

ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌ها در مناطق شهری پس از زلزله

مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی یک تهران

محمدعلی قنبری - دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.
بابک امیدوار* - دانشیار، گروه مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران؛ bomidvar@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۲ | تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱۶

چکیده

شهر تهران، به‌منزله‌ی پایتخت کشور و یک مجموعه‌ی شهری بزرگ، نقش عمده‌ای در فعالیت‌های سیاسی، اقتصادی، خدماتی و فرهنگی در مقیاس منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی ایفا می‌کند. وقوع هر سانحه‌ای در پایتخت می‌تواند تبعات گسترده‌ای، به‌ویژه در حوزه‌ی امنیت ملی، سیاست و اقتصاد، در پی داشته باشد. در این پژوهش مسئله‌ی فروریزش ساختمان‌ها در اثر زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی ساختمان‌هایی که فرو می‌ریزند، بیشترین خسارت‌ها و تلفات انسانی را با خود به همراه دارند. تبیین وضعیت ساختمان‌های منطقه‌ی یک شهر تهران، از نظر فروریزش، علاوه بر ترسیم وضعیت آینده‌ی منطقه پس از وقوع زلزله، می‌تواند عاملی برای اولویت دادن به برنامه‌های نوسازی و راهبردهای مقاوم‌سازی باشد. در این مسیر عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی ریسک فروریزش شامل نوع سازه، ارتفاع، آئین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای و نوع خاک همگی می‌توانند در قالب یک درخت منطقی در محاسبات دخیل شوند. منحنی شکست معیاری برای تعیین درصد احتمال حالت‌های خرابی است که در این پژوهش فقط حالت خرابی کامل مورد نظر است. توسعه‌ی منحنی‌های شکست منطبق بر شرایط منطقه اقدامی پیش‌گیرانه برای تطبیق هر چه بیشتر نتایج بر وضعیت موجود قلمداد می‌شود. در این مقاله، پس از بیان شیوه‌ی توسعه‌ی منحنی‌های شکست بومی، منطقه‌ی مورد مطالعه به سبب خصوصیات متغیر خاک به سلول‌های کوچک تقسیم می‌شود و برای هر یک تحلیل خسارتی مجزا، با استفاده از مقادیر محاسبه‌شده‌ی حداکثر شتاب زمین، صورت می‌گیرد. سپس با محاسبه‌ی احتمال فروریزش برای ساختمان‌های موجود بحرانی‌ترین شبکه‌ی سازه‌ای، از نظر میانگین و بیشینه‌ی احتمال فروریزش، تعیین می‌شود و دو سناریو برای مقاوم‌سازی به روش ارتقای آئین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای برای سازه‌ی بحرانی مورد نظر ارائه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: زلزله، منحنی شکست، احتمال فروریزش، مقاوم‌سازی

Collapse Risk Assessment of Urban Areas due to Earthquake

Case study: Municipal district No. 1 of Tehran Metropolitan

Mohammad Ali Ghanbari¹, Babak Omidvar²

ABSTRACT

The capital of Iran, Tehran, has a major role in the political, economic, cultural and services at the regional, national and international scale. Occurrence of any disaster in the capital could cause tremendous consequences, especially on national security, politic, and economy of the country. In this article, the collapse of the buildings due to earthquakes is investigated. Generally, collapsing the buildings will lead to the largest physical damage as well as human loss during an earthquake. Investigating the collapse of buildings at one of the regions in Tehran after the earthquake not only makes a clear view of that region future after disaster, but also it helps urban managers prioritize different retrofitting measures. In this regard, uncertainties influencing the risk assessment of the collapse is originated from the type of structures, height of buildings, applied seismic design codes, and type of soil are considered in the study using logic tree method. Fragility curve is a factor for determining the percentage chance of stating the damage and consequently, the collapse. Developing fragility curves based on region's conditions is a necessary task to justify the results of the study. In this paper, after introducing the local means of developing fragility curves, the studied region is divided into smaller cells based on soil characteristics and then the collapse risk of different buildings in each cell is studied separately based on a proposed algorithm. At the end, considering seismic analysis and collapse probability for existing buildings the most critical types of buildings would be determined based on the results of average and maximum collapse possibility. Furthermore, the results of collapse assessment are presented for two scenarios in order to evaluate retrofitting by enhancing of seismic design code.

Key Words: Earthquake, Fragility Curves, Probability of Collapse, Retrofitting.

1 M.Sc. Student in Natural Disaster Management, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 Associate Professor, Graduated Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran; bomidvar@ut.ac.ir

مقدمه

ساختمان‌ها با توجه به نوع سازه، آیین‌نامه‌ی طراحی، نوع خاک، مصالح ساختمانی و نوع کاربری خود می‌توانند دارای درجه‌های متفاوتی از آسیب‌پذیری باشند. در صورتی که ظرفیت ساختمان از تقاضای زلزله کمتر باشد، ساختمان وارد فازهای خرابی می‌شود که در بدترین حالت ساختمان وارد فاز خرابی کامل می‌شود. درصد مشخصی از ساختمان‌هایی که وارد فاز خرابی کامل می‌شوند، فرو می‌ریزند [۱].

واژگون شدن یا فروریزش کامل ساختمان‌ها، علاوه بر ایجاد بیشترین تلفات جانی، سنگین‌ترین خسارت‌های مالی را به مالکان ساختمان و یا شرکت‌های بیمه وارد می‌کند و امکان دسترسی برای امداد، به علت مسدود شدن معابر در اثر فروریزش ساختمان‌ها، با محدودیت همراه می‌شود. ارزیابی ریسک فروریزش در شهر تهران گام مهمی در مسیر مدیریت پیشگیری است تا با شناخت نقاطی که از احتمال بیشتری برای فروریزش برخوردارند و با انتخاب رویکردهای مناسب در فاز پیشگیری از تعداد تلفات و خسارت‌ها، در شهری که به گواه گزارش سال ۲۰۱۲ پایگاه بین‌المللی اطلاعات سوانح^۱ یکی از سه شهر پرمخاطره پس از توکیو و لس‌آنجلس در دنیا است، کاسته شود [۲].

به طور کلی می‌توان مطالعات مرتبط با این حوزه را در سه گروه طبقه‌بندی کرد که البته در مواردی نیز دارای اشتراک هستند. در اینجا به اختصار به ذکر چند نمونه بسنده می‌کنیم.

• مطالعات مربوط به آنالیز لرزه‌ای

دکتر زارع و همکاران رابطه‌ی کاهندگی تجربی را برای برآورد پارامترهای مختلف جنبش نیرومند زمین شامل PGV, PGA و PGD پیشنهاد داده‌اند [۳].

جعفری ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای را برای محدوده‌ی شمال تهران از دیدگاه شرایط ساختگاه انجام داده است و نتایج آن به صورت نقشه‌های ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای دوره‌ی طبیعی و دوره‌ی دینامیکی آبرفت، شتاب و سرعت بیشینه‌ی سطح زمین و ضریب بزرگ‌نمایی در محدوده‌های دوره‌ای مختلف ارائه شده است [۴].

زعفرانی و همکاران شش مؤلفه‌ی افقی تصادفی از حرکت زمین را بر مبنای نقاط ایستگاهی ثبت شتاب با فاصله‌ی ۵ کیلومتر از یکدیگر برای زمین سنگی با استفاده از یک روش تصادفی و برای همه‌ی سناریوهای فرضی ارائه داده‌اند که در ناحیه‌ی مستطیلی به ابعاد ۱۱۰ کیلومتر × ۹۵ کیلومتر قرار دارند و منطقه‌ی تهران را پوشش می‌دهند [۵].

• مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها

مطالعات متعددی در زمینه‌ی ارزیابی آسیب‌پذیری تهران انجام شده است که از آن جمله است: مطالعات آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا)، منحنی‌های شکست

امیدوار و درخشان با استفاده از روش‌های مشاهداتی و منحنی‌های شکست بر مبنای نظر خبرگان [۶، ۷، ۸].

امیدوار و شیرازی، در روشی دیگر، با استفاده از نظر خبرگان به محاسبه‌ی ماتریس‌های احتمال خرابی برای تعیین آسیب‌پذیری ساختمان‌های تهران پرداختند [۹].

• مطالعات ارزیابی ریسک فروریزش

در سال ۲۰۰۸ وضعیت ۱۶۰۰ ساختمان بتنی غیرشکل‌پذیر شهر لوس‌آنجلس، برای فروریزش لرزه‌ای، مورد مطالعه قرار گرفتند. این ساختمان‌ها به سبب ظرفیت فروریزش خود بیشترین خطر را برای ایمنی جانی^۲ در هنگام زلزله به خود اختصاص می‌دهند. این مطالعه که از منابع آنلاین (برخط) اطلاعات، بانک‌های اطلاعاتی به روز و بازرسی ساختمان‌ها بهره جسته است، توزیع جغرافیایی این ساختمان‌ها و همچنین مشخصات عمومی مرتبط با کاربری بر مبنای تعداد ساختمان‌ها، عمر ساخت، نوع کاربری و مالکیت را به نمایش گذاشته است. این اطلاعات با کمک نرم‌افزار HAZUS ساخت یک مدل فیزیکی و عددی شبیه‌سازی خسارت می‌انجامد. با به‌روزرسانی اطلاعات ورودی، خروجی‌های جدیدی از مدل‌های تحلیل خسارت ارائه می‌شود که نتایج آن‌ها انعکاس‌دهنده‌ی بهبود مقاوم‌سازی ساختمان‌ها بود [۱۰].

ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌های بتن مسلح موجود در کالیفرنیا در سال ۲۰۰۸ پایان‌نامه‌ای است که لیول در دانشگاه استنفورد ارائه داده است. مطابق این مطالعه بناهایی که قبل از آئین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ساخته شده‌اند، تهدیدی بر امنیت جامعه قلمداد می‌شوند [۱۱].

لیول و همکاران در سال ۲۰۰۹ تحلیل عدم قطعیت‌ها در ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از روش سطح پاسخ^۳ و شبیه‌سازی مونت کارلو^۴ شش تیپ از ساختمان‌های با قاب بتنی شکل‌پذیر و غیر شکل‌پذیر با ارتفاع و ظرفیت شکل‌پذیری متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ی این مطالعه بیانگر آن است که مشارکت عدم قطعیت‌ها در محاسبات منجر به افزایش پراکندگی انحراف معیار مرتبط با مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها (σ_{in}) در منحنی‌های پاسخ و همچنین تغییر در برآورد مقدار میانه شده است [۱۲].

در سال ۲۰۱۱ بهبود ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفت. در این مطالعه جرم و میرایی برای سازه‌ی چهارطبقه‌ی فلزی قاب خمشی ویژه در کلان‌شهر لوس‌آنجلس با آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی و با استفاده از تست Hybrid شبیه‌سازی شد. این مطالعه به پیشنهاد روشی برای تخمین λ_{col} (متغیری که بر ریسک فروریزش و منحنی‌های خطر جنبش نیرومند زمین دلالت می‌کند) انجامیده است [۱۳].

در سال ۲۰۱۱ روشی برای ارزیابی احتمالاتی فروریزش ساختمان‌ها پس از وقوع زمین‌لرزه مورد توجه قرار گرفت. این روش ابزاری محاسباتی برای ارزیابی خودکار^۵ و یا نیمه‌خودکار^۶ به شمار می‌آید. در این روش از شیوه‌ی انتگرال ریسک^۷، که برای ارزیابی احتمالی پیش از زمین‌لرزه نیز به کار می‌رود، استفاده شده

است. منحنی‌های شکست با استفاده از آنالیز غیرخطی و تحلیل دینامیکی به دست آمده‌اند [۱۴].

اگر بخواهیم مجموعه مطالعاتی را که تاکنون در مورد ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌ها انجام شده است جمع‌بندی کنیم، باید مفاهیم آن‌ها را در چهار گروه تقسیم کنیم:

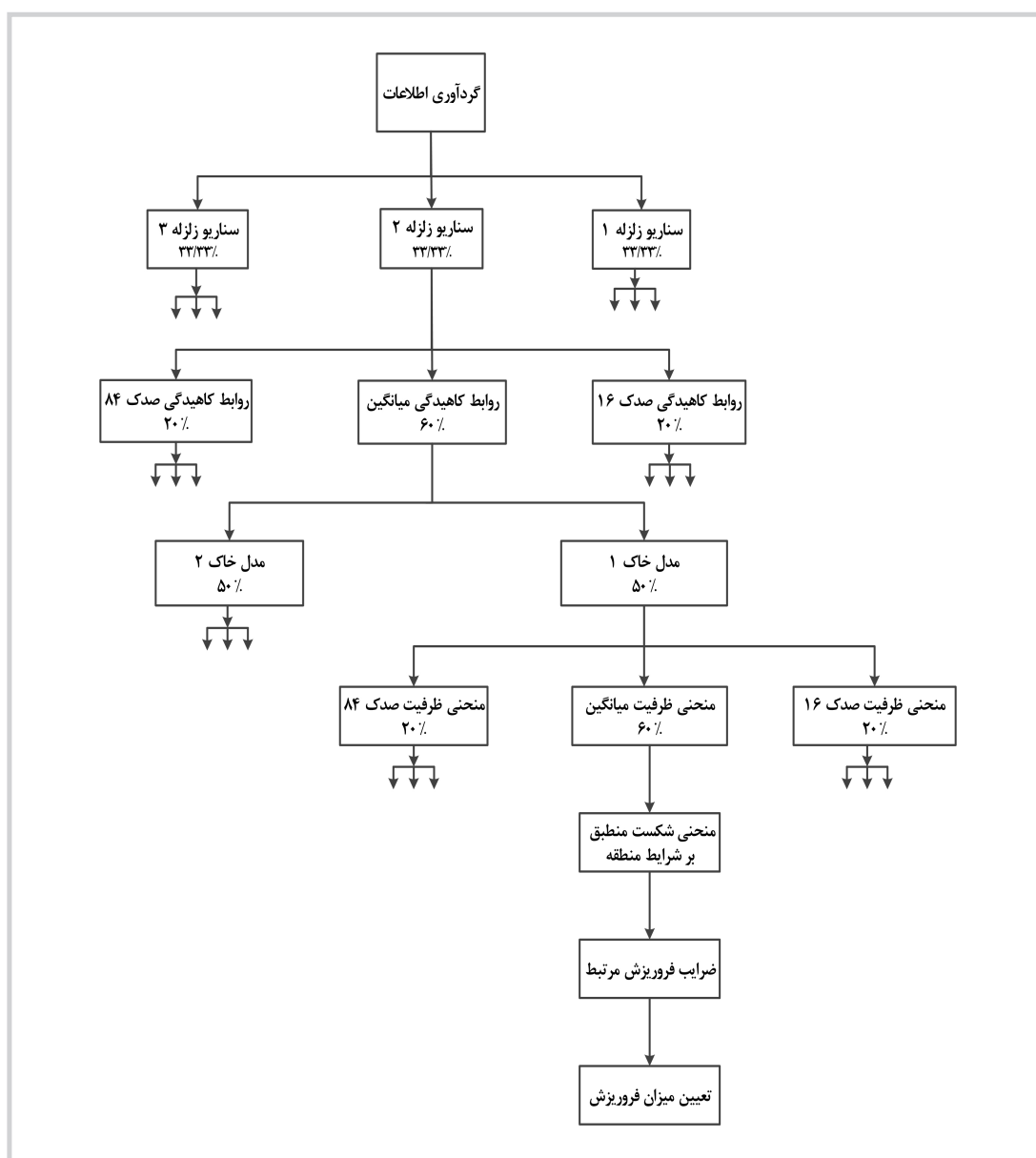
۱. مطالعاتی که فقط یک نظام سازه‌ای (ساختمان‌های قدیمی یا بتنی) را در سطح کل منطقه شناسایی کرده‌اند و تجمع آن‌ها به احتمال بیشتر فروریزش تعبیر شده است [۱۰].

۲. مطالعاتی که فقط یک نظام سازه‌ای خاص را برای حالت فروریزش بررسی کرده‌اند و منحنی‌های شکست مرتبط را ارائه کرده‌اند [۱۱، ۱۳].

۳. مطالعاتی که چند سازه‌ی قاب بتنی شکل‌پذیر و شکل‌ناپذیر را از نظر عواملی که دچار فروریزش می‌شوند با

استفاده از آنالیزهای دینامیکی بررسی کرده‌اند [۱۲].
۴. مطالعاتی که منحنی شکست را با استفاده از آنالیز غیرخطی و تحلیل دینامیکی پس از زلزله بررسی کرده‌اند [۱۴].

آنچه در مطالعات منحصر به ارزیابی ریسک فروریزش یافت نمی‌شود، بررسی وضعیت فروریزش تمام سازه‌های موجود با رویکرد منطقه‌ای، پس از وقوع زمین‌لرزه، است. این مطالعات زمانی ارزشمند هستند که وضعیت یک منطقه را با عدم قطعیت‌های خود در نوع سازه‌ها، ارتفاع و جنس خاک نشان دهند، چرا که وضعیت یک سازه‌ی خاص نمی‌تواند معیاری برای برنامه‌ریزی در فاز پیشگیری در سطح یک منطقه باشد. بنابراین در این پژوهش از رویکرد درخت منطقی و مطالعات آنالیز لرزه‌ای و مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها (که پیش‌تر نیز این مطالعات حتی در سطح یک منطقه انجام پذیرفته‌اند) در ارزیابی ریسک فروریزش



تصویر ۱: ساختار درخت منطقی

به نحوی استفاده شده است تا نقص ذکر شده برای مطالعات ارزیابی ریسک فروریزش نیز رفع شود. ذکر این نکته ضروری است که حتی در مطالعات جایکا نیز وضعیت فروریزش ساختمان‌ها مورد بررسی قرار نگرفته و فقط حالت خرابی کامل مورد نظر بوده است؛ همچنین بی‌توجهی به استفاده از منحنی‌های شکست، منطبق بر شرایط بومی منطقه، نیز از نکاتی است که می‌توان به آن اشاره کرد. بنابراین ما بر آنیم تا ارزیابی ریسک فروریزش را در سطح یک منطقه، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در سازه، ارتفاع و آئین‌نامه‌ی طراحی، با استفاده از منحنی‌های شکست مرتبط با وضعیت شهر تهران، انجام دهیم. برای نیل به این امر باید از ابزارهای مورد نیاز به نحوی استفاده کرد که نتایج حاصل از ارزیابی قابلیت مطابقت با شرایط بومی تهران را داشته باشد و بتوان از نتایج آن برای برنامه‌ریزی‌های راهبردی بهره جست. در این مقاله پس از بیان مبانی روش‌شناسی ارزیابی ریسک فروریزش، به بررسی منحنی‌های شکست بومی با استفاده از ماتریس‌های تحلیل خسارت می‌پردازیم و پس از آن نتایج ارزیابی ریسک فروریزش برای منطقه‌ی یک شهر تهران را ارائه می‌دهیم.

روش تحقیق و ابزارها

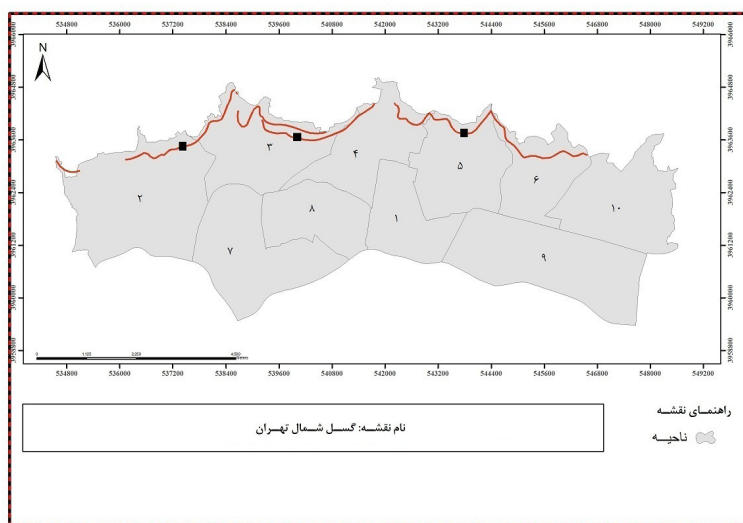
روش تحقیق در این مقاله مبتنی بر دو روش تجزیه و تحلیل سیستمی و ارزیابی تحلیلی است. تجزیه و تحلیل سیستمی در این مقاله شامل تشکیل ماتریس گونه‌های مختلف ساختمانی، جمع‌آوری اطلاعات پیرامون نوع سازه، ارتفاع طبقات و قدمت سازه، استفاده از منحنی‌های شکست منطبق بر داده‌ها و جنس خاک منطقه‌ی مورد مطالعه است. سپس با بهره‌گیری از روش ارزیابی تحلیلی و با در نظر گرفتن وضع موجود نواحی‌ای که در منطقه دچار فروریزش می‌شوند، مشخص می‌شوند. روش‌هایی که در مسیر ارزیابی ریسک فروریزش از آن‌ها استفاده شده، درخت منطقی^۸ و نظام اطلاعات جغرافیایی^۹ است. نرم‌افزار SELENA ابزاری کارا است که در مقایسه‌ی نرم‌افزارهای موجود از برتری‌های

زیادی برخوردار است. این نرم‌افزار، با استفاده از درخت منطقی، عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی ریسک فروریزش را با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به جنس خاک، سناریوها، روابط کاهندگی، منحنی‌های شکست و منحنی‌های ظرفیت و اطلاعات مربوط به منطقه ثبت می‌کند [۱۵]. در این مسیر استفاده از نرم‌افزار Arc GIS برای تبدیل اطلاعات جغرافیایی منطقه به فایل‌های متنی مورد استفاده در نرم‌افزار SELENA و بالعکس از اهمیت زیادی برخوردار است. نرم‌افزار Arc GIS در این تحقیق ابزاری است که ابتدا اطلاعات مکانی مربوط به ویژگی‌های منطقه را، برای استفاده در نرم‌افزار SELENA، تبدیل به فایل‌های متنی می‌کند و مجدداً پس از اتمام محاسبات، با گرفتن فایل‌های متنی (txt) از نرم‌افزار SELENA، خروجی‌های مورد نظر در مقیاس شبکه‌ای و ناحیه‌ای را به تصویر می‌کشد [۱۶]. نتایج مطالعات برآورد خسارت لرزه‌ای در برنامه‌ریزی برای کاهش خسارت ناشی از زلزله‌های لرزه‌ای آینده بسیار مهم است؛ به طوری که امکان مقاوم‌سازی و ایجاد طرح‌های مدیریت بحران را فراهم می‌سازد.

تئوری و محاسبات

در این مقاله، با استفاده از رویکرد درخت منطقی، عدم قطعیت‌های دخیل در محاسبات ریسک فروریزش مورد توجه قرار گرفته است. این عدم قطعیت‌ها شامل سناریوهای زلزله، روابط کاهندگی، نوع خاک (خاک غالب منطقه و خاک ضعیف‌تر) و منحنی‌های ظرفیت هستند. تصویر ۱ ساختار درخت منطقی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

برآورد خسارت لرزه‌ای با استفاده از منحنی‌های تقاضا^{۱۰}، شکست^{۱۱} و ظرفیت^{۱۲} انجام می‌پذیرد. در این مقاله منحنی تقاضا مبتنی بر ویژگی‌های زمین‌شناختی و گسل منطقه‌ی مورد نظر در قالب الگوی موجود در استاندارد FEMA محاسبه می‌شوند [۱]. در محاسبات منحنی‌های ظرفیت و درصدهای فروریزش از روابط مرجع استفاده شده است و از منحنی‌های بومی شهر تهران نیز



تصویر ۲: گسل شمال تهران

رده بندی خاک منطقه	توضیح نوع خاک	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
I	سنگ بسیار سخت	> ۱۵۰۰
II	سنگ	۱۵۰۰-۷۶۰
III	خاک بسیار متراکم و سنگ نرم	۷۶۰-۳۶۰
IV	خاک سفت	۳۶۰-۱۸۰
V	خاک نرم، پروفایل خاک با بیش از ۳ متر رس نرم. خاک با اندیس پلاستیسیته بزرگتر از ۲۰ و درصد رطوبت بیش از ۴۰٪	< ۱۸۰
VI	خاکی که نیازمند ارزیابی در منطقه است.	-

اهمیت بالایی برخوردار است. گسل شمال تهران در مرز بین بخش کوهستانی شمالی و منطقه‌ی شهری قرار دارد و بیش از ۹۰ کیلومتر امتداد دارد؛ اما بخش شمال غربی آن دور از شهر تهران است. گذرگاه این گسل شمال شرقی-جنوب غربی است و به صورتی ملایم به طرف جنوب متمایل است. تصویر ۲ نشان دهنده‌ی موقعیت این گسل در منطقه است [۱۷].

• روابط کاهندگی

در این مقاله از رابطه‌ی طیفی کمپیل - بزرگ‌نیا برای به دست آوردن شتاب ناشی از فعالیت گسل‌های فوق استفاده شده است. این رابطه برای زلزله‌های پوسته‌ای سطحی، با بزرگای لنگری بزرگ‌تر از پنج و فاصله‌ی کانونی کمتر از ۶۰ کیلومتر معتبر است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت مرتبط با رابطه‌ی کاهندگی از سه رابطه‌ی کاهندگی کمپیل - بزرگ‌نیا برای شرایط میانگین و $\pm \sigma$ میانگین استفاده شده است [۱۸].

• نوع خاک

نوع خاک منطقه‌ی مورد مطالعه با توجه به اطلاعات گرفته شده از شهرداری منطقه‌ی یک شهر تهران در رده‌های II, IV, و V از جدول ۱ قرار می‌گیرند.

در این مقاله با توجه به تفاوت جنس خاک در منطقه و برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در محاسبات و برای افزایش دقت محاسبات و به حداقل رساندن درصد خطا منطقه به قطعات مساوی تقسیم می‌شود. با توجه به اطلاعات در دسترس خاک، منطقه به ۱۲۳ سلول به ابعاد ۶۰۰×۶۰۰ متر تقسیم گردید تا در هر سلول، جنس خاک را بتوان ثابت فرض کرد (تصویر ۳). در ارزیابی ریسک فروریزش، برای هر یک از مربع‌های شبکه، یک تحلیل جداگانه انجام می‌پذیرد. این بدان معناست که مشخصات سازه‌هایی که در هر یک از این واحدها قرار دارند، بر حسب ارتفاع، نوع آیین‌نامه‌ی طراحی و سطح زیربنا نسبت به واحد دیگر تفاوت دارند. مجموعه‌ی ۱۲۳ سلول مربع، ۱۲۳ ارزیابی ریسک فروریزش منحصر به فرد را در بر دارد که، با توجه به تفاوت مختصات جغرافیایی این سلول‌ها، فواصل آن‌ها نیز از گسل متغیر و نتایج تحلیل‌ها متفاوت خواهد بود.

محاسبات مرتبط با منحنی‌های ظرفیت

منحنی‌های ظرفیت ساختمان بیانگر شتاب طیفی سازه در برابر جابه‌جایی‌های طیفی آن است. آئین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای، نوع سازه و ارتفاع طبقات از موارد عمده‌ای هستند که در منحنی‌های ظرفیت یک ساختمان اثرگذارند. در این مقاله ساختمان‌های مسکونی منطقه‌ی یک شهر تهران با توجه به نوع سازه، آیین‌نامه‌ی طراحی و ارتفاع خود به ۲۲ گونه طبقه‌بندی شدند که مطابق هر حالت از منحنی‌های ظرفیت مرتبط استفاده شده است (جدول ۲). برای تهیه‌ی این جدول اطلاعات پیرامون نوع سازه، قدمت سازه و ارتفاع آن در سطح منطقه‌ی یک شهر تهران با استفاده از داده‌های مطالعات انجام شده در منطقه به‌ویژه

در محاسبات منحنی‌های شکست بهره گرفته شده است. برای استفاده از این منحنی‌ها به مجموعه‌ای از داده‌ها نیاز داریم.

گروه اول طیف پاسخ لرزه‌ای در محل ساختمان‌ها یا در مرکز ناحیه‌ی مورد نظر است که در ساختمان‌های مورد بررسی واقع شده‌اند. طیف پاسخ حداکثر شتاب زمین^{۱۳} و تغییر مکان دائمی زمین^{۱۴} در محل ساختمان یا در مرکز منطقه‌ی مورد مطالعه همان خروجی‌های مربوط به اندازه‌گیری پارامترهای جنبش زمین هستند که یکی از راه‌های محاسبه‌ی آن استفاده از روابط کاهندگی است. گروه دوم در بر دارنده‌ی منحنی‌های ظرفیت متناظر با گونه‌های ساختمانی موجود با در نظر گرفتن آیین‌نامه‌ی طراحی، ارتفاع و جنس سازه‌ی آن‌ها است.

گروه سوم منحنی‌های شکست مبتنی بر شرایط بومی منطقه و جنس سازه‌ها است. خروجی منحنی شکست یک برآورد از احتمال تجمعی مربوط به هر یک از حالات خسارت ساختمانی است که به واسطه‌ی آن احتمال قرار گرفتن در آن حالت خسارت یا فراتر از آن به ازای سطح مشخصی از جنبش زمین یا شکست زمین به دست می‌آید. احتمال گسست مربوط به هر حالت خسارت از تفاضل احتمالات تجمعی به دست می‌آید.

محاسبات مرتبط با تقاضای لرزه‌ای

طیف پاسخ لرزه‌ای، که مبین تقاضای لرزه‌ای وارده بر ساختمان‌هاست، شامل برآورد پارامترهای حرکتی زمین و تأثیر جنس خاک بر آن‌ها است. با آزاد شدن انرژی یک گسل، با توجه به شرایط ساختگاهی منطقه، امواج به اطراف گسیل می‌شوند. حداکثر شتاب زمین عامل مهمی است که با توجه به ویژگی‌های ساختاری گسل اعم از عمق کانونی، طول گسل و مکانیسم عملکردی گسل و خاک منطقه تعیین می‌شود.

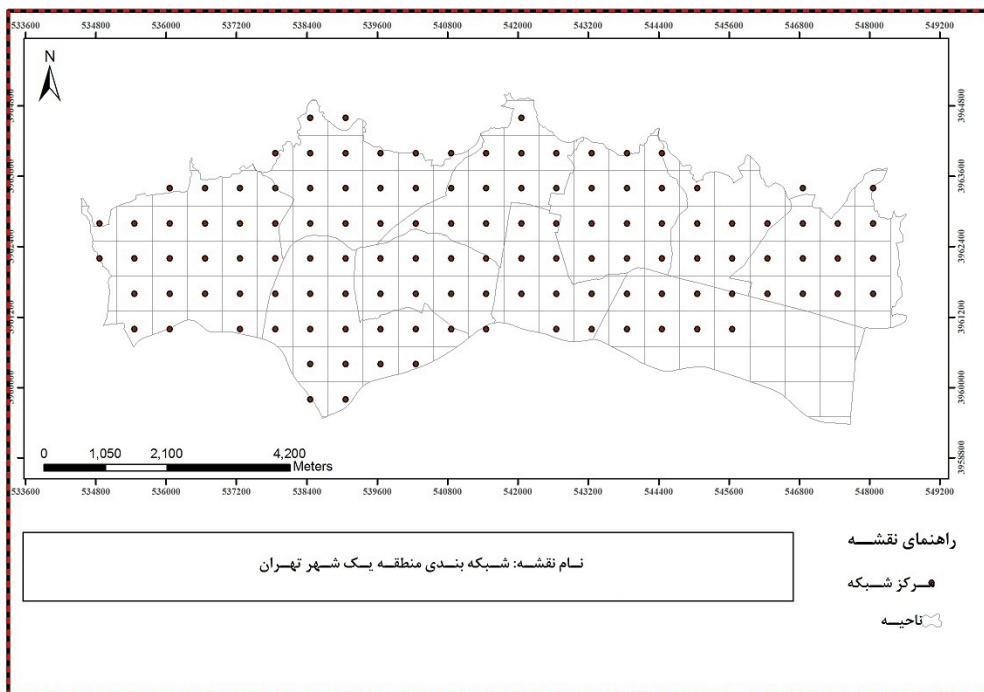
• ساز و کار گسل شمال تهران

در این مقاله فعالیت گسل شمال تهران برای منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است. این گسل به این سبب که نزدیک‌ترین گسل اصلی قرار گرفته در منطقه‌ی یک شهر تهران است، از

جدول ۲: طبقه‌بندی ساختمان‌های منطقه‌ی یک شهر تهران

کد سازه	گونه‌ی ساختمانی	ارتفاع سازه	درصد مساحت در ۱۲۳ سول	آیین نامه طراحی لرزه‌ای	تعداد طبقات
S2-LL	ساختمان فولادی مهاربندی شده	کوتاه مرتبه	۱/۴۴	(۲)	۱-۲
S2-LM	ساختمان فولادی مهاربندی شده	کوتاه مرتبه	۰/۹۱	(۳)	۱-۲
S2-LP	ساختمان فولادی مهاربندی شده	کوتاه مرتبه	۱/۶۲	(۱)	۱-۲
S2-ML	ساختمان فولادی مهاربندی شده	میان مرتبه	۳/۸۵	(۲)	۴-۷
S2-MP	ساختمان فولادی مهاربندی شده	میان مرتبه	۳/۶۶	(۱)	۴-۷
S2-HP	ساختمان فولادی مهاربندی شده	بلند مرتبه	۰/۴۵	(۱)	+۸
S1-HL	ساختمان فولادی قاب خمشی	بلند مرتبه	۰/۹۳	(۲)	+۸
S1-MM	ساختمان فولادی قاب خمشی	میان مرتبه	۲۹/۰۰	(۳)	۴-۷
S1-HM	ساختمان فولادی قاب خمشی	بلند مرتبه	۲/۸۸	(۳)	+۸
C1-LP	سازه‌ی بتنی قاب خمشی	کوتاه مرتبه	۰/۵۲	(۱)	۱-۲
C1-MP	سازه‌ی بتنی قاب خمشی	میان مرتبه	۳/۲۲	(۱)	۴-۷
C1-LL	سازه‌ی بتنی قاب خمشی	کوتاه مرتبه	۰/۲۴	(۲)	۱-۲
C2-HP	سازه‌ی بتنی قاب خمشی	بلند مرتبه	۰/۰۷	(۱)	+۸
C2-LM	سازه‌ی بتنی قاب خمشی	کوتاه مرتبه	۱/۲۷	(۳)	۱-۲
C2-MM	سازه‌ی بتنی با دیوار برشی	میان مرتبه	۹/۶۶	(۳)	۴-۷
C2-HM	سازه‌ی بتنی با دیوار برشی	بلند مرتبه	۲/۴۶	(۳)	+۸
C2-ML	سازه‌ی بتنی با دیوار برشی	میان مرتبه	۳/۲۹	(۲)	۴-۷
C2-HL	سازه‌ی بتنی با دیوار برشی	بلند مرتبه	۰/۵۹	(۲)	+۸
URM-LP	مصالح بنایی بدون کلاف بندی	کوتاه مرتبه	۴/۵۷	(۱)	۱-۲
URM-ML	مصالح بنایی کلاف بندی شده	میان مرتبه	۷/۷۵	(۲)	+۳
URM-LL	مصالح بنایی کلاف بندی شده	کوتاه مرتبه	۵/۹۴	(۲)	۱-۲
URM-MP	مصالح بنایی بدون کلاف بندی	میان مرتبه	۱۵/۶۷	(۱)	+۳

- (۱): ساخته شده قبل از تدوین ویرایش اول آیین نامه‌ی ۲۸۰۰
 (۲): ساخته شده بعد از تدوین ویرایش اول آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ و قبل از تدوین ویرایش دوم آیین نامه‌ی ۲۸۰۰
 (۳): ساخته شده بعد از تدوین ویرایش دوم آیین نامه‌ی ۲۸۰۰



تصویر ۳: شبکه بندی منطقه‌ی یک شهر تهران

مطالعات مرتبط با برآورد آوار ناشی از زلزله و مجموعه داده‌های سازمان آمار و پایگاه مدیریت بحران منطقه‌ی یک شهر تهران [۲۰، ۲۱، ۲۲] به مثابه‌ی یک مجموعه‌ی مدون در قالب فایل GIS گردآوری شد و پس از آن طبقه‌بندی اطلاعات منطبق بر ساختار ورودی نرم‌افزار SELENA در قالب فایل‌های متنی انجام شد.

شکست برای چهار حالت خسارت سازه‌ای و غیرسازه‌ای سبک، متوسط، گسترده و کامل تهیه می‌گردد. برای خسارت سازه‌ای به ازای جابه‌جایی طیفی S_d ، احتمال قرار گرفتن در یک حالت خسارت مشخص ds یا گذشتن از آن به صورت رابطه‌ی ۱ مدل می‌شود [۱].

$$P[S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta ds} \ln\left(\frac{S_d}{S_{d0}}\right)\right] \quad \text{رابطه‌ی ۱:}$$

S_{d0} : مقدار میانه‌ی جابه‌جایی طیفی در ساختمانی که به آستانه‌ی حالت خرابی ds رسیده است (بر حسب متر).
 βds : انحراف معیار لگاریتم طبیعی جابه‌جایی طیفی مربوط به سطح خسارت ds .
 Φ : تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد.

منحنی‌های شکست نقشی تعیین‌کننده در فرایند ارزیابی ریسک فروریزش ایفا می‌کنند. چرا که احتمال فروریزش مد نظر، مبتنی بر نتایجی است که از منحنی‌های شکست به دست می‌آید. منحنی شکستی که منطبق بر شرایط بومی منطقه نباشد، به هیچ وجه نمی‌تواند احتمال فروریزش صحیحی را برای منطقه ارائه دهد. این امر بر ضرورت توسعه‌ی منحنی‌های شکست منطبق بر شرایط بومی منطقه تأکید دارد. در میان منحنی‌های شکست موجود، این منحنی‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار هستند.

محاسبات مرتبط با منحنی‌های شکست

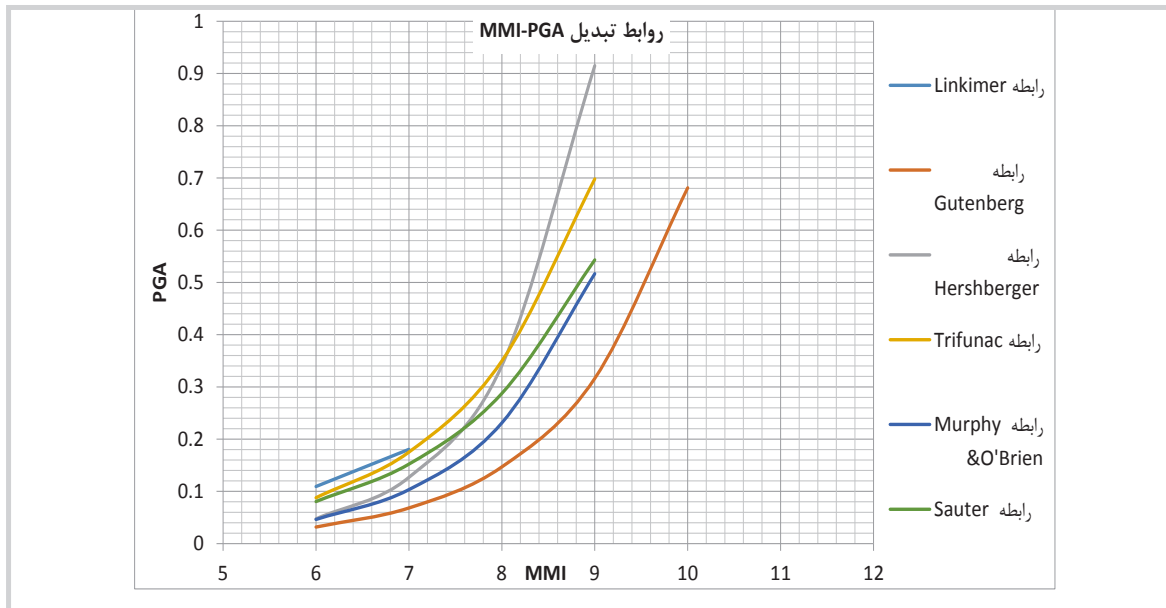
مطابق آنچه تاکنون ذکر شد، منحنی‌های ظرفیت و تقاضای لرزه‌ای به ترتیب با ویژگی‌های ساختمان‌های موجود در منطقه و گسل‌های قرار گرفته در آن مناسبت دارند. اما گروه سوم داده‌های مورد نیاز برای ارزیابی ریسک فروریزش منحنی‌های شکست هستند. منحنی‌های شکست احتمال تجاوز خسارت سازه از سطوح مختلف خرابی را با پارامتری از شدت زمین‌لرزه مرتبط می‌سازد. کاربرد این منحنی‌ها در مورد تعدادی از ساختمان‌ها تخمینی از نسبت درجات مختلف خسارت وارده پس از زلزله با توزیع شدت مشخص است. منحنی‌های شکست مربوط به خسارت سازه‌ای ساختمان‌ها توسط مقادیر میانه‌ی جابه‌جایی که به منزله‌ی آستانه‌ی ورود به خرابی کم، متوسط، گسترده و کامل تعریف می‌شود، توصیف می‌گردند. به طور کلی برآورد این جابه‌جایی‌ها برای هر نوع سیستم سازه (دربردارنده‌ی ارتفاع ساختمان و همچنین سطح طراحی لرزه‌ای) متفاوت است. منحنی‌های

جدول ۳: ماتریس‌های احتمال خرابی گونه‌ی ساختمانی URM(1)L [۹]

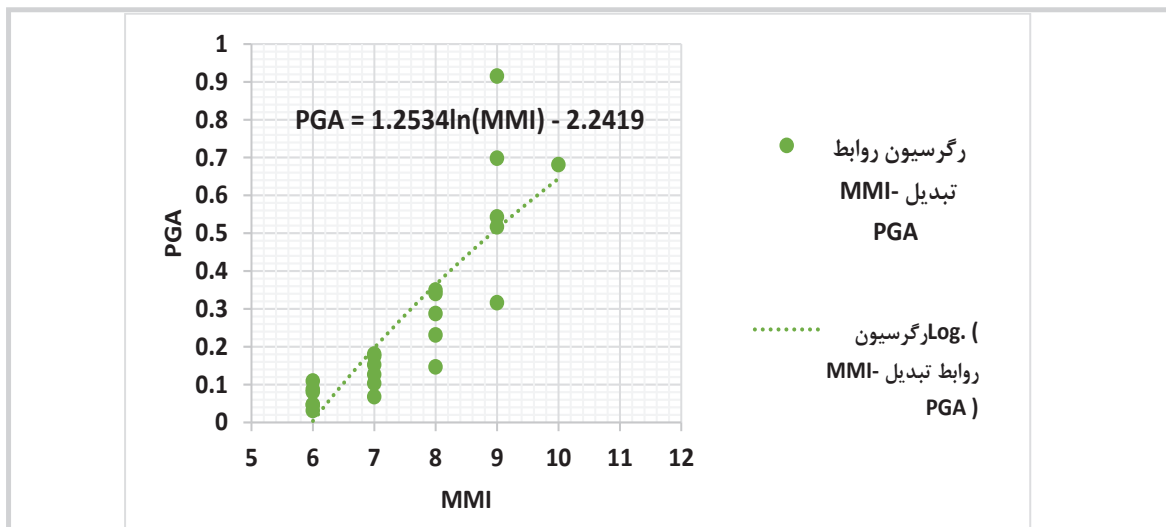
سطح خسارت	شدت مرکالی اصلاح شده						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
بدون خسارت	۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
خفیف	۵۱	۱۰/۶	۰/۲	۰/۱	۰	۰	۰
متوسط	۳۴	۶۴/۷	۱۳/۷	۳/۸	۰/۲	۰/۰۷۳	۰/۰۰۷
سنگین	۵	۲۴/۵	۶۲	۳۲/۵	۱۱/۸	۲/۸۱۱	۰/۳۰۳
کامل	۰	۰/۲	۲۴/۱	۶۳/۶	۸۸	۹۷/۱۱۶	۹۹/۶۹

جدول ۴: رابطه‌ی بین PGA (cm/s²) و MMI

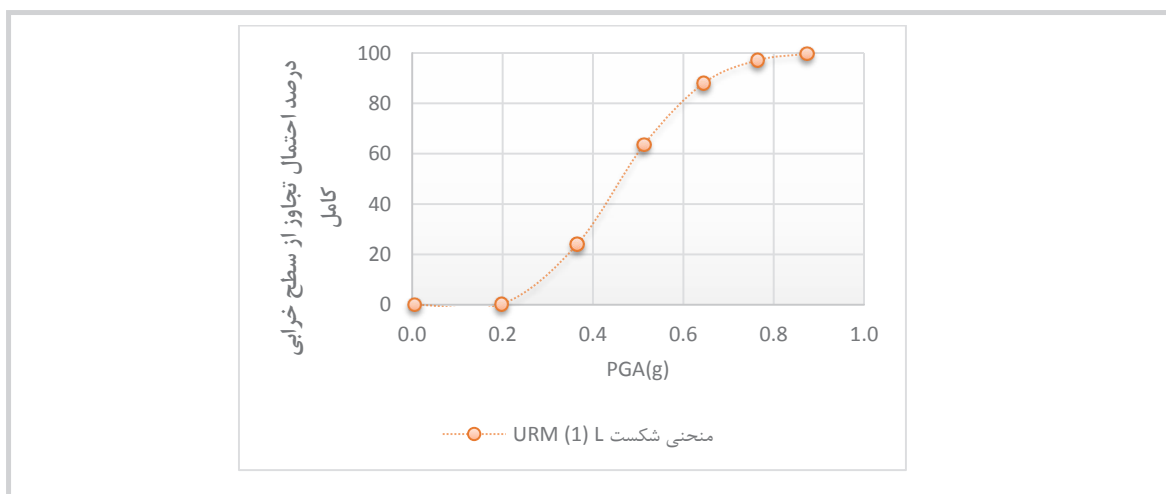
ردیف	عنوان رابطه	رابطه	مرجع
۱	Lipolt Linkimer	MMI=2/33log(PGA)+0/76 (from 2<MMI<5)	[۲۳]
۲	Lipolt Linkimer	MMI=4/60log(PGA)-3/38 (from 5<MMI<7)	[۲۳]
۳	Gutenberg & Richter	MMI=3/00log(PGA)+1/50	[۲۴]
۴	Hershberger	MMI=2/33log(PGA)+2/1	[۲۵]
۵	Trifunac & Brady	MMI=3/33log(PGA)-0/47 (from 4<MMI<10)	[۲۶]
۶	Murphy & O'Brien	MMI=2/86log(PGA)+1/24 (from 4<MMI<10)	[۲۷]
۷	Sauter & shah	MMI=3/62log(PGA)-0/9	[۲۸]



تصویر ۴: روابط تبدیل PGA-MMI



تصویر ۵: رگرسیون روابط تبدیل MMI -PGA



تصویر ۶: منحنی شکست برای سازه‌ی مصالح بنایی فاقد کلاف بندی

جدول ۵: درصد فروریختگی مدل‌های مختلف ساختمان [۱]

درصد فروریختگی (نسبت به حالت خسارت کامل)			مدل ساختمان	
بلندمرتبه	ارتفاع متوسط	کوتاه مرتبه		
۳	۳	۳	قاب چوبی سبک	W1
۳	۳	۳	چوبی، تجاری- صنعتی	W2
۳	۵	۸	قاب خمشی فولادی	S1
۳	۵	۸	قاب فولادی مهاربندی	S2
۳	۵	۸	قاب فولادی با دیوار برشی بتنی درجا ریخته	S4
۳	۵	۸	قاب فولادی با دیوار پرکننده از نوع مصالح بنایی	S5
۵	۱۰	۱۳	قاب خمشی بتن مسلح	C1
۵	۱۰	۱۳	بتنی با دیوار برشی	C2
۵	۱۳	۱۵	قاب بتنی با دیوار پرکننده مصالح بنایی غیرمسلح	C3
۱۰	۱۳	۱۵	قاب بتنی پیش ساخته با دیوار برشی بتنی	PC2
۵	۱۰	۱۳	دیوار بنایی مسلح با دیافراگم فلزی یا چوبی	RM1
۵	۱۰	۱۳	دیوار بنایی مسلح با دیافراگم بتنی پیش ساخته	RM2
۱۵	۱۵	۱۵	دیوار باربر بنایی غیرمسلح	URM

• منحنی‌های شکست HAZUS

سطح خسارت را به ازای شدت‌های مرکالی اصلاح شده^{۱۵}، برای تمامی گونه‌های ساختمانی، محاسبه کرده است. در این تحقیق ماتریس‌های خسارت بر اساس نظر خبرگان تهیه شده است. گام نخست برای به دست آوردن ماتریس‌های احتمال خرابی ساختمان‌ها شناسایی و دسته‌بندی گونه‌های مختلف ساختمانی از حیث مشابهت خسارت در برابر زلزله است [۹].

شیرازی پس از بیان نحوه طبقه‌بندی و تعاریف سطوح خسارت نهایتاً برای هر سیستم سازه‌ای یک ماتریس احتمال خرابی برای هر یک از سطوح خسارت ارائه می‌دهد. جدول ۳ بیانگر نمونه‌ای از این جدول‌ها برای ساختمان مصالح بنایی فاقد کلاف‌بندی URM(1)L است.

تهیه‌ی منحنی‌های شکست از ماتریس‌های احتمال خرابی

با توجه به آنچه بیان شد، منحنی‌های شکست جایکا علاوه بر آنکه تمامی حالات خسارت را در بر نمی‌گیرد، طبقه‌بندی محدودی از سازه‌ها ارائه می‌دهد. منحنی‌های جلالیان نیز برای برخی سطوح خسارت ساختمان‌های بتنی ارائه کرده است. منحنی‌های مرجع HAZUS نیز با توجه به تمام مزیت‌های خود قابل انطباق با شرایط بومی نیستند. بنابراین ماتریس‌های احتمال خرابی شیرازی با توجه به طبقه‌بندی گسترده‌ی سازه‌ها، ارتفاع طبقات و آئین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای مناسب‌ترین گزینه خواهند بود.

برای استفاده از ماتریس‌های احتمال خرابی شیرازی باید مشخصه‌ی زلزله از شدت زلزله به واحد بزرگی زلزله تغییر داده شود تا بتوان در کنار مجموعه منحنی‌های ظرفیت و تقاضای لرزه‌ای موجود از آن استفاده کرد.

منحنی‌های شکست مربوط به خسارت سازه‌ای ساختمان‌ها با مقادیر میانه‌ی جابه‌جایی طیفی آستانه‌ی خرابی خسارت کم، متوسط، گسترده و کامل توصیف می‌گردند. به طور کلی برآورد این جابه‌جایی‌ها برای هر نوع مدل ساختمان (در بر دارنده‌ی ارتفاع ساختمان و همچنین سطح طراحی لرزه‌ای) متفاوت است [۱].

• منحنی‌های شکست ارائه شده در گزارش جایکا

آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا) با همکاری مرکز مطالعات زلزله و زیست‌محیطی تهران پروژه‌ای با عنوان ریزپهنه‌بندی زلزله در تهران بزرگ را در سال ۱۳۷۸ شمسی آغاز کردند. در این طرح ساختمان‌ها به ۹ گروه تقسیم می‌شوند. طبق تعریف جایکا آسیب عبارت است از اینکه ساختمان خرابی سنگین داشته باشد و یا فروریزش کند [۶].

• منحنی‌های شکست جلالیان

در منحنی‌های شکست ارائه شده از جانب جلالیان حداکثر شتاب زمین به منزله‌ی پارامتر زلزله در نظر گرفته شده است و برای ساختمان‌های مصالح بنایی و اسکلت بتن مسلح ارائه شده است. جلالیان برای ساختمان‌های بتنی در محدوده‌ی خرابی ۳۰٪-۶۰٪ منحنی شکستی ارائه کرده است [۲۹].

• ماتریس‌های احتمال خرابی شیرازی

شیرازی، با استفاده از روش مبتنی بر نظر خبرگان، ساختمان‌های شهر تهران را بر اساس فاکتورهای جنس مصالح، سیستم مقاوم در برابر بار جانبی، ارتفاع، کاربری و عمر سازه به ۳۱ گونه تقسیم کرده است. با در نظر گرفتن پنج سطح خسارت (بدون خسارت، ناچیز، متوسط، سنگین و کامل)، احتمال هر

برای تبدیل واحد شدت مرکالی اصلاح شده به حداکثر شتاب زمین، روابط مطرحی در دنیا وجود دارد که جدول ۴ مجموعه‌ای از این روابط را به نمایش گذاشته است.

با استفاده از روابط جدول ۴ و با توجه به بازه‌ی شدت مرکالی اصلاح شده‌ی موجود در ماتریس‌های احتمال خرابی ($6 < MMI < 12$)، غیر از رابطه‌ی شماره‌ی یک، بقیه‌ی روابط با توجه به بازه قابلیت استفاده برای تبدیل واحد را دارند. تصویر ۴ نمایش دهنده‌ی ارتباط بین PGA و MMI برای شش رابطه‌ی موجود در دنیا است.

با توجه به تصویر ۴ می‌توان منحنی رگرسیون را برای مجموعه روابط فوق ترسیم کرد، به نحوی که منحنی ترسیم شده در تصویر ۵ مبین رابطه‌ی نهایی PGA و MMI خواهد بود.

رابطه‌ی ۲: $PGA = 1/2534 \ln(MMI) - 2/2419$

گام نهایی اصلاح منحنی‌های شکست، استفاده از ماتریس‌های احتمال خرابی شیرازی برای محاسبه‌ی احتمال حالت خرابی کامل در سازه‌های موجود است. در تصویر ۶ نمونه‌ای از منحنی شکست برای سازه‌ی URM(1)L نشان داده شده است. سایر منحنی‌های مورد استفاده برای سازه‌های موجود در منطقه نیز به همین نحو تولید می‌شوند.

محاسبه‌ی درصد فروریزش ساختمان‌ها در اثر زلزله

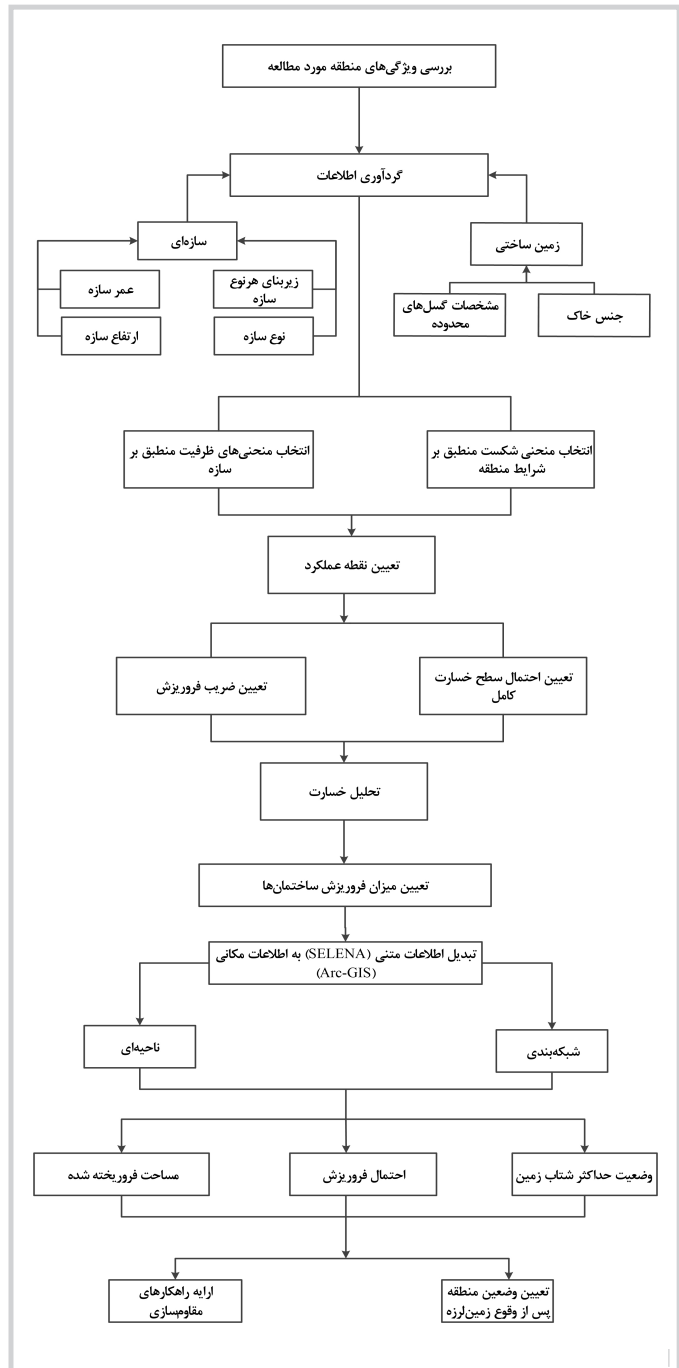
در دستورالعمل HAZUS ۹۹ ایالات متحده، که آژانس مدیریت اضطرار فدرال^{۱۶} آن را منتشر کرده است، درصد مشخصی از مجموعه ساختمان‌هایی که وارد فاز خرابی کامل می‌گردند، دچار فروریزش می‌شوند. درصدهای فروریزش با توجه به نوع سازه و ارتفاع آن تعیین می‌گردد. در این مسیر پس از مشخص شدن مساحت‌های خسارت دیده‌ی همه‌ی سازه‌ها برای سطح خسارت کامل، با استفاده از منحنی‌های شکست بومی، درصد مشخصی از آن‌ها دچار فروریزش می‌شوند که این درصد برای سازه‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد. در این مقاله سطوح خسارت، مطابق تعاریف موجود در دستورالعمل HAZUS استفاده شده و درصدهای فروریزش نیز وابسته به تعریف سطوح خرابی در سازه‌های مختلف است. بنابراین معیار واحدی برای سازه‌های موجود در نظر گرفته شده و منحنی‌های ظرفیت و درصدهای فروریزش همگی از روابط مرجع که مبتنی بر نوع سازه هستند مشخص می‌شوند و شرایط ساختگاهی در تعیین آن‌ها نقشی ندارد. درحالی‌که منحنی‌های شکست، که با احتمال وارد شدن به فازهای خرابی سر و کار دارد، را نمی‌توان صرفاً به نوع یک سازه وابسته کرد؛ بنابراین منحنی‌های شکست منطبق بر شرایط شهر تهران مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۵ بیانگر مقادیر مختلف این درصد برای سازه‌های گوناگون است [۱].

الگوریتم پیشنهادی

فرایند ارزیابی ریسک فروریزش از گردآوری اطلاعات تا ارائه‌ی راهکارهای مقاوم‌سازی در قالب یک الگوریتم تدوین شده است. تصویر ۷ مجموعه گام‌های متوالی در مسیر ارزیابی ریسک فروریزش را نشان می‌دهد.

بحث و نتایج

منطقه‌ی یک شهر تهران، با ۱۰ ناحیه و ۲۶ محله، به سبب در برداشتن سفارت‌خانه‌های متعدد و نقاط حساس از نظر سیاسی و امنیتی حائز اهمیت است. واقع شدن این منطقه بر گسل اصلی شمال تهران و زیرشاخه‌های آن، در کنار وجود بافت‌های فرسوده



تصویر ۷: الگوریتم ارزیابی ریسک فروریزش

جدول ۶: بازه‌ی تغییرات حداکثر شتاب زمین در شبکه بندی (g)

۰/۷۸۸۵	میانگین حداکثر شتاب زمین
۰/۹۷۱۴	بیشینه‌ی حداکثر شتاب زمین
۰/۶۴۲۶	کمینه‌ی حداکثر شتاب زمین
۰/۶۸۷۹	صدک ۱۶ حداکثر شتاب زمین
۰/۸۹۴۱	صدک ۸۴ حداکثر شتاب زمین

در نواحی ده‌گانه، این منطقه را در برابر خطر زلزله آسیب پذیر کرده است.

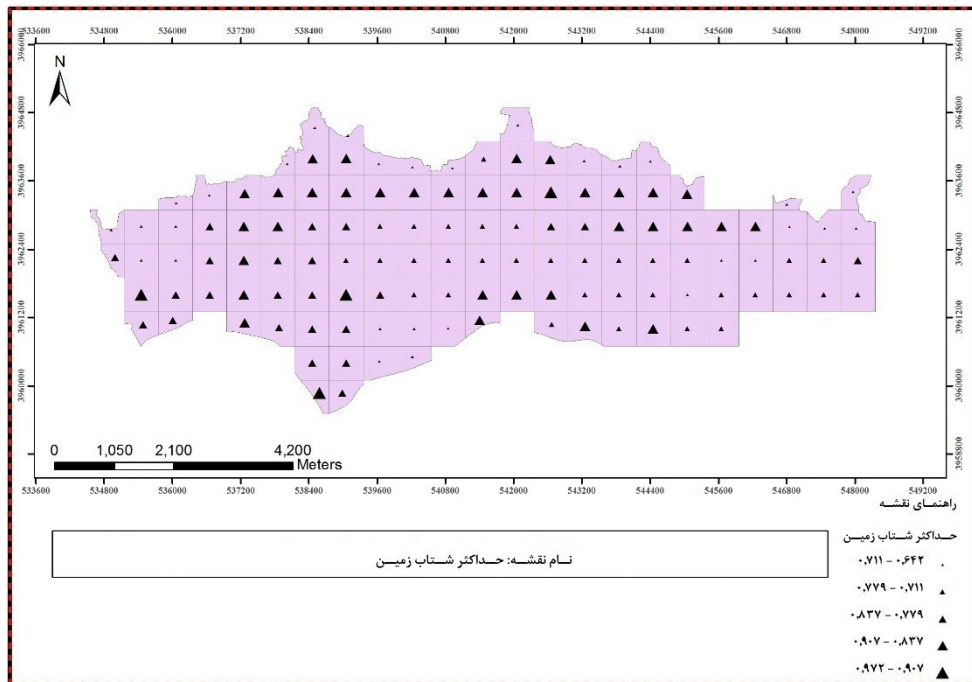
در این مقاله، پس از توسعه‌ی منحنی‌های شکست منطبق بر شرایط بومی شهر تهران و با توجه به ویژگی ساز و کار گسل شمال تهران و خاک متغیر منطقه، تعداد ۱۲۳ آنالیز مجزا برای ارزیابی ریسک فروریزش در هر سلول از شبکه صورت پذیرفت. اساس همه‌ی محاسبات بر مبنای جنس خاک و میزان حداکثر شتاب زمین در محل سازه‌ها است. با بررسی‌ای که در وضعیت خاک منطقه صورت گرفت، با دیدگاه ناحیه‌ای یا محله‌محور، در هر محله یا ناحیه نیز شاهد جنس متفاوتی از خاک بودیم و این امکان نبود تا برای محاسبات جنس خاک ثابتی را در یک محله یا ناحیه فرض کنیم. درحالی‌که با شبکه‌بندی در سطح منطقه در هر سلول کوچک جنس خاک غالب تعیین شد تا با حداقل خطا محاسبات برای یک نوع خاک انجام پذیرد؛ بنابراین در سلول‌های مجاور نیز می‌توانست جنس خاک متفاوت باشد. برای این منظور در هر سلول مرکز جغرافیایی آن تعیین شد تا فاصله‌ی آن از گسل تعیین گردد، سپس با استفاده از داده‌های موجود در نظام اطلاعات جغرافیایی برای هر سلول، به صورت مجزا، ویژگی‌های سازه‌های موجود در آن سلول خاص محاسبه شد و یک آنالیز مجزا برای هر سلول انجام پذیرفت. در پایان، نتایج ارزیابی ریسک فروریزش برای ۱۲۳ سلول موجود در دو بخش نتایج آنالیز لرزه‌ای و نتایج احتمال فروریزش طبقه‌بندی شد. بخش احتمال فروریزش شامل ۲۲ نقشه به ازای هر یک از سازه‌های موجود در شبکه‌ها است که در بخش احتمال فروریزش، به اختصار یک نقشه آورده شده است.

جدول ۷: احتمال فروریزش در شبکه بندی منطقه

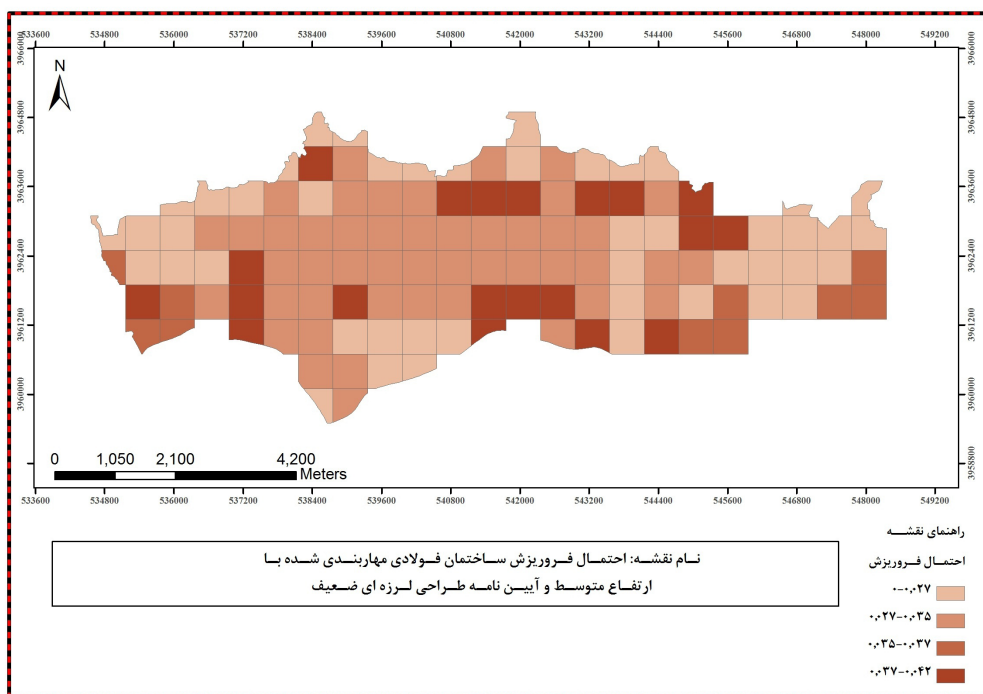
وضعیت احتمال فروریزش	ردیف	سازه	میانگین	بیشینه	صدک ۱۶	صدک ۸۴	وارانس (σ^2)
S1_MM	۲	۰/۰۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۲۸	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰۱	
S1_HM	۳	۰/۰۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۰	
S2_LL	۴	۰/۰۲۳	۰/۰۷۲	۰/۰۰۰	۰/۰۶۴	۰/۰۰۱۰	
S2_ML	۵	۰/۰۲۶	۰/۰۳۹	۰/۰۰۰	۰/۰۳۴	۰/۰۰۰۲	
S1_HL	۶	۰/۰۰۶	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۱	
S2_LP	۷	۰/۰۲۴	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰	۰/۰۶۹	۰/۰۰۱۲	
S2_MP	۸	۰/۰۲۸	۰/۰۴۲	۰/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۰۰۰۲	
S2_HP	۹	۰/۰۳۱	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	
C2_LM	۱۰	۰/۰۱۳	۰/۱۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱۰	
C2_MM	۱۱	۰/۰۱۵	۰/۰۷۹	۰/۰۲۲	۰/۰۷۷	۰/۰۰۰۴	
C2_HM	۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۳۴	۰/۰۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۱	
C1_LL	۱۳	۰/۰۱۲	۰/۱۱۸	۰/۰۰۰	۰/۰۵۳	۰/۰۰۱۳	
C2_ML	۱۴	۰/۰۲۱	۰/۰۳۸	۰/۰۰۰	۰/۰۷۰	۰/۰۰۱۲	
C2_HL	۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۳۷	۰/۰۰۰	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰۲	
C1_LP	۱۶	۰/۰۱۵	۰/۱۲۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱۵	
C1_MP	۱۷	۰/۰۲۱	۰/۰۸۷	۰/۰۰۰	۰/۰۷۰	۰/۰۰۱۲	
C2_HP	۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۳۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۱	
URM_LP	۱۹	۰/۰۰۷۲	۰/۱۴۵	۰/۰۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۰۴۲	
URM_ML	۲۰	۰/۰۰۷۴	۰/۱۳۵	۰/۰۴۱	۰/۱۳۲	۰/۰۰۱۸	
URM_LL	۲۱	۰/۰۰۳۷	۰/۱۴۴	۰/۰۰۰	۰/۱۳۰	۰/۰۰۳۴	
URM_MP	۲۲	۰/۰۰۸۰	۰/۱۴۵	۰/۰۰۰	۰/۱۲۷	۰/۰۰۳۵	

• نتایج آنالیز لرزه‌ای

مبنای محاسبات آنالیز لرزه‌ای، فعالیت لرزش سه نقطه در طول گسل شمال تهران است که در تصویر ۲ نشان داده شده است. طول طبیعی گسل شمال تهران را می‌توان در سه جزء مشاهده کرد که البته این اجزا از نظر ویژگی‌های لرزه‌ای برتری نسبت به هم ندارند. در این مقاله انتخاب سه نقطه به جای یک نقطه از کل گسل شمال تهران بر اساس تحت پوشش قرار دادن هر یک از نواحی مجاور با گسل و یک نقطه از هر جزء طولی برای دقیق‌تر شدن محاسبات و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها است. برای این منظور با توجه به ویژگی‌های گسل شمال تهران و عمق کانونی ۱۳ کیلومتر و بزرگی لنگری ۷/۲ و زاویه‌ی Dip ۷۵ درجه، مقادیر حداکثر شتاب زمین با استفاده از روابط سه‌گانه‌ی کاهندگی میانگین، صدک ۸۴ و صدک ۱۶ کمپبل-بزرگ‌نیا با توجه به شرایط ساختگاه و متفاوت بودن جنس خاک در منطقه، برای گسل شمال تهران محاسبه شد. بازه‌ی تغییرات حداکثر شتاب زمین در شبکه‌بندی را جدول ۶ نشان می‌دهد. همان‌گونه که تصویر ۸ نشان می‌دهد، مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) با تغییر مختصات جغرافیایی متفاوت هستند.



تصویر ۸: حداکثر شتاب زمین منطقه یک شهر تهران (g)



تصویر ۹: احتمال فروریزش سازی فولادی مهاربندی شده با ارتفاع متوسط و آیین نامه طراحی لرزه‌ای ضعیف

• نتایج احتمال فروریزش

می‌کند. از آنجا که توزیع سازه‌ها در منطقه متفاوت است، برخی از سلول‌ها فاقد همه‌ی سازه‌های موجود هستند؛ بنابراین در آن‌ها میزان احتمال فروریزش نیز صفر خواهد بود. از مقادیر میانگین و واریانس برای به تصویر کشیدن عدم قطعیت استفاده می‌شود. تصویر ۹ نمونه‌ای از خروجی محاسباتی نرم‌افزارهای SELENA و خروجی تصویری نرم‌افزار Arc GIS را برای سازی فولادی مهاربندی شده با ارتفاع متوسط و آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای ضعیف به تصویر می‌کشد.

احتمال فروریزش ساختمان‌های مسکونی، با استفاده از منحنی‌های شکست تولید شده و روش طیف ظرفیت، برای ۲۲ گونه‌ی ساختمانی و با انجام ۱۲۳ آنالیز مجزا برای هر سلول شبکه صورت گرفت. مقادیر احتمال فروریزش با استفاده از هر یک از ضرایب مرتبط با احتمال فروریزش ویژه‌ی سازی مورد نظر (جدول ۵) و نیز با استفاده از مقادیر مرتبط با آنالیز لرزه‌ای و مشخصات ظرفیت سازه‌ها، برای گسل شمال تهران مشخص گردید. جدول ۷ احتمال فروریزش در شبکه‌بندی منطقه را بیان

جدول ۸: سناریوهای ارتقای آئین نامی طراحی لرزه‌ای برای مصالح بنایی

شماره	نوع سازه	وضع موجود		وضع مطلوب		کاهش ریسک فروریزش (%)
		ارتفاع	آیین نامی طراحی لرزه‌ای	ارتفاع	آیین نامی طراحی لرزه‌ای	
۱	مصالح بنایی کلاف‌بندی شده	میان مرتبه	ضعیف (۱)	میان مرتبه	ارتقای آئین نامی (۲)	۷/۷۶
۲	مصالح بنایی فاقد کلاف‌بندی	کوتاه مرتبه	ضعیف (۱)	کوتاه مرتبه	ارتقای آئین نامی (۲)	۴۸/۷۱

(۱): مطابق شرایط پیش از تدوین ویرایش اول آیین نامه ۲۸۰۰

(۲): مطابق ویرایش اول آیین نامه ۲۸۰۰

سناریوهای مختلف زلزله ناشی از فعال شدن گسل‌های مختلف در نظر گرفته شود؛ بنابراین سناریوهای مورد بررسی در این تحقیق صرفاً برای نمونه مطرح شده است.

نتیجه‌گیری

ریسک فروریزش سازه‌های موجود در منطقه‌ی یک شهر تهران در اثر وقوع زمین لرزه در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به آنچه ذکر شد، نتایج ارزیابی ریسک فروریزش با استفاده از منحنی‌های شکست بومی، می‌تواند معیار مناسبی برای انتخاب رویکردهای پیشگیرانه باشد. وجود خاک متغیر در منطقه سبب شد تا ۱۲۳ ارزیابی ریسک منحصر به فرد برای هر سلول از شبکه‌بندی منطقه صورت پذیرد. بر اساس آنچه به تفصیل در قسمت بحث و نتایج بیان شد، به طور میانگین، حداکثر شتاب زمین برای کل منطقه $0.7885g$ خواهد بود که در بعضی نواحی این مقدار در حالت بیشینه به $0.97g$ هم می‌رسد.

احتمال ریسک فروریزش برای سازه‌های مختلف در منطقه متفاوت خواهد بود. مطابق نتایج جدول ۸ میانگین احتمال فروریزش سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی میان مرتبه با 0.08 از بقیه‌ی سازه‌ها بیشتر است و این در حالی است که بیشینه‌ی احتمال فروریزش نیز به سازه‌های مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی میان مرتبه و مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی کوتاه مرتبه اختصاص می‌یابد. سطح زیربنای سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی کوتاه مرتبه در کل منطقه 372767 متر مربع و سطح زیربنای سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی میان مرتبه در کل منطقه نیز 1367444 متر مربع است که مساحت قابل توجهی است. بنابراین بحرانی‌ترین سازه در منطقه سازه‌ی مصالح بنایی میان مرتبه خواهد بود.

آنچه مشهود است وضعیت نابسامان ساختمان‌های مصالح بنایی است که ضرورت توجه به نوسازی و همچنین توجه به رویکردهای نوین مقاوم سازی به ویژه در سازه‌های مصالح بنایی ضروری به نظر می‌رسد.

مطابق نتایج سناریوهای مقاوم سازی برای ساختمان‌های مصالح بنایی فاقد کلاف‌بندی، در صورتی که بتوان سطح

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، برای هر سلول، با توجه به مساحت سازه‌های موجود در آن، محاسبات ریسک فروریزش منحصر به آن سلول انجام پذیرفت. با استفاده از نتایج ۱۲۳ آنالیز ارزیابی ریسک فروریزش در منطقه‌ی یک شهر تهران و محاسبه‌ی مقادیر میانگین، بیشینه، صدک ۱۶ و صدک ۸۴ برای آن‌ها جدول ۷ احتمال فروریزش برای سازه‌های مختلف در کل منطقه را به نمایش می‌گذارد. به طوری که میانگین احتمال فروریزش در مجموع ۱۲۳ سلول، برای سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی میان مرتبه با 0.08 از بقیه‌ی سازه‌ها بیشتر است و این در حالی است که بیشینه‌ی احتمال فروریزش در میان مجموعه‌ی ۱۲۳ سلول، با 0.145 درصد، همزمان به سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی میان مرتبه و مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی کوتاه مرتبه اختصاص می‌یابد. بنابراین در میان ۱۲۳ شبکه، سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی میان مرتبه، سازه‌ای با بالاترین احتمال فروریزش و در عین حال سازه‌ای با بیشترین میانگین فروریزش نسبت به ۲۱ گونه‌ی سازه‌ی دیگر است.

• رویکردهای مقاوم سازی

برای دستیابی به تأثیر رویکردهای مختلف مقاوم سازی، بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌ها در منطقه‌ی یک شهر تهران، باید تأثیر هر یک از سناریوهای مقاوم سازی را در کاهش ریسک فروریزش در نظر گرفت. برای این منظور ریسک فروریزش سازه‌ی موجود نوع A و سازه‌ی موجود نوع B جداگانه محاسبه شده‌اند. در صورتی که ریسک فروریزش به ترتیب برای سازه‌های A و B مقادیر X و Y باشند، با استفاده از رابطه‌ی ۳ درصد کاهش ریسک فروریزش مشخص می‌شود.

$$\frac{X-Y}{X} = P(\%)$$

رابطه‌ی ۳:

این مقایسه برای تأثیر تغییرات یک پارامتر در ریسک فروریزش در شرایطی صورت می‌گیرد که پارامترهای دیگر ثابت فرض شوند. برای این منظور و برای ارزیابی نتایج مطلوب مقاوم سازی برای سازه‌ی مصالح بنایی بدون کلاف‌بندی، دو سناریوی ارتقای آئین نامی طراحی لرزه‌ای برای این سازه مطابق جدول ۸ بررسی شده است. گفتنی است که تصمیم در مورد انتخاب شیوه‌ی مقاوم سازی زمانی سودمند خواهد بود که نتایج حاصل از تحلیل

8. RISK-UE. (2003). "An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns, WP4: vulnerability of Current Pipelines", European Project.
۹. شیرازی، ن. (۱۳۸۹). "تهیه ماتریس‌های خسارت زلزله برای ساختمان‌های بتنی، فولادی و مصالح بنایی تهران". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
10. Anagnos, T. Comerio, M. Goulet, C. Na, H. Steele, J and Stewart, JP. (2008). "Los Angeles Inventory of Nonductile Concrete Buildings for Analysis of Seismic Collapse Risk Hazards". World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
11. Liel, B. (2008). "Assessing the collapse risk of California's existing reinforced concrete frame structures": metrics for seismic safety decisions. Department of civil and environmental engineering and the committee on graduate studies of Stanford University.
12. Liel, B. Haselton, Curt B. Deierlein, Gregory G. W. Baker, Jack. (2009). "Incorporating modeling uncertainties in the assessment of seismic collapse risk of buildings".
13. Eads, I. (2011). "Improving Building Collapse Risk Assessment". Stanford University. Houser, G, Egening, PC. (1993). "RISK analysis". Oakland, USA.
14. Luco, N. M.C. Gerstenberger & S.R. Uma, H. Ryu, A.B. Liel & Raghunandan, M. (2011). "A methodology for post-mainshock probabilistic assessment of building collapse risk. Auckland", New Zealand: Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society.
15. Retrieved from internationally recognized, independent, not-for-profit, research foundation. (2012). <http://www.norsar.no/seismology/engineering/SELENA-RISe/>
16. ESRI, 2004. ArcGIS 9- what is ArcGIS? Report of ESRI, Redlands, United States. URL: http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/what_is_arcgis.pdf (accessed 15.10.09).
۱۷. سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، (۱۳۹۰)، آشنایی با گسل‌های شهر تهران.
18. Campbell, K. & Bozorgnia, Y. (2003). "Updated Near-Source Ground Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No. 1, Feb.2003.
19. International building code, (2006). 'IBC-2006'. Technical report, International Code Council, United

آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای را در آن‌ها ارتقا داد، می‌توان تا ۴۸/۷۱٪ کاهش ریسک فروریزش را شاهد بود. همچنین در ساختمان‌های مصالح بنایی کلاف‌بندی شده نیز ارتقای سطح آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای می‌تواند تا ۷۶/۷٪ کاهش ریسک فروریزش را در پی داشته باشد.

ارزیابی ریسک فروریزش، علاوه بر ترسیم شرایط منطقه‌ی یک شهر تهران پس از وقوع زلزله، می‌تواند اولویتی برای شروع نوسازی یا مقاوم‌سازی مناطقی باشد که از بیشترین ریسک فروریزش برخوردارند.

پی‌نوشت

1. The International Disaster Database center for Research on the Epidemiology of Disasters
2. Life Safety
3. Response Surface Method
4. Monte carlo
5. Automatic
6. Semi-Automatic
7. Risk Integral
8. SEismic Loss Estimation using a logic tree Approach
9. Geographic Information System
10. Demand Curve
11. Fragility Curve
12. Capacity Curve
13. PGA
14. PGD
15. Modified Mercalli Intensity (MMI)
16. FEMA

منابع

1. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1999). "Earthquake Loss Estimation Methodology", User Manual. Washington, DC, United states.
2. Retrieved from The International Disaster Database. (2012). <http://www.emdat.be>.
3. Zare, M. Karimi-Paridari, S. and Sabzali, S. (2008). "Spectral Attenuation of Strong Motions for Near Source Data in Iran", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 10(3), 146-152.
۴. جعفری، م. (۱۳۸۱). "ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شمال تهران از دیدگاه شرایط ساختگاه". پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله شهر تهران.
5. Zafarani, H., et al., "Generation of Near-Field Ground Motions in Tehran from Future Large Earthquakes in the Alborz Seismic Zone", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 3-8 September 2006 in Geneva, Switzerland.
۶. مرکز مطالعات زلزله و زبست محیطی تهران بزرگ و آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا)، (۱۳۸۰)، گزارش نهایی پروژه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ، تهران. ایران.
7. Omidvar, B. Gatmiri, B. and Derakhshan. S. (2012). "Experimental Vulnerability Curves for the Residential Buildings of Iran", *Natural Hazards*,

States, January.

۲۰. صائبی، س. (۱۳۸۷). "ارزیابی و مدیریت آوار ناشی از زلزله؛ مطالعه موردی: منطقه ۱ شهر تهران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
۲۱. دفتر آمارهای جمعیت، نیروی کار و سرشماری. (۱۳۸۷). مقایسه ویژگی‌های جمعیتی و اجتماعی مناطق ۲۲ گانه شهر تهران بر اساس داده‌های سرشماری سال ۱۳۸۵، سازمان آمار ایران، تهران.
۲۲. طرح تفصیلی منطقه یک شهر تهران. (۱۳۸۶). وزارت مسکن و شهرسازی- شهرداری تهران.

23. Linkimer, L.(2008). "Relationship between Peak Ground Acceleration and Modified Mercalli Intensity". University of Arizona.
24. Gutenberg, B. & Richter, C. (1956). "Earthquake magnitude, intensity, energy and accelerations with intensity ratings". Bull. seismol. Soc. Amer. 46:317-320.
25. Hershberger, J. (1956). "A comparison of earthquake accelerations with intensity ratings". Bull. Seismol. Soc. Amer. 94:1728-1736.
26. Trifunac, M.D. & Brady, A.G. (1975). "on the correlation of seismic intensity scale with the peaks of recorded strong ground motion". -Bull. Seismol. Soc. Amer.:139-162
27. Murphy, J. R. & O'Brein, L.J. (1977) " the correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters". Bull. Seismol. Soc. Amer. 67:67-877-915.
28. Sauter, F. & Shah, H. c. (1978) " Estudio de seguro contra terremoto". -2560 pags. Franz Sauter y Asociados Ltda. San Jose, Costa Rica.
۲۹. جلالیان، م. (۱۳۸۴). "تهیه تابع آسیب پذیری تجربی برای کشور ایران". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

۳۵

شماره پنجم
بهار و تابستان
۱۳۹۳

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی



ارزیابی ریسک فروریزش ساختمان‌ها در مناطق شهری پس
از زلزله