



University Of Qom



Investigating Uncertainty in Seismic Design Maps Based on Hazard and Fragility Curves

Alireza Zarrineghbal¹  , Hamid Zafarani²  

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran. E-mail: zarrineghbal@qut.ac.ir
2. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, IIEES, Tehran, Iran. E-mail: h.zafarani@iiees.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 01 Sep 2024
Revised 26 Dec 2024
Accepted 27 Dec 2024
Published 28 Dec 2024

Keywords:
Seismic Hazard,
Risk Based Design,
Uncertainty,
Design Map,
Seismic Loading.

ABSTRACT

All engineering measurements carry inherent uncertainty, whether acknowledged or not. If we add a type of risk metric as well as uncertainty quantification in the procedure of establishing the seismic design load applied to the structures, we will have a risk-informed approach for the resulting design load referred to as the risk-based seismic design hazard. For example, ASCE/SEI 43-05 standard uses a risk-based approach to prepare the seismic design spectra to be applied to the nuclear power plants (NPPs). This approach necessitates the propagation of uncertainty in ground motion model (i.e., the hazard curve), as well as probabilistic distribution of structural capacity levels (i.e., the fragility curve). The present research begins with the specifics of this approach, in particular the whole shape of the earthquake hazard curve and its integration with the structural fragility curve for estimating the seismic design load. The aim is to identify for a probabilistic model that can estimate the uncertainty of seismic design loads for a variety of engineering structures. This paper presents the estimated uncertainties of seismic design loads across the Iran map using the developed probabilistic model. The uncertainty, according to the study's assumptions, is at least 45% in terms of the coefficient of variation, indicating a significant value. The estimated variability in seismic design loads in the Iran region ranges from 45% to 90%.

Cite this article: Zarrineghbal A, Zafarani H. Investigating Uncertainty in Seismic Design Maps Based on Hazard and Fragility Curves. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 1-14. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.11285.1572>



Introduction

All engineering measurements carry inherent uncertainty, whether acknowledged or not. If we add a type of risk metric as well as uncertainty quantification in the procedure of establishing the seismic design load applied to the structures, we will have a risk-targeted approach for the resulting design load referred to as the risk-targeted seismic design hazard. For example, ASCE/SEI 43-05 standard uses a risk-targeted approach to prepare the seismic design spectra to be applied to the nuclear power plants. When the risk-targeted approach was also used in ASCE 7- 10, seismic load intensity changes ranged from a 30% reduction in some areas to a 15% rise in others. It is clear that such an amount of change, when implemented across the whole region, will have a significant impact on the economics of the construction industry and each structure.

Problem Statement

This approach necessitates the propagation of uncertainty in ground motion model (i.e., the hazard curve), as well as probabilistic distribution of structural capacity levels (i.e., the fragility curve). The present research begins with the specifics of this approach, in particular the whole shape of the earthquake hazard curve and its integration with the structural fragility curve for estimating the seismic design load. The aim is to identify for a probabilistic model that can estimate the uncertainty of seismic design loads for a variety of engineering structures.

In developing a risk-targeted seismic hazard map, the risk of collapse at a construction site must equal the target risk. This study considers the target risk to be equal to a 1% probability of collapse in 50 years.

Results

A region with many construction sites is being studied. To ensure that each structure meets a specific collapse risk, the design Peak Ground Acceleration (PGA) is calculated for every building site. This calculated PGA, used to assess the risk target, is known as the risk-targeted design hazard, represented as PGA_R .

The outcome of the study will be a uniform risk map, rather than a uniform hazard map (which displays identical return periods). Therefore, the design return period will vary for each building site. The calculation of PGA_R at each construction site involves a trial-and-error approach because it is initially unclear which fragility curve will yield a risk integral equal to the target risk value of 1% (denoted as λ_{tg}).

Conclusion

This paper presents the estimated uncertainties of seismic design loads across the Iran map using the developed probabilistic model. The uncertainty, according to the study's assumptions, is at least 45% in terms of the coefficient of variation, indicating a significant value. The estimated variability in seismic design loads in the Iran region ranges from 45% to 90% (Fig. 1).

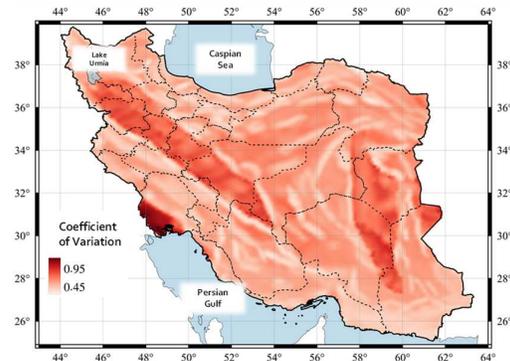


Fig. 1. Uncertainty map for risk-targeted seismic design hazard in Iran

The variations in design return periods are significant, ranging from 350 years to 900 years throughout Iran. The average design return is 490 years, indicating a 5% increase from the 475-year return period in the 2800 standard. Particularly at the seismic zone of very high hazard, it is necessary to consider larger return periods, potentially up to a 100% increase. The uncertainty in the mapped design hazard is finally presented. Figure 1, indicates that the uncertainty in the seismic design load in Iran, based on the available data, is at least 45%, which is substantial. It indicates the possibility for a change in the employed design PGA, ranging from 45% to 90%. This degree of uncertainty greatly influences the

outcomes of design and construction. Consequently, in light of the present condition of Standard 2800 or other national rules, the engineering community, stakeholders, and pertinent officials must acknowledge this issue.

Declaration of Competing Interest

No competing interests: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Alireza Zarrineghbal:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing–original draft; Writing–review & editing.

Hamid Zafarani:

Conceptualization; Data curation; Methodology; Project administration; Resources; Supervision; Validation; Writing–review & editing



پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی



شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۴۰۴
صفحه خانگی مجله: <https://cer.qom.ac.ir/>

بررسی عدم قطعیت در نقشه خطر طرح لرزه‌ای براساس منحنی‌های خطر و شکنندگی

علیرضا زرین اقبال^۱، حمید زعفرانی^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران. رایانامه: zarrineghbal@qut.ac.ir

۲. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. رایانامه: h.zafarani@iiees.ac.ir

چکیده

در هر اندازه‌گیری مهندسی، عدم قطعیت حضور دارد؛ خواه به آن توجه شود، خواه از قلم بیفتد. اگر در برآورد بار طرح برای یک سازه، معیاری از جنس ریسک قرار داده و عدم قطعیت آن نیز محاسبه گردد، روش انجام را روش ریسک‌مبنا و بار طرح حاصل را بار طرح ریسک‌مبنا می‌نامند. برای نمونه، در استاندارد معتبر ASCE/SEI 43-05، در طراحی لرزه‌ای کارخانه‌های هسته‌ای، از روش ریسک‌مبنا برای تهیه طیف طرح لرزه‌ای، استفاده شده است. یک لازمه در این روش، در نظرگیری عدم قطعیت، چه در مدل جنبش زمین (یعنی منحنی خطر) و چه در ظرفیت سازه (یعنی منحنی شکنندگی) است. تحقیق حاضر، نخست جزئیات این روش شامل در نظر گرفتن شکل کامل منحنی خطر زلزله و نحوه دخالت دادن پاسخ سازه مورد نظر در تعیین بار طرح لرزه‌ای را بررسی می‌کند. سپس، به یک مدل احتمالی دست یافته می‌شود به طوری که بتوان از آن برای برآورد عدم قطعیت در بار طرح لرزه‌ای، بهره برد. با کمک مدل احتمالی به‌دست آمده در این مقاله، نقشه عدم قطعیت موجود در زلزله طرح، برای کشور ایران، تهیه و ارائه گردید. عدم قطعیت در بار طرح لرزه‌ای در کشور ایران، براساس اطلاعات و فرضیات موجود در مطالعه حاضر، حداقل برابر ۴۵ درصد به‌دست آمد که یک مقدار قابل‌توجه است. به عبارت دیگر، مشاهده شد در شتاب مبنای طراحی که در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در گستره ایران به‌کار گرفته می‌شود، از ۴۵ تا ۹۰ درصد امکان تغییر وجود دارد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

کلیدواژه‌ها:

خطر لرزه‌ای،
طراحی ریسک‌مبنا،
عدم قطعیت،
نقشه خطر،
بارگذاری لرزه‌ای.

استناد: زرین اقبال علیرضا، زعفرانی حمید. بررسی عدم قطعیت در نقشه خطر طرح لرزه‌ای براساس منحنی‌های خطر و شکنندگی. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۱-۱۴. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.11285.1572>



۱- مقدمه

کشور ایران در کمربند لرزه‌خیز آلپ- هیمالیا قرار گرفته و در بیشتر مراکز جمعیتی ایران، خطر و ریسک لرزه‌ای بسیار بالا است [۱]. تجربه زمین‌لرزه‌های معروفی مانند منجیل، بم یا سرپل ذهاب نیز بر مفهوم ریسک لرزه‌ای در ایران تأکید نمود [۲]. از همین رو، در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های ساختمانی و غیرساختمانی، توجه زیادی بر ضوابط لرزه‌ای در سراسر کشور، پدیدار شده است. با این حال، شمار بسیار زیادی از سازه‌ها در معرض ریسک‌های نامعلوم و نایکنواخت قرار دارد، زیرا اگرچه آیین‌نامه در برابر زلزله طرح تعریف شده خود، هدف‌گذاری مشخصی می‌کند؛ اما سازه‌های طراحی شده طبق آیین‌نامه، در برابر زلزله‌هایی که فراتر از زلزله طرح، رخ می‌دهد؛ حاشیه اطمینان روشن یا یکسانی را ندارد [۳].

یک بخش کلیدی (تأثیرگذار در طراحی) در آیین‌نامه، جایی است که شدتی از جنبش زمین برآورد شده تا سازه‌ها در برابر رخداد آن در طول عمر خود، اصطلاحاً مقاومت کند (بار یا خطر طرح). برآورد بار طرح، کار دشواری است؛ زیرا با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه است.

آیین‌نامه، اغلب، بار طرح را براساس برگزیدن نرخ فراگذشت مشخصی، مثلاً متناظر با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله (استاندارد ۲۸۰۰)، تعیین کرده و نتایج را با نقشه خطر طرح لرزه‌ای ارائه می‌کند [۴]. در این صورت، می‌توان نقشه طرح لرزه‌ای را هم‌خطر نامید! خاطرنشان می‌گردد در دو ساختمان که خطر لرزه‌ای با دوره بازگشت یکسان وجود دارد، الزاماً ریسک فروریزش برابر، حاصل نمی‌گردد، زیرا با توجه به شکل کامل منحنی خطر، حتی دو ساختمان که در شدت خطر نظیر با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله، یکی باشند و هر دو سازه واقع بر آن دو نیز منحنی

شکنندگی یکسان داشته باشند، آن‌گاه لزوماً ریسک کل برابر هم، حاصل نخواهد گردید، زیرا تمام گستره سطوح لرزه‌ای از یک منحنی خطر، در احتمال کل فروریزش، سهم دارند و ریسک فروریزش را تنها نمی‌توان متناسب با یک سطح از خطر دانست. به همین دلیل، در آیین‌نامه‌های معتبر مانند استاندارد 7 ASCE، رویکرد دیگری با در نظرگیری مستقیم و شفاف ریسک فروریزش در طول عمر سازه، به جهت برآورد بار طرح لرزه‌ای به کار بسته می‌شود (اصطلاحاً بار یا خطر طرح ریسک‌مبنای) [۵]. باید خاطرنشان ساخت که آرمان آیین‌نامه، همانا فراهم‌آوری سطحی یکسان و معین از ایمنی، برای انواع سازه‌های طرح‌شده با آیین‌نامه و نیز برای تمام ساختمان‌ها است (ریسک یکنواخت برای همه) [۶]. رویکرد ریسک‌مبنای، با چنین آرمانی، سازگاری دارد. باید دانست، در این روش نیاز است تا کل منحنی خطر، در اختیار باشد؛ حتی شدت زلزله‌هایی با نرخ فراگذشت بسیار کوچک (نظیر با دوره بازگشت بسیار بزرگ) [۷]. اما این شدت‌ها یا کم‌تر در دسترس‌اند، یا مقدارشان با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. پس در اینجا نقش برجسته عدم قطعیت آشکار می‌شود. تحقیق حاضر، یک شیوه نوین جهت محاسبه عدم قطعیت موجود در بار طرح لرزه‌ای، ارائه کرده و با یک سری فرض معمول، حدود مقادیر آن را برای نخستین بار در پهنه ایران به دست می‌دهد. اهمیت توجه به عدم قطعیت، به تأثیر شگرفی برمی‌گردد که در تصمیمات مهندسی و البته مدیریتی دارد، زیرا بدون آنکه نقش هر عامل و میزان اطمینان به آن، روشن نباشد؛ تصمیمات منطقی و قابل دفاع، در دسترس نخواهد بود.

از طرف دیگر، احتمال شکنندگی سازه (با معیار فروریزش) نیز صریحاً به محاسبات برآورد بار طرح لرزه‌ای، با روش ریسک‌مبنا وارد می‌گردد. افزون بر این،

²- Risk-targeted Seismic Design Hazard

³- Risk-targeted Approach

¹- Uniform Hazard Map

آید. چنین موضوعی، نخستین علت تغییر از فلسفه نقشه هم‌خطر^۴، به نقشه هم‌ریسک^۵ است. مراجع بین‌المللی دیگری نیز به این موضوع اشاره کرده‌اند [۱۵-۱۷].

در تحقیق حاضر، افزون بر حل مسئله برآورد بار طرح زلزله با روش ریسک‌مبنا در سطح کشور، عدم قطعیت در بار طرح نیز براساس مدل‌های خطر و شکنندگی فرض شده، محاسبه و ارائه می‌گردد. از این رو، حاشیه تغییرات در برآورد خطر طرح، از دست نرفته و می‌توان یک اندازه مشخص را به آن اطلاق کرد. نتایج این اقدامات، می‌تواند مستقیماً در نسل(های) آتی استانداردها به‌کار گرفته شود. بدین‌سان، دیدگاه روشن و گویاتری در اختیار تصمیم‌گیران، پژوهشگران و مهندسان قرار خواهد گرفت [۱۸].

۲- مبانی نظری و شرح مسئله

ریسک، به طور عام، به احتمال وقوع رخداد‌های کم‌تکرار اما پر عواقب اطلاق می‌گردد. اگر در انتخاب بار طرح در یک سازه، معیاری از جنس ریسک را قرار دهند، روش انجام را روش ریسک‌مبنا و بار طرح حاصل را بار طرح ریسک‌مبنا می‌نامند. یک لازمه یا خاصیت این روش در استفاده از شکل کامل منحنی خطر و نیز دخالت دادن پاسخ سازه مورد نظر در تعیین بار طرح آن است.

زمانی که منحنی خطر با انجامیدن تحلیل خطر زلزله و منحنی شکنندگی سازه با روش‌هایی مانند تحلیل IDA^۶، در اختیار قرار گیرند؛ آن‌گاه با کمک این عناصر می‌توان ریسک لرزه‌ای را محاسبه کرد. در شکل ۲، ارتباط میان ریسک و خطر لرزه‌ای به شکلی ساده نشان داده شده است. با وجود مدل‌های احتمالاتی خطر لرزه‌ای و شکنندگی سازه، مدل ریسک به‌صورت ترکیب آن‌ها (براساس قانون احتمال کل)، و عدم قطعیت براساس

جنش‌های نزدیک‌گسل، مدل شکنندگی را پیچیده‌تر و گاهی آن را هم‌زمان به ساختگاه و سازه وابسته می‌کند. با فرض تولید منحنی‌های شکنندگی با چنین ملاحظات، هم‌چنان می‌توان برای دسته(های) مشخصی از ساختمان‌ها یا سازه‌ها در پهنه(های) موردنظر، نقشه برآورد خطر لرزه‌ای با روش ریسک‌مبنا را ارائه کرد [۸ و ۹].

روش ریسک‌مبنا یک روش منطقی و قابل دفاع برای برگزیدن اندازه شتاب یا بار طرح لرزه‌ای است. در نسخه سال ۲۰۱۶ استاندارد ASCE/SEI 4 روش ریسک‌مبنا شرح شده است [۱۰]. این روش در استاندارد ساختمانی ASCE 7 نیز جای خود را از سال ۲۰۱۰ باز کرد [۱۱]. هم‌اکنون مشاوران بین‌المللی از آخرین نسخه آن برای محاسبه زلزله طرح ریسک‌مبنا استفاده می‌کنند. روش ریسک‌مبنا، در حال حاضر، آخرین فلسفه‌ای است که مبنای برآورد بار طرح لرزه‌ای قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱- پیشرفت شیوه برآورد بار طرح لرزه‌ای

وقتی رویکرد ریسک‌مبنا در ASCE 7 به‌کار گرفته شد، مشاهده گردید، بازه تغییرات شدت بار لرزه‌ای از ۳۰٪ کاهش در بعضی مناطق، تا ۱۵٪ افزایش در جاهایی دیگر، گسترده است [۱۲]. روشن است چنین درصد تغییری، وقتی در پهنای کشور رخ دهد، افزون بر اثر بر هر سازه، تأثیر شایانی در اقتصاد بازار ساخت نیز خواهد گذاشت.

استانداردهای API RP 2EQ و ASCE 43 نیز از دهه ۹۰ میلادی با تکیه بر فرض شکل خطی برای منحنی خطر، کاملاً در حوزه برآورد ریسک‌مبنای بار طرح، شناخته شده‌اند [۱۳ و ۱۴]. این دو استاندارد صنعتی، به گونه‌ای مستدل، نشان داده‌اند که بسته به مقدار شیب منحنی خطر، می‌توان در میان ساختگاه‌های هم‌خطر، تغییراتی چشم‌ناپوشیدنی در ریسک نهایی لرزه‌ای، پدیدار

4- Uniform Hazard Map

5- Uniform Risk Map

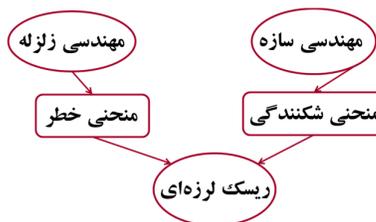
6- Incremental Dynamic Analysis (IDA)

منحنی خطر را به صورت سنتی با معادله زیر مدل می‌کنند:

$$\lambda_H(PGA) = k_0 \times PGA^{-k} \quad (1)$$

که در آن k_0 و k دو ضریب ثابت، وابسته به ساختگاه هستند. نرخ فراگذشت از یک سطح مشخص PGA نیز با نماد λ_H نشان داده می‌شود. معادله (۱)، در واقع، یک تقریب خطی در یک فضای لگ-نرمالی از PGA و نرخ‌های وقوع آن است. در رویکرد ریسک‌مبنا، نه فقط یک نرخ (یا معادلا یک دوره بازگشت که مثلاً ۴۷۵ ساله باشد)، بلکه یک بازه از نرخ‌های وقوع زلزله به کار گرفته می‌شود. باید دانست که این یک مزیت بزرگ است، زیرا ضمن آن، می‌توان عدم قطعیت وقوع زلزله را نیز مدل کرد (بخش ۳-۴). براساس نرخ فراگذشت، بازه $(10^{-3} \times 1)$ و $(10^{-4} \times 2)$ برای λ_{H0} و براساس دوره بازگشت (RP^9) برابر (۷۵ و ۵۰۰۰) $[\lambda_H]$ برحسب $\frac{1}{سال}$ و RP برحسب سال] در نظر گرفته می‌شود. این بازه، اغلب سازه‌های مهندسی را پوشش داده و تأثیری چشم‌ناپوشیدنی در برآورد خطر طرح دارد. البته روشن است چنین موضوعی، یک زحمت محاسباتی را در مبحث تعیین زلزله طرح افزون می‌کند؛ یعنی انجام تحلیل خطر و تولید منحنی خطر در فضای لگ-لگ در یک بازه دوره بازگشت ۷۰ تا ۵۰۰۰ ساله. این کار، خود موضوع مستقلی است که ذیل تحلیل خطر زلزله انجام می‌شود. در این تحقیق، مدل خطر $EMME^{10}$ بازتولید شده و خروجی‌های موردنیاز مخصوص به رویکرد ریسک‌مبنا استخراج شده‌اند. شرح جزئیات این مدل در [۲۰] آمده است. یک نمونه از پردازش خروجی‌ها در این تحقیق نیز در شکل ۳ آمده است. شکل ۳، به روشنی اهمیت موضوع عدم قطعیت در نرخ وقوع زلزله را نشان می‌دهد. مثلاً شدت زلزله ۲۴۷۵ ساله در بازه $(0.198g)$ و $(0.41g)$ با مقدار متوسط $0.66g$ و ضریب تغییرات ۱۳

تجزیه یا مشتق مدل ریسک (بخش ۴-۳)، محاسبه می‌شود.



شکل ۲- تلفیق علوم مهندسی سازه و زلزله جهت محاسبات ریسک و عدم قطعیت در بار طرح لرزه‌ای

با کمک نتایج به‌دست آمده از تحلیل خطر و استفاده از طیف UHS^7 ، احتمال یکسانی تضمین می‌شود به‌گونه‌ای که نرخ وقوع سنجه^۸ زلزله طرح، که مثلاً PGA باشد، در گستره یا پهنه ساخت، از حد معینی فراتر نرود. اما حتی با حصول چنین نرخ‌ی نیز، تضمینی برای ریسک یکسان فروریزش یا سطوح دیگر عملکردی فراهم نمی‌آید. علت موضوع، عدم قطعیت در منحنی خطر و در ظرفیت شکنندگی (فروریزش) سازه است. پس، این روش نیازمند در اختیار داشتن مدل‌های احتمالاتی معتبری از خطر لرزه‌ای و ظرفیت فروریزش سازه دارد. این موارد در ادامه شرح داده می‌شود.

شایان یادآوری است که روش ریسک‌مبنا در ایران نیز به تازگی (انتشار در سال ۱۴۰۲) در نشریه ۰۳۸ (تأسیسات صنعت نفت [۱۹]) معرفی گشته و این امکان در اختیار گذاشته شده تا به‌جای طیف سطح خطر سوم (زلزله نادر) در این نشریه، از طیف شتاب ریسک‌مبنا استفاده شود. شایان توجه است این طیف برای طراحی یا کنترل‌های دستگاه جداساز لرزه‌ای یا سازه فراساحلی ضروری دانسته شده است. در ادامه، مبانی ریاضی در روش ریسک‌مبنا، به طور خلاصه مرور می‌شود.

۲-۱- منحنی خطر

⁹- Return Period (RP)

¹⁰- Earthquake Model of Middle East (EMME)

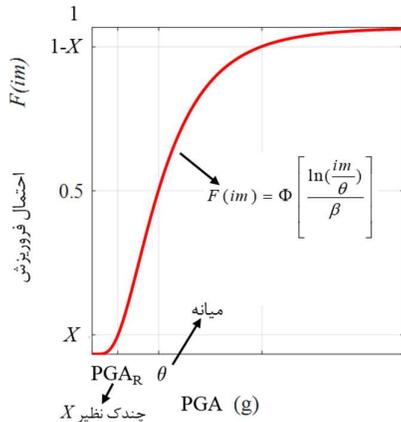
⁷- Uniform Hazard Spectra (UHS)

⁸- Intensity Measure (IM)

چندک^{۱۱} نظیر X ، سطحی از بار طرح PGA است که نابرابری زیر را برقرار کند:

$$F(PGA_R) \leq X \quad (2)$$

خاطرنشان می‌گردد ساده‌ترین چندک، همان میانه است با احتمال فروریزش نظیر برابر با $\frac{1}{2}$.



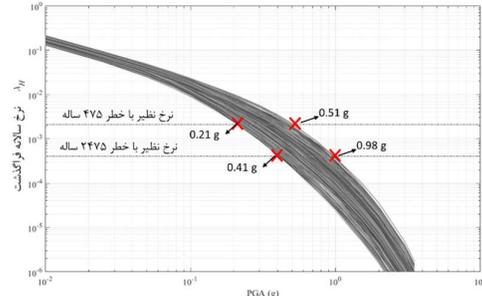
شکل ۴- مدل در نظر گرفته شده برای ظرفیت فروریزش سازه (منحنی شکنندگی)

۳-۲- روابط ریاضی و فرمول‌ها

گام‌های محاسباتی جهت برآورد بار طرح مبتنی بر ریسک، با نماد PGA_R ، به صورت زیر است:

گام ۱- محاسبه منحنی خطر در ساختگاه: این گام مستقل از گام‌های دیگر است. در این گام، نمودار منحنی خطر (یعنی مقادیر نرخ فراگذشت سالانه با نماد λ_H ، نسبت به سطوح مختلف جنبش زمین با نماد im) برحسب PGA ، در اختیار است. برای جزییات بیش‌تر باید به منابع تحلیل خطر لرزه‌ای رجوع کرد. هم‌چنین برای محاسبه عددی انتگرال ریسک که در ادامه شرح می‌شود، توصیه می‌شود که منحنی خطر با دست کم ۲۰ نقطه در ساختگاه موردنظر، مرقوم شده باشد. در این مقاله، از مدل خطر EMME استفاده شده تا

درصد قرار می‌گیرد. ولی شدت زلزله ۴۷۵ ساله در بازه (۰/۵۱g و ۰/۲۱g) با مقدار متوسط ۰/۳۳g و ضریب تغییرات ۷ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر، توزیع شدت زلزله در هر دوره بازگشت، متفاوت است و دوره بازگشت طرح، نباید به یک مقدار خود، متکی باشد.



شکل ۳- منحنی خطر در ۳۶۸ ساختگاه در ایران براساس مدل EMME [۲۰]

به این ترتیب، در روش ریسک‌مبنا، کل منحنی خطر (تمام سطوح دوره بازگشت) در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- منحنی شکنندگی

یکی دیگر از کاستی‌ها در عمده کارهای برآورد خطر طرح تاکنون، بحث عدم دخالت دادن تفاوت در منحنی شکنندگی سازه است. این موضوع، اتفاقاً در شهرهای پرجمعیت و مهم کشور، مانند تهران یا تبریز، مهم است، زیرا افزون بر توزیع نوع ساختمان‌ها و تنوع جمعیتی زیاد در جوار گسل‌های این مناطق، منحنی خطر با شیب نسبتاً تندتری در ساختگاه‌هایشان وجود دارد. منحنی خطر با شیب تند خود و منحنی شکنندگی در حوزه نزدیک‌گسل، ریسک فروریزش بزرگ‌تری را پیش‌بینی می‌کند. پس در این مناطق، توجه به تفاوت منحنی شکنندگی نسبت به مکان، بسیار مهم خواهد بود. یعنی فرض یک منحنی شکنندگی یکسان برای انواع سازه درست نخواهد بود. ضمناً منحنی خطر حاصل از تحلیل خطر نیز در این مناطق، اغلب، مقادیر بزرگی می‌دهد و باید با دقت برآورد گردد. شکل ۴، مدل منحنی شکنندگی در تحقیق حاضر را به طور دقیق نشان می‌دهد. منظور از

^{۱۱}- Quantile

منحنی خطر در ۱۵۶۴۲ ساختگاه در سطح کشور در اختیار قرار گیرد [۲۰]. چنین سطحی از مطالعه، کمتر نمونه مشابهی در دیگر تحقیقات داخلی کشور دارد.

گام ۲- منحنی شکنندگی و تعیین چندک موردنظر: سطوح *im* نظیر ظرفیت فروریزش سازه براساس توزیع لگ‌نرمال، طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F(im) = \phi\left(\frac{\ln(im) - \ln \theta}{\beta}\right) \quad (۳)$$

که در آن، *F* تابع یا منحنی شکنندگی سازه، *im* متغیر شتاب طیفی برحسب *g*، ϕ تابع CDF توزیع استاندارد نرمال، θ میانه ظرفیت فروریزش برحسب PGA و β انحراف معیار لگاریتم سطوح *im* می‌باشد. بدون توجه به معیار ریسک، میانه θ می‌تواند هر مقدار دلخواهی باشد (زیرا فلسفه نقشه هم‌خطر در استاندارد، چنین قیدی را اشاره نمی‌کند). اما در رویکرد ریسک‌مبنا و در پایان گام ۴ در این بخش، مقدار طراحی شده آن را که متناظر با ریسک مبنا باشد، پس از طی شدن یک چرخه سعی و خطا، به دست خواهد داد. نوع جنبش زمین^{۱۲} می‌تواند بیشینه شتاب زمین (PGA) یا شبه‌شتاب طیفی در یک دوره تناوب و میرایی مشخص، $S_{pa}(T, \xi)$ باشد. انحراف معیار β در تمام مراحل ثابت و برابر ۰/۶ فرض می‌شود. البته طراح، بنا به نوع سازه می‌تواند مقدار دیگری برای β فرض کند. یادآوری می‌شود مقدار ۰/۶ یک فرض رایج در روش ریسک‌مبنا است [۲۱].

در رویکرد ریسک‌مبنا، یک چرخه سعی و خطا روی نقطه میانه (دهک پنجم) یا هر چندک دلخواه دیگری از منحنی لگ‌نرمالی، پیاده می‌شود. باید دانست در هر توزیع لگ‌نرمالی، میان دهک اول و میانه رابطه زیر برقرار است:

$$PGA_{X=0.1} = \theta \cdot \exp(\beta \cdot \phi^{-1}(0.1)) \quad (۴)$$

که $PGA_{X=0.1}$ همان مقدار دهک اول منحنی شکنندگی است. چنین ارتباطی به دلیل رسمی است که در آن، دهک اول را برای چرخه‌های سعی و خطا در جست‌وجوی رسیدن به ریسک هدف، برمی‌گزینند. با جای‌نشانی معادله (۴) در معادله (۳) به دست خواهد آمد:

$$F(im) = \phi\left(\frac{\ln(im) - (\ln(PGA_{X=0.1}) + 1.28\beta)}{\beta}\right) \quad (۵)$$

و تابع چگالی احتمال نیز برابر است با:

$$F(im) = \frac{dF(im)}{d(im)} = \frac{1}{\beta \cdot im} \cdot \phi\left(\frac{\ln(im) - (\ln(PGA_{X=0.1}) + 1.28\beta)}{\beta}\right) \quad (۶)$$

که *f* و ϕ به ترتیب، تابع چگالی احتمال ظرفیت فروریزش سازه و چگالی نرمال استاندارد می‌باشند.

گام ۳- محاسبه ریسک فروریزش در ساختگاه: نمایه^{۱۳} یا شاخص ریسک لرزه‌ای در این تحقیق به شکل احتمال فروریزش سازه در ۵۰ سال در نظر گرفته می‌شود. نرخ وقوع سالانه چنین ریسکی را با نماد λ نشان می‌دهند. این نمایه با کمک انتگرال کانولوشن یا هم‌گشت^{۱۴} زیر موسوم به انتگرال ریسک محاسبه می‌گردد. عبارت λ برابر نرخ رخداد نامطلوب موردنظر (در اینجا فروریزش)، یا همان شمار رخدادها در یکای زمان، یعنی یک سال می‌باشد. براساس قانون احتمال کل، انتگرال ریسک برابر است با:

$$\lambda_f = \int_0^{\infty} \frac{dF(im)}{d(im)} \cdot \lambda_H(im) \cdot d(im) \quad (۷)$$

^{۱۳}- Index

^{۱۴}- Convolution integral

^{۱۲}- Intensity Measure Type (IMT)

منحنی کامل شکنندگی ریسک مینا^{۱۵} دست یافته می شود. پس از پیدا شدن پاسخ ریسک مینا، مجدداً می توان نوشت:

$$PGA_{R,X=0.1} = \theta_R \cdot \exp(\beta \cdot \phi^{-1}(0.1)) \quad (9)$$

مرسوم است شتاب طیفی ریسک مینا به شکل ضریب ثابتی، موسوم به ضریب ریسک، از شتاب طیفی با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله (زلزله نادر)، در نظر گرفته شود. در این حالت، از دهک اول استفاده شده، و نوشته می شود:

$$C_{2475} = \frac{PGA_{R,X=0.1}}{PGA_{2475}} \quad (10)$$

که C_{2475} ، به معنای ضریب ریسک نسبت به خطر ۲۴۷۵ ساله خواهد بود. با این حال، طراح می تواند هر چندک یا دهک دیگری از شتاب طیفی ریسک مینا را انتخاب کرده و نیز با دوره بازگشت های دیگری، برای محاسبه ضریب ریسک، مقایسه کند. در این صورت شتاب طرح ریسک مینای مورد نظر از رابطه زیر در دست خواهد بود:

$$PGA_{R,X} = \theta_R \cdot \exp(\beta \cdot \phi^{-1}(X)) \quad (11)$$

که در آن $PGA_{R,X}$ ، شتاب طیفی ریسک مینا (بر حسب PGA) است، نظیر با احتمال X یا نظیر با سطح اطمینان $(1-X)\%$. خاطر نشان می گردد، X یک احتمال است و بازه مقبول آن، $(0,1)$ می باشد [۲۲].

۲-۴- چرخه سعی و خطا در روش ریسک مینا

یک پهنه با شمار زیادی ساختگاه در نظر گرفته شود. اگر PGA طرح، در هر ساختگاه به گونه ای برآورد شود، که یک سازه، در همه جای پهنه، به ریسک

معادله (۷)، توابع λ_H و F را مطابق گام های پیشین، در انتگرال ریسک، جای می نشاند. با این حساب، ریسکی که تاکنون از آن صحبت شده، دست یافتنی خواهد بود. تمام مراحل در نرم افزار MATLAB به برنامه در آمده است.

در مورد احتمال رخداد در یک بازه زمانی در مقایسه با نرخ رخداد سالانه، مدل پواسونی برقرار است. در مدل پواسونی، یک زمین لرزه با نرخ سالانه λ ، احتمالی را به اندازه زیر دارد به طوری که در طول یک بازه زمانی به اندازه Δt سال (مثلاً ۵۰ سال)، حداقل یک بار روی دهد:

$$P = 1 - \exp(-\lambda \cdot \Delta t) \quad (8)$$

خاطر نشان می گردد احتمال P در معادله (۸)، برای $\lambda \cdot \Delta t$ های خیلی کوچک (کوچک تر از ۰/۱)، با خود $\lambda \cdot \Delta t$ برابر است. مثلاً احتمال رخداد زلزله با نرخ سالانه $\frac{1}{475}$ در ۵۰ سال طول عمر، تقریباً برابر با ۱۰ درصد است.

گام ۴- محاسبه خطر طرح ریسک مینا (PGA_R): در فرآیند تهیه نقشه خطر ریسک مینا، ریسک فروریزش λ_f در ساختگاه، باید دقیقاً برابر ریسک هدف یا ریسک مینا (λ_{target}) شود. این تحقیق، ریسک هدف را برابر احتمال فروریزش ۱ درصد در ۵۰ سال در نظر می گیرد. هم اکنون مقدار میانه ظرفیت شکنندگی (یا دهک یکم آن) که بر اساس ریسک هدف، تنظیم شده، باید از طریق تکرار انتگرال ریسک محاسبه گردد. در نهایت، پاسخ با نماد θ_R (در صورت انتخاب میانه) یا $PGA_{R,X}$ (در صورت انتخاب چندک نظیر با X) نشان داده می شود. با پیمودن گام های پیش و یافتن میانه یا دهک یکم ریسک مینا شده، به یک

¹⁵- Risk-targeted fragility curve

به λ بزرگ‌تر از λ_{tg} و دیگری به λ کوچک‌تر از λ_{tg} بینجامد. می‌توان اولی را $\theta_{bot,0}$ و دومی را $\theta_{top,0}$ نامید. حال در تکرار k ام ($k=1,2,\dots$)، مقدار جدید θ با برابری زیر محاسبه می‌شود:

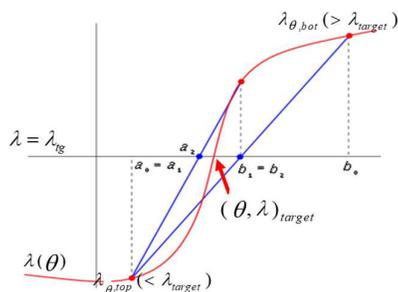
$$\theta_k = \theta_{top,k-1} - (\lambda(\theta_{top,k-1}) - \lambda_{tg}) \times \frac{\theta_{top,k-1} - \theta_{bot,k-1}}{\lambda(\theta_{top,k-1}) - \lambda(\theta_{bot,k-1})} \quad (12)$$

این مقدار در واقع محلی است که شیب خط گذرا از $(\theta_{bot,k-1}, \lambda(\theta_{bot,k-1}))$ و $(\theta_{top,k-1}, \lambda(\theta_{top,k-1}))$ با خط افقی ($\lambda = \lambda_{tg} (= 2 \times 10^{-4})$) برخورد می‌کند. اگر همچون $\lambda(\theta_k)$ از $\lambda(\theta_{bot,k-1})$ بزرگ‌تر شود، آن‌گاه قرار می‌گیرد:

$$\mu_{bot,k} = \mu_k, \mu_{top,k} = \mu_{top,k-1}$$

اما اگر $\lambda(\theta_k)$ مانند $\lambda(\theta_{top,k-1})$ از λ_{tg} کوچک‌تر باشد، آن‌گاه قرار می‌گیرد:

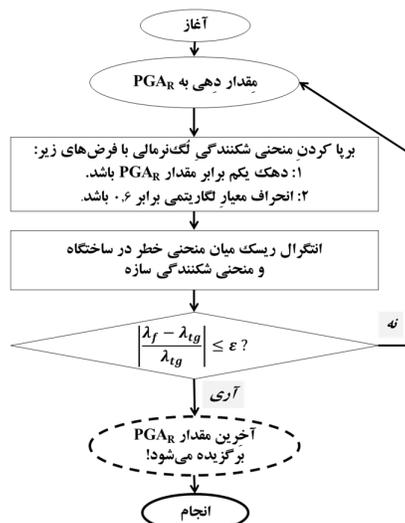
$$\mu_{top,k} = \mu_k, \mu_{bot,k} = \mu_{bot,k-1}$$



شکل ۱- الگوریتم نابجایی در حل ریشه معادله ناصریح

تکرار بعدی با جفت نقطه‌های جدید، صورت گرفته تا سرانجام، θ_k به اندازه‌ای به دست آید که کمینه خطا را داشته باشد، از این قرار: $|\lambda(\theta_k) - \lambda_{tg}| < \epsilon$. سرعت همگرایی روش نابجایی^{۱۶} از روش‌های تکرار ساده و نصف کردن، بیشتر اما از سرعت همگرایی روش نیوتن-رافسون کمتر است. در چرخه‌های تکرار، وقتی بعد دو تکرار، یک نقطه ثابت می‌ماند، تجربه نشان داده روش دوبخشی یا

فروریزش از پیش تعیین شده یکسانی برسد، آنگاه PGA برآوردی را خطر طرح ریسک-مینا گفته و با نماد PGA_R نشان می‌دهند. دقت شود دوره بازگشت نظیر این خطر، در هر ساختگاه متفاوت خواهد شد. یعنی حاصل کار در کل پهنه، یک نقشه هم‌ریسک خواهد بود و نه نقشه هم‌خطر (نقشه خطر با دوره بازگشت یکسان). فرآیند محاسبه PGA_R در هر ساختگاه، به شکل سعی و خطا انجام می‌پذیرد، زیرا از آغاز روشن نیست که به ازای کدام منحنی شکنندگی، حاصل انتگرال ریسک، با مقدار از پیش تعیین شده یک درصدی (همان λ_{tg})، برابر می‌گردد. کوشش شده است تا چرخه سعی و خطای ریسک‌مینا با کمک فلوجارتی در شکل ۵ به نمایش درآید. موضوع باقیمانده در چرخه سعی و خطای محاسبه PGA_R ، نحوه جست‌وجوی پاسخ مسئله است که در بخش بعدی، روش حل عددی نوینی معرفی می‌شود.



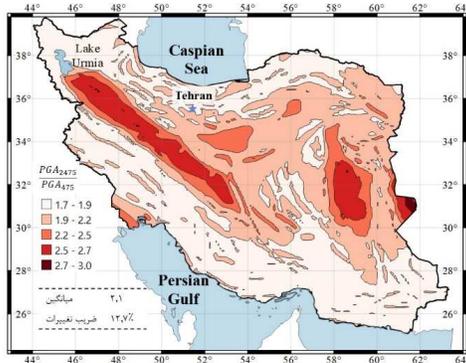
شکل ۵- چرخه سعی و خطا در روش ریسک‌مینا

۲-۵- الگوریتم روش نابجایی در روش ریسک‌مینا

ریسک فروریزش λ_f به ازای هر θ محاسبه شدنی است؛ یعنی می‌توان یک تابع تعریف کرد، از این قرار: $\lambda_f = \lambda(\theta)$ بنا است که به ریسک هدف λ_{tg} دستیابی شود. پژوهش حاضر، λ_{tg} را 2×10^{-4} گرفته است (طبق مدل پواسونی، هم‌سنگ با احتمال یک درصد در پنجاه سال). برای آغاز چرخه به دو مقدار، نیاز است به طوری که یکی

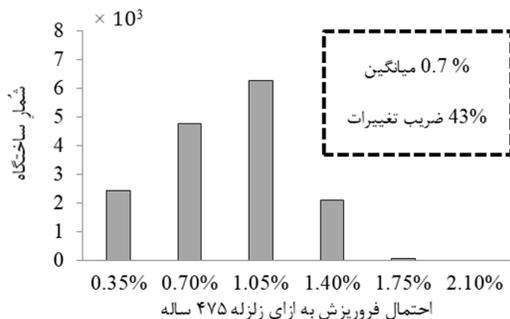
¹⁶- Regula falsi

تا محققان و مهندسان، بدون انجام تحلیل خطر یا رجوع به مدل‌های معتبر موجود، هیچ‌گاه عدد ۱/۵ را بین دو سطح خطر یادشده، مفروض نگیرند.



شکل ۲- نسبت خطر ۲۴۷۵ ساله به ۴۷۵ ساله در ایران

با روش ریسک‌مبنا، می‌توان پاسخ یک سؤال دیگر را نیز داد. در هر ساختگاه و به‌ازای زلزله ۴۷۵ ساله آن، با قرائت احتمال شکنندگی نظیر، می‌توان توزیع احتمال فروریزش نسبت به ساختگاه‌های درون مرز کشور را به ازای خطر طرح فعلی در استاندارد ۲۸۰۰ (یعنی ۴۷۵ ساله)، به‌دست آورد. مطابق شکل ۳، هیستوگرام چنین توزیعی قابل مشاهده است. با این بررسی، مشخص می‌گردد در کشور ایران، احتمال فروریزش به ازای خطر ۲۴۷۵ ساله در حدود ۱۰ درصد، و به ازای خطر ۴۷۵ ساله در حدود یک درصد است.



شکل ۳- توزیع احتمال فروریزش به‌ازای زلزله ۴۷۵ ساله

۳-۲- نسبت نقشه هم‌خطر با نقشه هم‌ریسک

حال که مبانی و مفروضات شیوه استفاده از روش ریسک‌مبنا روشن شد، می‌توان به انجام آن در سطح کشور

نصف کردن^{۱۷} هم اعمال شود. سپس بهتر است میان بازه حاصل از روش نابجایی و روش نصف کردن، بازه کوچک‌تر را برگزید. در حال حاضر، سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) از طریق یک وب‌آپ^{۱۸}، الگوریتم روش نابجایی را برای حل مسئله ریسک‌مبنا به‌کار گرفته و محاسبه خطر طرح ریسک‌مبنا را به طور رایگان جهت کنترل یا آزمودن، در اختیار قرار داده است. اما محدودیت‌هایی در آن برقرار است، از جمله عدم امکان تعریف مقادیر β و λ_{ig} بنابراین، در محاسبات متعلق به این تحقیق، برنامه مستقلی در MATLAB تهیه و استفاده گردید.

۳- بحث و بررسی

در این بخش، کارهای انجام شده در تحقیق به‌طور خلاصه، مرور و نتایج برگرفته از آن تفسیر می‌شود. ضمناً این بخش، می‌کوشد به کاربردهای تحقیق انجام شده، اشاره کند؛ و در آخر، نکات مبهم و قابل تحقیق جدید را مطرح ساخته و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه دهد.

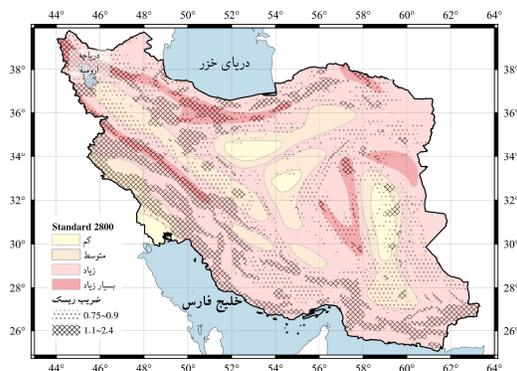
۳-۱- نسبت خطر ۲۴۷۵ ساله با خطر ۴۷۵ ساله

یکی از فرض‌های رایج ولی ناآزموده بین مهندسان زلزله عبارت است از وجود یک نسبت ۱/۵ برابری میان خطر با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله با خطر با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله. با پردازش نتایج مدل خطر EMME، می‌توان راستی این فرض را سنجید. برای این مقصود، اندازه خطر در سطوح یاد شده در هر نقطه استخراج و نسبت خطر با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله برای PGA روی نقشه ایران خطر با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله نشان می‌دهد این نسبت به طور متوسط در سطح کشور برابر ۲/۱ با ضریب تغییراتی به اندازه ۱۳٪ است. در نتیجه، نویسندگان توصیه اکید دارند

^{۱۷}- Bisection Method

^{۱۸}- <https://earthquake.usgs.gov/designmaps/rtgm/>

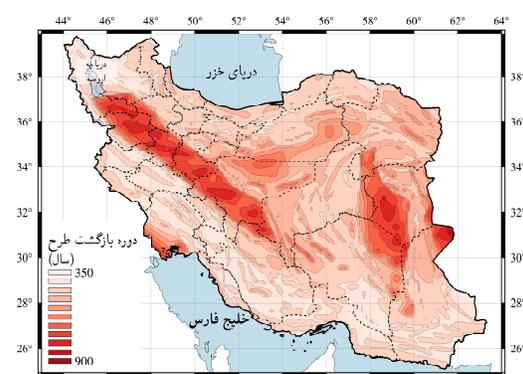
استاندارد ASCE 7 کنار گذاشته شده است. بلکه در آنجا به ازای هر ساختگاه، یک مقدار برآوردی از شتاب طرح، آن هم در انواع شتاب طیفی، ارائه می‌گردد. به هر صورت، چنانچه قصد آن باشد تا اهمیت چنین موضوعی روشن شود، یک فرصت مناسب در این بخش از تحقیق فراهم شده است؛ زیرا خطر طرح لرزه‌ای (به شکل ریسک‌مبنا) برای ۱۵۶۴۲ ساختگاه در پهنه کشور محاسبه شده و در اختیار است. اکنون می‌توان میان خطرهای برآوردی براساس ریسک، و چهار مقدار شتاب مبنای طرح در استاندارد ۲۸۰۰، یک مقایسه سودمند را انجام داد. این مقایسه بر دوش شکل ۱۰ گذاشته شده است. در هر ساختگاه، مقدار مخصوص PGA ریسک‌مبنا به شتاب مبنای طرح در استاندارد ۲۸۰۰ در همان ساختگاه، بخش (تقسیم) شده است. این نسبت در شکل ۱۰ با عنوان ضریب ریسک آمده است. همچنین، برای مقایسه بهتر، نقشه پهنه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ نیز به طور پس‌زمینه در شکل آمده است.



شکل ۱۰- نسبت خطر طرح ریسک‌مبنا به شتاب مبنای طرح استاندارد ۲۸۰۰

شکل ۱۰ به خوبی نشان می‌دهد تغییرات بار طرح لرزه‌ای گسترده است. به عبارت دیگر، پهنه‌بندی با چهار برآورد، آنچنان که استاندارد ۲۸۰۰ انجام می‌دهد، احتمالاً دقت یا حتی درستی لازم را ندارد. در شکل ۱۰، ضریب ریسک معرفی شده، در بازه (۲/۴ و ۰/۷۵) در پهنه کشور تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود، دو دسته ساختگاه مخصوص نیز هاشور خورده‌اند؛ با این مقصود که

و تولید نقشه حاصل پرداخت. پس از آنکه شدت PGA مبتنی بر ریسک یک درصد فروریزش در طول ۵۰ سال، به‌دست آمد؛ مجدداً به منحنی خطر رجوع می‌شود. به ازای هر PGA به‌دست آمده، نرخ فراگذشت یا معادل آن، دوره بازگشت از روی منحنی خطر، در هر ساختگاه، خوانده می‌شود. نتایج حاصل، روی نقشه ایران در شکل ۴ نگاریده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در رویکرد ریسک‌مبنا، هر ساختگاه باید با دوره بازگشت مخصوص به خود، طراحی گردد. بازه تغییرات دوره بازگشت طرح، قابل توجه است و از ۳۵۰ سال تا ۹۰۰ سال در گستره ایران تغییر می‌کند. میانگین دوره بازگشت طرح برابر ۴۹۰ سال مشاهده شده است که افزایش پنج درصد را به طور متوسط نسبت به دوره بازگشت فعلی در استاندارد ۲۸۰۰ نشان می‌دهد. شکل ۴، نشان می‌دهد به‌ویژه در درجه خطر نسبی بسیار زیاد، نیاز به در نظر گرفتن دوره بازگشت‌های بزرگ‌تری، تا سر حد ۱۰۰٪ افزایش، وجود دارد.



شکل ۴- نقشه دوره بازگشت طرح مبتنی بر ریسک

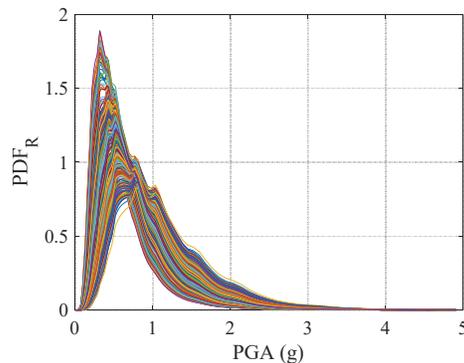
۳-۳- نسبت نقشه هم‌ریسک با درجه‌بندی خطر نسبی زلزله در استاندارد ۲۸۰۰

استاندارد ۲۸۰۰، کشور را به چهار ناحیه بخش کرده و به جز چهار مقدار برای شتاب طرح (PGA)، برآورد دیگری را ارائه نمی‌دهد. اگرچه یک دلیل برای این موضوع، سادگی و کارایی آن به جهت استفاده و خدمات مهندسان است، اما چنین رویکردی به طور کلی از

می‌توان اطلاعات بیش‌تری را از ریسک هدف در هر ساختمان به‌دست آورد. یعنی عبارت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$PDF_R = \frac{1}{\lambda_{ig}} \cdot \frac{d\lambda_{ig}}{d(im)} = \frac{1}{\lambda_{ig}} \cdot f_R(im) \cdot \lambda_H(im) \quad (۱۳)$$

که برابر است با حاصلضرب انتگرالده درون انتگرال ریسک، در وارون‌شده نرخ ریسک هدف. یعنی مقدار انتگرالده، بهنجار (نرمال) می‌گردد. بهنجارسازی به‌خاطر ساخته شدن یک تابع چگالی احتمال (تابع PDF^{۲۰}) انجام می‌گیرد. شکل ۱۱، توابع PDF ساخته شده براساس فرمول بالا را برای شماری از ساختمانها در سطح کشور، نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- چگالی احتمال بار طرح لرزه‌ای در ۳۶۸ ساختمان در سطح کشور

همانطور یک نمودار زنگوله‌ای از توزیع نرمال، نشانگر عدم قطعیت پدیده‌ای است که آن را مدل می‌کند، چنین نمودارهایی نیز نشانگر توزیع بار طرح لرزه‌ای (در این جا PGA طرح) هستند. یک PDF پهن و خوابیده نشان می‌دهد که ریسک هدف، عدم قطعیت بزرگ‌تری دارد و در کل فضای خطر گسترده است. اما هرچه این PDFها لاغر و برآمده‌تر باشد، چگال بودن نرخ ریسک هدف را نشان داده و سطح اطمینان بالاتری را از ریسک هدف، تضمین می‌کند. این توزیع‌ها نرمال نیستند، ولی با

ساختمانهای حساس‌تر، به‌معنای ساختمان‌هایی که بیشترین تغییر در بار زلزله طرح را نسبت به شتاب مبنای طرح (استاندارد ۲۸۰۰) در آنها انتظار می‌رود، برجسته (نمایان) سازد. به عبارت دیگر، ساختمان‌هایی که خطر طرح آنها تا حد ۱۵ درصد کاهش دارد از یک سو و ساختمان‌هایی که خطر طرح در آنها تا حد دو برابر نیز احتمال افزایش دارد، از سوی دیگر؛ در شکل ۱۰ هاشور مخصوص به خود را خورده‌اند. به طور جالبی، هاشور ساختمان‌های با ضریب ریسک افزایش یافته، تطابق محسوسی با پهنه با خطر خیلی زیاد (استاندارد ۲۸۰۰) پیدا کرده است. چنین تطابقی، خود نشانگر نوعی راستی‌آزمایی نتایج تحقیق حاضر است، زیرا نشان می‌دهد هم نتایج تحقیق حاضر و هم پهنه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰، یک دسته از ساختمان‌های تقریباً یکسان را دارای برآورد شدیدی از خطر طرح می‌دانند. با این حال، باید دقت کرد نتایج تحقیق حاضر، نشان می‌دهد همه ساختمان‌های موجود در پهنه با خطر خیلی زیاد، ریسک یکسانی را با یکدیگر ندارند. بلکه باید در ساختمان‌های موجود درون این پهنه نیز، تفکیک مناسب صورت گرفته و خطر طرح با طبقه‌بندی جزئی‌تر به آنها تخصیص گردد. مثلاً با مقایسه‌های بیشتر، با کمک نقشه شهرها و استان‌ها (که از ارائه شکل آن در این تحقیق برای به درازا نرفتن متن مقاله، پرهیز شده) می‌توان متوجه شد که شهرهایی مانند تبریز یا تکاب، باید با خطر طرح بزرگ‌تری نسبت به شتاب مبنای طرح موجود، طراحی گردند.

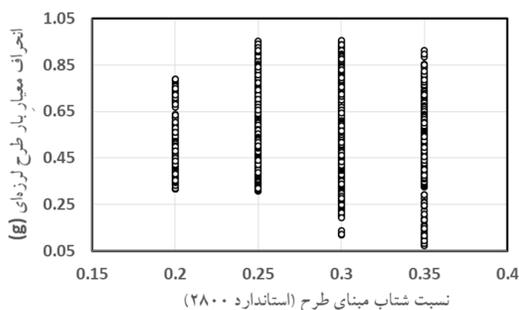
۴-۳- عدم قطعیت در نقشه خطر طرح لرزه‌ای

در بخش پایانی، به معرفی عدم قطعیت در خطر طرح برآوردی پرداخته می‌شود. نخست باید دوباره انتگرال ریسک را یادآوری کرد. اگر انتگرالده، خود جداگانه محاسبه گردد (به عبارت دیگر واهم‌افزایی^{۱۹} نرخ ریسک)

²⁰- Probability Density Function (PDF)

¹⁹- Disaggregation

شکل ۵- عدم قطعیت زلزله طرح در برابر دوره بازگشت آن
 حال اگر تغییرات انحراف معیار زلزله طرح در
 ساختگاه‌های کشور، نسبت به مناطق لرزه‌خیز چهارگانه
 در نظر گرفته شود، شکل ۶ حاصل می‌گردد. شکل ۶
 نشان می‌دهد عدم قطعیت در زلزله طرح در منطقه با
 لرزه‌خیزی بسیار زیاد، از همه بیشتر و در منطقه با
 لرزه‌خیزی کم از همه کوچک‌تر است. بنابراین در مطالعات
 تحلیل خطر در کشور، نسبت به مناطق لرزه‌خیز زیاد و
 بسیار زیاد، باید توجه بیشتری گردد تا دقت خروجی‌ها
 بالاتر به دست آید. البته به طور کلی، انحراف معیار در هر
 چهار منطقه، قابل توجه و چشم‌ناپوشیدنی است.



شکل ۶- عدم قطعیت زلزله طرح در مناطق چهارگانه لرزه‌خیز
 کشور (استاندارد ۲۸۰۰)

ضریب تغییرات، به شکل نسبت انحراف معیار به
 میانگین، نیز می‌تواند به عنوان یک کمیت بدون بعد به
 منظور شناخت عدم قطعیت، در نظر گرفته شود. البته در
 مطالعات مفصل‌تری که در حدود تحقیق حاضر نیست،
 می‌توان درباره جزئیات و نوع توزیع احتمال مطرح شده در
 برابری (۱۳)، تحقیقات بیشتری انجام داد تا خواص
 احتمالاتی توزیع بار طرح، بیش‌تر شناخته گردد. در مرجع
 [۲۳] تأثیر دو نوع توزیع احتمال متفاوت (لگ‌نرمالی و
 ویبولی) بر مدل شکنندگی و نیز مقدار متوسط PGA_R
 بررسی شده است، اما هنوز تحقیقات در مورد خود توزیع
 PGA_R (همان عدم قطعیت بار طرح لرزه‌ای) انجام نشده
 است. به هر حال هرچه ضریب تغییرات، نظیر با فرمول‌های
 (۱۴) و (۱۵)، کوچک‌تر باشد، حداقل می‌توان دریافت که
 توزیع PDF بار طرح لرزه‌ای حاصل، نیز عدم قطعیت

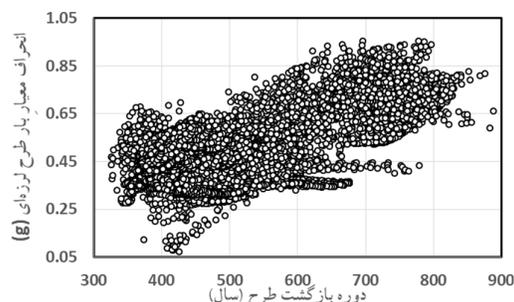
کمک محاسبه لنگرهای احتمالاتی نظیرشان می‌توان به
 دانسته‌هایی سودمند دست یافت؛ از جمله عدم قطعیت به
 شکل کمی. بنابراین زمانی که با یک توزیع ناپارامتری
 مواجهه می‌شود، محاسبه لنگرهای احتمالاتی را باید با
 تعریف مستقیم ریاضی آن‌ها، انجام داد. در ادامه، نحوه
 کمی‌سازی عدم قطعیت روشن می‌شود.

لنگرهای اول و دوم نظیر این PDFها، طبق تعریف
 مستقیم و به شکل عددی از این قرار می‌باشند:

$$\mu = E[PGA_R] = \int pga_R \cdot PDF_R \cdot dpga_R \quad (14)$$

$$\sigma^2 = VAR[PGA_R] = \int (pga_R - \mu)^2 \cdot PDF_R \cdot dpga_R \quad (15)$$

که در آن μ و σ به ترتیب، میانگین و انحراف معیار بار
 طرح لرزه‌ای PGA_R می‌باشند. تأکید می‌گردد در اینجا
 فقط مقادیر میانگین و انحراف معیار حاصل نشده است،
 بلکه توزیع کامل احتمالاتی (معادله ۱۳) و هر دهک بار
 طرح را می‌توان محاسبه کرد. حال می‌توان انحراف معیار
 را به عنوان یک نمایه از عدم قطعیت در نظر گرفت. در
 هریک از ۱۵۶۴۳ ساختگاه در کشور، محاسبات مربوط به
 معادله‌های (۱۴) و (۱۵) انجام می‌شود. سپس انحراف
 معیار در هر ساختگاه در برابر دوره بازگشت طرح (نقشه
 آمده در شکل ۴) در نمودار شکل ۵ ترسیم می‌گردد.
 همان‌گونه که روشن است، انحراف معیار بار طرح در
 کشور در بازه (۰/۹۶ و ۰/۰۷) g متغیر است. هم‌چنین
 روند صعودی قابل مشاهده در شکل ۵ نشان می‌دهد که
 مطابق انتظار، هرچه دوره بازگشت طرح بزرگ‌تر باشد،
 احتمالاً انحراف معیار زلزله طرح نیز بزرگ‌تر خواهد بود.



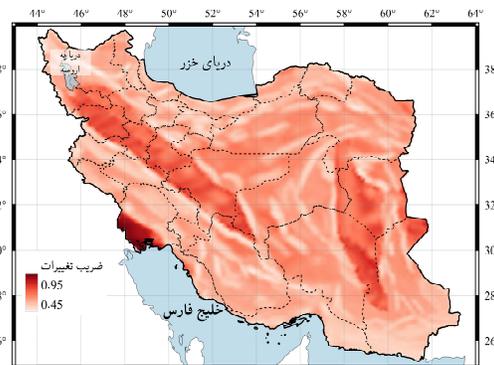
ساله به عنوان زلزله طرح) دور از اصل یک‌نواختی و عدالت، در یک نگاه عمیق و کلی است.

استفاده از روش طیف طراحی براساس داشتن ریسک هدف یکسان، نقص مزبور را می‌تواند برطرف سازد. آیین‌نامه 7 ASCE در ارائه و توسعه این روش جدید، پیشرو است و آن را RTGM²¹ می‌نامد. در ASCE 7، ریسک یک درصدی را برای ریسک فروریزش در ۵۰ سال در نظر می‌گیرند.

در این تحقیق، نخست، همان فرضیات ASCE 7 در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین از PGA (شتاب حرکت زمین در سنگ بستر) برای محاسبات، بهره برده شده است. با این مفروضات، نقشه خطر طرح ریسک‌مبنا برای کشور ایران، به شکل ارائه توزیع مکانی دوره بازگشت طرح، تولید شده است. با ارائه این نقشه، میانگین دوره بازگشت طرح برابر ۴۹۰ سال مشاهده شده است که افزایش ۵٪ را به طور متوسط نسبت به دوره بازگشت فعلی در استاندارد ۲۸۰۰ نشان می‌دهد. مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر، ضمیمه کردن یک نقشه عدم قطعیت، همراه با ارائه چنین نقشه‌ای است. برای این منظور، راهکار مخصوصی، معرفی و توسعه یافته و با کمک آن، عدم قطعیت در پهنه ایران محاسبه شده و توزیع مکانی آن با کمک نگاشت مقادیر روی نقشه ایران، نمایش یافته است. شدت متوسط ۶۰ درصدی ضریب تغییرات، نشان از عدم قطعیت بالا در دوره بازگشت(های) طرح است. بنابراین در تحقیقات آتی باید راهکارهایی چگونگی کاستن عدم قطعیت در تعیین بارهای لرزه‌ای را تحقیق کرد.

کوچک‌تری را نشان می‌دهد. بنابراین از ضریب تغییرات، می‌توان به عنوان یک حاشیه ایمنی کلی برای بار طراحی انتخاب شده، بهره برد.

در گام پایانی، می‌توان ضریب تغییرات (عدم قطعیت) محاسبه شده به این نحو را برای هر ساختگاه روی نقشه نشان داد. شکل ۱۴، از مقاله حاضر، نقشه عدم قطعیت در بار زلزله طرح را برای کشور ایران نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود عدم قطعیت در بار طرح لرزه‌ای در کشور ایران، با اطلاعات موجود، حداقل برابر ۴۵ درصد به‌دست آمده که یک اندازه قابل توجه و بزرگی است. چنین مقادیری یعنی از ۴۵ تا ۹۰ درصد امکان تغییر در شتاب مبنای طراحی که در طراحی به‌کار گرفته می‌شود، وجود دارد. روشن است که این سطح از عدم قطعیت، نتایج طراحی و ساخت را به شدت متأثر می‌کند. بنابراین در وضعیت حاضر استاندارد ۲۸۰۰ و سایر آیین‌نامه‌های ملی، طراحان، جامعه ذی‌نفعان و مسئولان مربوط باید از این موضوع آگاه باشند.



شکل ۱۴- نقشه عدم قطعیت بار طرح لرزه‌ای در کشور

۴- نتیجه‌گیری

ریسک فروریزش در ساختگاه‌های مختلف و برای سازه‌های مختلف، که صرفاً با طیف طرح هم‌خطر (UHS) طراحی شده باشند، یکی نخواهد بود. در چنین شرایطی، در یک‌جا، ایمنی مورد نظر، تأمین نشده و در جایی دیگر، اقتصاد بی‌سببی به پروژه تحمیل شده است. پس فلسفه جاری در استاندارد ۲۸۰۰ (تعیین یک دوره بازگشت ۴۷۵

²¹- Risk-targeted Ground Motion (RTGM)

References

- [1] Berberian M, Yeats RS. Tehran: An earthquake time bomb 2017. doi: **10.1130/2016.2525(04)**
- [2] Zafarani H, Jafarian Y, Eskandarinejad A, Lashgari A, Soghrat MR, Sharafi H, Afraz-e Haji-Saraei M. Seismic hazard analysis and local site effect of the 2017 M w 7.3 Sarpol-e Zahab, Iran, earthquake. *Natural Hazards*. 2020 Sep;103(2): 1783-1805. doi: 10.1007/s11069-020-04054-0
- [3] Iervolino I. Risk-targeted seismic design: Prospects, applications, and open issues, for the next generation of building codes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023 Oct; 52: 3919-3921. doi: **10.1002/eqe.3999**
- [4] Building and Housing Research Center. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Standard No. 2800; IS 2800-05. 4th revision. Tehran, Iran: Building and Housing Research Center (BHRC); 2014. [In Persian]
- [5] ASCE. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22). Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers; 2022. doi: **10.1061/9780784415788**
- [6] Luco N, Ellingwood BR, Hamburger RO, Hooper JD, Kimball JK, Kircher CA. Risk-targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States. *SEAOC 2007 convention proceedings*, 2007.
- [7] Zarrineghbal A, Zafarani H, Rahimian M. Towards an Iranian national risk-targeted model for seismic hazard mapping. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021 Feb 1; 141: 106495. doi: **10.1016/j.soildyn.2020.106495**
- [8] Turchetti F, Tubaldi E, Douglas J, Zanini MA, Dall'Asta A. A risk-targeted approach for the seismic design of bridge piers. *Bull Earthquake Eng*. 2023; 21: 4923-4950. doi: **10.1007/s10518-023-01717-8**
- [9] Naderpour H, Hoseini Vaez SR, Malekshahi N. Predicting the Behavior of Concrete Dams Using Artificial Neural Networks (Case study of Dez Dam). *Civil Infrastructure Researches*. 2021; 6: 123-132. doi: 10.22091/cer.2021.6898.1242 [In Persian]
- [10] ASCE. Seismic analysis of safety-related nuclear structures (ASCE/SEI 4-16). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers; 2017.
- [11] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10). Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers; 2010.
- [12] Luco N, Bachman RE, Crouse CB, Harris JR, Hooper JD, Kircher CA, Caldwell PJ, Rukstales KS. Updates to building-code maps for the 2015 NEHRP recommended seismic provisions. *Earthquake Spectra*. 2015 Dec; 31(1_suppl): S245-71.
- [13] ANSI/API. Seismic design procedures and criteria for offshore structures (ANSI/API Recommended practice 2EQ). Reaffirmed. 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005: API Publishing Services; 2021.
- [14] ASCE. Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities (ASCE/SEI 43-05). Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers; 2005.
- [15] Vamvatsikos D, Bakalis K, Kohrangi M, Pyrza S, Castiglioni CA, Kanyilmaz A, Morelli F, Stratan A, D'Aniello M, Calado L, Proença JM. A risk-consistent approach to determine EN1998 behaviour factors for lateral load resisting systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020 Apr 1; 131: 106008. doi: **10.1016/j.soildyn.2019.106008**
- [16] Douglas J, Ulrich T, Negulescu C. Risk-targeted seismic design maps for mainland France. *Nat Hazards*. 2013; 65: 1999-2013. doi: **10.1007/s11069-012-0460-6**
- [17] Kharazian A, Molina S, Galiana-Merino JJ, Agea-Medina N. Risk-targeted hazard maps for Spain. *Bull Earthquake Eng*. 2021; 19: 5369-5389. doi: **10.1007/s10518-021-01189-8**
- [18] Zarrineghbal A. Risk-targeted seismic design hazard. P.h.D Thesis. University of Tehran (UT), 2022. [In Persian]
- [19] Iranian Seismic Design Code for Petroleum Facilities (Pub. No. 038-16). 4rd ed. Iran: Ministry of Petroleum; 2023. [In Persian]
- [20] Şeşetyan K, Danciu L, Demircioğlu Tümsa MB, Giardini D, Erdik M, Akkar S, Gülen L, Zare M, Adamia S, Ansari A, Arakelyan A. The 2014 seismic hazard model of the Middle East: overview and results. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018 Aug; 16: 3535-3566. doi: **10.1007/s10518-018-0346-4**
- [21] Silva V, Crowley H, Bazzurro P. Exploring risk-targeted hazard maps for Europe. *Earthq Spectra*. 2015; 32: 1165-1186. doi: **10.1193/112514EQS198M**
- [22] Kennedy RP. Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants. *Nucl Eng Des*. 2011; 241: 648-656. doi: **10.1016/j.nucengdes.2010.08.001**
- [23] Zarrineghbal A, Zafarani H, Rahimian M, Jalalalhosseini SM, Khanmohammadi M. Risk-Targeted Seismic Design Maps with Aleatory and Epistemic Uncertainty in Tehran and Surrounding Areas. *Journal of Earthquake Engineering*. 2024 Oct 25; 28(14): 3925-3953. doi: **10.1080/13632469.2024.2368179**