

Estimation of Risk-Targeted Peak Ground Acceleration

Mohammadreza Ghayamghamian
Professor, Risk Management Research Center
mrgh@iiees.ac.ir

Abdolreza Sarvghad Moghadam, Mohammad Zaman

The advances in science and technology alongside the economic growth cause increase in society demand in the field of safety. In order to achieve the desired level of safety that is compatible with the societal and economic capacity, first, it is necessary to know the actual level of vulnerability and then the consequences of the possible proposed options should be evaluated quantitatively. In Standard No. 2800, which is the Iranian code for seismic resistance design of buildings, a uniform-hazard approach neglecting buildings' vulnerability and one point of hazard curve (475 years) is adopted in order to determine the seismic design intensity. Therefore, the reliability of buildings designed with this method remains unknown. Here, seismic design intensity is determined based on the uniform-risk approach. To this end, life safety performance at the maximum considered earthquake (MCE) level of demand is considered as the minimum acceptable performance. Since the collapse of buildings is the main cause of fatalities and serious injuries, two acceptance criteria are placed on the probability of buildings collapse in order to achieve an acceptable level of performance. Buildings collapse risk is determined through the risk integral, which is the covolution of earthquake hazard and building fragility curves. Tehran and Karaj cities are chosen for the calculation of earthquake hazard curves. Earthquake hazard is estimated in terms of peak ground acceleration (PGA) and then converted to the pseudo-spectral acceleration, which is needed in constructing buildings' collapse fragility curve, through the B factor provided in Standard No. 2800. In order to expedite the possible future seismic risk studies in the selected region, PGA hazard curves are approximated by cubic polynomials and their coefficients distribution maps are provided. The generic fragility curve concept is adopted in this study for constructing the buildings' fragility curves. Then the risk-adjusted design basis earthquake (PGA_{RDDBE}) is computed by optimizing the risk integral based on the selected acceptance criteria and its distribution maps are provided for Tehran and Karaj in Figures (1 and 2), respectively.

The effects of uncertainty in the buildings' fragility curve

برآورد بیشینه شتاب زمین بر اساس معیار خطرپذیری یکنواخت

محمدرضا قائمقامیان
استاد پژوهشکده مدیریت خطرپذیری و بحران
mrgh@iiees.ac.ir

عبدالرضا سروقد مقدم، محمد زمان

با افزایش دانش فنی، توان اجرایی و بهبود شرایط اقتصادی سطح بالاتری از ایمنی در طراحی ساختمانها و آیین‌نامه‌های طراحی از سوی جوامع مورد مطالبه قرار می‌گیرد. برای رسیدن به سطح مطلوب ایمنی نیاز است تا مشخص گردد در چه سطحی از ایمنی قرار گرفته و نیازمند ارتقاء به چه سطحی از آن می‌باشیم. طراحی ساختمانها بر اساس روند فعلی استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) منجر به ساختمانهایی با قابلیت اطمینان نامعین می‌گردد. در این رساله شتاب زلزله طراحی در قالب بیشینه شتاب زمین ($Peak\ Ground\ Acceleration$) به طوری که بتواند معیارهای پذیرش بر اساس ریسک فروریزش را برآورده نماید و منجر به ساختمانهایی با خطرپذیری مشخص گردد، ارائه شده است. این معیارها با محدود نمودن احتمال فروریزش ساختمان در طول عمر مفید ساختمان و همچنین تحت زلزله ($Maximum\ Considered\ Earthquake$) به مقادیر قابل قبول برآورده می‌گردند. برای محاسبه ریسک فروریزش ساختمانها که برابر با انتگرال حاصل ضرب منحنی خطر زلزله در منحنی آسیب‌پذیری می‌باشد، در ابتدا لازم است تا منحنی خطر زلزله و منحنی آسیب‌پذیری ساختمانها برآورد گردند. برای این منظور دو شهر تهران و کرج برای انجام مطالعات انتخاب و با استفاده از تحلیل خطر احتمالاتی مرسوم، منحنی‌های خطر موردنیاز برای ۲۱۲۵ محل برآورد شده‌اند. برای تسریع مطالعات آتی ریسک لرزه‌ای در نواحی مورد مطالعه توابع خطر زلزله در قالب PGA با احتمال فراگذشت در ۵۰ سال با چند جمله‌ای‌های درجه ۳ تقریب و نقشه توزیع ضرایب آن ارائه شده است. منحنی‌های شکنندگی در سطح عملکردی فروریزش برای ساختمانها نیز با استفاده از رویکرد «منحنی شکنندگی عمومی» تولید و سپس با استفاده از انتگرال ریسک، مقادیر شتاب زلزله طراحی $Risk-adjusted\ Design\ Basis$ پذیرش محاسبه شده است. مقادیر PGA_{RDDBE} حاصل نشان‌دهنده این است که شتاب زلزله طراحی تجویز شده در استاندارد ۲۸۰۰ (۲۸/۳۵) g برای نواحی مورد مطالعه نه تنها منجر به طراحی ساختمانها با ریسک فروریزش یکسان نمی‌شود، بلکه در جهت ایمن نیز قرار ندارد. مقادیر PGA_{RDDBE} محاسبه شده برای دو شهر تهران و کرج به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

عدم قطعیت‌های موجود در منحنی شکنندگی ساختمانها در محدوده ۰/۵ تا ۰/۸ مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شد که این میزان تغییرات تأثیری بر روی شتاب زلزله طراحی ساختمانهای متعارف نخواهند داشت (شکل (۳)). در ادامه کفایت مقادیر ضریب اهمیت موجود در استاندارد ۲۸۰۰ بررسی و نشان داده شد که این مقادیر هم نیاز به بازنگری و تغییر از مقدار ۱/۲ و ۱/۴ به ۱/۳ و ۱/۶ به ترتیب برای ساختمانهای با اهمیت زیاد و بسیار زیاد دارند (شکل (۴)).

برای بررسی کفایت مقادیر PGA_{RDDBE} در تأمین اهداف استاندارد ۲۸۰۰

are also evaluated and found that changes in its value have little effects on design values for buildings, Figure (3). The results of PGA_{RDDBE} show that the prescribed 0.35g for entire areas of Tehran and Karaj (PGA_{2800}) neither provides a uniform collapse risk nor stands on the safe side. Therefore, it is recommended that the design earthquake intensity of Standard No. 2800 to be replaced with PGA_{RDDBE} calculated. Besides, by examining the effects of importance factors prescribed in Standard No. 2800 for buildings with high and very high importance, it was found that those values also need to be increased from 1.2 and 1.4 to 1.3 and 1.6, respectively, Figure (4).

Before adopting PGA_{RDDBE} values as design earthquake intensity, it is necessary to ensure their adequacy in providing the intended performance goals considered in seismic design codes. For this purpose, the collapse margin ratio (CMR) and reparability of buildings at the MCE and design earthquake levels of demand need to be evaluated. To this end, 96 index archetypes of buildings with regular steel intermediate moment frame (IMF) by considering four design parameters, namely number of stories (2, 3, 6, 9, 12, and 15), span lengths (4.0 and 8.0 m), occupancies (residential and commercial), and design earthquake's intensity (0.15, 0.25, 0.35, and 0.45g) are designed. Static nonlinear analysis is used to evaluate the CMR at the MCE level of demand. CMR resulting values show that the PGA_{RDDBE} may lead to buildings with CMR lower than 1.5, Figure (5). Therefore, it is necessary to set a lower limit on the PGA_{RDDBE} values such that the CMR of 1.5 is guaranteed. This value is found to be 0.35g for Tehran and Karaj. According to this value, PGA_{RDDBE} values are modified and a design earthquake intensity map that can be used to update the PGA_{2800} is provided, Figure (6).

In order to assess the reparability of buildings design with and evaluated at the PGA_{RDDBE} proposed here, residual drift ratio (Δ_d) is selected as a performance indicator. Then, based on the results obtained from the nonlinear analysis of index archetypes, the relationship between design parameters and seismic demand with Δ_d is derived and used to calculate the residual drift ratio in Tehran and Karaj. All the calculated Δ_d s at the PGA_{RDDBE} level of demand are lower than 0.5%, which confirms that the considered buildings are repairable at this seismic demand level. In order to show the adequacy of IMFs use in regions with high and very high seismicity, ductility demand of index archetypes at the PGA_{RDDBE} level of seismic demand is evaluated. Ductility demands are calculated through the relationship derived here between

فضای نمونه ساختمانی از ساختمانهای فولادی با سیستم باربرجانبی قاب خمشی متوسط (Regular Steel Intermediate Moment Frame) و منظم در پلان و ارتفاع تشکیل و بر اساس مؤلفه‌های تأثیرگذار بر روی پاسخ ساختمان شامل تعداد طبقات (۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵)، طول دهانه (۴ و ۸ متر)، کاربری (مسکونی و تجاری) و شتاب زلزله طراحی (۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵g) به‌عنوان مؤلفه‌های تأثیرگذار بر روی پاسخ تعریف و ۹۶ ساختمان بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی فضای نمونه تولیدشده نشان می‌دهد که PGA_{RDDBE} می‌تواند به طرح ساختمانهایی با حاشیه ایمنی در برابر فروریزش (Collapse Margin Ratio) کمتر از ۱/۵ شود (شکل (۵)). به‌منظور تأمین CMR حداقل ۱/۵، قرار دادن حد کمینه‌ای بر روی مقادیر PGA_{RDDBE} لازم بود که این حد کمینه برای شهرهای تهران و کرج برابر با مقدار ۰/۳۵g برآورد گردید.

علاوه بر این با محاسبه نسبت جابه‌جایی نسبی ماندگار (Residual Drift Ratio) به‌عنوان شاخص تعمیرپذیری نشان داده شد که ساختمانهای طراحی‌شده با PGA_{RDDBE} در سطح خطر زلزله طراحی (PGA_{RDDBE}) تعمیرپذیر خواهند بود. همچنین این ساختمانها از شانس بالایی برای تعمیرپذیر بودن در سطح خطر MCE برخوردار هستند. کفایت بکارگیری ساختمانها با قاب خمشی فولادی متوسط در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد و بسیار زیاد از طریق محاسبه تقاضای شکل‌پذیری در سطح خطر MCE نیز بررسی و مشخص شد که می‌توان از این نوع سیستم باربرجانبی بدون نگرانی از فراگذشت تقاضا از ظرفیت شکل‌پذیری استفاده نمود. به‌منظور ایجاد امکان برآورد تبعات اقتصادی ناشی از تغییرات پیشنهادی در شدت زلزله طراحی، وزن نرمال شده اسکلت ساختمان به‌عنوان شاخص اقتصادی پایه انتخاب و رابطه میان شتاب زلزله طراحی و وزن نرمال ارائه‌شده است. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش شتاب زلزله طراحی از مقدار ۰/۳۵g به ۰/۴۰g، به‌طور میانگین تنها به میزان ۵٪ به وزن اسکلت ساختمانها افزوده خواهد شد که نشان‌دهنده تأثیر اقتصادی کم در مقیاس فردی می‌باشد. در ادامه، به‌منظور ایجاد ابزاری کاربردی با کاربری آسان، روابطی میان مؤلفه‌های طراحی تعریف‌شده و شتاب زلزله در سطح خطر مورد نظر با نسبت جابه‌جایی نسبی ماندگار به‌عنوان شاخص تعمیرپذیری و نسبت جابه‌جایی نسبی (Drift Ratio) تحمیل‌شده به‌عنوان شاخص خسارت ارائه شده است. در نهایت، روابط ارائه‌شده در این پژوهش چهارچوبی را برای تصمیم‌سازی به‌منظور تعیین شتاب زلزله طراحی تأمین‌کننده سطوح عملکردی مطلوب در سطوح خطر مورد علاقه را ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: شتاب زلزله طراحی، خطرپذیری-یکنواخت، حاشیه ایمنی ساختمان در برابر فروریزش، نسبت جابه‌جایی نسبی ماندگار، تقاضای شکل‌پذیری، قاب خمشی متوسط فولادی

this performance indicator and selected design parameters. The resulting values are within the allowable range required by the Iranian National Building Code (INBC) part 10. It reveals that the IMFs are relevant to be used in regions with high and very high seismicity. Results show that as the design earthquakes intensity increases, the CMR also increases. Meanwhile, an increase in design earthquake intensity increases the weight of the buildings. This matter can render the safety enhancement as an unaffordable option. In order to assess the economic consequences of changes in PGA_{RDBE} , the building's normalized structural weight (WN) is selected as a basic economic index, then a relationship that relates the WN to the level of seismic demand for which the designed building is provided. This equation is derived based on the statistical analysis of the results obtained from the designed index archetypes. In order to estimate damage state and its distribution at the desired level of seismic demand, imposed drift ratio (Δd) is selected as a performance indicator and then a relationship between design parameters and seismic demand level with Δd is derived. This equation is derived based on the static nonlinear analysis's results obtained from provided building design spaces in this study. The relationships provided in this study together provide a useful and easy-to-use tool in shortening the performance-based design procedure and helps the decision-makers to decide on the proposed changes in PGA_{RDBE} leading to a safe and affordable choice.

Keywords: Design base earthquake, Uniform-risk, Collapse margin ratio, Residual drift ratio, Ductility demand, Intermediate steel moment frame, Risk-targeted PGA

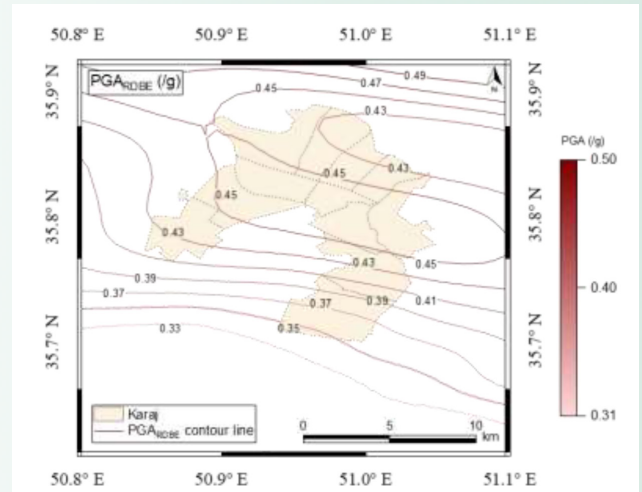


Figure 2: Risk-adjusted design basis earthquake (PGA_{RDBE}) for Karaj

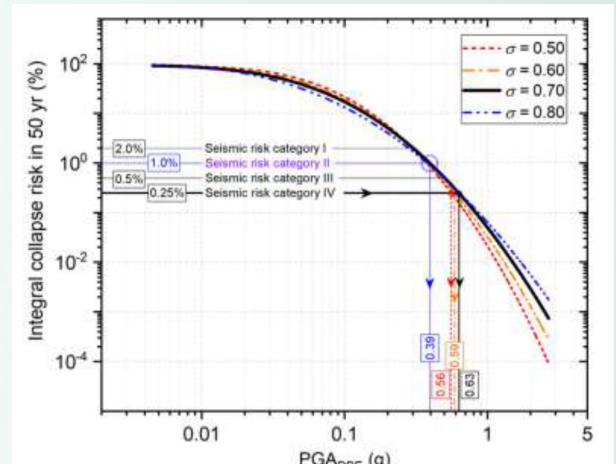


Figure 3: The effects of different uncertainty of fragility curve on design base earthquake

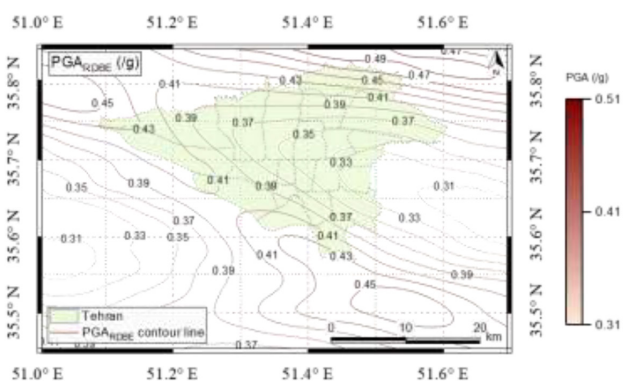


Figure 1: Risk-adjusted design basis earthquake (PGA_{RDBE}) for Tehran

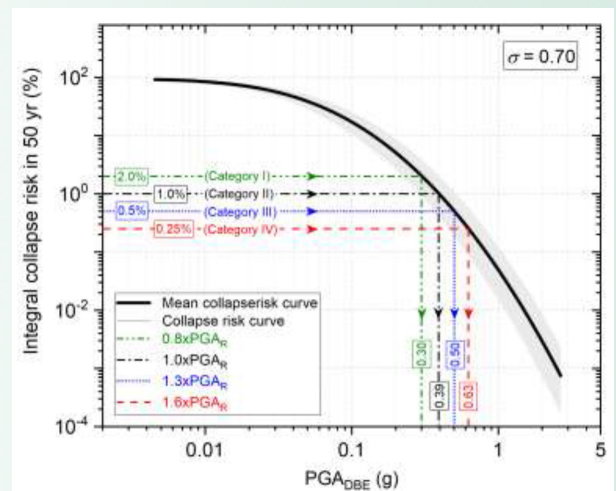


Figure 4: Design basis earthquake for buildings of high and very high importance

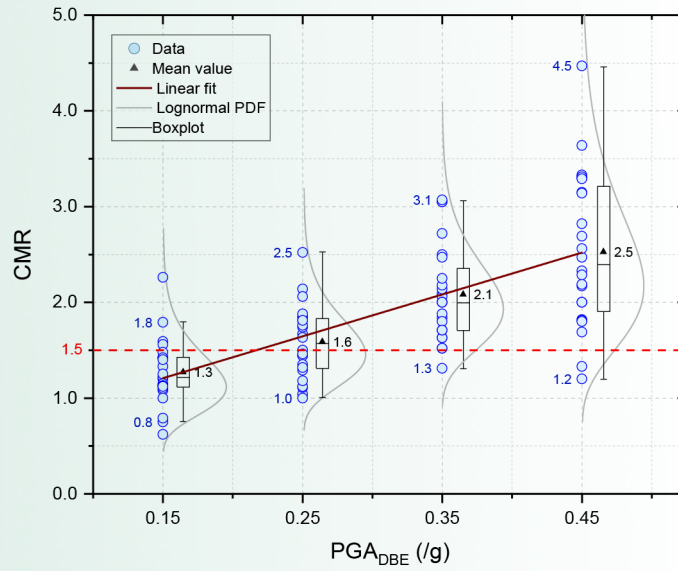


Figure 5: CMR versus a range of PGA_{DBE}

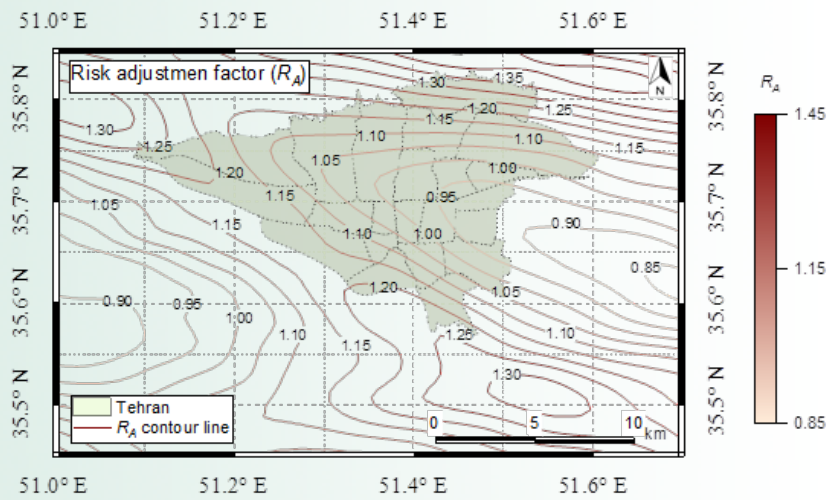


Figure 6: Risk-adjusted Factor (R_A) that used to convert design base earthquake proposed in standard 2800 to risk-targeted ones for Tehran