروض و اطلاعات جمعیتی و مکانی منتشر شده توسط مرکز آمار ایران برای برای ساختمان‌های شهر تهران، تلفات جانی به دست آمده است. خلاصه نتایج این محاسبات در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ و جدول ۵ ارائه شده است.

بیشترین تلفات جانی مربوط به سناریوی گسیختگی گسل نیاوران با تعداد ۱۱۶۸۷۴ نفر است که بیشترین تلفات در مناطق ۱، ۳ و ۴ دیده می‌شود. تلفات گسل پارچین نیز قابل توجه است. گسیختگی این گسل سبب تلفات ۸۵۰۱۶ نفری خواهد شد که حدود نیمی از آنها تنها مربوط به منطقه ۱۵ است. این مطلب ناشی ترکیب شدت زمین‌لرزه بالا با فراوانی سازه‌های ضعیف در این منطقه است. در این منطقه بیش از ۷ درصد کل جمعیت ساکن کشته خواهند شد.

در انتها شاید گفتن این نکته ضروری باشد که محاسبات مربوط به برآورد تلفات و خسارت در زمین‌لرزه‌ها (و به طور کلی بلایای طبیعی) می‌تواند بسیار پیچیده‌تر از راهکاری باشد که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. برای آگاهی بیشتر از پیشرفت‌های سال‌های اخیر در مورد مدل‌سازی تلفات انسانی به Spence et al. (2011) مراجعه شود.

۸- نتیجه‌گیری

در سال‌های گذشته فهم ما از وجود و جنبایی ساختارهای زمین‌ساختی در منطقه به طرز چشمگیری افزایش یافته است (Abbassi and Farbod, 2009; Nazari et al., 2010; Ritz et al., 2012). این مطلب همراه شده است با گسترش مدل‌هایی فیزیکی که هدف آنها کمک به شبیه‌سازی دقیق‌تر جنبش نیرومند زمین است (Hassani et al., 2011; Samaei et al., 2013; Zafarani et al., 2012). از سوی دیگر پژوهش‌هایی به همت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در زمینه بزرگنمایی ساختگاه در تهران انجام شده است. ترکیب مطالعات یاد شده زمینه‌ای است برای برآوردی بهتر از سطوح لرزش در زمین‌لرزه‌های آینده در شهر تهران و نیز محاسبه خرابی و تلفات ناشی از آنها و در پایان به‌روزرسانی مطالعات به نسبت محدودی که در این زمینه انجام شده است (مانند مطالعه آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (JICA, 2000)). در گزارش حاضر، خطر و ریسک زمین‌لرزه در تهران بزرگ، با توجه به اهمیت سیاسی و اقتصادی آن بررسی شده است. بدین منظور راهکارهای مختلفی از زیررشته‌های متفاوت، از لرزه‌شناسی مهندسی تا تحلیل ریسک به کار گرفته شده است.

با توجه به گزارشات و مقالات زمین‌شناسی، سه گسل مشا، نیاوران و پارچین، خطرناک‌ترین گسل‌ها برای تهران بزرگ تشخیص داده شده‌اند. با استفاده از روابط تجربی، بزرگای گشتاوری مربوط به گسیختگی هر یک از این گسل‌ها به ترتیب، ۷/۰، ۶/۹ و ۷/۰ به دست آمده است. از روش تصادفی به منظور تولید شتابگشت‌های

$$K=K_s+K'+k_2 \quad (۸)$$

که در آن K_s مرگ‌ومیر ناشی از خسارت سازه‌ای، K' میزان تلفات ناشی از آسیب‌های غیر سازه‌ای و K_2 میزان تلفات ناشی از خطرات رویدادهای در پی زمین‌لرزه است. مورد K' بسیار کمیاب است؛ اما در صورت رخداد می‌تواند بسیار تأثیر گذار باشد. K_2 در سطوح پایین خرابی حاکم و پیش‌بینی آن مشکل است. در زمین‌لرزه‌های مخرب، K_s عامل اصلی در میزان تلفات (کشته‌شدگان) است (منصوری و همکاران، ۱۳۹۰).

$$\text{ضریب } K_s \text{ یا «ضریب کشندگی» دارای فرمول‌بندی به شکل زیر است (JICA, 2000):} \\ K_s=D_5 \times M_1 \times M_2 \times M_3 \times (M_4d + (1-M_4d) \times M_5) \quad (۹)$$

که در آن، D_5 تعداد ساختمان‌های فروریخته، M_1 تعداد افراد حاضر در هر ساختمان، M_2 تعداد ساکنان ساختمان در هنگام رخداد زمین‌لرزه (به منظور برآورد تعداد تلفات در شب، وقتی که ساکنان همگی در خانه‌هایشان هستند، مقدار M_2 برابر ۱ فرض می‌شود)، M_3 تعداد ساکنانی که در ساختمان‌های فرو ریخته محبوس شده‌اند، M_4d تعداد تلفات در صفر ساعت پس از فروریزی ساختمان‌ها، M_5 تلفات پس از فروریزی (نسبت مجروحانی که پس از فروریختن و پیش از امداد رسانی می‌میرند) است.

در پروژه حاضر محاسبات مربوط به برآورد تلفات در هر یک از مناطق ۲۲ گانه تهران به تفکیک انجام شده است. نقشه این مناطق در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برای هر یک از مناطق با استفاده از میانگین PGV ثبت شده در آن منطقه و استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط Yaghmaei-Sabegh et al. (2011) شدت مرکالی اصلاح شده (MMI) در هر منطقه به دست آمده است. باور نگارندگان بر این است که با توجه به استفاده از پایگاه داده زمین‌لرزه‌های ایران برای گسترش روابط میان سرعت بیشینه و شدت مرکالی اصلاح شده در مطالعه مذکور، این رابطه مناسب‌ترین رابطه برای اینگونه تبدیلات است. گفتنی است که رابطه Yaghmaei-Sabegh et al. (2011) تفاوت زیادی با رابطه Trifunac and Brady (1975) که در (JICA 2000) استفاده شده است و نیز با رابطه Wald et al. (1999a) که در سازمان زمین‌شناسی آمریکا به‌طور گسترده استفاده می‌شود، دارد. این مسئله نشانه‌ای از وجود عدم قطعیت‌های بسیار در برآورد تلفات ناشی از زمین‌لرزه‌های آینده است.

مقادیر شدت مرکالی اصلاح شده برای هر سه سناریوی مورد نظر در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ نشان داده شده است. چنانچه دیده می‌شود سناریوی گسل نیاوران سبب ایجاد شدت ۹ در ۳ منطقه شده که این مطلب نشانه‌ای از زیاد شدن تلفات مربوط به این سناریو در این مناطق است. همچنین سناریوی گسل پارچین سبب شدت ۹ در منطقه ۱۵ در جنوب خاوری تهران می‌شود. از سوی دیگر سناریوی گسل مشا با توجه به فاصله آن از تهران، در هیچ منطقه‌ای شدت بزرگ‌تر از ۷ تولید نمی‌کند؛ بنابراین از دید خطر لرزه‌ای تهدید بزرگی برای شهر تهران به شمار نمی‌رود. این مطلب، مشارکت پایین را در خطر لرزه‌های تهران برای گسل‌های با فاصله‌های چند ده کیلومتری از این شهر تأیید می‌کند؛ برای نمونه می‌توان گسل‌های طالقان، ایپک، گرمسار و پیشوا را نام برد. گرچه این نتیجه‌گیری در حوزه تخصصی جدایش خطر زمین‌لرزه است (یزدانی و کوثری، ۱۳۹۲)؛ ولی نتایج در اینجا این گونه پیشنهاد می‌دهد که اهمیت و خطر لرزه‌های گسل‌هایی مانند گسل‌های نام برده بیشتر مربوط به مناطق مجاور خودشان است تا شهر تهران. گفتنی است که مقاوم شدن سازه‌های جدید سبب کم‌اهمیت‌تر شدن سطوح پایین لرزش (مانند بیشینه شتاب‌هایی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتیمتر بر مجذور ثانیه) شده‌اند.

همان‌گونه که گفته شد، به منظور ارتباط دادن شدت مرکالی اصلاح شده ناشی از هر یک از سناریوها به تلفات جانی از معادله ۹ استفاده شد که توسط JICA (2000) برای انواع سازه‌ها در ایران کالیبره شده است.

بر پایه گزارش سرشماری نفوس و مسکن (مرکز آمار ایران، ۱۳۸۵)، بیشتر سازه‌های موجود در شهر تهران در سه دسته قرار می‌گیرند که عبارتند از سازه‌های با اسکلت بتنی، سازه‌های با اسکلت فلزی و سازه‌های با اسکلت نیمه‌فلزی. دو دسته اول سازه‌های مهندسی هستند که رفتار قابل قبولی در برابر زمین‌لرزه دارند؛ دسته سوم

موجب بیشترین تلفات در جنوب باختری تهران شود. مجموع کل تلفات ناشی از گسیختگی این گسل در حدود ۸۵۰۰۰ نفر است که حدود نیمی از این مقدار مربوط به منطقه ۱۵ خواهد بود. تلفات ناشی از فعالیت گسل مشا بسیار کمتر و در حدود ۵۰۰۰ نفر است.

در پایان پیشنهاد می‌شود، به منظور ارزیابی دقیق‌تر خطر زمین‌لرزه در گستره تهران، مطالعات بیشتری در مورد گسل‌هایی انجام شود که درون تهران قرار دارند یا به فاصله‌ای بسیار نزدیک از آن جای گرفته‌اند. در مورد گسل پارچین با وجود فاصله ناچیز آن تا تهران مطالعات بسیار کمی انجام شده است. نگارندگان با وجود جستجوی بسیار حتی یک مورد مقاله منتشر شده در یک مجله علمی معتبر نیافتند که به‌طور خاص به بررسی زمین‌ساختی گسل پارچین پرداخته باشد.

سپاسگزاری

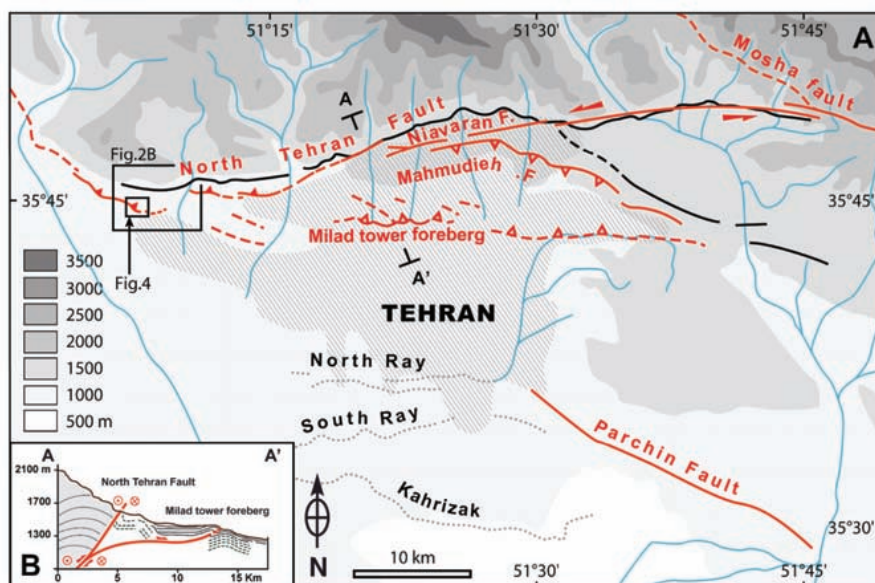
نگارنده اول طی سالیان گذشته در زمینه شبیه‌سازی تصادفی جنبش نیرومند زمین، همواره از راهنمایی‌های دیوید بور، پژوهشگر ارشد سازمان زمین‌شناسی آمریکا و از پیشروان دانش لرزه‌شناسی مهندسی بهره برده است؛ مجموعه کدهای SMSIM به زبان فرترن از تارنمای www.daveboore.com در دسترس عموم قرار دارد. از محمدرضا قائم‌مقامیان، استاد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان در مورد توابع خرابی و خسارت در تهران، از محمدرضا عباسی، دانشیار آن پژوهشگاه در زمینه بحث بسیار مفید راجع به گسل نیاوران و اهمیت آن در خطرپذیری شهر تهران، از جان فرانسوا ریتز، استاد دانشگاه مونت‌پلیه فرانسه که نتایج مطالعات خود را -پیش از انتشار- سخاوتمندانه در اختیار نویسندگان قرار دادند و در پایان از نوبوتو نوجیما، استاد دانشگاه گیفوی ژاپن، ماکو کویاما، دانشیار دانشگاه گیفوی ژاپن، آزاد یزدانی، دانشیار دانشگاه کردستان و داوران فصلنامه علوم زمین که نظراتشان سبب بهبود مقاله شد سپاسگزاری می‌شود.

مصنوعی در حدود ۲۰۰۰ نقطه در سطح شهر برای هر یک از سناریوهای مفروض استفاده شده است. در شبیه‌سازی زمین‌لرزه از متغیرهایی برای مسیر و چشمه زمین‌لرزه استفاده شده است که خود از مطالعات پیشین در مورد زمین‌لرزه‌های البرز به دست آمده‌اند. در مورد ساختگاه نیز با توجه به محدودیت‌های موجود، انواع خاک در شهر تهران به چهار نوع، بنا بر آیین‌نامه NEHRP تقسیم شده و از منحنی‌های به دست آمده برای همین نوع از ساختگاه‌ها برای متغیر سایت استفاده شده است.

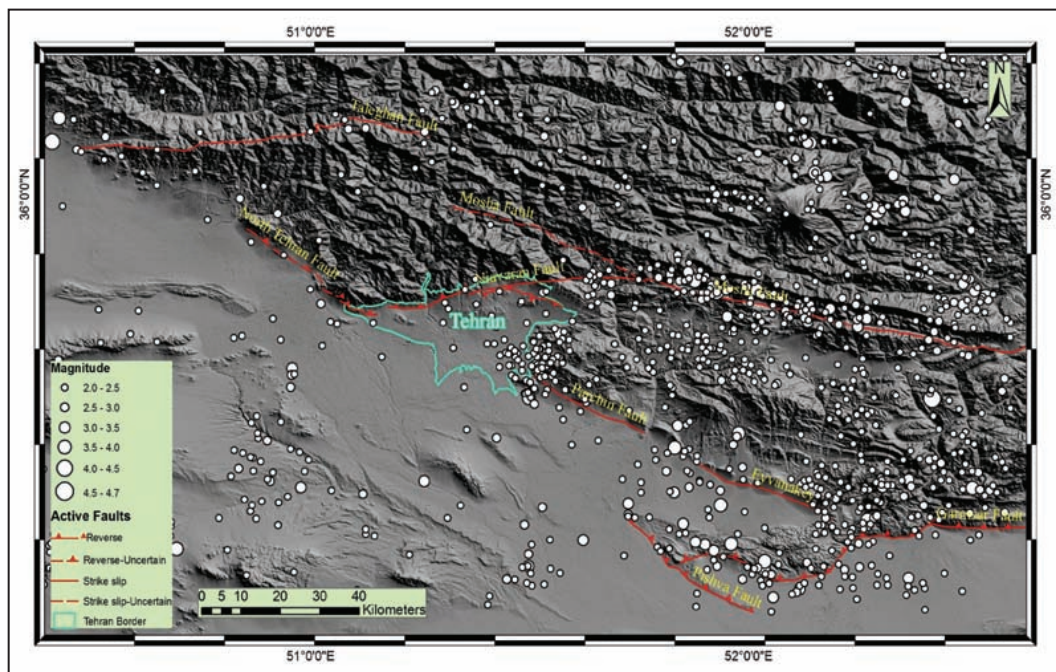
نتایج شبیه‌سازی برای سناریوهای مختلف زمین‌لرزه بسیار متفاوت است. با اینکه گسل مشا بالاترین بزرگی گشتاوری را دارد (۷/۳)؛ ولی با توجه به فاصله آن با شهر تهران مقدار شتاب‌ها و سرعت‌های مربوط به این سناریو چندان بزرگ نیستند، در حالی که گسیختگی گسل نیاوران توانایی ایجاد شتاب‌های بیشینه‌ای تا ۵۰۰ متر بر مجذور ثانیه را در بخش‌های شمالی شهر دارد. سناریوی گسیختگی گسل پارچین نیز با توجه به وجود ساختگاه‌های آبرفتی در جنوب تهران پتانسیل تولید شتاب‌هایی را تا حدود ۶۵۰ متر بر مجذور ثانیه در جنوب باختری تهران دارد.

در این مطالعه همچنین تقریب اولیه‌ای از تلفات جانی ناشی از هر یک از سناریوهای زمین‌لرزه مفروض به دست آمد. بدین منظور ابتدا با استفاده از روابط تجربی موجود برای ایران، مقدار بیشینه سرعت حرکت زمین در زمین‌لرزه به شدت اصلاح شده مرکالی تبدیل شد. برای سناریوی گسیختگی گسل نیاوران، در سه منطقه شمال‌خاوری تهران شدت زمین‌لرزه به ۹ درجه در مقیاس مرکالی اصلاح شده می‌رسد. همچنین در مورد گسل پارچین یک منطقه در جنوب خاور به شدت ۹ درجه می‌رسد.

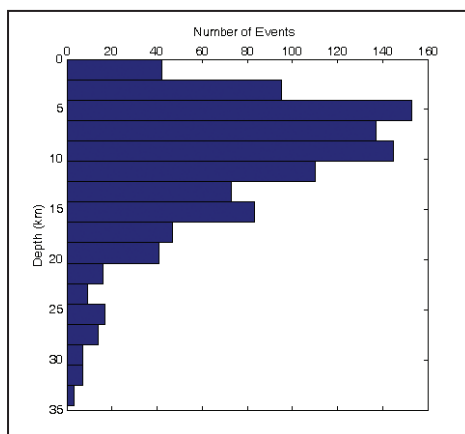
محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که فعالیت گسل نیاوران می‌تواند برای شهر تهران بسیار خطرناک باشد. تعداد تلفات جانی (مرگ و میر) ناشی از این سناریوی گسیختگی در حدود ۱۱۶۰۰۰ نفر برآورد می‌شود که بیشتر این تلفات مربوط به نواحی شمال باختری تهران خواهد بود. همچنین فعالیت گسل پارچین می‌تواند



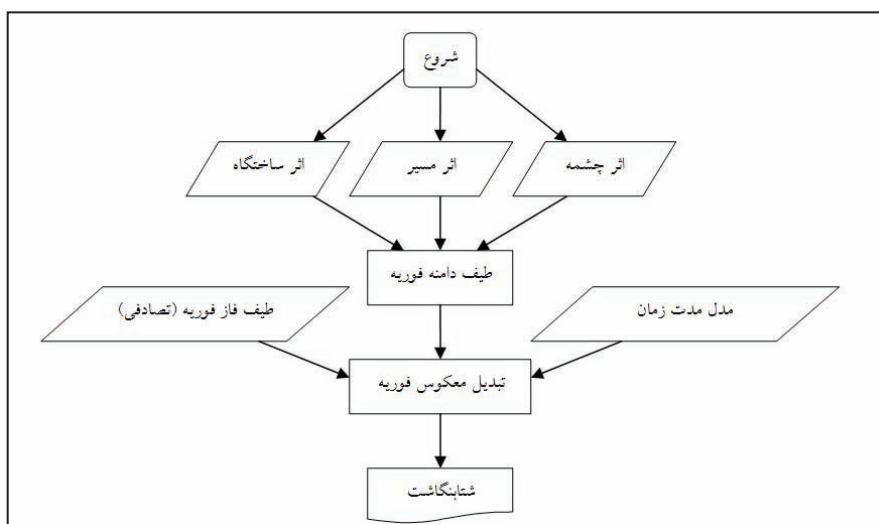
شکل ۱- گسل‌های فعال تهران به نقل از Ritz et al. (2012) و گردآوری شده از بربریان و همکاران (۱۳۷۱)، Solaymani Azad et al. (2011) و Abbassi and Farbod (2009) Landgraf et al. (2009) Nazari et al. (2010) است. در این شکل منطقه هاشورخورده نشان‌دهنده شهر تهران، خطوط سیاه نشان‌دهنده گسل‌های غیر فعال در دوران سنوزوییک، خطوط سرخ نشان‌دهنده گسل‌های فعال، خط‌چین‌های سرخ نشان‌دهنده گسل‌های پنهان یا غیر مطمئن و خط‌چین‌های سیاه مربوط به آثار به جای مانده از دریایی کهن هستند.



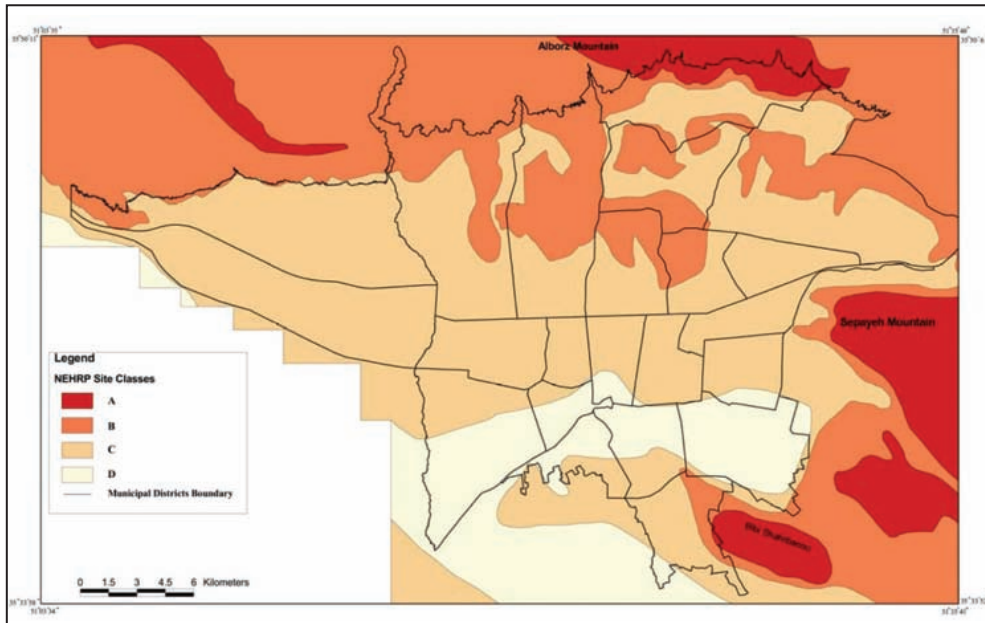
شکل ۲- زمین لرزه‌های رکورد شده در منطقه از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری به همراه گسل‌های فعال مهم (بزرگی زمین لرزه‌ها در مقیاس ناتلی است).



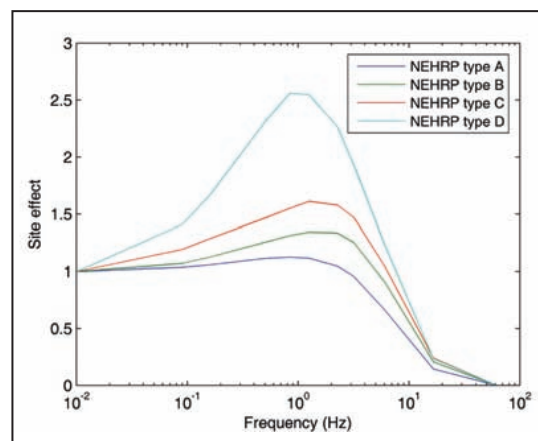
شکل ۳- نمودار ستونی نشان‌دهنده توزیع زمین لرزه‌ها در ژرفا.



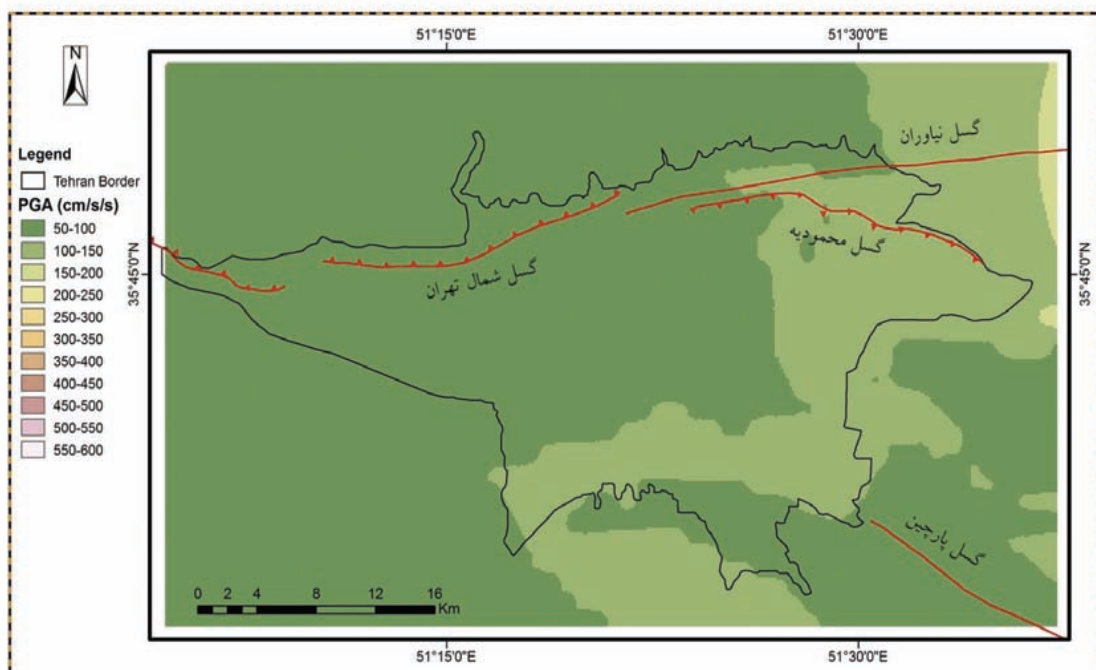
شکل ۴- فلوچارت نمایشگر شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی.



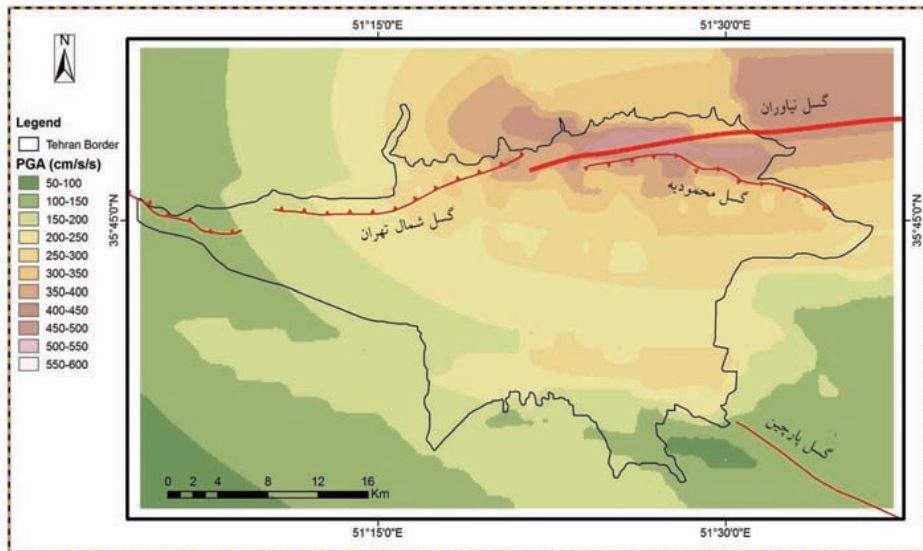
شکل ۵- رده‌بندی ساختمانی در تهران بر پایه آیین‌نامه NEHRP به نقل از (Gholipour et al. (2008)



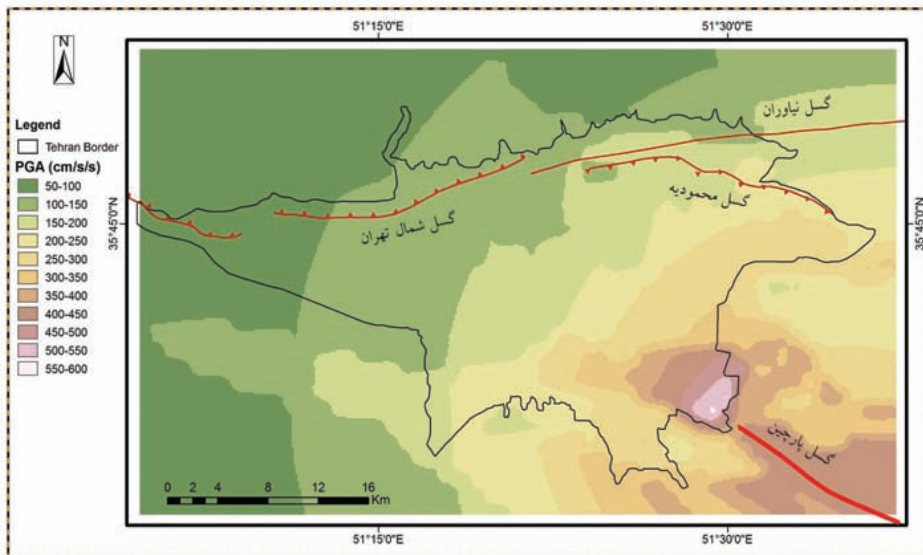
شکل ۶- اثر ساختمانی برای انواع خاک آیین‌نامه NEHRP.



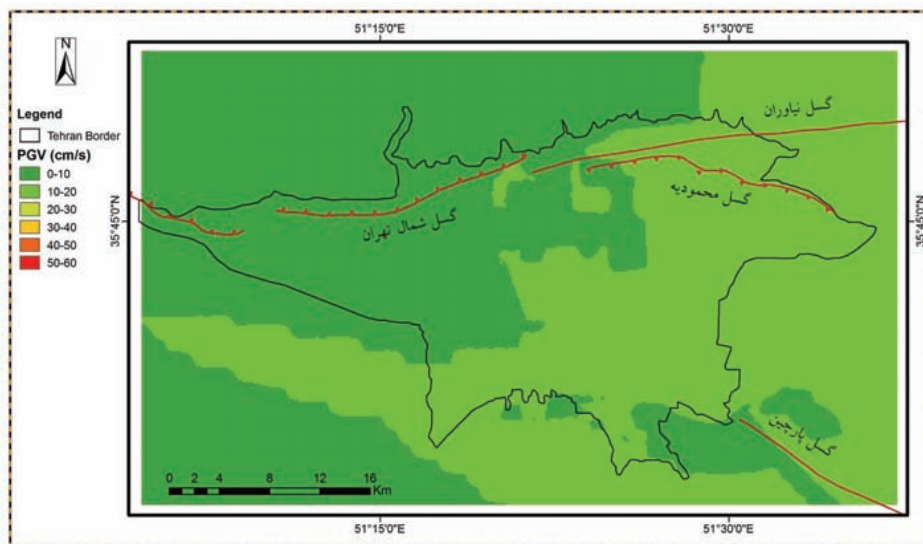
شکل ۷- شتاب بیشینه (PGA) در سناریوی گسیختگی گسل مشاء.



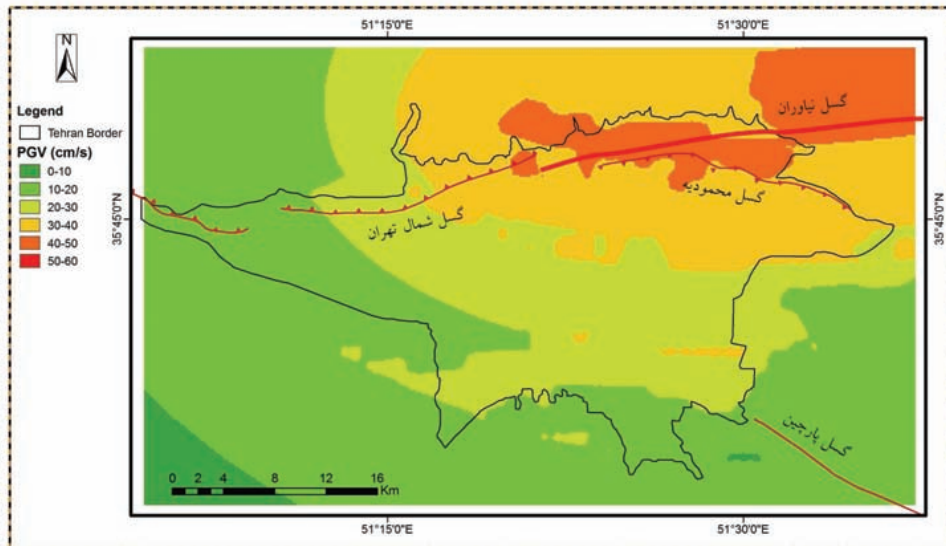
شکل ۸- شتاب بیشینه (PGA) در سناریوی گسیختگی گسل نیاوران.



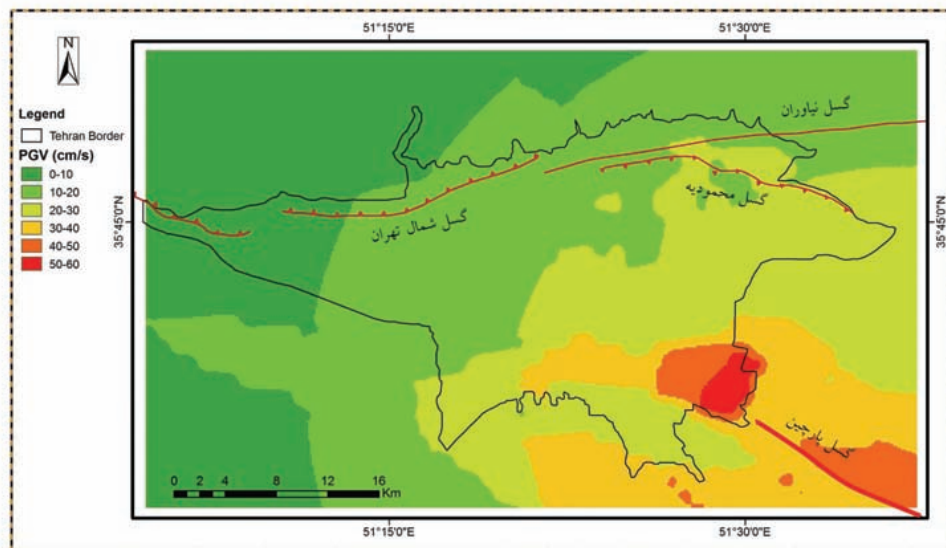
شکل ۹- شتاب بیشینه (PGA) در سناریوی گسیختگی گسل بارچین.



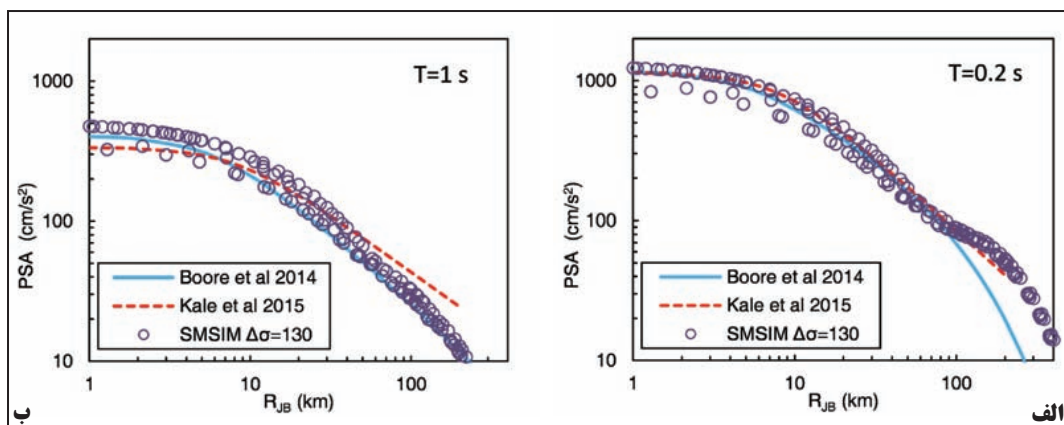
شکل ۱۰- سرعت بیشینه (PGV) در سناریوی گسیختگی گسل مشاء.



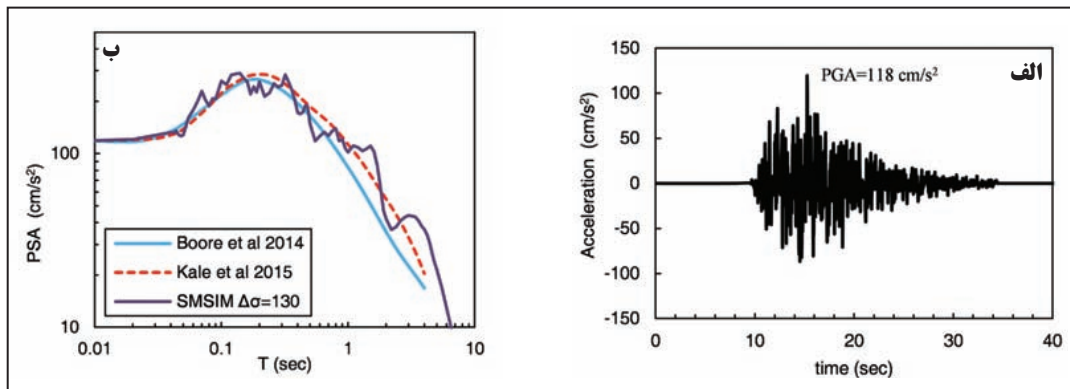
شکل ۱۱- سرعت بیشینه (PGA) در سناریوی گسیختگی گسل نیاوران.



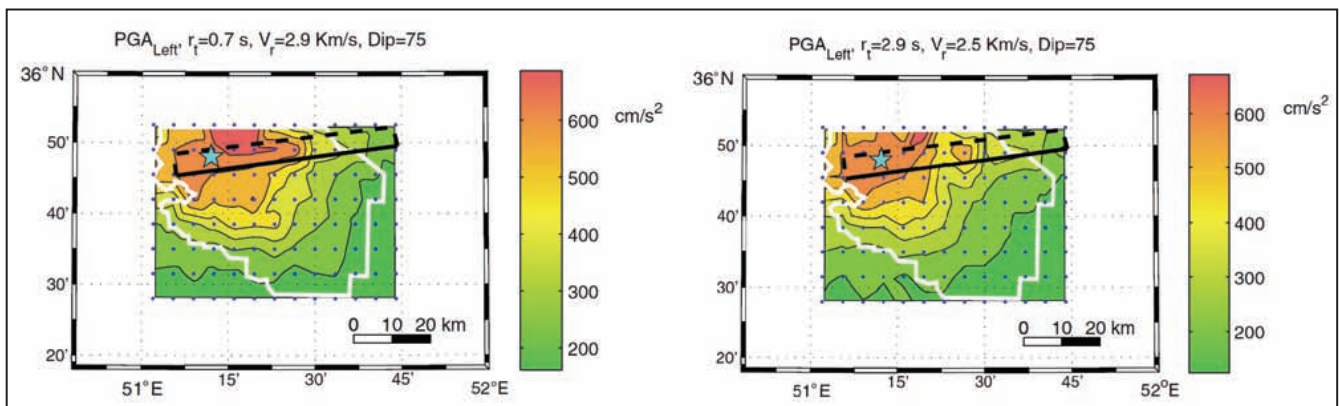
شکل ۱۲- سرعت بیشینه (PGA) در سناریوی گسیختگی گسل پارچین.



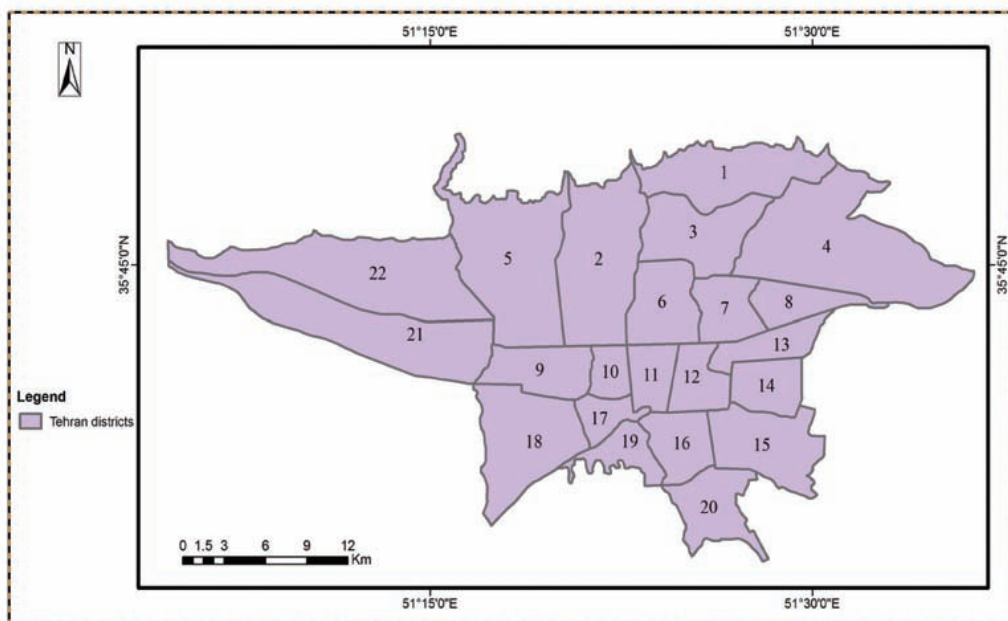
شکل ۱۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با روابط پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین (کاهندگی) در فواصل مختلف. الف) پاسخ شبه شتاب در زمان تناوب ۰/۲ ثانیه؛ ب) پاسخ شبه شتاب در زمان تناوب ۱ ثانیه.



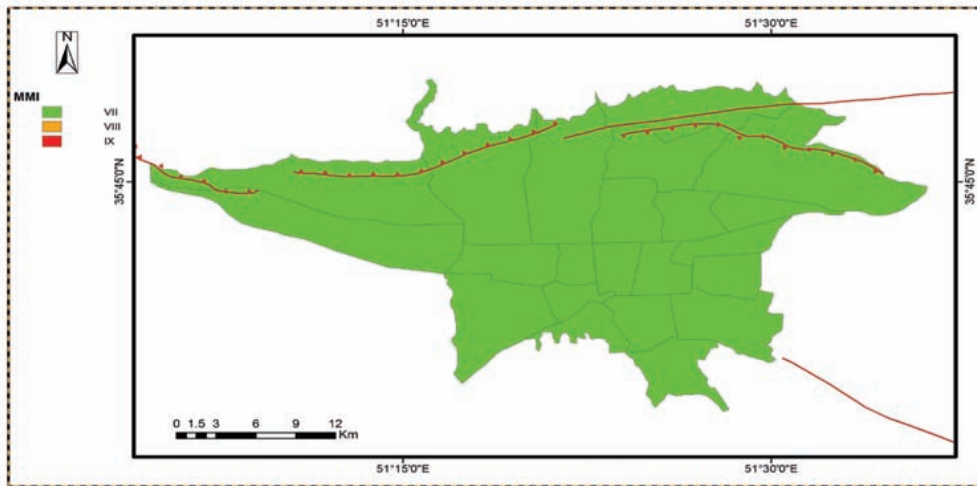
شکل ۱۴- نمونه‌ای از شتابنگاشت‌های تولید شده در فاصله ۳۰ کیلومتری از چشمه. الف) به همراه طیف پاسخ شبه شتاب آن؛ ب) در مقایسه با طیف شبه شتاب پیش‌بینی شده از روابط تجربی.



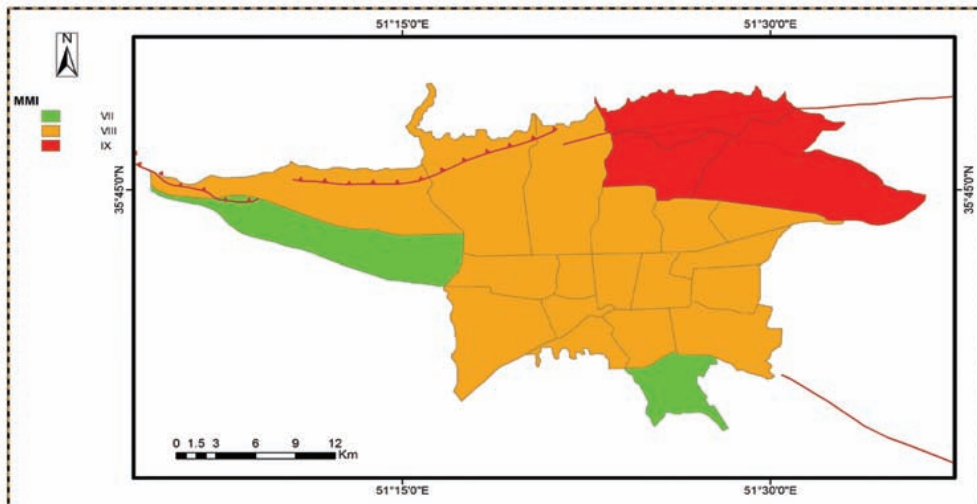
شکل ۱۵- دو نمونه از شبیه‌سازی‌های (Zafarani et al. (2013) برای گسیختگی گسل شمال تهران با بزرگی گشتاوری ۷/۲ و شیب ۷۵ درجه. متغیرهای زمان فرآینش (r_1) و سرعت گسیختگی (V_r) در اینجا متغیر در نظر گرفته شده‌اند.



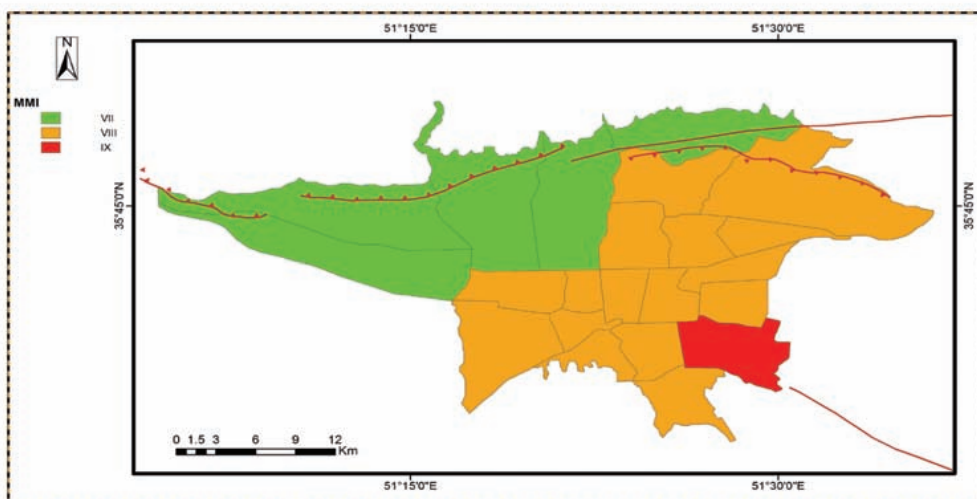
شکل ۱۶- مناطق ۲۲ گانه شهر تهران.



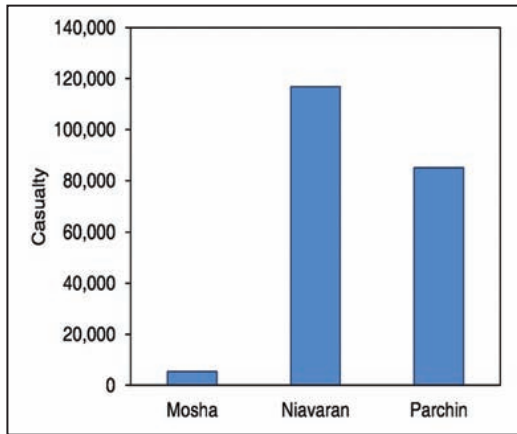
شکل ۱۷- شدت زمین‌لرزه در مقیاس مرکالی اصلاح شده بر پایه سناریوی گسل مشا.



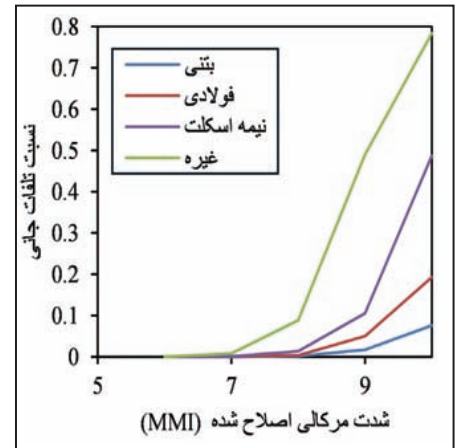
شکل ۱۸- شدت زمین‌لرزه در مقیاس مرکالی اصلاح شده بر پایه سناریوی گسل نیاوران.



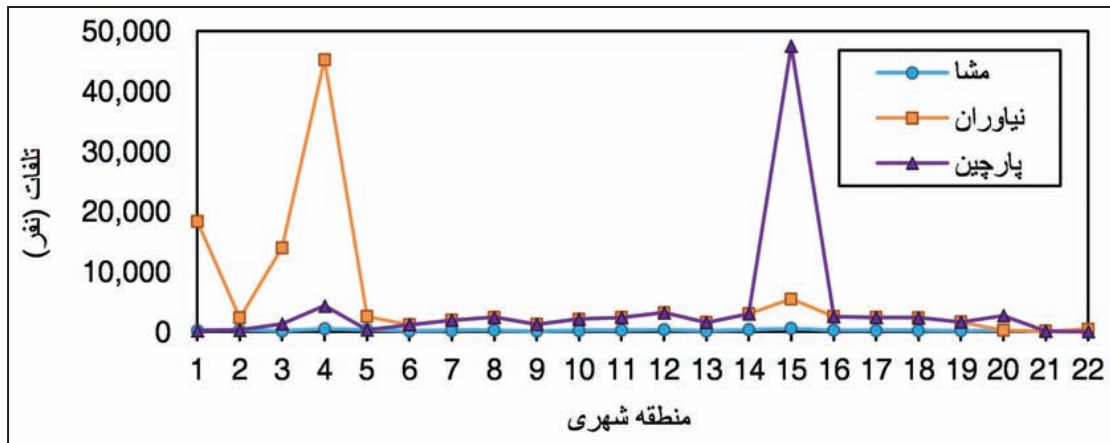
شکل ۱۹- شدت زمین‌لرزه در مقیاس مرکالی اصلاح شده بر پایه سناریوی گسل پارچین.



شکل ۲۱- تعداد کل تلفات (کشته شدگان) برای هر سناریوی زمین لرزه.



شکل ۲۰- منحنی‌های تلفات جانی استفاده شده در این مطالعه، مستخرج از گزارش JICA (2000).



شکل ۲۲- تعداد تلفات (کشته شدگان) به تفکیک منطقه.

جدول ۱- متغیرهای گسیختگی گسل‌های مورد نظر.

گسل	مشا	نیاوران	پارچین
طول جغرافیایی مبدأ	۵۲/۵۹	۵۱/۷۹	۵۱/۷۷
عرض جغرافیایی مبدأ	۳۵/۶۸	۳۵/۸۴	۳۵/۴۸
امتداد	۲۸۱ درجه	۲۶۵ درجه	۲۹۶ درجه
طول گسیختگی	۷۸ کیلومتر	۴۵ کیلومتر	۲۷ کیلومتر
پهنای گسیختگی	۲۳ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۸ کیلومتر
شیب	۷۰ درجه	۷۰ درجه	۵۰ درجه
بزرگای گشاوری	۷/۳	۷/۰	۶/۹

جدول ۲- تقسیم‌بندی ساختگاه بر پایه آیین‌نامه‌های NEHRP و ۲۸۰۰ و سرعت متوسط موج برشی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر برای هر نوع زمین.

نوع زمین بر پایه آیین‌نامه NEHRP	نوع معادل زمین بر پایه آیین‌نامه ۲۸۰۰	محدوده متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر ابتدایی لایه‌های خاک (m/s)	مقدار در نظر گرفته شده برای Vs(30) در این مطالعه (m/s)
A	نوع I	$1500 < V_s(30)$	۲۰۰۰
B	نوع I	$760 < V_s(30) \leq 1500$	۱۰۰۰
C	نوع II	$360 < V_s(30) \leq 760$	۵۲۰
D	نوع III	$180 < V_s(30) \leq 360$	۲۵۵
E	نوع IV	$V_s(30) \leq 180$	-

جدول ۳- متغیرهای ورودی مشترک در شبیه‌سازی.

افت تنش	۱۳۰ بار (۱۳ مگاپاسکال)
توزیع هندسی	کیلومتر $R^1, R \leq 70$ کیلومتر $R^{0.2}, 70 < R \leq 150$ کیلومتر $R^{0.1}, R > 150$
$Q(f)$	$87, f \leq 1$ $87f^{1.77}, f > 1$
سرعت موج برشی در چشمه	۳/۶ کیلومتر بر ثانیه
سرعت گسیختگی	۰/۸ × سرعت موج برشی
چگالی در چشمه	۲/۸ گرم بر سانتی‌متر مربع
بزرگنمایی ساختگاه	بر پایه جدول ۲
ضرب کاپا	۰/۰۵
مدت زمان	$T_0 + 0.1R$
تابع پوش	ساراگونی- هارت

جدول ۴- نسبت تلفات جانی استفاده شده در این مطالعه برای هر سطح از شدت مرکالی و برای هر نوع سازه..

شدت زمین لرزه (MMI)	سازه‌های بتنی	سازه‌های فولادی	سازه‌های نیمه‌مهندسی (آجر و فولاد)	سازه‌های دیگر (ضعیف)
۶	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۹
۸	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۳۷	۰/۰۸۸۲
۹	۰/۰۱۷۲	۰/۰۵۰۲	۰/۱۰۵۳	۰/۴۹۰۰
۱۰	۰/۰۷۶۲	۰/۱۹۳۰	۰/۴۸۷۵	۰/۷۸۴۰

جدول ۵- مجموع تلفات بر پایه هر یک از سناریوهای گسیختگی.

سناریو	مشا	نیاوران	پارچین
مجموع تلفات (نفر)	۵۴۰۴	۱۱۶۸۷۴	۸۵۰۱۶

کتابنگاری

- بربریان، م.، قرشی، م.، ارژنگ روش، ب. و مهاجر اشجعی، آ.، ۱۳۷۱- پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه‌زمین ساخت و خطر زمین لرزه- گسلش در گستره قزوین و پیرامون (پژوهش و بررسی لرزه‌زمین ساخت ایران زمین: بخش ششم) سازمان زمین شناسی کشور، گزارش شماره ۶۲.
- تاتار، م.، مومنی، م. و یمنی فرد، م.، ۱۳۹۳- خردلرزه‌خیزی و لرزه‌زمین ساخت ناحیه گرمسار، فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۴، صص. ۲۸۹ تا ۲۹۸.
- جموری، ی.، هاشمی طباطبایی، س.، صدیقی، م. و نانکلی، ح.، ۱۳۹۱- برآورد آهنگ GPS حرکات زمین ساخت نوار شمالی تهران بزرگ با نگرشی ویژه به گسل شمال تهران، فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۳، صص. ۲۱۱ تا ۲۱۸.
- زعفرانی، ح. و نورزاد، ن.، ۱۳۹۳- زلزله‌شناسی مهندسی و شبیه‌سازی زمین لرزه، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۶۴ ص.
- سمانی، م.، میاجیما، م. و یزدانی، آ.، ۱۳۹۳ الف- پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین به روش گسل محدود تصادفی: مطالعه موردی، گسل نیاوران، تهران، فصلنامه پژوهشی زمین پویا، سال دوم، شماره سوم، صص ۱۳-۲۳.
- سمانی، م.، میاجیما، م. و یزدانی، آ.، ۱۳۹۳ ب- مروری بر تولید شتابنگاشت‌های مصنوعی به روش چشمه نقطه‌ای تصادفی، مطالعه موردی تهران، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، ایران. قائم‌مقامیان، م.، منصوری، ب.، امینی حسینی، ک.، تسنیمی، ع.، حق‌شناس، آ.، گواهی، ن.، ۱۳۸۹- تعیین ضرایب بزرگنمایی ساختگاه و استخراج توابع شکنندگی و روابط تلفات انسانی در اثر زلزله برای ساختمان‌های شهر تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- مرکز آمار ایران، ۱۳۸۵- سرشماری عمومی نفوس و مسکن، نتایج کلی شهر تهران، ۱۱۷ ص.
- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳- آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش ۴، ۲۱۲ ص.

منصوری، ب.، قایمقامیان، م.، امینی حسینی، ک. و گواهی، ع.، ۱۳۹۰- توسعه مدل لرزه‌ای خسارت جانی (مطالعه موردی منطقه ۱۷ شهر تهران)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله. نظری، ح.، ۱۳۹۳- بررسی تحلیلی زمان احتمال رخداد زمین‌لرزه در گستره تهران: مروری بر پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۴، صص. ۲۶۳ تا ۲۷۲.

نظری، ح.، ریتز، ژ. ف.، سلامتی، ر.، قرشی، م.، قاسمی، ع.، حبیبی، ح.، جمالی، ف. و جوادپور، ش.، ۱۳۸۸- ساختارهای خطی جنوب تهران (سری گسل‌های ری- کهریزک): پرتگاه گسل با پدیده‌های زمین‌ریخت‌شناختی؟، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۳، صص. ۱۰۹ تا ۱۱۴.

یزدانی، آ. و کوثری، م.، ۱۳۹۲- مقدمه‌ای بر تحلیل خطر احتمالی زمین‌لرزه، انتشارات دانشگاه کردستان، ۱۸۰ ص.

یمینی‌فرد، م.، سیاهکلی مرادی، ع.، حسینی، م. و نوروزی، ر.، ۱۳۸۸- مطالعه لرزه‌خیزی تهران بزرگ و مجاورت آن با استفاده از داده‌های ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری شهر تهران، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۳، صفحه ۱۳۳ تا ۱۳۸.

References

- Abbassi, M. R. and Farbod, Y., 2009- Faulting and folding in quaternary deposits of Tehran's piedmont (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(4): 522-531.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D. and Kamalian, N., 2005- Microseismicity in the region of Tehran. *Tectonophysics*, 395(3-4): 193-208.
- Atkinson, G. M. and Assaturians, K., 2015- Implementation and validation of EXSIM (a stochastic finite-fault ground-motion simulation algorithm) on the SCEC broadband platform. *Seismological Research Letters*, 86(1): 48-60.
- Atkinson, G. M. and Boore, D. M., 2006- Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America. *Bulletin of the seismological society of America*, 96 (6): 2181-2205.
- Atkinson, G. M. and Silva, W., 2000- Stochastic modeling of California ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2): 255-274.
- Berberian, M., 1994- Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran: historical hazards in Iran prior to 1900. UNESCO.
- Beresnev, I. A. and Atkinson, G. M., 1997- Modeling finite-fault radiation from the ω spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(1): 67-84.
- Beresnev, I. A. and Atkinson, G. M., 1998- FINSIM--a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. *Seismological Research Letters*, 69(1): 27-32.
- Boore, D. M. and Joyner, W. B., 1997- Site amplifications for generic rock sites. *Bulletin of the seismological society of America*, 87(2): 327-341.
- Boore, D. M. and Thompson, E. M., 2015- Revisions to some parameters used in stochastic-method simulations of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Boore, D. M., 1983- Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6A): 1865-1894.
- Boore, D. M., 2003- Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and applied geophysics*, 160(3-4): 635-676.
- Boore, D. M., 2005- SMSIM---Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.3---A Revision of OFR 96-80-A.
- Boore, D. M., 2009- Comparing Stochastic Point-Source and Finite-Source Ground-Motion Simulations: SMSIM and EXSIM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6): 3202-3216.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E. and Atkinson, G. M., 2014- NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-Damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1057-1085.
- Brune, J. N., 1970- Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26): 4997-5009.
- Brune, J. N., 1971- Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes: correction. *Journal of Geophysical Research*, 76: 5002.
- Chen, S. Z. and Atkinson, G. M., 2002- Global comparisons of earthquake source spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(3): 885-895.
- Coburn, A., Spence, R. and Pomonis, A., 1992- Factors determining human casualty levels in earthquakes: mortality prediction in building collapse, *Proceedings of the tenth world conference on earthquake engineering*, pp. 5989-5994.
- Crane, S. and Motazedian, D., 2014- Low-frequency scaling applied to stochastic finite-fault modeling. *Journal of seismology*, 18(1): 109-122.
- Gholipour, Y., Bozorgnia, Y., Rahnama, M., Berberian, M., Ghorashi, M., Talebian, Nazari, H., Shoja-Taheri, J. and Shafiei, A., 2008- Probabilistic seismic hazard analysis - phase I, greater tehran regions, 180.
- Hamzehloo, H. and Mahood, M., 2012- Ground-motion attenuation relationship for east central Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6): 2677-2684.
- Hassani, B., Zafarani, H., Farjoodi, J. and Ansari, A., 2011- Estimation of site amplification, attenuation and source spectra of S-waves in the East-Central Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(10): 1397-1413.
- Jackson, J., 2001- Living with earthquakes: know your faults. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(S1): 5-123.
- JICA, 2000- The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran. *Japan International Cooperation Agency*, pp. 379.
- Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1981- Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6): 2011-2038.
- Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A. and Hamzehloo, H., 2015- A Ground-Motion Predictive Model for Iran and Turkey for Horizontal PGA, PGV, and 5% Damped Response Spectrum: Investigation of Possible Regional Effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A): 963-980.

- Landgraf, A., Ballato, P., Strecker, M. R., Friedrich, A., Tabatabaei, S. H. and Shahpasandzadeh, M., 2009- Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Mosha Fasham Fault, Alborz mountains Iran: implications for fault-system evolution and interaction in a changing tectonic regime. *Geophysical Journal International*, 177(2): 676-690.
- Motazedian, D. and Atkinson, G. M., 2005- Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3): 995-1010.
- Motazedian, D., 2006- Region-Specific Key Seismic Parameters for Earthquakes in Northern Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A): 1383-1395.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Salamati, R., Shahidi, A., Habibi, H., Ghorashi, M. and Bavandpur, A. K., 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.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M. and Saidi, A., 2012- Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran). *Journal of Geophysical Research*, 117(B6).
- Ritz, J., Balescu, S., Soleymani, S., Abbassi, M., Nazari, H., Feghhi, K., Shabanian, E., Tabassi, H., Farbod, Y. and Lamothe, M., 2003- Determining the long-term slip rate along the Mosha Fault, Central Alborz, Iran. Implications in terms of seismic activity, *Proceedings of the 4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, pp. 12-14.
- Samaei, M. and Miyajima, M., 2016- Source Spectra of 2012 Ahar-Varzaghan Double Earthquakes, Northwestern Iran *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 18(1): 1-11.
- Samaei, M., Miyajima, M. and Nojima, N., 2016a- Attenuation of Fourier spectra for 2012 Ahar-Varzaghan earthquakes, Northwestern Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 41(4): 23-38.
- Samaei, M., Miyajima, M., Saffari, H. and Tsurugi, M., 2012- Finite Fault Modeling of Future Large Earthquake from North Tehran Fault in Karaj, Iran. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering and Earthquake Engineering (SE/EE))*, 68(4): I_20-I_30.
- Samaei, M., Miyajima, M., Tsurugi, M. and Fallahi, A., 2013- Source and Path Parameters for Recorded Earthquakes in Tehran Province, Iran. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering and Earthquake Engineering (SE/EE))*, 69(4): I_980-I_988.
- Samaei, M., Miyajima, M., Yazdani, A. and Jaafari, A., 2016b- High frequency decay parameter (κ) for Ahar-Varzaghan double earthquakes, Iran (Mw 6.5 and 6.3). *Journal of Earthquake and Tsunami*, 10(2): 1640006_1-1640006_14.
- Shafiee, A. and Azadi, A., 2007- Shear-wave velocity characteristics of geological units throughout Tehran City, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(1): 105-115.
- Shearer, P. M., 2009- Introduction to seismology. Cambridge University Press.
- Solaymani Azad, S., Ritz, J. F. and Abbassi, M. R., 2011- Left-lateral active deformation along the Mosha-North Tehran fault system (Iran): Morphotectonics and paleoseismological investigations. *Tectonophysics*, 497(1): 1-14.
- Spence, R. J., Scawthorn, C. and So, E., 2011- Human casualties in earthquakes: progress in modelling and mitigation, 29. Springer Science and Business Media.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbassi, A. and Fard, F. Y., 2012- Microseismicity and seismotectonics around the Mosha fault (Central Alborz, Iran). *Tectonophysics*, 544: 50-59.
- Trifunac, M. and Brady, A., 1975- On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(1): 139-162.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H. and Kanamori, H., 1999a- Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthquake spectra*, 15(3): 557-564.
- Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., Kanamori, H., Scrivner, C. W. and Worden, C. B., 1999b- TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. *Earthquake Spectra*, 15(3): 537-555.
- 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.
- Yaghmaei-Sabegh, S. and Lam, N. T., 2010- Ground motion modelling in Tehran based on the stochastic method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(7): 525-535.
- Yaghmaei-Sabegh, S., Shoghian, Z. and Sheikh, M. N., 2014- A new model for the prediction of earthquake ground-motion duration in Iran. *Natural hazards*, 70(1): 69-92.
- Yaghmaei-Sabegh, S., Tsang, H. H. and Lam, N. T., 2011- Conversion between Peak Ground Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity Values. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(7): 1138-1155.
- Yazdani, A. and Kowsari, M., 2013- Earthquake ground-motion prediction equations for northern Iran. *Natural hazards*, 69(3): 1877-1894.
- Yenier, E. and Atkinson, G. M., 2014- Equivalent point-source modeling of moderate-to-large magnitude earthquakes and associated ground-motion saturation effects. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- 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.
- Zafarani, H., Vahidifard, H. and Ansari, A., 2013- Prediction of broadband ground-motion time histories: the case of Tehran, Iran. *Earthquake Spectra*, 29(2): 633-660.

Simulation of probable scenarios of earthquake occurrences in Tehran

M. Samaei^{1*}, A. Barzegari², M .R. Ghavimipناه², F. Ja'afari³ and A. Shami⁴

¹Postdoctoral Fellow, Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu, Japan

²Ph.D., Faculty of Basic Science, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³Ph.D. Student, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

⁴M.Sc., Faculty of Geography Sciences, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2016 February 16

Accepted: 2016 November 01

Abstract

Tehran metropolitan with a high population, existence of active faults, evidence of historical earthquakes and vulnerability of its infrastructures is exposed to a high seismic risk. In the present study, considering geological reports and papers published in the past decade, three scenario earthquakes for rupture of Mosha, Niavaran and Parchin faults are presented, and synthetic accelerograms were simulated in the Tehran metropolitan. Stochastic point source method with modification of distance parameter for considering finite fault effects is adopted; and results of studies carried out by International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES) in the recent years have been considered to account for site effects. Simulation results show considerable PGA values for Niavaran fault rupture in northern Tehran and for Parchin fault rupture in southern Tehran; also average Modified Mercalli Intensity (MMI) for these scenarios are equal to IX for districts 3 and 1 in Tehran, which indicates high damage potential in those areas. Using the simulation results, we have also carried out a preliminary estimation of casualty based on the assumed scenario earthquakes. Casualty (death toll) for rupture scenarios of Mosha, Niavaran and Parchin faults are estimated to be about 5000, 117000 and 85000, respectively.

Keywords: Earthquake simulation, Earthquake vulnerability, Damage prediction, Tehran seismicity

For Persian Version see pages 141 to 156

*Corresponding author: M. Samaei; E-mail: meghdad.samaei@gmail.com