



Seismic Lifetime Vulnerability Curve Development of Isolated Buildings with LRB Under Probable Mainshock-Aftershock Scenarios in Tehran

A. Khansefid*

Department of Civil Engineering, KN Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: This research deals with the application of lead rubber bearing isolation (LRB) systems in reducing the seismic risk of buildings located in Tehran metro city from technical and economic points of view. In this regard, first, three separate 5-, 10-, and 15-story buildings with the steel moment resisting frames system are considered. These models are designed in two separate scenarios: with and without the base isolation system. Next, all the active faults of Tehran and its surrounding area are considered to generate the probable earthquake scenarios in the 50-year life span of the buildings. This simulation contains the probable mainshock-aftershock event scenarios and the corresponding accelerograms for each of the generated events. Afterward, by adopting the Monte-Carlo simulation technique, an adequate number of random earthquake hazard scenarios are generated. Then, the buildings' performances are evaluated under mainshock-aftershock sequences using the nonlinear dynamic time history analysis approach. In addition, by using the damage and loss models considering the fatality and injury, building physical damage, and time-dependent economic losses, the lifetime seismic risks of buildings are estimated. The outcomes highlight that the LRB system is well capable of improving the building behavior and hence reducing the life-cycle cost of buildings tangibly which will be elaborated in this paper.

Review History:

Received: Oct. 15, 2021

Revised: Dec. 03, 2021

Accepted: Dec. 19, 2021

Available Online: Dec. 23, 2021

Keywords:

Lead rubber bearing system

Life-cycle cost

Mainshock-aftershock sequences

Random earthquake

Seismic risk

1- Introduction

Nowadays, the number of building projects constructed with the vibration control systems is growing very fast in the area prone to the high seismic hazard level, as a verified practical solution for mitigating the imposed risk. However, the application of such systems in developing countries are facing some problem from an economic point of view. Many clients of construction projects are not interested in applying such devices since they believe that they should pay more for these systems. However, it is not correct, since they only consider the initial cost of their building. Therefore, it is vital to deal with the application of vibration control systems, specifically base isolation systems, in terms of their lifetime seismic risk.

By reviewing the literature, there are several works [1,2] that only deal with the application of vibration control systems through a technical perspective. Besides, in some other research works, Kumar et al. [3], and Yu et al. [4] worked on the seismic risk of nuclear power plants equipped with base isolation systems. The main shortcoming of these works was the ignorance of the aftershocks' effects. On the other side, Khansefid et al. [5], and Zhai et al. [6] attempted to simulate the effects of aftershocks on the seismic performance of the

isolated building. Unfortunately, none of these works did the analysis through risk-based approaches. More recently, Khansefid [7] tried to propose a more advanced approach to estimate the lifetime seismic risk of buildings with vibration control systems.

This study is an attempt to deal with the lifetime seismic risk of base-isolated structures with LRB system under future probable mainshock-aftershocks (MA) via developing the vulnerability curves. In this regard, 3 sets of 5-, 10-, and 15-story buildings located in Tehran metro city are considered. The seismic hazard scenarios during the building life span are developed using advanced methods [8-10]. Afterward, via the nonlinear dynamic time history analysis approach, the response of building models to the MA hazard scenarios, and, consequently the building damages and losses are estimated.

2- Methodology

For the lifetime seismic risk assessment of isolated buildings, three sets of 5-, 10-, and 15-story typical building models in Tehran metro city are considered. They are designed without/with the lead rubber bearing isolation systems optimally. Afterward, through the Monte-Carlo simulation approach and by using the advanced model proposed by

*Corresponding author's email: khansefidali@kntu.ac.ir



Khansefid and Bakhshi [8], 6000 random earthquake hazard scenarios in Tehran are simulated. This model works by generating random event scenarios including probable mainshocks and aftershocks during the building lifetime [9] by considering 12 active faults of Tehran province including Mosha, North Tehran, Kahrizak, Robat Karim, Eshtehard, etc. Afterward, nonstationary stochastic accelerograms corresponding to each of generated random events are simulated [10]. In the next step, the response of each of the building models is obtained for each of the earthquake scenario realizations taking the whole MA sequences into account by performing nonlinear dynamic time history analysis, while the structural behavior of buildings is modeled using the nonlinear multi-degree of freedom mass-spring system [11]. Afterward, the structural damage of models is estimated by using the available fragility curves [12]. Finally, by considering the building physical damage, occupant injury and death, and the income interruption, the lifetime seismic loss and risk of buildings are estimated through available loss models of buildings [12-14].

3- Results and Discussion

In this part, the main outcomes of the research are presented. Figure 1 shows the exceedance probability of the estimated lifetime loss values of all building models with/without isolation systems. By considering the 10% probability level which is also called probable maximum loss, it is revealed that the usage of LRB system will lead to a significant (35%) reduction in the estimated loss, on average. In other words, the owner of buildings could invest up to 18% of it is total project cost for the base isolation system economically.

Next, the most important outcome of this research is the loss curves of buildings which are shown in Figure 2 for all models considering the aftershock effects. Generally, the application of LRB system reduces the estimated loss value considerably, especially in the more intensive earthquake

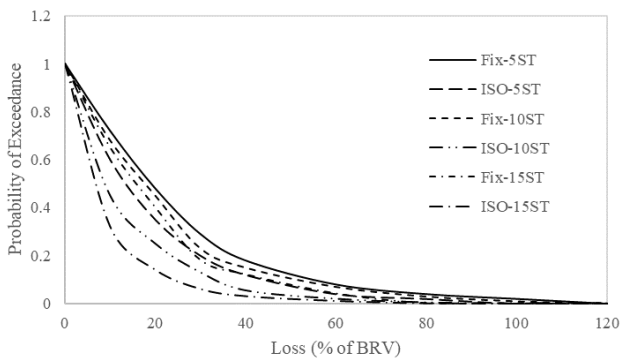


Fig. 1. Exceedance probability curve of the estimated loss value of 5-, 10-, 15-story buildings with/without lead rubber bearing isolation system

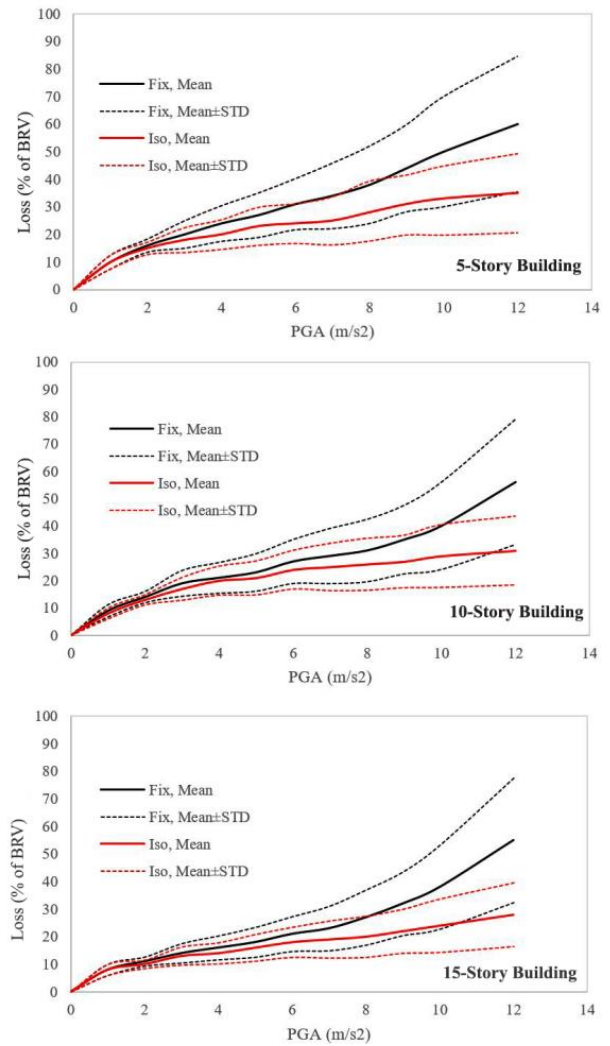


Fig. 2. Loss curves of building models, a) 5-story building b) 10-story building, c) 15-story building

scenarios ($PGA > 6m/s^2$). However, in the low-intensity levels ($PGA < 1m/s^2$), there are no significant differences between the estimated loss of uncontrolled (Fix) and isolated (Iso) buildings. This is observed due to the inactivation of LRB in low-intensity earthquakes.

Last but not least is the effect of aftershocks on the estimated seismic risk shown in Figure 3. As it is depicted, by neglecting the effects of aftershocks, the seismic risk is estimated 40% and 48% less than the case of considering them for isolated and uncontrolled buildings, on average. In addition, among different loss types, the physical losses (47% underestimation) are more sensitive to the consideration of aftershock effects than the economic loss (40% underestimation).

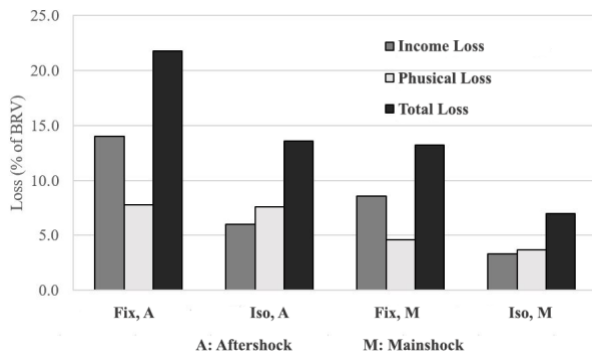


Fig. 1. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

4- Conclusions

The main outcome of this research paper was the developed vulnerability curves for the isolated buildings in Tehran considering the lifetime seismic hazard scenarios. In addition, outcomes of this research work proved both technical and economic superiority of lead rubber bearing systems in comparison with the traditional uncontrolled building. The application of LRB reduced the estimate lifetime risk of building by 35%, enjoying its capability in reducing both structural drift and acceleration responses of building, simultaneously. In the end, it is shown that among all active faults in Tehran province, North Tehran, Kahrizak, and Robotkarim have the highest contribution to the estimated risk.

References

- [1] I.V. Kalpakidis, M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Modelling strength degradation in lead-rubber bearings under earthquake shaking, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 39(13) (2010).
- [2] A. Kanyilmaz, C.A. Castiglioni, Reducing the seismic vulnerability of existing elevated silos by means of base isolation devices, *Engineering Structures*, 143 (2017).
- [3] M. Kumar, A.S. Whittaker, R.P. Kennedy, J.J. Johnson, A. Kammerer, Seismic probabilistic risk assessment for seismically isolated safety-related nuclear facilities, *Nuclear Engineering and Design*, 313 (2017).
- [4] C.C. Yu, C. Bolisetti, J.L. Coleman, B. Kosbab, A.S. Whittaker, Using seismic isolation to reduce risk and capital cost of safety-related nuclear structures, *Nuclear Engineering and Design*, 326, (2018).
- [5] A. Khansefid, A. Maghsoudi-Barmi, A. Bakhshi, Seismic performance assessment of optimally designed base isolation system under mainshock-aftershock sequences, In 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran (2019).
- [6] C.H. Zhai, Z. Zheng, S. Li, X. Pan, Damage accumulation of a base-isolated RCC building under mainshock-aftershock seismic sequences, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(1) (2017).
- [7] A. Khansefid, Lifetime risk-based seismic performance assessment of buildings equipped with supplemental damping and base isolation systems under probable mainshock-aftershock scenarios, *Structures*, 34 (2021).
- [8] A. Khansefid, A. Bakhshi, New model for simulating random synthetic stochastic earthquake scenarios, *Journal of Earthquake Engineering*, (2019).
- [9] A. Khansefid, A. Bakhshi, Statistical evaluation and probabilistic modeling of aftershock sequences of Iranian plateau, *Journal of Seismology*, 22(5) (2018).
- [10] A. Khansefid, A., Bakhshi, A. Ansari, Empirical predictive model for generating synthetic non-stationary stochastic accelerogram of the Iranian plateau: including far-and near-field effects as well as mainshock and aftershock categorization, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7) (2019).
- [11] C. Christopoulos, A. Filiatrault, V.V. Bertero, Principles of passive supplemental damping and seismic isolation, : Iuss press, Pavia, Italy, (2006).
- [12] Federal Emergency Management Agency (FEMA), HAZUS-MH 2.1 Earthquake Model Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, (2013).
- [13] A. Khansefid, A. Bakhshi, Advanced two-step integrated optimization of actively controlled nonlinear structure under mainshock-aftershock sequences, *Journal of Vibration and Control*, 25(4) (2019).
- [14] A. Khansefid, An investigation of the structural nonlinearity effects on the building seismic risk assessment under mainshock-aftershock sequences in Tehran metro city, *Advances in Structural Engineering*, 24(16) (2019) .

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Khansefid, *Seismic Lifetime Vulnerability Curve Development of Isolated Buildings with LRB Under Probable Mainshock-Aftershock Scenarios in Tehran*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(7) (2022) 523-526.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20672.7495





ارزیابی ریسک لرزه‌ای و تولید منحنی خسارت ساختمان‌های مجهز به سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی در طول عمر ساختمان تحت اثر توالی‌های محتمل لرزه-پس‌لرزه در شهر تهران

علی خان سفید*

دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲

کلمات کلیدی:

توالی لرزه-پس‌لرزه
جداساز لاستیکی هسته-سربی
ریسک لرزه‌ای
زلزله تصادفی
هزینه طول عمر

خلاصه: این تحقیق به بررسی تاثیر استفاده از جداسازهای لاستیکی هسته-سربی در کاهش ریسک لرزه‌ای ساختمان‌های واقع در شهر تهران از دو منظر فنی و اقتصادی با تمرکز بر اثر پس‌لرزه‌ها در طول عمر ساختمان می‌پردازد. در این ارتباط، ابتدا سه تیپ ساختمان ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی در نظر گرفته می‌شوند. تمامی ساختمان‌ها در دو شرایط مختلف طراحی می‌شوند. یک بار بدون سیستم کنترلی و بار دیگر با حضور آن. در ادامه، با در نظر گرفتن گسل‌های فعال در شهر تهران و حومه آن، سناریوهای لرزه‌ای محتمل در طول عمر ساختمان‌ها، یعنی ۵۰ سال، شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی، شامل توالی‌های محتمل رخدادهای لرزه-پس‌لرزه و همچنین شتاب‌نگاشت‌های تصادفی غیرمانا مرتبط با هر رخداد می‌باشد. سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو و تولید تعداد مکفی از سناریوهای تصادفی مذکور، رفتار و پاسخ مدل‌های سازه‌ای تحت اثر توالی‌های لرزه-پس‌لرزه به کمک روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی می‌گردد. در گام بعدی، با استفاده از مدل‌های خرابی و خسارت موجود و با در نظر گرفتن خسارت‌های ناشی از جرح و فوت، خرابی فیزیکی ساختمان و عدم بهره‌مندی از منافع مالی ناشی از عدم کارکرد ساختمان، ریسک لرزه‌ای طول عمر ساختمان‌ها ارزیابی می‌گردد. همچنین برای اولین بار منحنی خسارت سازه‌های جداسازی شده در شهر تهران با در نظر گرفتن اثر پس‌لرزه‌ها ارائه می‌گردد. نتایج به دست آمده نشان دهنده کارایی قابل توجه سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی در ارتقای فنی عملکرد ساختمان و بالتبع آن کاهش معنی‌دار ریسک لرزه‌ای ساختمان می‌شود که جزئیات آن در این مقاله به شرح و بررسی گذاشته شده است.

۱- مقدمه

در پروژه‌های ساختمانی با در نظر گرفتن هزینه چرخه عمر آن‌ها و تحت اثر ریسک‌های لرزه‌ای محتمل در طول عمر ساختمان ارزیابی و ملاک عمل قرار گیرد. به طور ویژه، یکی از این تجهیزات کنترلی که می‌تواند با توجه به دامنه کاربردش مورد توجه قرار گیرد، سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته-سربی می‌باشد.

امروزه بهره‌مندی از سیستم‌های کنترل ارتعاشات لرزه‌ای به صورت عام، به عنوان یک راه حل موثر در بهبود عملکرد فنی ساختمان‌ها در برابر زلزله مورد اتفاق نظر متخصصین می‌باشد و از این رو، استفاده از این تجهیزات در پروژه‌های واقعی با گسترش روز افزونی روبرو شده است. اما با این وجود یکی از دغدغه‌هایی که استفاده از این تجهیزات را در برخی مناطق به ویژه ایران با مشکلاتی روبرو کرده است صرفه اقتصادی استفاده از این تجهیزات است. این نگرش ناشی از نگاه مقطعی به این تجهیزات صرفاً با در نظر گرفتن هزینه اولیه آن‌ها در پروژه‌ها می‌باشد. هر چند که همین موضع نیز در برخی مطالعات به چالش کشیده شده است و مشخص گردیده است حداقل در برخی موارد استفاده از تجهیزات کنترلی حتی می‌تواند هزینه اولیه پروژه را نیز کاهش دهد [۱]. لذا نیاز است تا کارایی فنی-اقتصادی این تجهیزات

بررسی مطالعات پیشین نشان از وجود تحقیقات پر شمار در حوزه تجهیزات کنترل ارتعاشات سازه‌ها به ویژه جداسازهای لرزه‌ای دارد. بیشتر این مطالعات بر روی بررسی عملکرد سازه‌های این تجهیزات متمرکز هستند و به ابعاد اقتصادی و ریسک لرزه‌ای نمی‌پردازند. از این جمله می‌توان به تحقیقات مارانو^۱ و گرسو^۲، کالپاکیدیس^۳ و همکاران [۳]، چیمافانت^۴ و

- 1 Marano
- 2 Greco
- 3 Kalpakidis
- 4 Chimamphant

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khansfidali@kntu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.

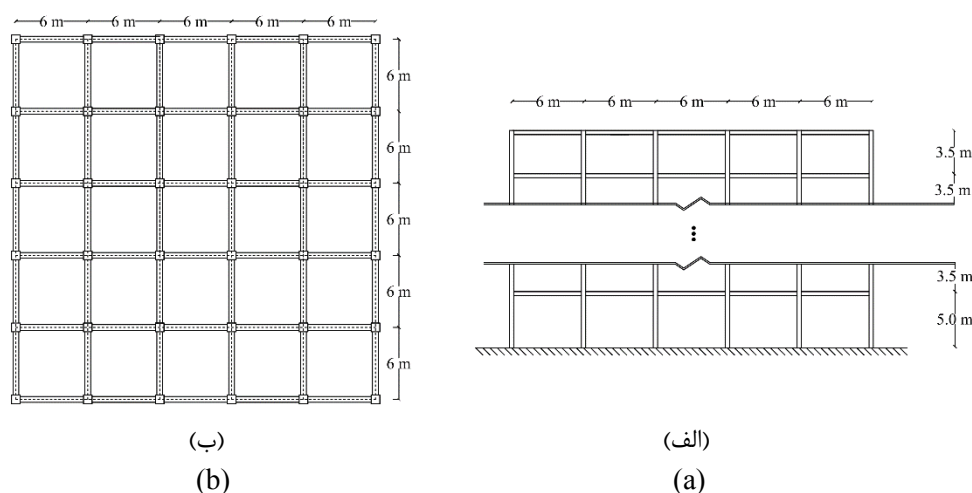


بیش از پیش اهمیت پیدا می‌کند.

با توجه به توضیحات فوق، تحقیق حاضر در امتداد و تکمیل کننده مطالعه پیشین خان سفید [۲۰] می‌باشد که با هدف تولید منحنی‌های خسارت سازه‌های مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته-سربی در طول عمر خود با در نظر گرفتن اثر پس‌لرزه‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر تمرکز اصلی بر اثر پس‌لرزه‌ها در منحنی خسارت ساختمان‌های جداسازی شده در شهر تهران می‌باشد. به مطالعه اثر استفاده از جداسازهای لرزه‌ای از نوع لاستیکی هسته-سربی در کاهش میزان هزینه‌ها و ریسک لرزه‌ای طول عمر سازه‌های با سیستم قاب خمشی متوسط تحت توالی‌های محتمل لرزه-پس‌لرزه می‌پردازد. برای این منظور، ابتدا سه تیپ ساختمان فولادی با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به عنوان ساختمان‌های تیپ در شهر تهران تعریف می‌شوند. سپس این ساختمان‌های یک بار بدون سیستم‌های کنترل ارتعاشات و به روش‌های مرسوم آیین‌نامه‌های ساختمانی طراحی می‌شوند و بار دیگر با فرض تجهیز ساختمان به جداسازهای لاستیکی هسته-سربی مجدداً ساختمان به صورت بهینه باز طراحی لرزه‌ای می‌شود. در ادامه و به جهت مدل‌سازی سناریوهای محتمل زلزله در شهر تهران، با در نظر گرفتن تمامی گسل‌های فعال محدوده شهر و با استفاده از یک روش شبیه‌سازی تصادفی غیرمانا دو مرحله‌ای، ابتدا رخدادهای محتمل لرزه-پس‌لرزه شبیه‌سازی می‌شوند و در ادامه برای هر رخداد مصنوعی تولید شده، شتاب‌نگاشت تصادفی متناظر، با در نظر گرفتن شرایط ساختگاه، تولید خواهد شد. در گام بعدی، با بهره‌مندی از روش شبیه‌سازی مونت-کارلو، به تعداد ۶۰۰۰ مرتبه، فرآیند تولید سناریوهای تصادفی زلزله و اثر دادن آن‌ها به مدل‌های ساختمانی تکرار شده و پاسخ سازه‌ای آن‌ها حاصل می‌گردد. پس از آن به کمک مدل‌های خرابی و خسارتی که توانایی در نظر گرفتن خسارت فیزیکی ساختمان، خواب اقتصادی ساختمان و میزان جرح و فوت افراد را دارند، ریسک لرزه‌ای طول عمر ساختمان‌ها برآورد می‌گردد. با توجه به ریسک لرزه‌ای محاسبه شده، منحنی‌های خسارت ساختمان با/بدون سیستم جداساز لرزه‌ای در شهر تهران برای اولین بار تهیه و تولید می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها توانمندی بالای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ارتقای عملکرد سازه در عین دارا بودن توجیه اقتصادی با در نظر گرفتن هزینه‌های محتمل طول عمر ساختمان دارد. در واقع استفاده از این سیستم باعث کاهش نزدیک به ۳۵ درصدی هزینه‌های چرخه عمر لرزه‌ای ساختمان می‌گردد که بیشتر به دلیل کاهش همزمان پاسخ شتاب و جابه‌جایی سازه در رخدادهای زلزله می‌باشد. علاوه بر این، خسارت‌های جرح و فوت با/بدون سیستم جداسازی

کاسای^۱ [۴]، کانیلماز^۲ و کاستیلیونی^۳ [۵] و یانگ^۴ و ژانگ^۵ [۶] اشاره نمود. اما در کنار این موارد، علی و همکاران [۷]، کومار^۶ و همکاران [۸] و یو^۷ و همکاران [۹] به موضوع ارزیابی ریسک لرزه‌ای ساختمان‌های نیروگاه‌های هسته‌ای که با تجهیزات جداساز لرزه‌ای ساخته شده بودند پرداختند. کاتفیلد^۸ و همکارانش [۱۰] نیز یک مطالعه مقایسه‌ای بین هزینه چرخه عمر ساختمان‌های مجهز به انواع مختلف جداساز لرزه‌ای پرداختند، تقریباً به گونه‌ای مشابه آنچه که گودا^۹ و همکارانش [۱۱] پیشتر به آن پرداخته بودند. همچنین وانگ^{۱۰} و ونگ^{۱۱} [۱۲] نیز به ارزیابی هزینه‌های چرخه عمر مخازن گاز مایعی که با استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای ساخته شده بودند پرداختند. علاوه بر این، موسی‌زاده و همکارانش [۱۳] نیز در مطالعه‌ای سعی بر ارائه روش طراحی بهینه جداسازهای لاستیکی هسته-سربی با در نظر گرفتن هزینه‌های چرخه عمر آن‌ها نمودند. نکته مهمی که در تمامی این مطالعات مشهود می‌باشد عدم منظور کردن اثر پس‌لرزه‌ها در محاسبه هزینه چرخه عمر و یا ریسک لرزه‌ای برآورد شده می‌باشد. هر چند که محققین دیگری بوده‌اند که سعی کرده‌اند اثر پس‌لرزه‌ها را بر روی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های جداساز شبیه‌سازی کنند نظیر خان سفید و همکاران [۱۴]، ژای^{۱۳} و همکاران [۱۵] و لی^{۱۳} و همکارانش [۱۶]. اما تمامی این موارد نیز اثر پس‌لرزه‌ها را صرفاً از منظر عملکرد سازه‌ای مورد بحث و بررسی قرار دادند و اثری از منظور کردن موضوع ریسک لرزه‌ای در آن‌ها مشاهده نمی‌شود. حال آن که پس‌لرزه‌ها عاملی برای ایجاد خرابی‌های تجمعی و افزایش ریسک لرزه‌ای ساختمان‌ها با/بدون سیستم‌های کنترل ارتعاشات می‌باشند [۱۹-۱۷]. اخیراً نیز خان سفید [۲۰] اقدام به ارائه روش نوینی جهت ارزیابی ریسک لرزه‌ای ساختمان‌ها در طول عمرشان به همراه انواع مختلفی از سیستم‌های کنترل غیرفعال لرزه‌ای نموده است. لذا با بررسی مطالعات پیشین، ضرورت بررسی عملکرد سیستم‌های کنترل ارتعاشات، به ویژه جداسازهای لرزه‌ای، در کاهش ریسک لرزه‌ای طول عمر ساختمان‌ها با در نظر گرفتن اثر پس‌لرزه‌ها

- 1 Kasai
- 2 Kanyilmaz,
- 3 Castiglioni
- 4 Yang
- 5 Zhang
- 6 Kumar
- 7 Yu
- 8 Cutfield
- 9 Goda
- 10 Wang
- 11 Weng
- 12 Zhai
- 13 Lee



شکل ۱. هندسه مدل‌های ساختمانی مورد استفاده در این تحقیق، الف) نمای ساختمان، ب) پلان تپ طبقات ساختمان.

Fig. 1. Building models' geometry considered in this study, a) building view, b) typical story plan.

نزدیک به صفر برآورد شده‌اند و نهایتاً از میان گسل‌های مختلف موجود در اطراف شهر، به ترتیب، گسل‌های شمال تهران، کهریزک، رباط کریم و مشا بیشترین اثرگذاری را در ریسک لرزه‌ای برآورد شده دارا هستند.

۲- مدل‌های ساختمان

سه مدل ساختمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تمامی این ساختمان‌ها از نوع فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی در نظر گرفته شده‌اند. این مدل‌ها با توجه به مشخصات کلی ساختمان‌های تپیی که در شهر تهران به صورت نوساز احداث می‌شوند در نظر گرفته شده‌اند [۲۱]. مصالح فولاد مورد استفاده دارای مقاومت تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال می‌باشد. مشخصات هندسی (پلان و نمای ساختمان) در شکل ۱ مشاهده می‌گردند. ارتفاع طبقات به جز طبقه اول که برابر ۵ متر است، در سایر طبقات به ۳/۵ متر کاهش می‌یابد. همچنین در پلان، در هر راستا ۵ دهانه ۶ متری وجود دارد. بارگذاری ساختمان در طبقات مختلف یکسان و برابر با 6 kN/m^2 و 3 kN/m^2 برای بارهای مرده و زنده در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به ضرورت مشخص بودن محل ساختمان جهت تولید سناریوهای لرزه‌ای در بخش بعدی، محل قرارگیری ساختمان در محدوده میدان انقلاب شهر تهران و با طول و عرض جغرافیایی $51/39^\circ$ و $35/69^\circ$ در نظر گرفته می‌شود. نوع خاک ساختگاه نیز از نوع ۲ با سرعت موج برشی

۳- طراحی ساختمان مجهز به جداساز لاستیکی هسته-سربی و معادلات دینامیکی آن

سیستم‌های کنترل غیرفعال به طور کلی با دو مکانیزم مختلف افزایش میرایی و یا جداسازی عمل می‌کنند [۲۴]. در این تحقیق از نوع دوم این سیستم‌ها، یعنی جداسازهای لاستیکی هسته-سربی استفاده می‌گردد که ترکیبی از لاستیک طبیعی به منظور ایجاد قابلیت جداسازی پایه و همچنین هسته سربی در راستای افزایش میرایی تجهیز و در نتیجه کاهش میزان تغییر شکل‌های کنترل نشده آن می‌باشد. فرآیند تحلیل و طراحی ساختمان‌های مجهز به این نوع از تجهیزات با ساختمان‌های معمول دارای تفاوت می‌باشد. از این رو، برای این کار از روش اختصاصی تشریح شده توسط آیین‌نامه ASCE7-16 [۲۳] آمریکا بهره گرفته می‌شود. بر اساس این روش، دو پارامتر کلیدی در رسیدن به یک طرح مهندسی مطلوب برای ساختمان و همچنین جداساز وجود دارند که عبارت‌اند از جابه‌جایی بیشینه جداساز (D_M)

و برش پایه طراحی روسازه (V_S) که از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$D_M = \frac{g S_{MI} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (1)$$

$$V_S = \frac{K_M D_M}{R_I} \left(\frac{W_S}{W} \right)^{(1-2.5\beta_M)} \quad (2)$$

در این روابط S_{MI} ، K_M ، R_I ، W_S ، W ، β_M ، T_M ، B_M به ترتیب، ضریب اثر میرایی، پریود سازه جداسازی شده، درصد میرایی، وزن لرزه‌ای سازه، وزن لرزه‌ای سازه بدون احتساب طبقه همکف، ضریب اصلاح پاسخ غیرخطی روسازه جداسازی شده، سختی موثر تراز جداسازی و شتاب پریود ۱ ثانیه طیف زلزله با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال می‌باشند. ضریب g نیز شتاب گرانش زمین و برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

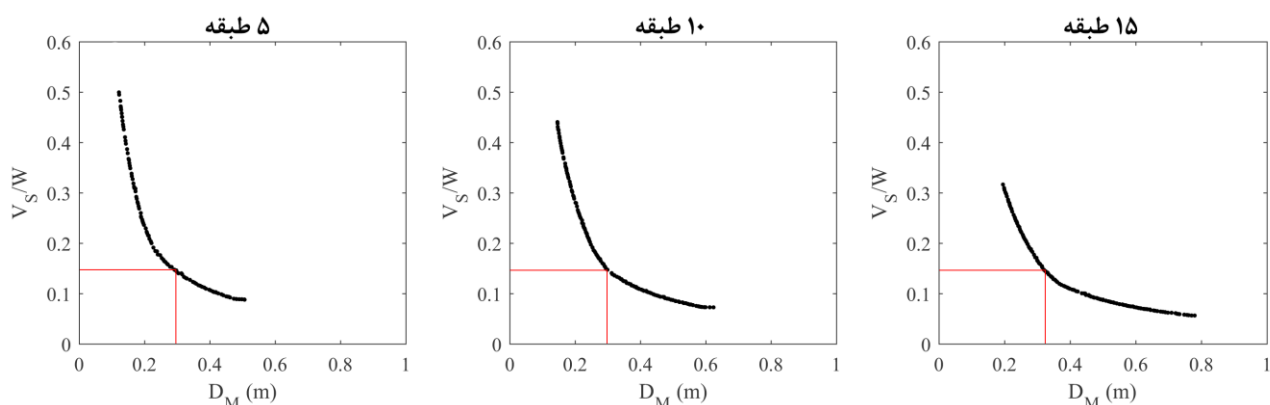
این دو پارامتر مهم طراحی سازه‌های جداسازی شده، که با استفاده از روابط فوق به دست می‌آیند، به نوعی در خلاف هم عمل می‌کنند. به این معنی که با تلاش برای بهبود یکی از آن‌ها، شرایط برای دیگری بدتر می‌شود و بالعکس. به عبارت دیگر با تلاش برای کاهش برش پایه (به جهت کاهش وزن و هزینه ساختمان)، مقدار جابه‌جایی تراز جداسازی افزایش می‌یابد و اقدام برای کاهش جابه‌جایی جداسازها نیز منجر به افزایش نیروی برش طراحی ساختمان می‌گردد. بنابراین در فرآیند طراحی چنین سازه‌هایی، اگر هدف دستیابی به یک طرح مطلوب باشد، با یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه روبرو هستیم که دو معیار مذکور فوق به عنوان اهداف بهینه‌سازی در آن باید در نظر گرفته شوند. در شرایط ایده‌آل طرحی بهینه است که بدون وقوع جابه‌جایی در تراز جداسازی بتواند عمل جداسازی را رقم بزند. اما از آنجایی که در عمل چنین چیزی ممکن نیست، تلاش می‌شود که به طرحی دست یافت که ضمن ایجاد جداسازی و کاهش مقدار برش طراحی روسازه، بتوان مقدار جابه‌جایی تراز جداسازی را نیز همزمان کنترل نمود. موضوع مهم دیگر علاوه بر اهداف بهینه‌سازی، متغیرهای آن هستند که برای سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی سختی اولیه (k_{IS})، نیروی تسلیم (F_{y-IS}) و نسبت سختی ثانویه به اولیه (α_{IS}) در نظر گرفته می‌شود. به جهت دستیابی به طرحی عملی، مقادیر این سه متغیر به ترتیب به محدوده‌های ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر، ۳۰ تا ۳۰۰ کیلو نیوتن و ۰ تا ۱۰ درصد محدود

شده‌اند. ضمناً باید به این موضوع نیز اشاره کرد که جداسازهای مورد استفاده در ساختمان‌های این تحقیق از نظر سایز و اندازه دارای تیپ‌بندی هستند. به این نحو که در ستون‌های پیرامونی ساختمان از یک نوع جداساز و در ستون‌های درونی تیپ دیگری از جداسازها استفاده می‌شوند.

به جهت حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه در علم ریاضیات راه حل‌های مختلفی وجود دارد که از آن بین می‌توان به روش‌های تجمع-محور^۱، معیار-محور^۲ و پیشانی پرتو^۳ اشاره کرد [۲۵]. در این تحقیق از روش آخر برای فرآیند بهینه‌سازی بهره گرفته خواهد شد. به دلیل اینکه روشی است که کمتر از فرضیات مسئله تاثیر می‌پذیرد. اساس کار این روش به این شرح است که ابتدا تعدادی حل تصادفی برای جواب مسئله تولید می‌شود، سپس از بین تمامی حل‌های تولید شده بخشی از آن که به اصطلاح حل‌های مسلط^۴ نام می‌گیرند انتخاب می‌شوند. حل مسلط به حل‌هایی اطلاق می‌گردد که هیچ حل تصادفی دیگری در بین موارد شبیه‌سازی شده وجود نداشته باشد که مقدار تمامی پارامترهای هدف آن همزمان از حل مذکور کمتر باشد. به این ترتیب، حل‌های انتخاب شده به همراه مجموعه دیگری از حل‌های تصادفی تولید شده جدید با هم برای مرحله دوم بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و فرآیند تشریح شده تکرار می‌گردد. این فرآیند به تعداد دفعاتی تکرار می‌شود که نتایج طرح‌های بهینه دو مرحله متوالی به یکدیگر همگرا شوند. در انتهای این روش، تعدادی حل بهینه به دست می‌آید که به اصطلاح غیرارجح^۵ نام می‌گیرند. به این معنی که نمی‌توان هیچ کدام از آن‌ها را به عنوان یگانه طرح بهینه نهایی در نظر گرفت و برای این منظور به یک معیار کمکی و اضافی نیاز می‌باشد.

حال با انجام این فرآیند برای سازه‌های مورد نظر این تحقیق، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است پیشانی پرتو برای هر سه تیپ مدل ساختمانی به دست می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود تعداد زیادی طرح بهینه در نمودارها ارائه شده است که برای انتخاب یک مورد از بین آن‌ها به عنوان طرح نهایی بهینه، نیاز به یک معیار اضافه وجود دارد. در این پژوهش به جهت ایجاد امکان مقایسه عادلانه و منطبق با شرایط واقعی بین طرح‌های مختلف، فرض می‌گردد که مقدار نسبت برش پایه به وزن لرزه‌ای ساختمان در همه مدل‌ها به میزان ۰/۱۵ محدود می‌گردد. با این فرض، طرحی که کمترین جابه‌جایی جداساز را داشته باشد به عنوان طرح

- 1 Aggregated-based
- 2 Criterion-based
- 3 Pareto Front
- 4 Dominant
- 5 Non-prior



شکل ۲. نمودار پیشانی پرتو بهینه طراحی ساختمان جداسازی شده برای مدل‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه.

Fig. 2. Pareto fronts of optimal design of 5-, 10-, and 15-story isolated building models.

جدول ۱. مشخصات طرح نهایی بهینه جداسازهای مدل‌های ساختمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه.

Table 1. Final outcomes of optimal design of 5-, 10, and 15-story isolated building models.

K_{IS} (kN/m)	a_{IS} (%)	F_{y-IS} (kN)	T_M (s)	تعداد دستگاه	تیب جداساز	مدل ساختمان
۱۰۵۰۰	۵/۱	۸۰	۲/۳۲	۲۰	درونی	۵ طبقه
۱۰۱۰۰	۳/۱	۵۰		۱۶	پیرامونی	
۱۱۵۰۰	۵/۲	۱۲۰	۲/۵۶	۲۰	درونی	۱۰ طبقه
۱۰۶۰۰	۴/۳	۱۰۵		۱۶	پیرامونی	
۱۲۴۰۰	۴/۷	۲۱۰	۲/۹۰	۲۰	درونی	۱۵ طبقه
۱۰۷۰۰	۴/۰	۱۳۰		۱۶	پیرامونی	

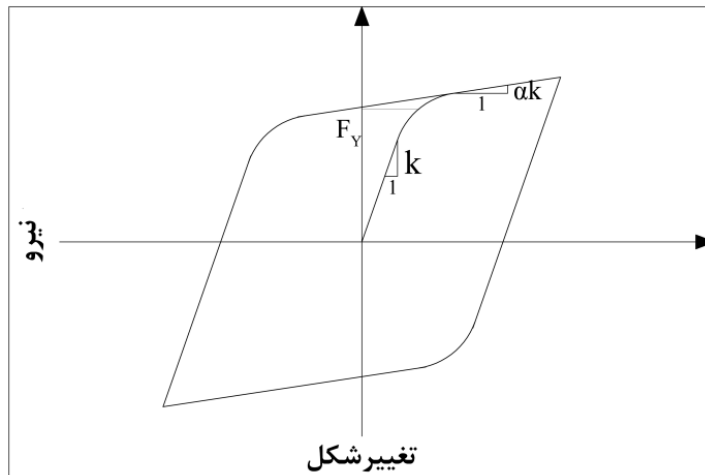
$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + F(t) + F_{IS}(t) = -ML\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

که در این رابطه M ، C ، F ، F_{IS} و L به ترتیب ماتریس جرم، میرایی ذاتی سازه، نیروی بازگرداننده غیرخطی سازه، نیروی سیستم جداساز لرزه‌ای و بردار تاثیر می‌باشد. همچنین، و پاسخ سازه‌ای شتاب و سرعت و همچنین شتاب حرکت زمین می‌باشند.

در این روش مدل‌سازی، برای در نظر گرفتن اثر رفتار غیرخطی سازه و همچنین رفتار جداسازهای لرزه‌ای از مدل رفتاری بوک-ون [۲۶] استفاده می‌گردد. این مدل خود دارای سه پارامتر اصلی سختی اولیه (k)، نیروی

نهایی انتخاب می‌شود. به این نحو، مقدار جابه‌جایی بیشینه تراز جداسازی ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر با ۰/۲۳، ۰/۲۴ و ۰/۳۲ متر به دست می‌آید. نهایتاً مشخصات طرح‌های بهینه به دست آمده برای هر کدام از جداسازها در مدل‌های ساختمانی در جدول ۱ ارائه شده است.

پس از اتمام فرآیند طراحی و به دست آوردن مشخصات بهینه جداسازها و طرح روسازه با کمک مقدار برش پایه به دست آمده، باید به فرآیند مدل‌سازی ساختمان مجهز به جداساز لرزه‌ای جهت انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی مورد نیاز در شبیه‌سازی پر حجم مونت-کارلو پرداخته شود. برای این منظور رفتار ساختمان به صورت مدل‌های ساده‌سازی شده چند درجه آزادی غیرخطی جرم و فنر با استفاده از معادلات حاکم زیر شبیه‌سازی می‌شود [۲۴].



شکل ۳. شماتیک مدل رفتار غیرخطی بوک-ون.

Fig. 3. Schematic of Bouc-wen nonlinear behavior model.

۴- مدل سازی زلزله تصادفی

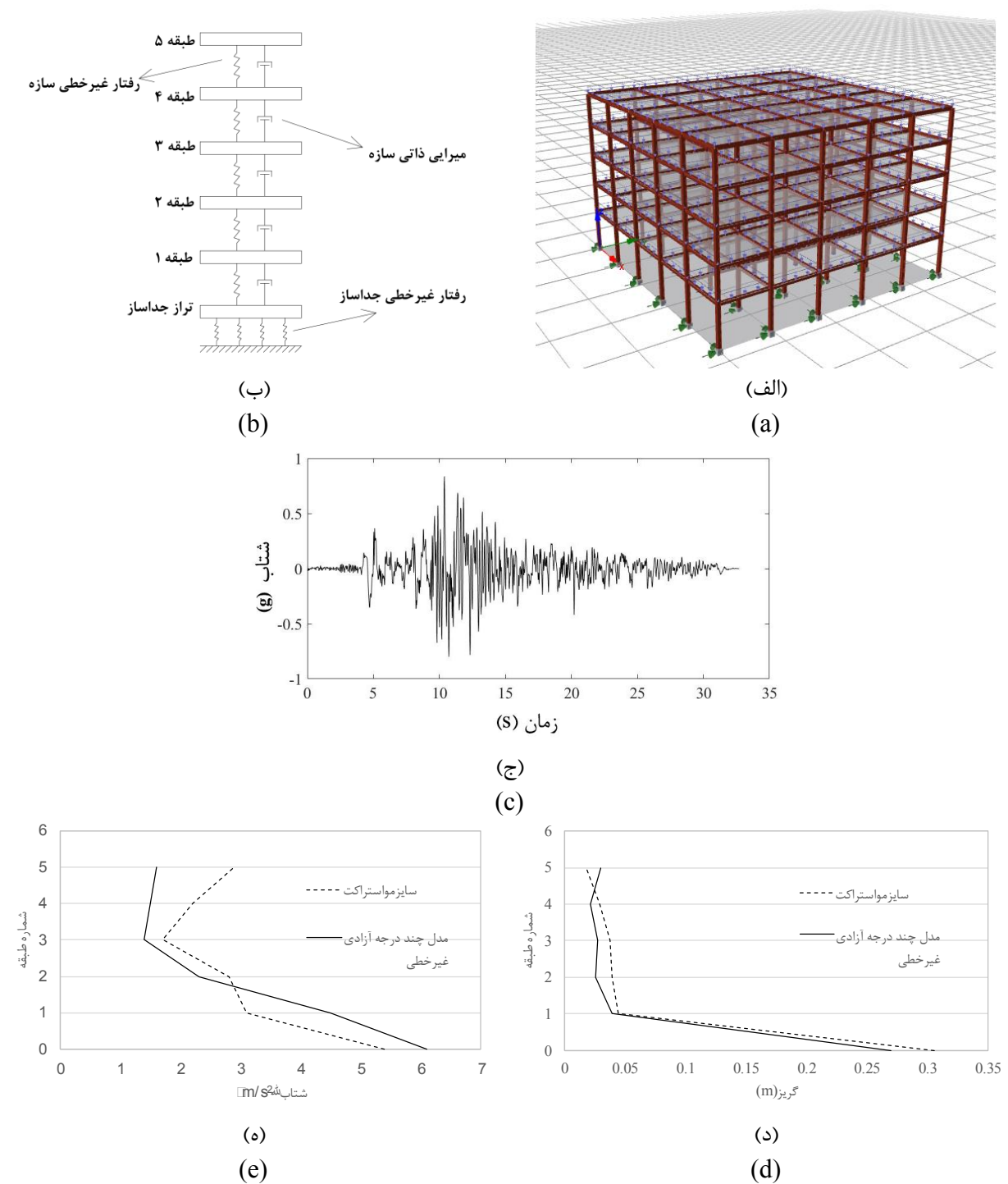
یکی از موضوعات بسیار مهم در ارتباط با شبیه‌سازی پدیده زلزله که در اغلب مطالعات و حتی ضوابط و دستورالعمل‌ها به نحو شایسته مورد بررسی قرار نگرفته است، مسئله لحاظ نمودن اثر سناریوهای واقعی زلزله در طول عمر ساختمان‌ها است که می‌تواند شامل بیش از یک لرزه اصلی و همراه با تعداد زیادی پس‌لرزه باشد. به منظور در نظر گرفتن این دغدغه مهم، در این تحقیق، از روش نوین شبیه‌سازی سناریوهای لرزه‌ای که توسط خان‌سفید و بخشی [۲۸] ارائه شده است بهره گرفته خواهد شد، که نمونه شماتیک آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. این مدل در واقع ترکیبی از دو زیر-مدل است که ابتدا به تولید سناریوهای محتمل رخدادهای زلزله شامل لرزه اصلی و پس‌لرزه در یک محل مشخص و برای دوره زمانی ۵۰ ساله می‌پردازد و در گام بعدی برای هر کدام از رخدادهای شبیه‌سازی شده یک شتاب‌نگاشت تصادفی سازگار با شرایط محل تولید می‌کند. در ادامه هر دو این زیر مدل‌ها به صورت مختصر تشریح خواهند شد.

همانطور که اشاره شد، در زیر-مدل اول رخدادهای لرزه-پس‌لرزه محتمل برای منطقه تهران شبیه‌سازی خواهد شد. به این منظور نیاز هست تا موقعیت و مشخصات گسل‌های فعال اطراف محل پروژه تعیین شوند. نقشه موقعیت مکانی گسل‌ها در شکل ۶ و همچنین مشخصات لرزه‌شناسی آن‌ها نیز برای محدوده استان تهران در جدول ۲ ارائه شده‌اند [۲۹].

تسلیم (F_y) و نسبت سختی ثانویه به اولیه (α) است که به صورت شماتیک در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. در مورد مدل‌سازی رفتار سازه، این سه متغیر برای هر کدام از طبقات سازه با کمک روش تحلیل رانشی^۱ به دست آمده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج دو پارامتر اول در پیوست ۱ ارائه شده‌اند و در مورد پارامتر آخر (α) نیز برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب مقادیر ۰/۱۷، ۰/۲۲ و ۰/۲۵ به دست آمده‌اند. در مورد رفتار جداسازها نیز مقدار این متغیرها در جدول ۱ ارائه شده است. در انتها، در ارتباط با نحوه مدل‌سازی میرایی ذاتی سازه نیز از روش رایلی^۲ [۲۷] با فرض میرایی ۰/۲ برای مودهای ۱ و ۳ رواسازه استفاده شده است.

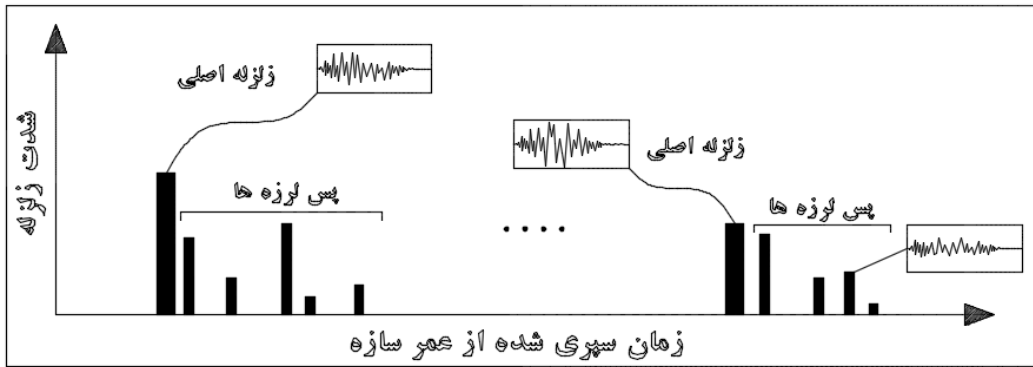
در انتهای این بخش به جهت اطمینان یافتن از صحت نتایج مدل سازه‌ای جرم و فنر چند درجه آزادی غیرخطی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، مدل سازه ۵ طبقه یک بار توسط حل معادلات فوق تحت زلزله طبرس سال ۱۳۵۷ که در ایستگاه طبرس ثبت شده است تحلیل گردیده و بار دیگر مدل سه بعدی و کامل آن در نرم‌افزار تحلیل غیرخطی سازه‌مستراکت^۳ ساخته و نتایج آن مقایسه شده است. چنانچه در شکل ۴ مشخص است پاسخ بیشینه گریز^۴ و شتاب مطلق طبقات سازه در هر دو مدل از همخوانی خوبی برخورداراند.

- 1 Pushover
- 2 Rayleigh
- 3 Seismostruct
- 4 Drift



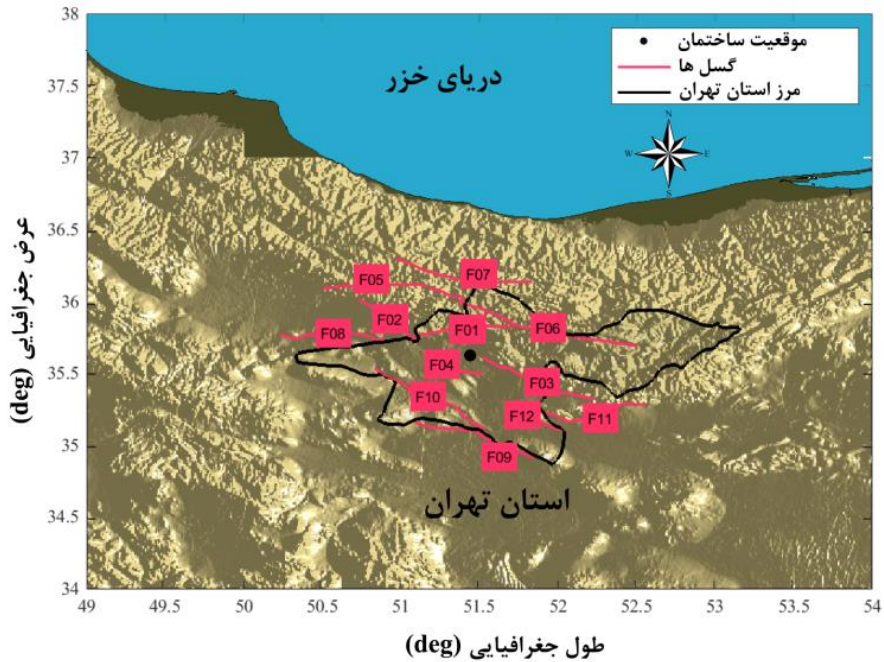
شکل ۳. صحت‌سنجی نتایج مدل تحلیل دینامیکی چند درجه آزادی غیرخطی سازه مجهز به جداساز لرزه‌ای با مدل نرم افزار سایزموستراکت، (الف) شکل مدل سه بعدی ساختمان ۵ طبقه در سایزموستراکت، (ب) شماتیک مدل جرم و فنر غیرخطی سازه، (ج) شتاب‌نگاشت مولفه قوی زلزله طیس در ایستگاه طیس، (د) نتایج گریز طبقات، (ه) نتایج شتاب بیشینه مطلق طبقات.

Fig. 3. Result validation of nonlinear multi degree of freedom building model equipped with the base isolation system with the Seismostruct model, a) 3D 5-story building model in Seismostruct, b) Schematic of the nonlinear structural mass-spring model, c) Tabas accelerogram recorded in Tabas station, d) Story drift results, e) Story maximum absolute acceleration results.



شکل ۵. شماتیک سناریو لرزه‌ای که توسط مدل خان سفید-بخشی [۲۸] تولید می‌شود.

Fig. 5. Schematic of seismic scenario generated by the Khansefid-Bakhshi [28] model.



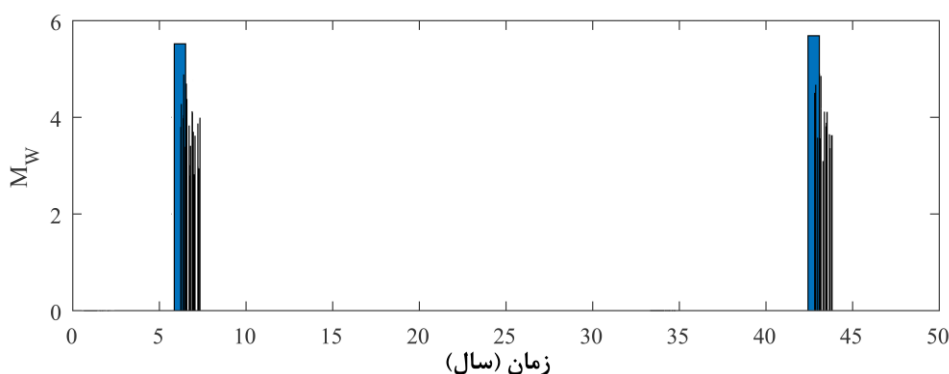
شکل ۶. نقشه گسل‌های اطراف محل ساختمان در استان تهران.

Fig. 6. Faults map surrounding the building model in Tehran province.

جدول ۲. مشخصات لرزه‌شناسی گسل‌های استان تهران [۲۹]

Table 2. Seismological characteristics of Tehran province faults.

شماره گسل	نام گسل	طول گسل (km)	M_{min}	M_{max}	نرخ لرزه‌خیزی	احتمال فعال شدن
F01	شمال تهران ۱	۷۲/۲	۵/۰	۷/۲	۰/۰۲۸۲۸	۰/۱۳۷
F02	شمال تهران ۲	۴۶/۹	۵/۰	۷/۰	۰/۰۱۷۸۱	۰/۰۸۰
F03	ایوانکی	۸۲/۱	۵/۰	۶/۹	۰/۰۱۱۴۰	۰/۰۵۱
F04	که‌ریزک	۳۶/۷	۵/۰	۶/۸	۰/۰۱۸۰۲	۰/۰۸۱
F05	طالقان	۷۴/۰	۵/۰	۶/۹	۰/۰۲۷۷۸	۰/۱۲۵
F06	مشا	۱۵۵/۷	۵/۰	۷/۶	۰/۰۲۲۴۶	۰/۱۰۱
F07	کندوان	۹۷/۲	۵/۰	۷/۳	۰/۰۱۳۹۷	۰/۰۶۳
F08	اشتهارد	۷۴/۷	۵/۰	۷/۲	۰/۰۱۹۵۸	۰/۰۸۸
F09	سیاکوه	۸۶/۸	۵/۰	۷/۲	۰/۰۱۵۷۴	۰/۰۷۱
F10	رباط کریم	۸۴/۴	۵/۰	۷/۳	۰/۰۱۳۷۶	۰/۰۶۲
F11	گرمسار	۷۶/۵	۵/۰	۷/۳	۰/۰۲۱۶۴	۰/۰۹۷
F12	پیشوا	۳۵/۳	۵/۰	۷/۵	۰/۰۱۱۴۳	۰/۰۵۱



شکل ۷. سناریو تصادفی لرزه-پس لرزه ناشی از فعالیت گسل F04.

Fig. 7. Random generated mainshock-aftershock scenario due to the fault F04 activity.

پس لرزه‌ها برای هر لرزه اصلی به کمک رابطه اوموری^۱ [۳۱] که به داده‌های فلات ایران کالیبره شده است تعیین و زمان وقوع و بزرگای آن‌ها نیز به کمک یک تابع توزیع احتمال چندگانه که توسط خان سفید و بخشی [۳۲] برای پس لرزه‌های ایران ارائه شده است، تولید می‌شود. به این ترتیب، فرآیند تولید سناریو رخدادهای لرزه‌ای محتمل کامل خواهد شد. اطلاعات تکمیلی و جزئیات متغیرهای این مدل شبیه‌سازی در کارهای خان سفید و بخشی [۳۲] و [۲۸] ارائه شده است. در شکل ۷ به عنوان نمونه، یک سناریو تصادفی که ناشی از فعال شدن گسل شماره F04 می‌باشد، مشاهده می‌شود. این سناریو، با احتمال تصادفی رخداد ۰/۰۰۰۳ تولید شده است. در این سناریو، دو لرزه

در ادامه، به منظور تولید سناریو رخداد لرزه‌ای، ابتدا با توجه به احتمال فعال شدن هر کدام از گسل‌ها، یک گسل به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. سپس با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال یکنواخت، محل وقوع گسلش بر روی گسل انتخاب شده به صورت تصادفی تعیین می‌گردد. با توجه به میزان لرزه‌خیزی گسل انتخاب شده و به کمک تابع توزیع احتمال پواسن، تعداد لرزه‌های اصلی محتمل در طول ۵۰ سال تعیین می‌شوند. زمان وقوع آن‌ها نیز با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال یکنواخت به صورت تصادفی شبیه‌سازی می‌شود. نهایتاً بزرگای آن‌ها به کمک رابطه معروف توزیع احتمال گوتنبرگ-ریشتر [۳۰] شبیه‌سازی خواهد شد. پس از شبیه‌سازی رخدادهای لرزه اصلی، نوبت به تولید تصادفی پس لرزه‌های محتمل است. برای این منظور نیز تعداد

1 Omori

در این رابطه D_r ، γ ، ν ، T_p ، V_p ، $t_{max,p}$ به ترتیب زمان وقوع بیشینه مقدار پالس سرعت، مقدار پیک پالس سرعت، پریود پالس سرعت، زاویه فازی، مشخصه نوسانی و متغیر اصلاح پاسخ پسماند جابه‌جایی رکورد تولید شده می‌باشند. تمامی این پارامترهای مدل برای فلات ایران محاسبه شده و وابستگی و رابطه آن‌ها با متغیرهای بزرگای زلزله، فاصله روکانونی زلزله تا ایستگاه، عمق کانون و سرعت موج برشی برای داده‌های فلات ایران به دست آمده است که جزئیات آن در کارهای خان‌سفید و همکاران ارائه شده است [۳۶ و ۳۳].

در نهایت به کمک مدل زلزله تشریح شده و بر اساس نیاز روش شبیه‌سازی مونت-کارلو (که در بخش ۵ تشریح خواهد شد) ۶۰۰۰ سناریو تصادفی لرزه-پس‌لرزه تولید می‌گردد که مشخصات آماری آن‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است. این داده‌های آماری از دیدگاه اطلاعات لرزه‌شناسی رخدادها و همچنین مشخصات شتاب‌نگاشت‌های تولید شده ارائه گشته است. آنچنان که از شکل مشخص است، بزرگای زلزله‌های اصلی بین ۵ تا ۷/۵ در حال تغییر است. در همین حین، بزرگای پس‌لرزه‌ها بین ۴ تا ۶ در نوسان دارد. عمق کانونی رخدادهای شبیه‌سازی شده نیز بین ۱۴ تا ۲۶ کیلومتر متغیر است، فارغ از نوع زلزله که آیا در زمره لرزه‌های اصلی است یا پس‌لرزه‌ها. ضمن اینکه فواصل محل رخداد زلزله‌ها تا محل پروژه ساختمانی مورد بررسی بین ۳ تا ۱۰۰ کیلومتر متغیر می‌باشد. علاوه بر این موارد، مقدار بیشینه شتاب زمین (PGA) در زلزله‌های اصلی و پس‌لرزه‌ها به ترتیب به مقادیر ۱۰ و ۴ متر بر مجذور ثانیه نیز می‌رسد. بیشینه مقدار سرعت حرکت زمین (PGV) نیز در لرزه‌های اصلی حداکثر به ۰/۵۱ متر بر ثانیه می‌رسد که بسیار بیشتر از مقادیر مربوط به پس‌لرزه‌ها (حداکثر ۰/۲۰ متر بر ثانیه) است. نهایتاً مدت زمان حرکت قوی زمین لرزه‌های اصلی بین ۲ تا ۱۰ ثانیه متغیر است که در مورد پس‌لرزه‌ها این پارامتر بین ۲ تا ۷ ثانیه تغییر می‌نماید.

۵- روش ارزیابی ریسک لرزه‌ای

این بخش از مقاله به اصول و مبانی روش تخمین خرابی و خسارت وارد بر ساختمان‌ها در سناریوهای لرزه-پس‌لرزه شبیه‌سازی شده، می‌پردازد. مبانی اصلی کار در این مقاله بهره‌مندی از ترکیبی از روش‌های پیشنهادی Hazus [۳۷] و FEMA-P58 [۳۸] می‌باشد. بر این اساس، سه نوع خسارت کلی در نظر گرفته می‌شود که شامل جرح و فوت، خرابی فیزیکی ساختمان و عدم بهره‌مندی از منافع مالی ناشی از توقف درآمدهای ممکن از ساختمان می‌باشد. به منظور تعیین تمامی این خسارت‌ها، نیاز هست تا در

اصلی به بزرگای ۵/۷ و ۵/۹ در سال‌های ۶-ام و ۴۴-ام رخ داده‌اند که هر کدام به ترتیب با ۲۹ و ۳۵ پس‌لرزه همراه شده‌اند. این پس‌لرزه‌ها دارای بزرگای بین ۳ تا ۴/۸ می‌باشند و در فاصله زمانی حداکثر ۱۵ ماه پس از زلزله اصلی رخ داده‌اند.

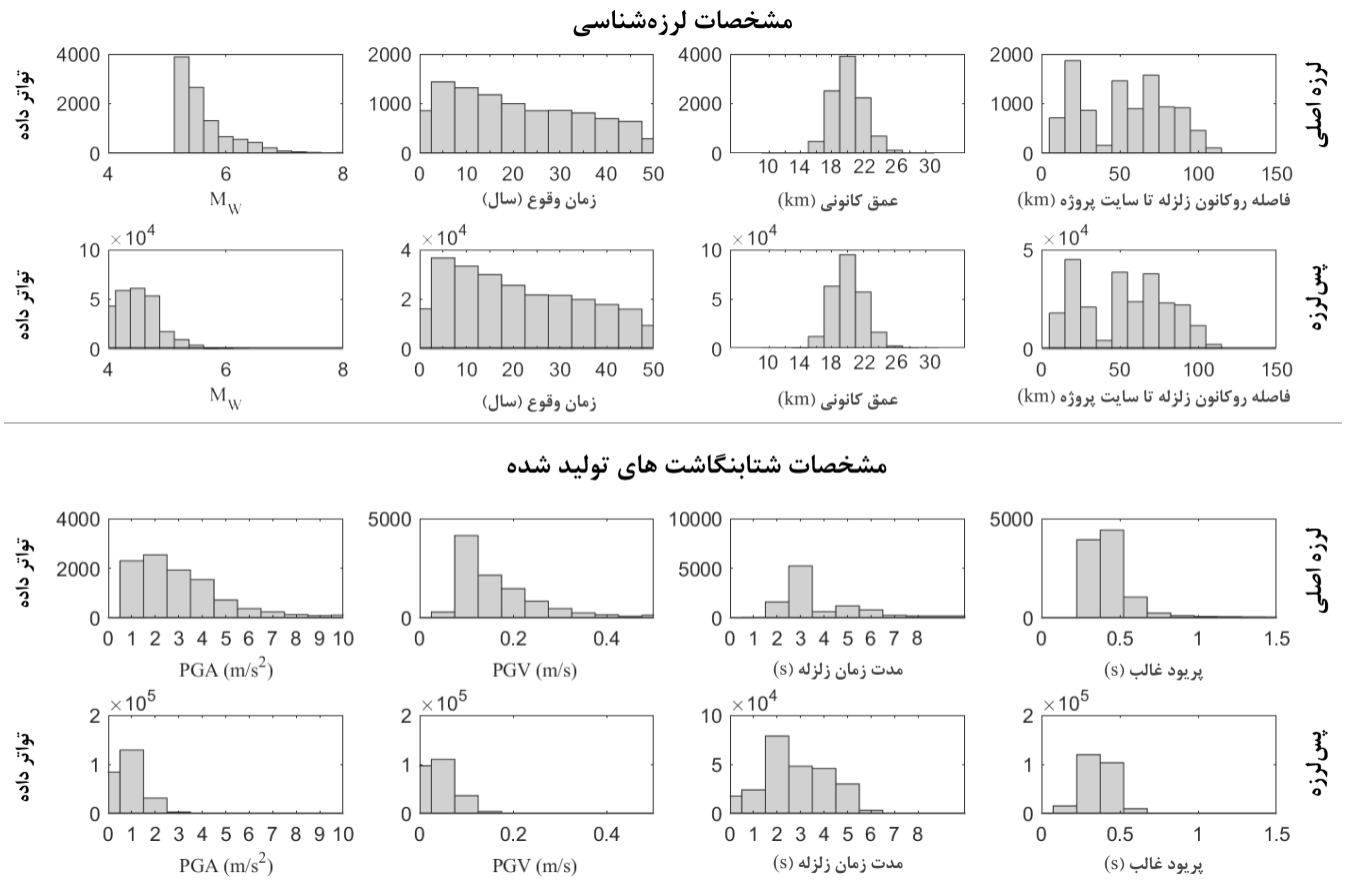
در گام بعدی از فرآیند شبیه‌سازی سناریو لرزه‌ای، به زیر-مدل دوم پرداخته می‌شود. این زیر-مدل به تولید شتاب‌نگاشت‌های تصادفی غیرمانا برای هر کدام از رخدادهای لرزه-پس‌لرزه تولید شده در زیر-مدل اول می‌پردازد. این زیر-مدل بر اساس نتایج تحقیقات خان‌سفید و همکاران [۳۳] توسعه یافته است. روش مورد نظر قابلیت تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی سازگار با فلات ایران را برای هر دو دسته رخدادهای لرزه و پس‌لرزه دارا می‌باشد. همچنین از دیگر ویژگی‌های بارز این مدل، توانایی تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی برای هر دو نوع شرایط دور از گسل و نزدیک گسل (رکوردهای پالس‌دار) می‌باشد. این مدل، رکوردهای زلزله دور از گسل را با کالیبره کردن روابطی که اولین بار توسط رضاییان و درگرگوریان [۳۴] ارائه شد، به داده‌های فلات ایران تولید می‌نماید.

$$X(t) = q(t, \alpha) \left\{ \frac{1}{\sigma_f(t)} \int_{-\infty}^t h[t - \tau, \lambda(\tau)] w(\tau) d\tau \right\} \quad (4)$$

در این رابطه، $X(t)$ سیگنال شتاب تصادفی است. نوفه سفید، $h[t - \tau, \lambda(\tau)]$ تابع پاسخ ضربه واحد (IRF) برای پارامتر زمانی متغیر، انحراف معیار تابع IRF و تابع پوش زمانی می‌باشند. توضیحات تکمیلی و جزئیات این متغیرها توسط خان‌سفید و همکاران تشریح شده است [۳۳]. در صورتی که هدف تولید یک شتاب‌نگاشت متناظر با شرایط نزدیک گسل (پالس‌دار) باشد. مدل به این شکل عمل می‌کند که ابتدا با کمک رابطه (۴) یک شتاب‌نگاشت مصنوعی دور از گسل تولید می‌نماید. سپس با کمک روابط پیشنهادی دباغی و درگرگوریان [۳۵] یک سیگنال پالس سرعت مطابق با شرایط ساختگاه تولید می‌نماید و آن را با سیگنال دور از گسل ترکیب نموده و سیگنال نهایی پالس‌دار زلزله را تولید می‌نماید. رابطه مورد نظر برای تولید سیگنال پالس به شرح ذیل می‌باشد:

$$v_{psl}(t) = \left\{ \frac{1}{2} V_p \cos \left[2\pi \left(\frac{t - t_{max,p}}{T_p} \right) + \nu \right] - \frac{D_r}{\gamma T_p} \right\} \times \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi \left(\frac{t - t_{max,p}}{T_p} \right)}{\gamma} \right] \right\}, \quad (5)$$

$$t_0 - \frac{\gamma}{2} T_p < t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2} T_p$$



شکل ۸. مشخصات آماری ویژگی‌های لرزه‌شناسی رخدادها و شتاب‌نگاشت‌های تصادفی تولید شده.

Fig. 8. Statistical features of seismological characteristics of randomly generated events and accelerograms.

در این رابطه Φ تابع توزیع احتمال استاندارد نرمال، i نوع خرابی (STR، NSD، NSA و CON)، EDP_{DS} و β_{DS} میانگین و انحراف معیار لوگاریتمی آستانه سطوح مختلف خرابی، EDP پاسخ سازه در زلزله و نهایتاً DS_j نیز سطح j -ام خرابی (کم، متوسط، زیاد و شدید) می‌باشد. بعد از ارزیابی احتمال مشاهده هر کدام از سطوح خرابی مختلف در سازه تحت زلزله مورد نظر، با استفاده از رابطه زیر خسارت وارد بر ساختمان و بهره‌برداران آن برآورد می‌گردد.

$$E_i(C) = A \times RPC \sum_{i=1}^4 P_{i,j} C_{i,j} \quad (7)$$

که در این رابطه A مساحت ساختمان، RPC هزینه جایگزینی

ابتدا خرابی‌های ایجاد شده در ساختمان ناشی از تجربه زلزله‌های مختلف مشخص شوند. در این راستا، در این مقاله چهار دسته خرابی پیشنهادی Ha-zus [۳۷] شامل خرابی سازه‌ای (STR^1)، خرابی اجزا غیرسازه‌ای وابسته به جابه‌جایی (NSD^2)، اجزای غیرسازه‌ای وابسته به شتاب (NSA^3) و خرابی محتوای داخل ساختمان (CON^4) در نظر گرفته می‌شوند. به منظور تعیین احتمال وقوع هر کدام از این خرابی‌ها در ساختمان از منحنی‌های شکنندگی پیشنهادی Hazus [۳۷] مطابق رابطه زیر استفاده می‌گردد.

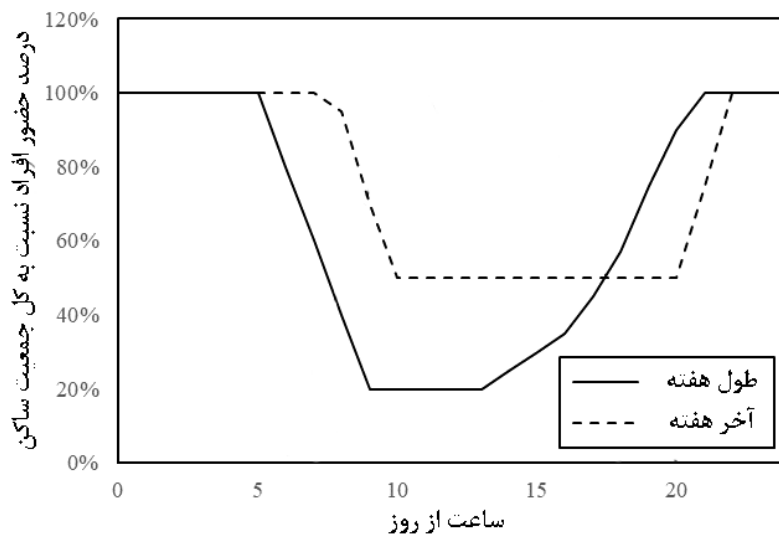
$$P_i[DS_j | EDP] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{DS}} \ln\left(\frac{EDP}{EDP_{DS}}\right)\right] \quad (6)$$

- 1 Structural damage
- 2 Non-structural drift sensitive damage
- 3 Non-structural acceleration sensitive damage
- 4 Contents

جدول ۳. هزینه تعمیر ساختمان در سطوح مختلف خرابی و به ازای حالت‌های مختلف آن، بر حسب درصدی از ارزش جایگزینی ساختمان [۳۹ و ۴۰].

Table 3. Building repair cost for different damage states of different damage types per percent of building replacement cost [39, 40].

خرابی محتوای داخل ساختمان	خرابی اجزا غیرسازه‌ای وابسته به شتاب	خرابی اجزا غیرسازه‌ای وابسته به جابه‌جایی	خرابی سازه‌ای	سطح خرابی
۱/۰	۰/۸	۰/۹	۰/۳	کم
۵/۰	۴/۳	۴/۳	۱/۴	متوسط
۲۵/۰	۱۳/۱	۲۱/۳	۶/۹	زیاد
۵۰/۰	۴۳/۷	۴۲/۵	۱۳/۸	کامل



شکل ۹. توزیع زمانی حضور افراد در ساختمان در طول شبانه روز.

Fig. 9. Time distribution of occupant's presence in the building during the whole day.

این، الگوی حضور افراد در ساختمان نیز بر اساس پیشنهاد FEMA-P58 [۳۸] با انجام اصلاحات اندک به جهت تطبیق با الگوی زمانی حضور افراد در منزل در شهری مثل تهران مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۹). همچنین مقدار دیه ناشی از فوت یک انسان بالغ برابر ۴۴۰ میلیون تومان فرض می‌گردد.

نوع آخر خسارت‌ها که باید به تشریح آن پرداخت، خسارت ناشی از عدم بهره‌مندی از منافع مالی درآمد ساختمان پس از زلزله به واسطه بسته شدن آن است. با توجه به نوع کاربری ساختمان که مسکونی در نظر گرفته شده است، دو نوع خسارت ممکن است بعد از زلزله و در طول زمان متوجه

ساختمان که به صورت متوسط برابر با ۷ میلیون تومان بر متر مربع در نظر گرفته شده است. P_{ij} هم احتمال مشاهده سطح خرابی i -ام برای نوع خرابی j -ام می‌باشد و C_{ij} نیز هزینه متناظر آن می‌باشد که بر مبنی Hazus [۳۷] و با انجام برخی تغییرات کوچک به جهت سازگاری آن با شرایط ایران [۴۰ و ۳۹] مورد استفاده قرار گرفته است و در جدول ۳ نمایش داده شده است.

در ادامه خسارت جرح و فوت نیز می‌باید مورد محاسبه قرار گیرد که برای این کار از همان رابطه (۷) بهره گرفته می‌شود. در همین راستا، فرض می‌شود که در هر مدل ساختمانی، در زمان حضور همه افراد، حداکثر ۴ نفر به ازای هر ۱۰۰ متر مربع زیربنای آن در ساختمان حضور داشته باشند. علاوه بر

جدول ۴. میانگین و ضریب پراکندگی تابع توزیع احتمال لوگنرمال برای متغیرهای دارای عدم قطعیت در این تحقیق [۴۰ و ۴۲]

Table 4. Mean and coefficient of variation of lognormal probability density function for variables with uncertainty in this research work [40,42].

متغیر	میانگین	ضریب پراکندگی
سختی طبقه	در پیوست ۱ ارائه شده است	۰/۱۰
نیروی تسلیم طبقه	در پیوست ۱ ارائه شده است	۰/۱۰
سختی اولیه جداساز	در جدول ارائه شده است	۰/۰۵
سختی ثانویه جداساز	در جدول ارائه شده است	۰/۰۵
نیروی تسلیم جداساز	در جدول ارائه شده است	۰/۵۰
هزینه جایگزینی ساختمان	در بخش ۵ ارائه شده است	۰/۲۵
هزینه اجاره ماهانه ساختمان	در بخش ۵ ارائه شده است	۰/۲۵

نکته مهمی که در فرآیند محاسبات فوق در زمینه ارزیابی ریسک باید به آن اشاره شود، موضوع وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل سازی می باشد که شامل تمامی مراحل از جمله شبیه سازی پدیده زلزله، مدل سازی ساختمان و برآورد خسارت می باشد. در مورد عدم قطعیت های مربوط به پدیده زلزله، در همان فرآیند تشریح شده در بخش ۴ به موارد ضروری اشاره گشت. برای سایر انواع عدم قطعیت ها نیز، مطابق با آنچه در جدول ۴ نمایش داده شده است، هر کدام از پارامترهای مدل سازی ساختمان و همچنین برآورد خسارت مالی به عنوان یک متغیر تصادفی با تابع توزیع احتمال لوگ نرمال در نظر گرفته شده است که میانگین و ضریب پراکندگی هر کدام در جدول ۴ ارائه شده است.

به عنوان مطلب مهم پایانی در ارتباط با فرآیند ارزیابی ریسک، به موضوع حداقل تعداد نمونه مورد نیاز برای شبیه سازی تصادفی در روش مونت-کارلو [۴۳] پرداخته می شود. نکته مهم در این روش شبیه سازی وابستگی دقت نتایج حاصل به تعداد نمونه های شبیه سازی شده می باشد. اما افزایش بیش از حد تعداد نمونه های شبیه سازی می تواند منجر به ایجاد یک هزینه محاسباتی بسیار بالا شود، بدون آنکه بهبود چشمگیری در دقت کار حاصله داشته باشد. از این رو، رابطه زیر برای تعیین حداقل تعداد داده مورد نیاز برای شبیه سازی مورد استفاده قرار می گیرد [۴۴]:

$$N_{\min} = \frac{p'(1-p')}{\delta_{ip}^2} Z_{(1+\gamma)/2}^2 \quad (10)$$

ساکنین و مالکین ساختمان شود، اول هزینه جابه جایی و اسکان موقت (REC) و دومی از بین رفتن درآمد اجاره (RIL) مالکینی که واحدهایشان دارای مستاجر بودند. این هزینه ها بر اساس توصیه Hazus [۳۷] به صورت متوسط از روابط زیر محاسبه می گردند.

$$E_{REC}(C) = (1-OO) \times RT \times \sum_{i=1}^4 P_i \times TRANS + (OO) \times RT \times \sum_{i=1}^4 P_i \times (TRANS + RENT) \quad (8)$$

$$E_{RIL}(C) = (1-OO) \times A \times RENT \times \sum_{i=1}^4 P_i \times RT \quad (9)$$

در این روابط P_i احتمال مشاهده خسارت سطح i -ام است که از منحنی های شکنندگی قبلی به دست می آید. OO درصد اشغال واحدها توسط مالکین می باشد که بر اساس اطلاعات مندرج در سالنامه ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران [۴۱] برابر ۰/۶ در نظر گرفته می شود. A سطح زیربنای ساختمان می باشد. RT مدت زمان لازم برای تعمیر ساختمان به ازای سطوح مختلف خسارت می باشد که بر اساس توصیه های Hazus [۳۷] منظور شده است. $RENT$ هزینه اجاره ماهانه به ازای هر متر مربع است که برابر با ۰/۰۵ میلیون تومان در نظر گرفته شده است. نهایتاً $TRANS$ نیز هزینه ای است که در صورت خرابی ساختمان، ساکنین آن برای جابه جایی و اسباب کشی به محل جدید باید بپردازند و برابر با ۵ میلیون تومان فرض شده است.

نسبتاً کوتاهی بعد از زلزله اصلی رخ می‌دهند فرض شده است که امکان بازسازی سازه ساختمان در آن زمان کم وجود ندارد. ضمن آن که در ارتباط با اسباب و وسایل نیز فرض دیگری که صورت گرفته است، تخلیه آن‌ها از سوی مالکین بعد از رخداد زلزله اصلی است. در انتها نیز باید به این نکته اشاره شود که به دلیل ثابت فرض شدن هندسه پلان مدل‌ها، پارامتر ضریب لاغری ساختمان‌ها یا به عبارت دیگر نسبت ارتفاع به بعد حداکثر پلان در مدل‌های مختلف با یکدیگر تفاوت دارند.

در ادامه این بخش ابتدا پاسخ سازه‌های ساختمان‌ها تحت اثر یکی از سناریوهای شبیه‌سازی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. سناریو انتخاب شده به واسطه فعالیت گسل سیاکوه (گسل شماره ۹) تولید شده است. این سناریو دارای یک زلزله اصلی به بزرگای ۶/۳ و ۱۹ پس‌لرزه با بزرگای متغیر بین ۳/۹ تا ۵/۴ می‌باشد. فاصله رخدادهای شبیه‌سازی شده بین ۵۰ تا ۸۰ کیلومتر از محل ساختمان بوده و مقدار بیشینه شتاب زمین رکورددهای شتاب تولید شده (شکل ۱۰) آن‌ها نیز به ترتیب برای زلزله اصلی برابر ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه و برای پس‌لرزه‌ها بین ۰/۵ تا ۲/۶ متر بر مجذور ثانیه متغیر می‌باشد.

پاسخ سازه با و بدون سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی به این سناریو لرزه‌ای در شکل ۱۱ به نمایش در آمده است که شامل پاسخ میانگین بیشینه شتاب و گریز طبقات سازه می‌شود. چنان که مشخص است استفاده از سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی به طور متوسط به میزان ۳۸٪، ۳۴٪ و ۲۹٪ مقدار پاسخ شتاب بیشینه طبقات ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه را کاهش داده و این کاهش برای پاسخ بیشینه گریز طبقات نیز به ترتیب برابر ۳۳٪، ۲۹٪ و ۲۴٪ می‌باشد که مقادیر قابل توجهی هستند. ضمن آن که همانطور که مشخص است با افزایش ارتفاع ساختمان اندکی در عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای افت مشاهده می‌شود.

گام بعدی، پس از تعیین پاسخ دینامیکی سازه‌های مختلف برای تمامی ۶۰۰۰ سناریو تصادفی زلزله، نوبت به ارزیابی خرابی، خسارت و نهایتاً ریسک لرزه‌ای می‌رسد. شکل ۱۲ منحنی احتمال فراگذشت مشاهده خسارت احتمالاتی ساختمان‌ها با/بدون جداساز لرزه‌ای نمایش می‌دهد. چنانچه از نتایج مشاهده می‌شود، استفاده از سیستم جداساز منجر به کاهش هزینه‌های خسارت طول عمر ساختمان شده است. به عنوان نمونه، در سطح احتمال فراگذشت ۱۰٪ که به بیشینه خسارت محتمل (PML^1) نیز معروف است [۴۵]، میزان خسارت ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب از ۵۷٪، ۵۲٪ و ۴۶٪ به ۴۴٪، ۳۳٪ و ۲۴٪ رسیده‌اند که به طور متوسط نشان دهنده

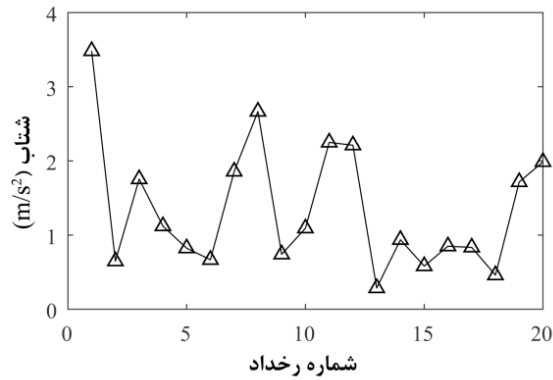
در این رابطه P ، δ_{ip} ، γ و Z به ترتیب احتمال موفقیت در هر مرتبه از شبیه‌سازی معادل با ۰/۵، بیشترین مقدار خطای قابل قبول در محاسبات برابر ۰/۰۵ ارزش جایگزینی ساختمان، سطح اطمینان نسبت به دقت نتایج به دست آمده برابر با ۹۵ درصد و نهایتاً متغیر تابع توزیع احتمال استاندارد نرمال می‌باشند.

به منظور افزایش دقت محاسبات، فرض می‌شود که هدف اصلی‌ای که در فرآیند مونت-کارلو باید شبیه‌سازی شود، یعنی هزینه خسارت طول عمر ساختمان، به ۱۰ بازه مساوی در محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد ارزش جایگزینی ساختمان تفکیک شود و برای هر بازه به تعداد مورد نیاز داده شبیه‌سازی شود تا اطمینان مورد نظر در مورد صحت و دقت نتایج حاصل گردد. به این ترتیب، براساس رابطه (۱۰) و پارامترهای تشریح شده آن، به حداقل ۳۸۵ نمونه برای هر دسته نیاز است که در مجموع برابر ۳۸۵۰ عدد خواهد شد. با این وجود و به جهت افزایش دقت محاسبات ۶۰۰۰ نمونه سناریو زلزله تصادفی تولید و عملکرد ساختمان و خسارت‌های وارد بر آن‌ها ارزیابی می‌گردید.

۶- تحلیل‌ها و نتایج

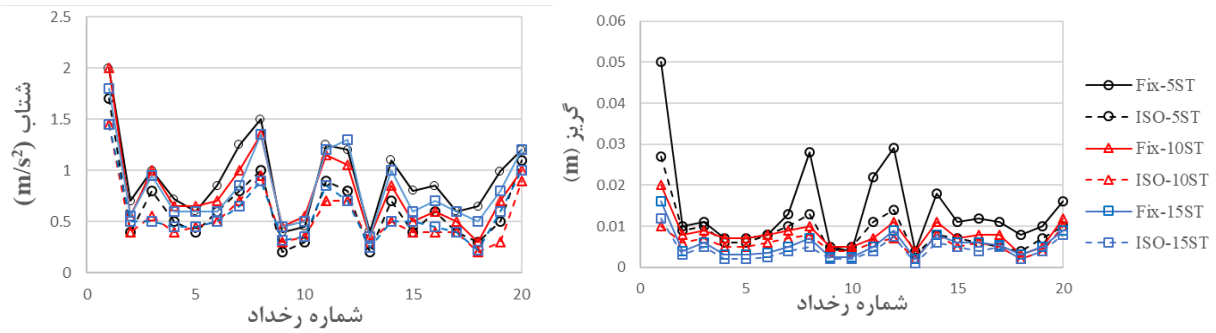
در این بخش نتایج حاصل از فرآیند تحلیل ریسک انجام گرفته تشریح خواهد شد. همانطور که در بخش‌های پیش نیز اشاره شد، در این مقاله ابتدا سناریوهای خطر لرزه‌ای محتمل برای ساختمان‌ها در شهر تهران شبیه‌سازی می‌شود. سپس ساختمان‌ها تحت اثر سناریوهای لرزه-پس‌لرزه مورد اشاره تحلیل می‌شوند و پاسخشان ارزیابی می‌گردد. در گام بعدی نیز، با استفاده از مدل‌های خرابی و خسارت، ریسک لرزه‌ای وارد بر ساختمان‌ها ارزیابی می‌گردد. تمامی این فرآیند نیز از طریق روش شبیه‌سازی مونت-کارلو پیاده‌سازی می‌گردد. بدیهی است که در انجام چنین تحقیقی نیاز به در نظر گرفتن برخی فرضیات در بخش‌های مختلف آن وجود دارد که می‌باید قبل از شرح نتایج به اهم آن‌ها اشاره نمود. اولین مورد به نوع کاربری ساختمان‌ها بر می‌گردد که از نوع مسکونی در نظر گرفته شده است. همچنین در انجام فرآیند تحلیل تاریخچه زمانی به منظور استحصال نتایج واقعی، به مدت ۴۰ ثانیه شتاب به مقدار صفر به انتهای رکورددهای زلزله اضافه شدند تا امکان ارتعاش آزاد ساختمان‌ها و برآورد دقیق تغییر شکل‌های پسماند سازه بعد از اتمام زلزله میسر گردد. علاوه بر این، در فرآیند تحلیل دینامیکی سازه نیز تغییر شکل‌های ساختمان در انتهای تحلیل تحت هر رکورد به عنوان شرایط اولیه آن برای شبیه‌سازی رفتار در پس‌لرزه بعدی در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند تخمین خسارت نیز با توجه به توالی زمانی پس‌لرزه‌ها که در زمان

1 Probable maximum loss



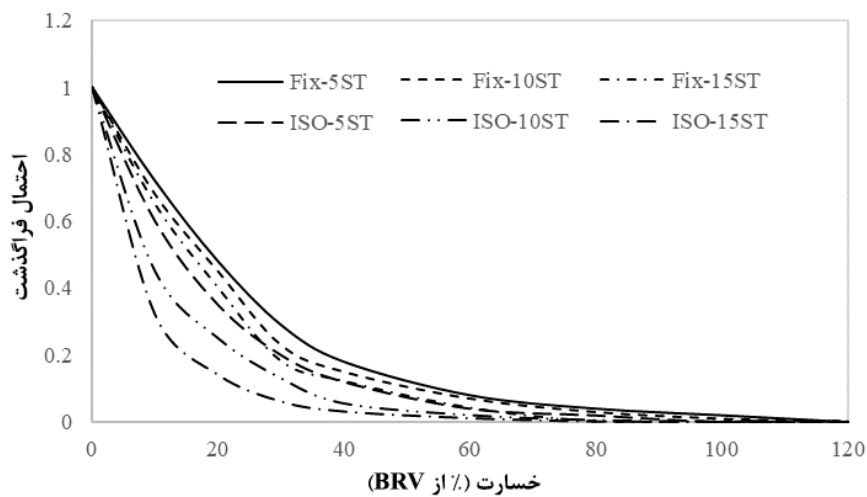
شکل ۱۰. مقدار PGA زلزله‌های سناریو لرزه-پس لرزه منتخب.

Fig. 10. PGA of records of selected mainshock-aftershock scenario.



شکل ۱۱. پاسخ میانگین بیشینه شتاب و دریف طبقات سازه در تمامی رخداد‌های لرزه-پس لرزه سناریو انتخاب شده با/بدون سیستم جداساز لرزه‌ای.

Fig. 11. Average of maximum absolute acceleration and story drift of structure for all events of selected mainshock-aftershock scenario with/without seismic isolation system.



شکل ۱۲. منحنی احتمال فراگذشت خسارت تخمین زده شده ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با و بدون سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی.

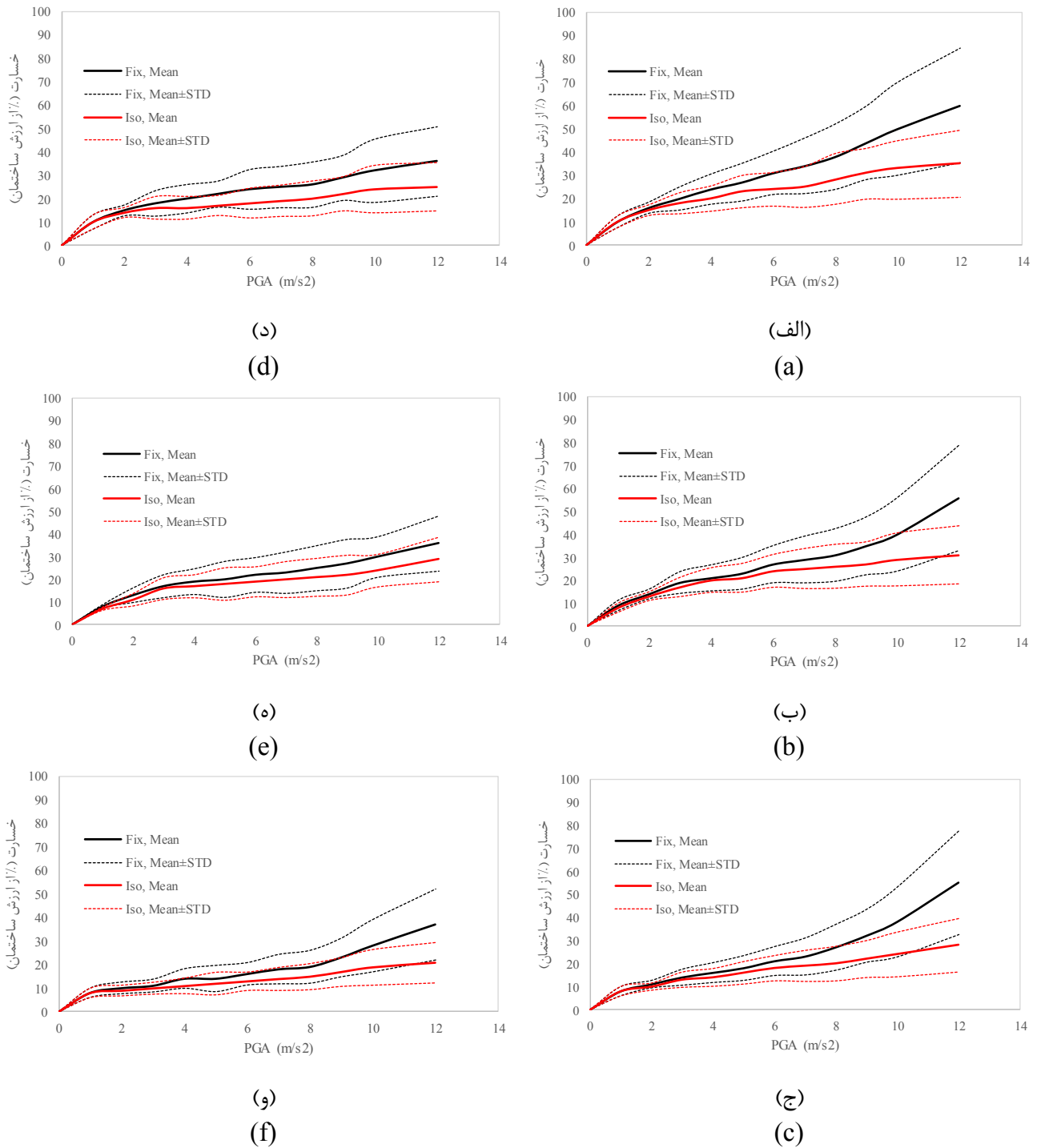
Fig. 12. Exceedance probability curve of the estimated loss value of 5-, 10-, 15-story buildings with/without lead rubber bearing isolation system.

کاهش خسارت ۳۵٪ می‌باشد. به بیانی دیگر، اگر فردی بخواهد در یک پروژه ساختمانی مشابه تصمیم بگیرد که از سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته-سربی استفاده نماید یا خیر، چنین می‌توان بیان نمود که، به طور متوسط، مالک ساختمان می‌تواند تا حدود ۱۸ درصد ارزش کل ساختمان خود را برای تامین و تجهیز آن به جداسازهای لرزه‌ای و نگهداری آن‌ها در طول عمر ساختمان هزینه نماید. این عدد از تفاضل بین خسارت‌های برآورد شده فوق برای حالت بدون/با سیستم جداساز لرزه‌ای در سطح احتمال PML به دست آمده است.

در گام بعدی بررسی‌ها، عملکرد ساختمان مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای در شدت‌های مختلف زلزله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر در شکل ۱۳ منحنی خسارت سازه با و بدون سیستم جداساز لرزه‌ای، به عنوان خروجی اصلی این تحقیق، تولید و ارائه شده است. در این نمودار، پارامتر PGA زلزله از میان انواع مختلفی از متغیرها نظیر شتاب طیفی، سرعت طیفی، جابه‌جایی طیفی و غیره، به عنوان معیار شدت جنبش قوی زمین در نظر گرفته شده است. علت این موضوع عدم وابستگی پارامتر PGA به مشخصات سازه است. در حالی که سایر پارامترهای مذکور به مشخصات لرزه‌ای سازه، به ویژه پرپود نوسان ذاتی آن، وابسته‌اند و از آنجایی که در سازه جداسازی شده، پرپود نوسان ذاتی خود به میزان جابه‌جایی دستگاه جداساز در زلزله تجربه شده و به تبع آن به شدت زلزله وابسته است، استفاده از این متغیر توصیه نمی‌گردد. همانطور که در این شکل نمایش داده شده است، در شدت‌های کم زلزله (کمتر از ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه) تفاوت محسوسی در میزان خسارت تجربه شده توسط سازه با و بدون سیستم جداساز لرزه‌ای وجود ندارد که به دلیل فعال نشدن سیستم جداساز (تسلیم هسته سربی) در زلزله‌های خفیف است. باید توجه کرد که سامانه جداساز مطابق ضوابط آیین‌نامه ASCE7-16 [۲۳] برای زلزله‌های با دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال طراحی و کنترل می‌شود. به این ترتیب، هر چه بر شدت زلزله افزودی می‌شود و به ویژه در PGA های بالاتر جداسازهای لاستیکی هسته-سربی بیش از پیش توانمندی خود را در بهبود عملکرد ساختمان به نمایش می‌گذارد. نهایتاً چنانکه مشخص است، اگر اثر پس لرزه‌ها در تحلیل‌ها منظور نشود مقدار خسارت برآورد شده در شدت‌های مختلف به میزان ۵ تا ۵۵ درصد کمتر تخمین زده می‌شود که طبیعتاً این اختلاف در شدت‌های پایین‌تر که متناظر با زلزله‌های خفیف‌تر است کمتر بوده، زیرا که اصولاً چنین لرزه‌های اصلی خفیف‌تری با تعداد کمتری پس-لرزه همراه می‌شوند. ضمن آن که شدت پس لرزه‌ها نیز در مقایسه با

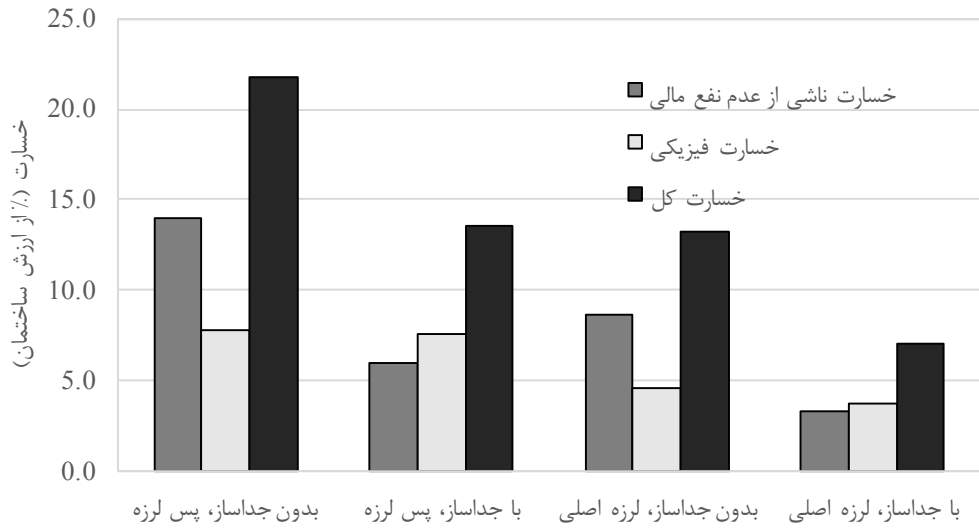
پس‌لرزه‌های یک لرزه اصلی قوی، کمتر می‌باشد. در ادامه بررسی عمیق‌تری بر روی میزان تاثیر پس‌لرزه‌ها در خسارت و ریسک نهایی برآورد شده صورت می‌گیرد. به این منظور، در شکل ۱۴ میانگین خسارت برآورد شده برای سازه با/بدون سیستم جداساز لرزه‌ای برای دو سناریو مختلف ارائه شده است: یک بار با در نظر گرفتن اثر لرزه اصلی و بار دیگر با منظور کردن اثر توامان سناریوهای لرزه-پس‌لرزه در طول عمر ساختمان. چنانکه مشخص است، با در نظر نگرفتن اثر پس‌لرزه‌ها میزان ریسک لرزه‌ای برای سازه بدون جداساز در حدود ۴۰٪ و در صورت استفاده از سیستم جداساز به میزان ۴۸٪ کمتر از حالت منظور کردن اثر پس‌لرزه‌ها برآورد می‌گردد که اختلاف قابل توجه و تاثیرگذاری است. علاوه بر این از میان دو نوع خسارت برآورد شده، یعنی خسارت فیزیکی و خسارت اقتصادی ناشی از عدم بهره‌مندی مالی از ساختمان، ریسک برآورد شده مورد اول بیشتر (۴۷٪ کمتر برآورده شدن خسارت) تحت تاثیر قرار می‌گیرد تا خسارت‌های اقتصادی (۴۰٪ کمتر برآورد شدن).

در گام بعدی، نحوه توزیع خسارت برآورد شده در میان انواع مختلف خسارت‌های سازه‌ای، جرح و فوت و اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۵ میانگین خسارت کل تخمین زده شده برای میانگین تمامی مدل‌های ساختمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در طول عمر خودشان نمایش داده شده است. چنانچه مشخص است، با استفاده از سیستم جداساز خسارت‌ها، به میزان قابل توجهی (نزدیک به ۴۰ درصد) کاهش می‌یابد. در کنار این موضوع، آنچه که جلب توجه می‌نماید این است که جرح و فوت افراد سهم قابل‌ذکری در کل خسارت برآورد شده نداشته است، چه در حضور سیستم جداساز لرزه‌ای و چه بدون استفاده از آن. این بدان معنی است که اگر صرفاً یک ساختمان فقط با همان سیستم‌های متداول سازه‌ای مندرج آیین‌نامه‌ها نیز ساخته شود می‌توان انتظار داشت که خطر ناچیزی جان و سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند. علاوه بر این، در ارتباط با خسارت فیزیکی وارد به ساختمان نیز استفاده از جداساز موثر بوده است به ویژه در کاهش سهم خسارت‌های NSA و CON که به پاسخ شتاب سازه وابسته‌اند. اما آنچه که در این نمودار بیشتر به چشم می‌آید، کاهش چشمگیر خسارت‌های اقتصادی ناشی از تعطیلی و از کار افتادن ساختمان است که به دلیل عملکرد موثر سیستم جداساز در بهبود همزمان پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه رقم خورده است. در انتها، به میزان تاثیر گسل‌های مختلف در ریسک لرزه‌ای برآورد شده برای ساختمان‌ها پرداخته می‌شود. همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، از میان گسل‌های مندرج در جدول ۲، گسل‌های شمال تهران،



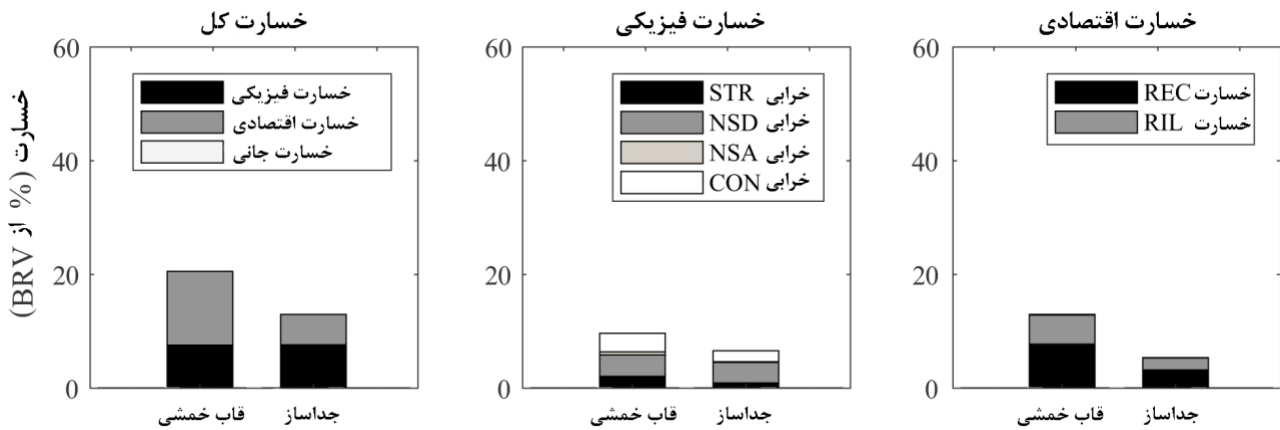
شکل ۱۳. منحنی خسارت مدل‌های ساختمانی بر حسب پارامتر شدت زلزله PGA، الف) سازه ۵ طبقه با در نظر گرفتن پس لرزه، ب) سازه ۱۰ طبقه با در نظر گرفتن پس لرزه، ج) سازه ۱۵ طبقه با در نظر گرفتن پس لرزه، د) سازه ۵ طبقه بدون در نظر گرفتن پس لرزه، ه) سازه ۱۰ طبقه بدون در نظر گرفتن پس لرزه، و) سازه ۱۵ طبقه بدون در نظر گرفتن پس لرزه.

Fig. 13. Loss curves of building models per PGA as an intensity measure, a) 5-story building with considering aftershocks, b) 10-story building with considering aftershocks, c) 15-story building with considering aftershocks, d) 5-story building without considering aftershocks, e) 10-story building without considering aftershocks, f) 15-story building without considering aftershocks.



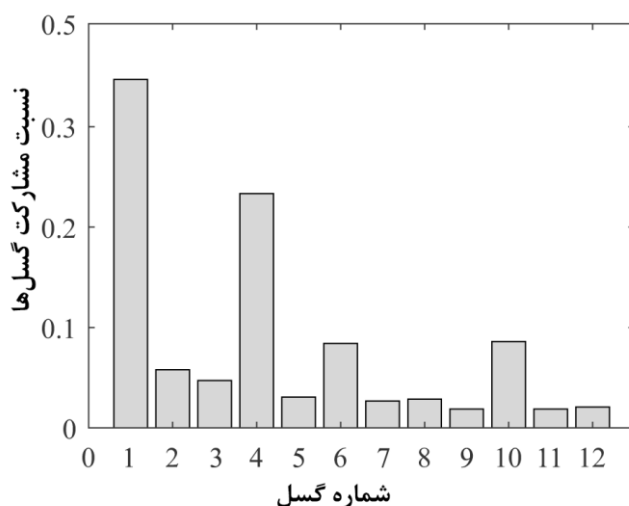
شکل ۱۴. تاثیر در نظر گرفتن پس لرزه‌ها در میزان ریسک لرزه‌ای نهایی برآورد شده.

Fig. 14. Effects of considering aftershocks in the final estimated seismic risk.



شکل ۱۵. میزان مشارکت انواع مختلف خرابی‌ها در خسارت نهایی برآورد شده.

Fig. 15. Contribution of different damage types in final estimated seismic loss.



شکل ۱۶. میزان نسبی مشارکت هر کدام از گسل‌های در خسارات برآورد شده.

Fig. 16. Relative contribution of different faults in the estimated loss values.

۷- جمع‌بندی

تحقیق حاضر به تلاش برای ارزیابی عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته-سربی از منظر کاهش ریسک لرزه‌ای طول عمر آن ساختمان‌ها با در نظر گرفتن سناریوهای محتمل لرزه-پس‌لرزه پرداخت. در همین راستا، سه مدل ساختمانی ۵، ۱۰ و ۱۵ ساختمان فولادی که در شهر تهران قرار گرفته‌اند مورد مطالعه قرار گرفتند. این ساختمان‌ها بدون/با سیستم جداساز لرزه‌ای به صورت بهینه طراحی شدند. سپس به کمک روش شبیه‌سازی مونت-کارلو و با بهره‌گیری از یک مدل پیشرفته شبیه‌سازی سناریوهای رخدادهای لرزه-پس‌لرزه به همراه شتاب‌نگاشت‌های تصادفی آن‌ها، بیش از ۶۰۰۰ سناریو تصادفی زلزله در طول عمر ۵۰ سال یک ساختمان شبیه‌سازی شد. در این فرآیند ۱۲ گسل فعال در محدوده شهر تهران مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه به کمک روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها ارزیابی گردید و در گام بعدی به کمک مدل‌های خرابی مورد استفاده، خسارت‌های فیزیکی ساختمان، خسارت‌های جانی و همچنین خسارت‌های اقتصادی محتمل برآورد شدند. نهایتاً به کمک فرآیند مذکور برای اولین بار منحنی خسارت سازه‌های جداسازی شده در شهر تهران با در نظر گرفتن اثر پس‌لرزه‌ها ارائه شد. به این ترتیب، نتایج به دست آمده مبین این موضوع می‌باشد که استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای لاستیکی هسته-سربی میزان ریسک (PML) ساختمان را

کهریزک، رباط کریم و مشا به ترتیب با درصد مشارکت ۳۹، ۲۳، ۱۱ و ۱۰ بیشترین سهم‌ها را در ایجاد ریسک لرزه‌ای برای ساختمان‌های مورد مطالعه داشته‌اند. سایر گسل‌ها نیز با وجود فعالیت، اما سهم عمده‌ای از میزان ریسک محاسبه شده را به خود اختصاص ندادند. به جهت تحلیل مناسب‌تر این سهم مشارکت برای گسل‌ها، باید به متغیرهای مهمی نظیر بزرگای حداکثر، قوه لرزه‌زایی و فاصله آن‌ها از محل پروژه پرداخته شود. همانطور که در جدول ۲ نیز بیان شده است، اکثر گسل‌ها دارای بزرگای حداکثری نزدیک به یک دیگر می‌باشند. اما در ارتباط با قوه لرزه‌زایی گسل‌ها، چهار گسل مورد اشاره در میان موارد با قوه لرزه‌زایی بالا قرار دارند که این خود به معنی احتمال بیشتر فعالیت آن‌ها و در نتیجه تاثیرگذاری بیشترشان در ریسک برآورد شده می‌باشد. علاوه بر این پارامتر، میانگین فاصله زلزله‌های شبیه‌سازی شده روی گسل‌های مورد اشاره تا محل پروژه نیز به ترتیب برابر ۱۲، ۱۴، ۵۱ و ۴۶ کیلومتر است که مجدداً از بین تمامی گسل‌ها کمترین فاصله را تا ساختمان مورد مطالعه دارند. البته در انتها باید به این نکته نیز اشاره نمود که فواصل ذکر شده مربوط به محل پروژه در نظر گرفته شده (میدان انقلاب)، می‌باشد. به عبارت دیگر اگر موقعیت پروژه تغییر نماید و به طور مثال به شرق، غرب، جنوب و یا هر سمتی دیگری منتقل گردد، فواصل مورد اشاره تغییر کرده و در نتیجه می‌توان انتظار داشت که سهم مشارکت گسل‌ها نیز تا حدودی دستخوش تغییر گردد.

strong ground motions of Tohoku earthquake, Nuclear Engineering and Technology, 46(5) (2014).

- [8] M. Kumar, A.S. Whittaker, R.P. Kennedy, J.J. Johnson, A. Kammerer, Seismic probabilistic risk assessment for seismically isolated safety-related nuclear facilities, Nuclear Engineering and Design, 313 (2017).
- [9] C.C. Yu, C. Bolisetti, J.L. Coleman, B. Kosbab, A.S. Whittaker, Using seismic isolation to reduce risk and capital cost of safety-related nuclear structures, Nuclear Engineering and Design, 326, (2018).
- [10] M. Cutfield, K. Ryan, Q. Ma, Comparative life cycle analysis of conventional and base-isolated buildings, Earthquake Spectra, 32(1) (2016).
- [11] K. Goda, C.S. Lee, H.P. Hong, Lifecycle cost-benefit analysis of isolated buildings. Structural Safety, 32(1) (2010).
- [12] H. Wang, D. Weng, Life-Cycle Cost Assessment of Seismically Base-Isolated Large Tanks in LNG Plants, in: Pressure Vessels and Piping Conference (Vol. 55744, p. V008T08A005), American Society of Mechanical Engineers, USA.
- [13] M. Mousazadeh, F. Pourreza, M.C. Basim, M.R. Chenaghloou, An efficient approach for LCC-based optimum design of lead-rubber base isolation system via FFD and analysis of variance (ANOVA), Bulletin of Earthquake Engineering, 18(4) (2020).
- [14] A. Khansefid, A. Maghsoudi-Barmi, A. Bakhshi, Seismic performance assessment of optimally designed base isolation system under mainshock-aftershock sequences, In 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran (2019).
- [15] C.H. Zhai, Z. Zheng, S. Li, X. Pan, Damage accumulation of a base-isolated RCC building under mainshock-aftershock seismic sequences, KSCE Journal of Civil Engineering, 21(1) (2017).
- [16] H.P. Lee, M.S. Cho, S. Kim, J.Y. Park, K.S. Jang, Experimental study on the compressive stress dependency of full scale low hardness lead rubber bearing, Structural Engineering and Mechanics, 50(1) (2014).

در طول عمرش حدود ۳۵ درصد کاهش می‌دهد که بخش عمده آن، به دلیل توانایی این سیستم در برقرار نگه داشتن خدمت‌رسانی ساختمان به واسطه کاهش همزمان پاسخ گزیر و شتاب ساختمان و در نتیجه خرابی‌های آن است. همچنین مشخص شد که جرح و فوت افراد ناشی از زلزله، سهم بسیار ناچیزی در ریسک برآورد شده دارد. علاوه بر این منحنی‌های خسارت به دست آمده مبین عملکرد مطلوب‌تر سیستم جداساز لاستیکی هسته-سربی در زلزله‌های شدیدتر در قیاس با زلزله‌های خفیف می‌باشد. در نهایت از میان گسل‌های موجود در محدوده شهر تهران به ترتیب گسل‌های شمال تهران، کهریزک، رباط کریم و مشا بیشترین تاثیر را در ایجاد ریسک لرزه‌ای برای ساختمان‌های مورد مطالعه داشتند.

منابع

- [1] A. Maghsoudi-Barmi, A. Khansefid, Technical and economic evaluation of new damping and isolation seismic systems in urban projects, in: 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, Iran (2019) (in Persian).
- [2] G.C. Marano, R. Greco, Efficiency of base isolation systems in structural seismic protection and energetic assessment, Earthquake engineering & structural dynamics, 32(10) (2003).
- [3] I.V. Kalpakidis, M.C. Constantinou, A.S. Whittaker, Modelling strength degradation in lead-rubber bearings under earthquake shaking, Earthquake engineering & structural dynamics, 39(13) (2010).
- [4] S. Chimamphant, K. Kasai, Comparative response and performance of base-isolated and fixed-base structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 45(1) (2016).
- [5] A. Kanyilmaz, C.A. Castiglioni, Reducing the seismic vulnerability of existing elevated silos by means of base isolation devices, Engineering Structures, 143 (2017).
- [6] T.Y. Yang, H. Zhang, Seismic Safety Assessment of Base-Isolated Buildings Using Lead-Rubber Bearings, Earthquake Spectra, 35(3) (2019).
- [7] A. Ali, N.A. Hayah, D. Kim, S.G. Cho, Probabilistic seismic assessment of base-isolated NPPs subjected to

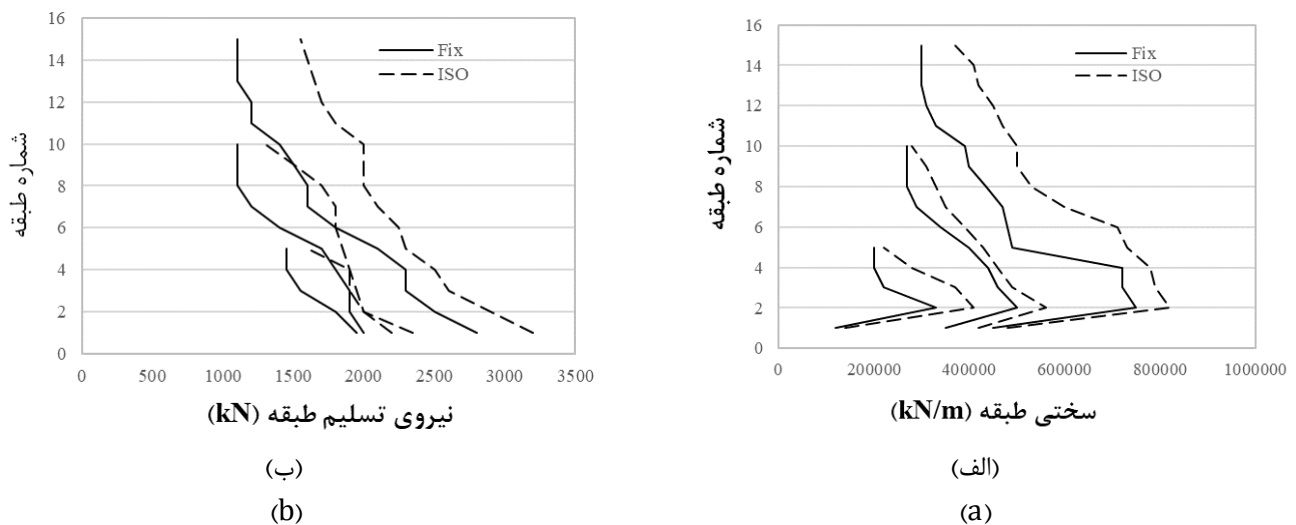
- random synthetic stochastic earthquake scenarios, *Journal of Earthquake Engineering*, (2019).
- [29] L. Danciu, K. Sesetyan, M. Demircioglu, M., Erdik, D. Giardini, OpenQuake input files of the seismogenic source model of the 2014 earthquake model of the Middle East (EMME-Project), (2016), doi:10.12686/a3.
- [30] T. Anagnos, A.S. Kiremidjian, A review of earthquake occurrence models for seismic hazard analysis, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(1) (1988).
- [31] T. Utsu, Y. Ogata, The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *Journal of Physics of the Earth*, 43(1) (1995).
- [32] A. Khansefid, A. Bakhshi, Statistical evaluation and probabilistic modeling of aftershock sequences of Iranian plateau, *Journal of Seismology*, 22(5) (2018).
- [33] A. Khansefid, A., Bakhshi, A. Ansari, Empirical predictive model for generating synthetic non-stationary stochastic accelerogram of the Iranian plateau: including far-and near-field effects as well as mainshock and aftershock categorization, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7) (2019).
- [34] S. Rezaeian, A. Der Kiureghian, Simulation of orthogonal horizontal ground motion components for specified earthquake and site characteristics, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(2) (2012).
- [35] M. Dabaghi, A. Der Kiureghian, Simulation of orthogonal horizontal components of near-fault ground motion for specified earthquake source and site characteristics, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(6) (2018).
- [36] A. Khansefid, Pulse-like ground motions: Statistical characteristics, and GMPE development for the Iranian Plateau, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 134 (2020).
- [37] Federal Emergency Management Agency (FEMA), HAZUS-MH 2.1 Earthquake Model Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, (2013).
- [38] Federal Emergency Management Agency, Seismic [17] I. Iervolino, M. Giorgio, E. Chioccarelli, Closed-form aftershock reliability of damage-cumulating elastic-perfectly-plastic systems, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 43(4) (2014).
- [18] I. Iervolino, M. Giorgio, E. Chioccarelli, Markovian modeling of seismic damage accumulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(3) (2016).
- [19] I. Iervolino, E. Chioccarelli, A. Suzuki, Seismic damage accumulation in multiple mainshock–aftershock sequences, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(10) (2020).
- [20] A. Khansefid, Lifetime risk-based seismic performance assessment of buildings equipped with supplemental damping and base isolation systems under probable mainshock-aftershock scenarios, *Structures*, 34 (2021).
- [21] A. Khansefid, Probabilistic Optimization of Structures Equipped with Active Vibration Control Systems Under Probable Mainshock-Aftershock Sequences of the Iranian Plateau, PhD dissertation, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2018) (In Persian).
- [22] Engineering optimization research group, Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Iran, Tehran, Iran, Iranian Planning and Budget Organization, <https://iranhazard.mporg.ir/> (2020).
- [23] Structural Engineering Institute, ASCE_07-16: Minimum design loads for buildings and other structures, Virginia, USA: ASCE (2016).
- [24] C. Christopoulos, A. Filiatrault, V.V. Bertero, Principles of passive supplemental damping and seismic isolation, : Iuss press, Pavia, Italy, (2006).
- [25] E. Zitzler, M. Laumanns, S. Bleuler, A tutorial on evolutionary multiobjective optimization, *Metaheuristics for multiobjective optimisation*, (2004).
- [26] M. Ismail, F. Ikhrouane, J. Rodellar, The hysteresis Bouc-Wen model, a survey, *Archives of computational methods in engineering*, 16(2) (2009).
- [27] A.K. Chopra, Dynamics of structures, Pearson Education, India, (2011).
- [28] A. Khansefid, A. Bakhshi, New model for simulating

- 1395, Iranian Statistical Center (2017) (In Pearsian).
- [42] Joint Committee of Structural Safety, Probabilistic model code: part III - resistance models, (2001), Available at: <https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/>
- [43] C. Robert, Casella G. Monte Carlo Statistical Methods. 2nd ed: Springer, (2004).
- [44] G. Hahn, Sample Sizes for Monte Carlo Simulation, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-2 (1972).
- [45] K. Porter, A beginner's guide to fragility, vulnerability, and risk, Encyclopedia of earthquake engineering, (2015).

- Performance Assessment of Buildings Volume 1 – Methodology Second Edition, FEMA P-58-1, Applied Technology Council, Washington D.C., USA, (2018).
- [39] A. Khansefid, A. Bakhshi, Advanced two-step integrated optimization of actively controlled nonlinear structure under mainshock–aftershock sequences, Journal of Vibration and Control, 25(4) (2019).
- [40] A. Khansefid, An investigation of the structural nonlinearity effects on the building seismic risk assessment under mainshock–aftershock sequences in Tehran metro city, Advances in Structural Engineering, 24(16) (2019).
- [41] Iranian Statistical Center, Iranian Statistical Yearbook

پیوست ۱

در این پیوست مشخصات مکانیکی طبقات هر مدل ساختمانی شامل سختی و نیروی تسلیم آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. پ. مشخصات مکانیکی طبقات ساختمان، الف) سختی طبقات، ب) نیروی تسلیم طبقات.

Fig. A.1. Mechanical properties of building stories, a) Story stiffness, b) Story yielding force.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Khansefid, *Seismic Lifetime Vulnerability Curve Development of Isolated Buildings with LRB Under Probable Mainshock-Aftershock Scenarios in Tehran*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(7) (2022) 2589-2612.

DOI: 10.22060/ceej.2021.20672.7495



