

Evaluating the Effect of Seismic Hazard Level on the Risk-based Insurance Premium of Buildings against Earthquake

Shahrokh Tafi

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
Pooria Rashvand *

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Mehdi Mahdavi Adeli

Department of Civil Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Seyed Amir Hossein Hashemi

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Poorya_rashvand@qiau.ac.ir

Doi: 10.71507/civil.2024.1190159

Keywords:

Earthquake,
Insurance of
Buildings against
Earthquake,
Risk-based
Insurance,
Seismic Hazard Rate,
Peak Ground
Acceleration

Abstract

The abundant uncertainties associated with earthquakes and the consequent damage to buildings make determining earthquake insurance premiums for buildings one of the most challenging types of insurance. This determination is influenced by multiple variables, particularly the seismic hazard level, which is often overlooked. This study aims to evaluate the effect of seismic hazard levels on risk-based earthquake insurance premiums for buildings. A risk-based framework was established to calculate earthquake insurance premiums, incorporating seismic hazard curves and fragility curves as the two main components. By defining the seismicity model of Tehran, integrating active faults and historical seismicity, and performing a probabilistic seismic hazard analysis, seismic hazard curves were derived for three hazard levels: low, medium, and high. To develop fragility curves at four performance levels, five target buildings were subjected to incremental dynamic analysis using 120 accelerograms. The resulting curves, fitted using a normal distribution, enabled the calculation of 15 earthquake insurance premiums. Results indicate that increasing the hazard level from low to medium and from medium to high (corresponding to 50% and 40% increases in peak ground acceleration, respectively) leads to 120% and 85% increases in the insurance premiums. Overall, the findings suggest that for each increase in seismic hazard level, expressed in terms of peak ground acceleration, earthquake insurance premiums should rise by approximately 2.2 times. These results highlight the significant error in guidelines that propose earthquake insurance premiums independently of seismic hazard.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

این نشریه تحت قانون بین‌المللی کپی‌رایت Creative Commons: BY-NC است



* Corresponding Author

ارزیابی میزان تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه ریسک محور ساختمان‌ها در برابر زلزله

شاهرخ طافی

گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
پوریا رشوند*

گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
مهدی مهدوی عادل

گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
سید امیرحسین هاشمی

گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
Poorya_rashvand@qiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۵ آبان ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۰۵ مهر ۱۴۰۳

چکیده

به واسطه عدم قطعیت‌های فراوان موجود در زلزله و بروز خرابی ساختمان‌ها ناشی از آن، تعیین نرخ بیمه زلزله یکی از چالش‌برانگیزترین انواع بیمه‌ها است و تابع متغیرهای مختلفی از جمله سطح خطر لرزه‌ای است. هدف از انجام تحقیق حاضر ارزیابی میزان تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه ریسک محور ساختمان‌ها در برابر زلزله تعریف شده است. برای این منظور ابتدا یک چارچوب ریسک محور جهت محاسبه نرخ بیمه زلزله پایه‌ریزی گردید که در آن دو جزء اصلی، منحنی‌های خطر لرزه‌ای و منحنی‌های شکنندگی، وجود داشت. جهت تعیین منحنی‌های خطر لرزه‌ای، با تعریف مدل لرزه‌خیزی شهر تهران و انجام یک تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای، این منحنی‌ها در سه سطح خطر لرزه‌ای کم، متوسط و زیاد تعیین شدند. جهت تعیین جزء دوم، یعنی منحنی‌های شکنندگی، پنج ساختمان هدف تحت اثر ۱۲۰ عدد شتاب‌نگاشت مورد تحلیل دینامیکی افزایشی قرار گرفت و منحنی‌های مدنظر تعیین گردید و در نهایت پانزده نرخ بیمه زلزله محاسبه گردید. بر اساس نتایج حاصل، تغییر سطح خطر زلزله از کم به متوسط و از متوسط به زیاد (که در آنها شتاب حداکثر زمین حدود ۵۰٪ و ۴۰٪ افزایش می‌یابد) سبب می‌گردد نرخ بیمه زلزله حدود ۱۲۰٪ و ۸۵٪ افزایش یابد. به‌طور کلی می‌توان پیشنهاد داد به هر میزان که سطح خطر زلزله بر حسب شتاب حداکثر زمین افزایش پیدا کند، نرخ بیمه زلزله باید حدود ۲/۲ برابر افزایش یابد که میزان افزایش بسیار قابل‌توجهی است و نشان می‌دهد دستورالعمل‌هایی که نرخ بیمه زلزله را مستقل از سطح خطر لرزه‌ای پیشنهاد می‌دهند، دچار خطای بسیار زیادی خواهند شد.

کلیدواژه‌گان: زلزله، بیمه ساختمان‌ها در برابر زلزله، بیمه ریسک محور، سطح خطر زلزله، شتاب حداکثر زمین

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

بدون شک صنعت بیمه عرصه جوالان ریسک و برخورد منطقی با آن است. به طور کلی باوجود ریسک‌های متعددی که در پدیده‌های مختلف وجود دارد، تعیین نرخ منطقی و اقتصادی بیمه یکی از چالش‌های اساسی در این صنعت محسوب می‌گردد [۱]. طبیعی است که هرچه ذات خود پدیده دارای عدم قطعیت و ریسک بیشتری باشد، تعیین نرخ بیمه آن هم پیچیده تر خواهد بود. پدیده طبیعی زلزله و اثرات آن بر روی سازه‌ها با انبوهی از عدم قطعیت‌ها [۲] نظیر محل وقوع زلزله و بزرگی آن، مکانیزم گسل، شرایط ساختگاهی، مسیر انتشار امواج، دوره بازگشت زلزله، زاویه برخورد امواج زلزله با سازه، مدلسازی عملکرد خطی و غیرخطی عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای، میزان آسیب و محل تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه و ... مثال واضحی از این موضوع است که سبب گردیده تعیین نرخ بیمه زلزله ساختمانها تبدیل به یک چالش واقعی در این صنعت گردد [۳].

یک نرخ بیمه زلزله منطقی و مناسب که از سوی دولت‌ها به عنوان تکلیف بر ساختمان‌ها اعمال گردد، از یک سو پوشش‌دهنده خسارات احتمالی وارد به ساختمان‌ها پس از وقوع زلزله خواهد بود و از سوی دیگر تشویقی جهت احداث ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود می‌گردد. دقیقاً در سمت مقابل غیرمنطقی بودن نرخ بیمه زلزله یک مانع اصلی در گسترش استفاده از این بیمه محسوب می‌گردد [۴]. همین مقدمه بسیار کوتاه نشانگر اهمیت تعیین یک نرخ منطقی و منصفانه برای بیمه ساختمانهای یک گستره در برابر زلزله با در نظر گرفتن تمام عدم قطعیت‌های مرتبط با وقوع پدیده زلزله، پاسخ سازه به زلزله، میزان آسیب‌پذیری ساختمانها ناشی از پاسخ لرزه‌ای و هزینه‌های تعمیر و بازسازی ساختمانها ناشی از آسیب لرزه‌ای و ... می‌باشد که محور اصلی این مقاله را تشکیل می‌دهد.

تاکنون جهت ایجاد یک چارچوب ریسک محور برای بیمه ساختمان‌ها در برابر زلزله و تعیین نرخ آن مطالعات و تحقیقات بسیار گسترده‌ای انجام گرفته است که در گام اول این تحقیق، تلاش شد تمام آنها موردبررسی قرار گیرد.

یکی از اولین اقدامات در تدوین برنامه ملی بیمه زلزله پس از وقوع زلزله ویتیر نروز در یکم اکتبر ۱۹۸۷ انجام شد. این زلزله مخرب که خسارت بسیاری به ساختمان‌های دولتی و عمومی وارد کرد، دولت را بر آن داشت که باهدف تعمیر خسارات، نوع و میزان خسارت و مکانیزم‌های بودجه‌بندی را برآورد نماید [۵]. یکی از این مکانیزم‌های حمایتی در برابر فجایع طبیعی مفهوم بیمه مالی است که موضوع پژوهشی است که در سال ۱۹۹۳ به لحاظ متغیرهای علمی و آماری مثل محاسبه حق بیمه زلزله، شرح آسیب، جنبش زمین، مدلسازی تصادفی، برآورد عدم قطعیت و غیره باهدف تعریف نرخ مناسب حق بیمه زلزله انجام شد [۶]. در سال ۱۹۹۷ نیز مبحث حق بیمه زلزله از منظر توزیع بزرگی زلزله و ارزیابی خسارت بررسی شد. مبحث ارزیابی

خسارت پس از وقوع زلزله نیوکسل در سال ۱۹۸۹ با تمرکز بر توسعه مدل‌های ارزیابی خسارت بیمه متناسب‌سازی شده برای مناطق اصلی استرالیا مطرح شد [۷، ۸]. یکی از سیستم‌های مدلسازی ریسک خسارت زلزله مینه‌وا است که قادر به برآورد ریسک خسارت و عملکرد مالی کمیسیون زلزله است که موضوع پژوهشی در سال ۲۰۰۲ است [۹].

در تحقیق دیگری ارزیابی احتمالاتی نرخ بیمه زلزله برای ساختمان‌های بتن مسلح در ترکیه و اردن انجام شد [۱۰، ۱۱]. نتایج حاکی از آن بود که نرخ بیمه نسبت به خطر لرزه ای و فرضیات احتمالاتی آسیب حساس هستند. اگرچه نحوه استفاده از این پژوهش‌ها در تکنولوژی بتن و بیمه موضوعی است که در چین مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۲].

استرالیا کشوری با سطح لرزه‌خیزی پایین یکی از اصلی‌ترین خریداران بیمه زلزله در جهان است. اصول و شیوه بیمه زلزله و قیمت‌گذاری موضوع پژوهشی است که در سال ۲۰۰۸ انجام شد که در آن سطح بالای عدم قطعیت در تحلیل زلزله به نبود مدل‌های آسیب‌پذیری قابل اعتماد برای برآورد خسارت بیمه شده ارتباط داده شده است [۱۳]. در پژوهشی دیگر در ترکیه، تحلیل خطر لرزه ای و برآورد خسارت بر اساس ماتریس احتمالاتی آسیب به منظور برآورد حق بیمه ریسک خالص سالانه برای اجرای مختلف سیستم آزادراهی انجام شده است [۱۴]. به علاوه، خسارات ناشی از زلزله‌های بسیار بزرگ و مخرب در چین سال ۲۰۰۸ را به عنوان نقطه عطفی برای لحاظ مدیریت ریسک زلزله و بیمه مدل کرد. در این راستا، پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که مسئولیت دولت در تحمل ریسک و نفوذ پایین بیمه زلزله به خاطر تقاضای کم ناشی از عدم آگاهی عمومی در خصوص مزایا و پوشش آن است [۱۵]. همین نتیجه با تحلیل داده‌های موجود در خصوص بهای بیمه زلزله و نفوذ آن در میسوری و راهکارهای پیشنهادی برای افزایش تقاضا با هدف ارائه آموزش مناسب برای افراد از سوی صنعت بیمه نیز حاصل شده است [۱۶]. برنامه ملی بیمه زلزله برای یونان با ایجاد این تقاضا در افراد، بر اساس مشارکت دولت- بخش خصوصی برای همه خانوارها بر مبنای حق بیمه مبتنی بر ریسک، بیمه زلزله مقرون به صرفه را ارائه نمود [۱۷].

در پژوهشی در نیوزلند، رویکرد متفاوتی نسبت به بیمه زلزله اتخاذ شده است. در این پژوهش، دو سیستم سازه‌ای متفاوت، با جداساز لرزه‌ای و بدون جداساز با تمرکز بر هزینه بیمه زلزله بررسی شده است [۱۸]. در پژوهش دیگر در چین، عوامل تاثیرگذار بر درک ریسک زلزله، مثل نوع خانه، تعداد و شدت زلزله‌های رخ داده، سطح درآمد و تحصیلات ساکنان بررسی شده و نتایج به منظور تدوین برنامه بیمه زلزله مورد استفاده واقع شده است [۱۹]. مطالعات بیانگر افزایش تمایل به استفاده از پوشش بیمه زلزله در سراسر جهان است. با این هدف، یک برنامه داوطلبانه جمعی بیمه زلزله در مانیزال کلمبیا بر اساس مدل‌های احتمالاتی خطر با هدف حمایت مالی از مودیان مالیاتی و مالکان کم

نشانگر احتمال وقوع خطر زلزله (که عموماً از تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای حاصل می‌گردد) و دوم جزء نشانگر احتمال وقوع یک‌میزان مشخص از آسیب در سازه به‌ازای سطوح مختلف خطر زلزله (که عموماً به‌واسطه منحنی‌های آسیب‌پذیری حاصل می‌گردد)؛ بنابراین یک متغیر بسیار مهم در تعیین نرخ بیمه زلزله ساختمان‌ها بر اساس ریسک، سطح خطر زلزله است که تا کنون کمتر به آن پرداخته شده است و در بسیاری از دستورالعمل‌های تعیین نرخ بیمه زلزله، این نرخ مستقل از سطح خطر زلزله پیشنهاد شده است. این مقاله به‌صورت مشخص به بررسی این موضوع می‌پردازد و در آن ارزیابی میزان تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه ریسک محور ساختمان‌ها در برابر زلزله پرداخته خواهد شد.

در این تحقیق با ثابت نگه‌داشتن تمام متغیرهای دخیل در تعیین نرخ بیمه زلزله (از جمله متغیرهای مربوط به زلزله و متغیرهای مربوط به رفتار سازه) و تغییر سطح خطر زلزله، به تأثیرپذیری نرخ بیمه زلزله از سطح خطر لرزه‌ای پرداخته خواهد شد. در این تحقیق به‌منظور اطمینان از یکسان بودن کلیه متغیرها (به‌جز سطح خطر زلزله)، تمام اجزای لازم در تعیین این نرخ (از جمله مدل‌سازی سازه، تحلیل خطر زلزله، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ساختمان‌ها، تعیین منحنی‌های شکنندگی و...) توسط محققین به‌صورت مستقل انجام گرفته است.

۲- نحوه محاسبه نرخ بیمه زلزله ریسک محور

نحوه محاسبه نرخ بیمه زلزله بر مبنای ریسک در این تحقیق، چارچوبی استاندارد است که با تغییراتی جزئی در بسیاری از تحقیقات ارائه شده در بخش قبل مورد پذیرش قرار گرفته است در این فرمول‌بندی نرخ بیمه زلزله (Earthquake Insurance Premium) یا به طور خلاصه EIP از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

$$EIP = (1 + \theta) \cdot PRP \cdot IV \quad (1)$$

در این رابطه IV به معنی ارزش ساختمان و θ میزان بارگذاری حق بیمه است و وظیفه آن پوشش دادن عدم قطعیت‌های اقتصادی پنهان مؤثر در تعیین نرخ بیمه خواهد بود [۲۲]. مقادیر مختلفی برای این متغیر با توجه به شرایط محلی بیمه پیشنهاد شده است (به عنوان مثال ۰.۶۷ در مرجع [۱۰] و ۰.۱۷۶۵ در مرجع [۲۲]). با توجه به اینکه این متغیر موضوع اصلی تحقیق حاضر را تشکیل نمی‌دهد، در این مقاله مقدار آن برای تمام ساختمان‌ها و سطوح خطر مشابه با مرجع [۲۲] برابر ۰.۱۷۶۵ در نظر گرفته خواهد شد.

اما جزء مهم و محاسباتی رابطه فوق PRP به معنی ریسک خالص بیمه است که با استفاده از رابطه ذیل تعیین خواهد شد:

$$PRP = \sum_d LR(d) \cdot P[DS = d] \quad (2)$$

بر اساس این رابطه PRP برابر مجموع حاصل ضرب نسبت خسارت (LR) در هر سطح آسیب (DS) در احتمال وقوع سالیانه آن سطح آسیب $P[DS = d]$ در کلیه سطوح آسیب خواهد بود. مطابق با بسیاری

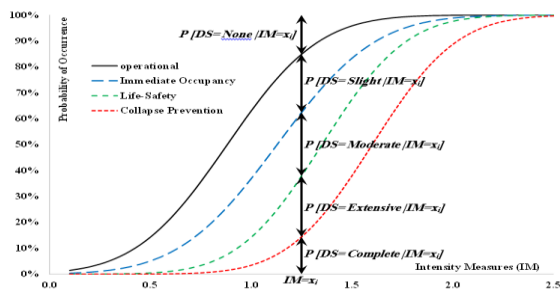
درآمد توسعه یافته است [۲۰]. پژوهشی مشابه در ایران با تمرکز بر آسیب‌پذیری مالی خانوارها و افزایش احتمالی حق بیمه زلزله ناشی از عدم قطعیت مدل‌های ریسک احتمالاتی زلزله با استفاده از عوامل بارگذاری انجام شده است [۳]. بر اساس پژوهش‌ها، عوامل اجتماعی اقتصادی بر تقاضای بیمه زلزله، یعنی تمایل به خرید بیمه و پرداخت هزینه تأثیرگذار هستند که این امر موضوع پژوهشی است که با هدف توسعه سیستم بیمه بلایا در چین انجام شده است [۲۱].

قیمت‌گذاری بیمه زلزله عامل مهمی است که باید به‌دقت لحاظ شود. هنگام برآورد حق بیمه زلزله، رویکرد مبتنی بر ریسک به‌منظور اجتناب بر قیمت‌گذاری بالا یا پایین آن پیشنهاد شده است. این رویکرد از طریق مطالعه موردی بر روی ساختمان‌ها در تایپه در تایوان بررسی شده است [۲۲]. در مطالعه دیگری که در نیوزلند انجام شده، بررسی طرح‌های بیمه زلزله در سه منطقه بر درآمد و پر ریسک، یعنی کالیفرنیا، ژاپن و نیوزلند مقایسه شده است [۲۳]. تحلیل وضعیت بیمه زلزله در مناطق با خطر لرزه‌ای بسیار بالای کالیفرنیا بیانگر آن است که احتمال رخداد یک زلزله مخرب یا کاهش قابل توجه در بهای حق بیمه سالانه می‌تواند مالکان را به استفاده از بیمه زلزله ترغیب کند [۲۴]. در پژوهش دیگر در کالیفرنیا، مقیاسی برای بیمه زلزله ارائه شده که شامل اطلاعات مختلفی از جمله تقاضای بازار، مقرون به صرفه بودن حق بیمه و غیره است. بر اساس تحلیل تکامل بیمه زلزله کالیفرنیا از سال ۱۹۰۶، مقیاس مذکور دارای چهار سطح مختلف نوظهور، استاندارد، پیشرفته و پایدار پیشنهاد شده است. این مقیاس برای مدیریت بهتر ریسک مورد استفاده شرکت‌های بیمه واقع شده است [۲۵].

رابطه بین نرخ پذیرش بیمه و معیارهای ریسک تمرکز یک مطالعه در سال ۲۰۲۰ است، که در آن PGA و نسبت خسارات مورد انتظار سالانه به عنوان شاخص‌های خطر لرزه‌ای و ریسک برای خانوارهای کانادا در نظر گرفته شدند [۲۶]. به علاوه، مدیریت خسارت مورد انتظار از طریق بیمه زلزله در اروپا با لحاظ عدم قطعیت ذاتی در مدل خطر لرزه‌ای بررسی شده است [۲۷]. به همین ترتیب، مدل خسارت جمعی برای سورابایا بر اساس دو نوع ساختمان بنایی مسکونی و غیرمهندسی توسعه داده شده و نرخ بیمه با استفاده از اصل ارزش مورد انتظار محاسبه شده است [۲۸].

باتوجه به ماهیت تصادفی بلایای طبیعی، به‌ویژه زلزله، مفهوم جدید بیمه پارامتریک مطرح و معرفی شده که فرایند جبران خسارت را تسریع بخشیده و منطبق بر ریسک است [۲۹]. اگرچه، علیرغم مزایای متعدد، محدودیت‌هایی از جمله ریسک مبنا دارد که نیاز است برای دستیابی به نتایج بهتر کاهش داده شود. یک مدل رگرسیون چندک فضایی در مطالعه‌ای در استان یونان چنین برای مقابله با این کاستی از طریق تعیین رابطه بین خسارت و عوامل مرتبط با ریسک استفاده شده است [۳۰].

آنچه از بررسی تمام مقالات فوق مشخص است، این است که در تعیین نرخ بیمه زلزله ساختمان‌ها دو جزء اجتناب‌ناپذیر وجود دارد، نخست جزء



شکل ۲- نحوه محاسبه احتمال وقوع سطوح آسیب از منحنی‌های شکنندگی به ازای وقوع یک مقدار مشخص از شاخص شدت

با چنین ساختاری هدف از انجام این تحقیق به‌وضوح قابل‌توصیف است. در تمام فرمول‌بندی ذکر شده، سطح خطر زلزله (که در قالب مقدار شاخص شدت یا همان IM بیان می‌گردد)، یک متغیر بنیادی است که با تغییر آن مقدار نرخ بیمه زلزله به‌راحتی می‌تواند دستخوش تغییر گردد. در این تحقیق نرخ بیمه زلزله به‌عنوان تابعی از سطح خطر زلزله (سطح خطر کم، متوسط و زیاد) بیان خواهد شد تا مشخص گردد نادیده گرفتن این متغیر تا چه حد می‌تواند مشکل‌آفرین باشد.

۳- معرفی ساختمانهای مورد مطالعه

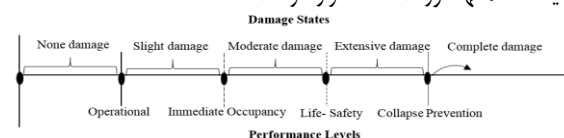
انتخاب نوع سازه‌ها و مدل‌سازی آنها جهت محاسبه نرخ بیمه زلزله در این تحقیق اهمیت بسیار زیادی دارد. باتوجه به عدم قطعیت‌های بسیاری که در تعریف یک سازه می‌تواند وجود داشته باشد (نظیر نامنظمی در پلان و ارتفاع) این موضوع جنبه کاربردی خواهد داشت که تعریف سازه‌ها با کمترین عدم قطعیت صورت پذیرد تا نتایج حاصل قابل‌تعمیم و منحصر به متغیر بنیادی این تحقیق (سطح خطر لرزه‌ای) باشند. برای این منظور در این مقاله از مفهوم قاب‌های ژنریک جهت مدل‌سازی سازه‌های هدف یعنی قاب‌های خمشی فولادی استفاده شده است [۳۱].

نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که این قاب‌های یک دهانه به‌خوبی قادر خواهند بود که رفتار پیچیده قاب‌های چنددهانه را تخمین بزنند [۳۲]. البته تردیدی نیست که در عمل، سازه‌ها سیستم‌هایی بسیار پیچیده و سه بعدی هستند که تحت اثر بارهای سه بعدی و بسیار پیچیده‌تر که در صفحات مختلفی بر آنها وارد می‌شوند، قرار می‌گیرند. اگرچه استفاده از مدل سه بعدی سازه و مدل کردن سه بعدی تحریکات زمین‌ناشی از زلزله یک گزینه ایده‌آل و شاید حتی دست نیافتنی در مطالعات مربوط به تعیین EIP بشمار می‌رود، اما جهت نیل به نتایج مدنظر در این تحقیق، که رویکردی مقایسه‌ای دارد، این مدل‌های ژنریک کفایت خواهند کرد.

این قاب‌ها رفتار غیرخطی سازه را که جهت برآورد آسیب در سطوح شدید (نظیر فروریزش) الزامی است به‌خوبی مدل می‌کنند. رفتار غیرخطی این قاب‌ها در سطح اعضا با استفاده از فنرهای چرخشی (با زوال سختی و مقاومت) در انتهای تیرها و پای ستون‌ها مدل‌سازی و مدل چرخه‌ای Peak-Oriented جهت نشان دادن رفتار هیستریتیک بکار

تحقیقات در این تحقیق با توجه به چهار سطح عملکرد (Operational, Immediate Occupancy, Life-Safety, and Collapse Prevention) پنج سطح آسیب (None Damage, Slight Damage, Moderate Damage, Extensive Damage and Complete Damage) مطابق شکل (۱) تعریف شده است.

تعریف دقیق LR عبارت است از نسبت هزینه تعمیرات خرابی ناشی از زلزله در یک ساختمان به هزینه جایگزینی آن ساختمان و برای مقادیر آن در هر DS پیشنهادهای مختلفی وجود دارد. به‌عنوان مثال [۱۰] برای پنج سطح آسیب None, Slight, Moderate, Extensive و Complete به ترتیب ۰.۰۵، ۰.۳۰، ۰.۷۰، ۱.۰۰ و ۱.۵۰ را پیشنهاد داده است. مقادیر متناظر در مرجع [۲۲] به ترتیب ۰.۰۲، ۰.۱۰، ۰.۵۰ و ۱.۰۰ در نظر گرفته شده‌اند که این مقادیر در تحقیق حاضر و برای کلیه ساختمانها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



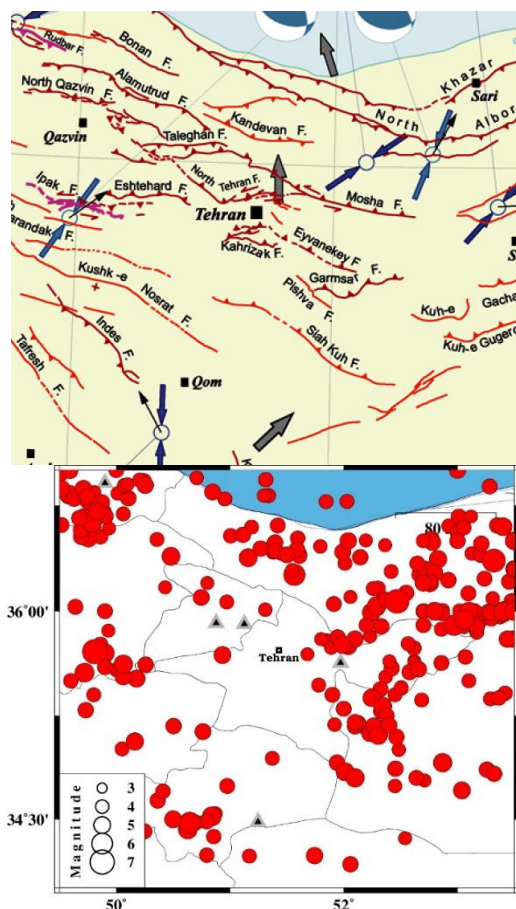
شکل ۱- تعریف سطوح آسیب با توجه به سطوح عملکرد سازه

اما بخش مهم رابطه (۲) احتمال وقوع سالیانه یک سطح آسیب است. با استفاده از قضیه کلی احتمال این احتمال بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$P[DS = d] = \sum_i P[DS = d | IM = x_i] |\beta'_{IM}(x_i)| \quad (3)$$

رابطه فوق دو جزء کلیدی دارد. نخست $|\beta'_{IM}(x_i)|$ که به معنی مقدار قدرمطلق مشتق منحنی خطر لرزه‌ای شاخص شدت در نقطه x_i می‌باشد که متغیر اصلی این تحقیق است و نحوه محاسبه آن بطور کامل در بخش پنجم مطرح شده است. جزء دوم این رابطه $P[DS = d | IM = x_i]$ می‌باشد که یک احتمال شرطی به مفهوم احتمال وقوع DS در سطح d به شرط احتمال وقوع شاخص شدت به میزان x_i قابل تعریف است.

این جزء اخیر با استفاده از منحنی‌های شکنندگی قابل محاسبه است که در شکل (۲) بصورت تصویری کاملاً تشریح شده است. در این شکل منحنی‌های شکنندگی چهار سطح عملکرد معرفی شده نشان داده شده است. حال منطبق بر تعریف انجام شده در شکل (۱)، $P[DS = d | IM = x_i]$ از تفاضل احتمال وقوع دو سطح عملکرد تشکیل دهنده آن DS در نقطه $IM = x_i$ قابل محاسبه است.

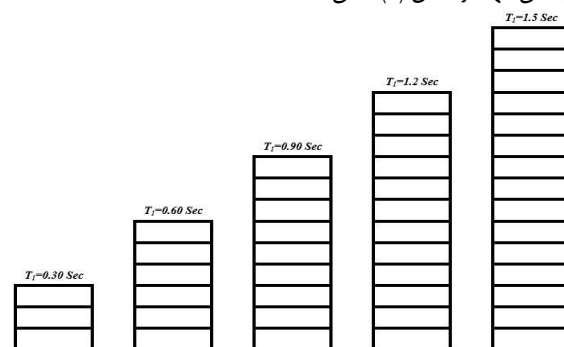


شکل ۴- گستره شهر تهران و گسلها و زلزله‌های رخ داده در آن جهت تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای در این گستره، آمار زلزله‌ها (شامل زلزله‌های تاریخی و دستگاهی) و گسل‌های فعال موجود در آن شناسایی گردید.

۵- تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای و تعیین منحنی‌های خطر
لرزه‌ای در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای

متغیر اصلی این پژوهش سطح خطر زلزله است که از طریق منحنی خطر لرزه‌ای در محاسبه نرخ بیمه زلزله تأثیرگذار خواهد بود. منحنی خطر لرزه‌ای یک شاخص شدت که به معنی احتمال وقوع سالیانه آن شاخص شدت است و مشتق آن در رابطه (۳) بکار می‌رود، یکی از اجزای تعیین EIP است که عموماً با استفاده از تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای حاصل می‌گردد [۳۵]. در این بخش منحنی‌های خطر لرزه‌ای برای شاخص شدت منتخب (شتاب حداکثر زمین یا به اختصار PGA) در سطوح مختلف لرزه‌خیزی گستره جغرافیایی مورد مطالعه با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای تعیین شده است. مبنای روش مورد استفاده در این تحقیق جهت تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای، روش کلاسیک معرفی شده توسط کرنل است [۳۶] که برخی جزئیات آن به روز شده است و جهت توضیحات کامل می‌توان به مرجع [۳۷] مراجعه نمود.

برده شده است. با بکار بردن این مفهوم و به‌منظور پوشش‌دادن ساختمان‌ها با تعداد طبقات و رفتارهای متفاوت، در این تحقیق از پنج قاب خمشی فولادی ژئریک با تعداد طبقات، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ که دارای زمان تناوب مود اولی برابر با یک دهم تعداد طبقات می‌باشد، استفاده شده است. نمای شماتیک این سازه‌ها و زمان تناوب مود اول ارتعاش آنها در شکل (۳) نشان داده است.



شکل ۳- نمای شماتیک پنج ساختمان مورد مطالعه

همچنین در این تحقیق، مدل‌سازی تمام قاب‌های خمشی فولادی و انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی آنها توسط نرم‌افزار OpenSees انجام گرفته است. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار اجزای محدود است که توسط مؤسسه PEER و در دانشگاه برکلی کالیفرنیا توسعه پیدا کرده است و یک نرم‌افزار تحقیقاتی با کد باز محسوب می‌گردد [۳۳].

۴- انتخاب معرفی گستره جغرافیایی مورد مطالعه

گستره جغرافیایی انتخاب شده در این تحقیق جهت محاسبه EIP، شهر تهران، پایتخت کشور ایران انتخاب شده است. علت این انتخاب از یک سو اهمیت شهر تهران به واسطه جمعیت بسیار زیاد و انبوه ساختمان‌ها و از سوی دیگر سطح خطر زلزله بسیار زیاد اثبات شده آن است [۳۴]. در اینجا گستره شهر تهران، محدوده ای بین ۵۰/۸ تا ۵۲/۲ درجه طول جغرافیایی و ۳۵/۵ تا ۳۶/۲ درجه عرض جغرافیایی تعریف می‌گردد. همچنین ناحیه بزرگتری به عنوان گستره طرح انتخاب شد. این ناحیه بزرگتر بین طولهای جغرافیایی ۴۹/۵ تا ۵۳/۵ درجه و عرضهای جغرافیایی ۳۴ تا ۳۷ درجه تعریف می‌گردد. در شکل (۴) گستره طرح و محدوده تعریف شده برای شهر تهران همراه با موقعیت گسلها و زلزله‌های رخ داده مشاهده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات لرزه‌خیزی چشمه‌های تعریف شده در گستره جغرافیایی هدف (مربوط به مدل لرزه‌خیزی شکل ۵)

Zone I: $\log(N_M)=3.8154-0.8628M$

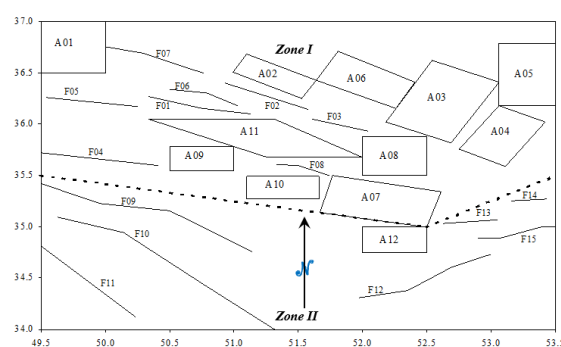
ID	Type	μ_i	M_{max}
F01	Linear	0.083	7.21
F02	Linear	0.090	7.22
F03	Linear	0.109	6.92
F04	Linear	0.141	7.40
F05	Linear	0.103	7.10
F06	Linear	0.064	7.05
F07	Linear	0.109	7.31
F08	Linear	0.083	7.60
A01	Area	0.156	7.36
A02	Area	0.087	7.25
A03	Area	0.138	7.60
A04	Area	0.113	7.50
A05	Area	0.156	7.50
A06	Area	0.104	7.37
A07	Area	0.130	7.50
A08	Area	0.121	7.20
A09	Area	0.138	7.20
A10	Area	0.104	7.00
A11	Area	0.286	8.00

Zone II: $\log(N_M)=3.5416-0.9366M$

ID	Type	μ_i	M_{max}
F09	Linear	0.130	7.87
F10	Linear	0.141	7.94
F11	Linear	0.089	7.56
F12	Linear	0.087	7.54
F13	Linear	0.038	6.98
F14	Linear	0.025	6.81
F15	Linear	0.051	7.11
A12	Area	0.062	7.00

در این مقاله جهت محاسبه منحنی خطر لرزه‌ای برای شتاب حداکثر زمین، ابتدا مدل لرزه‌خیزی گستره نشان داده شده در شکل (۴) مطابق شکل (۵) با توجه به شرایط لرزه‌زمین ساخت آن، به دو زون لرزه‌خیزی مختلف تقسیم و رابطه گوتنبرگ- ریشتر برای هر کدام از این دو زون تعیین گردید. سپس در این مدل تعداد ۱۲ چشمه لرزه‌زای سطحی و ۱۵ چشمه لرزه‌زای خطی تعریف شدند. از مختصات هندسی این چشمه‌ها جهت تعیین تابع چگالی احتمال فاصله و از ضرائب رابطه گوتنبرگ- ریشتر و حداکثر توان لرزه‌ای آنها جهت تعیین تابع چگالی احتمال بزرگی استفاده شد. همچنین نرخ فعالیت لرزه‌ای این چشمه‌ها (μ_i) نیز با استفاده از کاتالوگ زلزله قابل محاسبه می‌باشد که خلاصه تمام نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است. در این جدول جهت محاسبه حداکثر توان لرزه‌ای چشمه‌ها از طول گسل‌های مربوط به آن چشمه و روابط معتبر برای ایران استفاده گردید [۳۸]. همچنین برای رابطه کاهندگی مورد نیاز در تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای، از رابطه کاهندگی پیشنهاد شده توسط زارع و سبزی در سال ۲۰۰۶ که برای گستره مورد مطالعه معتبر است استفاده شده است [۳۹]. همچنین شرایط ساختمانی مورد استفاده در این رابطه آبرفت متراکم و سنگ نرم با سرعت موج برشی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

پس از تعیین تمام اجزای لازم، تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای برای گستره جغرافیایی هدف انجام گرفت. اولین نتیجه حاصل نقشه پهنه‌بندی شتاب حداکثر زمین با احتمال وقوع ۱۰٪ در طول ۵۰ سال (متناظر با دوره بازگشت ۴۷۵ سال) می‌باشد که در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل لرزه‌خیزی تعریف شده برای محاسبه نرخ بیمه زلزله در گستره جغرافیایی هدف

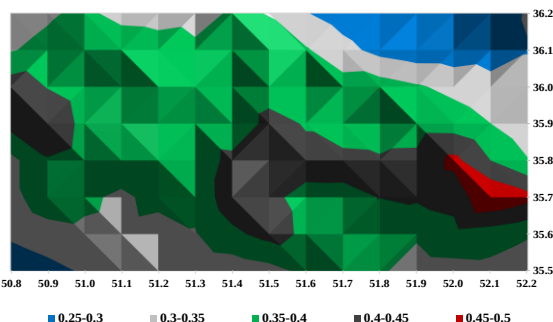
لازم به ذکر است تمام نتایج این بخش و محاسبات تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای این تحقیق با مدل کیکو- سلوول نیز تکرار گردید و نتایج حاصل مورد تأیید قرار گرفت.

۶- تحلیل دینامیکی افزایشده ساختمانهای هدف

همان‌گونه که گفته شد دیگر جز مورد نیاز جهت محاسبه EIP برای ساختمان‌های هدف، منحنی شکنندگی آنها در سطوح مختلف عملکرد است که این منحنی‌های شکنندگی باید برای شاخص شدت هدف (یعنی PGA) و در هر چهار سطح عملکرد سازه‌های هدف تعیین گردد. روش‌های مختلفی جهت تعیین منحنی شکنندگی وجود دارد [۴۱]. با توجه به ماهیت سازه‌های مورد نظر در این تحقیق، استفاده از روش تحلیلی جهت تعیین این منحنی‌ها منطقی بنظر می‌رسد. این روش مبتنی بر استفاده از تعداد کافی شتابنگاشت و تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها در سطوح عملکردی مختلف می‌باشد که این تحلیل با توجه به سطح عملکرد سازه می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد.

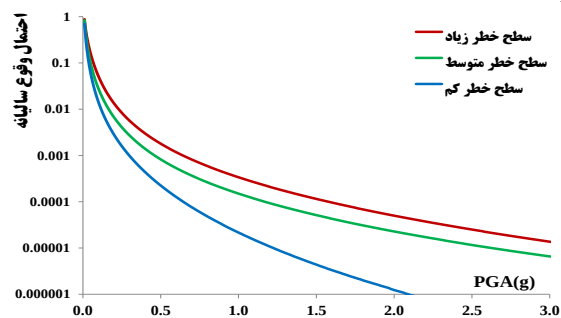
بنابراین، دو نکته کلیدی جهت تعیین منحنی‌های شکنندگی وجود دارد، نخست انتخاب شتاب‌نگاشت به تعداد کافی و دوم استفاده از الگوریتمی مناسب جهت تعیین پاسخ سازه‌ها در سطوح مختلف عملکردی که هر کدام متناسب با یک سطح آسیب تعریف می‌شوند. اگر چه برای تعیین تعداد شتاب‌نگاشت لازم جهت تحلیل تاریخچه زمانی دستورالعمل‌های مختلفی پیشنهاد شده است [۴۲]، لیکن در این تحقیق به منظور به حداقل رساندن اثر عدم قطعیت (Record-to-Record) و تعداد شتاب‌نگاشت‌ها بر نتایج، بصورت کاملاً دست بالا، تعداد ۱۲۰ عدد شتاب‌نگاشت (دو مؤلفه افقی ثبت شده در ۶۰ ایستگاه) جهت تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها انتخاب گردد. این شتاب‌نگاشت‌ها از پایگاه داده جنبش نیرومند زمین دانشگاه برکلی با رعایت ضوابط زیر انتخاب شده‌اند [۴۳]:

- شرایط ساختمانی آنها حتی‌الامکان منطبق با شرایط ساختمانی تعریف شده در تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای باشد. به همین دلیل شرایط ساختمانی C در NEHRP (تقریباً مشابه با شرایط ساختمانی بکار رفته در رابطه کاهندگی و با سرعت موج‌برشی بین ۳۶۰ تا ۷۶۰ متر بر ثانیه) برای این منظور انتخاب گردید.
 - بزرگی زلزله مسبب این شتاب‌نگاشت‌ها دارای توزیع تقریباً یکنواخت بین ۶ تا ۷/۶ باشد.
 - فاصله سایت تا گسل زلزله مسبب این شتاب‌نگاشت‌ها دارای توزیع تقریباً یکنواخت بین ۱۳ تا ۶۰ کیلومتر باشد.
- انتخاب این تعداد قابل ملاحظه از شتاب‌نگاشت سبب می‌گردد سه مؤلفه اصلی در تحلیل خطر زلزله یعنی حداکثر شتاب زلزله، مدت زمان تحریک مؤثر و محتوای فرکانسی زلزله به‌خوبی پوشش داده شوند. فهرست کامل این شصت ایستگاه ثبت ۱۲۰ شتاب‌نگاشت با مشخصات آنها در مرجع [۴۴] موجود است.



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی خطر شتاب حداکثر زمین در گستره جغرافیایی مورد مطالعه جهت تعیین برای محاسبه نرخ بیمه زلزله

این نقشه از دو جهت می‌تواند مفید باشد. نخست مقدار PGA به‌دست آمده با دوره بازگشت ۴۷۵ سال در این نقشه کاملاً تأیید کننده صحت مدلسازی لرزه‌خیزی و تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای انجام شده در این تحقیق است، زیرا مقادیر حاصل مشابه با مقادیر استاندارد و حاصل شده در تحقیقات پیشین برای این ناحیه از ایران است [۴۰]. اما کاربرد دوم و اصلی این نقشه، تعریف سطوح مختلف خطر لرزه‌ای در گستره مورد مطالعه با استفاده از آن است که متغیر اصلی این مقاله است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، سطوح خطر لرزه‌ای متفاوتی در گستره هدف قابل تعریف است که مقادیر PGA آنها به طور متوسط با یکدیگر متفاوت است. از این نقشه استفاده شد و سه نقطه هدف به‌عنوان نماینده سه سطح لرزه‌خیزی کم، متوسط و زیاد انتخاب گردید. این نقاط عبارت‌اند از نقطه سطح خطر لرزه‌ای کم با مختصات ($E=51.9^\circ$ & $N=36.2^\circ$) که مقدار PGA آن کمترین مقدار در کل گستره است، نقطه متوسط با مختصات ($E=51.4^\circ$ & $N=35.9^\circ$) که مقدار PGA آن برابر متوسط PGA کل گستره است و نقطه زیاد با مختصات ($E=52.1^\circ$ & $N=35.7^\circ$) که مقدار PGA آن بیشترین مقدار در کل گستره است. پس از تعریف این سه سطح خطر لرزه‌ای، سه منحنی خطر لرزه‌ای در هر کدام از این نقاط با استفاده تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای در مدل لرزه‌خیزی تعریف شده به دست آمد که در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. این منحنی‌ها در واقع همان $\beta_{IM}(x)$ هستند که قدر مطلق مشتق آنها در تعیین نرخ بیمه زلزله بکار خواهد رفت.

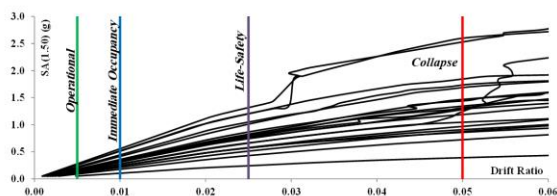


شکل ۷- منحنی‌های خطر لرزه‌ای در سه سطح خطر

لرزه‌ای ساختمان‌ها روش‌های متعددی وجود دارد که منحنی‌های شکنندگی یکی از روش‌های تحلیلی شناخته شده برای این منظور است و در این تحقیق مورد استفاده قرار خواهند گرفت. داده‌های حاصل در بخش قبل، اطلاعات مورد نیاز جهت رسم منحنی‌های شکنندگی در سطوح مختلف عملکرد برای ساختمان‌های هدف را فراهم می‌کنند. در بخش ۲ چهار سطح عملکرد تعریف شد. برای رسم منحنی شکنندگی هر کدام از این سطوح عملکرد، کافی است این سطوح به مقدار مشخصی از دررفت نسبت داده شوند. اگرچه رابطه قطعی و ثابتی بین سطح عملکرد و مقدار دررفت وجود ندارد ولی مقادیر پیشنهاد شده در مراجع مختلف در مورد قاب‌های خمشی فولادی تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد.

در این تحقیق با پذیرش مقادیر پیشنهادی پیشین برای قاب‌های خمشی فولادی، دررفت برابر 0.005 معادل سطح عملکرد Immediate Operational، دررفت برابر 0.01 معادل سطح عملکرد Life-Safety، دررفت برابر 0.025 معادل سطح عملکرد Collapse Prevention و دررفت برابر 0.05 معادل سطح عملکرد Collapse تعریف شده است. با توجه به اینکه این نسبت‌ها برای تمام سازه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است، بنظر نمی‌رسد تغییر در آنها، تأثیری بر هدف اصلی این تحقیق (یعنی تأثیر سطح خطر زلزله) داشته باشد.

پس از تعریف این مقادیر دررفت متناظر با سطوح مختلف عملکرد، لازم است که مقادیر شاخص شدت (PGA) هر شتاب‌نگاشت برای هر سازه و هر سطح عملکرد متناظر با مقدار دررفت آن از نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی استخراج شوند. این موضوع به صورت گرافیکی در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل به عنوان نمونه بخش کوچکی از نتایج تحلیل دینامیکی قاب ۱۵ طبقه (۲۰ شتاب‌نگاشت بجای ۱۲۰ شتاب‌نگاشت) نشان داده شده است و در آن مقادیر دررفت متناظر با سطوح عملکرد (0.005 ، 0.01 ، 0.025 و 0.05) مشخص شده‌اند. استخراج مقادیر IM (در اینجا به عنوان مثال SA1) متناظر با هر مقدار دررفت، اطلاعات لازم جهت رسم منحنی‌های شکنندگی آن سطح عملکرد را فراهم خواهد آورد.

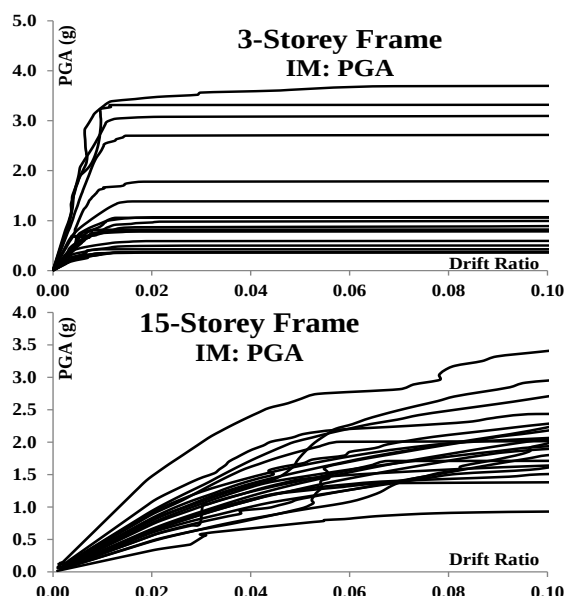


شکل ۹- مثالی از استخراج منحنی شکنندگی از نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی

با انجام این فرایند با تمام ۱۲۰ عدد شتاب‌نگاشت و برای هر سازه، در هر سطح عملکرد ۱۲۰ عدد بدست خواهد آمد که با استفاده از آنها می‌توان یک منحنی شکنندگی را رسم نمود. بدین طریق در این بخش مجموعاً بیست منحنی شکنندگی (برای چهار سطح عملکرد و پنج سازه) حاصل خواهد شد. به عنوان نمونه در شکل (۱۰) استخراج

پس از انتخاب این تعداد قابل توجه از شتاب‌نگاشت‌ها باید الگوریتمی مناسب جهت تحلیل تاریخیچه زمانی سازه در تمام سطوح عملکردی انتخاب نمود. برای این منظور در تحقیق حاضر روش تحلیل دینامیکی افزایشی انتخاب گردید [۴۵]. این روش اگرچه حجم محاسباتی بسیار بالایی دارد، لیکن ابزار قابل قبولی جهت تعیین منحنی‌های شکنندگی می‌باشد [۴۶]. در این روش شاخص شدت یک شتاب‌نگاشت به گونه‌ای به مقادیر کم و زیاد مقیاس خواهد شد تا پس از اعمال آن به سازه، طیفی از سطوح عملکرد و آسیب‌ها (از رفتار خطی بدون آسیب تا رفتار غیرخطی نزدیک فروپاشی) را تجربه کند. طبیعی است که با استفاده از نتایج حاصل براحتی می‌توان منحنی‌های شکنندگی را در هر سطح عملکردی رسم نمود.

در این تحقیق هر کدام ۱۲۰ شتاب‌نگاشت با الگوریتم تحلیل دینامیکی افزایشی به پنج سازه هدف اعمال گردید. شاخص شدت PGA با گام‌های بسیار کوچک ($0.05g$ و کمتر) افزایش داده شدند تا سازه به حد فروپاشی (ناپایداری عددی ولی با این شرط که از فروپاشی آئین‌نامه‌ای بیشتر باشد) برسد و در هر گام پس از تحلیل تاریخیچه زمانی، حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقات (drift) متناظر با شاخص شدت در بانک داده ذخیره شد. این حجم بسیار بالای محاسبات در محیط نرم افزار این سپس انجام گرفت فقط به عنوان مثال برای قاب ۳ طبقه این الگوریتم شامل ۷۵۰۰ بار تحلیل تاریخیچه زمانی بود. صرفاً بخش بسیار کوچکی (شامل ۲۰ شتاب‌نگاشت از کل ۱۲۰ شتاب‌نگاشت) از این نتایج در شکل (۸) برای قاب سه و پانزده طبقه نشان داده شده است.



شکل ۸- بخشی از نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی دو قاب سه و پانزده طبقه

۷- تعیین منحنی‌های شکنندگی

بدون شک یک جزء اجتناب‌ناپذیر در تعیین EIP یک ساختمان، احتمال وقوع آسیب در آن ناشی از زلزله خواهد بود. جهت ارزیابی آسیب‌پذیری

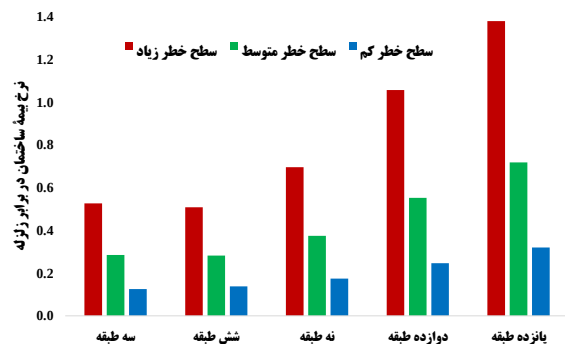
۸- محاسبه نرخ بیمه ساختمانهای هدف در برابر زلزله

تمام اجزای لازم برای محاسبه نرخ بیمه زلزله برای پنج ساختمان هدف در سه سطح خطر زلزله کم، متوسط و زیاد در بخش‌های قبلی فراهم آمد و بطور دقیق مورد محاسبه قرار گرفت. در این بخش با استفاده از فرمولبندی معرفی شده در بخش ۲، پانزده نرخ بیمه زلزله (پنج ساختمان و سه سطح خطر زلزله) محاسبه گردید که در جدول ۳ به نمایش در آمده‌اند. مطابق رویه معمول محاسبه نرخ بیمه زلزله، این نرخ به ازای ارزش ساختمان برابر ۱۰۰۰ واحد فرضی محاسبه شده است (به عبارت دیگر مقدار IV در رابطه شماره ۱ برابر ۱۰۰۰ فرض شده است).

جدول ۳- نرخ بیمه زلزله محاسبه شده برای پنج ساختمان در سه سطح خطر زلزله به ازای ارزش ساختمان ۱۰۰۰ واحد

سطح خطر زلزله	سطح خطر زلزله		
	کم	متوسط	زیاد
سه طبقه	0.1252	0.2849	0.5270
شش طبقه	0.1380	0.2819	0.5085
نه طبقه	0.1745	0.3744	0.6968
دوازده طبقه	0.2462	0.5530	1.0582
پانزده طبقه	0.3204	0.7187	1.3815

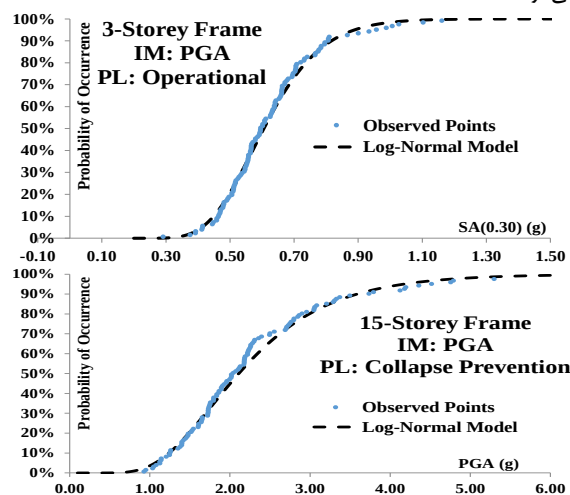
اعداد حاصل در جدول (۳) که شاخص شدت بکار رفته در محاسبه آن PGA است، قابل مقایسه با بسیاری تحقیقاتی است که فرض‌های مشابهی با این تحقیق داشته‌اند. بخش عمده مفروضات این تحقیق مشابه با مرجع [۲۲] است که نرخ بیمه در آن برای ساختمانهای مشابه این تحقیق تقریباً یکسان حاصل شده است. همچنین این موضوع کنترل شد که عوض کردن نسبت خسارت و مقدار میزان بارگذاری حق بیمه منجر به نتایجی مشابه سایر تحقیقات خواهد شد [۱۰]. این موضوع می‌تواند در مجموع نشانگر صحت چارچوب و نتایج حاصل شده باشد. این نتایج بصورت گرافیکی در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۱- مقادیر نرخ بیمه پنج ساختمان هدف در مقابل زلزله با توجه به سطح خطر زلزله

منحنی شکنندگی سطح عملکرد Operational برای قاب سه طبقه و منحنی آسیب‌پذیری سطح عملکرد Collapse Prevention برای قاب ۱۵ طبقه نشان داده شده است.

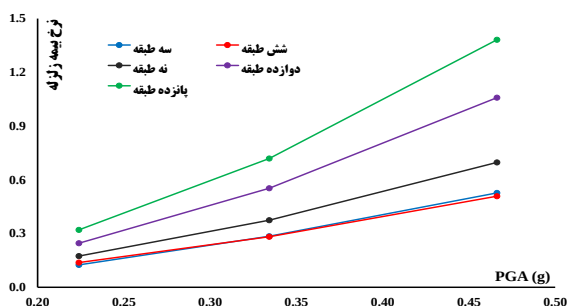
نکته قابل‌توجه در این نمودارها این است که تعداد بسیار زیاد شتاب‌نگاشت‌ها (۱۲۰ عدد) سبب شده که نقاط حاصل کاملاً وضعیت توزیع نرمال به خود بگیرند و با دقت بسیار مناسبی بتوان آنها را با یک توزیع نرمال مدل کرد. البته برای پوشش دادن کرانه‌های بالا و پایین داده‌ها، این توزیع نرمال بر روی مقادیر لگاریتم طبیعی داده‌ها فیت شده است و به نوعی توزیع لوگ-نرمال است. تطابق عالی این توزیع لوگ-نرمال با داده‌های مشاهده شده نشانگر صحت انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، تحلیل دینامیکی و منحنی‌های شکنندگی حاصل است. در جدول (۲) مقادیر میانگین و انحراف معیار لگاریتم طبیعی PGA برای رسم منحنی‌های آسیب‌پذیری پنج سازه در چهار سطح عملکرد مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰- نمونه‌ای از منحنی‌های شکنندگی تعیین شده با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی

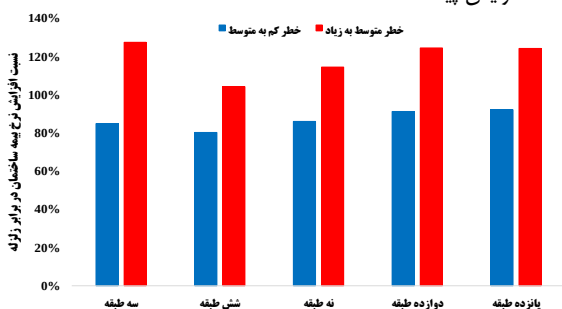
جدول ۲- مقادیر میانگین و انحراف معیار محاسبه شده از لگاریتم PGA جهت رسم منحنی شکنندگی پنج سازه در چهار سطح عملکرد

تعداد طبقه	پانزده	دوازده	نه	شش	سه	سطح عملکرد
Operational	-1.71	-1.58	-1.33	-1.09	-0.50	μ
	0.38	0.34	0.35	0.34	0.23	σ
Immediate Occupancy	-1.02	-0.89	-0.64	-0.44	-0.06	μ
	0.38	0.34	0.35	0.32	0.27	σ
Life-Safety	-0.14	-0.05	0.16	0.32	0.08	μ
	0.38	0.35	0.36	0.37	0.30	σ
Collapse Prevention	0.75	0.76	0.67	0.58	0.09	μ
	0.41	0.44	0.41	0.44	0.30	σ



شکل ۱۲- روند تغییرات نرخ بیمه زلزله بر حسب تغییرات نرخ شتاب حداکثر زمین (سطح خطر لرزه‌ای)

دیگر نتیجه حاصل شده در این بخش از شکل ۱۳ قابل استنتاج است. بر اساس این شکل تغییر سطح خطر زلزله از کم به متوسط (که در آن شتاب حداکثر زمین حدود ۵۰٪ افزایش خواهد یافت). سبب می‌گردد نرخ بیمه زلزله حدود ۱۲۰٪ افزایش یابد. همچنین بر اساس این شکل تغییر سطح خطر زلزله از متوسط به زیاد (که در آن شتاب حداکثر زمین حدود ۴۰٪ افزایش خواهد یافت). سبب می‌گردد نرخ بیمه زلزله حدود ۸۵٪ افزایش پیدا کند.



شکل ۱۳- نسبت افزایش نرخ بیمه زلزله با افزایش سطح خطر زلزله از خطر کم به متوسط و متوسط به زیاد در پنج ساختمان هدف

۱۰- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله پژوهشی باهدف ارزیابی میزان تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه ریسک محور ساختمان‌ها در برابر زلزله به تخمین مقدار نرخ بیمه زلزله پنج ساختمان به‌عنوان تابعی از سطح خطر لرزه‌ای پرداخته شد. برای این منظور ابتدا یک چارچوب ریسک محور جهت محاسبه نرخ بیمه زلزله پایه‌ریزی گردید که در آن دو جز اصلی یعنی منحنی‌های خطر لرزه‌ای (که همان متغیر تحقیق است) و منحنی‌های شکنندگی وجود داشت. سپس این دو جزء با طی مراحل مختلف تعیین گردید. جهت تعیین منحنی‌های خطر لرزه‌ای، با تعریف مدل لرزه‌خیزی شهر تهران از طریق ترکیب گسل‌ها و زلزله‌های رخ داده و انجام یک تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای، این منحنی‌ها در سه سطح خطر لرزه‌ای کم، متوسط و زیاد تعیین شدند.

جهت تعیین جزء دوم، یعنی منحنی‌های شکنندگی در چهار سطح عملکرد، پنج ساختمان هدف تحت اثر ۱۲۰ عدد شتابنگاشت مورد تحلیل دینامیکی افزاینده قرار گرفت و با رگرسیون نمودن یک توزیع

شکل ۱۱ می‌تواند منجر به نتایج اولیه در خصوص ارزیابی میزان تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه ریسک محور ساختمان‌ها در برابر زلزله گردد. چند نکته از این شکل قابل استنتاج است. نخست اینکه با افزایش تعداد طبقات روند تغییرات نرخ بیمه زلزله ساختمان‌ها روندی افزایشی است. اما نکته قابل توجه که در راستای هدف این مقاله است، بدین شکل می‌باشد که افزایش سطح خطر زلزله بنحو محسوسی بر نرخ بیمه زلزله تأثیر گذاشته است و آن را افزایش داده است. این موضوع بصورت دقیق در بخش آتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۹- تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه زلزله

نتایج بخش قبل به‌صورت واضحی اثبات نمود سطح خطر لرزه‌ای می‌تواند بر مقدار نرخ بیمه تأثیرگذار باشد که بررسی این تأثیرپذیری هدف اصلی این مقاله است. برای بررسی منطقی این تغییرات، لازم است ارزیابی نسبت خطر لرزه‌ای و نسبت نرخ بیمه تعیین شده به‌صورت توأمان صورت پذیرد. برای توضیح بیشتر لازم است که برای یک دوره بازگشت استاندارد (۴۷۵ سال که متناظر با احتمال وقوع سالیانه ۰/۰۰۲۱ و ریسک ۱۰٪ در طول ۵۰ سال است و بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران تعریف شده است). مقادیر PGA از منحنی‌های خطر لرزه‌ای شکل (۷) استخراج گردد.

این مقدار برای PGA در سطح خطر زلزله زیاد برابر ۰/۴۶۶ g برای سطح خطر متوسط برابر ۰/۳۳۴ g و برای سطح خطر کم برابر ۰/۲۲۴ g از منحنی‌ها حاصل می‌شود (جدول ۴). بنابراین این نتایج نشان می‌دهد نسبت خطر لرزه‌ای در سطح کم به متوسط حدود ۵۰٪ و در سطح متوسط به زیاد حدود ۴۰٪ افزایش یافته است.

جدول ۴- مقدار PGA با احتمال وقوع ۱۰٪ در طول ۵۰ سال در سه سطح خطر زلزله در

	سطح خطر زلزله		
	کم	متوسط	زیاد
PGA:	0.224	0.334	0.466

شکل ۱۲ بر همین اساس رسم شده است و در آن روند تغییرات نرخ بیمه زلزله بر حسب تغییرات نرخ شتاب حداکثر زمین که نشانگر سطح خطر لرزه‌ای به نمایش درآمده است. این شکل نشان می‌دهد نرخ بیمه زلزله پنج ساختمان هدف روند افزایشی تقریباً یکسانی در مقابل افزایش سطح خطر از خود نشان داده‌اند که نتیجه قابل توجهی بشمار می‌رود و اثبات می‌کند می‌توان از ضرایب تقریباً یکسانی جهت نشان دادن تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه زلزله ساختمان‌ها استفاده نمود که این ضریب چندان تابع تعداد طبقات ساختمان نخواهد بود. این نتیجه می‌تواند در تدوین یک دستورالعمل بسیار کاربردی و منطقی جهت تعیین نرخ بیمه ساختمان‌ها در برابر زلزله با توجه به سطح خطر لرزه‌ای کارگشا باشد.

vulnerability and insurance loading for the affordability of earthquake insurance systems: evidence from Iran. The Geneva Papers on Risk and Insurance-Issues and Practice. 2015 Apr 1; 40: 295-315. <https://doi.org/10.1057/gpp.2014.35>

[4] Lin X. Risk awareness and adverse selection in catastrophe insurance: Evidence from California's residential earthquake insurance market. Journal of Risk and Uncertainty. 2020 Aug; 61 (1): 43 -65. <https://doi.org/10.1007/s11166-020-09335-4>

[5] French SP, Rudholm GG. Damage to public property in the Whittier Narrows earthquake: Implications for earthquake insurance. Earthquake spectra. 1990 Feb; 6 (1): 105 -23. <https://doi.org/10.1193/1.1585560>

[6] Brillinger DR. Earthquake risk and insurance. Environmetrics. 1993 Mar; 4 (1): 1 -21. <https://doi.org/10.1002/env.3170040102>

[7] Kagan YY. Earthquake size distribution and earthquake insurance. Communications in statistics. Stochastic models. 1997 Jan 1; 13 (4): 775 -97. <https://doi.org/10.1080/15326349708807451>

[8] Shephard RB, Smith EGC, Spurr DD. Earthquake insurance loss assessments for regions of Australia. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. 1997; 30 (1): 32 -9. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.30.1.32-39>

[9] Shephard RB, Spurr DD, Walker GR. The Earthquake Commission's earthquake insurance loss model. In: Proceedings of the 2002 Annual Conference of the New Zealand Society for Earthquake Engineering; 2002. Wellington (New Zealand): New Zealand Society for Earthquake Engineering. <https://www.nzsee.org.nz/db/2002/Paper41.pdf>.

[10] Yucemen MS. Probabilistic assessment of earthquake insurance rates for Turkey. Natural Hazards. 2005; 35: 291 -313. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-6485-8>.

[11] Yucemen M. Probabilistic assessment of earthquake insurance premium rates for Jordan. In: Proceedings of the International Earthquake Engineering Conference; 2005 Nov 21-24; Skopje, Macedonia. Skopje: Earthquake Engineering Research Center. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_375.pdf

نرمال منحنی‌های مدنظر تعیین گردید و در نهایت با استفاده از چارچوب ریسک محور تعیین شده، پانزده نرخ بیمه زلزله (پنج ساختمان و سه سطح خطر زلزله) محاسبه گردید. تحلیل این نرخ‌های بیمه بر مبنای سطح خطر زلزله منجر به نتایج ذیل گردید:

نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش تعداد طبقات روند تغییرات نرخ بیمه زلزله ساختمان‌ها روندی افزایشی است. در واقع اگرچه تفاوت چندانی بین نرخ بیمه زلزله ساختمان‌های سه و شش طبقه وجود ندارد، لیکن نرخ بیمه زلزله ساختمان‌های نه، دوازده و پانزده طبقه حدود ۱/۳، ۲ و ۲/۵ برابر نرخ بیمه ساختمان سه طبقه خواهد بود. این نسبت چندان تابع سطح خطر زلزله نیست و نشان می‌دهد تأثیرپذیری نرخ بیمه از تعداد طبقه ساختمان اندرکنش چندانی با سطح خطر زلزله نخواهد داشت.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد نرخ بیمه زلزله پنج ساختمان هدف روند افزایشی تقریباً یکسانی در مقابل افزایش سطح خطر از خود نشان داده- اند که نتیجه قابل توجهی بشمار می‌رود و اثبات می‌کند می‌توان از ضرایب تقریباً یکسانی جهت نشان دادن تأثیر سطح خطر لرزه‌ای بر نرخ بیمه زلزله ساختمانها استفاده نمود که این ضریب چندان تابع تعداد طبقات ساختمان نخواهد بود. این نتیجه می‌تواند در تدوین یک دستورالعمل بسیار کاربردی و منطقی جهت تعیین نرخ بیمه ساختمانها در برابر زلزله با توجه به سطح خطر لرزه‌ای کارگشا باشد.

بر اساس نتایج حاصل شده در این تحقیق، تغییر سطح خطر زلزله از کم به متوسط (که در آن شتاب حداکثر زمین حدود ۵۰٪ افزایش خواهد یافت) سبب می‌گردد نرخ بیمه زلزله حدود ۱۲۰٪ افزایش یابد. همچنین بر اساس این شکل تغییر سطح خطر زلزله از متوسط به زیاد (که در آن شتاب حداکثر زمین حدود ۴۰٪ افزایش خواهد یافت) سبب می‌گردد نرخ بیمه زلزله حدود ۸۵٪ افزایش پیدا کند.

به‌طور کلی و بر اساس نتایج حاصل می‌توان پیشنهاد داد به هر میزان که سطح خطر زلزله بر حسب شتاب حداکثر زمین افزایش پیدا کند، نرخ بیمه زلزله باید ۲/۲ برابر افزایش یابد که میزان افزایش بسیار قابل توجهی است و نشان می‌دهد دستورالعملهایی که نرخ بیمه زلزله را مستقل از سطح خطر لرزه‌ای پیشنهاد می‌دهند دچار خطای بسیار زیادی در محاسبات خواهند شد.

مراجع

[1] Cummins JD, Harrington SE, editors. Fair rate of return in property-liability insurance. New York: Springer Science & Business Media; 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7957-5>.

[2] Bradley BA. A critical examination of seismic response uncertainty analysis in earthquake engineering. Earthquake Eng Struct Dyn. 2013;42 (11): 1717 -29. <https://doi.org/10.1002/eqe.2331>

[3] Pakdel-Lahiji N, Hochrainer-Stigler S, Ghafory-Ashtiany M, Sadeghi M. Consequences of financial

<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1833-2>

[22] Lin JH. Earthquake insurance pricing: a risk-based approach. *Disasters*. 2018 Apr; 42 (2): 392 -404. <https://doi.org/10.1111/disa.12250>

[23] Nguyen C, Noy I. Insuring earthquakes: how would the Californian and Japanese insurance programs have fared after the 2011 New Zealand earthquake? *Disasters*. 2019 Jul; 43 (3): 746 -767. <https://doi.org/10.1111/disa.12343>

[24] Pothon A, Gueguen P, Buisine S, Bard PY. California earthquake insurance unpopularity: the issue is the price, not the risk perception. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2019 Aug 29; 19 (8): 1909 -1924. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1909-2019>

[25] Pothon A, Buisine S, Gueguen P, Bard PY. A maturity scale for earthquake insurance development based on the California experience. In: Silvestri F, Moraci N, editors. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*. Rotterdam (NL): CRC Press; 2019 Oct 22. p. 548-4555. <https://doi.org/10.1201/9780429063781-628>

[26] Goda K, Wilhelm K, Ren J. Relationships between earthquake insurance take-up rates and seismic risk indicators for Canadian households. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020 Nov 1; 50: 101754. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101754>

[27] Gkimpraxis A, Douglas J, Tubaldi E. Seismic risk management through insurance and its sensitivity to uncertainty in the hazard model. *Natural Hazards*. 2021 Sep; 108(2):1629-1657. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04721-6>

[28] Ardiansyah A, Gunawan SL, Pramujati WH, Putri ER, Oktaviana PP, Nurcahyo CB. An earthquake insurance for residential and non-engineered masonry building in Surabaya City. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022 Apr 1; 1015 (1): 012010. Bristol (UK): IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1015/1/012010>

[29] Radu N, Alexandru F. Parametric insurance—A possible and necessary solution to insure the earthquake risk of Romania. *Risks*. 2022 Mar 8; 10 (3): 59. <https://doi.org/10.3390/risks10030059>

[30] Pai J, Li Y, Yang A, Li C. Earthquake parametric insurance with Bayesian spatial quantile

[12] Liu RS, Wang Z, Zhu M. Study on financial loss and its adjustment in earthquake insurance. *Acta Seismologica Sinica*. 2006 Mar; 19: 207 -16. <https://doi.org/10.1007/s11589-002-0207-7>

[13] Walker GR. Earthquake insurance: an Australian perspective. *Australian Journal of Structural Engineering*. 2008 Jan 1; 8 (1): 39 -48. <https://doi.org/10.1080/13287982.2008.11464985>

[14] Yucemen MS, Yilmaz C, Erdik MU. Probabilistic assessment of earthquake insurance rates for important structures: application to Gumusova-Gerede motorway. *Structural Safety*. 2008 Sep 1; 30 (5): 420 -35. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2007.01.001>

[15] Wang Z, Lin T, Walker G. Earthquake Risk and Earthquake Catastrophe Insurance for the People's Republic of China. <http://hdl.handle.net/11540/1394>.

[16] Athavale M, Avila SM. An analysis of the demand for earthquake insurance. *Risk Management and Insurance Review*. 2011 Sep; 14 (2): 233 -46. <https://doi.org/j.1540-6296.2011.01205.x>

[17] Petseti A, Nektarios M. Proposal for a national earthquake insurance programme for Greece. *Geneva Pap Risk Insur Issues Pract*. 2012 Apr 1; 37: 377 -400. <https://doi.org/10.1057/gpp.2012.10>

[18] Charleson AW, Allaf NJ. Costs of base-isolation and earthquake insurance in New Zealand. In: *Proceedings of the 2012 New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference*; 2012 Apr 13-15; Christchurch, New Zealand. Wellington (NZ): NZSEE; 2012. p. 13-15. Available from: <http://db.nzsee.org.nz/2012/Paper041.pdf>

[19] Tian L, Yao P, Jiang SJ. Perception of earthquake risk: a study of the earthquake insurance pilot area in China. *Natural Hazards*. 2014 Dec; 74 (3): 1595 -611. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1253-6>

[20] Marulanda MC, Cardona OD, Mora MG, Barbat AH. Design and implementation of a voluntary collective earthquake insurance policy to cover low-income homeowners in a developing country. *Natural Hazards*. 2014 Dec; 74 (3): 2071 -88. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1263-4>

[21] Tian L, Yao P. Preferences for earthquake insurance in rural China: factors influencing individuals' willingness to pay. *Natural Hazards*. 2015 Oct; 79 (1): 93 -110.

[40] Zare M. Seismic hazard zoning in Iran: a state-of-the-art on the studies during four decades. *J Seismol Earthq Eng*. 2017 Apr 1; 19 (2): 71.

<https://www.bhrc.ac.ir/wp-content/uploads/2021/07/JSCEE-Vol-19-No-2-2017-pp71-94.pdf>

[41] Rajkumari S, Thakkar K, Goyal H. Fragility analysis of structures subjected to seismic excitation: a state-of-the-art review. *Structures*. 2022 Jun 1; 40: 303 -16. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.053>

[42] Jalayer F, Ebrahimian H, Miano A, Manfredi G, Sezen H. Analytical fragility assessment using unscaled ground motion records. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2017 Dec; 46 (15): 2639 -63.

<https://doi.org/10.1002/eqe.2922>

[43] Ancheta TD, Darragh RB, Stewart JP, Seyhan E, Silva WJ, Chiou BS, Wooddell KE, Graves RW, Kottke AR, Boore DM, Kishida T. NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*. 2014 Aug; 30 (3): 989 -1005. <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>

[44] Tafi S, Rashvand P, Adeli MM, Hashemi SA. Analyzing the dependency of earthquake insurance premium on the intensity measure used in probabilistic seismic hazard analysis and fragility curves. *Ain Shams Eng J*. 2024 Aug 3; 102989. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102989>

[45] Vamvatsikos D, Cornell CA. Applied incremental dynamic analysis. *Earthq Spectra*. 2004 May; 20 (2): 523 -53. <https://doi.org/10.1193/1.1737737>

[46] Brunesi E, Nascimbene R, Parisi F, Augenti N. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. *Eng Struct*. 2015 Dec 1; 104: 65 -79. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.09.024>

regression. *Insurance: Mathematics and Economics*. 2022 Sep 1; 106: 1 -12.

<https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2022.07.014>

[31] Medina RA, Krawinkler H. Evaluation of drift demands for the seismic performance assessment of frames. *Journal of Structural Engineering*. 2005 Jul; 131(7): 1003 -1013.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:7\(1003\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:7(1003))

[32] Ibarra LF, Medina RA, Krawinkler H. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2005 Oct; 34 (12): 1489 -1511.

<https://doi.org/10.1002/eqe.495>

[33] McKenna F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*. 2011 Jun 27; 13 (4): 58 -66.

<https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>

[34] Amiri GG, Motamed R, Es-Haghi HR. Seismic hazard assessment of metropolitan Tehran, Iran. *Journal of Earthquake Engineering*. 2003; 7 (3), 347-372.

<https://doi.org/10.1080/13632460309350455>

[35] McGuire RK. Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2008 Mar; 37 (3): 329 -338.

<https://doi.org/10.1002/eqe.765>

[36] Cornell CA. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968 Oct 1; 58 (5): 1583 -1606.

<https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>

[37] Baker JW. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. Version 2.1. 2013; 2 (1): 79. Available from:

[https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker \(2013\) Introduction to PSHA v2.1.pdf](https://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker (2013) Introduction to PSHA v2.1.pdf)

[38] Ramazi H, Firoozi A, Aenollah. Seismotectonics and seismicity of the Silakhor region, Iran. *Journal of the Geological Society of India*. 2013 Sep 1; 82 (3): 283 -289.

<https://doi.org/10.1007/s12594-013-0088-2>

[39] Zare M, Sabzali S. Spectral attenuation of strong motions in Iran. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*; 2006 Aug; Grenoble, France. Paper No. 146. Available from:

<https://www.issmge.org/uploads/publications/59/67/6.6.ESSMA.pdf>