

Seismic Performance of Buckling-Restrained Braces in Irregular Reinforced Concrete Buildings under Successive Earthquakes

Mohammad Fardkakaei¹, Elham Rajabi^{1,2} * 

¹ Department of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

² Qualitative and Quantitative Analysis of Fluids and Environmental Research Group, Tafresh University, Tafresh, Iran.

Review History:

Received: Dec. 31, 2024

Revised: Dec. 19, 2025

Accepted: Jan. 17, 2026

Available Online: Jan. 30, 2026

Keywords:

Buckling Restrained Brace

Reinforced Concrete Structures

Seismic Sequence Phenomenon

Irregularity

Nonlinear Dynamic Analysis

ABSTRACT: This study evaluates the seismic performance of irregular reinforced concrete (RC) structures equipped with buckling-restrained braces (BRBs) under successive earthquakes involved foreshock-main shock and main shock-aftershock. Seismic sequence phenomenon refers to the occurrence of multiple shocks in a short time interval, whose cumulative effects can significantly change the structural response compared to a single shock. In this regards, three RC frames with 3, 6, and 9 stories were designed based on the Iranian Code 2800. Nonlinear dynamic analyses were performed in OpenSees after verification of the studied frames based on reference model. Comparison of the response of frames under single and successive shocks indicate that BRBs improve lateral force distribution, increased ductility in the upper stories (up to 32%), and reduced beam and column cross-section dimensions. Also, residual displacements and inelastic strains have been increased about 47% in frames with fewer BRBs. Moreover, increased damage has been observed up to two times. Generally, the results indicate that buckling braces are a reliable option for improving the seismic performance of irregular reinforced concrete structures under successive earthquakes due to providing high energy absorption capacity and stable hysteresis behavior.

1- Introduction

Successive earthquakes with short time intervals can significantly affect the seismic performance of structures. In these scenarios include foreshock-mainshock or mainshock-aftershock, first shocks usually have medium to high intensity and next shocks occur with approximately similar intensity. This succession can increase material fatigue, decrease effective strength and disrupt the safe evicton. Furthermore, structural irregularity (in plan or height) can lead to diminish the seismic performance of buildings because of torsion and stress concentration in earthquake. Recently, buckling restrained braces (BRBs) have been known as one of the most efficient methodology in energy dissipation systems in new and existing structures. These braces can absorb considerable energy and improve the seismic response of irregular structures through symmetric behavior in pressure and tension [1-4]. This paper tries to evaluate the seismic performance of buckling-restrained braces in irregular reinforced concrete buildings under successive earthquakes. In this regards, key parameters such as ductility, residual drift and damage index have been investigated for regular/irregular RC frames under single and consecutive shocks.

2- Research Methodology

Despite the high potential of successive shocks in increasing the structural/nonstructural damages, single earthquake has been considered as “Design earthquake” by seismic design cods. This theory becomes more critical when buildings have irregularity in plan or height. Therefore, three irregular RC buildings with BRB and 3, 6 and 9 story have been designed based on Standard 2800 with medium importance, official and commercial landuse in very high seismicity zone. Figure (1) shows plan and the schematic view of 6-story model. Section properties of the studied models are reported in Table (1). Period of models are 0.336, 0.56 and 0.843 (s). In the following, one frame has been implemented in Opensees. For this purpose, *Force-Based Beam-Column* element have been used for modeling of beams and columns. Also, BRBs are modeled using *Truss Element*. Nonlinear behavior of concrete has been considered by *Concrete01* material (with zero tension strength). Moreover, *Steel02* based on *Menegotto-Pinto* and *Isotropic Strain Hardening* formulations has been used for yielding behavior of steel in braces and bars. It should be noted that modeling procedure of the studied frames in Opensees is verified based on [5-6] with comparing period and pushover curve (Figure 2). In order to examine the seismic response of the studied models,

*Corresponding author's email: rajabi@tafreshu.ac.ir

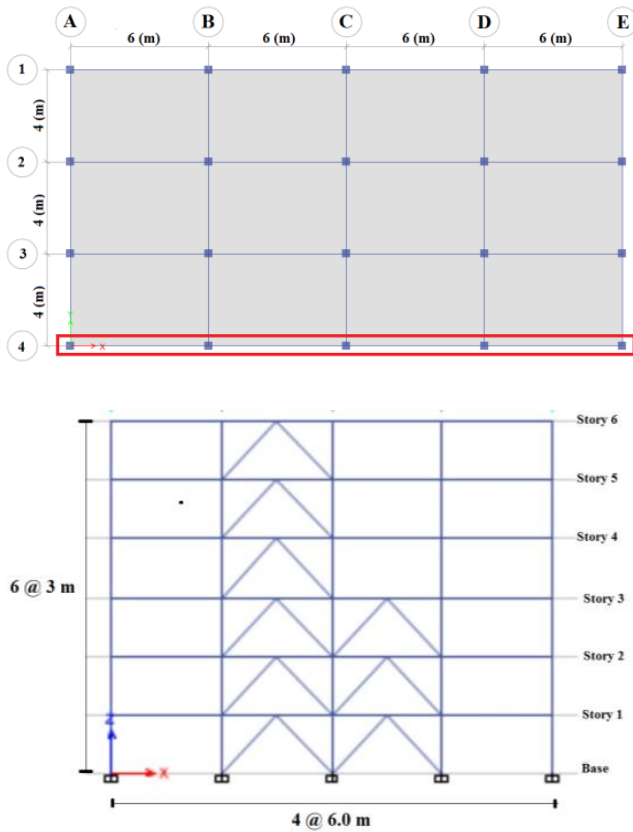


Fig. 1. Plan and the schematic view of 6-story model.

Table 1. Section properties of the studied models.

Model	Story No.	Column	Beam	BRB
3-story	3	C35x35-8T18	B35x45-2T16-3T16	PL12x100
	1-2			PL 20x100
	6	C40x40-12T16	B35x50-3T16-3T18	PL10x100
6-story	5			PL20x75
	4			PL20x150
9-story	3	C50x50-16T18	B40x50-3T18-4T16	PL20x150
	1-2			PL20x100
	9	C60x60-16T18	B40x50-3T16-4T14	PL10x100
9-story	8			PL20x125
	7			PL20x175
9-story	6	C40x40-12T18	B40x45-3T16-3T16	PL20x175
	4-5			PL20x200
	1-3			PL20x175

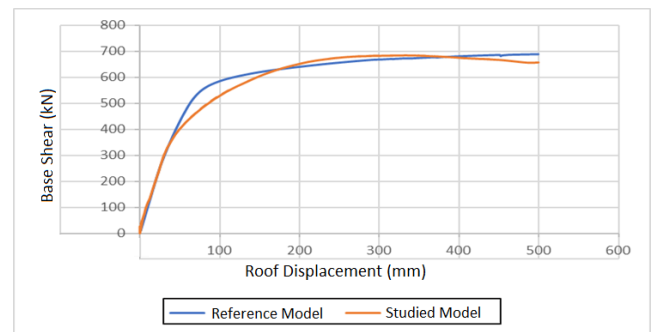


Fig. 2. Pushover curve of the reference and studied model.

critical successive shocks are selected based on [7].

3- Results and Discussion

After gravity loads, nonlinear dynamic analysis has been performed for all RC frames. Then, key parameters such as ductility, residual drifts, drift ratio and damage index have been evaluated caused by single and successive shocks. Seismic sequence phenomenon increases drift ratio for all frames based on Figure (3) so that average of the increased response is 34, 25 and 24% for 3, 6 and 9 story models. Moreover, successive shocks lead to more residual drifts than single scenarios according to Figure (4). Maximum increased residual drifts because of successive shocks are 30, 22 and 28%.

For ductility, effect of the successive shocks is ascendant for all frames and average of the increased responses is 24, 20 and 51%. Park-Ang damage index [8] is also calculated for the studied models and reported in Figure (5). Maximum increase is observed for 6-story frame approximately more than double value.

4- Conclusions

This paper reveals that single shocks cannot be suitable representative of successive scenarios especially for irregular structures. However, decreasing the damage index in taller

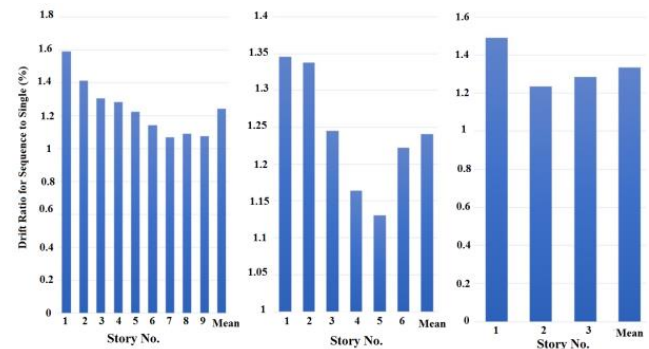


Fig. 3. Ratio of drift (successive/single) for 3-story (Right), 6-story (Middle) and 9-story (Left).

models is demonstrative of improvement of distribution of lateral forces and more effective participation of braces in energy absorption. Hence, it can be said that optimum design of BRBs has notable effects on residual drifts, increased ductility, and damage concentration prevention in special stories in irregular structures. Therefore, BRBs are proposed to control the instability and improve the progressive damages pattern.

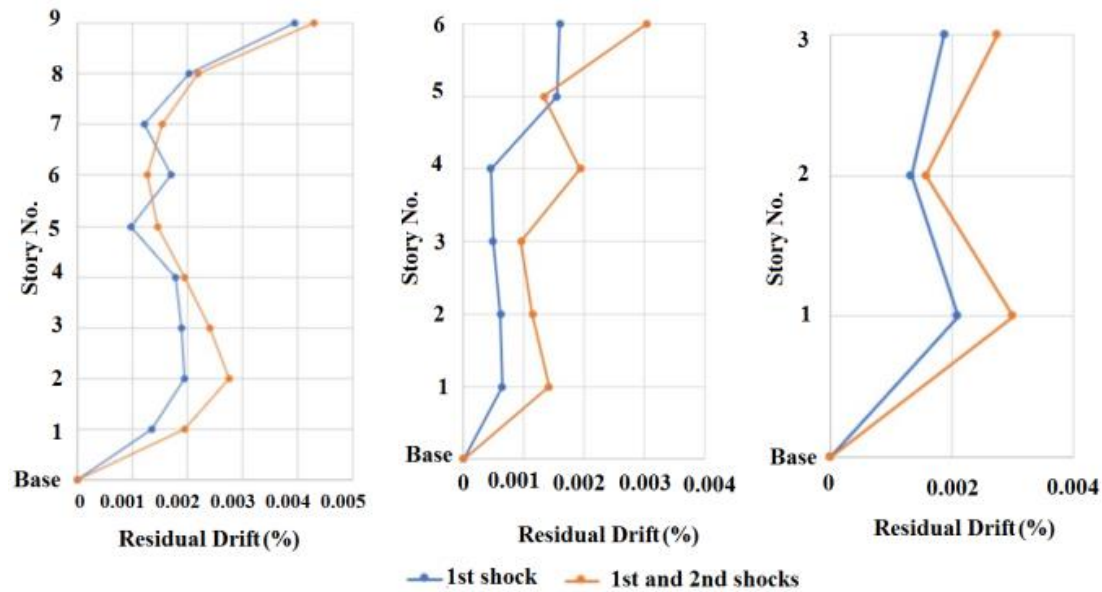


Fig. 4. Residual drift ratio for 3-story (Right), 6-story (Middle) and 9-story (Left).

References

- [1] Niyonyungu, F., and Noroozinejad Farsangi, E., 2020. "Application of buckling restrained braces to upgrade vertical stiffness of existing RC frames". Civil and Environmental Engineering Reports, pp. 68-93. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0034>.
- [2] Orellana, G. M., Ramos, B. C., Velásquez, F., Casas Rius, J. R., and Delgadillo, R. M., 2024. "Spectral Dynamic Analysis of Buckling Restrained Brace (BRB) Configurations in an Irregular Building". In Proceedings of the 9th International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering (ICCSTE 2024), pp. 1-6. University of Toronto Press.
- [3] Vaziri, S. J., Vahdani, R., and Souri, O., 2024. "Seismic evaluation of BRBF steel structures with L-shaped irregular plan considering soil-structure interaction". Bulletin of Earthquake Engineering, 22: pp. 5347–5377. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01963-4>
- [4] Kong, S., Shi, F., Zhou, Y., Ma, Y., and Xie, L., 2022. "Influence of BRBs deformation capacity on the seismic performance of RC building frames". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 161:107442. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107442>.
- [5] Chen, H., and Bai, J., 2022. "Loading protocols for seismic performance evaluation of buckling-restrained braces in RC frames". Journal of Building Engineering, 45: 103522. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103522>
- [6] Bai, J., Chen, H., and Jin, S., 2021. "Investigation on the

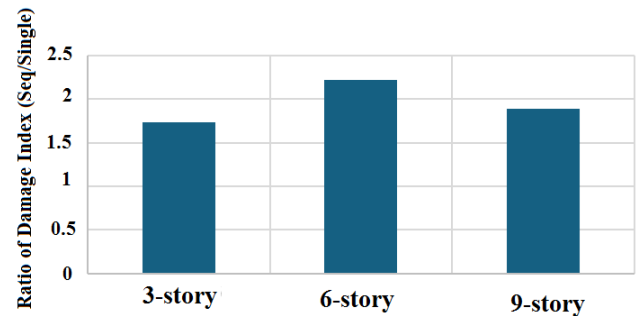


Fig. 5. Ratio of increased damage index .

interaction between BRBs and the RC frame in BRB-RCF systems". Engineering Structures, 243: 112685. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112685>.

- [7] Rajabi, E., and Ghodrati Amiri, G., 2020. "Generation of critical aftershocks using stochastic neural networks and wavelet packet transform". Journal of Vibration and Control, 26(5-6): pp. 331-351. <https://doi.org/10.1177/1077546319879536>.
- [8] Park, Y. J., Ang, A. H. S., and Wen, Y. K., 1985. "Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings". Journal of Structural Engineering, 111(4):pp.740-757. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(740\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(740)).



عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب در ساختمان‌های بتن‌آرمه نامنظم در معرض زلزله‌های متوالی

محمد فردکاکایی^۱، الهام رجیبی^{۲*} 

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

۲- گروه پژوهشی تحلیل کمی و کیفی سیالات و محیط زیست، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

مهاربند کمانش‌تاب

سازه‌های بتن‌آرمه

پدیده توالی لرزه‌ای

نامنظمی

تحلیل دینامیکی غیرخطی

خلاصه: در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه نامنظم مجهز به مهاربندهای کمانش‌تاب در برابر زلزله‌های متوالی مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده‌ی توالی لرزه‌ای به وقوع چند زلزله‌ی پی‌درپی شامل پیش‌لرزه-لرزه اصلی و یا لرزه اصلی-پس‌لرزه در بازه‌ی زمانی کوتاه اشاره دارد که اثر تجمعی آن‌ها می‌تواند پاسخ سازه را به‌طور چشمگیری نسبت به یک زلزله‌ی منفرد تغییر دهد. در این راستا، سه مدل سازه‌ی سه، شش و نه طبقه براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران طراحی و پس از صحت‌سنجی تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی در محیط OpenSees قرار گرفتند. مقایسه‌ی پاسخ قاب‌ها تحت تحریک‌های لرزه‌ای منفرد و متوالی نشان داد که استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب موجب بهبود توزیع نیروی جانبی، افزایش شکل‌پذیری در طبقات فوقانی (به‌طور متوسط حدود ۳۲٪) و کاهش ابعاد مقاطع تیر و ستون می‌شود. همچنین در قاب‌های دارای تعداد کمتر مهاربند، جابه‌جایی پسماند و کرنش‌های غیرالاستیک به‌طور متوسط حدود ۴۷٪ افزایش یافته و افزایش شاخص خسارت ۲ برابر مشاهده شده است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که مهاربندهای کمانش‌تاب با فراهم‌سازی ظرفیت بالای جذب انرژی و رفتار پایدار هیستریزس، گزینه‌ای قابل اعتماد برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های نامنظم بتن‌آرمه در برابر زلزله‌های متوالی هستند.

۱- مقدمه

وقوع زمین‌لرزه‌های متوالی در بازه‌های زمانی کوتاه می‌تواند اثرات تجمعی قابل‌توجهی بر عملکرد سازه‌ها بر جای گذارد. در چنین شرایطی، لرزه‌ی نخست معمولاً دارای شدت متوسط تا زیاد بوده و لرزه‌های بعدی با شدتی در همان حدود تکرار می‌شوند. این موضوع منجر به افزایش خستگی مصالح، کاهش مقاومت مؤثر و اختلال در فرایند تخلیه‌ی ایمن ساکنان می‌گردد. از سوی دیگر، نامنظمی در پلان یا ارتفاع سازه، به‌ویژه در ساختمان‌های بتن‌آرمه، موجب تمرکز تنش و ایجاد پیچش‌های ناخواسته در هنگام زلزله می‌شود که عملکرد لرزه‌ای سازه را تضعیف می‌کند. در سال‌های اخیر، استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب (BRB) به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های اتلاف انرژی در سازه‌های جدید و موجود مورد توجه قرار گرفته است. این مهاربندها با رفتار متقارن در فشار و کشش و توانایی بالای جذب انرژی، امکان بهبود چشمگیر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های نامنظم را فراهم می‌کنند. هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر وقوع زلزله‌های متوالی بر

رفتار قاب‌های بتن‌آرمه نامنظم مجهز به BRB و تحلیل تغییرات پارامترهای کلیدی مانند شکل‌پذیری، جابه‌جایی پسماند و شاخص خسارت است. با توجه به مطالب فوق و اهمیت نامنظمی در سازه‌های بتن‌آرمه تحت پدیده توالی لرزه‌ای، مطالعات زیادی پیرامون این موضوع و پاسخ سازه‌ها صورت گرفته است. برای نمونه، پس از بررسی عملکرد لرزه‌ای دو نوع ساختمان بتن‌آرمه با نامنظمی پلکانی و کشیده تحت آخرین رکوردهای شتابنگاشت یوگیاکتا، اندونزی در سال ۲۰۲۳، مشخص گردیده است که استفاده از BRB تغییر مکان طبقات فوقانی را بهبود می‌بخشد [۱]. در سال ۲۰۲۲، Ghamari و همکاران با تمرکز بر قاب‌های فولادی نشان دادند که اثرگذاری BRBها به عوامل مختلفی مانند ترکیب لرزه‌ای، ارتفاع سازه و نوع نامنظمی بستگی دارد [۲]. در سال ۲۰۲۰، استفاده از BRB را برای تقویت قاب‌های موجود بررسی و اعلام شده است که نیروهای داخلی ستون‌ها بسته به تعداد و محل مهاربندها تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابند [۳]. مطالعات اخیر نیز به تحلیل توزیع و آرایش BRBها پرداخته‌اند. به عنوان نمونه در سال ۲۰۲۴ طی مطالعه‌ای آشکار گردیده است که توزیع بهینه مهاربندها در طبقات منجر به کاهش حداقل

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rajabi@tafreshu.ac.ir



بر مترمربع، (۴) بار زنده طبقه بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، (۵) بار برف طبقه بام ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و (۶) بار اصلاح وزن لرزه‌ای طبقه بام ۳۴۴ کیلوگرم بر مترمربع. مشخصات مصالح مصرفی برای فولاد هسته مهاربند کمانش‌تاب فولاد S235، آرما‌تور در قاب‌های بتن مسلح S_{340} و S_{400} و همچنین بتن مصرفی از رده C_{25} می‌باشد که ویژگی‌های آن‌ها در جدول (۱) بیان شده است. پس از انجام تحلیل استاتیکی معادل و کنترل ضوابط آیین‌نامه‌های مذکور، مقاطع مورد استفاده طبق جدول (۲) استخراج شده است. به منظور پیاده‌سازی مدل‌های مورد مطالعه در اپنسیس، از المان‌های Force-Based Beam-Column جهت تیر و ستون و از Truss Element برای مهاربندهای BRB استفاده شد. رفتار غیرخطی مصالح بتن با مدل Concrete01 (با مقاومت کششی صفر) و رفتار فولاد تسلیم‌شونده مهاربند و میلگردهای بتن مسلح با المان Steel02 بر پایه‌ی فرمول‌بندی Menegotto-Pinto و Isotropic Strain Hardening تعریف شد. شرایط مرزی قاب‌ها گیردار و اتصالات مهاربندها مفصلی فرض شده است. همچنین جرم‌ها در المان‌های طبقات توزیع شده است.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل‌های مورد مطالعه

۲-۲-۱- انتخاب مدل مرجع

به منظور کنترل کفایت روش اتخاذ شده جهت پیاده‌سازی مدل‌های مورد مطالعه، اقدام به انتخاب مدل مرجع گردید. پس از پیاده‌سازی مدل، به مقایسه زمان تناوب و همچنین منحنی پوش‌آور مدل پیاده‌سازی شده و مدل مرجع پرداخته شد. در این راستا از مطالعه Bai و Chen در سال ۲۰۲۲ [۱۷] و مطالعه Bai و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۸] استفاده گردید. در مطالعات فوق پیاده‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه مجهز به مهاربندهای کمانش‌تاب در نرم‌افزار Opensees انجام گرفته است.

۲-۲-۲- مقایسه زمان تناوب مدل مرجع و مدل پیاده‌سازی شده

در مطالعه Bai و Chen در سال ۲۰۲۲ [۱۷]، سه ساختمان با تعداد طبقات ۵، ۷ و ۱۱ با نسبت‌های برش طبقه ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۶ مدل‌سازی شده است که سازه ۵ طبقه با نسبت برش ۰/۳ مطابق شکل (۲) به‌عنوان مدل مرجع به‌منظور مقایسه زمان تناوب جهت صحت‌سنجی انتخاب‌شده است. مطابق شکل (۳) زمان تناوب برای سازه ۵ طبقه با نسبت برش ۰/۳ تقریباً بین ۰/۷۷۰ الی ۰/۷۹۰ ثانیه قرار دارد. شکل (۴) زمان تناوب مدل مرجع پیاده‌سازی با روش مدل‌سازی در این مطالعه را معرفی می‌نماید.

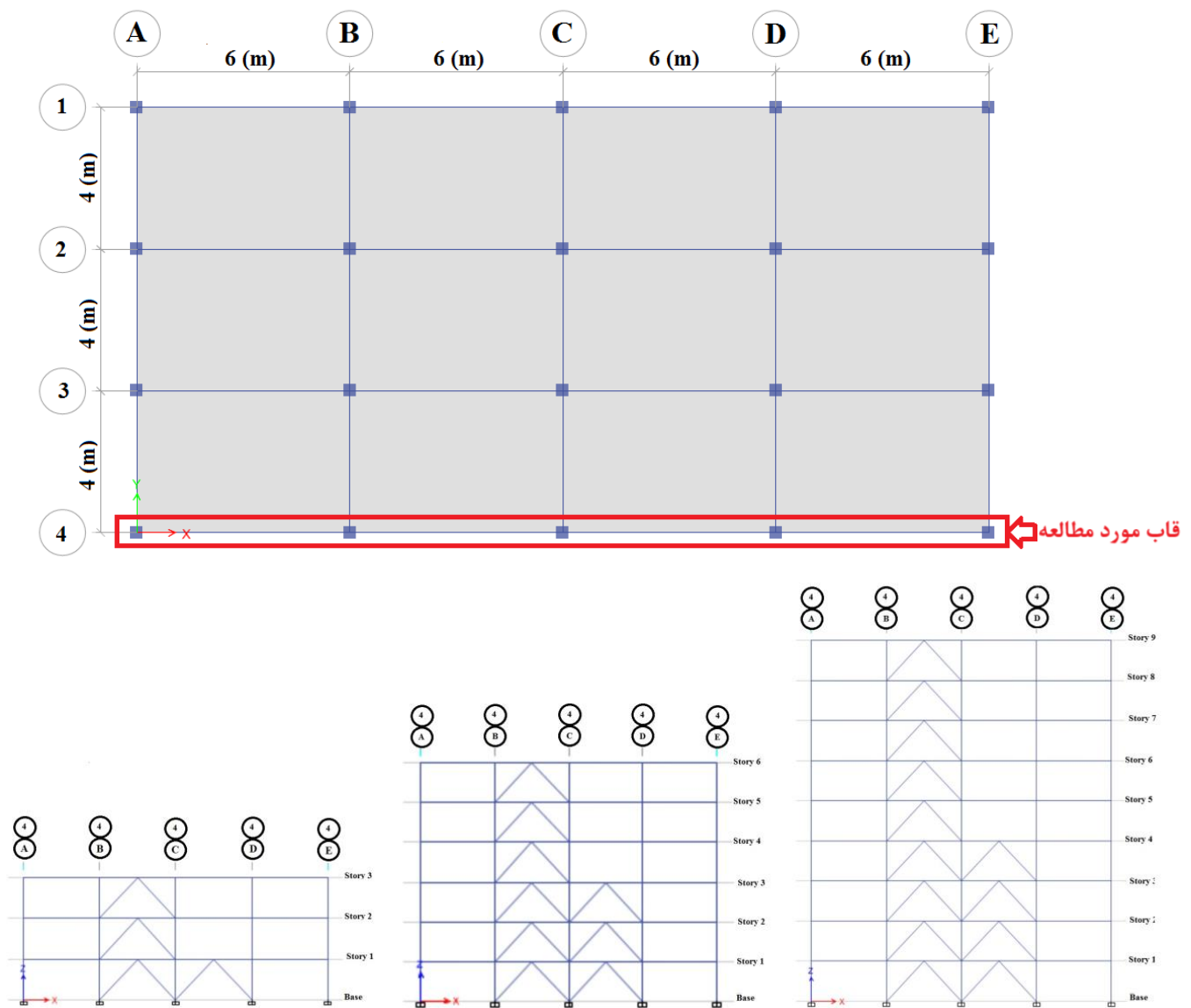
۲۵ درصدی جابه‌جایی‌های نسبی غیرالاستیک می‌شود [۴]. تأثیر اندرکنش خاک و سازه (SSI) در قاب‌های فولادی مجهز به BRB بررسی شده است [۵]. همچنین، ارزیابی بر جابه‌جایی پسماند، شاخص آسیب و انرژی مصرفی مهاربندها [۶-۷] در معرض زلزله‌های متوالی، اهمیت بررسی قاب‌های مجهز به BRB با لحاظ نمودن اثر پدیده توالی لرزه‌ای را برجسته می‌کند. تحقیقات مرتبط با اتصال مهاربندها نشان می‌دهد که روش‌های مستقیم و غیرمستقیم انتقال نیرو، ظرفیت و قابلیت استفاده از BRB‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۸-۱۲]. علاوه بر این، طراحی بهینه سیستم‌های اتلاف انرژی با توزیع نامنظم BRB‌ها می‌تواند ضمن ایجاد نامنظمی، عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها و منحنی‌های کرنش مهاربندها را بهبود دهد [۱۳-۱۶]. با توجه به شواهد موجود در خصوص خسارت‌زایی چشمگیر لرزه‌های متوالی که هنوز از دیدگاه آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای معتبر پوشیده مانده است و اهمیت پدیده نامنظمی که به شدت بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها تأثیرگذار می‌باشد، مطالعه حاضر به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه نامنظم مجهز به BRB تحت زلزله‌های متوالی می‌پردازد. تمرکز این مطالعه بر جابه‌جایی بین‌طبقه‌ای، جابه‌جایی باقی‌مانده و رفتار کلی سازه است.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کمانش‌تاب در ساختمان‌های بتن‌آرمه نامنظم در معرض زلزله‌های متوالی، سه سازه بتنی براساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) در نرم‌افزار ایتبس طراحی و با ضوابط مبحث نهم (ویرایش ۱۳۹۹) و دهم مقررات ملی ساختمان (ویرایش ۱۴۰۱) کنترل شده است. در ادامه یک قاب حاوی آرایش نامنظمی از مهاربندهای کمانش‌تاب انتخاب و در نرم‌افزار Opensees پیاده‌سازی شد. روند فوق در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

۲-۱- طراحی و پیاده‌سازی مدل‌های مورد مطالعه

در مطالعه پیش‌رو ۳ سازه بتن مسلح نامنظم مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با تعداد طبقات رایج در کشور ایران با پلان و نمای نمایش داده شده در شکل (۱) طراحی شده‌اند. در این راستا نوع کاربری تجاری و اداری، محل ساختگاه شهر تهران با سطح لرزه‌خیزی بسیار زیاد انتخاب شده است. زمان تناوب مدل‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه به ترتیب ۰/۳۳۶، ۰/۵۶ و ۰/۸۴۳ ثانیه می‌باشد. بارهای وارده به سازه شامل موارد زیر است: (۱) بار مرده تمام طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، (۲) بار زنده طبقات به جز طبقه بام ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، (۳) بار تیغه‌بندی طبقات به جز طبقه بام ۱۰۰ کیلوگرم



شکل ۱. پلان و نمای سازه‌های مورد مطالعه.

Fig. 1. Plan and schematic view of the studied models.

مدل‌سازی شده است. از میان حالات موجود، سازه ۵ طبقه با نسبت برش ۰/۶ به عنوان مدل مرجع جهت مقایسه منحنی پوش‌آور انتخاب شده است. تفاوت عمده قرارگیری سیستم باربر جانبی در قاب‌های داخلی یا پیرامونی سازه در سهم گرفتن از بارهای ثقیل، جانبی و جرم‌های لرزه‌ای می‌باشد. در شکل (۶) نمودار مشکی پیوسته نمایانگر مدل مرجع قاب بتن مسلح مجهز به مهاربند کماتش‌تاب می‌باشد. مقایسه منحنی پوش‌آور مدل مرجع و مدل پیاده‌سازی شده با تطابق قابل‌قبولی در شکل (۷) گزارش شده است.

به این ترتیب زمان تناوب مدل مرجع برابر با ۰/۷۸۰ ثانیه و زمان تناوب مدل پیاده‌سازی شده برابر ۰/۷۹۳ ثانیه و اختلاف زمان تناوب کمتر از ۲٪ می‌باشد.

۲-۲-۳- مقایسه منحنی پوش‌آور مدل مرجع پیاده‌سازی شده

در مطالعه Bai و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۸]، سه ساختمان با تعداد طبقات ۵، ۷ و ۱۱ مطابق شکل (۵) با نسبت‌های برش طبقه مختلف

جدول ۱. ویژگی‌های مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی

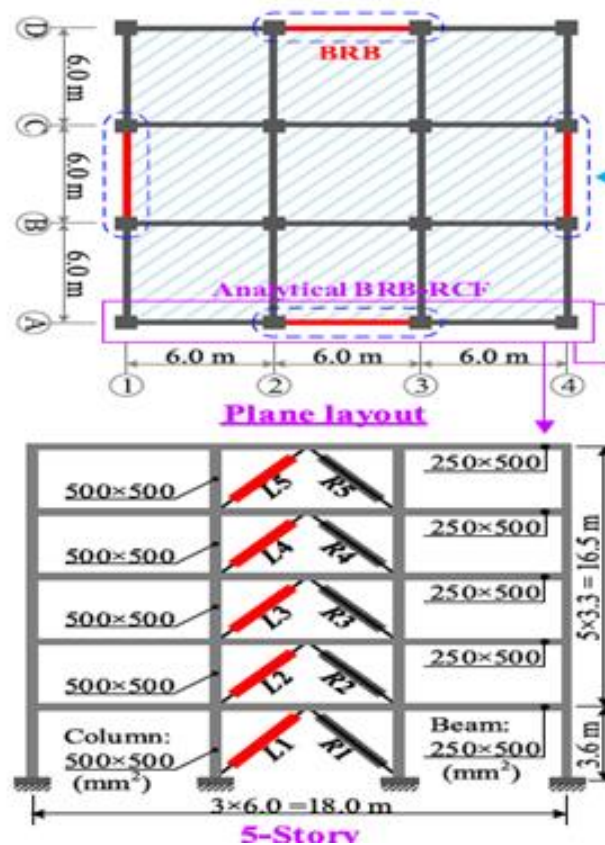
Table 1. Material properties in modeling.

واحد	مقدار	ویژگی	مصالح
MPa	۲۳۵۰۰	مدول الاستیسیته	بتن
	۲۵	مقاومت فشاری	
	۲۰۰۰۰۰	مدول الاستیسیته	آرماتور رده S ₃₄₀
	۳۴۰	تنش تسلیم	
	۵۰۰	تنش نهایی	آرماتور رده S ₄₀₀
	۲۰۰۰۰۰	مدول الاستیسیته	
	۴۰۰	تنش تسلیم	
	۶۰۰	تنش نهایی	
	۲۳۵	تنش تسلیم	فولاد S ₂₃₅
	۵۱۰-۳۶۰	تنش نهایی	
	۲۱۰۰۰۰	مدول الاستیسیته	

جدول ۲. مشخصات مقطع عرضی مدل‌های مورد مطالعه.

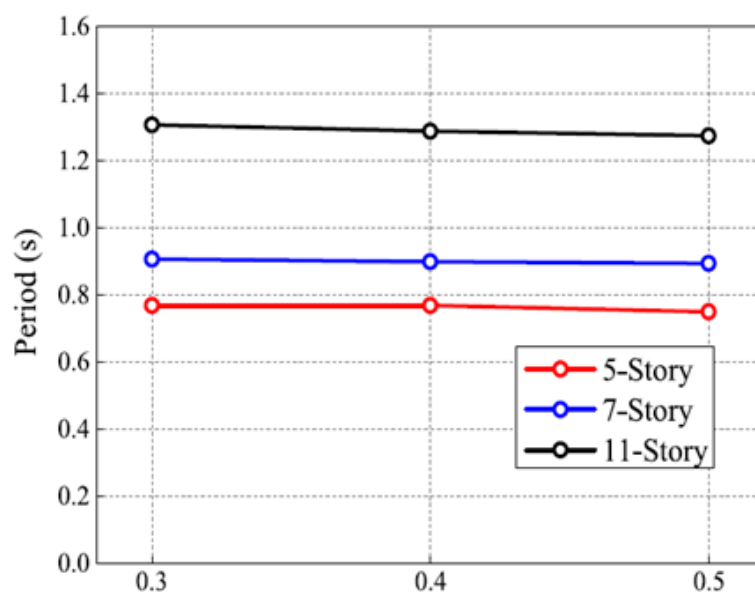
Table 2. Section properties of the studied models.

مدل	شماره طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر	مقطع مهاربند کمانش تاب
سه طبقه	طبقه سوم	C35x35-8T18	B35x45-2T16-3T16	BRB-plate12x100
	طبقه اول تا دوم			BRB-plate20x100
شش طبقه	طبقه ششم	C40x40-12T16	B35x50-3T16-3T18	BRB-plate10x100
	طبقه پنجم			BRB-plate20x75
	طبقه چهارم			BRB-plate20x150
	طبقه سوم	C50x50-16T18	B40x50-3T18-4T16	BRB-plate20x150
	طبقه اول تا دوم			BRB-plate20x100
	طبقه نهم			BRB-plate10x100
نه طبقه	طبقه هشتم	C60x60-16T18	B40x50-3T16-4T14	BRB-plate20x125
	طبقه هفتم			BRB-plate20x175
	طبقه ششم			BRB-plate20x175
	طبقه چهارم تا پنجم	C40x40-12T18	B40x45-3T16-3T16	BRB-plate20x200
	طبقه اول تا سوم			BRB-plate20x175



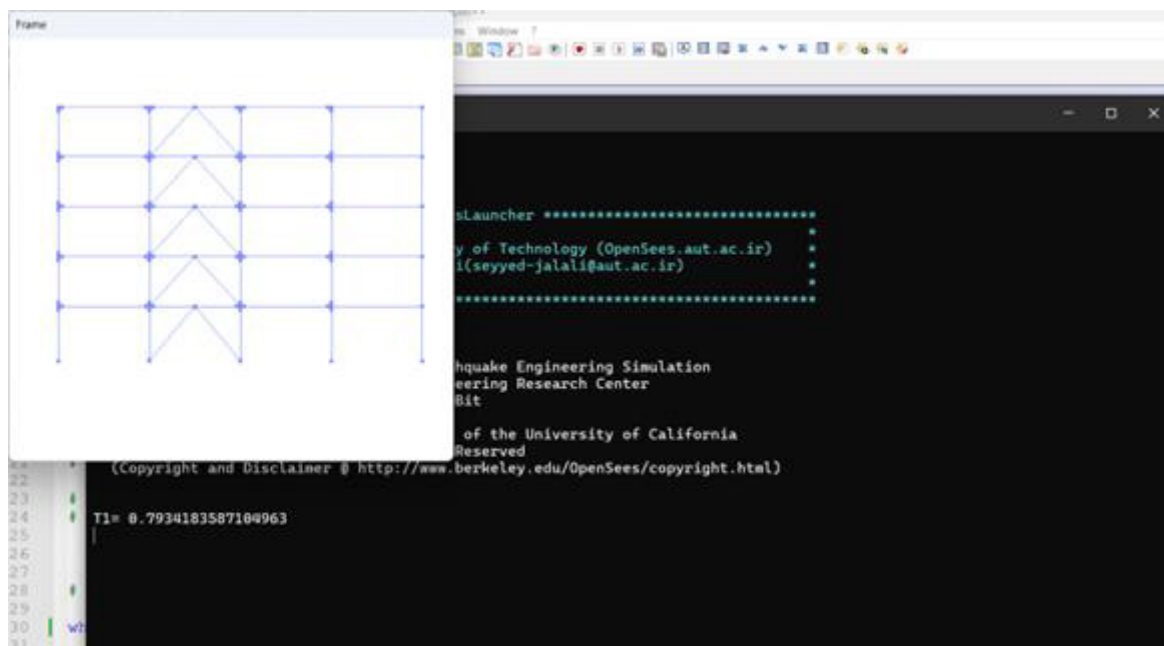
شکل ۲. مدل مورد استفاده در مطالعه Bai و Chen در سال ۲۰۲۲ [۱۷].

Fig. 2. The used model in Chen and Bai's study [17].



شکل ۳. زمان تناوب مدل مرجع [۱۷].

Fig. 3. Period of the reference model [17]



شکل ۴. زمان تناوب مدل مرجع پیاده‌سازی در Opensees با استفاده از روش مورد استفاده در این مطالعه

Fig. 4. Period of the implemented reference model in Opensees .

ناشی از لرزه‌های منفرد و متوالی.

۴-۱- نسبت تغییرمکان جانبی طبقه

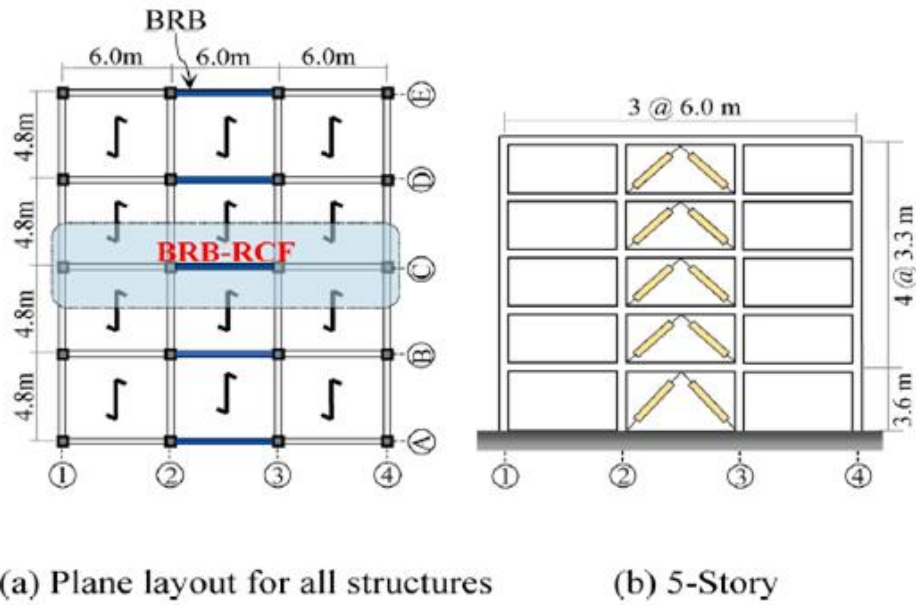
در شکل (۸) نسبت تغییرمکان جانبی طبقات در کلیه مدل‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌های منفرد و متوالی نمایش داده شده است. در خلال بررسی‌ها، بیشترین تغییرمکان جانبی طبقه نسبت به ارتفاع برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه تحت زلزله Livermore سال ۱۹۸۰ مشاهده شد. همچنین میزان افزایش مقدار میانگین پاسخ در حالت متوالی به منفرد برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه به ترتیب ۲۸، ۱۳ و ۷٪ درصد بوده است. در قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه بیشینه تغییرمکان جانبی در طبقات تحت زلزله Livermore سال ۱۹۸۰ مشاهده شد. همچنین میزان افزایش مقدار میانه نتایج مورد نظر با لحاظ نمودن حالت متوالی به منفرد برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه به ترتیب ۱۲، ۸٪ و ۵٪ درصد بوده است. در شکل (۹) میانگین بیشینه تغییرمکان نسبی در تمام طبقات قاب‌ها به همراه میانگین نتایج نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد زلزله‌های متوالی در تمامی حالت بر رفتار سازه مؤثر بوده‌اند. همچنین در حالت کلی با در نظر گرفتن پدیده توالی لرزه‌ای برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه مطابق شکل (۱۰)، به ترتیب میانگین افزایش نسبت تغییرمکان نسبی طبقات ۲۵، ۳۴ و ۲۴ درصد بوده است.

۳- سناریوهای لرزه‌ای منفرد و متوالی بحرانی

در این مطالعه تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌های مورد بررسی در نرم افزار اپنسیس انجام شده است. به این منظور از زلزله‌های بحرانی پیشنهاد شده توسط رجبی و قدرتی امیری در سال ۲۰۲۰ [۱۹] استفاده شده است. این رکوردها بر اساس پارامتر بیشینه شتاب مؤثر (EPA) که توسط امیری و دانا در سال ۲۰۰۵ [۲۰] پیشنهاد شده است، از پایگاه PEER استخراج و در جدول (۳) گزارش شده‌اند. در ادامه، مقیاس لرزه‌های اول براساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و لرزه‌های دوم مطابق با روش عبدالله زاده و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۱] انجام شده است.

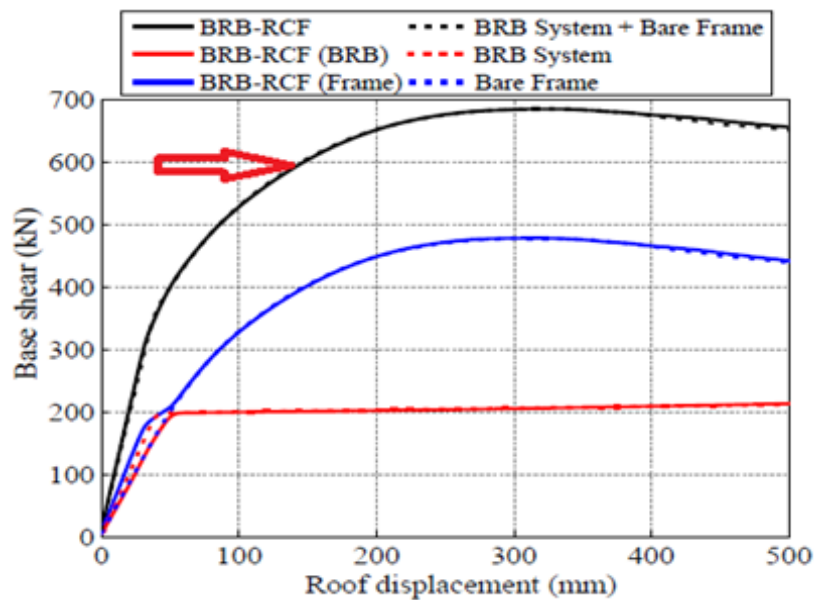
۴- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی

در مطالعه پیش‌رو به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کماتش‌تاب در ساختمان‌های بتن‌آرمه نامنظم در معرض زلزله‌های متوالی، تحلیل دینامیکی غیرخطی برای کلیه مدل‌های مورد بررسی انجام شده است. لازم به ذکر است این مدل‌ها پیش از رویارویی با سناریوهای لرزه‌ای منفرد و متوالی، تحت بارگذاری ثقلی قرار گرفته‌اند. در ادامه پارامترهایی به شرح زیر استخراج و با یکدیگر مقایسه شده‌اند: نسبت تغییرمکان جانبی طبقه، نسبت جابه‌جایی پسماند، شکل‌پذیری، شاخص خسارت و حلقه‌های هیسترزیس



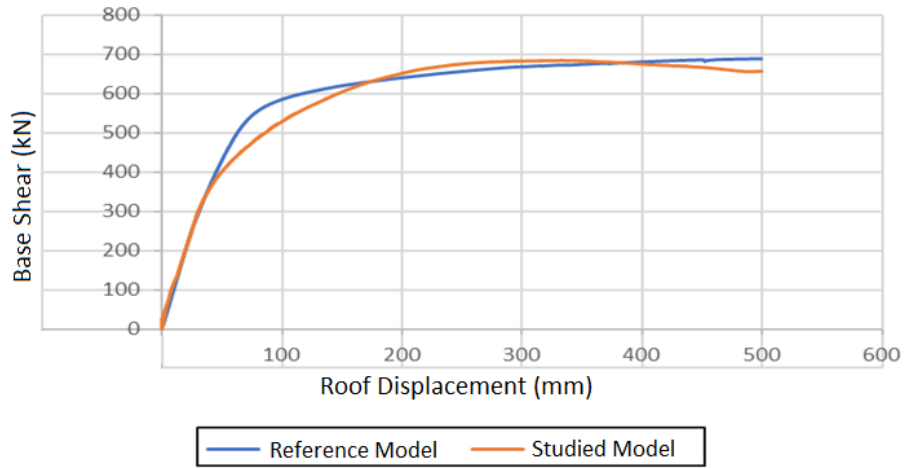
شکل ۵. مدل مورد استفاده در مطالعه Bai و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۸].

Fig. 5. The used model in Bai et al [18].



شکل ۶. منحنی پوش اور مدل مطالعه Bai و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۸].

Fig. 6. Pushover curve of the studied model by Bai et al [18].



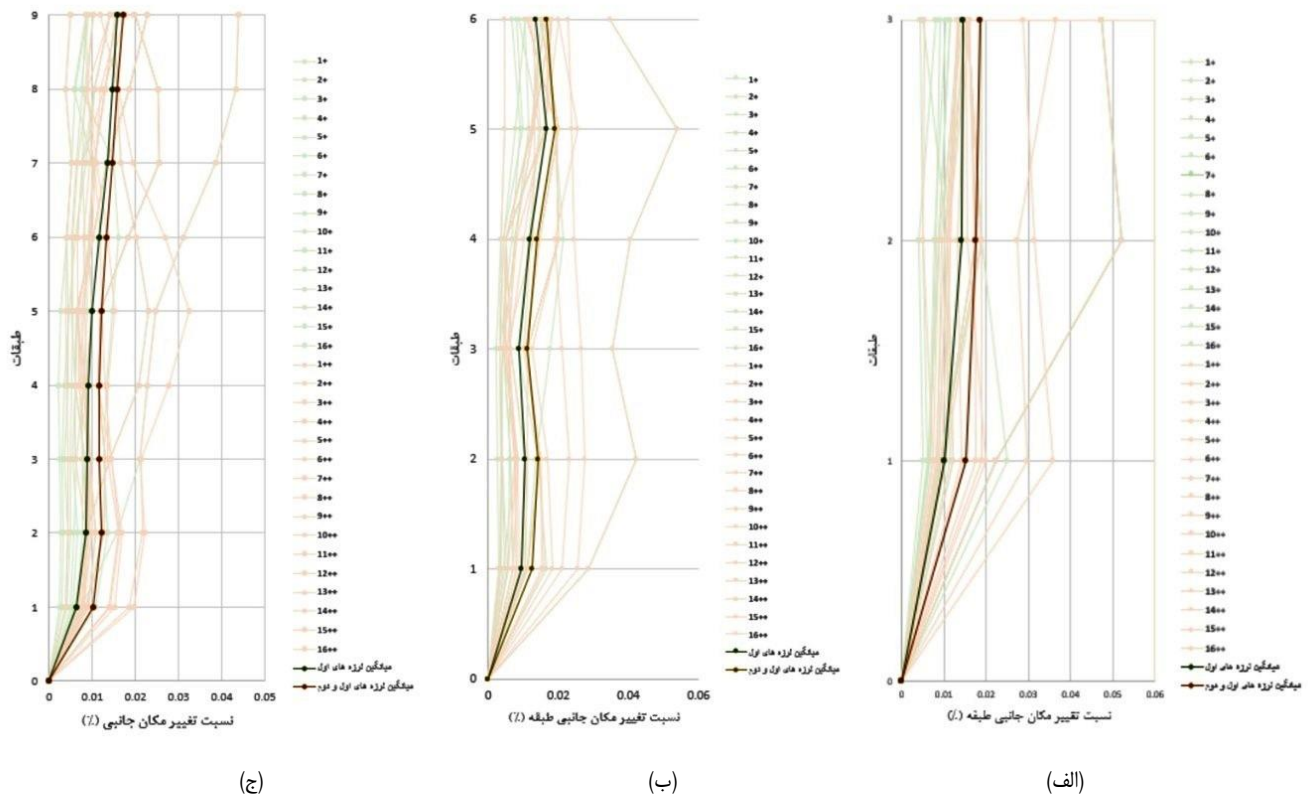
شکل ۷. منحنی پوش اور مدل مرجع و مدل پیاده سازی شده.

Fig. 7. Pushover curve of the reference and studied model.

جدول ۳. سناریوهای لرزه‌ای مورد استفاده در این مطالعه [۱۹].

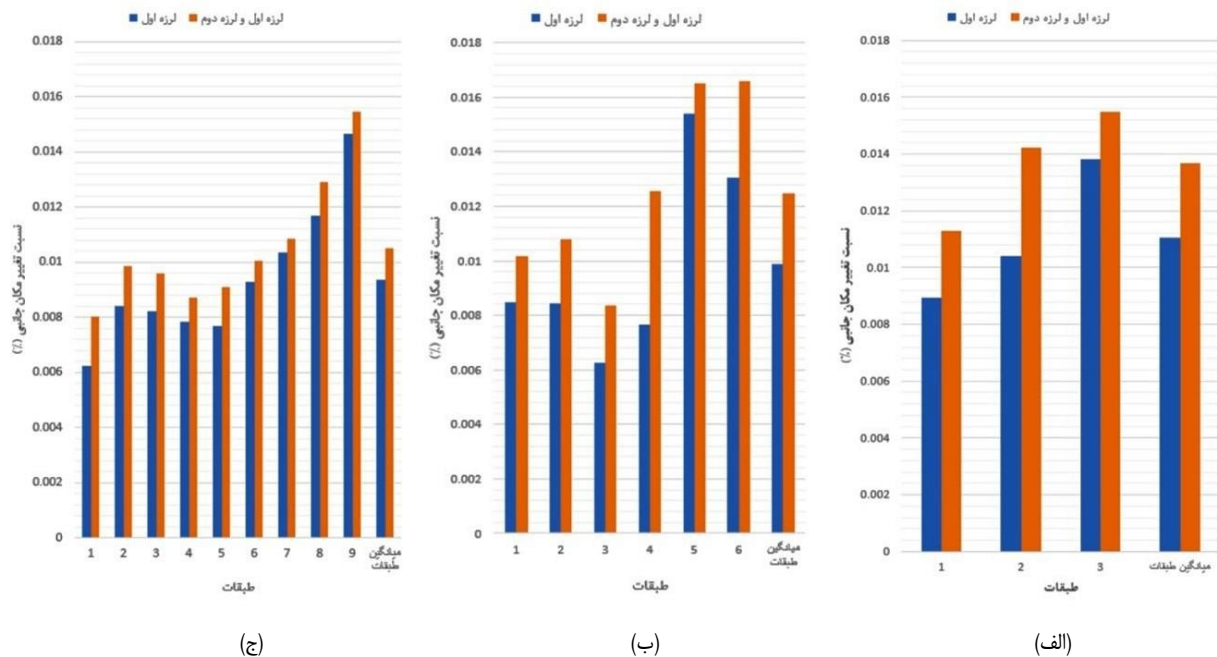
Table 3. Seismic scenarios based on [19].

شماره	نام زلزله	سال وقوع	EPA (g)	PGA (g)	ایستگاه ثبت زلزله
۱	Chalfant Valley3	1986	0.2451	0.2382	CDMG 54428 Zack Brothers Ranch
		1986	0.4854	0.4246	
۲	Coalinga	1983	0.0993	0.1539	CDMG 46617 Coalinga-14th & Elm (Old CHP)
		1983	0.3513	0.5813	
۳	Mammoth4	1980	0.1722	0.2178	USC 37 USC McGee Creek Inn
		1980	0.2726	0.3689	
۴	Mammoth5	1980	0.2726	0.3289	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		1980	0.4287	0.6293	
۵	Mammoth6	1980	0.1117	0.0926	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		1980	0.4287	0.6293	
۶	Chalfant Valley9	1986	0.088	0.1105	CDMG 54171 Bishop - LADWP South St
		1986	0.2197	0.2058	
۷	Livermore	1980	0.1066	0.086	CDMG 57187 San Ramon - Eastman Kodak
		1980	0.1917	0.2119	
۸	Mammoth1	1980	0.2387	0.2818	CDMG 54301 Mammoth Lakes H. S.
		1980	0.4091	0.4143	
۹	Mammoth7	1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
		1980	0.2618	0.4156	
۱۰	Mammoth9	1980	0.1563	0.1669	CDMG 54099 Convict Creek
		1980	0.1563	0.3169	
۱۱	Mammoth10	1980	0.2041	0.2172	CDMG 54099 Convict Creek
		1980	0.2618	0.4156	
۱۲	Mammoth12	1980	0.2041	0.2172	CDMG 54099 Convict Creek
		1980	0.2207	0.3169	
۱۳	Mammoth15	1980	0.0912	0.1234	CDMG 54099 Convict Creek
		1980	0.2207	0.3169	
۱۴	Mammoth17	1980	0.2635	0.3403	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		1980	0.2726	0.3289	
۱۵	Mammoth20	1980	0.2635	0.3403	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		1980	0.4287	0.6293	
۱۶	Mammoth22	1980	0.0884	0.1369	CDMG 54214 Long Valley Dam (Upr L Abut)
		1980	0.2726	0.3289	



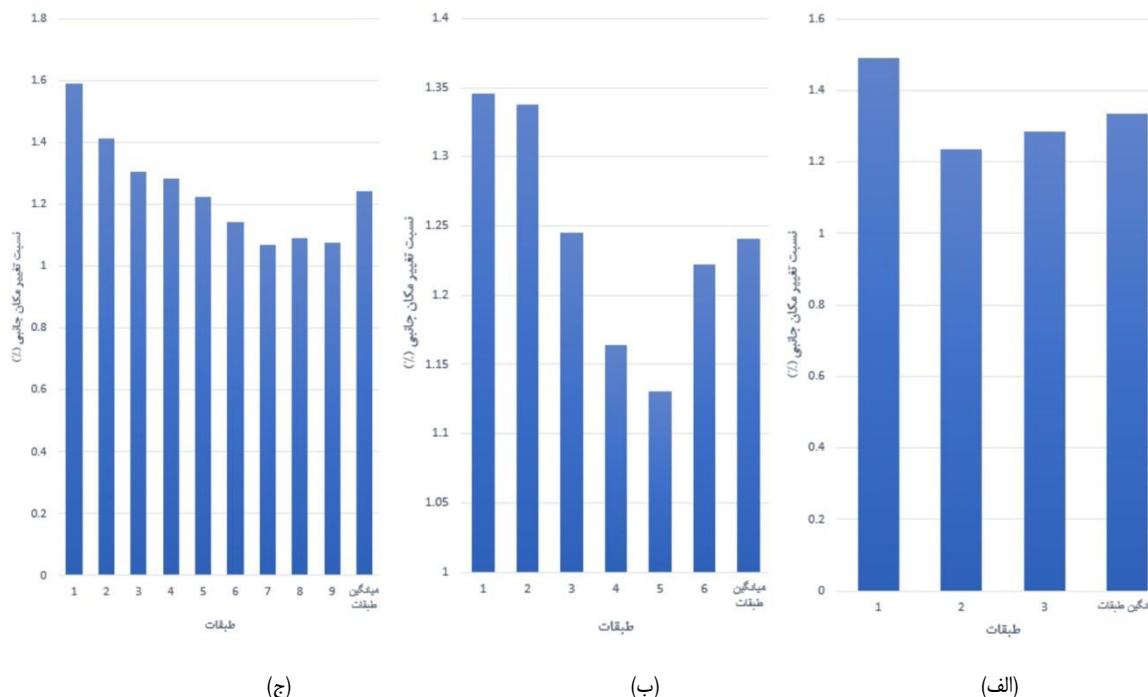
شکل ۸. تغییر مکان جانبی نسبی طبقه تقسیم بر ارتفاع در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه.

Fig. 8. Drift ratio for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



شکل ۹. میانگین بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه.

Fig. 9. Average of the maximum drift ratio for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



شکل ۱۰. نسبت تغییر مکان نسبی برای حالت متوالی به منفرد در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه

Fig. 10. Ratio of drift under successive shocks to single shock for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.

۴-۲- نسبت جابه‌جایی پسماند

کمانش‌تاب هر قاب تحت کلیه سناریوهای لرزه‌ای معرفی شده در جدول (۳) بر کرنش تسلیم‌شونده مهاربند کمانش‌تاب تقسیم شده است. تأثیر زلزله‌های متوالی به زلزله‌های منفرد بر پارامتر شکل‌پذیری برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه صعودی بود. همچنین میزان افزایش میانگین کل (در حالت متوالی به منفرد) برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه (شکل ۱۳) به ترتیب ۲۴، ۲۰ و ۵۱٪ محاسبه شده است.

یادآور می‌گردد جابه‌جایی پسماند نشان‌دهنده آسیب دائمی سازه پس از بارگذاری است، در حالی که شکل‌پذیری بیانگر توانایی سازه در تحمل تغییر شکل‌های بزرگ و جذب انرژی بدون شکست ناگهانی می‌باشد.

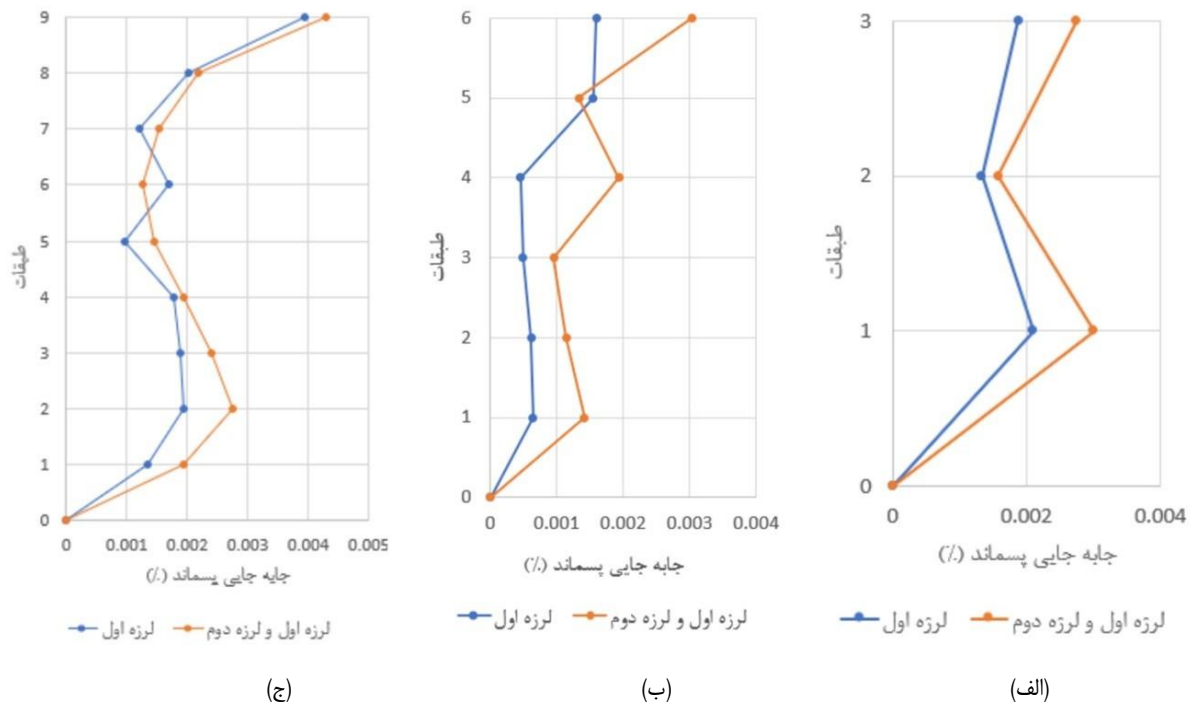
۴-۴- شاخص خسارت

برای به دست آوردن شاخص خسارت از معیار شاخص خسارت پارک-انگ در سال ۱۹۸۵ [۲۲] مطابق رابطه (۱) استفاده شده است. ضرایب شاخص خسارت نیز از مطالعه هویدایی سال ۲۰۲۰ [۶] و آیین‌نامه ASCE41 سال ۲۰۱۷ [۲۳] انتخاب شده است.

جابه‌جایی‌های پسماند ناشی از زلزله‌های متوالی تقریباً در تمام حالات نسبت به لرزه‌های منفرد بیشتر بوده است. بیشینه این مقادیر برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه مطابق شکل (۱۱) به ترتیب ۱۶، ۲۴ و ۲۲ درصد بود. همچنین میزان افزایش مقدار میانگین کل (نسبت نتایج در حالت متوالی به منفرد) در قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه به ترتیب ۴۲، ۹۱ و ۹ درصد مشاهده شده است. جابه‌جایی پسماند بام تحت لرزه‌های متوالی به لرزه منفرد جز در موارد معدود همواره بیشتر بوده است به گونه‌ای که بیشینه مقادیر آن برای قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه به ترتیب ۳۰، ۲۲ و ۲۸ درصد بود. همچنین میزان افزایش مقدار میانگین کل در معرض لرزه‌های متوالی در مقایسه با لرزه منفرد مطابق شکل (۱۲) به ترتیب ۴، ۱۷ و ۱۲ درصد محاسبه شده است.

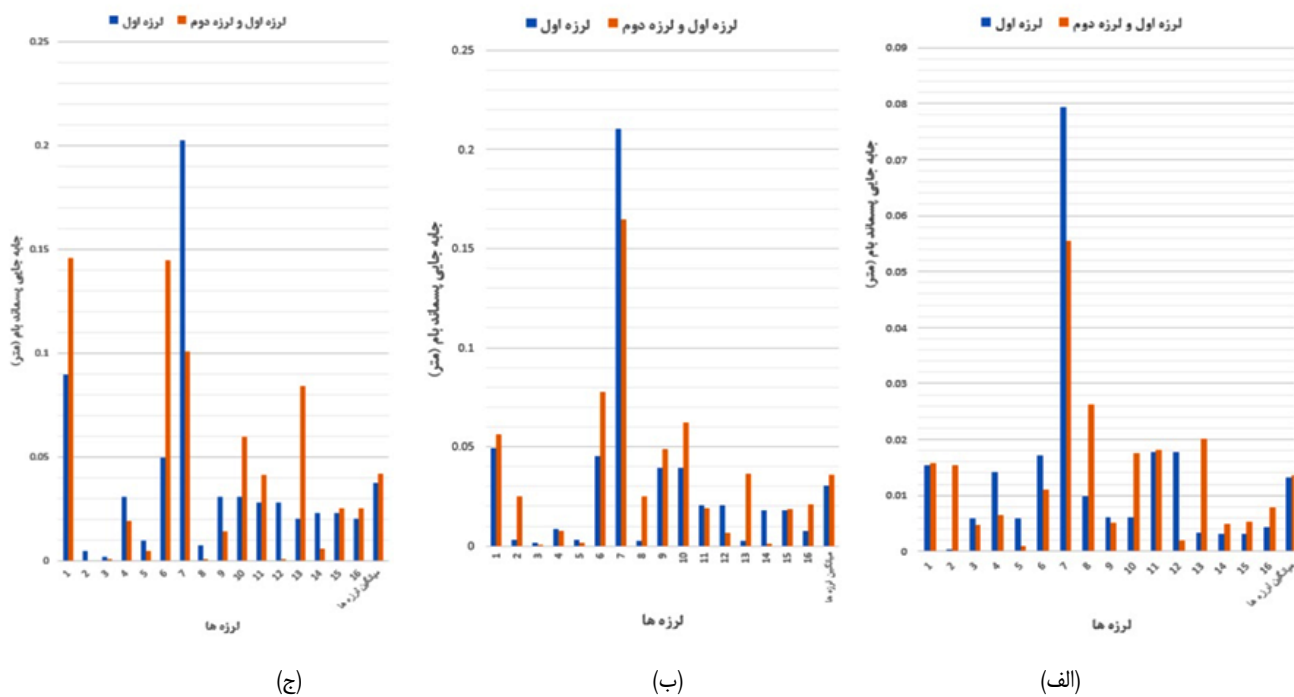
۴-۳- شکل‌پذیری

به‌منظور محاسبه شکل‌پذیری بیشینه، از معیار کرنش مهاربندهای کمانش‌تاب استفاده شده است بدین منظور کرنش تمام مهاربندهای



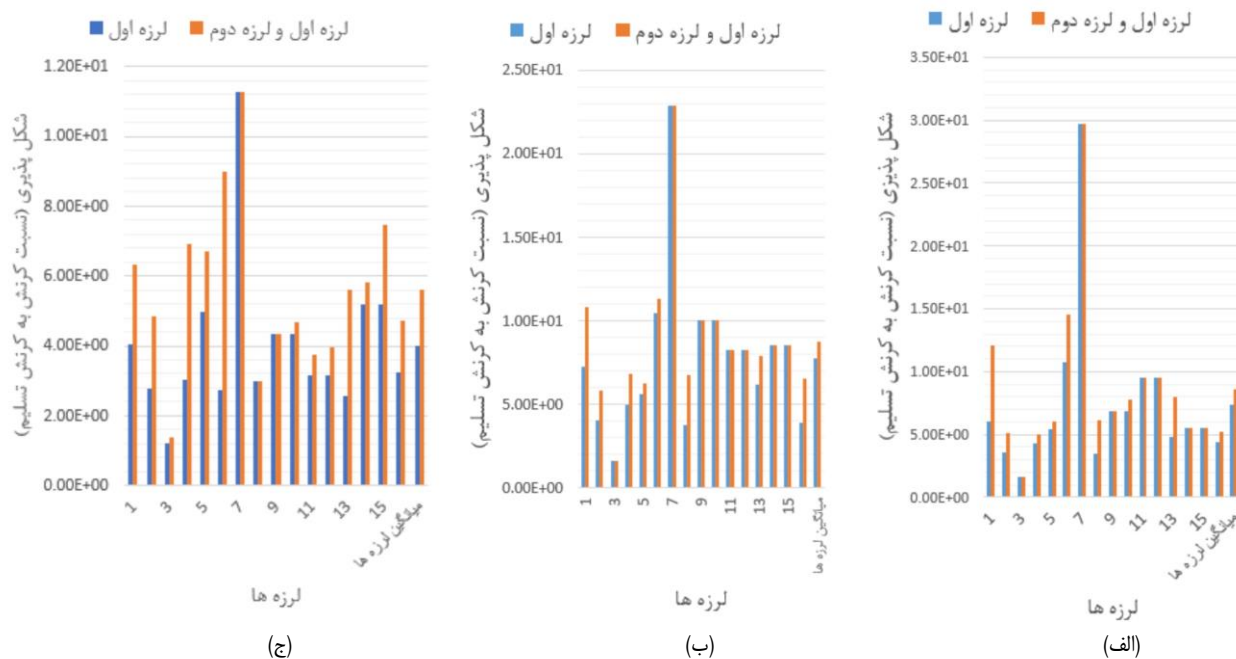
شکل ۱۱. نسبت جابه جایی نسبی پسماند به ارتفاع طبقات در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه

Fig. 11. Residual drift ratio for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



شکل ۱۲. جابه جایی پسماند بام در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه.

Fig. 12. Residual drift of roof for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



شکل ۱۳. شکل پذیری در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه.

Fig. 13. Ductility for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.

همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، نسبت شاخص خسارت ناشی از لرزه های متوالی به لرزه منفرد در طبقه اول قاب ۳ طبقه ۲۰۱ درصد، طبقه چهارم قاب ۶ طبقه ۹۳ درصد و طبقه سوم قاب ۹ طبقه ۹۱ درصد بود که با اضافه شدن یک لرزه به سناریوی تحریک، خسارت افزایش بیشتری داشته است. مطابق شکل (۱۵)، درصد افزایش شاخص خسارت میانگین لرزه های متوالی در مقایسه با میانگین لرزه های منفرد قاب های ۳، ۶ و ۹ به ترتیب ۷۳، ۱۲۲ و ۸۹ درصد بوده است. در ادامه شاخص خسارت ناشی از لرزه های متوالی به لرزه های منفرد در شکل (۱۶) نشان داده شده است و بیشترین افزایش در حالت متوالی به منفرد در قاب ۶ طبقه رخ داده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل های آماری و نمودارهای مقایسه ای بین قاب های سه، شش و نه طبقه، مشاهده می شود که روند تغییرات پارامترهای لرزه ای از جمله شکل پذیری، جابه جایی پسماند و شاخص خسارت تابع مستقیم ارتفاع سازه و آرایش مهاربندهای کمانش تاب است. افزایش تعداد طبقات موجب توزیع یکنواخت تر تغییر شکل ها و کاهش تمرکز کرنش در طبقات میانی شده است. این امر از دیدگاه فیزیکی ناشی از افزایش سختی مؤثر و سهم بیشتر طبقات پایین در جذب انرژی لرزه ای است.

$$DI = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{\delta_u P_y} \int dE_h \quad (1)$$

که δ_m حداکثر تغییر مکان محوری داخلی، δ_u ظرفیت تغییر شکل نهایی تحت بارگذاری استاتیکی، β ضریب اثر بارگذاری چرخه ای، P_y نیروی تسلیم محاسبه شده و dE_h انرژی هیستریتیک جذب شده افزایشی است. در ادامه در جداول (۴) الی (۶) شاخص خسارت تمام طبقات برای قاب های ۳، ۶ و ۹ طبقه مطابق رابطه (۲) که براساس مطالعه هویدایی و همکاران سال ۲۰۲۰ [۶] تجمیع و گزارش شده، ارائه شده است.

$$DI_G = \frac{\sum_{i=1}^m DI_i^2}{\sum_{i=1}^m DI_i} \quad (2)$$

در این رابطه DI_G شاخص آسیب کلی و DI_i شاخص آسیب محلی عضو i می باشد.

جدول ۴. مقادیر شاخص خسارت در طبقات برای قاب ۳ طبقه.

Table 4. Damage index for 3-story frame.

نسبت متوالی به منفرد	میانۀ شاخص خسارت ۱۶ زلزله		سطح مقطع مهاربند (مترمربع)	طول مهاربند (متر)	تعداد مهاربندها	طبقه
	لرزه اول و لرزه دوم	لرزه اول				
۱	0.2593	0.2593	0.0035	3.51	1	
	0.1854	1.03E-01	0.0035	3.51	2	
	1.66E-01	7.22E-02	0.0035	3.51	3	
	3.12E-01	1.62E-01	0.0035	3.51	4	
۲	5.77E-01	4.79E-01	0.004	3.51	1	
	6.06E-01	6.16E-01	0.004	3.51	2	
۳	7.03E-01	6.54E-01	0.0035	3.51	1	
	7.28E-01	7.61E-01	0.0035	3.51	2	

جدول ۵. مقادیر شاخص خسارت در طبقات برای قاب ۶ طبقه.

Table 5. Damage index for 6-story frame.

نسبت متوالی به منفرد	میانۀ شاخص خسارت ۱۶ زلزله		سطح مقطع مهاربند(مترمربع)	طول مهاربند(متر)	تعداد مهاربندها	طبقه
	لرزه اول و لرزه دوم	لرزه اول				
۱	3.30E-01	3.56E-01	0.0035	3.51	1	
	2.62E-01	2.42E-01	0.0035	3.51	2	
	2.57E-01	2.53E-01	0.0035	3.51	3	
	3.65E-01	3.26E-01	0.0035	3.51	4	
۲	4.03E-01	4.13E-01	0.0035	3.51	1	
	3.48E-01	3.00E-01	0.0035	3.51	2	
	3.82E-01	3.74E-01	0.0035	3.51	3	
	3.93E-01	3.71E-01	0.0035	3.51	4	
۳	5.85E-02	4.82E-02	0.0035	3.51	1	
	5.52E-02	4.74E-02	0.0035	3.51	2	
	8.63E-02	6.18E-02	0.0035	3.51	3	
	1.01E-01	6.76E-02	0.0035	3.51	4	
۴	3.05E-01	1.43E-01	0.004	3.51	1	
	2.38E-01	1.38E-01	0.004	3.51	2	
۵	9.07E-01	8.74E-01	0.0035	3.51	1	
	1.02E+00	1.04E+00	0.0035	3.51	2	
۶	8.33E-01	6.20E-01	0.0035	3.51	1	
	8.24E-01	5.67E-01	0.0035	3.51	2	

جدول ۶. مقادیر شاخص خسارت در طبقات برای قاب ۹ طبقه.

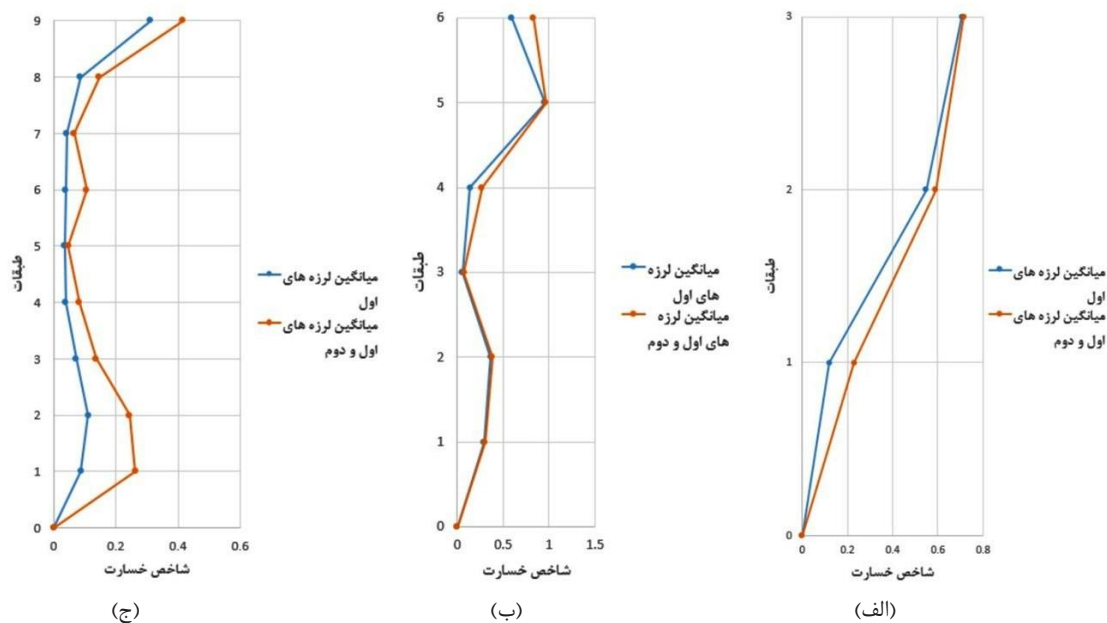
Table 6. Damage index for 9-story frame.

نسبت متوالی به منفرد	میانۀ شاخص خسارت ۱۶ زلزله		سطح مقطع مهاربند (مترمربع)	طول مهاربند(متر)	تعداد مهاربندها	طبقه
	لرزه اول و لرزه دوم	لرزه اول				
۱	1.75E+00	2.74E-01	0.0035	3.51	1	
	4.45E+00	2.29E-01	0.0035	3.51	2	
	1.99E+00	1.54E-01	0.0035	3.51	3	
	6.27E+00	3.94E-01	0.0035	3.51	4	
۲	1.39E+00	2.74E-01	0.0035	3.51	1	
	4.28E+00	2.57E-01	0.0035	3.51	2	
	1.82E+00	2.40E-01	0.0035	3.51	3	
	3.61E+00	2.02E-01	0.0035	3.51	4	
۳	1.36E+00	1.22E-01	0.0035	3.51	1	
	2.52E+00	1.32E-01	0.0035	3.51	2	
	2.01E+00	2.00E-01	0.0035	3.51	3	
	1.95E+00	9.36E-02	0.0035	3.51	4	
۴	1.47E+00	5.12E-02	0.004	3.51	1	
	1.61E+00	5.98E-02	0.004	3.51	2	
	2.88E+00	1.37E-01	0.004	3.51	3	
	2.17E+00	8.49E-02	0.004	3.51	4	
۵	1.34E+00	4.60E-02	0.004	3.51	1	
	1.30E+00	4.85E-02	0.004	3.51	2	
۶	2.36E+00	9.62E-02	0.0035	3.51	1	
	3.10E+00	1.17E-01	0.0035	3.51	2	
۷	1.76E+00	7.42E-02	0.0035	3.51	1	
	1.38E+00	5.72E-02	0.0035	3.51	2	
۸	1.49E+00	1.17E-01	0.0025	3.51	1	
	1.85E+00	1.75E-01	0.0025	3.51	2	
۹	1.19E+00	3.60E-01	0.001	3.51	1	
	1.47E+00	4.73E-01	0.001	3.51	2	

۴-۵- حلقه‌های هیستریزیس

به منظور نمایش حلقه‌های هیستریزیس مهاربندهای کمانش‌تاب، نام‌گذاری آن‌ها در قاب‌ها در شکل (۱۷) نشان داده شده است. تغییرات تنش و کرنش در مهاربندهای کمانش‌تاب در معرض لرزه‌های متوالی و لرزه‌های منفرد در قالب حلقه‌های هیستریزیس در شکل‌های (۱۸) الی (۲۰) نمایش داده شده است. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی نتایج و تطبیق معیارهای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای با آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی، سه شاخص شکل‌پذیری، جابه‌جایی پسماند و شاخص خسارت بر اساس ضوابط استانداردهای FEMA 356 (۲۰۰۰) و ASCE 41-17 (۲۰۱۷) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این منابع، نسبت

در مقابل، در قاب‌های کوتاه‌تر به دلیل نسبت سختی به جرم کمتر و حضور محدود مهاربندها در طبقات فوقانی، تغییر مکان نسبی و کرنش مهاربندها بیشتر بوده و انرژی اتلافی عمدتاً در طبقات پایینی متمرکز شده است. این موضوع با افزایش میانگین شکل‌پذیری و جابه‌جایی پسماند در قاب سه‌طبقه نسبت به قاب‌های بلندتر همخوانی دارد. از سوی دیگر، کاهش تدریجی شاخص خسارت در قاب‌های بلندتر نشان‌دهنده توزیع مناسب‌تر نیروهای جانبی و عملکرد هم‌زمان سیستم‌های باربر جانبی است. بنابراین، نتایج آماری نشان می‌دهند که توزیع مناسب مهاربندها در ارتفاع سازه می‌تواند موجب بهبود رفتار غیرخطی و کاهش آسیب تجمعی ناشی از زلزله‌های متوالی گردد.



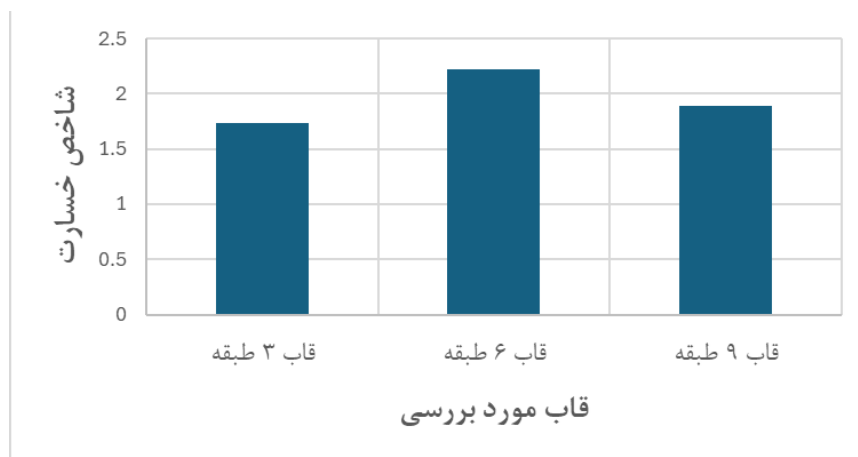
شکل ۱۴. توزیع میانگین شاخص خسارت در طبقات قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه

Fig. 14. Distribution of the average of damage index for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



شکل ۱۵. شاخص خسارت کل قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه.

Fig. 15. Damage index for the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



شکل ۱۶. نسبت شاخص خسارت ناشی از لرزه‌های متوالی به منفرد.

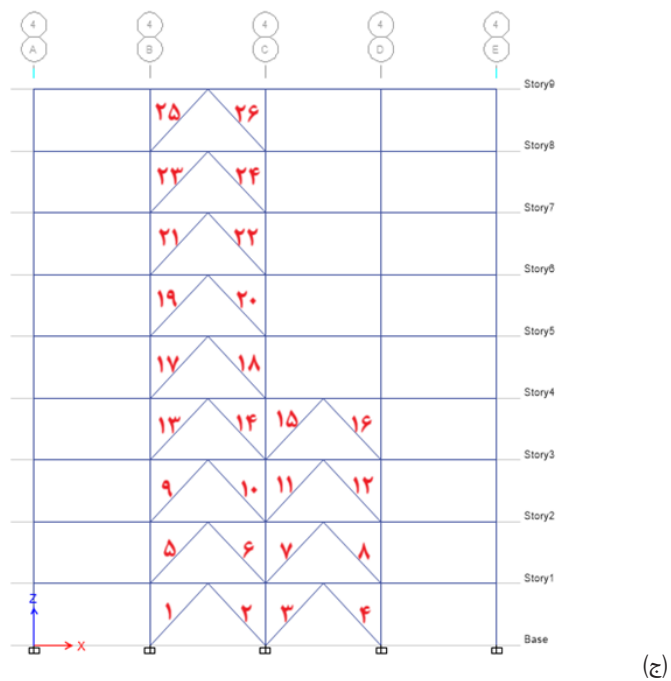
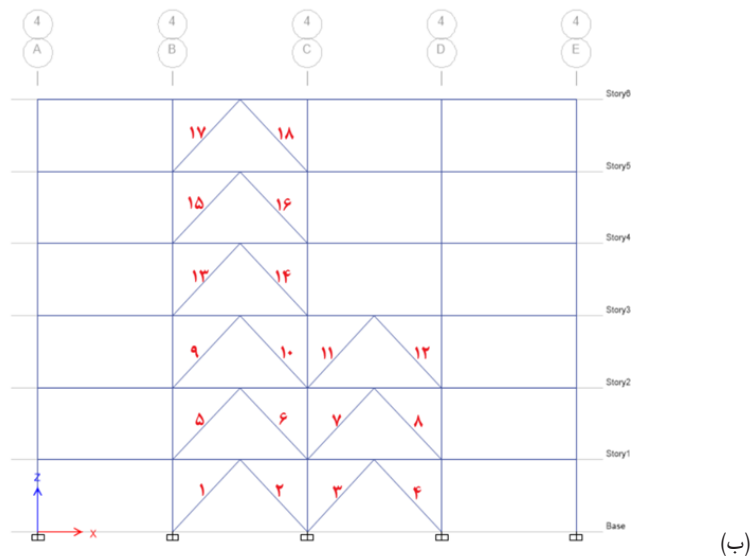
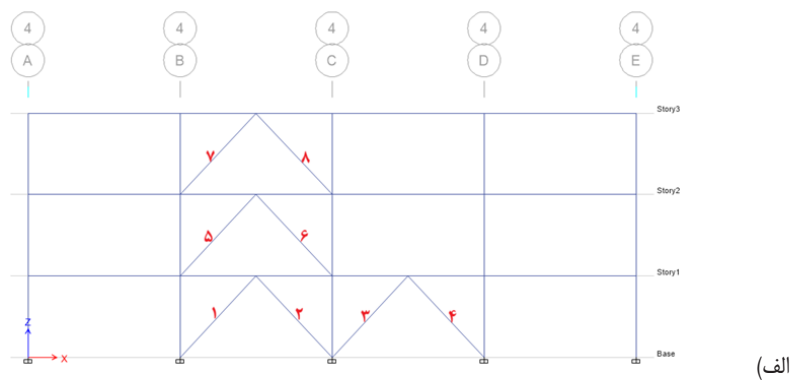
Fig. 16. Ratio of damage index caused by successive shocks to single shock.

مورد مطالعه اثرگذار است. چرا که لرزه منفرد هیچگاه نمی‌تواند نماینده مناسبی از زلزله‌های متوالی باشد. در این میان به عنوان راهکار مقابله با عدم پایداری و پیشرفت خسارات سازه‌ای، استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب در قاب‌های بتن‌آرمه نامنظم باعث بهبود محسوس عملکرد لرزه‌ای سازه در برابر زلزله‌های منفرد و متوالی شد. از دیدگاه علی-فیزیکی، افزایش شکل‌پذیری در طبقات فوقانی ناشی از توزیع غیریکنواخت سختی و کاهش تعداد مهاربندها در این طبقات است. در نتیجه، تغییر شکل‌های غیرالاستیک بیشتری در اعضای قاب ایجاد شده و ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد. در مقابل، در طبقات پایینی به دلیل حضور تعداد بیشتر مهاربندها و افزایش سهم سختی جانبی، رفتار سازه صلب‌تر بوده و شکل‌پذیری کمتری مشاهده شده است. افزایش جابه‌جایی پسماند در قاب‌های کوتاه‌تر نیز به دلیل تمرکز کرنش‌های پلاستیک در تعداد محدودتری از طبقات و ضعف در توزیع یکنواخت انرژی اتلافی است. همچنین کاهش شاخص خسارت در قاب‌های مرتفع بیانگر بهبود توزیع نیروهای جانبی و مشارکت مؤثرتر مهاربندها در جذب انرژی لرزه‌ای می‌باشد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که طراحی بهینه توزیع مهاربندهای کمانش‌تاب در سازه‌های نامنظم نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل تغییر مکان‌های ماندگار، افزایش شکل‌پذیری کلی و جلوگیری از تمرکز آسیب در طبقات خاص و در نهایت دستیابی به سازه ایمن‌تر دارد.

شکل‌پذیری به‌عنوان شاخص توانایی سازه در تحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک بدون فروپاشی تعریف می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده در قاب‌های مورد بررسی عمدتاً در محدوده‌ی عملکرد ایمنی جانی قرار دارند. همچنین، مطابق با آیین‌نامه ASCE 41-17، مقدار مجاز جابه‌جایی پسماند برای سطوح عملکرد بهره‌برداری بی‌وقفه و ایمنی جانی به ترتیب ۱ و ۲ درصد ارتفاع طبقه است؛ در این مطالعه میزان جابه‌جایی پسماند مدل‌ها کمتر از حدود یاد شده بوده و بیانگر پایداری مناسب سازه پس از وقوع زلزله‌های متوالی است. افزون بر این، شاخص خسارت بر مبنای مدل پارک و انگ (۱۹۸۵) محاسبه و با حدود پیشنهادی FEMA 356 مقایسه شد. بر اساس این معیار، مقادیر کمتر از ۰/۲ معرف عملکرد بهره‌برداری بی‌وقفه، بین ۰/۲ تا ۰/۴ بیانگر ایمنی جانی و بیش از ۰/۴ نشان‌دهنده‌ی آستانه فروریزش است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میانگین شاخص خسارت قاب‌های سه، شش و نه طبقه در محدوده‌ی عملکرد ایمنی جانی قرار داشته و سازه‌ها از نظر ظرفیت تغییر شکل، جذب انرژی و پایداری کلی با الزامات آیین‌نامه‌ای تطابق مطلوبی دارند.

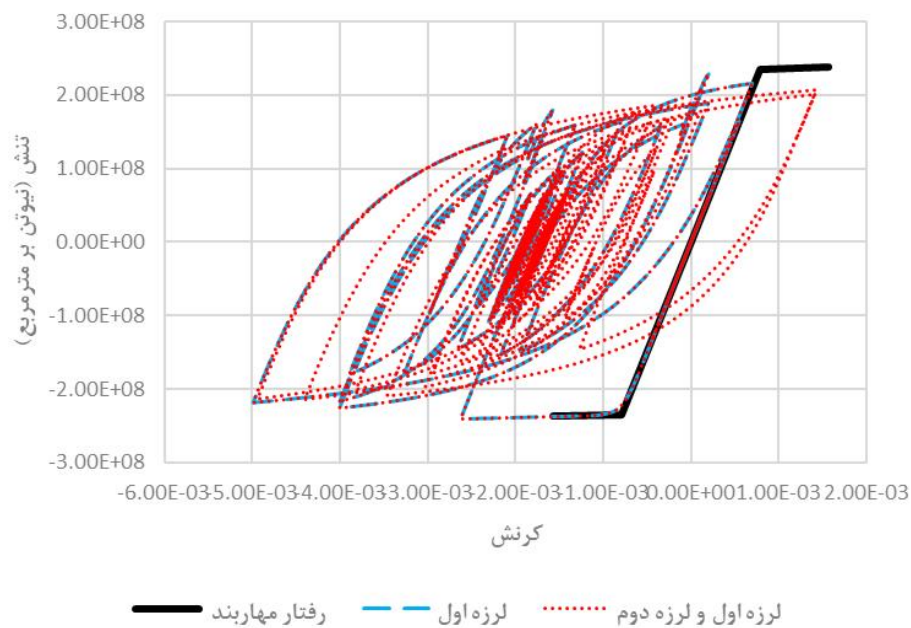
۵- نتیجه گیری

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان داد که صرفنظر نمودن وقوع لرزه‌های متوالی به شدت بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های



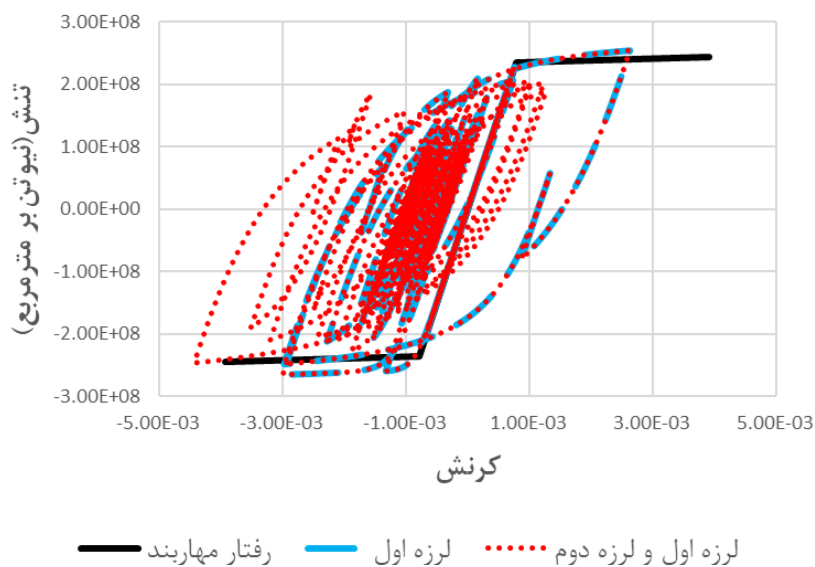
شکل ۱۷. شماره گذاری مهاربندهای کمانش تاب در قاب (الف) ۳ طبقه، (ب) ۶ طبقه و (ج) ۹ طبقه

Fig. 17. BRBs ID in the studied models (a) 3-story, (b) 6-story and (c) 9-story.



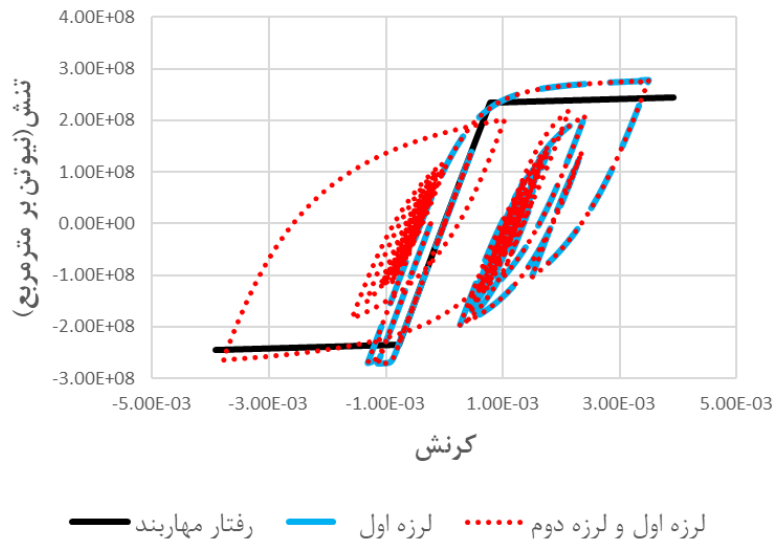
شکل ۱۸. حلقه هیستریزیس مهاربند شماره ۵ از قاب ۳ طبقه تحت زلزله Mammoth5 در سال (۱۹۸۰).

Fig. 18. Hysteresis loops for BRB with ID=5 in 3-storyframe under Mammoth5 earthquake (1980).



شکل ۱۹. حلقه هیستریزیس مهاربند شماره ۵ از قاب ۶ طبقه تحت زلزله Mammoth17 در سال (۱۹۸۰).

Fig. 19. Hysteresis loops for BRB with ID=5 in 6-storyframe under Mammoth17 earthquake (1980).



شکل ۲۰. حلقه هیستریزیس مهاربند شماره ۱ از قاب ۹ طبقه تحت زلزله Livermore سال (۱۹۸۰).

Fig. 20. Hysteresis loops for BRB with ID=1 in 9-story frame under Livermore earthquake (1980).

منابع

- of the 9th International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering (ICCSTE 2024) (pp. 1-6). University of Toronto Press.
- [5] Vaziri, S. J., Vahdani, R., & Souri, O. (2024). Seismic evaluation of BRBF steel structures with L-shaped irregular plan considering soil-structure interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22: 5347–5377. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01963-4>
- [6] Hoveidae, N., & Radpour, S. (2021). Performance evaluation of buckling-restrained braced frames under repeated earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(1): 241–262. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00983-0>
- [7] Wang, F., Shi, Q. X., & Wang, P. (2021, April). Seismic behaviour of reinforced concrete frame structures with all steel assembled Q195 low yield buckling restrained braces. *Structures*, 30: 756–773. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.051>
- [8] Li, B., Wang, J., Duan, M., Guo, L., & Wang, B. (2021). Cyclic experimental and numerical analytical
- [1] Maulana, T. I., & Syamsi, M. I. (2023). Seismic performance improvement of reinforced concrete frame with vertical irregularity using buckling-restrained braces. *AIP Conference Proceedings*, 2846(1). AIP Publishing.
- [2] Ghamari, M., Shoostari, M., & Naeimi, S. (2022). Fragility Curves in Regular and Irregular Steel Structures Equipped with Buckling Restrained Braces. *4th International Conference on Steel & Structure*, 14-15 December 2022, Olympic Hotel, Tehran, Iran.
- [3] Niyonyungu, F., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). Application of buckling restrained braces to upgrade vertical stiffness of existing RC frames. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 68-93. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0034>
- [4] Orellana, G. M., Ramos, B. C., Velásquez, F., Casas Rius, J. R., & Delgadillo, R. M. (2024). Spectral Dynamic Analysis of Buckling Restrained Brace (BRB) Configurations in an Irregular Building. In *Proceedings*

- performance-based plastic design method. *Structures*, 43: 338-350. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.032>
- [16] Farahani, S., & Akhaveissy, A. H. (2022). Direct displacement-based seismic design of buckling-restrained braced RC frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(3): 1767-1839. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01290-y>
- [17] Chen, H., & Bai, J. (2022). Loading protocols for seismic performance evaluation of buckling-restrained braces in RC frames. *Journal of Building Engineering*, 45: 103522. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103522>
- [18] Bai, J., Chen, H., & Jin, S. (2021). Investigation on the interaction between BRBs and the RC frame in BRB-RCF systems. *Engineering Structures*, 243: 112685. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112685>
- [19] Rajabi, E., & Ghodrati Amiri, G. (2020). Generation of critical aftershocks using stochastic neural networks and wavelet packet transform. *Journal of Vibration and Control*, 26(5-6): 331-351. <https://doi.org/10.1177/1077546319879536>
- [20] Amiri, G. G., & Dana, F. M. (2005). Introduction of the most suitable parameter for selection of critical earthquake. *Computers & structures*, 83(8-9): 613-626. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.10.010>
- [21] Abdollahzadeh, G., Mohammadgholipour, A., & Omranian, E. (2019). Seismic evaluation of steel moment frames under Mainshock-aftershock sequence designed by elastic design and PBPD methods. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(10): 1605-1628. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1387198>
- [22] Park, Y. J., Ang, A. H. S., & Wen, Y. K. (1985). Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, 111(4): 740-757. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(740\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(740))
- [23] American Society of Civil Engineers. (2017). ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, seismic evaluation and retrofit of existing buildings.
- investigation of precast concrete frames with buckling-restrained braces considering various assembling connections. *Structures*, 34: 1135-1153. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.022>
- [9] Bai, J., Chen, H., Zhao, J., Liu, M., & Jin, S. (2021). Seismic design and subassembly tests of buckling-restrained braced RC frames with shear connector gusset connections. *Engineering Structures*, 234: 112018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112018>
- [10] Zhao, J., Zhang, J., Song, J., Zhou, Y., Bai, J., & Yu, H. (2023). Sliding gusset connections for improved seismic performance of BRB-RC frame: Damage-control design and subassembly tests. *Engineering Structures*, 282: 115828. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115828>
- [11] Zhao, J., Zhang, J., Song, J., Zhou, Y., Bai, J., & Yu, H. (2023). Sliding gusset connections for improved seismic performance of BRB-RC frame: Damage-control design and sub-assembly tests. *Engineering Structures*, 282: 115828. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115828>
- [12] Kong, S., Shi, F., Zhou, Y., Ma, Y., & Xie, L. (2022). Influence of BRBs deformation capacity on the seismic performance of RC building frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161: 107442. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107442>
- [13] Velasco, L., Hospitaler, A., & Guerrero, H. (2022). Optimal design of the seismic retrofitting of reinforced concrete framed structures using BRBs. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(10): 5135-5160. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01394-z>
- [14] Bai, J., Chen, H., Jin, S., & You, T. (2022). Development of dual-parameter loading protocols for buckling-restrained braced RC frames considering variable axial loads. *Engineering Structures*, 262: 114388. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114388>
- [15] Ouyang, X., Zhang, Y., Ou, X., Shi, Y., Liu, S., & Fan, J. (2022). Seismic fragility analysis of buckling-restrained brace-strengthened reinforced concrete frames using a

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fardkakaei, E. Rajabi, *Seismic Performance of Buckling-Restrained Braces in Irregular Reinforced Concrete Buildings under Successive Earthquakes*, Amirkabir J. Civil Eng., 57(9) (2025) 1619-1642.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23788.8216](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23788.8216)

